

BOGDAN DYBAŁA

INTEGRACJA I SPÓJNOŚĆ MODELI
W INŻYNIERII ODWROTNEJ
WYBRANE ASPEKTY TECHNICZNYCH
I MEDYCZNYCH ZASTOSOWAŃ
REVERSE ENGINEERING



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Bogdan Dybała

Integracja i spójność modeli w inżynierii odwrotnej

**Wybrane aspekty
technicznych i medycznych zastosowań
Reverse Engineering**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013

Opiniodawcy
Piotr GENDARZ
Michał WIECZOROWSKI

Opracowanie redakcyjne i korekta
Alina KACZAK

Projekt okładki
Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-796-2

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 759/2013.

Spis treści

Wykaz skrótów i oznaczeń	5
1. Wstęp	7
1.1. Pochodzenie terminu inżynieria odwrotna	9
1.2. Cel badań w inżynierii odwrotnej	10
2. Wymagania w badaniach inżynierii odwrotnej	13
2.1. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów technicznych	13
2.2. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów biomedycznych	27
2.3. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów artystycznych	35
3. Cel pracy	41
4. Metodyka zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej	45
4.1. Analiza potrzeb	50
4.2. Dobór metody digitalizacji 3D	53
4.3. Dobór metody przetwarzania danych pomiarowych	65
4.4. Ocena jakości badania RE	71
4.5. Wnioski	72
5. Techniki pomiaru kształtów 3D	73
5.1. Klasyfikacja technik pomiarowych	73
5.2. Zdolność urządzenia pomiarowego w szacowaniu niepewności pomiaru	75
5.3. Metody niszczące	76
5.4. Metody mechaniczne	78
5.5. Zdalne metody optyczne	81
5.6. Zdalne metody nieoptyczne	85
5.7. Pomiary wielosensorowe	89
5.8. Wnioski	90
6. Przetwarzanie danych 3D	91
6.1. Efekty przekształceń struktur danych 3D	96
6.2. Porównywanie modeli 3D	100
6.3. Modele 3D w postaci chmur punktów	103
6.4. Modele 3D wokselowe	110
6.5. Modele 3D w postaci zestawów konturów	116
6.6. Modele 3D w postaci siatek trójkątów	119
6.7. Modele 3D powierzchniowe	125
6.8. Modele 3D bryłowe	126
6.9. Modele CAD	127
6.10. Wnioski	137
7. Przykłady zastosowania metodyki zapewnienia spójności	139
7.1. Tworzenie modelu obiektu technicznego o kształtach regularnych	139

7.2. Tworzenie modelu obiektu technicznego o kształtach swobodnych	148
7.3. Tworzenie modelu obiektu biomedycznego	152
7.4. Wnioski	157
8. Podsumowanie i perspektywy dalszych badań	159
Literatura	161
Streszczenie w języku angielskim	175

Wykaz skrótów i oznaczeń

AM	– <i>Additive Manufacturing</i> , wytwarzanie generatywne (przyrostowe)
AMF	– <i>Additive Manufacturing [File] Format</i> , format [danych dla] wytwarzania przyrostowego (używany m.in. do opisu siatki trójkątów)
CAD	– <i>Computer Aided Design</i> , komputerowo wspomagane projektowanie konstrukcyjne
CAE	– <i>Computer Aided Engineering</i> , komputerowo wspomagane prace inżynierskie (przede wszystkim obliczenia sprawdzające)
CAM	– <i>Computer Aided Manufacturing</i> , komputerowo wspomagane projektowanie technologiczne (dla urządzeń wytwórczych sterowanych komputerowo)
CAX	– <i>Computer Aided <x></i> , komputerowo wspomagane <x> – zbiór komputerowo wspomaganych działań inżynierskich, w tym CAD, CAE, CAM
CFD	– <i>Computational Fluid Dynamics</i> , komputerowe symulacje przepływów [gazów i cieczy] (jeden z rodzajów analizy w programach CAE)
CNC	– <i>Computer Numerical Control</i> , komputerowe sterowanie cyfrowe [urządzeń wytwórczych]
CT	– <i>Computed Tomography</i> , tomografia komputerowa
DXF	– <i>Drawing Exchange Format</i> , format wymiany rysunków (standard zapisu danych 2D i 3D, w tym modeli w postaci zestawów konturów)
E_{exp}	– oczekiwana niepewność badania w inżynierii odwrotnej
E_{proc}	– złożona rozszerzona niepewność (splot odchylek) łańcucha przekształceń danych 3D
$E_{\text{proc}, i}$	– i -ty składnik rozszerzonej niepewności (odchyłka) przekształceń danych 3D
$e_{\text{proc}, i}$	– i -ty składnik standardowej niepewności (odchyłka) przekształceń danych 3D
FEA	– <i>Finite Element Analysis</i> , analiza metodą elementów skończonych (jeden z rodzajów analizy w programach CAE)
GD&T	– <i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i> , system definiowania i oznaczania w dokumentacji technicznej cech geometrycznych wymiarowych i kształtowych oraz ich odchylek granicznych
IGES	– <i>Initial Graphics Exchange Specification</i> , wstępna specyfikacja wymiany grafiki (standard zapisu danych 3D, w tym powierzchniowych modeli 3D)
k	– współczynnik rozszerzenia, w obliczeniach niepewności
LRE	– LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING, akredytowane laboratorium inżynierii odwrotnej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej
MBS	– <i>Multi-Body Systems</i> , układy wielocłonowe (wielobryłowe lub wielomasowe, przedmiot symulacji kinematycznych jako jednego z rodzajów analizy w programach CAE)
MPE	– <i>Maximum Permissible Error</i> , błąd graniczny dopuszczalny wskazań [urządzenia pomiarowego]
MRI	– <i>Magnetic Resonance Imaging</i> , obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego
NURBS	– <i>Non-Uniform Rational B-Spline</i> , niejednorodne ilorazowe krzywe bazowe sklejane (popularna w programach CAD parametryczna reprezentacja elementów powierzchniowych)

- PLY – *PoLYgon file format*, format pliku [dla opisu] wielokątów (używany także do opisu siatki trójkątów)
- RE – *Reverse Engineering*, inżynieria odwrotna
- STEP – *Standard for Exchange of Product Model Data*, standard wymiany danych o modelu produktu (w tym danych 3D – modeli powierzchniowych i bryłowych)
- STL – *STereoLithography [format]*, [format dla] stereolitografii lub *Standard Triangulation Language*, standardowy język triangulacji (format do opisu siatki trójkątów)
- U – [złożona] rozszerzona niepewność pomiaru
- u – [złożona] standardowa niepewność pomiaru
- u_i – i -ty składnik standardowej niepewności pomiaru
- U_{RE} – [złożona] rozszerzona niepewność badania w inżynierii odwrotnej
- u_{RE} – [złożona] standardowa niepewność badania w inżynierii odwrotnej
- VR – *Virtual Reality*, rzeczywistość wirtualna
- VRML – *Virtual Reality Modeling Language*, język modelowania rzeczywistości wirtualnej (służy także do opisu siatki trójkątów)
- X3D – *Extensible 3D*, rozszerzalny [język zapisu danych] 3D (następca VRML)

1. Wstęp

Niniejsza monografia dotyczy przemysłowej **inżynierii odwrotnej** (*Reverse Engineering*) – dziedziny nauk technicznych, w której badania mają na celu utworzenie lub odtworzenie komputerowych reprezentacji obiektów fizycznych.

Działania określane mianem „inżynierii odwrotnej” można zdefiniować tak jak autorzy publikacji [44] – jako „analizę systemu w celu identyfikacji jego elementów składowych i zależności między nimi w celu utworzenia jego reprezentacji w innej postaci lub na innym poziomie abstrakcji”. Taka uogólniona definicja, chociaż opracowana przez informatyków, sprawdza się też w pozostałych zastosowaniach RE – w przemyśle wytwórczym, biologii, medycynie czy ekonomii.

Przedmiotem zainteresowania autora tej monografii jest zastosowanie inżynierii odwrotnej w przemyśle wytwórczym. Cel takich działań, obejmujących badanie i analizę obiektów technicznych, autorzy publikacji [230] wyjaśnili następująco: „Podczas gdy konwencjonalna inżynieria przetwarza inżynierskie koncepcje i modele w prawdziwe części [*real parts*], w inżynierii odwrotnej prawdziwe części są zamieniane na inżynierskie modele i koncepcje”.

Przemysłowa inżynieria odwrotna rozpoczyna się od pomiarów obiektu fizycznego, a na podstawie wyników tych pomiarów tworzony lub odtwarzany jest – w trybie *off-line*, bez konieczności dostępu do badanego obiektu – jego trójwymiarowy model geometryczny. Wynikowy model może mieć zastosowanie w technologiach komputerowo wspomaganego projektowania nowego produktu (CAD), jego obliczeniowej weryfikacji (CAE) i projektowaniu procesów jego wytwarzania (CAM) oraz w analizie przebiegu procesów wytwórczych czy w symulacjach zjawisk fizycznych i mechanicznych z udziałem zmierzonego obiektu.

W niektórych polskich publikacjach naukowych [123, 207, 252, 253] zamiast „inżynierii odwrotnej” stosuje się nazwę „inżynieria rekonstrukcyjna”, a w internecie można spotkać określenie „inżynieria odtwórcza”. Zdaniem autora takie tłumaczenia są zbyt zawężające, bo nie oddają sytuacji, w których komputerowy model 3D jest tworzony po raz pierwszy, gdyż nigdy nie istniał – obiekt mógł być projektowany

w erze przedkomputerowej lub nie jest w ogóle wyrobem przemysłowym¹, a to dla takich są tworzone projekty techniczne.

Niektórzy autorzy, np. w [238], do zadań przemysłowej inżynierii odwrotnej zaliczają także badania materiałowe – rozpoznawanie materiałów (polimerowych, metalowych i in.) oraz sposobów ich przetwarzania prowadzących do uzyskania postaci zidentyfikowanej w badanych obiektach (np. metod zastosowanej obróbki wykończeniowej). Niektórzy też, np. w [102], inżynierię odwrotną rozszerzają o procesy wytwarzania produktów na bazie odtworzonych modeli 3D (np. metodami przyrostowymi lub 5-osiowym frezowaniem). Tak szerokie podejście wykracza jednak poza zainteresowania autora niniejszej pracy.

Pierwsze informacje o zastosowaniu inżynierii odwrotnej w przemyśle pojawiły się już we wczesnych latach 80. XX wieku (np. w [183]), podobnie jak pierwsze wzmianki o urządzeniach pomiarowych – skanerach 3D² (np. w [12]). W Polsce pierwsza publikacja na temat przemysłowej inżynierii odwrotnej (wówczas jeszcze używano angielskiej nazwy dyscypliny) ukazała się w roku 2000 na Politechnice Wrocławskiej [47].

Ta praca była efektem utworzenia w roku 1998 przez profesora Edwarda Chlebusa pierwszego krajowego laboratorium technologii wytwarzania 3D, nazwanego później Laboratorium Szybkiego Rozwoju Produktu (LRPD³). Do dziś jest to najszerzej w Polsce działający ośrodek badawczy w obszarze generatywnych technologii wytwarzania – metod przyrostowego budowania obiektów fizycznych przez dodawanie materiału, bez użycia specjalnego oprzyrządowania (form, matryc), na podstawie ich komputerowych modeli 3D. Z technologiami generatywnymi od początku była związana inżynieria odwrotna, najpewniej dlatego że jest lustrzanym odbiciem procesów przyrostowych: od fizycznego obiektu prowadzi do komputerowego modelu. Wraz z pierwszym urządzeniem przyrostowym na Politechnice Wrocławskiej pojawił się więc pierwszy na polskiej uczelni skaner 3D (laserowy punktowy).

Z LRPD po kilku latach, w miarę rozszerzania się bazy sprzętowej i wzrostu liczby projektów badawczych i przemysłowych związanych z inżynierią odwrotną, wyodrębniło się w 2006 roku LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING pod kierownictwem

¹ Inaczej „produktem” lub „wytworem” – zgodnie z przedstawioną w [81] metodologią projektowania i konstruowania prof. Janusza Dietrycha (tzw. Śląska Szkoła Metodologii).

² „Skaner 3D” to nazwa sprzężonego z komputerem urządzenia pomiarowego do badania trójwymiarowych obiektów fizycznych przez „współrzędnościową” rejestrację ich powierzchni zewnętrznych (a niekiedy także cech geometrycznych wewnętrznych), wykorzystującą ruchy urządzenia lub obiektu. Początkowo skanerami nazywano urządzenia, w których do pomiarów punktów 3D na powierzchni obiektów stosowano promień lasera (omiatający, czyli „skanujący”, obiekt), dziś taka nazwa stosowana jest też m.in. do tomografów komputerowych („skanery CT”), w których obracany obiekt jest „skanowany” wiązką promieni rentgenowskich pochodzącą z nieruchomego źródła.

³ *Laboratory of Rapid Product Development.*

autora niniejszej monografii. W roku 2008 Laboratorium uzyskało certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji na zgodność systemu zarządzania z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 dla laboratoriów badawczych [174] i było pierwszym w Polsce akredytowanym laboratorium inżynierii odwrotnej. Aktualnie w LRE badania prowadzone są z użyciem systemów skanowania laserowego, stykowego, optycznego i jednego z niewielu jeszcze w Polsce tomografów „metrologicznych” [138].

Przemysłowa inżynieria odwrotna jako dyscyplina nauk technicznych łączy elementy mechaniki (budowa maszyn, metrologia wielkości geometrycznych), informatyki (struktury danych, algorytmy), elektroniki (przetwarzanie sygnałów), a nawet optyki i radiologii – jeśli do pomiarów trójwymiarowych cech geometrycznych⁴ stosuje się urządzenia emitujące i rejestrujące promieniowanie świetlne czy rentgenowskie. Niniejsza monografia jest próbą syntezy wybranych zagadnień z tych obszarów.

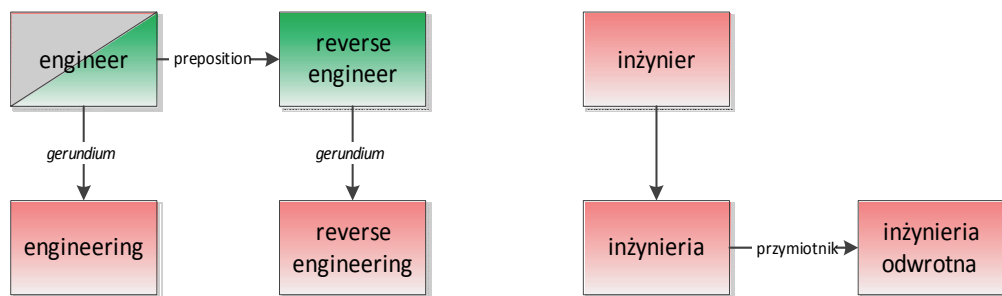
Inżynieria odwrotna należy do nauk stosowanych i szczególnie zainteresowania autora skupiają się przede wszystkim na poszukiwaniu jej **aplikacji** w różnych obszarach działań przemysłowych, w tym też w przemyśle wyrobów medycznych, oraz na możliwie zobiektywizowanej **analizie** jej możliwości i ograniczeń. Taki jest też profil niniejszej pracy.

1.1. Pochodzenie terminu inżynieria odwrotna

Przy pierwszym kontakcie z terminem „inżynieria odwrotna” słuchacz lub czytelnik zazwyczaj go nie rozumie – nazwa sama się nie objaśnia. Problem w prostym przetłumaczeniu *reverse engineering* na język polski wynika z braku słowa odpowiadającego angielskiemu czasownikowi to *reverse engineer* – oznacza on „badać i analizować” jakiś obiekt (lub zjawisko) w celu zaspokojenia ciekawości lub zrozumienia konstrukcji i zasady działania, a w przypadku obiektów technicznych – do wytworzenia kopii lub skonstruowania lepszej wersji, nie mając przy tym dostępu do jego pierwotnej dokumentacji lub szczegółowego opisu⁵.

⁴ [Trójwymiarowe] cechy geometryczne elementów, czyli ich (geometryczne) postacie konstrukcyjne z wymiarami i topologią, mogą być w dalszej części pracy nazywane także ich „kształtem” lub „kształtem 3D”, w nawiązaniu do pojęcia *shape* w literaturze angielskojęzycznej (jak np. w *shape analysis*, *shape measurement* lub *shape comparison*).

⁵ Brak zresztą w języku polskim także czasownika odpowiadającego angielskiemu *to engineer* („działać jak inżynier”, czyli planować, projektować, konstruować itp.). Gdyby przyjął się występujący w postaci śladowej czasownik „inżynierować” (w formie dokonanej „wyinżynierować”), to wtedy *to reverse engineer* można by tłumaczyć jako „odinżynierować”.



Rys. 1.1. Odmienne źródłosłów angielskiej i polskiej nazwy dyscypliny
(kolor zielony – czasowniki, czerwony – rzeczowniki) (oprac. własne)

Konsekwencją braku czasownika jest niemożliwość utworzenia od niego rzeczownika dla nazwania czynności – na takiej zasadzie, jak od czasownika „malować” pochodzi rzeczownik „malowanie”, a od „pisać” – „pisanie”. W języku angielskim taka konstrukcja jest jeszcze prostsza, polega na dodaniu do czasownika przyrostka *-ing*: np. *to paint* – *painting*, *to write* – *writing*, *to reverse engineer* – *reverse engineering*.

Termin *reverse engineering* musiał zatem zostać przetłumaczony tak, jakby stanowił nazwę nowego rodzaju „inżynierii” – słowo *reverse* potraktowano jako określający ją przymiotnik (rys. 1.1). *Reverse* oznacza tyle co „odwrotny”, „wsteczny” lub „przeciwny” i w ten sposób powstały „inżynieria odwrotna”, „inżynieria wsteczna” lub „inżynieria przeciwna”. Ostatecznie, wobec pewnych pejoratywnych konotacji dwóch ostatnich wersji, przyjęła się ta pierwsza.

Choć takie tłumaczenie jest niedoskonałe, jest dziś najczęściej spotykane w polskiej literaturze technicznej i jest też stosowane w niniejszej pracy. W miarę potrzeby pełna nazwa może być w tekście zastąpiona skrótowcem, ale ponieważ akronim utworzony z polskiej nazwy inżynierii odwrotnej byłby słabo rozpoznawalny, używany jest akronim nazwy angielskiej – RE.

1.2. Cel badań w inżynierii odwrotnej

Inżynieria odwrotna w zastosowaniach przemysłowych ma na celu utworzenie (nowego) lub odtworzenie (istniejącego, ale niedostępnego, lub potrzebnego do porównania z istniejącym) komputerowego modelu opisującego kształt geometryczny zewnętrzny, a niekiedy także wewnętrzny, badanego obiektu. W zależności od potrzeb **końcowy model 3D** może mieć postać mniej lub bardziej „zorganizowaną” w znaczeniu struktury danych geometrycznych (rys. 1.2):

- „surowy” zapis zmierzonego kształtu – w postaci rozmieszczonych w trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej punktów pomiarowych (w tym sensie po-

miary w inżynierii odwrotnej można zaliczyć do współrzędnościowych technik pomiarowych – patrz np. [181], [211]), ale też profili 2D (konturów) lub zbioru sześciennych woksli uzyskanych bezpośrednio z pomiarów – różne postacie danych są opisane w rozdziale 6,

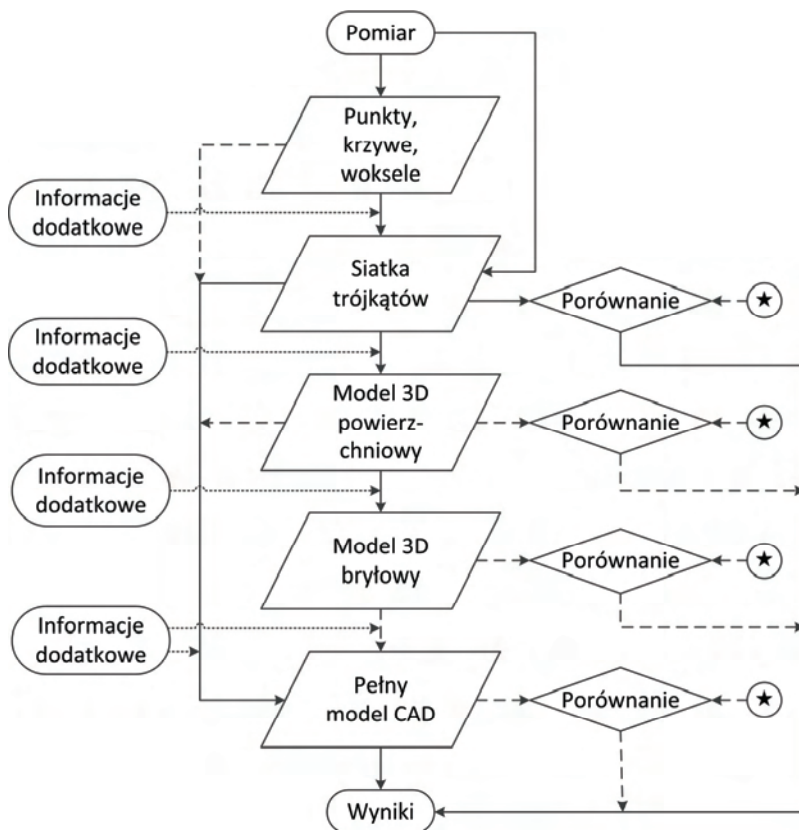
- z „surowych” danych najczęściej tworzona jest **siatka trójkątów** – struktura złożona z płaskich trójkątów rozpiętych na punktach 3D, która wprowadza do punktów pewien porządek – wiadomo już, które z nich opisują odpowiednie powierzchnie obiektu (np. wewnętrzne i zewnętrzne); siatka zapisywana jest najczęściej w formacie STL,
- z siatki trójkątów można uzyskać **model powierzchniowy 3D** – najczęściej w postaci zbioru krzywokreślnych powierzchni typu NURBS⁶, będących wyidealizowanym zapisem kształtów zmierzonych powierzchni obiektu; taki model zapisywany jest zwykle w jednym z formatów neutralnych, np. IGES,
- jeśli zbiór powierzchni spełnia uogólnioną regułę Eulera (tzw. twierdzenie o wielościanach), czyli kompletnie ogranicza pewien fragment przestrzeni 3D, można z niego wprost utworzyć **model bryłowy 3D**, ale będzie to tzw. *dumb solid model* – model „głupi” („niemy”), bo oprócz informacji o kształcie powierzchni i objętości wnętrza nie zawiera powiązań konstrukcyjnych ani topologicznych między elementami; jeśli powierzchnie nie spełniają reguły Eulera, należy je uzupełnić lub poprawić („domknąć”), aby mogły być zamienione na model bryłowy; jako że taki model wnosi niewiele więcej niż model powierzchniowy 3D, konstruowany jest rzadko; można go zapisać w jednym z formatów neutralnych, np. STEP,
- dla obiektów technicznych pożądane jest utworzenie/odtworzenie w pełni funkcjonalnego **modelu CAD**⁷, który oprócz uporządkowanego zapisu kształtów 3D zawiera też „intencje projektanta” (*design intent*), definiowane za pomocą mechanizmów, takich jak parametry, obiekty i tolerancje (rozdz. 6.9); modele CAD zazwyczaj powstają bezpośrednio z siatek trójkątów, rzadko z modeli bryłowych lub powierzchniowych.

„Informacje dodatkowe” wskazane na rys. 1.2 przy konwersji danych ze struktury „niższej” w hierarchii do struktury „wyższej” są albo dodawane przez człowieka – operatora programu do przetwarzania danych w RE, albo są efektem obliczeń specjalnych algorytmów, opisanych w rozdziale 6, w których jednak to także człowiek musi ustalić parametry robocze, np. sposób reakcji na obecność bardzo drobnych struktur (zostawić/usunąć) lub cechy struktur wynikowych (gładkość powierzchni). Dzięki tym

⁶ *Non-Uniform Rational B-Spline* (niejednorodne ilorazowe bazowe krzywe sklepane) – typ reprezentacji powierzchni krzywokreślnych przyjęty w większości współczesnych systemów CAD – patrz rozdział 6.7.

⁷ Technologie CAX, w tym CAD, CAE i CAM opisane są np. w książce [50].

informacjom można połączyć elementy niższego poziomu, np. punkty 3D, w struktury wyższego poziomu, np. powierzchnie lub bryły.



Rys. 1.2. Możliwe scenariusze i rezultaty badań w inżynierii odwrotnej (oprac. własne)

Badania w inżynierii odwrotnej mogą się także kończyć **porównaniem** odtworzonego modelu 3D z modelem wzorcowym, pochodzącym albo od oryginalnego konstruktora obiektu (w postaci modelu CAD – takie porównanie może służyć ocenie zgodności badanego wytworu ze specyfikacją zawartą w konstrukcji), albo z badań innego egzemplarza takiego samego obiektu (takie porównanie może posłużyć do oceny różnic między kolejnymi wytworami w procesie wytwarzania). Do wyników badań będą wówczas oprócz lub zamiast modelu 3D należeć wyniki takiego porównania – w postaci raportu tabelarycznego, zbioru profili odchylek 2D, mapy odchylek 3D itp.

2. Wymagania w badaniach inżynierii odwrotnej

Badania RE mogą mieć różne wymagania: dla obiektów technicznych, których efektem są modele inżynierskie do zastosowania w rozwoju nowych produktów, najważniejsza jest duża dokładność, a dla obiektów biomedycznych istotne jest uchwycenie złożoności topologicznej, aby zidentyfikować w wynikowym modelu szczegóły struktury wewnętrznej obiektu.

W kolejnych podrozdziałach pokazane zostały przykłady badań RE różnych typów obiektów.

2.1. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów technicznych

Celem inżynierii odwrotnej w badaniu obiektów technicznych jest tworzenie i odtwarzanie modeli 3D prototypów i wzorców technicznych, narzędzi produkcyjnych, gotowych produktów lub infrastruktury technicznej. Wiele takich rekonstrukcji można znaleźć m.in. w pracach [11] i [194].

Badanie RE może także służyć tylko inspekcji – porównaniu zgodności zmierzonego obiektu ze specyfikacją, w tym z pełnym zapisem jego wymiarów i tolerancji w systemie GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*, patrz np. [62, 64, 101]). W artykule [83] opisano prototypowy system integrujący narzędzia CAD, bazy wiedzy i narzędzia RE w celu prowadzenia „wirtualnych inspekcji” i automatycznego generowania raportów zgodności.

Różnorodne obszary zastosowania inżynierii odwrotnej w przemyśle (na podstawie [66]) przedstawiono w tabeli 2.1. Pokazano w niej także reprezentatywne przykłady z literatury i z działalności LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING na Politechnice Wrocławskiej (kolumna z LRE).

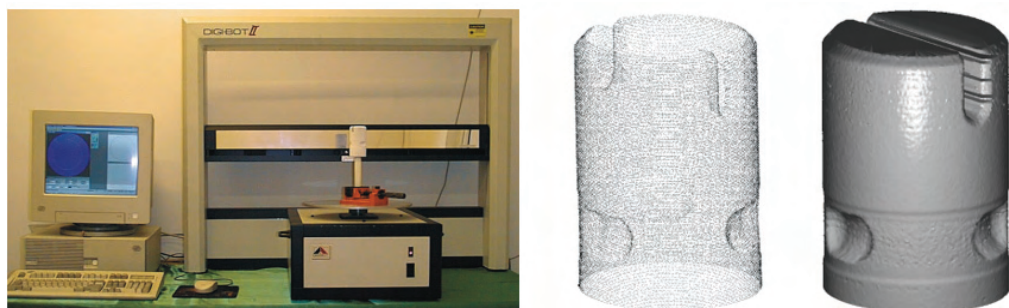
Tabela 2.1. Przemysłowe zastosowania RE wraz z typowymi wymaganiami dotyczącymi dokładności współrzędnościowej (W) i struktury danych wynikowych (S) (oprac. własne)

Opis	Przykłady		Wymagania	
	z literatury	z LRE	W	S
Odtwarzanie zagubionej lub niedostępnej albo tworzenie nowej komputerowej dokumentacji technicznej na podstawie badań jednego egzemplarza produktu – dla wznowienia jego produkcji seryjnej przez tego samego lub uruchomienia produkcji przez innego wytwórcę, a nawet do wyprodukowania jednego elementu (np. przy rekonstrukcji zabytku techniki)	[189, 207, 215, 238, 259, 262, 267]		●	◐
Odtwarzanie niedostępnej dokumentacji w celu modyfikacji konstrukcji wyrobu (<i>reengineering</i>)		rys. 2.1 rys. 2.2 rys. 2.3	●	◐
Tworzenie pierwszych komputerowych modeli technicznych CAD wyrobu na podstawie fizycznych projektów <i>designerów</i> lub stylistów		rys. 2.4	●	●
Tworzenie modeli uszkodzonych obiektów technicznych w celu ich naprawy lub regeneracji, najczęściej z użyciem technologii sterowanych komputerowo: obróbki ubytkowej na maszynach CNC lub wytwarzania przyrostowego	[114, 252]	rys. 2.5	●	●
Tworzenie modeli numerycznych do programów klasy CAE w analizie zachowania się badanego obiektu w warunkach eksploatacyjnych obciążeń mechanicznych, zmęzeniowych, termicznych czy elektromagnetycznych lub przepływów gazów lub cieczy (CFD); często analizowane są w ten sposób wyroby konkurencji ⁸ lub dostawców, którzy nie udostępniają modeli komputerowych wyrobów	[119]	rys. 2.6	●	●
Tworzenie cyfrowych modeli do programów klasy CAE w analizie obliczeniowej procesów wytwórczych, np. odlewania, kształtowania plastycznego (kucia, wylączania) lub formowania wtryskowego		rys. 2.7	●	●
Tworzenie komputerowych modeli do projektowania wyrobów indywidualizowanych, dopasowanych swoim kształtem do istniejących obiektów (innych wyrobów technicznych lub anatomii właściciela)		rys. 2.8 rys. 2.9	●	●

⁸ Dopóki nie służy to kopiowaniu zastrzeżonych prawnie rozwiązań konstrukcyjnych (patentów lub wzorów przemysłowych), takie badania są dopuszczalne – rozważania tego rodzaju zawiera m.in. praca [123].

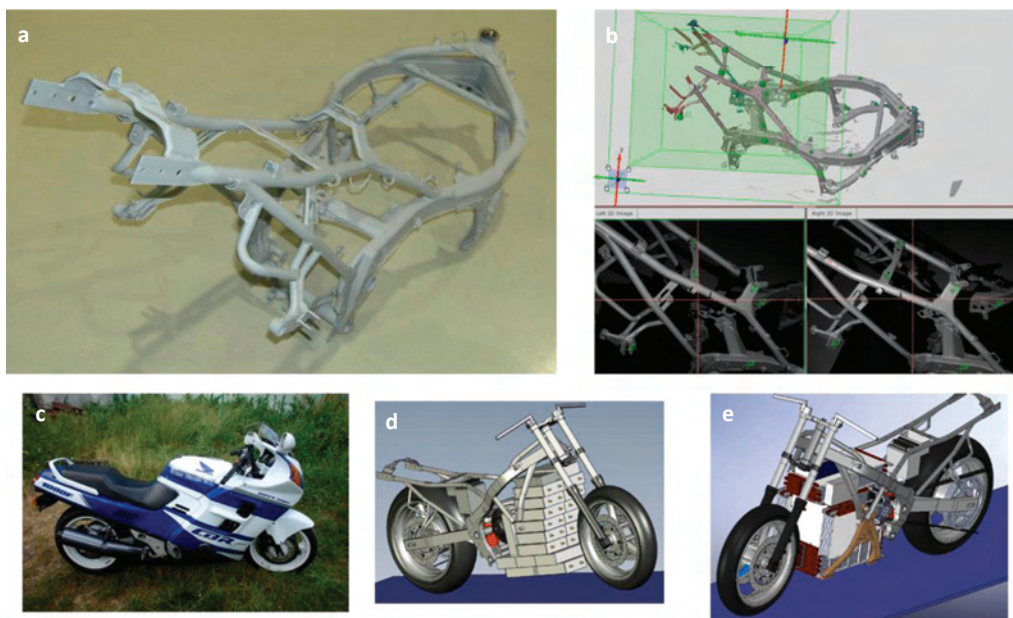
Uaktualnianie dokumentacji technicznej po badaniach optymalizacyjnych fizycznego prototypu (np. w tunelu aerodynamicznym) lub po optymalizacji narzędzia w czasie jego użytkowania (z odtworzonym w efekcie takich badań modelem komputerowym można wrócić do środowiska systemów Cax i kontynuować rozwój produktu lub technologii wytwarzania)				
Badanie wyrobów (odlewoń, wyprasek, wytłoczek, wykrojów itp.) w kontroli jakości procesów wytwarzania, np. w ocenie dokładności danej technologii lub w ocenie stopnia zużycia narzędzi produkcyjnych	[37, 91, 133, 175, 228, 243, 259]	rys. 2.10		
Analiza kształtu wyrobów w badaniach nieniszczących oraz kontroli eksploatacyjnej wyrobów lub narzędzi	[132, 153, 190, 204, 244]	rys. 2.11		
Inwentaryzacja systemów produkcyjnych wraz z rejestracją kształtów 3D wszystkich ich istotnych składników w celu analizy symulacyjnej tych systemów lub optymalizacji <i>layoutu</i> hal produkcyjnych	[124]	rys. 2.12		
Badanie kształtu elementów wchodzących w skład podzespołów, wykonywane w stanie złożonym, kiedy te kształty mogą przyjmować inną postać niż przed złożeniem lub kiedy istotne jest zbadanie wzajemnej orientacji elementów po złożeniu – użyteczne w kontroli jakości procesów montażowych lub identyfikacji przyczyn niewłaściwego działania takich podzespołów		rys. 2.13		
Rekonstrukcja modeli wyrobów do celów szkoleniowych i marketingowych, dla których zwykle nie powstaje dokumentacja techniczna 3D		rys. 2.14		
Badania naukowe metod inżynierii odwrotnej		rys. 2.15 rys. 2.16		

Na rysunkach 2.1–2.16 przedstawiono przykłady zastosowania inżynierii odwrotnej w badaniach obiektów technicznych wraz z oceną przebiegu i rezultatów badań, w tym niepewności pomiarów oraz początkowej i końcowej postaci struktury danych 3D (jeżeli dane te były dostępne dla autora).



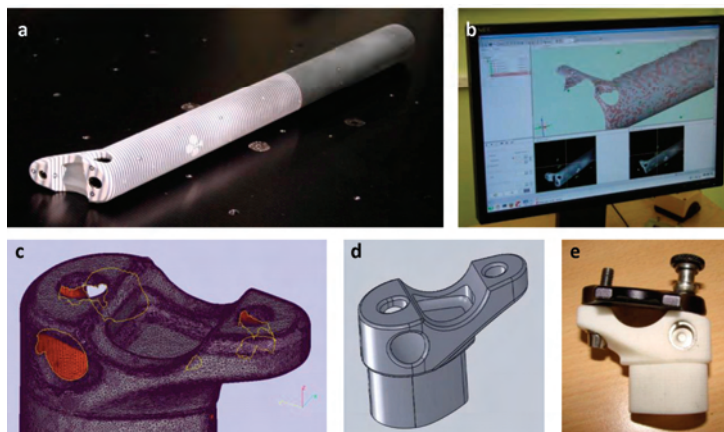
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,5 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: chmura punktów	Liczba elementów: 114 157

Rys. 2.1. Rekonstrukcja elementu metalowego techniką laserową punktową (na jednym z pierwszych wówczas w Polsce skanerów laserowych), z pokryciem obiektu warstwą przeciwlrefleksyjną (oprac. własne, [46])



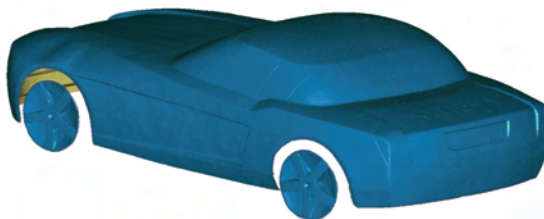
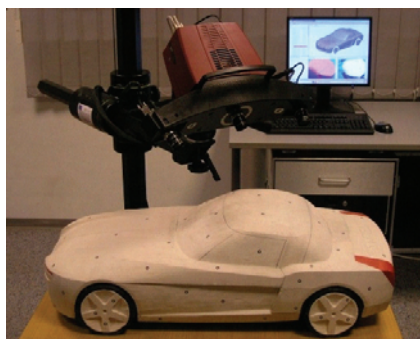
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,5 mm	Struktura końcowa: model obiektowy CAD
	Postać danych: siatka trójkątów	

Rys. 2.2. Digitalizacja ramy motocykla w projekcie przekonstruowania układu napędowego na elektryczny: zdjęcia ramy (a) i motocykla (c), okno programu RE (b), projekt nowej ramy (d, e) (oprac. własne, [135])



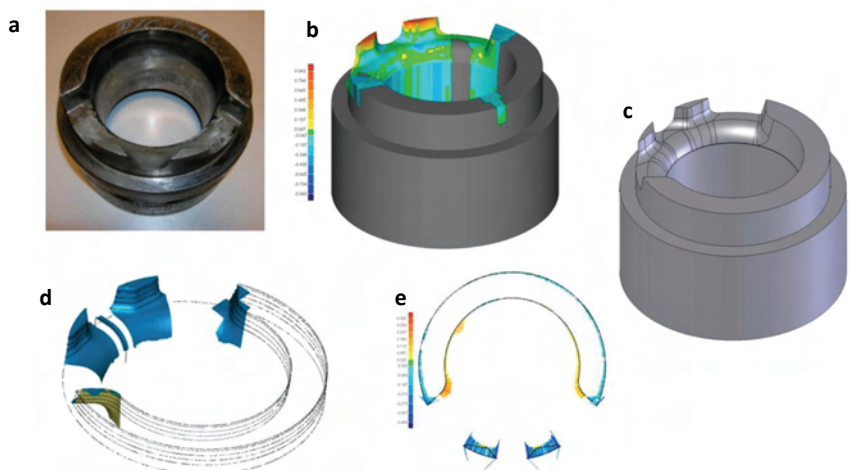
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,1 mm	Struktura końcowa: model obiektowy CAD
	Postać danych: siatka trójkątów	

Rys. 2.3. Reengineering części do roweru: skanowanie elementu (a), okno programu RE (b), model w postaci siatki (c) i powierzchni (d) oraz fizyczny prototyp nowej konstrukcji (e) (oprac. własne, [265])



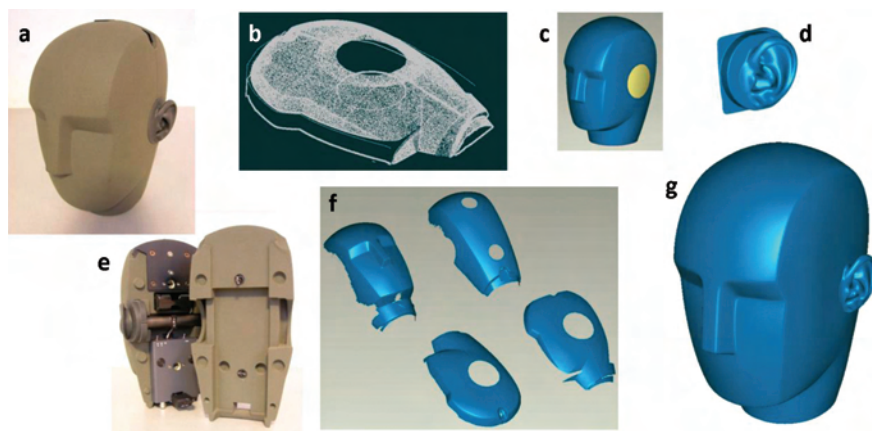
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,07 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: siatka trójkątów	Liczba elementów: 1 068 354

Rys. 2.4. Digitalizacja modelu koncepcyjnego samochodu i model wynikowy (oprac. własne)



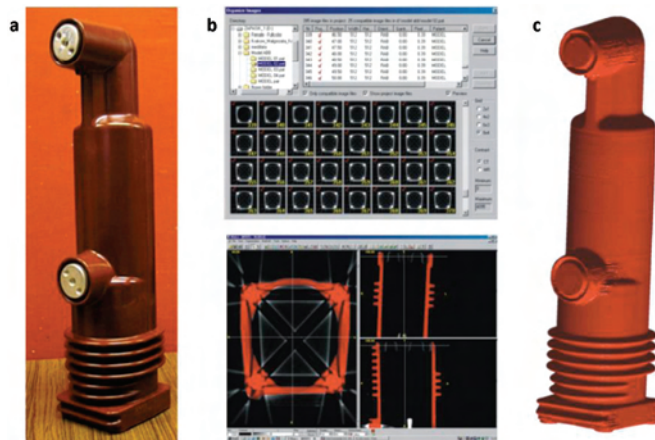
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0.07 mm	Struktura końcowa: model obiektowy CAD
	Postać danych: zestaw konturów	

Rys. 2.5. Digitalizacja kształtu zewnętrznego zużytej formy odlewniczej w celu opracowania modelu komputerowego zamiennika: zdjęcie formy (a), model CAD (c) i mapy odchyłek (b, d, e) (oprac. własne, [24])



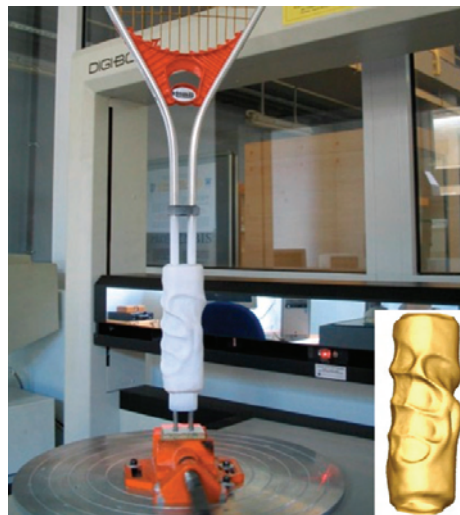
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,07 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: chmura punktów	Liczba elementów: 75 436

Rys. 2.6. Odtworzenie modelu 3D fantomu akustycznego – „sztucznej głowy” – za pomocą kombinacji dwóch technik pomiarowych – techniki stykowej dla zasadniczej części głowy oraz techniki niszczącej dla małżowiny usznej: zdjęcia fantomu (a, e), modele 3D głowy (b, c, f), model 3D ucha (d) oraz kompletny model powierzchniowy (g) (oprac. własne, [25, 26])



RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,75 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model wkselowy	Liczba elementów: 708 250

Rys. 2.7. Odtworzenie modelu wielokomponentowego wyrobu metalowo-polimerowego za pomocą tomografii komputerowej (rejestracja na tomografie medycznym) w celu przygotowania analizy procesu formowania wtryskowego: zdjęcie wyrobu (a), okno programu RE (b) i wynikowy model (c) (oprac. własne, [69])



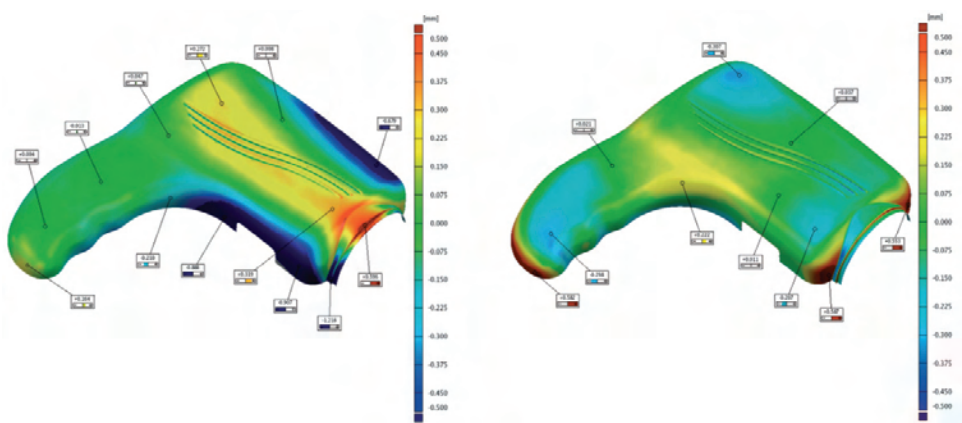
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,5 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: chmura punktów	Liczba elementów: 16 068

Rys. 2.8. Pomiary metodą skanowania laserowego w celu wytworzenia wyrobu indywidualizowanego – rakiety z uchwytem dopasowanym do dłoni tenisisty (oprac. własne, [266])



RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,04 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: siatka trójkątów	Liczba elementów: 116 796

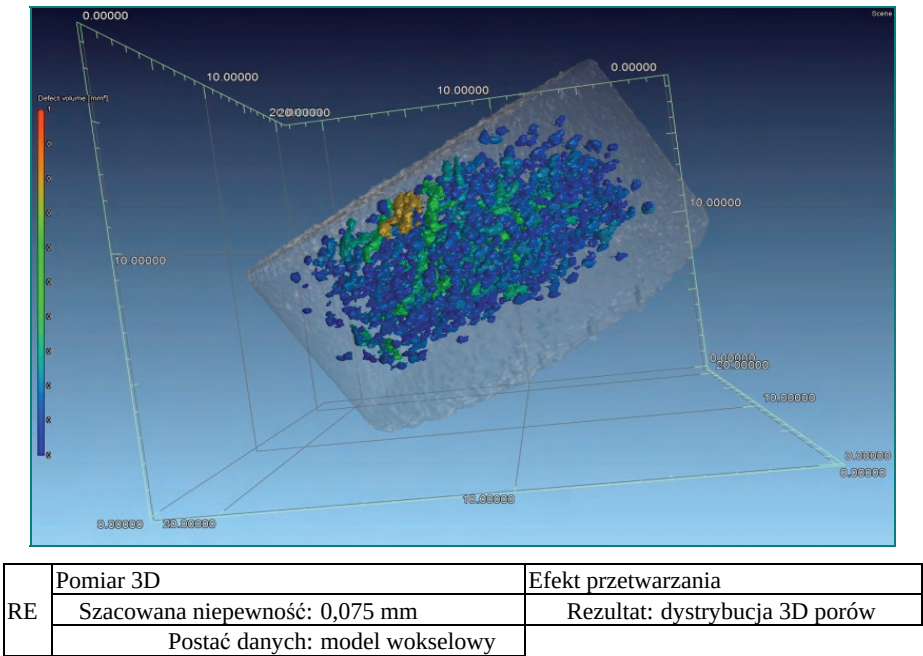
Rys. 2.9. Skanowanie, konstruowanie i wytworzenie nakładki na korpus aparatu fotograficznego dopasowanej do chwytu użytkownika: zdjęcie stanowiska pomiarowego (a), prototyp uchwytu (b, c) (oprac. własne, [148])



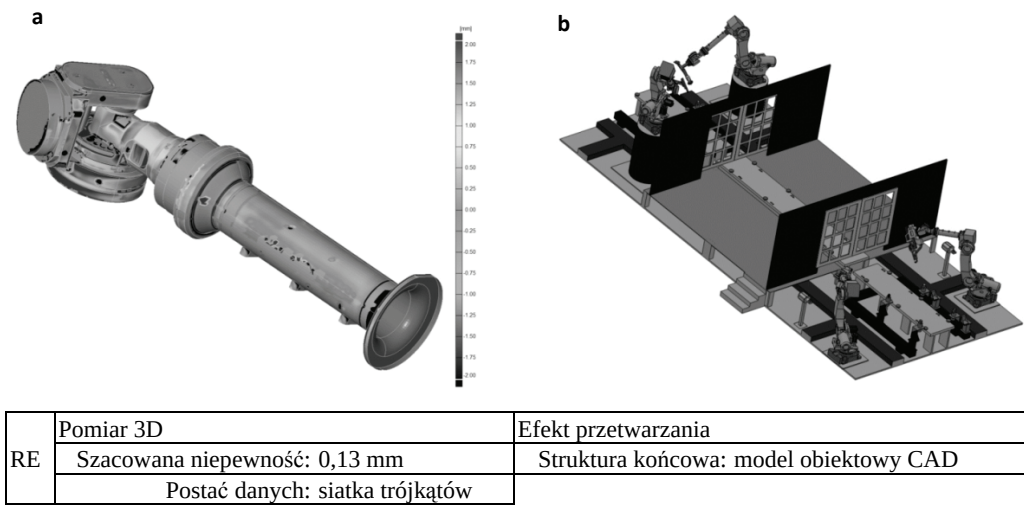
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,046 mm	Rezultat: mapa odchyłek
	Postać danych: siatka trójkątów	

Rys. 2.10. Mapy odchyłek kolejnych wyprask z tej samej formy silikonowej w procesie *Rapid Tooling*⁹ (oprac. własne, [78])

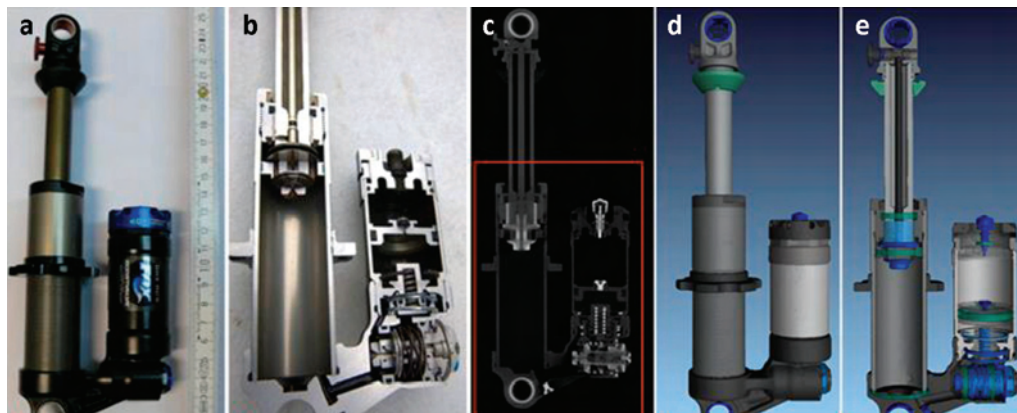
⁹ *Rapid Tooling* (szybkie wytwarzanie narzędzi) to obszar zastosowania technologii generatywnych – przyrostowego wytwarzania narzędzi (form, matryc) dla technologii konwencjonalnych, np. odlewania, formowania wtryskowego, tłoczenia blach.



Rys. 2.11. Ocena porowatości materiału obiektu wytworzonego z proszku metalu metodą laserowej mikrometalurgii (oprac. własne, [263])

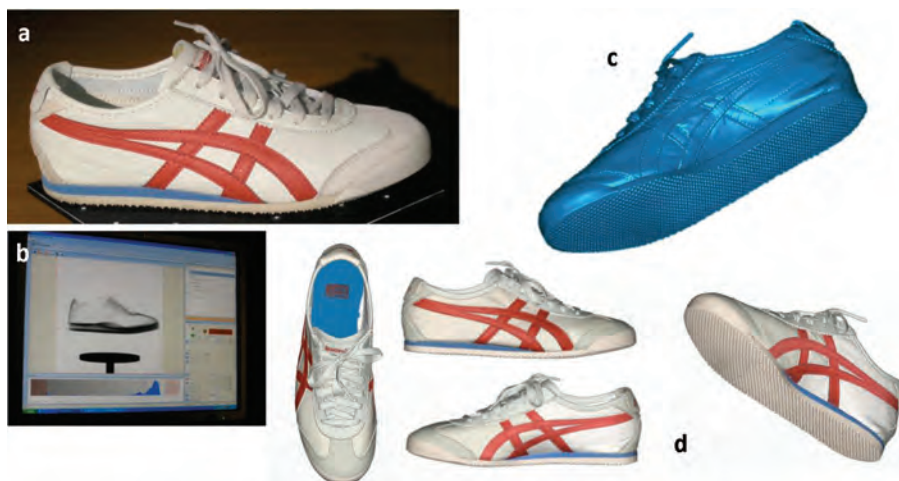


Rys. 2.12. Rekonstrukcja szczegółowego modelu gniazda produkcyjnego w celu analizy bezpieczeństwa pracy: ramię jednego z robotów zgrzewających (a), kompletne gniazdo montażowe (b) (oprac. własne, [68])



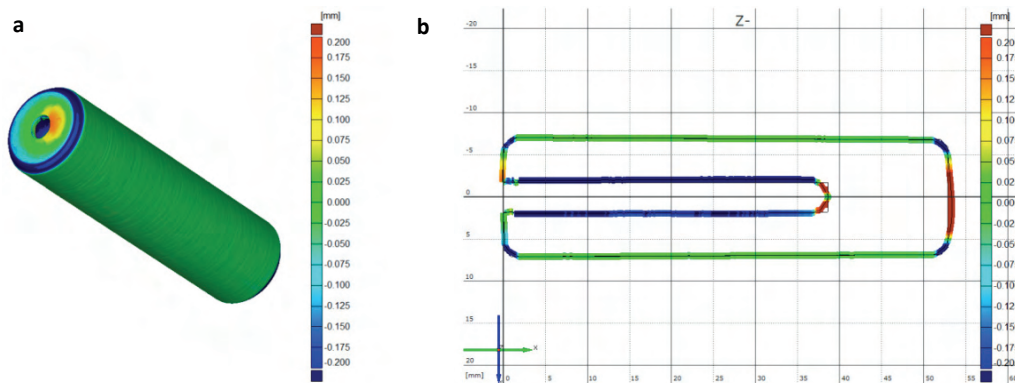
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,38 mm	Struktura końcowa: model wokselowy
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 179 649 440

Rys. 2.13. Rowerowy amortyzator powietrzno-olejowy: zdjęcia złożenia całego (a) i przekrojonego (b), przekrój RTG (c) oraz wynikowe modele 3D złożenia (d, e), którego strukturę wewnętrzną zbadano metodą tomografii komputerowej (oprac. własne, [49])

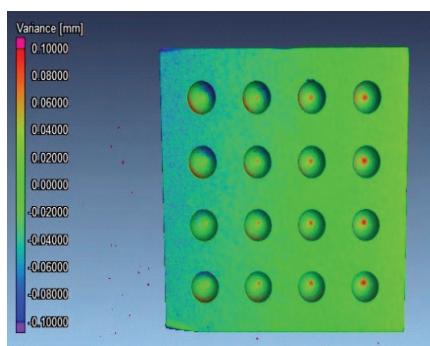
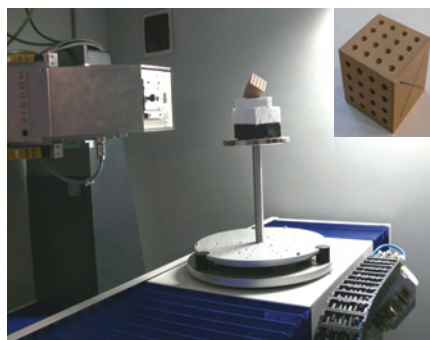


RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,44 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów (kolorowa)
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 2 157 640

Rys. 2.14. Opracowanie fotorealistycznej wizualizacji obuwia sportowego za pomocą tomografii komputerowej i fotografii optycznej: zdjęcie buta (a), okno programu RE (b), model homogeniczny 3D (c) oraz model niehomogeniczny – z nałożonym kolorem powierzchni (d) (oprac. własne, [117])



Rys. 2.15. Analiza odchylek między modelami odtworzonymi w pomiarach na maszynie współrzędnościowej i technicznym tomografii komputerowym: mapa odchylek 3D (a) i mapa odchylek w osiowym profilu 2D (b) (oprac. własne, [70])



Nr Badania	90% odchylek poniżej wartości [mm]
1.1	0.0681
1.2	0.0546
2.1	0.0635
2.2	0.0481
3.1	0.0481
3.2	0.0470
4.1	0.0465
4.2	0.0509
5.1	0.0605
5.2	0.0471
6.1	0.0446
6.2	0.0452
7.7	0.0458
7.2	0.0491
8.1	0.0628
8.2	0.0491

Rys. 2.16. Badania wzorca dla technicznej tomografii komputerowej (oprac. własne, [250])

W działalności LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING większość badań stanowią prace prowadzone na obiektach przemysłowych, a wizerunki obiektów i wyniki

badan objęte są zazwyczaj klauzulą poufności. Tylko nieliczne przykłady można było opisać w wymienionych publikacjach naukowo-technicznych.

W badaniach obiektów technicznych niezwykle istotna jest ich jakość – laboratorium badawcze powinno mieć procedurę jej określania (rozdział 4) i przekazywać odbiorcy raport z badań wraz z odpowiednim wskaźnikiem „pewności” uzyskanych wyników (norma ISO 17025 [174] nakazuje określanie „niepewności pomiaru”).

Wskaźnikiem oczekiwanej jakości badań obiektów technicznych są wymagania dotyczące technologii ich wytwarzania – im dokładniej wytwarzane są obiekty danego typu, tym dokładniejsze muszą być ich badania w inżynierii odwrotnej. Inaczej nie można by sprawdzać ich zgodności ze specyfikacją konstrukcyjno-technologiczną ani projektować nowych wyrobów na bazie danych z badań RE. Niektóre wymagania odbiorców dotyczące dokładności bywają jednak nierealistyczne – taka niezgodność powinna wynikać ze wstępnej analizy potrzeb (rozdz. 4.1) i przy niedostępności odpowiednio dokładnych technik pomiarowych wskazywać niecelowość prowadzenia badania metodami inżynierii odwrotnej (w zamian można zaproponować bardziej precyzyjny pomiar tylko nielicznych, najważniejszych cech geometrycznych wymiarowych lub kształtowych, w trybie *on-line*, klasycznymi technikami współrzędnościowymi z użyciem bardzo dokładnych maszyn pomiarowych).

Chętnie oczekiwanym, ale najtrudniejszym do osiągnięcia, rezultatem badań RE jest rekonstrukcja „pełnego”, w pełni funkcjonalnego **modelu CAD**. Dobrze, gdyby taki model był identyczny z oryginalnym modelem CAD konstrukcyjnym lub technologicznym tego obiektu (jeśli taki istnieje) lub gdyby miał taką funkcjonalność, jaką te modele dysponują. „Pełny” model CAD zawiera:

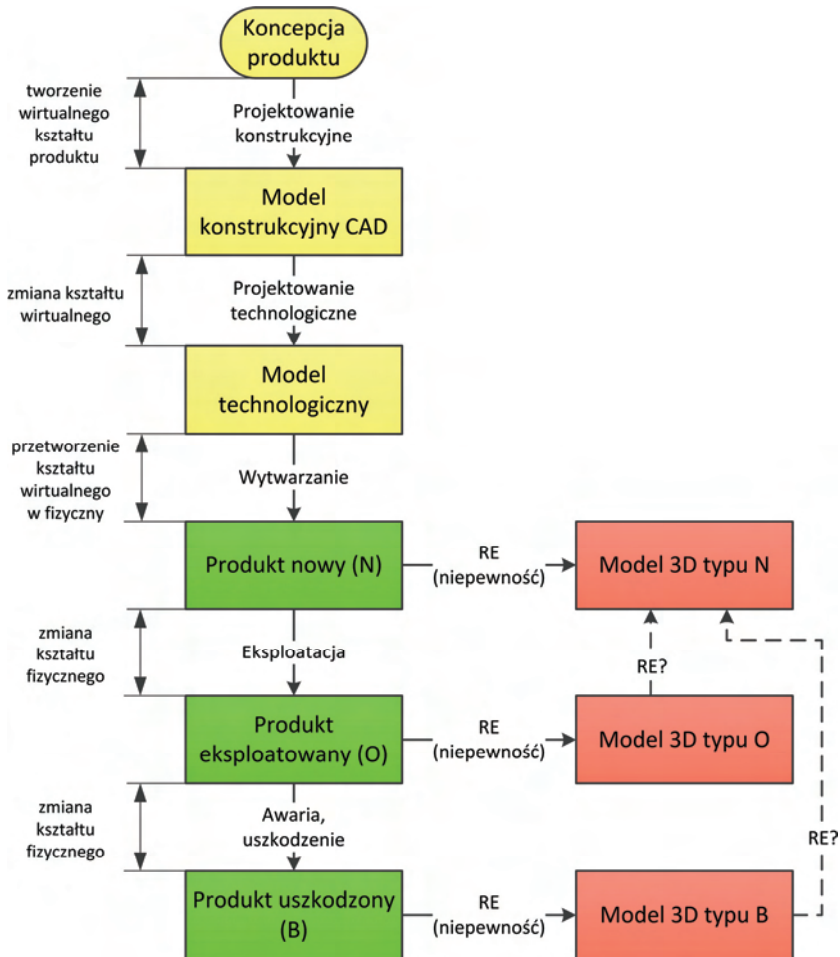
- zapis kształtu nominalnego – w postaci modelu geometrycznego 3D powierzchniowego lub bryłowego,
- informacje o „obiektach” i „parametrach” w modelu CAD, identyfikujących „intencje projektanta” pełniej niż sam kształt 3D (rozdział 6.9),
- informacje o dopuszczalnych tolerancjach cech geometrycznych wymiarowych i kształtowych, warunkujących spełnianie przez zaprojektowaną konstrukcję swoich funkcji lub relacji (informacja GD&T).

Cel w postaci konstrukcyjnego modelu CAD jest trudny do uzyskania z powodu niemożliwości bezpośredniego odtworzenia zarówno idealnego kształtu 3D określonego na etapie konstruowania elementów, jak i niemożliwości bezpośredniego odczytania „intencji” konstruktora.

2.1.1. Kształt wyrobu technicznego możliwy do digitalizacji w RE

Obiekt techniczny jest niedoskonałą realizacją wymagań opisanych w jego projekcie konstrukcyjnym. Nawet jego kształt jest tylko przybliżeniem kształtu idealnego –

zanim zostanie poddany badaniom w inżynierii odwrotnej przechodzi zmiany – na rys. 2.17 pokazano wybrane etapy cyklu życia produktu i zaznaczono te momenty, w których produkt może być badany metodami inżynierii odwrotnej.



Rys. 2.17. Miejsce badań RE w cyklu życia produktu
(kolor zielony wskazuje obiekty fizyczne, czerwony – rezultaty badań RE) (oprac. własne)

„Model 3D typu N” (od *new*) na rys. 2.17 jest najwcześniejszym możliwym obrazem kształtu produktu – dane pomiarowe zostały zebrane tuż po jego wytworzeniu. Zmierzony kształt nie może być zgodny z modelem koncepcyjnym czy konstrukcyjnym:

- cechy geometryczne mogły zostać dostosowane do wymagań technologii wytwórczych dostępnych w przedsiębiorstwie (na rysunku: „zmiana kształtu wirtualnego”), np. formowania wtryskowego polimerów lub odlewania metali,

- produkt został fizycznie wytworzony (na rysunku: „przetworzenie kształtu wirtualnego w rzeczywisty”) w kształcie nietożsamym z projektem, ponieważ wszystkie technologie wytwarzania mają skończoną zgodność ze specyfikacją zapisaną w projektach wykonawczych – świadczą o tym choćby dopuszczalne „klasy dokładności wykonania” (patrz np. [75] oraz norma ISO 286 [169], z której tolerancje dla różnych klas przedstawiono w tab. 2.2.) czy też fizyczne ograniczenia dostępnych technologii obróbki (patrz np. [118]).

Tabela 2.2. Klasy dokładności wykonania od IT1 do IT18, wg ISO 286. Kolorami zaznaczono „pasma” na poziomie pojedynczych mikrometrów, dziesiątek i setek mikrometrów oraz milimetrów

Wymiar nominalny [mm]		Klasy dokładności																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
od	do	mikrometry											milimetry						
0	3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	1	17,5	28
2500	3150	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	3,5	21	33

Często badaniom RE poddawane są obiekty techniczne, które były już eksploatowane (powstaje wówczas „Model 3D typu O” (od *old*) z rys. 2.17). Fizyczna postać obiektu mogła ulec zmianom na skutek zużycia – można przewidywać charakter tych zmian i próbować zrekonstruować kształt „nowy”, ale wymagana jest znajomość specyfiki eksploatacji takich obiektów: miejsc występowania i wielkości efektów zużycia,

i trudno takie „odgadywanie”, jeśli nie jest opisane zidentyfikowanymi naukowo zależnościami, traktować jako część spójnych badań RE.

Niekiedy do badań dostarczony jest produkt zniszczony (co prowadzi do „Modelu 3D typu B” (od *broken*) z rys. 2.17). Taki model traktuje się już zasadniczo jako zapis obiektu **innego** niż „nowy”, bo trudno go odnosić do kształtu nominalnego wyrobu w kontekście jego zgodności ze specyfikacją. Można próbować rekonstruować model wyrobu „nowego”, ale podobnie jak poprzednio – należy zastosować wiedzę (zewnętrznych) specjalistów i nie można tych działań uwzględniać w ocenie spójności badań w inżynierii odwrotnej.

2.1.2. Informacje dodatkowe dla pełnego modelu CAD

Fizyczne obiekty poddawane badaniom RE nie zawierają intencji zapisywanych przez konstruktora w programach CAD wraz z kształtem geometrycznym – one są tylko realizacją tych intencji. W „surowych” wynikach badań (chmurach punktów czy siatkach trójkątów) nie można odnaleźć bezpośrednich wskazań ani co do topologii kształtów, czyli sparametryzowanych obiektów z „pełnego” modelu CAD (nie ma w takiej chmurze lub siatce nawet powierzchni płaskich czy obrotowych i nie wiadomo jakich konstrukcji geometrycznych użył projektant do uzyskania ostatecznych kształtów czy w jakiej kolejności je stosował), ani co do dopuszczonych przez konstruktora tolerancji cech geometrycznych wymiarowych i kształtowych.

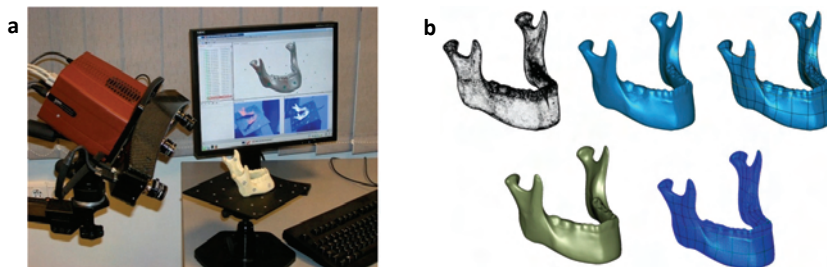
Informacje takie mogą być **dodane** do modelu 3D i wymagana jest do tego celu wiedza specjalistyczna: konstruktorów o specjalności odpowiedniej dla badanych wyrobów, którzy mają wiedzę i doświadczenie w stosowaniu branżowych, korporacyjnych i zakładowych metod i reguł dotyczących określania, obliczania i zapisywania takich informacji w modelach CAD dla produktów danego rodzaju (więcej szczegółów w tym zakresie w rozdz. 6.9).

2.2. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów biomedycznych

Za „obiekty biomedyczne” można uważać rośliny, zwierzęta lub ludzi – w stanie żywym (trudne do zarejestrowania) lub nieożywione, w tym także ich kopie lub „ślady”, np. odciski czy odlewy. Celem badań obiektów biomedycznych w inżynierii odwrotnej jest utworzenie ich modeli komputerowych dla bardzo różnych potrzeb – przegląd można odnaleźć np. w [28, 103, 140, 152, 194, 219]. W tabeli 2.3 przedstawiono różne obszary zastosowań RE w badaniu obiektów biomedycznych, wraz z przykładami z literatury i z działalności LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING.

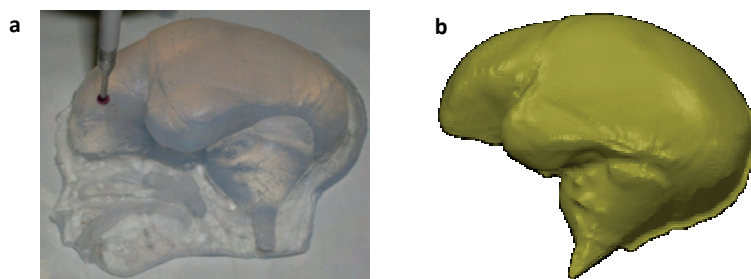
Tabela 2.3. Biomedyczne zastosowania RE wraz z typowymi wymaganiami dotyczącymi dokładności współrzędnościowej (W) i struktury danych wynikowych (S) (oprac. własne)

Opis	Przykłady		Wymagania	
	z literatury	z LRE	W	S
Tworzenie modeli cyfrowych do symulacji zjawisk biologicznych, chemicznych, fizycznych, mechanicznych, odbywających się w lub z udziałem obiektów danego rodzaju		rys. 2.18		
Pomiary serii obiektów biomedycznych o złożonych kształtach do celów analizy statystycznej zmienności międzyosobniczej		rys. 2.24		
Wytworzenie kopii obiektów biomedycznych do prowadzenia eksperymentów biologicznych lub fizycznych, w których istotny jest skomplikowany kształt obiektów; zazwyczaj kopie wytwarzane są za pomocą technologii generatywnych	[187]			
Wytworzenie kopii obiektów do prowadzenia szkoleń i symulacji operacji chirurgicznych, zarówno w szkolenictwie medycznym (modele anonimowe), jak i w przygotowywaniu i trenowaniu konkretnych operacji (modele danego pacjenta)		rys. 2.20 rys. 2.21		
Projektowanie i wytwarzanie narzędzi chirurgicznych lub rehabilitacyjnych przeznaczonych do terapii konkretnego pacjenta – wzorców do cięcia i wiercenia, masek do naświetleń itp.		rys. 2.22		
Projektowanie i wytwarzanie implantów standardowych typów, dopasowanych do anatomii konkretnego pacjenta – sztucznych stawów biodrowych, kolanowych itp.		rys. 2.23		
Projektowanie i wytwarzanie implantów specjalnych dopasowanych do anatomii konkretnego pacjenta – płyt lub siatek do rekonstrukcji oczodołów czy pokrywy czaszki, protez rekonstrukcyjnych fragmentów twarzy (np. nosa) i głowy (np. małżowin usznych), protez stomatologicznych itp.		rys. 2.24 rys. 2.25 rys. 2.26		
Zobiektywizowana analiza rezultatów operacji w chirurgii plastycznej i regeneracyjnej	[147]			
Analiza anatomopatologiczna na modelach komputerowych – tzw. <i>virtopsy</i> (<i>virtual autopsy</i> , autopsja wirtualna)	[221, 222, 251]	rys. 2.27		
Rekonstrukcje antropologiczne – modele komputerowe mogą posłużyć do wytwarzania kopii obiektów unikatowych, np. mumii lub innych cennych eksponatów – zabytków lub relikwii		rys. 2.28 rys. 2.29		
Rekonstrukcja modeli kinematycznych (komputerowych i fizycznych) z danych uzyskanych metodą tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego		rys. 2.30 rys. 2.31		



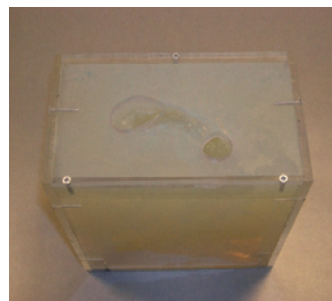
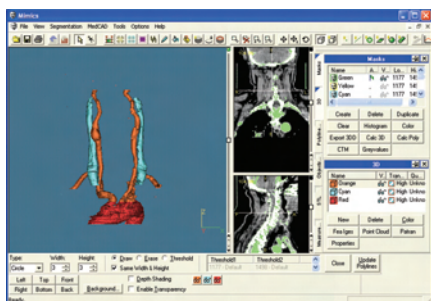
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,04 mm	Struktura końcowa: model powierzchniowy (NURBS)
	Postać danych: siatka trójkątów	Liczba elementów: 216

Rys. 2.18. Digitalizacja fantomu (a) i budowa modelu żuchwy do analizy obliczeniowej (b) (opisanej w [216])



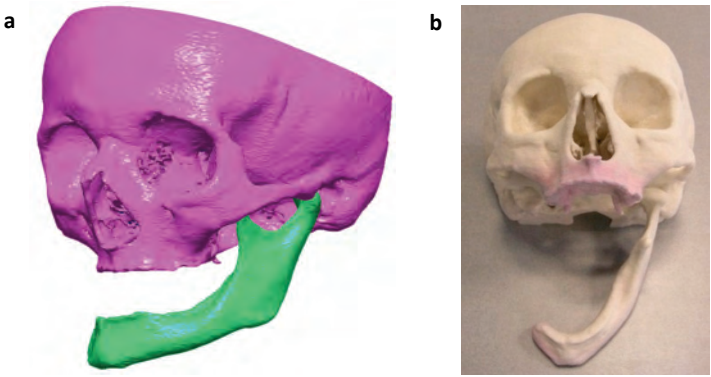
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,2 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: siatka trójkątów	

Rys. 2.19. Pomiar odlewu preparatu biologicznego (a) i wynikowy model powierzchniowy 3D (b) (oprac. własne)



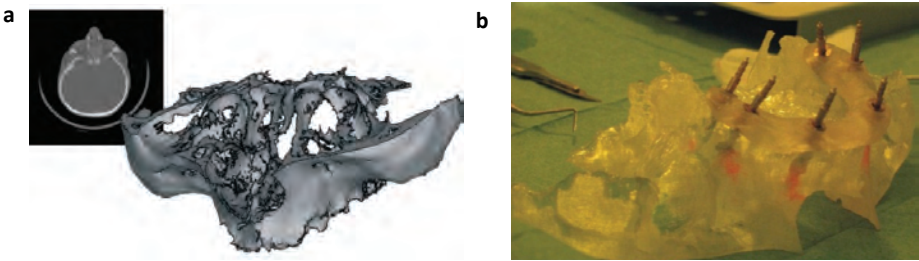
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 2,25 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model woksłowy	Liczba elementów: 109 892

Rys. 2.20. Rekonstrukcja modelu dużych naczyń krwionośnych z badania tomograficznego dla budowy fantomu do trenowania operacji wewnątrznacyniowych (oprac. własne, [137])



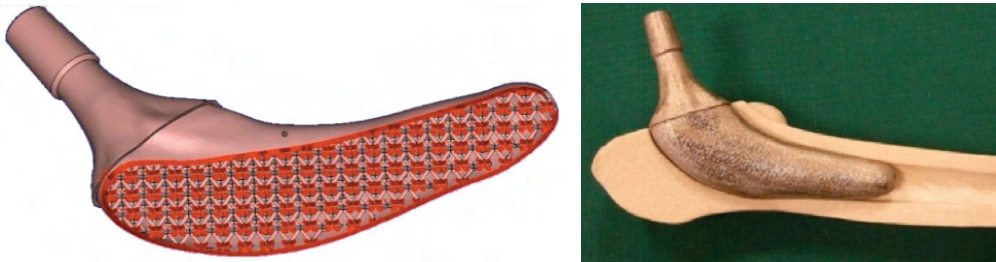
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 1 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 725 688

Rys. 2.21. Model 3D (a) i wytworzona kopia czaszki do planowania operacji chirurgicznych (b) (oprac. własne, [48])

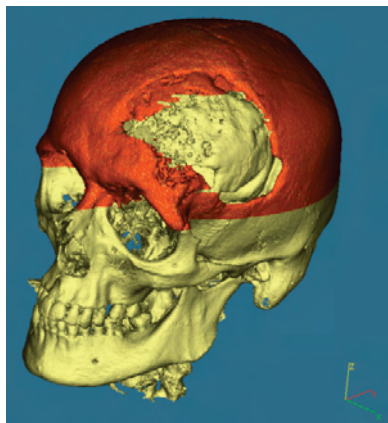


RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,9 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 147 124

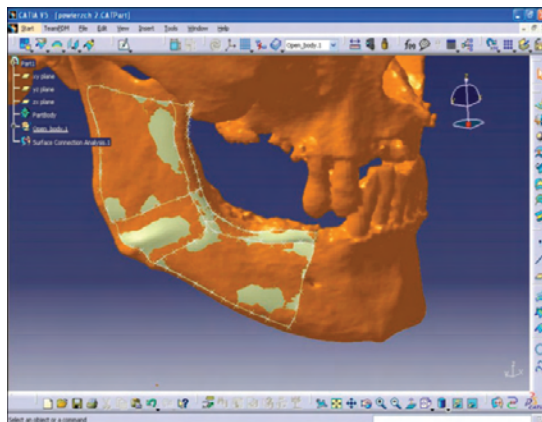
Rys. 2.22. Rekonstrukcja modelu 3D (a) i wzornik do wiercenia chirurgicznego (b) (oprac. własne, [144])



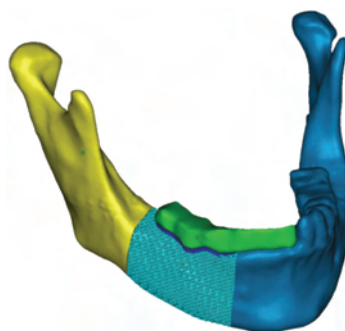
Rys. 2.23. Model i prototyp implantu – trzpienia stawu biodrowego – dopasowanego do anatomii [45]



Rys. 2.24. Komputerowy projekt implantu pokrywy czaszki [53]



Rys. 2.25 Komputerowy projekt implantu żuchwy [63]



Rys. 2.26. Projekt rusztowania komórkowego do regeneracji kości żuchwy pacjenta [29]



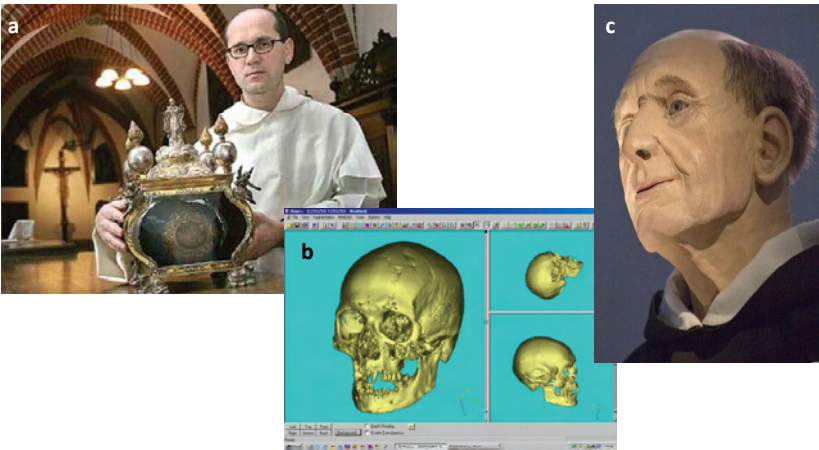
	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
RE	Szacowana niepewność: 0,054 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: siatka trójkątów	Liczba elementów: 462 094

Rys. 2.27. Zdjęcie fragmentów kości długiej (a) i efekt ich wirtualnego złożenia do analizy przyczyn złamania (b) (oprac. własne)



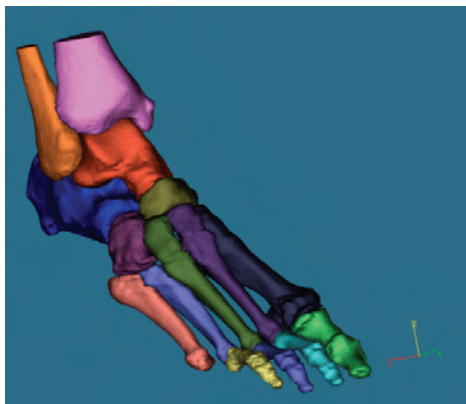
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 1 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 386 152

Rys. 2.28. Rekonstrukcja głowy mumii z wrocławskiego Muzeum Człowieka: mumia (a) oraz model stereolitograficzny, proces rekonstrukcji antropologicznej i jego efekt końcowy (b) (oprac. własne, [224])

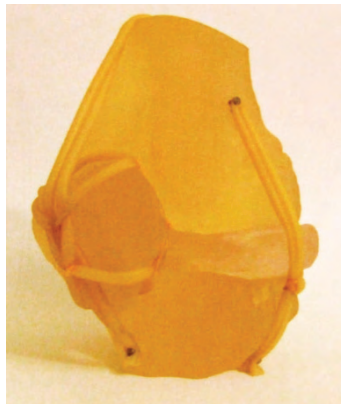


RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,3 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: model wokselowy	Liczba elementów: 2 968 380

Rys. 2.29. Rekonstrukcja głowy błogosławionego biskupa Czesława: relikwie (a), model 3D czaszki (b) i efekt końcowy rekonstrukcji (c) (oprac. własne, [80])



Rys. 2.30. Komputerowy model układu kości stopy opracowany na podstawie badań metodą tomografii [94]



Rys. 2. 31. Ruchomy model stawu kolanowego opracowany na podstawie badań metodami CT i MRI [51]

Rekonstrukcje biomedyczne prowadzone są od dawna, od lat 80. XX wieku stosowano do tego celu przede wszystkim medyczną tomografię komputerową, później inne techniki pomiarowe znane z przemysłowej inżynierii odwrotnej. Badania tego typu prowadzone w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING są zwykle projektami interdyscyplinarnymi, prowadzonymi we współpracy z antropologami, biomechanikami, biologami czy chirurgami – jako odbiorcami rezultatów badań RE. Część projektów prowadzona jest razem z sąsiednim Laboratorium Szybkiego Rozwoju Produktu, w którym za pomocą technologii przyrostowych na bazie modeli 3D wytwarzane są biomodele szkoleniowe, narzędzia chirurgiczne czy prototypy nowych typów implantów.

Wymagania dotyczące dokładności wymiarowej w typowych badaniach obiektów biomedycznych w RE nie są zwykle tak wysokie jak w badaniach obiektów przemysłowych, gdzie poszukuje się dokładności na poziomach od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Oczekiwania są ograniczone np. przez:

- zmienność międzyosobniczą – badany obiekt jest zwykle członkiem rodziny (gatunku) obiektów biologicznych, których kształty w obrębie populacji mogą się między sobą różnić; jeśli tylko pozyskany kształt 3D nie będzie zastosowany do weryfikacji innych badań tego samego osobnika (np. przez porównanie wyników obliczeń na jego modelu 3D z wynikami fizycznych eksperymentów z jego udziałem) – kształt 3D uzyskany przy nienajlepszej dokładności badań może być równie reprezentatywny dla danej populacji jak kształt zmierzony bardzo precyzyjnie;
- aktualną dokładność systemów do medycznego obrazowania 3D – rozdzielczość przestrzenna typowych systemów medycznych sięga dzisiaj 0,4 mm [41], tylko w najlepszych (i najdroższych) można dla specjalnych potrzeb

osiągnąć poziom 20 μm (np. w tomografach spiralnych wielorzędowych [167] do obrazowania drobnych naczyń krwionośnych), systemy MRI i ultrasonografy 3D są zwykle jeszcze mniej dokładne;

- dokładność biomodeli wytwarzanych dzisiaj na bazie pozyskanych danych 3D – opisane w literaturze modele i narzędzia do wspomagania operacji chirurgicznych charakteryzują się niedokładnością rzędu 0.5 mm, a często przekracza ona kilka milimetrów [77, 103, 242];
- precyzję interwencji chirurgicznych prowadzonych przez człowieka – w badaniach takich procedur określono wiele czynników zmniejszających dokładność operacji, np. drżenie fizjologiczne u operatora (na poziomie ok. 0,1 mm), oddychanie i bicie serca pacjenta; próby kompensowania tych zakłóceń, np. przez zastosowanie narzędzi z napędzanymi końcówkami lub robotów chirurgicznych, mają na celu osiągnięcie dokładności na poziomie dziesiątych części milimetra [188].

Ze względu na zazwyczaj skomplikowaną wewnętrzną strukturę obiektów biomedycznych, w danych uzyskanych podczas badań RE istotne są informacje dotyczące nie tyle „współrzędnościowej” dokładności, co wierności odtworzenia topologii kształtu. W takich rekonstrukcjach należy zapobiegać „upraszczaniu” topologii przez niedostateczną rozdzielczość rejestracji, np. przez zastosowanie detektora CT o zbyt małej gęstości pikseli lub wyborze ROI¹⁰ jako zbyt małego fragmentu całego pola widzenia detektora. Takie upraszczanie może prowadzić do utraty części informacji o strukturze obiektów, np. pominięcia obecności komór wypełnionych powietrzem czy cieczą lub niezauważenia połączenia (lub granic) między elementami struktury uważanymi za rozłączne (lub połączone), które mogą być istotne ze względu na kolejne działania na zrekonstruowanych modelach 3D obiektów, np. obliczeń przepływów krwi czy powietrza lub wytwarzania kopii do eksperymentów biologicznych i fizycznych.

W zależności od potrzeb końcowe postacie danych 3D o obiektach biomedycznych to najczęściej:

- siatka trójkątów – taki model wystarczy do komputerowej wizualizacji, np. w systemach nawigacji chirurgicznej, lub wytworzenia metodami przyrostowymi obiektów zaprojektowanych na bazie zmierzonych kształtów (np. indywidualizowanych implantów lub narzędzi chirurgicznych),
- model powierzchniowy 3D (NURBS) – jeśli dane mają stanowić podstawę do budowy modeli obliczeniowych w systemach CAE.

¹⁰ *Region of Interest* („region zainteresowania”) to definicja tej części obiektu, która jest istotna dla badania, skutkująca odrzuceniem (lub brakiem akwizycji) danych o pozostałej części obiektu.

2.3. Analiza wymagań w badaniach RE obiektów artystycznych

Za „obiekty artystyczne” można uznać dzieła sztuki, także użytkowej, oraz obiekty architektoniczne. Cele badań takich obiektów w inżynierii odwrótej mogą być zarówno szlachetne, np. chęć zachowania dziedzictwa kulturowego, jak i bardziej merkantylne, np. uruchomienie produkcji wyrobów o kształcie geometrycznym nawiązującym do istniejących dzieł sztuki lub inwentaryzacja obiektów budowlanych.

W wielu publikacjach (np. [92, 96, 130, 146, 164, 185, 186, 193, 194, 200, 205, 206, 214]) przedstawiono przykłady badań obiektów artystycznych, w których celem jest archiwizacja ich modeli 3D (rys. 2.32). Najpopularniejszymi technikami pomiarowymi są w takich badaniach skanery z oświetleniem strukturalnym, skanery laserowe średniego lub dalekiego zasięgu i systemy fotogrametryczne.



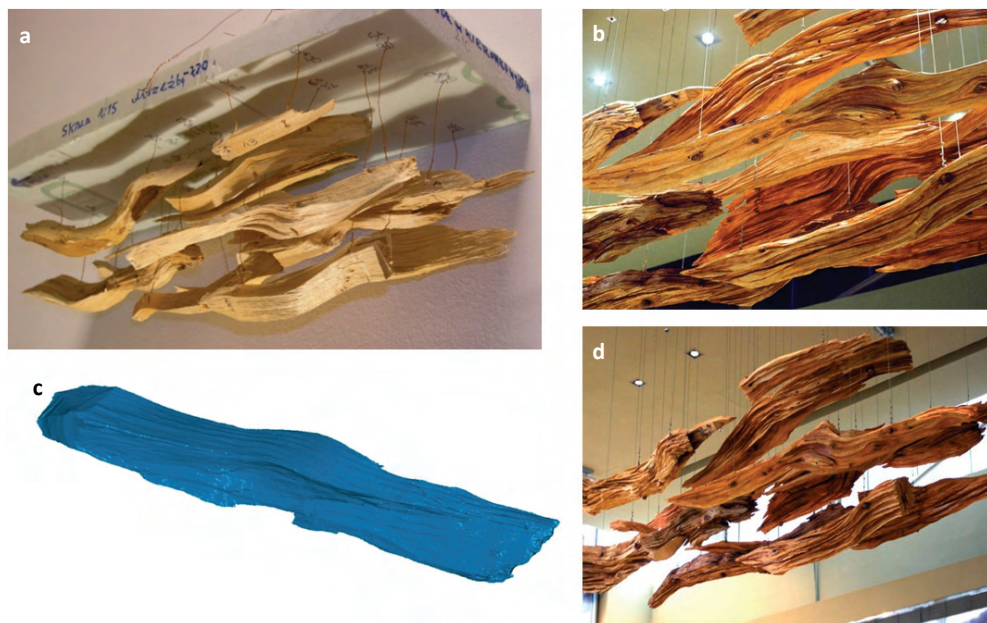
Rys. 2.32. Fasada Baha'i Center w San Francisco – rezultat projektu inwentaryzacji starych kościołów za pomocą skanowania laserowego [200]

Do tej grupy obiektów można zaliczyć także budynki, w tym przemysłowe – ośrodki zajmujące się badaniami obiektów architektonicznych opracowują narzędzia i metody, które można stosować także do analizy deformacji ustrojów nośnych budowli [136] lub oceny postępów prac budowlanych [30].

Do tej kategorii zastosowań inżynierii odwrótej można też zaliczyć coraz popularniejsze rejestracje kryminalistyczne, w których badane są sceny przestępstw i wypadków (np. [79, 150]), analizowane później w systemach komputerowych.

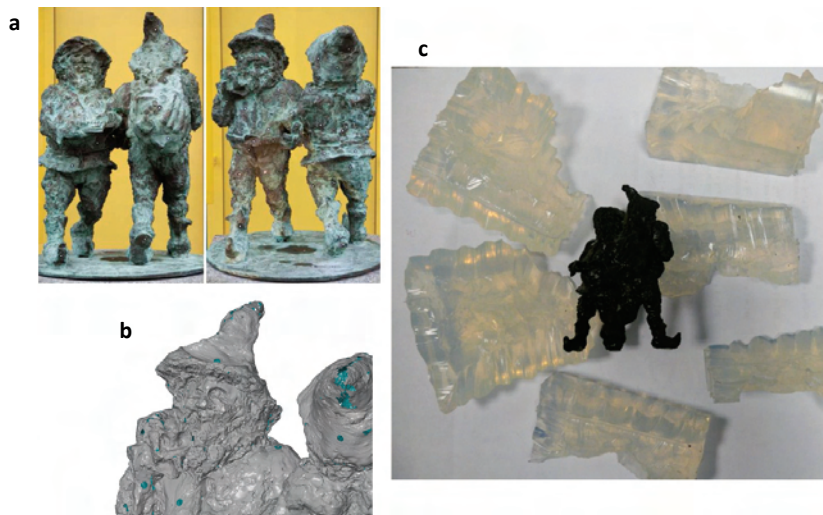
Projekty badań obiektów artystycznych realizowane w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING – z racji technologicznego profilu całego centrum badawczego – dotyczą przede wszystkim tworzenia komputerowych modeli 3D dzieł sztuki w celu opracowania dokumentacji wykonawczej ich „replik”:

- na rysunku 2.33 zilustrowano projekt polegający na digitalizacji pomniejszonej makiety rzeźby i utworzeniu jej modelu 3D, który posłużył do wydrukowania szablónów pomocnych w budowaniu powiększonej do kilku metrów rzeźby w wersji ostatecznej,
- na rysunkach 2.34, 2.35 i 2.36 przedstawiono projekty polegające na digitalizacji dzieł sztuki, co umożliwiło wytworzenie w technologiach przyrostowych ich pomniejszonych replik do celów marketingowych,
- na rysunku 2.37 przedstawiono projekt rekonstrukcji uszkodzonego dzieła sztuki użytkowej polegający na digitalizacji zachowanego egzemplarza i komputerowego modelowania do odtworzenia kształtu idealnego.



RE	Pomiar 3D		Efekt przetwarzania	
	Szacowana niepewność: 0,06 mm		Struktura końcowa: siatka trójkątów	
	Postać danych: siatka trójkątów		Liczba elementów: 5 583 140	

Rys. 2.33. Digitalizacja kilkunastocentymetrowego modelu rzeźby (zdjęcie – a i model powierzchniowy fragmentu rzeźby – c) w celu opracowania dokumentacji wykonawczej jej kilkumetrowej wersji ostatecznej (b, d) (oprac. własne)



RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,068 mm	Struktura końcowa: siatka trójkątów
	Postać danych: siatka trójkątów	Liczba elementów: 1 827 986

Rys. 2.34. Digitalizacja rzeźby pary wrocławskich krasnoludków Wrati i Slawi (rzeźba – a i jej model 3D – b) w celu wykonania jej skalowanej repliki (c) [163]



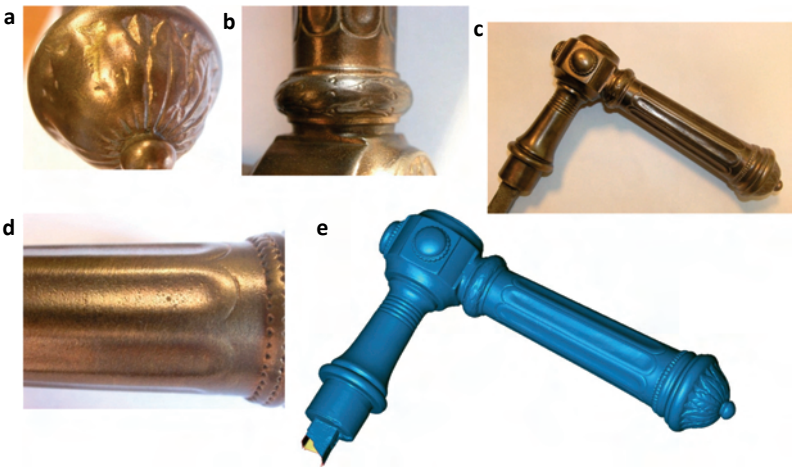
RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Postać danych: siatka trójkątów	Struktura końcowa: siatka trójkątów
		Liczba elementów: 3 529 099

Rys. 2.35. Digitalizacja posągu z użyciem skanera dalekiego zasięgu (a) w celu opracowania modelu 3D (c) do wytwarzania skalowanych replik (b) (oprac. własne)



RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Postać danych: siatka trójkątów	Struktura końcowa: kolorowa siatka trójkątów
		Liczba elementów: 87 437 861

Rys. 2.36. Digitalizacja budynku sakralnego z użyciem skanera dalekiego zasięgu w celu wytworzenia kolorowej makiety metodą drukowania 3D (oprac. własne)



RE	Pomiar 3D	Efekt przetwarzania
	Szacowana niepewność: 0,06 mm	Struktura końcowa: model powierzchniowy 3D
	Postać danych: siatka trójkątów	

Rys. 2.37. Digitalizacja zniszczonej zabytkowej klamki (a–d) w celu opracowania jej wyidealizowanego modelu komputerowego (e) i wytworzenia „odświeżonej” wersji (oprac. własne)

W badaniach obiektów artystycznych efektem końcowym są najczęściej chmury punktów, niekiedy „kolorowe” (rozdz. 6.3.5). Takie modele nadają się zarówno do archiwizacji kształtów (są dokładne, bo pozbawione odchyłek, które pojawiłyby się w konwersji do modeli o bardziej złożonej strukturze), jak i – po konwersji do siatek trójkątów – do wytwarzania replik w skomputeryzowanych technologiach wytwórczych (np. metodami generatywnymi).

Trudne do badań w inżynierii odwrotnej są obiekty artystyczne o dużych rozmiarach (rzeźby, zabytkowa architektura), kiedy wymagane jest rejestrowanie wszystkich szczegółów, łącznie z teksturą powierzchni (styl rzeźbiarza często się w takich szczegółach ujawnia) – w technikach pomiarowych przeznaczonych do pomiaru kształtów obiektów o dużych rozmiarach, np. skanerach średniego i dalekiego zasięgu, dokładność sięga wielu milimetrów, a rejestracja tekstury wymaga dokładności submilimetrowej. Rozwiązaniem może być łączenie pomiarów dwiema lub więcej technikami, z dodaniem do wyników badania makroskopowego wyników badań lokalnych szczegółów z pomocą techniki mikroskopowej. Metodyka takich badań „hybrydowych”, łączących wyniki pomiarów z użyciem wielu technik, była przedmiotem pracy doktorskiej realizowanej w LRE [27].

3. Cel pracy

Celem naukowych prac autora w dziedzinie inżynierii odwrotnej jest opracowanie metod badania obiektów fizycznych (technicznych, biomedycznych, artystycznych i innych), w których rezultatom można przypisać pewną całościową **miarę jakości**. Badania w inżynierii odwrotnej składają się z dwóch etapów: pomiaru kształtów obiektu fizycznego i przetwarzania danych pomiarowych, więc taka miara powinna uwzględniać zarówno jakość (w znaczeniu pewności i adekwatności) zastosowanego sposobu pomiaru, jak i jakość (w znaczeniu integralności i wierności) zastosowanego sposobu przekształcania danych 3D.

Wprowadzenie takiej miary pozwoliłoby na ocenę efektywności różnych scenariuszy badań w inżynierii odwrotnej, porównywanie różnych sposobów na dojście do takich samych rezultatów końcowych oraz weryfikację znanych wyników badań RE przez powtórzenie takich samych procesów w porównywalnych warunkach.

Proponowana przez autora w niniejszej monografii miara nawiązuje do **spójności pomiarowej** (*traceability*¹¹) wymaganej od wszelkich certyfikowanych działań badawczo-pomiarowych. Autor postuluje rozszerzenie wymagania spójności od samego procesu pomiaru na cały łańcuch procesów w inżynierii odwrotnej tak, aby **spójność badania w inżynierii odwrotnej** zapewniała możliwość odtworzenia i oceny całego przebiegu badania RE – pomiarów i przetwarzania danych.

Podobnie jak dla zapewnienia spójności **pomiarów** wielkości geometrycznych rejestrowane muszą być zastosowane techniki pomiarowe i warunki pomiarów, w kolejnych krokach **przetwarzania danych 3D** także powinny być rejestrowane metody przekształceń i ich skutki – zarówno w odniesieniu do zmian współrzędnych geometrycznych w modelach 3D, jak i zmian struktury tych modeli. Od zapisu i transferu danych z pomiaru, przez konwersję danych z każdej postaci strukturalnej na inną i w ramach przetwarzania danych w każdej z tych postaci, aż do uzyskania oczekiwa-

¹¹ *Traceability* oznacza dosłownie „możliwość bycia śledzonym” i może odnosić się do możliwości „prześledzenia” pochodzenia jakiejś rzeczy lub zjawiska od ich źródeł. W literaturze metrologicznej takim „źródłem” są wzorce miar i w tym sensie spójność metrologiczna oznacza możliwość odniesienia wyników pomiarów do wzorców (metra, sekundy czy kilograma).

nej końcowej struktury danych 3D – rejestrowane powinny być wszelkie **zmiany danych** w znaczeniu:

1. **Współrzędnościowym** – w postaci pojedynczej liczby rzeczywistej (reprezentatywnej dla zmian położenia wszystkich punktów opisujących kształt 3D), profilu/profilu odchyłek (zmian w przebiegu konturów opisujących kształt 3D), mapy odchyłek (zmian w przebiegu powierzchni opisujących kształt 3D) lub trójwymiarowego pola skalarnego odchyłek (zmian w kształcie brył opisujących kształt 3D); wartości tych wskazań są wyrażane w jednostkach długości, najczęściej w milimetrach.
2. **Strukturalnym** – przez określenie wejściowego i wyjściowego typu i liczby składników danych 3D (mogą to być elementy 0-, 1-, 2- lub 3-wymiarowe, czyli odpowiednio: punkty, kontury, powierzchnie lub bryły – patrz rozdział 6) oraz wskazanie rodzaju operacji przekształcających dane (konwersja, transfer lub inne przetworzenie), np.

identyfikacja
 prymitywów¹²
 geometrycznych:
walców i płaszczyzn

siatka trójkątów $\longrightarrow$ model powierzchniowy 3D (NURBS)

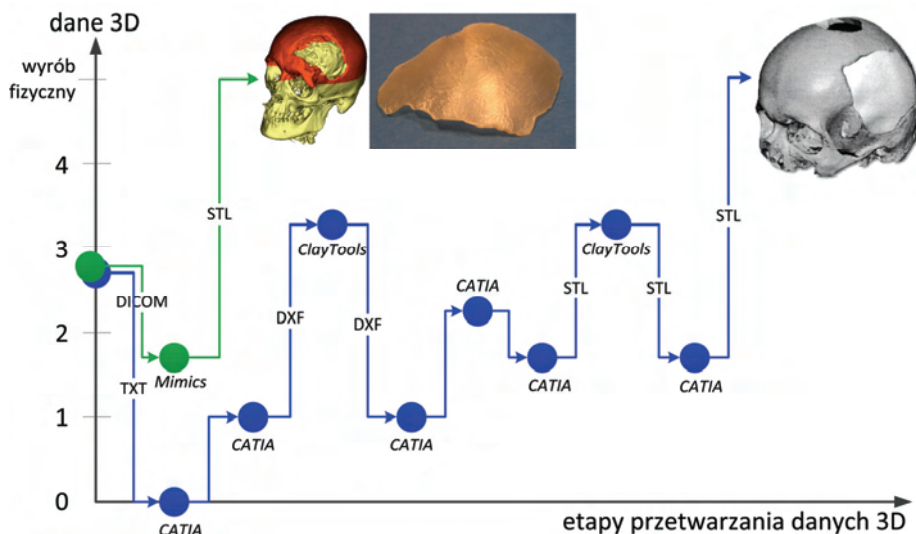
Dzięki takim zapisom rezultaty badań w RE mogłyby podlegać ocenie pod względem **jakości i integralności danych 3D**. Podobnie jak w pomiarach dowolnej wielkości fizycznej – jeśli wynik nie wskazuje na poziom jego „pewności”, może być uznany za bezużyteczny – tak samo model geometryczny 3D utworzony w badaniach inżynierii odwrotnej jest niepełnowartościowy, jeśli jest pozbawiony informacji o tym jak powstał, jak bardzo się różni od swojego fizycznego źródła oraz jakim operacjom był poddawany. Nie można takiego „niepewnego” modelu z pełną odpowiedzialnością użyć do weryfikacji obliczeniowej krytycznych elementów konstrukcji mechanicznej czy przewidywania skuteczności ważnego dla zdrowia pacjenta urządzenia medycznego.

Dobłą ilustracją konieczności wdrożenia działań zapewniających spójność badań w RE jest zestawienie dwóch opisanych w literaturze¹³ projektów podobnego typu – wykorzystujących dane zebrane z anatomii pacjentów do opracowania implantów dopasowanych do kości czaszki (rys. 3.1). Każdy z projektów rozpoczął się od akwi-

¹² „Prymityw geometryczny” to podstawowy element modeli geometrycznych, w przypadku modeli 3D są to elementy bryłowe, np. kostka, klin, kula, walec i stożek, lub powierzchniowe – oprócz wymienionych w tekście powierzchni walcowych i płaszczyzn także powierzchnie stożkowe, kuliste, torusowe, elipsoidalne itp.

¹³ Autor podaje ich dane bibliograficzne w innych rozdziałach pracy.

zycji danych w medycznym tomografie komputerowym i zakończył wytworzeniem prototypu implantu do kranioplastyki. Projekty zostały opisane na tyle szczegółowo, że udało się z dużym *prawdopodobieństwem* odtworzyć zastosowane narzędzia oraz formaty i struktury danych. Żaden z autorów nie oceniał zgodności geometrycznej modelu implantu z pierwotnym kształtem ubytku w kości pacjenta, można jednak sądzić, że jeden z modeli wynikowych musiał być mniej dokładny niż drugi, ponieważ jego dane 3D podlegały większej liczbie przetworzeń, konwersji i transferów, które – chociaż pozwoliły na uwzględnienie w kształcie implantu istotnych aspektów podnoszących jego funkcjonalność (np. lepszą ergonomię i skuteczne mocowanie implantu do kości) – to na pewno wniosły też więcej niepożądanych odchyłek w tych fragmentach kształtu implantu, które miały pozostać dopasowane do kości. Jednak bez wdrożenia **metodyki spójności** takich projektów nie można wprost porównywać – autorzy nie podali wszystkich wymaganych szczegółów dotyczących dokładności pomiaru i procesów przetwarzania danych.



Rys. 3.1. Porównanie przebiegu dwóch projektów wykorzystujących wyniki badań RE („poziomy struktury” danych 3D są opisane w dalszej części pracy) (oprac. własne)

Do realizacji celu, polegającego na opracowaniu i wstępnym wdrożeniu proponowanej metodyki, konieczne były następujące działania:

- opracowanie założeń **metodyki zapewnienia spójności badań** w inżynierii odwrotnej – przedstawiono je w rozdziale 4, razem z metodą planowania badań RE,
- dostosowanie **narzędzi oceny jakości pomiarów danych 3D** do opracowanej metodyki – w rozdziale 5 przedstawiono najważniejsze techniki pomiarowe

i metody obliczania jakości uzyskiwanych w tych technikach danych za pomocą pojęcia „niepewności pomiaru”,

- opracowanie **narzędzi oceny jakości procesów przekształcania danych 3D** dla opracowanej metodyki – w rozdziale 6 przedstawiono metody przetwarzania danych 3D na różnych poziomach ich struktur oraz sposoby obliczania zmian w tych danych w efekcie różnych przekształceń,
- przeprowadzenie przykładowych **wdrożeń** opracowanej metodyki – w rozdziale 7 przedstawiono kilka projektów o charakterze reprezentatywnym dla działalności LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING, w których zastosowano przygotowane narzędzia,
- ocena **efektów** zastosowania metodyki w przedstawionych przykładach i wniośki dotyczące dalszych prac badawczych w tym temacie – w rozdziale 8 przedstawiono takie podsumowanie i wskazano kierunki do kontynuacji badań.

4. Metodyka zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej

Badania techniczne i naukowe powinny się cechować obiektywnością, pewnością i możliwością ich powtórzenia w innych laboratoriach. Dla badań przemysłowej inżynierii odwrotnej mechanizmem zapewniającym te cechy może być proponowana w niniejszej pracy metodyka spójności.

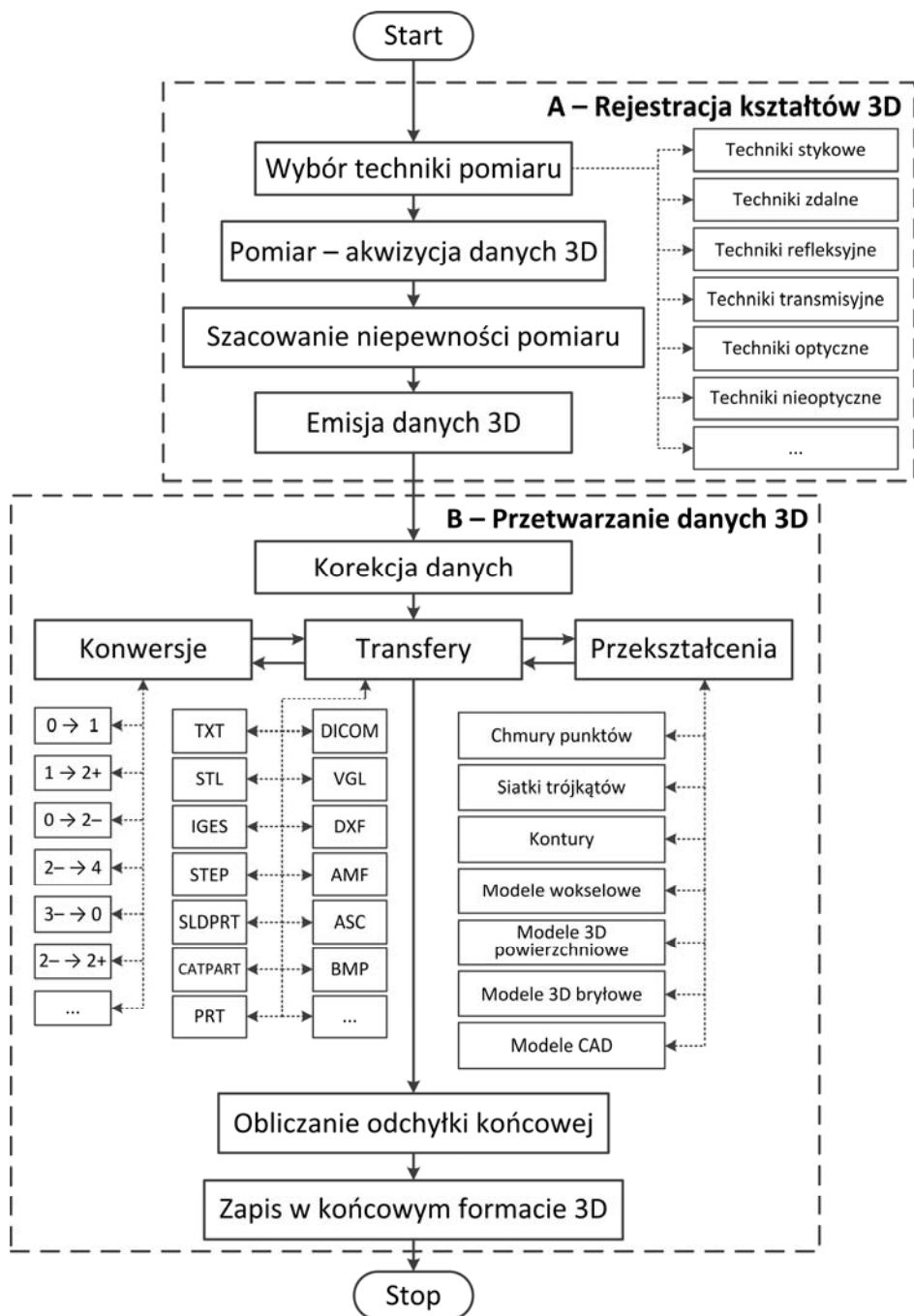
Typowe zadanie inżynierii odwrotnej można podzielić na dwa etapy (rys. 4.1):

- A. Rejestracja kształtów 3D, czyli pomiar cech geometrycznych badanego obiektu fizycznego odpowiednimi technikami.
- B. Przetwarzanie danych pomiarowych z użyciem różnych algorytmów i programów.

Na etapie **rejestracji kształtów** obiektu fizycznego, badany obiekt jest mierzony z zastosowaniem urządzenia pomiarowego (skanera 3D) i rezultaty pomiaru są przez oprogramowanie skanera zapisywane w postaci albo chmury punktów lub siatki trójkątów (rozdz. 6) – jeśli badana jest tylko powierzchnia zewnętrzna obiektu, albo w postaci zestawu obrazów przekrojowych – jeśli badana jest cała objętość obiektu. Proces pomiaru kształtu 3D jest często określany jako „digitalizacja”, jako że polega na przetworzeniu kształtu fizycznego obiektu, traktowanego w tej skali jako „analogowy”, na jego cyfrowy model. Ważnym elementem procesu pomiaru jest obliczenie jego niepewności (podrozdz. 4.2.1).

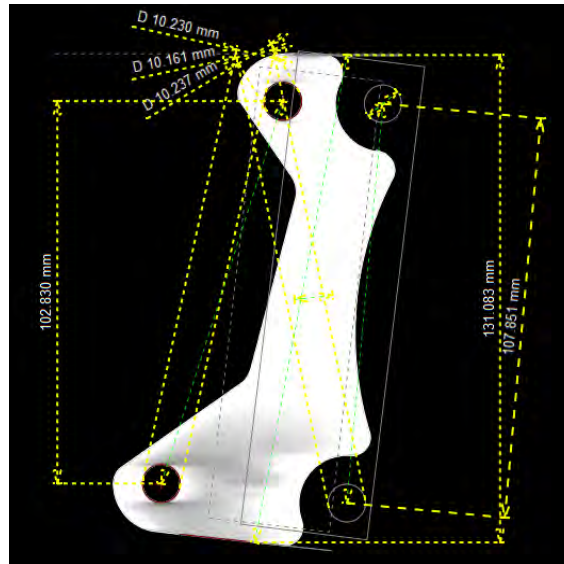
Na etapie **przetwarzania danych** forma pierwotnych danych uzyskanych z pomiaru jest zamieniana na formę adekwatną dla sposobu dalszego wykorzystania wyników badań inżynierii odwrotnej, niekiedy wymaga to wielu kolejnych kroków realizowanych w różnych środowiskach programowych. Formy końcowe wyników badań RE to np.:

- **raport pomiarowy**, potwierdzający zgodność wskazanych cech geometrycznych obiektu ze specyfikacją określoną w jego konstrukcji – podobnie jak w typowych zadaniach współrzędnościowej techniki pomiarowej [100]; w inżynierii odwrotnej jednak pomiary wykonywane są bez dostępu do obiektu, w trybie *off-line* – na bazie danych cyfrowych pozyskanych wcześniej (chmur punktów lub siatek trójkątów ze skanerów stykowych lub optycznych albo modeli wokselowych z tomografii komputerowej); przykład takiego raportu pokazano na rys. 4.2;



Rys. 4.1. Przebieg badania w inżynierii odwrotnej (oprac. własne)

Name	Type	Source	Value [mm, deg]	Nominal [mm, deg]	Tolerance neg. [mm, deg]	Tolerance pos. [mm, deg]	Status
Feature 1	Distance	Circle 1	107.851	108.00	0.10	0.10	Out of tolerance band
Feature 2	Diameter	Circle 1	10.079	10.25	0.05	0.05	Out of tolerance band
Feature 3	Diameter	Circle 2	10.161	10.25	0.05	0.05	Out of tolerance band
Feature 4	Diameter	Cylinder 1	10.230	10.25	0.05	0.05	OK
Feature 5	Diameter	Cylinder 2	10.237	10.25	0.05	0.05	OK
Feature 6	Distance	Plane 1	18.004	18.00	0.01	0.01	OK
Feature 7	Distance	Plane 3	131.083	131.00	0.10	0.10	OK
Feature 8	Distance	Cylinder 1	102.830	103.00	0.10	0.10	Out of tolerance band



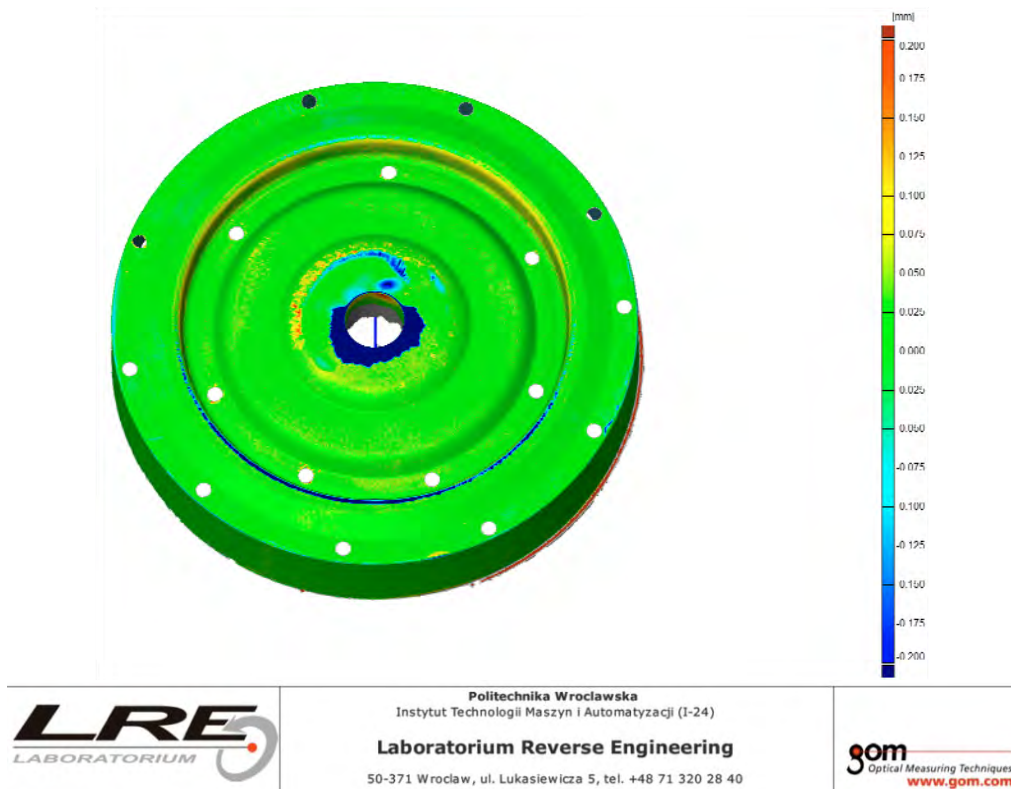
Rys. 4.2. Automatycznie generowany raport pomiarowy z badań obiektu przy zastosowaniu techniki tomografii komputerowej (program jest angielskojęzyczny, więc raport także¹⁴). W ostatniej kolumnie wniosek o zgodności (OK) lub niezgodności wymiaru ze specyfikacją (*Out of tolerance band*).

Taki raport nie uwzględnia niepewności pomiaru (oprac. własne)

- trójwymiarowa **mapa odchyłek** między kształtem zmierzonego obiektu i wybranym wzorcem, np. modelem konstrukcyjnym CAD lub wynikiem pomiaru elementu wzorcowego; taka mapa przydatna jest na przykład w kontroli jakości procesów produkcyjnych dla wyrobów o kształtach swobodnych, trudnych lub

¹⁴ Name = Nazwa, Type = Typ, Source = Źródło, Value = Wartość, [mm, deg] = [milimetry lub stopnie], Nominal = Wartość nominalna, Tolerance neg. = Odchyłka ujemna, Tolerance pos. = Odchyłka dodatnia, Status = Wynik, Feature = Obiekt, Diameter = Średnica, Circle = Okrąg, Cylinder = Walec, Plane = Płaszczyzna, Out of tolerance band = Poza polem tolerancji, OK = Wewnątrz pola tolerancji

niemożliwych do opisania tylko zestawem wymiarów liniowych i kątowych¹⁵; przykład na rys. 4.3;

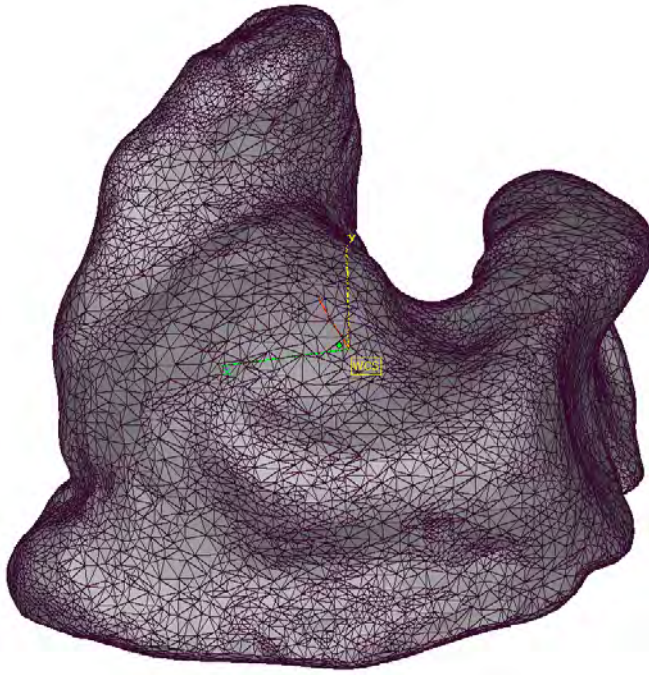


Rys. 4.3. Przykładowa mapa odchyłek między modelem zmierzonym a wzorcem (obiekt: matryca kuźnicza, technika pomiaru: optyczna) (oprac. własne)

- **siatka trójkątów**, wystarczająca np. do wytworzenia kopii mierzonego obiektu w technologiach sterowanych komputerowo: skrawaniu szybkościowym¹⁶ lub w jednej z metod generatywnych; siatka może być zoptymalizowana – przez zmniejszenie jej zagęszczenia, wygładzenie i relaksację lub usunięcie jej nadmiarowych fragmentów (rozdz. 6.6.2); przykład na rys. 4.4;

¹⁵ Po angielsku takie porównania wyników pomiarów obiektu ze wzorcem nazywają się porównaniami *actual-nominal* („rzeczywisty–nominalny”), a po niemiecku *soll-ist* („powinno być – jest”).

¹⁶ Skrawaniu z dużymi prędkościami, znanym z literatury jako HSC (*High Speed Cutting*) lub HSM (*High Speed Machining*).



Rys. 4.4. Przykładowa siatka trójkątów z pomiarów RE
(obiekt mierzony: wycisk z kanału usznego człowieka, technika pomiaru: optyczna) (oprac. własne)

- model **powierzchniowy 3D**, **bryłowy 3D** albo „pełny” **model CAD** – takie modele umożliwiają pracę nad projektem w środowisku inżynierskim CAX, np. w celu opracowania zmodyfikowanej konstrukcji wyrobu (CAD), przygotowania technologii jego wytwarzania (CAM) lub wykonania obliczeń symulacyjnych (CAE).

W praktyce laboratoryjnej, np. w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING na Politechnice Wrocławskiej, etap pomiaru i etap przetwarzania danych traktowane są niekiedy jako samodzielne zadania. Można proces pomiaru kształtu wykonać dowolną z dostępnych metod pomiarowych i zakończyć badanie przekazując końcowy model w postaci „surowej” chmury punktów, można też przeprowadzić tylko proces przetwarzania na danych pochodzących z innego źródła. Obydwa etapy mogą mieć swoje wskaźniki jakości i kryteria spójności, chociaż celem autora było ich ujednolicenie.

Jeżeli dla etapu pomiarów przyjętym powszechnie wskaźnikiem jakości wyników jest niepewność pomiaru (zdefiniowana w podrozdziale 4.2.1), to nie ma ustalonych metod oceny rezultatów przetwarzania danych pomiarowych. A przecież każdy proces ich przetwarzania **nie jest dla jakości tych danych obojętny**. W literaturze na temat inżynierii odwrotnej często zwraca się uwagę na niepewność po-

miarów, ale rzadko na błędy powstające podczas przetwarzania danych od postaci chmury punktów, przez siatkę trójkątów, do modelu powierzchniowego NURBS czy „mapy odchyłek” między modelem zmierzonym i wzorcowym. Wręcz przeciwnie, niektórzy autorzy przedstawiają procesy rekonstrukcji danych RE zawierające wielokrotne przechodzenie między różnymi ich postaciami, nie dbając o przedstawienie skutków takich przejść (rys. 3.1). Niektóre publikacje odnoszą się do zachowania dokładności w wybranych przekształceniach (np. [184, 254]), ale w żadnej nie traktuje się tematu globalnie – pokazując metody zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej w całym łańcuchu jej procesów. Niniejsza monografia takie podejście wskazuje.

Proponowana metodyka zakłada zapewnienie spójności badania RE w trybie „Zaplanuj–Przeprowadź–Sprawdź”:

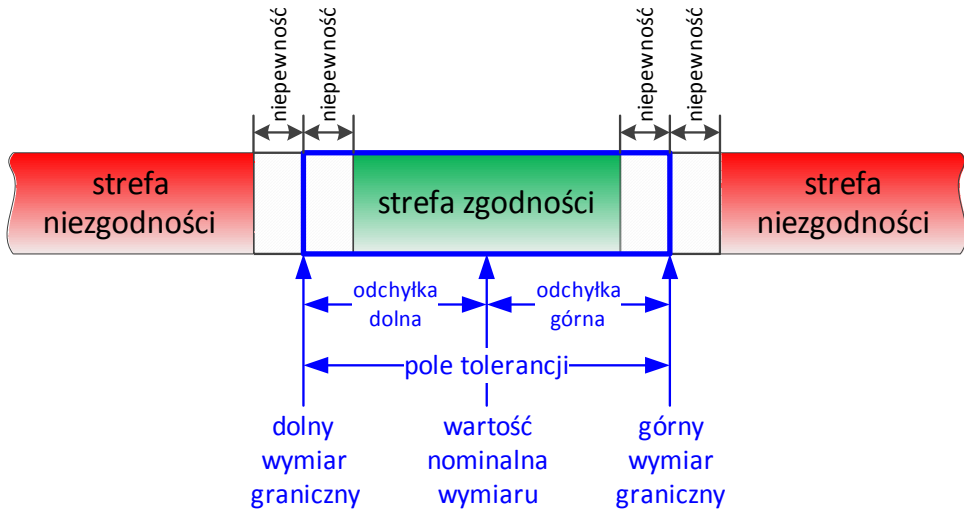
- **Zaplanowanie** badania, w tym wybór techniki pomiarowej i łańcucha procesów przetwarzania danych, bierze pod uwagę wymagania dotyczące rezultatów – oczekiwaną dokładność i końcową postać struktury danych.
- **Przeprowadzenie** badania według opracowanego planu musi zawierać obliczanie rzeczywistej niepewności pomiaru i wszystkich odchyłek podczas przetwarzania danych 3D oraz rejestrację wszystkich przekształceń.
- **Sprawdzenie** czy po zakończeniu badania obliczona suma niepewności i odchyłek spełnia wymagania dotyczące spodziewanych rezultatów – jeśli nie spełnia, badanie uznaje się za **niezgodne** i trzeba je albo powtórzyć z innym przebiegiem pomiaru (inne techniki) lub przetwarzania (inne programy lub algorytmy), albo uznać za niemożliwe do wykonania.

W podrozdziale 4.1 opisano wymagania, jakie należy zdefiniować dla końcowych wyników badań RE i których spełnienie należy zapewnić w realizacji jednego lub obydwu etapów badań. W podrozdziale 4.2 opisano kryteria doboru i oceny metod digitalizacji w procesach pomiaru, a w rozdziale 4.3 takie same kryteria dla procesów przetwarzania danych, w tym sposób obliczania wskaźników opisujących zmiany danych 3D. W podrozdziale 4.4 przedstawiono sposób sprawdzania i prezentacji rezultatów procesów inżynierii odwrotnej.

4.1. Analiza potrzeb

Planowanie zadań w inżynierii odwrotnej rozpoczyna się od analizy potrzeb pod kątem procesów, w których wyniki badania RE będą wykorzystywane. Istotną częścią tych rozważań jest także ocena samego obiektu i analiza oczekiwanej postaci strukturalnej modelu, który ma być utworzony lub zrekonstruowany. Wymagania końcowe w zakresie oczekiwanej jakości badań wyrażone są najczęściej przez wskaźnik nazywany ogólnie **dokładnością** i wyrażony w jednostkach długości, np. jak

w warunku „Oczekiwana dokładność ma być nie gorsza niż 0,1 mm”. W teorii niepewności pomiarów, przyjętej kilkanaście lat temu przez organizacje metrologiczne w miejsce teorii błędów pomiarów, w określaniu „dokładności” pomiarów stosuje się koncepcję ich „niepewności” (więcej w podrozdziale 4.2.1) i takie podejście jest stosowane w monografii.



Rys. 4.5. Zdolność pomiarowa badania zgodności ze specyfikacją wobec tolerancji badanej cechy geometrycznej (na podst. [211])

W przypadku dostępności dokumentacji technicznej obiektu, który ma być przedmiotem badania, dla sformułowania oczekiwań co do jakości badania można oprzeć się na określonych w dokumentacji konstrukcyjnej **tolerancjach** cech wymiarowych i kształtowych. Jeśli efektem badania ma być potwierdzenie zgodności jednej lub wielu cech badanego obiektu z dostępną „specyfikacją geometrii wyrobu” (GPS, *Geometric Product Specification*, patrz np. [100], [172]), należy wybrać taką metodę badania (technikę pomiarową i łańcuch procesów przetwarzania danych), aby całkowita niepewność była **znacząco mniejsza** niż tolerancja określona w dokumentacji (rys. 4.1). W przeciwnym razie strefa zgodności – obszar, decydujący o pozytywnym wyniku badania zgodności ze specyfikacją – będzie zbyt mały i potwierdzenie będzie trudne lub niemożliwe. Przyjmuje się, że niepewność powinna być co najmniej 5–10 razy mniejsza niż tolerowane odchyłki wymiarów (strefa zgodności będzie wówczas miała szerokość równą 80–90% pola tolerancji), chociaż wciąż dość prawdopodobna jest wówczas sytuacja, w której zgodności ze specyfikacją nie można ani potwierdzić ani zaprzeczyć („szara strefa”). W zaawansowanych technicznie przedsiębiorstwach (koncernach, takich jak Ford, Volkswagen lub Bo-

sch) są większe wymagania – stosunek wartości rozszerzonej niepewności pomiarów do szerokości pola tolerancji musi wynosić co najmniej 1:20 lub 1:30 [100]. Ten sam warunek w proponowanej metodyce powinien teraz dotyczyć niepewności całego badania RE.

W przypadku niedostępności dokumentacji konstrukcyjnej badanego obiektu można przygotować listę cech geometrycznych samodzielnie rozpoznanych w kształcie obiektu (najłatwiej rozpoznać prymitywy geometryczne: powierzchnie płaskie i zbudowane z nich wielościany lub powierzchnie obrotowe – walce, stożki lub torusy) i opracować wzór dla raportu pomiarowego, zawierający oczekiwaną niepewność badań dla każdej cechy i miejsce na wpisanie wyniku pomiarów i jego obliczonej niepewności. Takie postępowanie jest jednak pracochłonne i rzadko występuje w praktyce. Zwykle poprzestaje się na jednej wartości określającej oczekiwaną dokładność pomiaru wszystkich cech geometrycznych badanego obiektu.

Potrzeby co do **postaci strukturalnej** wyników końcowych badania wyraża się przez wybór jednej z dostępnych postaci, np. „raport pomiarowy”, „mapa odchyłek”, „siatka trójkątów” lub „model 3D”. Raport i mapa są zwykle dokumentami papierowymi (mogą być też udostępnione ich wersje elektroniczne), dla siatki i modelu 3D należy wskazać oczekiwany format zapisu danych wynikowych – dla siatki trójkątów zwykle jest to STL, dla modelu 3D – albo format neutralny (np. IGES, STEP), albo rodzimy konkretnego programu CAD (np. CATIA, PRO/ENGINEER, INVENTOR, SOLIDWORKS), w zależności od tego czy wymagany jest model 3D powierzchniowy lub bryłowy czy parametryczny i obiektowy model CAD.

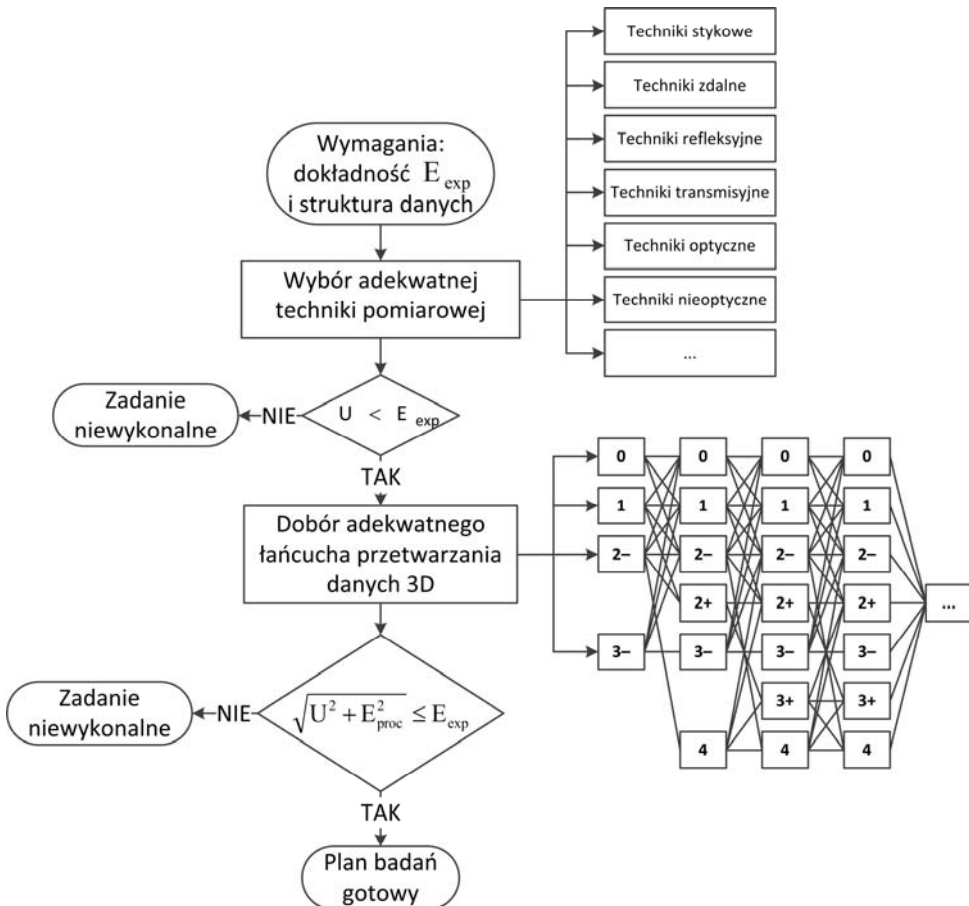
Oczekiwany wynik końcowy pośrednio wskazuje, jakie procesy przetwarzania danych pomiarowych należy zastosować, aby ten cel osiągnąć. Dla raportu pomiarowego wystarczy „surowe” dane pomiarowe, być może po drobnej „korekcie” (np. redukcja szumu, wygładzenie), wyeksportować do programu umożliwiającego optymalne dopasowanie wskazanych prymitywów geometrycznych i odczytanie ich obliczonych parametrów – średnic, długości czy kątów. W celu zbudowania pełnego modelu CAD konieczny jest dużo dłuższy łańcuch procesów przetwarzania (więcej w rozdz. 6).

Aby przetworzyć wymagania dotyczące rezultatów badania na plan badania w RE, należy wybrać taką technikę pomiaru badanego obiektu i taki łańcuch procesów przetwarzania danych pomiarowych prowadzący do oczekiwanej postaci końcowej wyników badania, żeby suma geometryczna rozszerzonej niepewności pomiaru (oznaczanej zwykle jako U)¹⁷ i rozszerzonej odchyłki przetwarzania (oznaczona jako E_{proc}) nie przekraczała oczekiwanej niepewności badania RE (tutaj – E_{exp}):

¹⁷ Oznaczenie: U jest skrótem od słowa *uncertainty* („niepewność”), E – od *error* („błąd”/„odchyłka”), *proc* – od *processing* („przetwarzanie”), a *exp* – od *expected* („oczekiwany”).

$$\sqrt{U^2 + E_{\text{proc}}^2} \leq E_{\text{exp}} \quad (4.1)$$

Wzór (4.1) podano w podrozdziale 4.3.1, a sposób obliczania rozszerzonej niepewności pomiaru – w podrozdziale 4.2.1 i rozszerzonej odchyłki przetwarzania – w rozdziale 6.1.1. Metodę planowania badania RE przedstawiono schematycznie na rys. 4.6.



Rys. 4.6. Planowanie badania w inżynierii odwrotnej na podstawie wymagań dla końcowej postaci i dokładności danych (oprac. własne)

4.2. Dobór metody digitalizacji 3D

Za obiektywną miarę spełnienia oczekiwań dotyczących jakości pomiaru przyjmuje się **niepewność pomiaru**, którą oblicza się dla każdego pomiaru według opra-

cowanego wcześniej algorytmu i której wartość zależy od warunków pomiaru, cech badanego obiektu, a nawet od konfiguracji urządzenia pomiarowego. Jej ostateczna wartość znana jest dopiero **w trakcie lub po zakończeniu pomiarów** (podrozdz. 4.2.1).

W poszukiwaniu techniki pomiarowej według planu opisanego na rys. 4.6 należy zatem odnosić się do danych historycznych – wartości niepewności obliczonych w **poprzednich** pomiarach podobnych obiektów:

- przeprowadzonych wcześniej w laboratorium planującym nowe badanie w ramach badań zleconych lub eksperymentów walidacyjnych,
- przeprowadzonych wcześniej w innym laboratorium wyposażonym w takie same lub podobne techniki pomiarowe – w ramach wymiany doświadczeń lub porównań międzylaboratoryjnych,
- dostępnych w literaturze przedmiotu.

W przypadku braku takich danych można posłużyć się znanymi z góry składnikami budżetu niepewności pomiaru, w tym **zdolnością urządzenia pomiarowego** (rozdz. 5.2). Uwzględniając jednak tylko wybrane składniki, dopuszcza się ryzyko, że obliczona ostatecznie po zakończeniu procesu pomiaru całkowita (złożona) niepewność badania przekroczy wartość oczekiwaną i trzeba będzie powtórzyć proces doboru techniki pomiarowej i procesów przetwarzania danych, a następnie wykonać nowe badanie, być może z wykorzystaniem innej techniki.

W doborze odpowiedniej techniki pomiarowej warto także wykorzystać dostępne w literaturze wskazówki praktyczne, pomagające w zawężeniu pola poszukiwań. W podrozdziale 4.2.3 opisano doświadczenia autora i jego współpracowników oraz innych badaczy zagadnienia.

4.2.1. Niepewność pomiaru

Międzynarodowe Biuro Miar w latach 70. XX w. zapoczątkowało prace nad ujednoliceniem sposobu określania niedokładności pomiarów. Efektem było opublikowanie w roku 1995 przewodnika *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* (tzw. GUM, [115], tłumaczenie polskie: [87]). Zastąpiono w nim obowiązującą wcześniej teorię „błędów pomiarów” nowym podejściem, w którym w celu określenia rozrzutu wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej, należy posługiwać się parametrem zwanym **niepewnością pomiaru** (*measurement uncertainty*).

Niepewność pomiaru U wskazuje przedział $[x - U, x + U]$ wokół zmierzonej wartości x danej wielkości fizycznej. Zgodnie z przyjętym poziomem prawdopodobieństwa, zwanym „ufnością”, w tym przedziale powinna się znajdować rzeczywista wartość wielkości mierzonej. Niepewność jest wyrażana w takich samych jednostkach, co wartość mierzona, w inżynierii odwrotnej są to jednostki długości. Ufność jest wyra-

zana tak jak prawdopodobieństwo – w jednostkach bezwymiarowych z przedziału $[0, 1]$, najczęściej w procentach, i powinna mieć dużą wartość, rzędu 95% lub 99%.

Przewodnik GUM zaleca dwie metody obliczania niepewności: metodę A i metodę B.

Metoda A jest metodą statystyczną. W wielkim uproszczeniu: dla pomiarów *bepośrednich*, przy założeniu, że *pojedyncza* mierzona wielkość X jest *ciągłą* zmienną losową o *rozkładzie normalnym* (co oznacza, że zakładany jest rozkład normalny błędów pomiarowych), jeśli prowadzone są *wystarczająco liczne* ($n > 30$) pomiary wielkości X i ich wyniki są oznaczone przez $x_1, x_2, \dots, x_n$, to za rezultat pomiaru przyjmuje się wartość średnią z tych pomiarów:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2)$$

a za **standardową niepewność pomiaru** $u(X)$ – jej estymator w postaci odchylenia standardowego wartości średniej:

$$u(X) \approx \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (4.3)$$

Wartość **rozszerzonej niepewności pomiaru** jest wielokrotnością niepewności standardowej i zależy od założonego poziomu ufności wyniku pomiarów:

$$U(X) = k \cdot u(X) \quad (4.4)$$

Dla poziomu ufności 95% stosuje się współczynnik rozszerzenia $k = 2$ (wciąż przy założeniu rozkładu normalnego wielkości mierzonej), a dla poziomu 99% – współczynnik $k = 3$. Odpowiada to tzw. „przedziałom 2 sigma” lub „3 sigma” rozkładów normalnych.

Zgodnie z przewodnikiem GUM za wynik pomiaru powinno się przyjąć wartość złożoną z wartości średniej i rozszerzonej niepewności:

$$x = \bar{X} \pm U(X) \quad (4.5)$$

Pomiary w inżynierii odwrotnej mają charakter „masowych” pomiarów współrzędnościowych – w rezultacie pojedynczego pomiaru powstają setki, tysiące, a nawet miliony zmiennych, z których każda opisana jest trzema liczbami rzeczywistymi wyznaczającymi pozycję w układzie współrzędnych kartezjańskich. W takich pomiarach nie jest spełnionych wiele (wskazanych kursywą w poprzednim akapicie) założeń upraszczających do obliczeń statystycznych i metoda A obliczania niepewności bardzo się komplikuje:

- pomiary współrzędnościowe mają charakter *pośredni* – w zależności od techniki pomiarowej wyniki pomiaru (współrzędne punktów 3D) są pewnymi funk-

cjami pozycji na prowadnicach głowicy pomiarowej, kątów w przegubach luster odchylających promień lasera czy jasności pikseli w matrycach detektorów optycznych, a nawet rezultatem skomplikowanych algorytmów obliczeniowych, takich jak transformacje rekonstrukcyjne w tomografii,

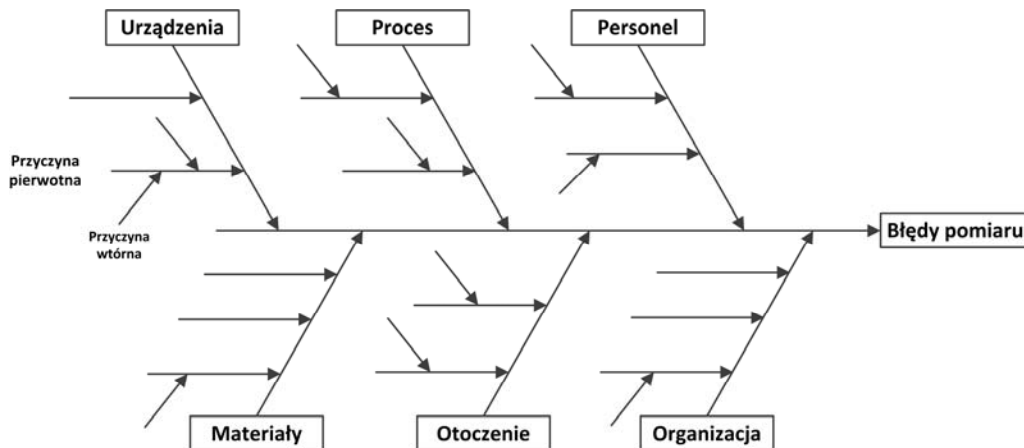
- mierzonych jest równocześnie *bardzo dużo* wielkości, co w obliczeniach statystycznych wymagałoby obliczania i uwzględniania ich wzajemnych korelacji,
- możliwość *wielokrotnego* powtarzania tych samych pomiarów dla osiągnięcia istotności statystycznej wyników jest bardzo ograniczona, choćby czynnikami ekonomicznymi – niektóre rodzaje pomiarów wymagają długiego czasu i kosztownego sprzętu, więc powtarzanie pomiarów współrzędnościowych tego samego obiektu kilkadziesiąt razy jest właściwie niemożliwe.

Dlatego w praktyce przyjęło się w obliczeniach niepewności pomiarów w inżynierii odwrotnej stosować **metodę B**, dopuszczoną przez przewodnik GUM [115]. Metoda ta polega na obliczaniu niepewności metodami innymi niż statystyczne – w obliczeniach bierze się pod uwagę poprzednie wyniki pomiarów, doświadczenia lub ogólną wiedzę na temat zachowania się i właściwości materiałów badanych obiektów oraz urządzeń pomiarowych, specyfikacje producentów urządzeń pomiarowych, wyniki procedur kalibracyjnych i wzorcujących, informacje z innych źródeł: przewodników, podręczników itp. [115].

W metodzie B tzw. **złożoną** niepewność pomiaru oblicza się według algorytmu zwanego „budżetem niepewności”. Składniki takiego budżetu wynikają np. z następujących aspektów procesu pomiaru:

- błędów wynikających z użycia danego urządzenia pomiarowego; decydujące są tutaj nie tylko cechy samego urządzenia, ale i przebieg procesu pomiaru z jego udziałem, np. użyty zakres urządzenia, wyposażenie, strategia pomiaru,
- charakterystyki badanego obiektu, np. jego możliwości odkształcania się podczas pomiaru, trudności w pokryciu go warstwą zapobiegającą odbłyskom światła itp.,
- warunków, w których następuje proces pomiarowy – wilgotność i temperatura otoczenia, mierzonego obiektu i urządzenia pomiarowego, wibracje, oświetlenie zewnętrzne itp.,
- wpływu czynnika ludzkiego, np. doświadczenia i kompetencji personelu w prowadzeniu pomiarów danego rodzaju,
- inne źródła błędów – w zależności od charakteru procesu pomiarowego.

Użytecznym narzędziem w budowaniu budżetu niepewności jest tzw. „diagram przyczyn i skutków” (*cause and effect diagram*, znany także jako diagram ryby lub diagram rybiej ości – *fishbone diagram*), opracowany w latach 60. XX w. przez Kaoru Ishikawę [111]. Diagram ma w założeniu służyć do ilustrowania związków przyczynowo-skutkowych (pomagając oddzielić przyczyny od skutków) i do zarządzania złożonością problemów. Na rysunku 4.7 podano diagram z głównymi przyczynami powstawania błędów w pomiarach współrzędnościowych, także w inżynierii odwrotnej.



Rys. 4.7. Diagram Ishikawy z głównymi źródłami błędów pomiaru (oprac. własne)

Jeśli źródła niepewności pomiaru, zidentyfikowane w ramach przeprowadzonych wcześniej tzw. **badania walidacyjnych** danego procesu pomiarowego, są od siebie niezależne, **złożoną** standardową niepewność pomiaru oblicza się jako sumę geometryczną:

$$u(X) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m (c_i u_i(X))^2} \quad (4.6)$$

której składniki $u_i(X)$ odpowiadają wszystkim zidentyfikowanym źródłom niepewności, a c_i , tzw. współczynniki wrażliwości, zależą od wpływu danego źródła na wartość mierzoną (ponieważ składniki są badane pod względem ich wpływu na zmianę wartości mierzonej i tak też wymiarowane, współczynniki c_i są równe 1). Dokument EA-4/02 [73] zaleca przygotowywanie tabeli ze składnikami budżetu niepewności (tab. 4.1).

Tabela 4.1. Budżet standardowej niepewności pomiaru

Wielkość składowa	Niepewność standardowa składnika	Współczynnik wrażliwości składnika	Udział składnika w złożonej niepewności standardowej
1	$u_1(X)$	c_1	$c_1 u_1(X)$
2	$u_2(X)$	c_2	$c_2 u_2(X)$
...	...	...	...
n	$u_n(X)$	c_n	$c_n u_n(X)$
Złożona niepewność standardowa			$u(X) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i u_i(X))^2}$

Składowe niepewności $u_i(X)$ można wyznaczyć eksperymentalnie lub obliczyć innymi metodami. W metodzie eksperymentalnej, jeśli wykonanych zostanie istotnie wiele pomiarów kontrolnych, za $u_i(X)$ należy przyjąć standardową niepewność takich pomiarów obliczoną ze wzoru (4.3). Jeśli dany składnik niepewności zostanie określony (np. metodą analityczną na podstawie modelu matematycznego jakiegoś zjawiska fizycznego) jako należący do przedziału zmienności $[a, b]$, to należy obliczyć jego niepewność częściową [5] w zależności od zidentyfikowanego rozkładu:

- normalnego (granice zmienności umowne, obliczone przy założonym poziomie ufności)

$$u_i(X) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{3} \frac{|b-a|}{2} & \text{dla poziomu ufności 0,99} \\ \frac{1}{2} \frac{|b-a|}{2} & \text{dla poziomu ufności 0,95} \end{array} \right\}, \quad (4.7)$$

- Simpsona (o kształcie trójkąta, rzeczywiste granice zmienności wskazane przez jego wierzchołki)

$$u_i(X) = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{|b-a|}{2} \quad (4.8)$$

- równomiernego (o kształcie prostokąta, rzeczywiste granice zmienności wskazane przez granice rozkładu)

$$u_i(X) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{|b-a|}{2} \quad (4.9)$$

- arcsin (o kształcie litery U, asymptotyczne granice zmienności)

$$u_i(X) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{|b-a|}{2} \quad (4.10)$$

Ze złożonej niepewności **standardowej** oblicza się złożoną niepewność **rozszerzoną**, mnożąc tę pierwszą przez współczynnik rozszerzenia (zgodnie ze wzorem (4.4)). Wartość współczynnika przyjmuje się w zależności od przewidywanego rozkładu kompozycji (splotu) rozkładów wszystkich składników budżetu niepewności:

- jeśli większość składników ma rozkład normalny lub składników jest stosunkowo dużo, można uznać rozkład splotu za normalny i zastosować współczynnik rozszerzenia $k = 2$ dla całkowitego poziomu ufności 0,95 lub $k = 3$ dla poziomu ufności 0,99,
- jeśli składników jest niewiele, należy uznać, że rozkład splotu jest zgodny z rozkładem t -Studenta i przyjąć współczynniki rozszerzenia z tablic/wzorów dla wybranego poziomu ufności, przy czym liczbę stopni swobody rozkładu t -Studenta można obliczyć z równania Welcha–Satterthwaite’a [5],
- w najgorszym razie należy wykonać symulacje kompozycji rozkładów składników i obliczyć współczynnik rozszerzenia metodą Monte Carlo [5].

W badaniach RE za wynik pomiaru, dokonanego za pomocą dowolnej techniki pomiarowej, należy uznać nie tylko sam model 3D (w dowolnej postaci), ale i rozszerzoną niepewność pomiaru, obliczaną jako niepewność złożona (wzory (4.6) i (4.4)) i określaną pojedynczą liczbą rzeczywistą, np. dla chmury punktów wynikiem badania będą punkty 3D (ich zbiór można oznaczyć jako $\mathbf{P}$) oraz wartość niepewności w postaci liczby rzeczywistej:

$$\{\mathbf{P} \subset \mathbb{R}^3, U(\mathbf{P}) \in \mathbb{R}\}, \quad (4.11)$$

co w praktyce może oznaczać plik komputerowy z zapisem punktów 3D w formacie ASCII i liczbę opisującą niedokładność pomiaru, taką samą dla każdego punktu, wymiarowaną w jednostkach długości, np. {"DETAL034.ASC", $\pm 0,64$ mm}. Powinno się także podawać wartość współczynnika rozszerzenia, zastosowanego do obliczenia niepewności rozszerzonej, chociaż w niniejszej pracy ustalono ją z góry na wartość 3 (patrz uwaga 20 na stronie 69).

W rozdziale 5 opisano sposoby konstruowania budżetów i obliczania niepewności pomiaru dla wybranych technik pomiarowych.

4.2.2. Jakość zapisu kształtu 3D

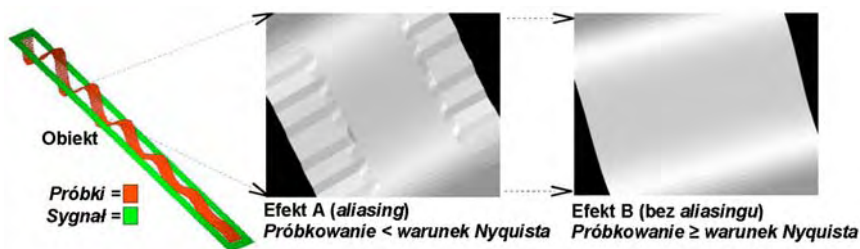
Pomiary kształtów 3D polegają na digitalizacji – konwersji analogowo-cyfrowej, ponieważ z domeny fizycznych kształtów (analogowej) obiekty przenoszone są w domenę modeli komputerowych (cyfrową). Jak każda taka konwersja proces ten stwarza ryzyko utraty części informacji lub wprowadzenia do niej zakłóceń. Teoria sygnałów (np. [149]) mówi o dwóch źródłach błędów dyskretyzacji: błędach próbkowania i błędach kwantyzacji.

Błąd próbkowania wynika z niewłaściwego doboru częstotliwości próbkowania – jeśli jest ona mniejsza niż tzw. częstotliwość Nyquista [203], równa dwukrotności największej częstotliwości próbkowanego sygnału, to pierwotnego sygnału nie da się całkowicie odtworzyć z pobranych próbek (ilustracja dla prostego sygnału jednowymiarowego – rys. 4.8).



Rys. 4.1. Wpływ częstotliwości próbkowania na jakość rekonstrukcji sygnału:
(a) – oryginalny sygnał prostokątny, (b) – sygnał odtworzony kolejno z: dwóch,
czterech, ośmiu i szesnastu równoodległych próbek (oprac. własne)

W przypadku pomiarów kształtów 3D „próbkami” są punkty w przestrzeni 3D, a „częstotliwości próbkowania” odpowiada gęstość tych punktów – warunek Nyquista można zatem przeformułować w wymaganie dla minimalnej gęstości punktów: aby uniknąć zniekształceń kształtu (*aliasing*), odległości między punktami pomiarowymi powinny być dwukrotnie mniejsze niż długość najmniejszej krawędzi najdrobniejszego „szczegółu” mierzonego kształtu (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Gęstość próbkowania punktów 3D a kryterium Nyquista wg [35]

Jeśli gęstość punktów pomiarowych jest mniejsza niż nakazuje warunek Nyquista, można mówić o wynikach pomiaru obiektu, że są niedostatecznie gęsto spróbkowane (*undersampled*). Szacunek niepewności pomiaru należy w takich przypadkach rozszerzyć o błędy, które mogą wynikać z niezarejestrowania wszystkich szczegółów mierzonego obiektu. Ich wartość jest zależna od kształtu danego obiektu, a przez analogię do pomiarów wielkości skalarnych za jej wartość można przyjąć **połowę odległości między punktami pomiarowymi**.

Efektom występowania w danych 3D obszarów o niedostatecznej gęstości próbkowania są problemy w automatycznym wykrywaniu obiektów geometrycznych (rozdz. 6.3.3, 6.9.4). Istnieją metody wykrywania takich obszarów [59, 60], w których mimo to można skutecznie odtwarzać ostre krawędzie między obiektami geometrycznymi. Algorytmy takie zostały zaimplementowane w niektórych programach użytkowych stosowanych w inżynierii odwrotnej.

Błąd kwantyzacji wynika z ograniczenia zbioru wartości reprezentujących próbkowany sygnał. W pomiarach kształtów 3D pozycje punktów pomiarowych w przestrzeni rejestrowane są w postaci trzech liczb rzeczywistych, więc zbiór wartości dla każdej z nich jest duży – dla najkrótszych, 32-bitowych liczb zmiennoprzecinkowych pojedynczej precyzji liczba dziesiętnych cyfr znaczących wynosi 7–8, dla 64-bitowych liczb podwójnej precyzji liczba cyfr znaczących wynosi już 15–16, chociaż w konwersjach do formatu tekstowego (ASCII, STL) wszystkie liczby rzeczywiste zaokrągla się nawet do 5–6 cyfr dziesiętnych.

Zakładając najgorsze warunki (przetwarzanie na liczbach pojedynczej precyzji i/lub konwersję do formatu tekstowego) w przemysłowych badaniach RE najczęściej

spotykanych obiektów mechanicznych – o rozmiarach poniżej 1 metra, błąd kwantyzacji może mieć wartość kilku mikrometrów. Dla obiektów wielkogabarytowych, np. w pomiarach budynków skanerami średniego zasięgu, błąd kwantyzacji rośnie do kilku dziesiątych części milimetra. Jest to co najmniej o jeden rząd wielkości mniej niż wynosi typowa niepewność pomiarowa stosowanych urządzeń, ale mimo wszystko **należy uwzględnić ten błąd w budżecie niepewności pomiaru i/lub szacowaniu odchyłek w procesie przetwarzania danych**, albo przynajmniej wykazać, że jego wpływ na całkowitą niepewność może być pominięty.

W metodach transmisyjnych (rozdz. 5.1) rekonstrukcji struktur wewnętrznych obiektów, w których dane pomiarowe odnoszą się do właściwości materiału obiektów, a próbki pomiarowe są „pobierane” ze stałych pozycji (tak jest np. w tomografii komputerowej), błąd kwantyzacji zależy od zastosowanego detektora (rentgenowskiego w tomografii, optycznego w metodzie niszczącej itp.). Na przykład detektor tomografu METROTOM 1500 zainstalowanego w LRE rejestruje wartości intensywności promieniowania za pomocą 16-bitowych liczb całkowitych (od 0 do 65 535). Niedostatecznie duża liczba skwantowanych wartości mogłaby mieć negatywne skutki w operacji progowania (binaryzacji), wyznaczającej granice między fragmentami obiektu o różnych właściwościach, a co za tym idzie mogłyby pojawić się błędy w wyznaczaniu kształtów tych fragmentów. Błędy progowania są już częścią budżetu niepewności całego procesu pomiarowego w tych technikach, kiedy szacuje się wpływ wyboru wartości progowej, automatycznie lub przez operatora, na rezultaty badania (patrz np. rozdz. 5.6.1).

4.2.3. Inne aspekty w doborze technik pomiarowych

W praktyce nie tylko oczekiwana dokładność badań decyduje o wyborze techniki pomiarowej. Kształt i materiał obiektu także mogą mieć duże znaczenie. Nawet najbardziej dokładniejsza technika nie może być stosowana w każdej sytuacji. Jeśli zostanie użyta do pomiaru obiektów o niewłaściwych cechach materiałowych czy geometrycznych lub nie całkiem zgodnie ze swoim przeznaczeniem, nie zapewnia niepewności pomiaru lepszej od innej techniki, teoretycznie mniej dokładnej.

W literaturze można znaleźć wymagania dotyczące kryteriów doboru techniki pomiarowej w różnych obszarach zastosowań (np. w artykule [88], rys. 4.1) oraz oceny przydatności różnych technik w badaniach obiektów klasyfikowanych pod względem rozmiarów, stopnia skomplikowania kształtów oraz materiału i właściwości powierzchni zewnętrznych (np. w artykule [195], rys. 4.2).

Zastosowanie	Dokład- ność	Rozdziel- czość	Mobil- ność	Zasięg	Czas ustawień	Czas skanowania	Łatwość obsługi	Uniwer- salność
PRZEMYSŁ								
Benchmarking	●	●	◐	◐	◐	○	○	●
Archiwizacja cyfrowa	●	●	◐	●	◐	◐	○	●
Design	○	◐	○	○	◐	◐	●	◐
Modernizacja	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	●
Kopiowanie	●	●	◐	○	◐	◐	◐	●
Projektowanie	●	◐	○	◐	○	○	◐	●
Wytwarzanie narzędzi	●	◐	●	◐	○	○	○	◐
Wytwarzanie opakowań	●	●	○	◐	◐	◐	●	○
MEDYCYNĄ								
Aplikacje medyczne	●	●	○	○	◐	◐	●	○
OCHRONA DZIEDZICTWA KULTUROWEGO								
Ochrona zabytków	○	◐	●	●	●	●	●	◐
SZTUKA I ROZRYWKA								
Grafika	○	●	○	◐	○	◐	●	●

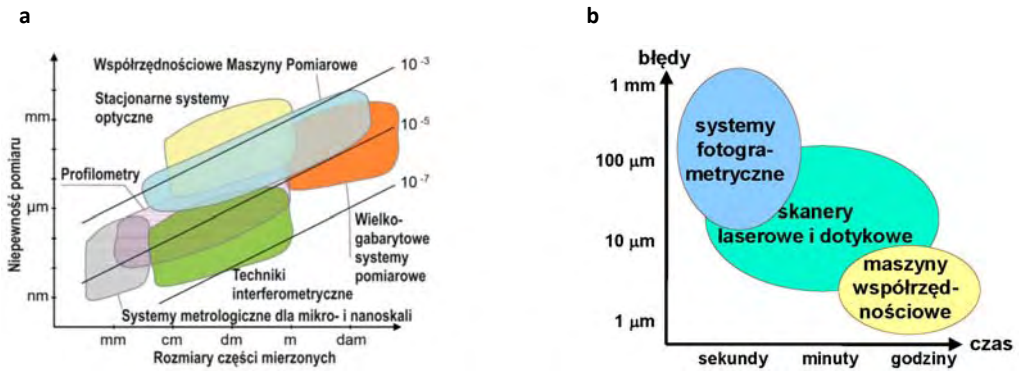
Legenda: ● – kryterium kluczowe, ◐ – kryterium drugorzędne, ○ – kryterium pomocnicze

Rys. 4.10. Wymagania dla technik pomiarowych w różnych zastosowaniach ([27] na podst. [88])

	Skanowanie laserowe trackery	Bezpośrednie porównanie	Skanowanie dotykowe CMM	Skanowanie optyczne CMM	Tomografia komputerowa	Systemy projekcji prążków	Deflektometria	Fotogrametria	Interferometria	Profilometria dotykowa	Profilometria optyczna	Mikroskopia konfokalna	Mikroskopia skaningowa
Wymiary obiektu													
duży	●	◐	●	●		◐		●	◐				
średni	●	◐	●	●		◐		●	◐				
mały			●	●	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	
mikro			◐	◐	●	◐	◐		●	●	●	●	◐
Stopień skomplikowania obiektu													
niski	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
średni	◐	◐	●	●		◐		◐		◐	◐	◐	◐
wysoki	◐		◐	◐	●								
Materiał/powierzchnia													
twarda, niepodatna	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
odkształcalna		◐	◐	●	●	●		●	◐	◐	●	●	●
błyszcząca	●	●	●		●		●	●	●	●		◐	●
przezroczysty	●	◐			●			●				◐	●
nieprzezroczysty	●	●	●	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	●

● - pełne dopasowanie ◐ - małe dopasowanie

Rys. 4.11. Ocena przydatności technik pomiarowych ([27] na podstawie [195])



Rys. 4.12. Obszary zastosowania technik pomiarowych: (a) klasyfikacja ze względu na wymiary obiektów i uzyskiwane dokładności (na podst. [195]), (b) klasyfikacja ze względu na różny czas pomiaru i uzyskiwaną dokładność (oprac. własne, [66])

Dla ogólnej orientacji w przydatności różnych technik pomiarowych w badaniach obiektów o różnych rozmiarach i z różną dokładnością autorzy publikacji [195] posłużyli się wykresem przedstawionym na rys. 4.12a. Dla porównania na rysunku 4.12b pokazano opracowaną przez autora niniejszej monografii prostą klasyfikację technik według nieco innych kryteriów: czasu pomiaru i możliwej dokładności w badaniach obiektów o rozmiarach kilkucentymetrowych.

Istnieje także wiele reguł **praktycznych** (czasem oczywistych, wynikających ze zdrowego rozsądku lub doświadczenia), które ułatwiają ograniczenie obszaru poszukiwań techniki pomiarowej adekwatnej dla planowanego zadania – obecna lista nie jest wyczerpująca:

1. Masa i gabaryty obiektu

- Wiele urządzeń pomiarowych charakteryzuje się ograniczeniami wynikającymi z ich konstrukcji lub użytych elementów wyposażenia, które uniemożliwiają badanie obiektów o rozmiarach lub masie przekraczających wartości dopuszczalne – procedury pomiarowe muszą zakładać przestrzeganie takich ograniczeń, określonych przez producentów urządzeń i opisanych w ich dokumentacji technicznej.

2. Struktura wewnętrzna obiektu

- Dla obiektów o jednolitej strukturze materiału lub takich, w których ta struktura jest nieistotna, domyślnym wyborem jest jedna z technik mierzących zewnętrzne powierzchnie (stykowe lub refleksyjne, podział technik – patrz rozdział 5). Unika się z reguły stosowania technik, które rejestrują strukturę (transmisyjnych, niszczących), gdyż zwykle ich użycie jest bardziej kosztowne.
- I odwrotnie – dla obiektów zbudowanych z niejednorodnego materiału lub będących złożeniem kilku elementów zamkniętych we wspólnej obudowie,

wyborem musi być jedna z technik transmisyjnych lub technika niszcząca (jeśli komponenty dają się unieruchomić).

- Wyjątek mogą stanowić obiekty o kształcie powierzchni zewnętrznych tak skomplikowanej, np. przez obecność wielu stosunkowo głębokich otworów lub kieszeni o wysokich ściankach (przykład w [67]), że pomiary technikami stykowymi lub refleksyjnymi byłyby bardzo pracochłonne (wymaganych byłoby nadmiernie wiele pozycji skanowania) lub wręcz niemożliwe.

3. Regularność kształtów obiektu

- Jeśli badany obiekt ma geometrycznie regularny kształt, a powierzchnia zewnętrzna (jeśli tylko ona jest istotna) składa się z fragmentów powierzchni płaskich lub obrotowych (takie elementy są np. efektem prostych procesów obróbki ubytkowej, jak toczenie i 3-osiowe frezowanie), to rekonstrukcja jego kształtu nie wymaga zbierania dużej liczby danych (punktów pomiarowych) podczas pomiarów – można wówczas zastosować technikę stykową/refleksyjną zbierającą dane o małej gęstości – przebieg regularnych powierzchni daje się w procesie przetwarzania danych odtworzyć z niewielu punktów, pod warunkiem rozpoznawania charakteru takich powierzchni przez człowieka na etapie rekonstrukcji modelu CAD (jeśli taki jest pożądanym efektem badań).
- Obiekty o nieregularnych (swobodnych) kształtach, np. obiekty pochodzenia naturalnego lub dzieła sztuki, powinny być mierzone z dużą gęstością danych, aby zagwarantować dobrą dokładność rekonstruowanych powierzchni – muszą być w tym celu wybrane takie techniki, które osiągają duże gęstości danych pomiarowych, a więc raczej techniki refleksyjne, np. optyczne z użyciem oświetlenia strukturalnego lub laserowe liniowe, niż techniki stykowe czy transmisyjne.

4. Materiał obiektu

- Jeśli badany obiekt zbudowany jest z materiału o małej twardości, należy unikać techniki stykowej, wymagającej nacisku na obiekt choćby niewielką siłą.
- Podobnie z obiektami zbudowanymi z materiału o małej sztywności lub bardzo dużej gęstości i przez swój wydłużony lub rozplaszczony kształt – „wiotkimi”, uginającymi się pod wpływem własnego ciężaru lub ruchów otaczającego powietrza – wykluczone jest stosowanie techniki stykowej, ale też należy rozważyć wykluczenie techniki wymagającej zbyt energicznego poruszania obiektem (np. tomografii komputerowej) lub ruchów urządzenia pomiarowego w bezpośredniej bliskości obiektów (np. ręcznych skanerów laserowych).
- Jeśli badany obiekt zbudowany jest z materiału o właściwościach fizycznych zmieniających się w czasie, np. materiału kurczącego się czy wysychającego (jak liść), co może spowodować zmiany w kształcie tego obiektu, należy poszukiwać techniki o dużej szybkości pomiaru, np. optycznej (fotogrametria).

Istnieją też reguły dotyczące kombinacji poszczególnych rodzajów technik pomiarowych i właściwości badanych obiektów, np.:

5. Techniki optyczne i powierzchnie refleksyjne

- Jeśli obiekt jest zbudowany z materiału przezroczystego lub jego powierzchnia jest bardzo refleksyjna, należy albo zrezygnować z techniki optycznej (laserowej, świetlnej), albo zastosować pokrycie powierzchni materiałem nieprzezroczystym i mało refleksyjnym (farba, matowy lakier, wywołывacz – jasny proszek nakładany metodą natryskiwania itp.), które jednak może zniekształcić wyniki pomiaru ze względu na obecność dodatkowej warstwy zmieniającej położenie i topografię powierzchni zewnętrznej obiektu, co należy uwzględnić w budżecie niepewności pomiaru.
- Istnieją metody umożliwiające precyzyjny pomiar powierzchni refleksyjnych, np. dzięki wstępnej znajomości kształtu mierzonego obiektu [182].

6. Obiekty żywe

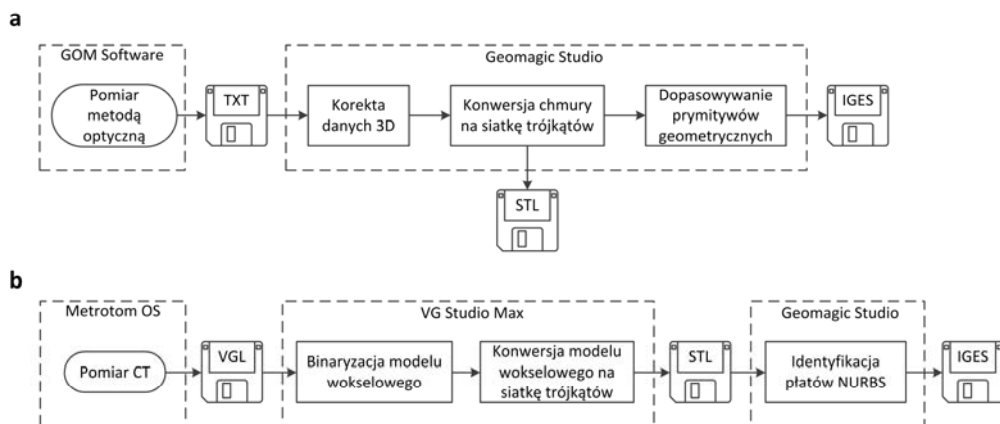
- Niedopuszczalne jest badanie obiektów ożywionych (roślin, a zwłaszcza zwierząt) metodą technicznej tomografii komputerowej ze względu na szkodliwość stosowanego tam intensywnego promieniowania rentgenowskiego.
- Spośród pozostałych technik pomiarowych należy wybrać taką, która jest nieszkodliwa dla zdrowia i życia badanego obiektu i która nie wymaga zbyt długiego czasu pomiaru – takie obiekty badań nie mogą zbyt długo pozostawać nieruchome.

4.3. Dobór metody przetwarzania danych pomiarowych

Obiektywną miarą spełnienia oczekiwań dotyczących jakości przetwarzania danych 3D jest wartość odchyłek danych 3D w ich końcowej postaci od danych uzyskanych w pomiarach. Taka odchyłka jest obliczana dla każdego łańcucha procesów przetwarzania i może mieć różne wartości w różnych projektach, zależnie od kształtów 3D badanych obiektów i wykorzystanych algorytmów dostępnych w stosowanych programach. Jej ostateczna wartość znana jest dopiero po zakończeniu przetwarzania (podrozdz. 4.3.1).

Łańcuch przetwarzania danych 3D rozpoczyna się od importu danych pomiarowych (bezpośredniego – w ramach oprogramowania skanera 3D zintegrowanego z modułami do przetwarzania danych lub pośredniego – przez odczyt danych zapisanych w pliku na dysku komputera przez oprogramowanie skanera 3D w jednym z formatów wymiany danych), a kończy na zapisie danych w postaci oczekiwanej dla wyników badań RE. Między tymi etapami przetwarzanie danych odbywa się z zastosowaniem narzędzi dostępnych w oprogramowaniu skanera 3D, komercyjnych programów do przetwarzania danych geometrycznych 3D, bogatego oprogramowania z domeny *open-source* lub programów opracowanych samodzielnie. Przykłady dwóch łańcuchów procesów przetwarzania przedstawiono na rys. 4.13: w pierwszym dane pochodzące z pomiaru na skanerze optycznym

firmy GOM przetworzono do postaci siatki trójkątów, a następnie zidentyfikowane powierzchniowe prymitywy geometryczne zapisano w formacie IGES, w drugim – dane pochodzące z pomiaru na tomografii przemysłowym firmy Zeiss przeniesiono do programu VG Studio Max, gdzie zostały zamienione na siatkę trójkątów, którą następnie przetworzono do zestawu powierzchni NURBS i zapisano także w formacie IGES.



Rys. 4.13. Przykładowe łańcuchy procesów przetwarzania danych 3D do postaci modelu powierzchniowego, zapisanego w formacie IGES po pomiarze:
a) metodą optyczną, b) metodą tomografii komputerowej (oprac. własne)

Tabela 4.2. Możliwości **konwersji** danych 3D w różnych klasach oprogramowania (oprac. własne)

Programy	Najważniejsze rodzaje konwersji danych 3D					
	Chmura punktów → siatka trójkątów	Model wokselowy → siatka trójkątów	Kontury → powierzchnie 3D	Siatka trójkątów → powierzchnie 3D	Powierzchnie 3D → bryły 3D	Siatki trójkątów → model CAD
Oprogramowanie urządzeń pomiarowych refleksyjnych	●	○	○	◐	○	○
Oprogramowanie urządzeń pomiarowych transmisyjnych	○	●	○	○	○	○
Programy RE dla chmur i siatek, np. RAPIDFORM, GEOMAGIC	●	○	○	●	○	◐
Programy RE dla wokseli, np. MIMICS, VOLUMEGRAPHICS	○	●	○	○	○	○
Programy do modelowania powierzchniowego*, np. RHINO	○	○	●	○	◐	○
Programy CAD*, np. CATIA, SOLIDWORKS, Siemens NX	○	○	●	○	●	○
Legenda: ● – całkowicie/wszystkie, ◐ – częściowo/niektóre, ○ – wcale/żadne						

* zestawienie dotyczy programów w wersji podstawowej, bez modułów rozszerzających ich funkcjonalność

Dobór adekwatnego łańcucha procesów przetwarzania wymaga znajomości możliwości oferowanych przez dostępne oprogramowanie (przegląd możliwych **konwersji danych między różnymi postaciami** ich struktury przedstawiono w tabeli 4.2, a możliwych **przekształceń danych w różnych postaciach** – tab. 4.3) oraz wyboru jak „najkrótszej” ścieżki od danych pomiarowych 3D do oczekiwanej postaci końcowej struktury danych z zastosowaniem narzędzi programowych o jak największej funkcjonalności lub najlepiej znanych i dostępnych. Definicje postaci strukturalnych danych 3D opisano w rozdziale 6.

Tabela 4.3. Możliwości **przetwarzania** danych 3D w różnych klasach oprogramowania (oprac. własne)

Programy	Struktury danych 3D						
	Chmury punktów	Kontury	Siatki trójkątów	Powierzchnie 3D	Modele woksellowe	Bryły 3D	Modele CAD
Oprogramowanie urządzeń pomiarowych refleksyjnych	●	○	●	○	○	○	○
Oprogramowanie urządzeń pomiarowych transmisyjnych	○	○	○	○	●	○	○
Programy RE dla chmur i siatek, np. RAPIDFORM, GEOMAGIC	●	○	●	○	○	○	○
Programy RE dla wokseli, np. MIMICS, VOLUMEGRAPHICS	○	○	○	○	●	○	○
Programy do modelowania powierzchniowego*, np. RHINO	○	●	○	●	○	◐	○
Programy CAD*, np. CATIA, SOLIDWORKS, Siemens NX	○	●	○	●	○	●	●
Legenda: ● – całkowicie/wszystkie, ◐ – częściowo/niektóre, ○ – wcale/żadne							

* zestawienie dotyczy programów w wersji podstawowej, bez modułów rozszerzających ich funkcjonalność

Dobór adekwatnego na potrzeby danego badania łańcucha przetwarzania danych 3D powinien także uwzględniać odchyłki, które mogą być efektem poszczególnych operacji. Tutaj, podczas planowania badań, podobnie jak w doborze technik pomiarowych, należy się oprzeć na danych historycznych – wartościach takich odchyłek uzyskanych w poprzednich przekształceniach tego rodzaju dla podobnych jak badany obiektów:

- przeprowadzonych w laboratorium w ramach poprzednich badań zleconych lub eksperymentów walidacyjnych,
- przeprowadzonych w innym laboratorium wyposażonym w takie same lub podobne narzędzia do przetwarzania danych 3D – w ramach wymiany doświadczeń lub porównań międzylaboratoryjnych,
- dostępnych w literaturze przedmiotu.

W trakcie i po zakończeniu przekształceń danych 3D należy obliczać i rejestrować odchyłki rzeczywiste.

4.3.1. Odchyłki w przetwarzaniu danych 3D

Każda operacja przekształcająca dane 3D – poza zamierzonym przekształceniem (np. redukcją liczebności chmury punktów lub zamianą fragmentu siatki na prymityw powierzchniowy) – wnosi pewną niezamierzoną odchyłkę „współrzędnościową” (liczoną w jednostkach długości) od danych pierwotnych, którą można traktować jako błąd. Metodyka zapewnienia spójności w badaniach RE wymaga obliczania tych odchyłek i „składania” ich z niepewnością pomiaru w celu oszacowania **całkowitej niepewności badania w inżynierii odwrotnej**.

Metoda obliczania niepewności badania RE oparta jest na analogii z niepewnością pomiarów: jeśli badanie RE potraktować jako „pomiar” modelu 3D przekształconego do pożądanej postaci końcowej, to do wyniku obliczeń budżetu niepewności samego „fizycznego” pomiaru (podrozdz. 4.2.1) należy dołączyć składniki zależne od odchyłek kształtu 3D w każdej i -tej operacji przekształcającej. Składniki te, oznaczone jako $e_{proc,i}$ można interpretować jako dodatkowe „zakłócenia” wpływające na niepewność całego badania RE. Rozbudowując budżet niepewności o te nowe składniki, uzyskuje się analogiczną do wzoru (4.6) zależność na **standardową złożoną niepewność badania RE**:

$$u_{RE} = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2 + \sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2} \quad (4.12)$$

przy czym współczynniki wrażliwości składników budżetu przyjęto za jednostkowe¹⁸, a kolejne operacje przekształcające dane ponumerowano, rozpoczynając od powiększonego o jeden numeru ostatniego składnika budżetu niepewności pomiaru (jeśli np. składników budżetu niepewności pomiaru było 4, to pierwszy składnik odpowiadający przekształceniom danych będzie miał numer 5).

Przez analogię do rozszerzonej niepewności pomiaru (wzór (4.4)) – **rozszerzona niepewność badania RE** jest wielokrotnością niepewności standardowej:

$$U_{RE} = k u_{RE} \quad (4.13)$$

Podstawiając wzór (4.13) do zależności (4.12) można rozdzielić obliczenia rozszerzonej niepewności badania na dwa składniki, które ułatwią obliczanie jej wartości całkowitej:

¹⁸ Z przyczyn objaśnionych po wzorze (4.6).

$$\begin{aligned}
 U_{RE}^2 &= (ku_{RE})^2 = \left(k \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2} + \sqrt{\sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2} \right)^2 = k^2 \left(\sum_{i=1}^m u_i^2 + \sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2 \right) \\
 &= k^2 \sum_{i=1}^m u_i^2 + k^2 \sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2 = \left(k \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2} \right)^2 + \left(k \sqrt{\sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2} \right)^2
 \end{aligned}$$

Pierwszy składnik tej sumy to kwadrat rozszerzonej niepewności samego pomiaru – U^2 (według wzorów (4.4) i (4.6)), drugi składnik można zaś określić jako kwadrat **rozszerzonej niepewności przekształceń danych** E_{proc}^2 . Daje to w rezultacie zależność na rozszerzoną całkowitą niepewność badania RE, uwzględniającą oddzielnie pomiar i oddzielnie efekty przekształceń danych:

$$U_{RE} = \sqrt{U^2 + E_{proc}^2} \quad (4.14)$$

Zależność ta została już przywołana w nierówności (4.1) na początku rozdziału.

Kolejne przekształcenia dotyczą już tylko drugiego składnika:

$$E_{proc}^2 = \left(k \sqrt{\sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2} \right)^2 = k^2 \sum_{i=m+1}^n e_{proc,i}^2 = \sum_{i=m+1}^n (k e_{proc,i})^2 = \sum_{i=m+1}^n E_{proc,i}^2$$

skąd:

$$E_{proc} = \sqrt{\sum_{i=m+1}^n E_{proc,i}^2} \quad (4.15)$$

$E_{proc,i}$ można określić jako rozszerzoną odchyłkę kształtu w i -tej operacji, a $n - m$ jest liczbą procesów w łańcuchu przetwarzania danych 3D.

Zakładając, że rozkład odchyłek w rezultacie większości przekształceń danych 3D jest zbliżony do normalnego¹⁹, i przyjmując współczynnik rozszerzenia niepewności całkowitej na poziomie $k=3$ (dla rozkładów normalnych oznacza to poziom ufności $1 - \alpha = 0,99$)²⁰, można przez analogię ze wzorem (4.7) dla niepewności pomiarów obliczyć niepewność (odchyłkę) przekształcenia danych 3D:

¹⁹ Takie założenie potwierdza się w doświadczeniach wielu rodzajów przekształceń danych z wykorzystaniem programów użytkowych RE i rzeczywistych danych z pomiarów.

²⁰ Wybór współczynnika rozszerzenia na poziomie 3 w obliczaniu niepewności badania RE jest podyktowany nie tylko chęcią uproszczenia obliczeń, ale też dążeniem do zachowania większego poziomu ufności niż zwyczajowe 95%. Można zredukować ten współczynnik do 2, wprowadzając do obliczeń rozszerzonych odchyłek mnożnik 2/3.

$$E_{\text{proc},i} = \frac{|b_i - a_i|}{2} \quad (4.16)$$

gdzie a_i i b_i – odpowiednio dolna (zwykle ujemna) i górna (zwykle dodatnia) granica przedziału zmienności **zmian kształtu 3D** w efekcie i -tej operacji. Zmiany kształtu 3D oblicza się np. dla wszystkich punktów chmury lub wierzchołków siatki i mogą one mieć wartość ujemną (jeśli kształt po zmianie jest „skurczony” do wewnątrz) lub dodatnią (jeśli kształt jest „odsunięty” na zewnątrz) – więcej szczegółów w rozdziale 6.2 o metodach porównywaniu modeli 3D.

Zależność (4.16) jest prosta do obliczenia w przypadku operacji, gdy punkty (chmury) lub wierzchołki (siatki) jedynie zmieniają swoje położenie w przestrzeni – tak działają np. operacje „usuwania szumu” czy „wygładzania siatki” (rozdz. 5). Jeśli jednak rezultatem przekształcenia jest także zmiana liczby punktów opisujących kształt 3D – znikają „stare” punkty/wierzchołki i powstają „nowe” (np. w operacji „upraszczania/rozzredzania siatki”) lub konwersja struktury danych do innej postaci (np. siatka trójkątów → model powierzchniowy 3D), to odchyłkę kształtu można oszacować, wykonując **porównanie modeli 3D** sprzed i po operacji (rozdz. 6.2). Rezultatem takiego porównania jest trójwymiarowa „mapa odchyłek”, zawierająca informacje o odległościach punktów 3D opisujących strukturę sprzed przekształcenia (jest ona wówczas tzw. modelem „referencyjnym”) od elementów struktury wynikowej, np. od trójkątów nowej siatki lub od składników nowego modelu powierzchniowego 3D (model „porównywany”). Wśród tych odległości należy odszukać wartości najmniejszą (a_i) i największą (b_i), i można obliczyć odchyłkę tego przekształcenia ze wzoru (4.16). Niestety, operacja porównania modeli 3D nie zawsze jest bezbłędna, np. kiedy model referencyjny i porównywany wymagają przed porównaniem dokładnego nałożenia na siebie (rozdz. 6.2).

Stosując do przekształceń danych 3D programy użytkowe RE (np. GEOMAGIC lub RAPIDFORM) z parametrów ustawianych przed lub z komunikatów wyświetlanych po wykonaniu operacji przekształcających, można pozyskać informacje do obliczania odchyłek według wzoru (4.16) – więcej szczegółów w rozdziale 6.1.1.

Transfery danych 3D z użyciem formatów wymiany danych (np. STL, IGES, STEP) mogą być także źródłem odchyłek. Każda operacja transferu powinna być analizowana pod względem potencjalnych odchyłek, wynikających z dyskretnego charakteru zapisu – jeśli d_i ma wartość odpowiadającą najmniejszej zmianie w zapisie współrzędnych 3D w danym formacie, to odchyłka transferu wynosi (na podstawie wzorów (4.4) i (4.9) oraz przy założeniu $k = 3$):

$$E_{\text{proc},i} = k \frac{\frac{1}{2} d_i}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i \quad (4.17)$$

Na przykład w tekstowym pliku STL opisującym model 3D o wartościach współrzędnych dochodzących do kilkuset milimetrów, w którym zapis tworzony jest za pomocą liczb 5-cyfrowych, najmniejszą zmianą jest 0,01 mm. Odchyłka przy „przejściu” przez taki format wynosi 0,0086 mm. Więcej szczegółów w rozdziale 6.1.1.

4.4. Ocena jakości badania RE

W proponowanej w pracy metodyce miarą jakości badania w inżynierii odwrotnej jest spójność oraz integralność i adekwatność wynikowych danych 3D. Każde badanie powinno się kończyć oceną stopnia osiągnięcia zakładanych celów: spójność osiągana jest przez rejestrację niepewności pomiaru i odchyłek wymiarowych we wszystkich operacjach przekształcających dane 3D, integralność przez rejestrację procesów przetwarzania – ich charakteru i zmian struktury danych (rozdział 6), a adekwatność przez porównanie rezultatów badania z założeniami – oczekiwaną dokładnością i strukturą danych wynikowych.

W przypadku wymagań dotyczących dokładności – należy sprawdzić czy geometryczna suma niepewności pomiaru (obliczona na zakończenie I etapu badań RE) i całkowitego błędu przetwarzania (obliczona na zakończenie II etapu) nie przekracza oczekiwanej dokładności badania – według nierówności (4.1).

W przypadku wymagań dotyczących struktury wynikowych danych – jeśli to możliwe, należy potwierdzić poprawność:

- **raportu pomiarowego** lub wykresu z **mapą odchyłek** – przez uważne sprawdzenie (np. przez innego członka zespołu niż osoba wykonująca badanie) czy wszystkie wartości zmierzone są zapisane poprawnie i zawierają określenie niepewności, np. czy legenda obok mapy jest czytelna i poprawna,
- **siatki trójkątów** – w programie do przetwarzania siatek należy uruchomić funkcję analizy poprawności siatki, sprawdzając jej ciągłość („szczelność”, brak przerw lub powierzchni otwartych, których brzegowe trójkąty nie łączą się z sąsiadami na wszystkich swoich krawędziach), występowanie trójkątów zdegenerowanych lub odwróconych itp.,
- **modelu 3D** – należy odczytać model w programie docelowym, dla którego przeznaczony jest model (lub innym programie CAD, który też akceptuje modele w przygotowanym formacie), i przeprowadzić wizualne sprawdzenie jego kompletności i poprawności; jeśli ocena błędu przetwarzania nie była już wykonywana właśnie w ten sposób, należy przeprowadzić pełne porównanie końcowego modelu 3D z wejściową chmurą punktów (lub siatką trójkątów), pochodzącą z pomiarów.

4.5. Wnioski

W rozdziale przedstawiono zaproponowaną przez autora metodykę zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej. Znanе z metrologii pojęcie niepewności pomiaru rozszerzono na cały łańcuch procesów RE, w tym na przetwarzanie danych 3D pochodzących z pomiaru do końcowej postaci ich struktury: siatki trójkątów czy modelu powierzchniowego lub bryłowego 3D. Do znanych z metrologii narzędzi szacowania niepewności pomiaru dołożono nowe narzędzia, umożliwiające na szacowanie odchyłek wnoszonych przez operacje na danych 3D: konwersje, przekształcenia i transfery, które zwiększają niepewność całego badania RE. Przedstawiono odpowiedni aparat matematyczny.

Opisano także sposób planowania badania RE, uwzględniający nie tylko oczekiwaną dokładność, ale także oczekiwaną strukturę końcową danych, wskazując sposób doboru technik pomiarowych i łańcucha procesów przetwarzania. Zaproponowano także sposób weryfikacji rezultatów badania w inżynierii odwrotnej.

5. Techniki pomiaru kształtów 3D

Istnieje wiele metod pomiaru kształtów 3D²¹, których rezultatem jest rejestracja tych kształtów w postaci danych 3D. Takie metody mogą wykorzystywać techniki mniej lub bardziej wyrafinowane, znane od wielu lat (np. stykowe) lub nowatorskie (np. oświetlenie niebieskim światłem strukturalnym). Podział i klasyfikację tych technik przedstawiono w podrozdziale 5.1. W rozdziale 5.2 omówiono sposoby opisu zdolności pomiarowych urządzeń stosowanych w różnych technikach na podstawie istniejących norm i deklaracji producentów. W kolejnych podrozdziałach podano różne techniki pomiarowe oraz – jeśli są znane – sposoby obliczania jakości pomiarów z ich udziałem, w postaci **niepewności pomiaru**.

5.1. Klasyfikacja technik pomiarowych

Techniki pomiaru kształtów 3D, czy to komercyjnie dostępne czy rozwijane na skalę laboratoryjną, można klasyfikować według różnych kryteriów:

- **stan obiektu** po zakończeniu badań: metody można podzielić na niszczące i nieniszczące,
- **struktura** uzyskiwanych **danych 3D**: metody mogą umożliwiać zmierzenie tylko kształtu powierzchni zewnętrznej obiektów (efektem takiego pomiaru jest najczęściej chmura punktów 3D) lub także makrostrukturę wewnętrzną (efektem jest najczęściej zestaw obrazów rastrowych składających się na model wokselowy – patrz rozdział 6.4),
- **rodzaj** wykorzystywanego **zjawiska fizycznego**: metody stykowe (mechaniczne) i bezdotykowe (zdalne), wśród zdalnych – w zależności od rodzaju oddziaływania: oparte na falach dźwiękowych lub elektromagnetycznych,

²¹ Cech geometrycznych postaci konstrukcyjnej produktu (patrz uwaga 4, strona 9).

- **sposób rozchodzenia się czynnika oddziaływania fizycznego:** metody refleksyjne (z odbiciem), transmisyjne (penetracyjne, z przejściem fali przez obiekt) i mieszane (część fali się odbija, część przechodzi),
- **zakres częstotliwości fal elektromagnetycznych** w metodach je wykorzystujących: od radiowych (obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego), przez świetlne (metody optyczne i laserowe), do rentgenowskich (tomografia komputerowa),
- **rodzaj światła** w metodach je wykorzystujących: od światła niespójnego białego (lub innego koloru, np. niebieskiego) do światła monochromatycznego i spójnego (metody laserowe), wśród tych drugich – w zależności od sposobu ukształtowania wiązki lasera: laserowe metody punktowe i liniowe,
- **źródło światła** w metodach optycznych: metody optyczne aktywne (w których zapewnia się własne sztuczne źródło) i pasywne (wykorzystujące światło otoczenia).

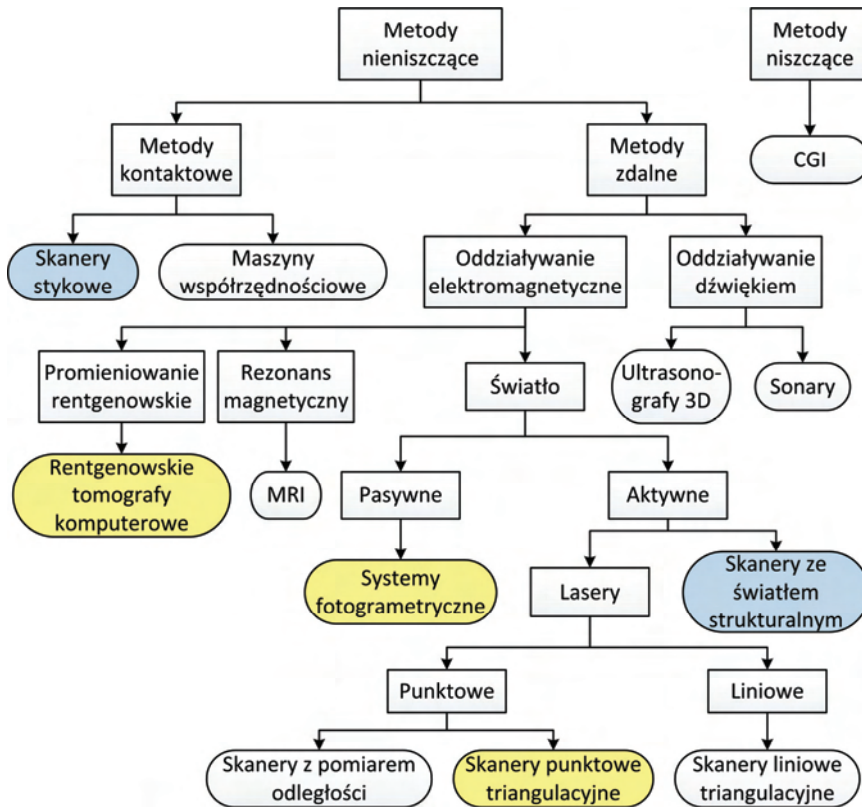
Próbę takiej wielokryterialnej klasyfikacji, uwzględniającej tylko kilkanaście najpopularniejszych technik pomiarów 3D, przedstawiono w tabeli 5.1 i na rys. 5.1.

Tabela 5.1. Klasyfikacja najpopularniejszych technik pomiaru trójwymiarowych kształtów (oprac. własne)

Stan obiektu	Oddział. fizyczne				Struktura danych 3D
	Fale elektromagnet.				
	Widmo	Światło			
		Spójność	Wiązka	Źródło	
metody nieniszczące	fale elektromagnet.	radiowe			struktura wewn.
		widzialne	laser	punktowe	powierzchnie
				liniowe	powierzchnie
			niespójne	pasywne	powierzchnie
		aktywne		powierzchnie	
		rentgenowskie			struktura wewn.
	dźwięk			struktura wewnętrzna	
	metoda stykowa			powierzchnie	
metoda niszcząca					struktura wewn.

Przykładowe techniki pomiaru:

Rezonans magnetyczny
Skanery z pomiarem odległości
Skanery punktowe triangulacyjne
Skanery liniowe triangulacyjne
Systemy fotogrametryczne
Skanery ze światłem strukturalnym
Tomografy komputerowe
Ultrasonografy
Sonary
Maszyny współrzędnościowe
Skanery stykowe
CSS



Rys. 5.1. Klasyfikacja najpopularniejszych technik pomiaru trójwymiarowych kształtów²²
(oprac. własne)

5.2. Zdolność urządzenia pomiarowego w szacowaniu niepewności pomiaru

Wobec braku powszechnie obowiązujących standardów w dziedzinie inżynierii odwrotnej, wśród producentów urządzeń pomiarowych nie ma zgody dotyczącej wspólnego nazewnictwa i metod obliczania parametrów definiujących dokładność różnych urządzeń w pomiarach obiektów 3D, co byłoby przydatne w przygotowywaniu budżetów niepewności pomiarów dokonywanych z ich użyciem.

²² Kolorem żółtym zaznaczono techniki dostępne w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING, a niebieskim – akredytowane w LRE.

Istnieje norma ISO 10360 [170] określająca m.in. sposób wyznaczania błędu granicznego dopuszczalnego wskazań (*maximum permissible error*, MPE), ale stosuje się ją wprost tylko dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dla niektórych rodzajów urządzeń stosowanych w inżynierii odwrotnej Niemieckie Stowarzyszenie Inżynierów (*Verein Deutscher Ingenieure*) oraz Stowarzyszenie Elektrotechniki, Elektroniki i Informatyki (*Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik*) opracowało własne zalecenia dotyczące sposobu obliczania takich wskaźników:

- VDI/VDE 2634 *Optische 3D-Messsysteme* [232] – dla urządzeń optycznych, w tym laserowych, w pomiarach kształtów 3D,
- VDI/VDE 2630 *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik* [231] – dla systemów tomografii komputerowej w zastosowaniach metrologicznych.

Dla pozostałych typów urządzeń procedury obliczania niepewności pomiarów muszą określać zdolność urządzenia z użyciem innych wskaźników, np. parametrów określanych przez producenta.

W LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING opracowano wspólną dla wszystkich stosowanych technik pomiarowych metodę konstruowania budżetu niepewności pomiaru – przy znajomości zdolności pomiarowej danego urządzenia, niepewność pomiaru szacuje się według metody B z przewodnika GUM [115]:

$$U = ku = k\sqrt{u_{\text{urz}}^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_m^2}, \quad (5.1)$$

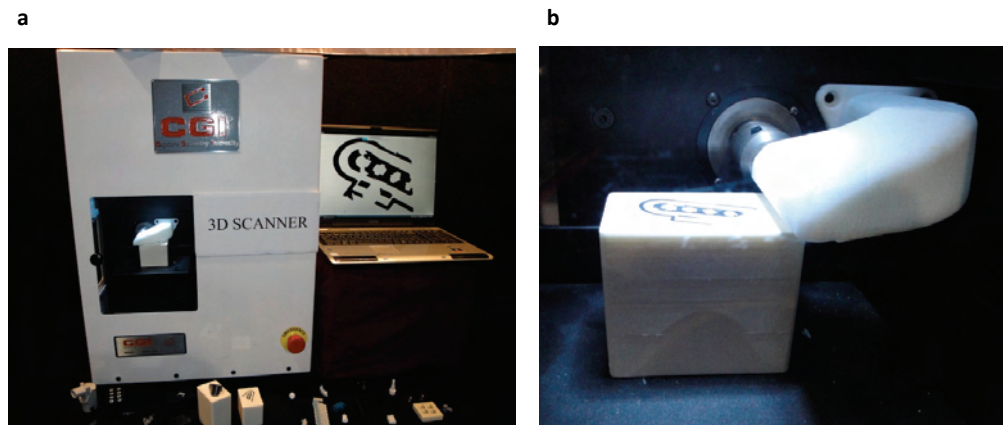
gdzie: u_{urz} – zdolność pomiarowa urządzenia w konfiguracji zastosowanej podczas pomiaru (np. MPE, obliczony według normy ISO lub zaleceń VDI/VDE), $u_2, u_3, \dots, u_m$ – składniki odpowiedzialne za pozostałe zidentyfikowane źródła niepewności. Każdy składnik jest szacowany według zależności opracowanych na bazie eksperymentów walidacyjnych, prowadzonych w różnych warunkach i dla różnych rodzajów obiektów, i odpowiada za wpływ na wynik pomiaru temperatury obiektu, sposobu jego mocowania, obecności powłoki antyrefleksyjnej (dla techniki optycznej), jednorodności materiału obiektu (dla techniki transmisyjnej) czy poszczególnych parametrów strategii pomiarów stosowanej z wykorzystaniem danego urządzenia. Badania walidacyjne są prowadzone na obiektach wzorcowanych przez akredytowane laboratoria wzorcujące.

W kolejnych podrozdziałach opisano wybrane techniki pomiarowe z poszczególnych kategorii i – jeśli są dostępne w literaturze lub zostały opracowane w LRE – metody obliczania ich zdolności pomiarowych oraz niepewności pomiarów z ich wykorzystaniem.

5.3. Metody niszczące

Komercyjną wersję techniki skanowania niszczącego opracowała amerykańska firma Capture Geometry Internally [39]. Jej urządzenia służą do rejestracji skompli-

kowanych kształtów obiektów, które są w prostopadłościennym bloku zalewane materiałem polimerowym o kontrastowym kolorze. W kolejnych krokach wewnątrz tego bloku jest odsłaniane przez ścinanie lub frezowanie cienkich warstw od góry i fotografowany jest każdy przekrój (rys. 5.2). Proces został opatentowany jako „skanowanie przekrojowe” (*Cross-Sectional Scanning*).



Rys. 5.2. Urządzenie PEARL 700 firmy CGI (a)
oraz widok jego głowicy ścinającej podczas pracy (b)

Urządzenia takie mogą być stosowane do badania obiektów z tworzyw sztucznych, miękkiej ceramiki (np. gipsu), a największe modele – nawet obiektów metalowych (aluminium, brąz). Parametry małego modelu PEARL 700: minimalna grubość warstwy 0,001 cala (0,0254 mm), rozdzielczość sensora optycznego 1,3 megapiksela oraz wielkość przestrzeni roboczej $2,5 \times 1,75 \times 3,5$ cala ($63,5 \times 44,45 \times 88,9$ mm) wskazują, że bezpośrednim rezultatem pomiaru jest zestaw obrazów składający się na **homogeniczny model wokselowy** z około miliardem wokseli, każdy o rozmiarach 20–70 μm .

Zdolność pomiarowa urządzenia firmy CGI zależy m.in. od parametrów nominalnych: rozdzielczości sensora optycznego i grubości warstw odsłanianych przez głowicę ścinającą, ale także od rzeczywistych właściwości zastosowanych komponentów, np. od jakości układu optycznego (obiektyw, matryca), układu mechanicznego pozycjonowania próbki, procesu frezowania (np. płaskość osiąganých powierzchni, brak „zaciągnięć” dla różnych kombinacji materiałów badanego i otaczającego) oraz kontroli warunków w komorze roboczej (np. temperatury i zapylenia). Nie są znane wyniki badań dokładności konkretnego typu urządzenia CGI, można jedynie polegać na pojedynczym parametrze ujawnianym przez producenta: powtarzalności pomiaru (*repeatability*), którego wartość jest równa minimalnej grubości warstwy.

Tabela 5.2. Charakterystyka techniki pomiarowej firmy CGI (oprac. własne)

Technika	Zastosowanie	Struktura danych wynikowych	Miara zdolności pomiarowej
CSS	Pomiary niszczące obiektów z tworzyw sztucznych, miękkiej ceramiki i metali	Model wokselowy homogeniczny	Według producenta: „powtarzalność”, równa minimalnej grubości warstwy (0,001” = 0,0254 mm)

5.4. Metody mechaniczne

W metodach mechanicznych – stykowych (dotykowych), pomiar polega na rejestracji współrzędnych tych punktów w przestrzeni, w których czujnik urządzenia pomiarowego wykrywa kontakt z mierzonym obiektem. Istnieją wersje urządzeń z ręcznym lub automatycznym przesuwem czujnika oraz z automatycznym przesuwem przedmiotu. Wśród najpopularniejszych typów urządzeń pomiarowych stykowych znajdują się maszyny współrzędnościowe z sondami stykowymi skanującymi, skanery stykowe o konstrukcji podobnej do maszyn współrzędnościowych oraz ramiona pomiarowe z sondami stykowymi. Maszyny współrzędnościowe i ramiona pomiarowe z zainstalowanymi głowicami optycznymi, w tym laserowymi, należałoby zaliczyć do urządzeń optycznych (podrozdz. 5.5).

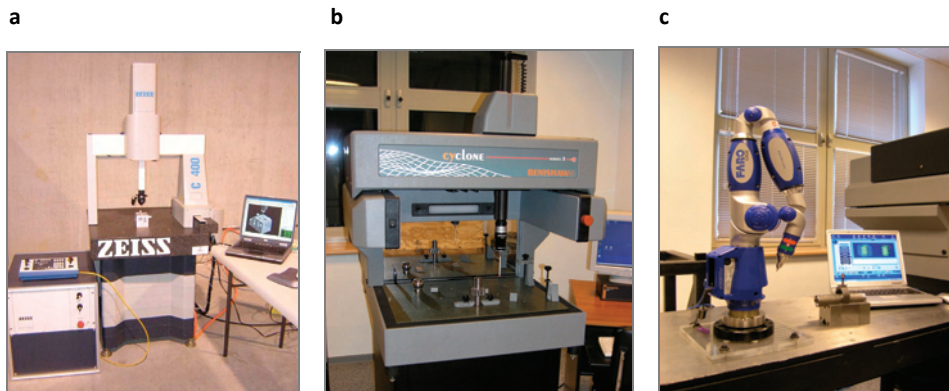
5.4.1. Maszyny współrzędnościowe i skanery stykowe

Różnica między współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi (WMP, rys. 5.3a) z głowicami skanującymi stykowymi a skanerami stykowymi (rys. 5.3b) jest właściwie tylko ilościowa – maszyny współrzędnościowe są przeznaczone do pomiarów o dużej, nawet submikronowej, precyzji (zwłaszcza kiedy pracują z precyzyjnymi głowicami nieskanującymi – impulsowymi), a skanery są nastawione na szybkość pomiaru – ich zadaniem jest zebrać tysiące punktów pomiarowych w możliwie krótkim czasie. Poza tym obydwa rodzaje urządzeń są oparte przeważnie na portalowej strukturze nośnej, z głowicą przesuwaną w trzech ortogonalnych osiach.

5.4.2. Ramiona pomiarowe

Ramiona pomiarowe stykowe (rys. 5.3c) są funkcjonalnie bliższe maszynom współrzędnościowym niż skanery stykowe – są wykorzystywane przede wszystkim do pomiarów *on-line*, zwykle tylko od kilku do kilkunastu punktów, których współrzędne 3D są zamieniane na parametry wybranych cech geometrycznych obiektu: średnic

otworów, kątów między ścianami, odległości. Zbudowane są podobnie do manipulatorów robotów, ale zamiast silników w przegubach mają czujniki położenia kąтового (enkodery); znajomość wszystkich kątów pozwala obliczyć położenie kulki pomiarowej zamocowanej na końcu ostatniego segmentu. Ramię pomiarowe można także zastosować do pomiarów wielu punktów (chmury), z których w trybie *off-line* budowany jest model 3D obiektu – jak w typowych badaniach inżynierii odwrotnej.



Rys. 5.3. Urządzenia stykowe:

a) maszyna współrzędnościowa C 400 firmy Zeiss (źródło: insightcmm.com),
b) skaner CYCLONE 2 firmy Renishaw, c) ramię pomiarowe z sondą stykową GAGE firmy Faro

5.4.3. Zdolności pomiarowe urządzeń stykowych

Charakterystykę stykowej techniki pomiarowej z użyciem maszyn współrzędnościowych, skanerów i ramion stykowych przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Charakterystyka stykowych technik pomiarowych

Technika	Zastosowanie	Struktura danych wynikowych	Miara zdolności pomiarowej
Stykowa – WMP, skanery, ramiona pomiarowe	Pomiary obiektów z materiałów niepodatnych na nacisk	Chmura punktów 3D	MPE, wg ISO 10360

Przykładowe metody szacowania niepewności pomiaru:

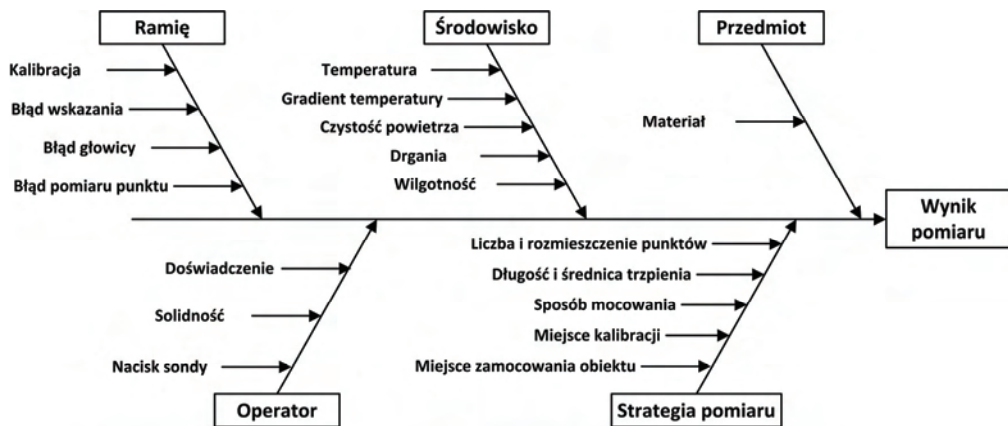
- dla maszyn współrzędnościowych – w publikacji [211] pokazano źródła błędów pomiaru (rys. 5.1) i opisano budżet niepewności zawierający składniki uwzględniające wpływ temperatury, błąd głowicy pomiarowej i niepewność kalibracji wzorca długości; doświadczalny sposób wyznaczania niepewności pomiarowej dla WMP z wykorzystaniem wzorców lub wyrobów wzorcowanych ustala norma PN-EN ISO 15530-3 [173] – ograniczeniem tego sposobu jest konieczność stosowania obiektów wzorcowanych bardzo podobnych i w warunkach takich sa-

mych jak dla obiektu mierzonego (co najwyżej 10% lub 2,5 cm różnicy w wymiarach liniowych, 5° w kątowych, porównywalne błędy kształtu i tekstura powierzchni, taka sama strategia pomiaru i konfiguracja sond pomiarowych);



Rys. 5.4. Źródła błędów pomiaru na WMP [211]

- dla ramion pomiarowych – na rys. 5.5 pokazano źródła niepewności pomiaru zidentyfikowane w LRE; w ośrodku krakowskim [210] opracowano metodę wymagającą znajomości parametrów konstrukcyjnych urządzenia – wskazań enkoderów w różnych położeniach segmentów ramienia;



Rys. 5.5. Źródła niepewności pomiaru ramieniem pomiarowym [57]

- dla skanera stykowego – w akredytowanej procedurze badawczej LRE [22] wskazano źródła niepewności (rys. 5.6) i najbardziej istotne składniki jej budżetu: MPE skanera (określone przez jego wzorcowanie według normy ISO 10360), temperatura podczas pomiaru, charakterystyka trzpienia zamocowanego w głowicy oraz strategia skanowania.

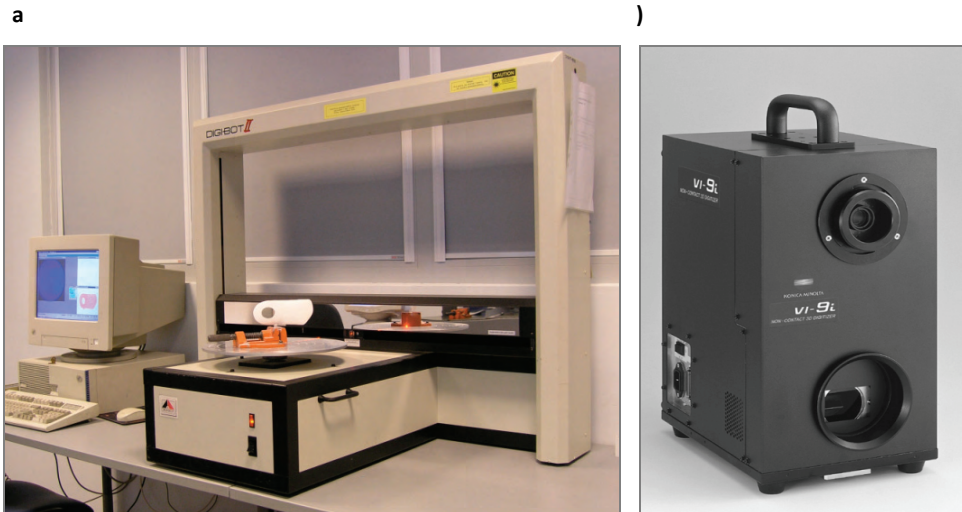


Rys. 5.6. Źródła niepewności pomiaru skanerem stykowym [22]

5.5. Zdalne metody optyczne

5.5.1. Skanery triangulacyjne – laserowe punktowe i liniowe

Przykładami urządzeń optycznych stosujących zasadę triangulacji są nieprodukowane już, ale wciąż popularne wśród użytkowników, skanery DIGIBOT II [61] i KONICA MINOLTA VI-9i [129] (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Skanery laserowe: DIGIBOT II firmy Digibotics (a) i KONICA MINOLTA VI-9i (b)

Zasada ich działania polega na oświetlaniu mierzonego obiektu laserem małej mocy w postaci promienia skupionego w punkcie (DIGIBOT II) lub rozszczepionego w linię (VI-9i) i obliczaniu położenia w przestrzeni oświetlonych punktów powierzchni obiektu z użyciem zależności trygonometrycznych (wiążących kąty i odległości między źródłem promienia, czujnikiem optycznym i obiektem) – w pierwszym przypadku rejestrowany jest pojedynczy punkt, w drugim – zestaw wielu punktów. Po rejestracji promień lasera lub obiekt jest przesuwany lub obracany i oświetlane są kolejne punkty powierzchni (algorytm tych przesunięć i obrotów może być dość wyrafinowany – w pracy dotyczącej skanera DIGIBOT [128] opisano zastosowaną w nim automatyczną strategię „adaptacyjną” obrotów obiektu). Po przeskanowaniu całego obiektu powstaje chmura punktów opisująca widzialny fragment jego powierzchni zewnętrznej.

Producenci tych urządzeń deklarują ich zdolność pomiarową przez parametry zwane „dokładnością” i/lub „precyzją”. Np. w opisie skanera KONICA MINOLTA ten pierwszy dotyczy błędu pomiaru położenia wzdłuż każdej osi układu współrzędnych w określonych odległościach mierzonego obiektu od skanera („dokładność wynosi $\pm 0,1$ mm dla odległości 1 m”), a ten drugi parametr – błędu pomiaru odległości 3D („precyzja wynosi $\pm 0,024$ mm dla 1 m”).

5.5.2. Skanery z pomiarem odległości

Przykłady skanerów, działających na zasadzie pomiaru odległości, są FARO FOCUS 3D [74] i LEICA SCANSTATION C10 [139] (rys. 5.8). Z powodu ich pochodzenia i szerokiego zastosowania w pomiarach geodezyjnych i terenowych, w literaturze określane są jako „nazemne” (*terrestrial laser scanner*, TLS), coraz częściej można jednak znaleźć przykłady ich stosowania w pomiarach obiektów budowlanych, instalacji technicznych, a nawet dużych obiektów mechanicznych (łódzie i samoloty).



Rys. 5.1. Skanery FARO FOCUS 3D (a) i LEICA SCANSTATION C10 (b)

Urządzenia wykorzystują światło laserowe podczerwone (Faro) lub zielone (Leica), które – odbijane przez obrotowe lustro zamocowane na obrotowej podstawie – skanuje otoczenie w zakresie 360° horyzontalnie i 305° (Faro) lub 270° (Leica) wertykalnie i rejestruje odległości od każdego punktu, od którego promień lasera odbił się i wrócił do czujnika.

Do opisanie zdolności pomiarowych swoich systemów producenci używają pojęcia „dokładności pomiaru odległości” (skaner Faro: ± 2 mm, Leica: ± 4 mm) i „dokładności pomiaru położenia” (tylko Leica: ± 6 mm). Badania nad metodami określania niepewności pomiarów dla takich urządzeń wciąż trwają, np. w pracy [143] autorzy koncentrują się na rozdzielczości kątowej skanerów TLS, w publikacji [176] zaproponowano obiekt do testowania powtarzalności pomiarów, a w referacie [52] autorzy wskazali na konieczność kompensacji znaczących błędów systematycznych w pomiarach tego typu.

5.5.3. Systemy fotogrametryczne

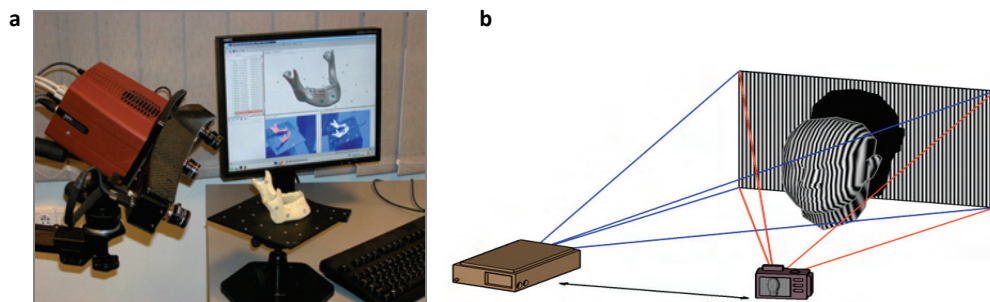
Fotogrametria jest techniką pomiarową optyczną pasywną (bez własnego źródła światła), polegającą na rejestracji za pomocą kamery lub aparatu fotograficznego serii obrazów²³ obiektu z różnych pozycji i ich automatycznego wzajemnego pozycjonowania na bazie wspólnych punktów lub innych cech geometrycznych zidentyfikowanych na kilku obrazach (algorytm zwany *Bundle Adjustment*), co prowadzi do możliwości skonstruowania modelu 3D badanego obiektu. Większość zastosowań systemy fotogrametryczne znajdują, podobnie jak „naziemne” skanery laserowe, w geodezji i topografii [13] oraz w budownictwie, ale rośnie liczba ich aplikacji w inżynierii odwrotnej obiektów technicznych [4, 151].

Niepewność pomiarów w systemach fotogrametrycznych wynika z jakości zastosowanych urządzeń optycznych (aparatów, kamer), funkcjonalności specjalistycznego oprogramowania (np. PHOTOMODELER [72] lub RHINOPHOTO [179]) i strategii akwizycji danych (liczby i orientacji obrazów). Ze względu na brak gotowych zintegrowanych rozwiązań (producenci aparatów i oprogramowania to zwykle firmy z różnych segmentów rynku) trudno znaleźć publikacje analizujące zdolności pomiarowe całych zestawów sprzętowo-programowych i prac dotyczących metod obliczania niepewności pomiaru w takich badaniach.

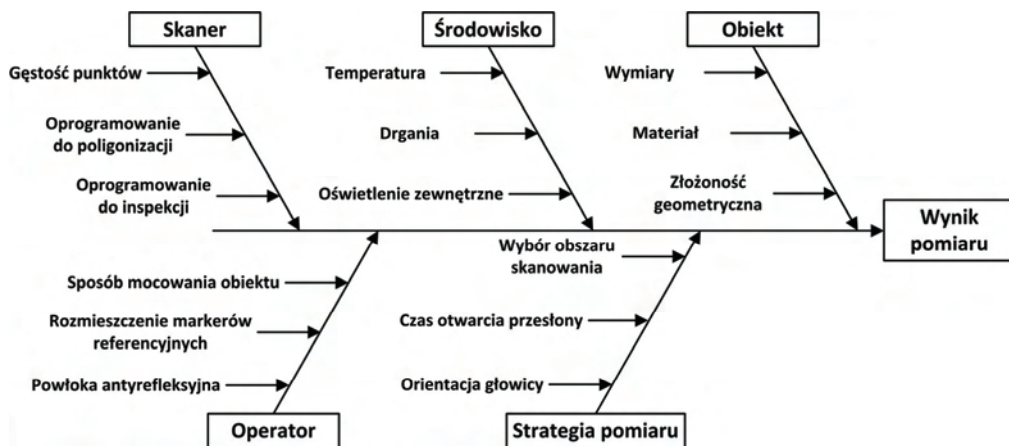
²³ Co najmniej dwóch, chociaż można próbować rekonstrukcji z pojedynczym zdjęciem, jak pokazano np. w [258].

5.5.4. Skanery z oświetleniem strukturalnym

Kolejna optyczna technika pomiarów wykorzystuje rejestrację obrazów, na których mierzony obiekt jest oświetlany światłem „strukturalnym”, zawierającym regularne geometryczne wzory (kropki, linie/prążki, kraty itp.). Jeśli obserwuje się taki wzór na obiekcie niepłaskim z kierunku innego niż kierunek projekcji wzoru, to z lokalnych odkształceń wzoru można obliczyć kształt i położenie oświetlanej powierzchni [166, 192]. W większości komercyjnych rozwiązań stosowane są kodowane zestawy wzorów liniowych, wyświetlanych sekwencyjnie jeden po drugim w celu identyfikacji poszczególnych linii wzoru, oraz dwie kamery zamiast jednej (rys. 5.19).



Rys. 5.9. Skaner z oświetleniem strukturalnym AROS II firmy GOM (a – widoczne 3 obiektywy należą do projektora wzorów i dwóch kamer) i zasada oświetlania strukturalnego (b),
źródło: main.alcestech.com



Rys. 5.10. Źródła błędów pomiaru z użyciem skanera z oświetleniem strukturalnym [23]

Skanery z oświetleniem strukturalnym znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie w badaniach obiektów technicznych, a nawet w kontroli jakości wytwarzania [9,

85, 154]. W wielu aplikacjach ich dokładność nie odbiega od dokładności WMP [34], chociaż poza zaleceniami VDI/VDE wciąż brak standardowych metod oceny ich zdolności pomiarowej – proponowane są za to wzorce do kalibracji i porównań [112].

W procedurze badawczej LRE dla skanera z oświetleniem strukturalnym [23] wskazano źródła niepewności (rys. 5.10) i najbardziej istotne składniki jej budżetu: MPE skanera (określone przez jego wzorcowanie według zaleceń VDI/VDE 2634), temperatura podczas pomiaru, obecność powłoki antyrefleksyjnej oraz strategia skanowania.

5.5.5. Zdolności pomiarowe urządzeń optycznych

Charakterystyka optycznych technik pomiarowych z użyciem skanerów laserowych, dalmierzowych, fotogrametrycznych i z oświetleniem strukturalnym przedstawiona jest w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Charakterystyka optycznych technik pomiarowych

Technika	Zastosowanie	Struktura danych wynikowych	Miara zdolności pomiarowej
Optyczna triangulacyjna	Pomiary obiektów o powierzchniach mało refleksyjnych	Chmura punktów 3d, siatka trójkątów	„dokładność pomiaru odległości”, MPE wg ISO 10360, MPE wg VDI/VDE 2634
Optyczna dalmierzowa			
Fotogrametria			
Optyczna z oświetleniem strukturalnym			

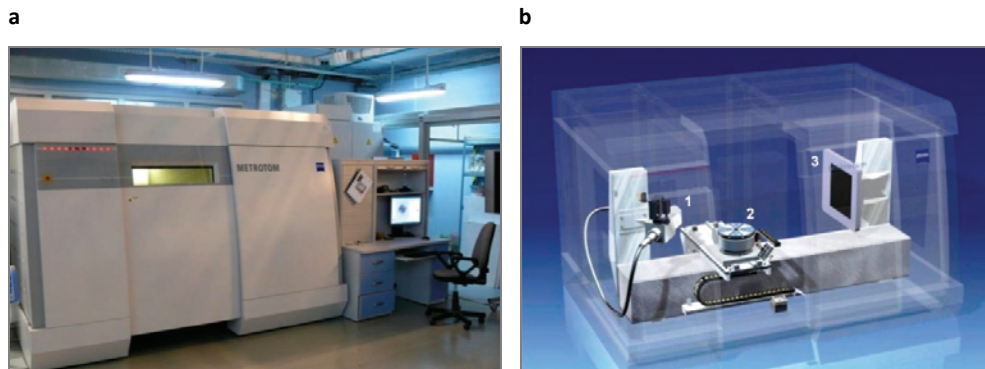
5.6. Zdalne metody nieoptyczne

5.6.1. Tomografia komputerowa

Tomografia komputerowa [99] jest znaną od wielu lat i powszechną dzisiaj metodą medycznej diagnostyki obrazowej, a jej twórcy zostali wyróżnieni Nagrodą Nobla. Początkowo wykorzystywana jedynie do wizualnej oceny anatomii pacjentów, stała się z czasem źródłem informacji ilościowych w badaniach biomedycznych. Najnowsze tomografy medyczne to już czwarta i piąta generacja, wyposażone są w wielkie struktury detektorów (tzw. detektory „wielorzędowe”, *multislice detectors*) i efektywne źródła promieniowania rentgenowskiego [122].

W latach 80. XX w. rozpoczął się rozwój systemów wykorzystujących źródła promieniowania o większej energii, koniecznej do penetracji obiektów gęstszych niż biologiczne. W takich tomografach, zwanych „technicznymi”, najczęściej stosuje się wiązkę promieni uformowaną stożkowo (*cone-beam CT*), a nie jak dotychczas wa-

chlarzowo (*fan-beam*), co wymaga innych algorytmów rekonstrukcji geometrycznej [54, 256]. Także struktura kinematyczna tomografów technicznych różni się od tomografów medycznych – podczas badania źródło promieniowania i detektor są nieruchome, obraca się stolik z przymocowanym obiektem (rys. 5.11); upraszcza to konstrukcję (stałe mocowanie źródła i detektora) i minimalizuje odkształcenia statyczne i dynamiczne (badany przedmiot jest zwykle lżejszy niż źródło czy zespół detektora).



Rys. 5.11. Techniczny tomograf komputerowy METROTOM 1500 firmy Zeiss:
zdjęcie instalacji w LRE (a), struktura kinematyczna (b), źródło: www.zeiss.com:
1 – lampą, 2 – stolik obrotowy, 3 – detektor

Od kilku lat dostępne są tomografy techniczne nazywane przez producentów „metrologicznymi” [67]. W pracy [134] można znaleźć szczegółowy opis zasady pomiarów metodą tomografii komputerowej oraz przykłady wykorzystania tych urządzeń w metrologii, wraz z analizą czynników wpływających na ich dokładność. W Polsce przegląd przemysłowych zastosowań systemów tomografii komputerowej opublikował autor pracy [180].

Tomografy rentgenowskie mogą być stosowane w pomiarach cech geometrycznych powierzchni zewnętrznej obiektów (podobnie jak w metodach stykowych czy optycznych), ale także ich struktury wewnętrznej (w skali makro – cech geometrycznych i w skali mikro – cech materiałowych). W zależności od ich konfiguracji, rozdzielczość rejestracji może wynosić od setek nanometrów do kilku milimetrów. W przypadku wystarczającej mocy źródła promieniowania można badać obiekty z materiałów bardzo gęstych, w tym z metali.

Dotychczas prowadzono wiele prac dotyczących dokładności pomiarów i kalibracji systemów **medycznej** tomografii komputerowej, proponując np. użycie sztucznych „fantomów” o znanych właściwościach [86] lub porównywanie wyników pomiarów tomograficznych z innymi metodami pomiaru wielkości geometrycznych [45, 199, 209]. Dla tomografii **technicznej** opracowano zalecenia VDI/VDE 2630 [231], a wielu auto-

rów zaleca – za normą ISO 15530 [173] – stosowanie skalibrowanych wzorców do oceny zdolności pomiarowej [4, 14, 15, 98, 141, 198].

Proces pomiaru metodą tomografii komputerowej jest – w porównaniu z innymi technikami pomiarowymi – bardzo skomplikowany technicznie. Składa się z trzech etapów:

1. Rejestracji obrazów rentgenowskich obiektu na płaskim detektorze.
2. Obliczenia modelu wokselowego na podstawie zestawu obrazów.
3. Pomiarów *off-line* na trójwymiarowym modelu wokselowym lub modelu przetworzonym do innej postaci strukturalnej.

Każdy z tych etapów charakteryzuje się pewnymi ograniczeniami, wynikającymi z konstrukcji urządzenia i budowy oprogramowania, oraz parametrami procesowymi, dobieieranymi przez operatora na podstawie jego wiedzy i doświadczenia.

Na etapie **rejestracji obrazów** dokładność późniejszych pomiarów zależy bezpośrednio od rozdzielczości bezwzględnej obrazów i ich jakości – zniekształceń geometrycznych i zakłóceń sygnału w każdym z elementów macierzy detektora. Możliwości minimalizacji przez użytkownika niekorzystnych czynników na tym etapie polegają na doborze parametrów ekspozycji w trzech miejscach:

- źródło promieniowania – napięcie i natężenie prądu w lampie, rodzaj prefiltrowa (zasłony) na wyjściu promieni z lampy,
- obiekt – właściwe pozycjonowanie w przestrzeni roboczej: odległość, decydująca o powiększeniu obrazu i jego rozdzielczości bezwzględnej, stabilność mocowania, eliminująca błędy rozmycia, i właściwa orientacja obiektu, minimalizująca drogę promieni rentgenowskich przez materiał obiektu podczas wszystkich ekspozycji,
- detektor – czas integracji, wzmocnienie sygnału, łączenie pikseli (*binning*), uśrednianie.

Na etapie **obliczania modelu wokselowego** z zestawu obrazów z ekspozycji dokładność późniejszych pomiarów zależy od algorytmu obliczeniowego (patrz np. [76, 165, 225, 256]); można sterować niektórymi jego parametrami, np.:

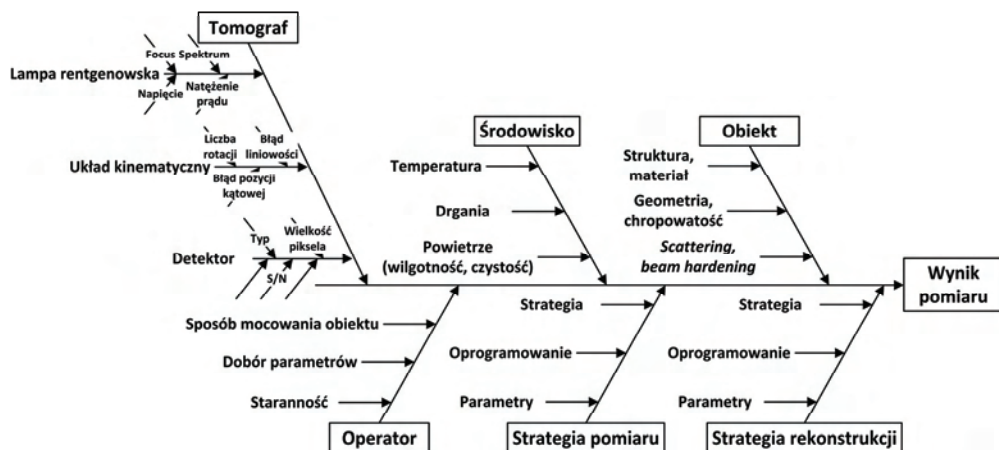
- aktywacją programowych filtrów usuwających szum i/lub zniekształcenia o znanym pochodzeniu, np. artefakty kołowe (skutek różnic między czułościami elementów detektora) lub efekt „utwardzania promieni” (*beam hardening*, skutek różnic w przenikalności fotonów o różnych energiach),
- korekcją obrazów wobec niestałości w czasie poziomu promieniowania źródła,
- normalizacją rezultatów (wartości przypisanych wokselom) wobec nieliniowej czułości elementów detektora.

Na ostatnim etapie, w **pomiarach *off-line*** na bazie modelu 3D, na dokładność pomiarów wpływa sposób przetwarzania obliczonego modelu wokselowego i budowania konstrukcji do obliczania mierzonych wielkości geometrycznych (np. identyfikacji płaszczyzn i walców, rozdział 6).

W wielu ośrodkach prowadzone są badania nad różnymi aspektami pomiarów za pomocą tomografii komputerowej, np.:

- w pracy [126] przedstawiono propozycję teoretycznej metody obliczania niepewności pomiaru i określono niektóre składniki budżetu niepewności na podstawie serii badań eksperymentalnych, ale metoda odnosi się tylko do pomiarów długości na wybranym płaskim przekroju przez mierzony obiekt,
- publikacja [158] opisuje badania nad wpływem zjawiska rozpraszania fotonów (*scattering*) na dokładność pomiarów,
- autorzy pracy [161] zajęli się wpływem rozdzielczości przestrzennej i szumu w obrazach rejestrowanych przez detektor,
- praca [197] przedstawia metodę doboru parametrów pomiaru (ustawień dla pracy źródła i detektora), opartą na bazie wiedzy pochodzącej z badań empirycznych.

W procedurze badawczej przygotowywanej w LRE dla pomiarów metodą tomografii technicznej wstępnie zidentyfikowano źródła niepewności (rys. 5.2) i najbardziej istotne składniki jej budżetu: MPE skanera (uzyskane przez jego wzorcowanie według zaleceń VDI/VDE 2630), temperatura podczas pomiaru, strategia i parametry procesu rejestracji i rekonstrukcji. Trwają badania walidacyjne do określenia wpływu poszczególnych składników na niepewność złożoną.



Rys. 5.12. Źródła błędów pomiaru z użyciem tomografu technicznego (oprac. własne)

5.6.2. Inne nieoptyczne techniki pomiarowe

W badaniach inżynierii odwrotnej można wykorzystać także dane pochodzące z innych niż wymienione urządzeń do trójwymiarowego obrazowania, np.:

- stosowanych w diagnostyce medycznej – emisyjnej tomografii pozytonowej (*positron emission tomography*, PET), emisyjnej tomografii pojedynczych fotonów (*single photon emission computed tomography*, SPECT), tomografii op-

tycznej, rezonansu magnetycznego (*magnetic resonance imaging*, MRI), funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (*functional MRI*, fMRI), ultrasonografii 3D itp.,

- stosowanych w badaniach morskich, powietrznych i lądowych – radarów (wykorzystujących fale elektromagnetyczne), lidarów (laserowych) i sonarów (dźwiękowych),

jeśli tylko możliwe jest dopasowanie formatów wymiany danych geometrycznych 3D i kalibracja takich urządzeń za pomocą wzorców fizycznych spójnych z metrycznym systemem miar.

5.6.3. Zdolności pomiarowe urządzeń nieoptycznych

Charakterystykę nieoptycznej techniki pomiarowej z użyciem technicznej (przemysłowej) tomografii komputerowej przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Charakterystyka nieoptycznej techniki pomiarowej

Technika	Zastosowanie	Struktura danych wynikowych	Miara zdolności pomiarowej
Tomografia komputerowa	Pomiary i badania cech geometrycznych powierzchni i struktury wewnętrznej obiektów	Model wokselowy niehomogeniczny	MPE wg VDI/VDE 2630

5.7. Pomiary wielosensorowe

Różne techniki pomiarów 3D mają wady i zalety, wynikające z ich ograniczeń technicznych, powstało zatem wiele koncepcji łączenia technik w zintegrowane wielosensorowe systemy pomiarowe lub chociaż łączenia rezultatów pomiarów jednego obiektu wykonanych różnymi technikami, np.:

- autorzy pracy [93] opracowali metodę łączenia fotogrametrii i skanowania z oświetleniem strukturalnym, szczególnie w zastosowaniach do archiwizacji obiektów dziedzictwa kulturowego (problemy związane z takimi pomiarami opisano w rozdziale 2.3),
- w pracy [18] autor zaproponował połączenie skanowania laserowego i fotogrametrii,
- w pracy [20] opisano technikę pomiarów z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej z sondą stykową w połączeniu z głowicą laserową liniową,
- zespół polskich naukowców opracował metodę łączenia pomiarów za pomocą jednego lub kilku skanerów z oświetleniem strukturalnym i pomiarów na WMP,

łącznie z obliczeniami zdolności pomiarowej takiego systemu hybrydowego [208, 212],

- niemieccy metrologowie postulują łączenie w ramach jednego systemu pomiarowego jeszcze większej liczby różnych typów sensorów: stykowych, optycznych, laserowych, tomograficznych, a nawet mikroskopowych [239, 240],
- zapewne dlatego też niemiecka firma Werth Messtechnik pierwsza zaoferowała komercyjny system do badań techniką tomografii komputerowej ze zintegrowanymi sensorami stykowym i optycznym [241].

W łączeniu wyników pomiarów jednego obiektu różnymi technikami problemem jest składanie otrzymanych zbiorów danych 3D w jeden model (tzw. „fuzja danych”, *data fusion*), w ramach którego należy rozwiązać zagadnienie „nakładania” danych 3D (*registration*, patrz rozdział 6.2), które mogą się różnić rozdzielczością, strukturą (np. model wokselowy nakładany na siatkę trójkątów), a nawet zarejestrowanym kształtem obiektu (np. pomiary sensora stykowego są często dokładniejsze niż sensora optycznego i modele 3D nie mają dokładnie tych samych kształtów) – nakładanie modeli komplikuje się wówczas do przypadku tzw. nakładania elastycznego (*non-rigid registration*). Jednym z rozwiązań takiego problemu może być dodawanie pomocniczych punktów 3D do danych [201]. Bardziej szczegółowa analiza tego zagadnienia wykracza poza zakres niniejszej pracy.

5.8. Wnioski

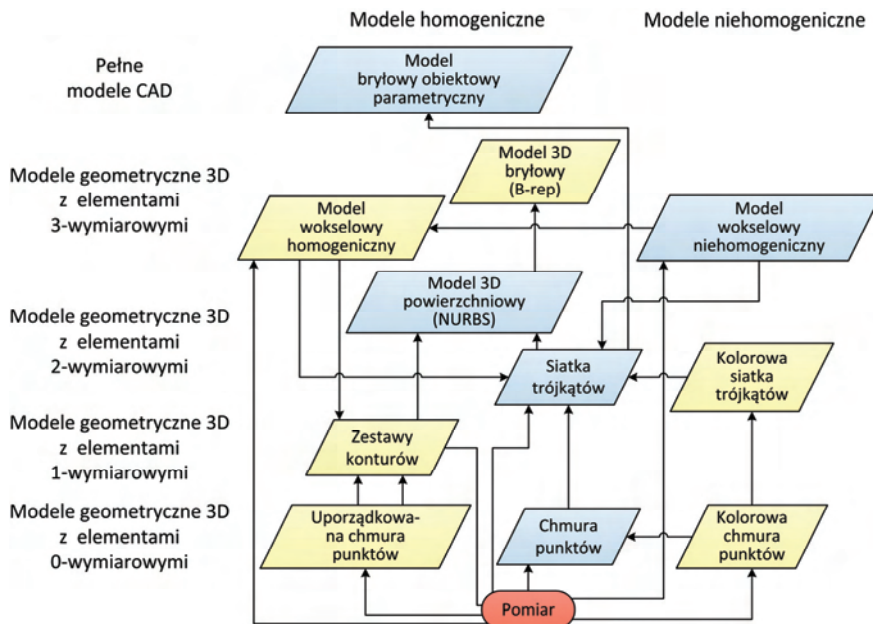
W rozdziale przedstawiono klasyfikację i przegląd technik pomiarowych stosowanych w badaniach inżynierii odwrotnej: od techniki niszczącej, przez stykowe, optyczne, w tym techniki laserowe i fotogrametryczną, po tomografię komputerową i techniki wielosensorowe. Opisano zasady działania różnych skanerów 3D i pokazano przykłady urządzeń komercyjnych.

Dla głównego celu monografii – metodyki zapewnienia spójności badań RE – istotne było wskazanie struktur danych pomiarowych uzyskiwanych w różnych technikach pomiarowych oraz znanych metod szacowania niepewności pomiarów. Pokazano także miary zdolności pomiarowej różnych technik – zgodne z normami, zaleceniami lub propozycjami przedstawianymi w literaturze – uwzględniane w budżecie niepewności pomiaru.

6. Przetwarzanie danych 3D

Wynikiem procesów pomiarowych opisanych w poprzednim rozdziale są modele 3D – w przypadku metod stykowych i refleksyjnych mają one najczęściej postać zbioru punktów 3D wyznaczających powierzchnie zewnętrzne obiektów, w przypadku metod niszczących lub wykorzystujących promieniowanie przenikliwe są to najczęściej zestawy cyfrowych obrazów rastrowych 2D, zawierających informacje także na temat wnętrza obiektów (kolor lub inne właściwości materiału).

W tym rozdziale pokazano różne struktury danych 3D oraz operacje, mające na celu wzrost stopnia ich uporządkowania (organizacji lub poziomu abstrakcji). Takie porządkowanie przez rekonstrukcje kolejnych struktur ułatwia późniejsze wykorzystanie danych 3D w projektowaniu, analizie obliczeniowej czy wizualizacji.



Rys. 6.1. Poziomy uporządkowania danych 3D i najważniejsze rodzaje przekształceń między nimi (oprac. własne)

Poziomy struktury danych 3D można uszeregować według złożoności ich elementów składowych: zbiór punktów 3D, nazywany w RE „chmurą punktów”, to postać najmniej uporządkowana, bo pozbawiona informacji o związkach między punktami, np. łączących je elementach powierzchniowych czy objętościowych, których granice punkty wyznaczają; modele CAD to postacie najbardziej uporządkowane – oprócz pełnej informacji o kształcie 3D i ewentualnej strukturze wewnętrznej zawierają też „intencje projektanta”, np. obiekty topologiczne na wyższym poziomie abstrakcji czy tolerancje wymiarów i kształtów. Próbę uszeregowania struktur danych 3D wraz z najczęściej występującymi przekształceniami między nimi przedstawiono na rys. 6.1. Kolorem błękitnym zaznaczono postacie danych będące zwykle efektem końcowym badań w RE.

Poziomy organizacji struktur danych 3D definiowane są w zależności od liczby wymiarów elementów składowych modeli 3D w ramach każdej struktury (punkt ma zero wymiarów, kontur – jeden, trójkąt – dwa, a woksel – trzy):

Poziom 0 Punkty – podstawowa informacja o wynikach pomiaru. Każdy punkt w przestrzeni 3D jest definiowany przez trzy liczby rzeczywiste, opisujące jego położenie w trójwymiarowej przestrzeni w układzie współrzędnych kartezjańskich:

$$P_i = (x_i, y_i, z_i); x_i, y_i, z_i \in \mathfrak{R}$$

W zbiorze danych pomiarowych o punktach 3D wiadomo tylko, że zostały zarejestrowane na powierzchni będącej zewnętrzną granicą mierzzonego obiektu. Punkty nie łączą się ze sobą i nie wiadomo, w jakiej kolejności były zarejestrowane, nie wiadomo też, w którym kierunku względem punktu znajduje się mierzony obiekt ani z którego kierunku nastąpiła rejestracja punktu.

Poziom 1 Kontury – zestaw krzywych łączących punkty pomiarowe w kolejności ich rejestracji, a więc najprawdopodobniej należące do tej samej powierzchni zewnętrznej mierzonego obiektu (a na pewno tej samej strony obiektu) – ta właściwość **sąsiedztwa punktów** (dla każdego punktu znane są dwa punkty sąsiednie) wskazuje na większe uporządkowanie danych pomiarowych połączonych w kontury w porównaniu do chmury indywidualnych punktów. W kolejnych przekształceniach danych 3D punkty wewnętrzne konturów między punktami pomiarowymi mogą stać się *częścią geometrii mierzonego obiektu* – istotny jest zatem wybór rodzaju krzywych konturowych: czy są krzywymi segmentowo-liniowymi, segmentowo-łukowymi, splajnami czy typu NURBS.

Pojedynczy kontur o segmentach **liniowych** jest zbiorem odcinków o początku i końcu w kolejnych punktach pomiarowych – takie odcinki są

z kolei zbiorami punktów leżących na prostych między punktem pomiarowym P_i a jego następcą P_{i+1} , wraz z tymi punktami:

$$k_i = \mathbf{P}_i \mathbf{P}_{i+1} = \{t\mathbf{P}_i + (1-t)\mathbf{P}_{i+1} : 0 \leq t \leq 1, t \in \mathfrak{R}\}$$

Pojedynczy kontur krzywoliniowy typu **NURBS**, łączący punkty pomiarowe od P_i do P_j , jest definiowany:

$$k_{i-1} = \frac{\sum_{l=i}^j w_l \mathbf{P}_l N_l^n(t)}{\sum_{l=i}^j w_l N_l^n(t)}, \quad t \in \mathfrak{R}, \quad n \in \mathbb{N}$$

gdzie w_l – „waga” punktu $\mathbf{P}_l$ (domyślnie wszystkie wagi są jednostkowe), $N_l^n(t)$ – unormowana funkcja B-sklejana (funkcja ilorazowa wielomianów n -tego stopnia, najczęściej trzeciego) [191].

W zbiorach danych pomiarowych kontury są często zamknięte, a punkty pomiarowe należące do nich są współpłaszczyznowe – wówczas umowna reguła określa, że mają taką samą wartość współrzędnej Z w układzie współrzędnych urządzenia pomiarowego.

Poziom 2– Siatka trójkątów²⁴ – zbiór płaskich trójkątów, w inżynierii odwrotnej – łączących sąsiednie punkty pomiarowe i skonstruowanych dzięki specjalnym algorytmom na bazie chmur punktów o wystarczającej gęstości (podrozdz. 6.3.3), zwykle ciągle (jednoznacznie zamykające wewnątrz niepusty fragment przestrzeni). Wzajemna relacja wierzchołków trójkąta ma wskazywać, że należą one do tej samej powierzchni zewnętrznej mierzonego obiektu – ta właściwość **sąsiedztwa** (dla każdego punktu znane są dwa lub więcej punktów sąsiednich) wskazuje na większe uporządkowanie danych pomiarowych w siatce trójkątów w porównaniu do chmury indywidualnych punktów.

Płaski trójkąt rozpięty na trzech punktach $\mathbf{P}_i$, $\mathbf{P}_j$ i $\mathbf{P}_k$ jest zbiorem:

$$\mathbf{T} = \Delta \mathbf{P}_i \mathbf{P}_j \mathbf{P}_k = \{u\mathbf{P}_i + v\mathbf{P}_j + (1-u-v)\mathbf{P}_k : \\ 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1, u, v \in \mathfrak{R}\}$$

²⁴ W literaturze można też na siatkę trójkątów znaleźć określenie „powierzchnia triangularna” lub „triangularyzowana”, pochodzące od nazwy procesu „triangulacji” lub „triangularyzacji” (*triangulation*) – tworzenia siatki trójkątów przez łączenie punktów w trójkąty lub przez dzielenie powierzchni wyższego poziomu na trójkąty.

W zbiorze danych pomiarowych trójkąty wiążą trzy sąsiednie punkty pomiarowe i przybliżają **lokalnie** kształt powierzchni zewnętrznej mierzonego obiektu. Trójkąty łączą się na wspólnych krawędziach i we wspólnych wierzchołkach w siatkę, która aproksymuje **globalnie** całą zmierzoną powierzchnię zewnętrzną obiektu. Każda krawędź każdego trójkąta w siatce może należeć tylko do niego i co najwyżej jednego sąsiada.

Poziom 2+ Polipowierzchnia – złożenie elementów geometrycznych typu „powierzchnia krzywokreślna” (powierzchnie płaskie, prostokreślnie i obrotowe są ich szczególnymi przypadkami), opisujące kształt w modelu 3D. Indywidualne powierzchnie mogą być definiowane:

- funkcją matematyczną trzech zmiennych x , y i z opisujących współrzędne kartezjańskie (reprezentacja bezpośrednia, *implicit representation*):

$$P = \{\langle x, y, z \rangle \in \mathbb{R}^3 : F(x, y, z) = 0\}$$

gdzie $F: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ jest pewną funkcją skalarną trzech zmiennych; przykładem reprezentacji bezpośredniej jest definicja sfery: $x^2 + y^2 + z^2 - r^2 = 0$;

- układem trzech równań z dwoma parametrami (reprezentacja parametryczna, *parametric representation*):

$$P = \{\langle x(u, v), y(u, v), z(u, v) \rangle \in \mathbb{R}^3 : u, v \in \mathbb{R}\}$$

gdzie współrzędne kartezjańskie $x(u, v)$, $y(u, v)$ i $z(u, v)$ są funkcjami parametrów u i v ; przykładowa sfera jest w reprezentacji parametrycznej definiowana jako:

$$\{\langle x, y, z \rangle : x = r \sin(u) \cos(v), y = -r \cos(u),$$

$$z = -r \sin(u) \sin(v), \quad 0 \leq u \leq 2\pi, \quad 0 \leq v \leq \pi\}$$

W większości programów do modelowania 3D stosuje się parametryczną reprezentację elementów powierzchniowych za pomocą wielomianów (np. krzywych Beziera) lub ilorazów wielomianów (NURBS, podrozdział 6.7) [191].

W zbiorze danych pomiarowych powierzchnie mogą być dzięki specjalnym algorytmom „rozpoznawane” w wydzielonych fragmentach chmury punktów lub siatki trójkątów – są wówczas aproksymacją kształtu zmierzonego obiektu na **wyższym poziomie abstrakcji**, łącząc duże obszary zmierzonej powierzchni zewnętrznej (wiele punktów pomiarowych) w większe kompleksy, w tym także regularne prymitywy geometryczne: walce, stożki, sfery, torusy, wielościany itp.

Poziom 3– Woksele – elementy 3-wymiarowe, prymitywne – mają kształt prostopadłościanu (często wręcz: sześciianu). Nazwa pochodzi od angielskiego słowa *voxel*, które zostało utworzone jako skrótowiec od *volume(tric) pixel*²⁵ („piksel objętościowy”). Modele wokselowe są efektem pomiarów metodami transmisyjnymi (rozdział 5) i w wersji niehomogenicznej²⁶ przenoszą informacje o właściwościach materiałowych. Model wokselowy niehomogeniczny można zdefiniować jako macierz wokseli $w[i, j, k]$:

$$W = \{w[i, j, k] \in \mathbb{N} \text{ lub } \mathfrak{R}, i, j, k \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$$

a model wokselowy homogeniczny jako macierz:

$$W = \{w[i, j, k] \in \{0,1\}: i, j, k \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$$

W kolejnych przekształceniach geometrycznych 3D w inżynierii odwrotnej struktury wokselowe są zwykle od razu – za pomocą specjalnych algorytmów – redukowane do poziomu 2– (siatka trójkątów).

Poziom 3+ Bryła – w większości systemów do modelowania 3D reprezentowana jest za pomocą swoich powierzchni granicznych (*boundary representation*, B-rep); przewagą modeli bryłowych nad powierzchniowymi jest gwarancja utrzymywania ciągłości tych granic w różnych operacjach modyfikujących bryły (boolowskie dodawanie, odejmowanie, część wspólna), w rekonstrukcjach RE modele bryłowe nie mają zbyt wielu innych zalet, występują zwykle jako etap pośredni w dochodzeniu do postaci modelu CAD.

Poziom 4 Model CAD – w pełni funkcjonalny model CAD oprócz geometrii 3D zawiera informacje dodatkowe (obiekty, parametry, tolerancje), które – jeśli są potrzebne – muszą być specjalnie dodawane jako nieobecne w danych pomiarowych (więcej w podrozdziale 6.9).

²⁵ *Pixel* („piksel”) to z kolei skrótowiec od *picture element* („element obrazu” – w domyśle: rastrowego).

²⁶ Stosowane tutaj określenie „niehomogeniczny” wskazuje, że model oprócz informacji geometrycznych o obiekcie zawiera także informacje o wybranej cesze *jego materiału lub struktury wewnętrznej*, np. kolorze, gęstości, kompozycji składników, która ma zwykle zmienny (niejednorodny, stąd nazwa) rozkład przestrzenny. Jeśli model nie zawiera informacji o takiej cesze (bo zakłada się lub wiadomo, że jej rozkład jest równomierny), to model nazywa się „homogenicznym”.

Wiele operacji przetwarzania danych w ramach danej struktury i operacji konwersji danych z jednej postaci struktury do drugiej wprowadza odchyłki do modelu zdigitalizowanego obiektu, niekiedy przekraczające swoją wartością błędy pomiaru. Celem tego rozdziału jest wskazanie źródeł tych odchyłek i metod ich obliczania, a także metod rejestracji i dokumentowania przekształceń danych 3D.

6.1. Efekty przekształceń struktur danych 3D

Każda operacja na danych 3D, prowadząca do wybranego celu badań RE, może skutkować zmianą jednego lub więcej rodzajów:

- wartości kartezjańskich **współrzędnych** x , y , z punktów opisujących strukturę 3D – jeśli operacja zmienia tylko współrzędne punktów 3D (na poziomie 0), punktów należących do konturów (poziom 1), węzłów trójkątów w siatkach (poziom 2–), punktów kontrolnych powierzchni NURBS (poziom 2+) itp., a nie zmienia postaci tych elementów struktury; celem takich operacji może być np. zmniejszenie gęstości danych, wygładzenie lub wyostrenie kształtu, aproksymacja idealnymi prymitywami geometrycznymi;
- **zakresu** kształtu opisywanego przez strukturę 3D – jeśli operacja usuwa część punktów pomiarowych (na poziomie 0), fragment siatki (poziom 2–) lub fragment modelu wokselowego (poziom 3–) dla wyboru istotnego fragmentu obiektu, będącego przedmiotem dalszej analizy, albo np. wydłuża powierzchnię (poziom 2+) dla utworzenia wyidealizowanego modelu 3D opartego na zmierzonym fragmencie kształtu;
- **poziomu** organizacji struktury 3D – jeśli operacja konwertuje chmurę punktów na siatkę trójkątów lub na powierzchnie krzywokreślne albo redukuje model wokselowy do postaci siatki trójkątów.

Aby zapewnić spójność badań, należy określić efekty każdej takiej zmiany w sposób jak najbardziej zobiektywizowany:

- zmianę **współrzędnych** – za pomocą wielkości odchyłki między kształtem po zmianie i przed zmianą, wyrażonej w jednostkach długości,
- zmianę **zakresu** – za pomocą opisu w dowolnej formie (tekstowej lub graficznej), dokumentującego zmianę,
- zmianę **poziomu** – za pomocą opisu lub samego modelu 3D, o którego poziomie struktury można wnioskować z jego budowy.

Przykładowy protokół, tzw. „rejestr spójności”, dokumentujący efekty pomiaru i przekształceń w łańcuchu procesów badania RE przedstawiono w tabeli 6.1. Zawiera on opisy operacji, ich parametry, określenie skutków i wskazanie modeli z zapisem danych wynikowych.

Tabela 6.1. Przykładowy rejestr spójności badania w RE

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka* (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
1	<program 1>	Pomiar w technice ...	<parametry pomiaru>	0,045 mm (niepewność pomiaru)	0 (chmura)	12 516 punktów
2		Usuwanie szumu	<parametry operacji >	0,018 mm		
3		Zapis do formatu TXT		0,0009 mm		
4	<program 2>	Konwersja do siatki trójkątów	<parametry konwersji>	0	2– (siatka)	24 891 trójkątów
5		Zmniejszenie gęstości siatki	<parametry przekształcenia>	0,042 mm		23 551 trójkątów
6		Zapis do binarnego formatu STL		~ 0		„deta145_2.stl”
Rozszerzona niepewność złożona badania**				0,064 mm		

* rozszerzone odchyłki oblicza się ze wzorów (4.16) lub (4.17)

** rozszerzoną niepewność badania oblicza się ze wzorów (4.14) i (4.15)

6.1.1. Odchyłki w przekształceniach danych 3D

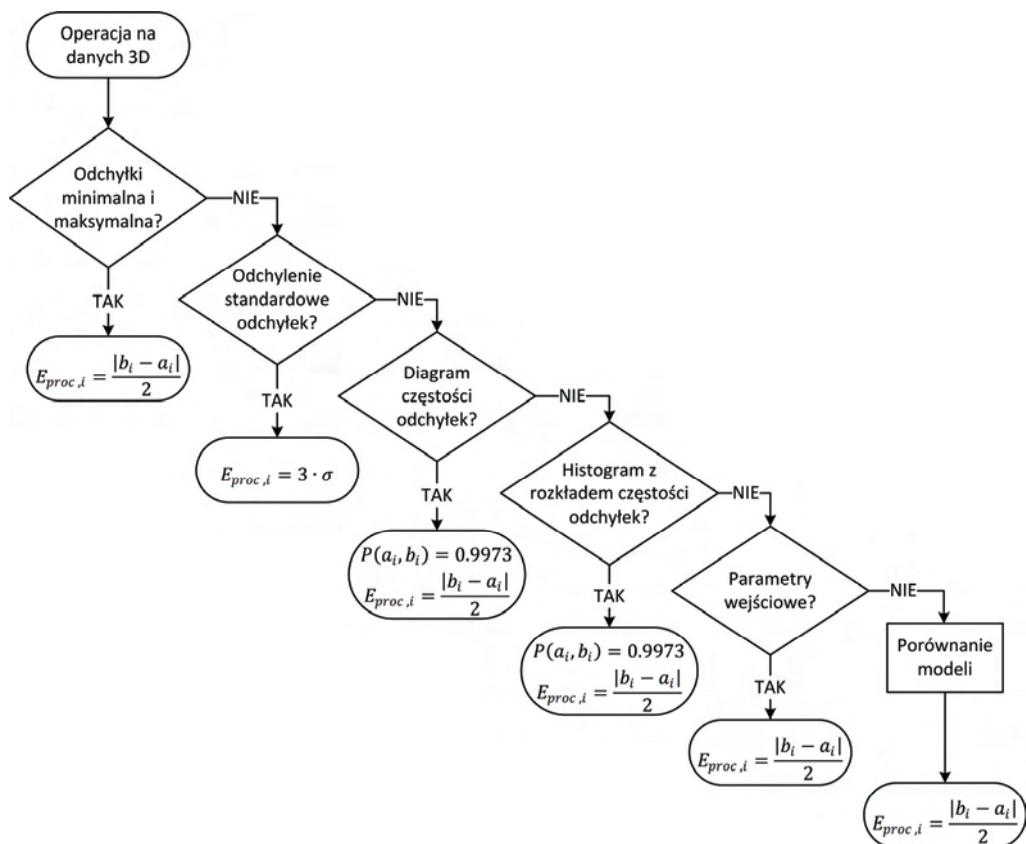
Przekształcenia danych mogą mieć charakter niezmienniający postaci ich struktury, mogą być konwersjami do innej postaci struktury i mogą polegać na transferze danych z wykorzystaniem odpowiednich formatów zapisu kształtów 3D. Rozszerzone odchyłki są w tych przypadkach obliczane w różny sposób:

1. Rozszerzona odchyłka $E_{proc,i}$ w **przekształceniach** modelu 3D niezmienniających postaci jego struktury oblicza się według wzoru (4.16), porównując stan modelu po przekształceniu ze stanem sprzed przekształcenia według następującego algorytmu (rys. 6.2):

- jeśli po wykonaniu operacji w programie RE generowany jest raport, wskazujący minimalne i maksymalne odległości między punktami definiującymi kształt 3D przed i po operacji, to do wzoru (4.16) należy te odległości wstawić jako a_i oraz b_i ,
- jeśli takie wielkości nie są dostępne, to:
 - jeśli po wykonaniu operacji w programie RE generowany jest raport, wskazujący odchylenie standardowe przesunięć/odległości punktów, to za $E_{proc,i}$ należy uznać trzykrotność tego odchylenia,
 - jeśli taka wielkość nie jest dostępna, to:
 - jeśli po wykonaniu operacji w programie RE można wygenerować dynamiczny diagram, wskazujący jaki odsetek punktów jest przesu-

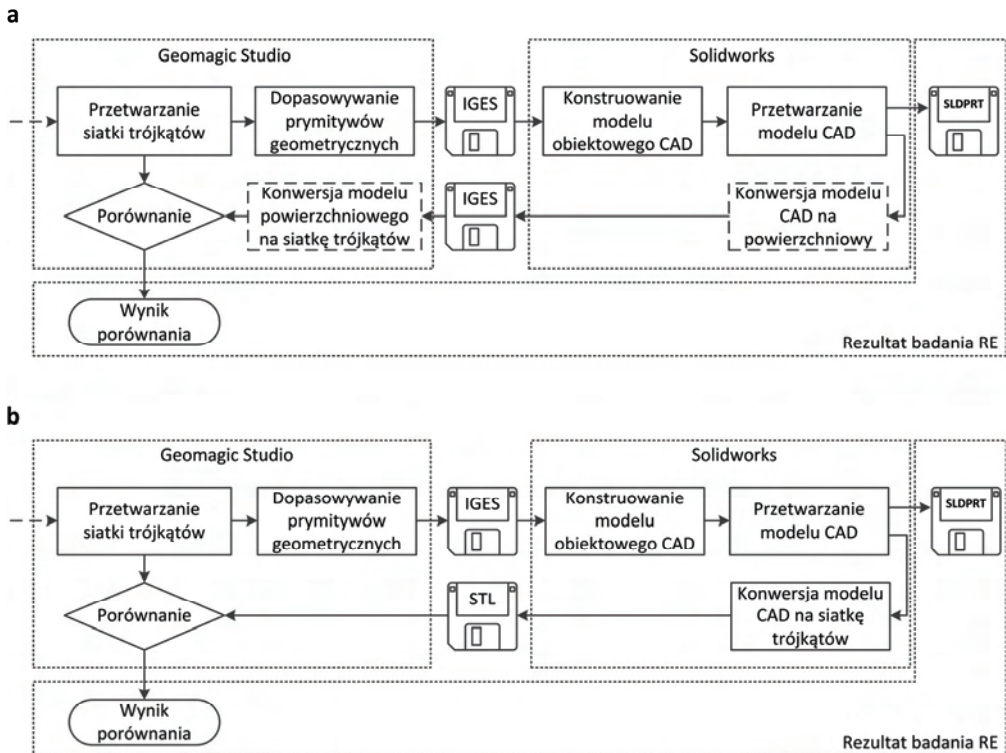
nięty/odchylony o jaką wartość, to za $E_{proc,i}$ należy uznać odchyłkę dla 99,73% liczby punktów (szerokość przedziału „3 sigma”),

- jeśli taki diagram nie jest dostępny, to:
 - jeśli po wykonaniu operacji w programie RE można wygenerować histogram z liczbami punktów przesuniętych/odległych o wartości należące do kilku przedziałów liczbowych, to należy zsumować tyle „słupków” histogramu, aby zawierały co najmniej 99,71% liczby punktów – i odczytać granice dolną i górną i użyć ich jako a_i oraz b_i , a w ostateczności (jeśli rozdzielczość histogramu jest za mała) – znaleźć najmniejszą i największą odchyłkę dla całego histogramu i użyć ich jako a_i oraz b_i ,
 - jeśli dana operacja żadnej z opisanych informacji nie raportuje, to:



Rys. 6.2. Obliczanie rozszerzonej odchyłki w przekształceniu danych 3D (oprac. własne)

- jeśli wśród parametrów wejściowych operacji jest maksymalna dopuszczalna zmiana kształtu (dodatnia), to za b_i przyjmuje się tę wartość graniczną, a za a_i – jej wartość ujemną,
 - w pozostałych przypadkach:
 - należy wykonać niezależne porównanie modeli sprzed i po operacji (podrozdział 6.2) i odczytać minimalne (a_i) i maksymalne (b_i) różnice między nimi.
2. Rozszerzone odchyłki w **konwersjach** modelu 3D do innych postaci strukturalnych oblicza się podobnie jak dla przekształceń – zgodnie z opisaną procedurą, ale obliczanie różnic między niektórymi postaciami modeli 3D może być trudne. Procedury porównywania modeli 3D zaimplementowane w programach RE nie akceptują wszystkich możliwych struktur danych, np. modeli bryłowych czy modeli CAD, a niektóre spośród struktur akceptowanych i tak są przed porównaniem wewnętrznie konwertowane na struktury niższego poziomu (np. model



Rys. 6.3. Dwa scenariusze pośredniego porównania wynikowego modelu CAD (bryłowego, obiektowego, parametrycznego) ze źródłową siatką trójkątów:

- a) dwie konwersje pomocnicze (o parametrach obliczanych automatycznie),
 b) jedna konwersja pomocniczej (o parametrach wybieranych przez operatora) (oprac. własne)

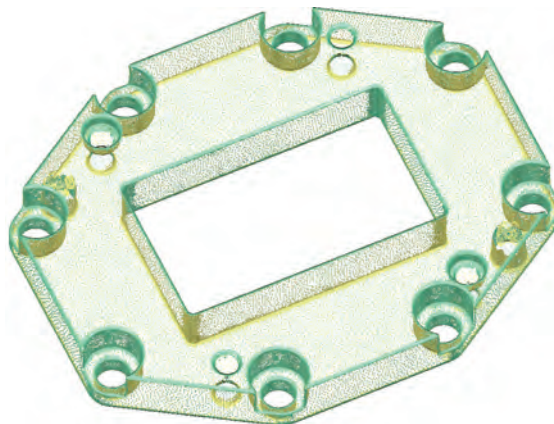
powierzchniowy 3D na siatkę trójkątów). Dla struktur o postaci nieakceptowanej należy wygenerować postać akceptowaną i podczas takiej pomocniczej konwersji zadbać, jeśli to możliwe, o minimalizację ewentualnych dodatkowych odchyłek.

Na rysunku 6.3 pokazano dwie możliwości takiego konwertowania przed porównaniem modelu wynikowego w postaci modelu CAD z modelem wyjściowym w postaci siatki trójkątów do oceny odchyłki łańcucha procesów przetwarzania. W pierwszym scenariuszu konwersja odbywa się automatycznie w programie CAD i w programie RE, w drugim – konwersję wywołuje operator i może decydować o jej parametrach – w tym przypadku o jakości dopasowania siatki generowanej z modelu CAD, a tym samym o potencjalnych dodatkowych odchyłkach towarzyszących operacji porównania.

3. W trzecim możliwym rodzaju przekształceń danych 3D – w operacjach **transferu** danych – rozszerzone odchyłki oblicza się według wzoru (4.17) w zależności od zidentyfikowanej rozdzielczości zapisu liczb określających współrzędne 3D:
 - w formatach **binarnych** przy pojedynczej precyzji (32-bitowej) liczby są równoważne dziesiętnemu zapisowi w postaci 7–8 cyfr znaczących, przy podwójnej precyzji (64-bitowej) – w postaci 15–16 cyfr znaczących (rozdział 4.2.2), więc odchyłka jest pomijalnie mała, np. dla modelu o gabarytach kilkusetmilimetrowych (np. większe części w przemyśle samochodowym), w zapisie z pojedynczą precyzją $d_i = 0,0001$ mm, czyli ostatecznie $E_{\text{proc},i} = 0,000086$ mm $\approx 0,1$ μm ;
 - większe odchyłki możliwe są podczas transferu przez formaty **tekstowe**, w których liczby dziesiętne mogą być zapisywane za pomocą nawet tylko 3–4 cyfr znaczących (rys. 6.15) – w takim samym modelu będzie więc: $d_i = 0,1$ mm, czyli $E_{\text{proc},i} = 0,086$ mm ≈ 90 μm .

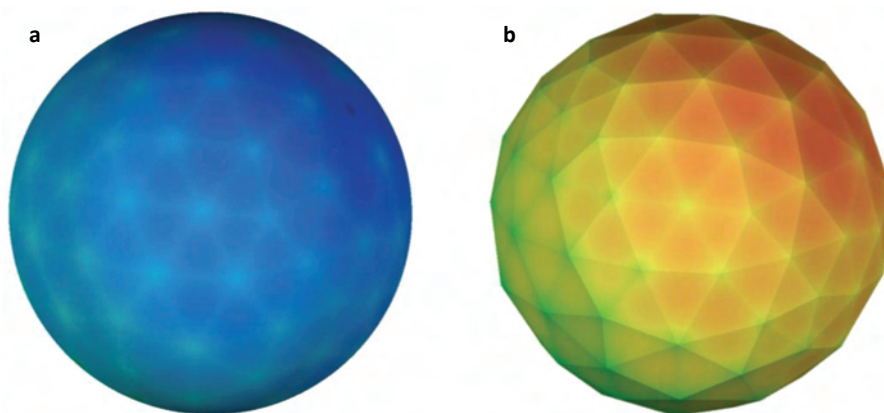
6.2. Porównywanie modeli 3D

Porównanie dwóch modeli 3D polega na obliczeniu różnic między ich kształtem, jakkolwiek byłby on reprezentowany. Teoretycznie można porównać ze sobą modele o dowolnej strukturze, praktycznie algorytmy zaimplementowane w programach RE mają pewne ograniczenia, np. wymagają, aby w jednej ze struktur zidentyfikowane były punkty, w których są obliczane odległości do kształtu drugiego z modeli. Efektem porównania jest wówczas **dyskretne pole skalarne**: skończony zbiór umocowanych w punktach pierwszego modelu odległości tych punktów od najbliższych elementów geometrycznych drugiego modelu (trójkątów, krzywych, powierzchni itp.). Odległości mogą mieć wartość dodatnią lub ujemną, w zależności od tego czy element jest oddalony od punktu w kierunku „zewnętrznym” (na zewnątrz obiektu opisywanego przez zbiór punktów) czy „wewnętrznym”.



Rys. 6.4. Wizualizacja obliczonej dla punktów 3D odległości od elementów innego modelu

Bezpośrednia wizualizacja różnicy między modelami, czyli zbioru odległości, może polegać na kolorowaniu punktów 3D według przyjętej hierarchii kolorów (np. ciemnoczerwony – duża odległość dodatnia, zielony – odległość w okolicy zera, ciemnoniebieski – duża odległość ujemna). Ponieważ jednak wizualizacje kolorowych punktów są mało czytelne (rys. 6.4), częściej wykonuje się wizualizacje rozpiętych na tych punktach polipowierzchni (jeśli są już zdefiniowane w strukturze, która została wybrana do porównania jako pierwsza) – lokalny kolor zależy od wartości odległości od drugiego modelu w punktach, na których powierzchnie są rozpięte – takie powierzchniowe „mapy odchyłek” pokazano już w tej pracy na rys. 2.10, rys. 4.3 i wielokrotnie w rozdziale 7.



Rys. 6.5. Dwa porównania tych samych modeli o kształcie sfer o nieznacznie różnej średnicy i znacznie różniących się gęstościach (liczebnościach) punktów pomiarowych:

- a) modelem referencyjnym jest model o większej gęstości i średnicy,
- b) modelem referencyjnym jest model o mniejszej gęstości i średnicy (oprac. własne)

Należy podkreślić, że porównywanie nie jest operacją przemiennej – rezultat zależy od tego który model zostanie wskazany jako „referencyjny”, a który jako model do porównania. Poza tym, że po zamianie kolejności modeli do porównania odległości między nimi będą miały przeciwne znaki, to o wyglądzie „mapy odchyłek” będzie też decydować rozmieszczenie i gęstość punktów w modelu referencyjnym (rys. 6.5). Wybór referencyjnego modelu o większej gęstości powoduje wydłużenie czasu obliczeń, ale daje w efekcie więcej informacji o różnicy między modelami. W łańcuchu procesów przetwarzania modeli 3D należy konsekwentnie wykonywać porównania, wybierając jako referencyjny model sprzed operacji.

Aby zmierzyć odległości między dwoma dowolnymi modelami 3D, należy najpierw je ze sobą wyrównać – taki proces nazywany jest „nakładaniem” (*alignment* lub *registration*) modelu porównywanego na model referencyjny²⁷. Możliwe jest nakładanie ręczne lub automatyczne. W tym pierwszym operator programu wskazuje odpowiadające sobie elementy geometryczne (punkty, krawędzie lub powierzchnie) w obydwu modelach, co umożliwia programowi obliczenie trójwymiarowej transformacji w układzie współrzędnych modelu drugiego do pozycji i orientacji pierwszego tak, aby wskazane wspólne elementy się nałożyły.

Nakładanie automatyczne (tzw. *best-fit*) polega na tak długim iteracyjnym zmienianiu pozycji i orientacji przestrzennej modelu porównywanego, aż odległości między nim a modelem referencyjnym będą mniejsze niż założona granica (mała, np. na poziomie 0,01 mm). Początkowa pozycja i orientacja mogą być wskazane przez operatora, co pozwala na zmniejszenie liczby iteracji.

Funkcją celu w minimalizacji odległości między modelami jest zwykle minimum średniej kwadratowej (*root mean square*, RMS) wszystkich odległości, liczonych dla wszystkich punktów modelu referencyjnego (niektóre implementacje wybierają „reprezentatywny” podzbiór punktów dla przyspieszenia obliczeń, np. 10% punktów). Algorytmy rozwiązujące to zagadnienie są oparte na klasycznym algorytmie ICP (*Iterative Closest Point*) [21, 90, 255, 261]:

1. Dla każdego punktu referencyjnego znajdź najbliższy element modelu porównywanego.
2. Oblicz parametry transformacji modelu porównywanego (rotacja i translacja w przestrzeni 3D) tak, aby zminimalizować funkcję celu – średnią kwadratową odległości.
3. Wykonaj transformację modelu porównywanego.
4. Jeśli wartość funkcji celu nie jest mniejsza niż założona granica, wróć do punktu 1.

²⁷ Proces nakładania można pominąć, jeśli jeden z modeli jest pochodną drugiego – powstał przez operację przekształcającą kształt, które nie zmieniają położenia i orientacji całego modelu w przestrzeni – tak działają np. opisane później w tym rozdziale „redukcja szumu” w chmurze punktów albo „relaksacja” i „decymacja” siatki trójkątów.

Opracowano także algorytmy nakładania modeli 3D, w których w kształtach opisanych modelami automatycznie identyfikowane są podstawowe obiekty geometryczne [142, 264].

Końcowe wartości odległości między modelami **nałożonymi** są traktowane jako różnice między kształtami obydwu modeli w operacji **porównywania**. Dlatego precyzja porównania (jego niepewność) zależy od jakości uprzedniego nałożenia modeli, w znaczeniu sprawności odpowiedniego algorytmu [160].

6.3. Modele 3D w postaci chmur punktów

W inżynierii odwrotnej „chmura punktów” to zbiór punktów 3D, będących najczęściej efektem digitalizacji metodą stykową lub optyczną. Każdy punkt w chmurze jest opisany trzema współrzędnymi kartezjańskimi w układzie współrzędnych systemu pomiarowego. Punktów może być od kilkudziesięciu (w pomiarach na maszynie współrzędnościowej z głowicą impulsową) do wielu milionów (w pomiarach skanem laserowym dalekiego zasięgu). Przykładowy widok chmury punktów przedstawiono na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Chmura punktów po digitalizacji obiektu 3D
(obiekt: płaskorzeźba na portalu jednego z budynków Politechniki Wrocławskiej,
urządzenie pomiarowe: skaner laserowy punktowy średniego zasięgu)

Chmura stanowi najmniej uporządkowaną postać danych pomiarowych, nie zawiera bowiem informacji innych niż położenie zmierzonych punktów w przestrzeni – kolejność punktów jest nieistotna, brak jest jakichkolwiek między nimi związków, np.

wskazujących na topologię zmierzonych powierzchni. Przy zbyt małej gęstości próbkowania (zbyt dużych odległościach między punktami pomiarowymi) automatyczne odtworzenie takiej topologii może być trudne lub niemożliwe (podrozdział 6.3.3).

6.3.1. Metody zapisu chmur punktów

Brak jest formalnego standardu zapisu chmur punktów. Wszystkie programy do ich generowania i przetwarzania obsługują **format tekstowy** (formalnie w kodzie ASCII [106]), a pliki najczęściej mają rozszerzenie TXT, XYZ lub ASC.

Struktura pliku tekstowego jest prosta – każdy kolejny punkt jest zapisywany w jednej linii za pomocą jego kartezjańskich współrzędnych x , y i z (w układzie współrzędnych urządzenia pomiarowego), opisanych liczbami rzeczywistymi oddzielonymi przecinkami lub spacjami (rys. 6.7). Kolejność punktów nie ma znaczenia, brak jest ustaleń dotyczących precyzji liczb rzeczywistych, w pliku zwykle nie występuje nagłówek ani specjalne zakończenie, nie jest też z góry określona liczba punktów.

7.0424	6.5984	-29.1620
6.9441	7.0489	-28.7910
5.4865	7.2706	-27.5891
4.7483	6.9396	-26.7842
4.1415	7.2435	-26.6019

Rys. 6.7. Przykładowy fragment pliku ASCII z zapisem chmury punktów

W niektórych zastosowaniach spotyka się wersje formatu tekstowego, w których w każdej linii liczby oznaczające trzy współrzędne poprzedzone są **numerem** lub **nazwą** punktu 3D. Można też znaleźć aplikacje, w których wraz z punktami 3D zapisywane są **wektory normalne** do hipotetycznej powierzchni w tych punktach (normalne wykorzystywane są przez niektóre algorytmy rekonstrukcji powierzchni) – do trzech liczb opisujących współrzędne punktu dochodzą kolejne trzy liczby opisujące współrzędne wektora normalnego. Dla niehomogenicznych chmur punktów w formacie tekstowym mogą być zapisywane także cechy punktów inne niż geometryczne (podrozdział 6.3.5).

Punkt 3D występuje w programach CAD jako element składowy modeli 3D, podobnie jak linia czy okrąg, zatem formaty przeznaczone do zapisywania modeli CAD, zarówno zamknięte/natywne²⁸, jak i otwarte/neutralne, także mogą służyć do zapisywania chmur punktów – na rysunku 6.8 pokazano początek pliku w formacie IGES.

²⁸ Przymiotnik „nativny” pochodzi od angielskiego *native* i oznacza tyle co „rodzimy”, „pochodzący od/z ...”.

także do generowania siatki trójkątów na bazie chmury punktów i przetwarzania siatki (podrozdział 6.6.2).

Za najbardziej użyteczne dla inżynierii odwrotnej uważane są dwa pierwsze programy [42], ale ostatnio obydwaj ich producenci zostali przejęci przez firmę 3D Systems [1, 2], dotychczas znaną z produkcji urządzeń do wytwarzania przyrostowego²⁹, i w niedalekiej przyszłości można się spodziewać ich integracji.

Wśród operacji na chmurach punktów w większości programów użytkowych występują co najmniej następujące:

- usuwanie punktów – operacja ma na celu usunięcie niepotrzebnych danych i nie wnosi błędów do wyników pomiarów, jeśli tylko operator na skutek braku uwagi lub staranności nie usunie ze zbioru punktów danych istotnych, zmieniając zakres dalszych rekonstrukcji – jest to przypadek **błędu grubego** pomiarów, który jest stosunkowo prosty w identyfikacji,
- łączenie chmur (*merging*) – operacja ma na celu „sklejanie” danych pochodzących z kilku źródeł (np. z kilku pomiarów pod różnymi kątami lub różnych fragmentów obiektu); takie łączenie może wnosić błędy, a zasady ich obliczania są zgodne z takimi zasadami dla operacji łączenia siatek trójkątów, przedstawionymi w podrozdziale 6.6.2,
- usuwanie/redukcja szumu (*noise removal/reduction*) – operacja ma na celu „wygładzenie” hipotetycznych powierzchni opisywanych przez punkty pomiarowe; jeśli jest wykonane poprawnie, takie uśrednianie może redukować błędy pomiarowe, ale formalnie wnosi odchyłki do danych pomiarowych; istnieje wiele algorytmów stosowanych do usuwania szumu, najbardziej znany to filtr gaussowski (zakłada normalny rozkład zakłóceń; jeśli jakiś punkt jest oddalony od swoich sąsiadów bardziej niż by to wynikało ze średniej i odchylenia standardowego obliczonych globalnie, jego położenie jest korygowane lub jest całkowicie usuwany z chmury), ale można też stosować filtry bardziej wyrafinowane (nieliniowe, dyfuzyjne itp.) lub filtry znane z mikroskopowych pomiarów powierzchni [156] i ustandaryzowane (patrz np. normy ISO 213 i ISO 16610);
- zmiana próbkowania (*resampling*) – operacja ma na celu globalne wyrównanie lub zmniejszenie gęstości punktów w chmurze (zmniejszenie liczby punktów usprawnia kolejne operacje na chmurze); jeśli operacja zmniejszenia gęstości jest zbyt agresywna i prowadzi do lokalnych deficytów punktów, może się przyczynić do problemów w rozpoznawaniu obiektów na kolejnych etapach przetwarzania (rozdział 4.2.2).

²⁹ To kolejny dowód na bliskie związki między tymi dwoma obszarami: wytwarzaniem generatywnym i inżynierią odwrotną.

Wiele innych działań na chmurach punktów ma swoje odpowiedniki wśród operacji wykonywanych na wygenerowanych z tych punktów siatkach trójkątów – takie operacje i ich skutki opisano w rozdziale 6.6.2 o siatkach.

W tabeli 6.3 przedstawiono sposób zapisu operacji przekształcających chmurę punktów w rejestrze spójności badania RE. Rozszerzoną odchyłkę przekształcenia należy obliczyć ze wzoru (4.16).

Tabela 6.3. Zapis skutków przekształcenia chmury punktów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
i	<program>	<przekształcenie>	<parametry>	$E_{proc,i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	0 (chmura)	n punktów 3D

6.3.3. Konwersja chmury punktów na siatkę trójkątów

Matematyczna teoria i algorytmy obliczeniowe, które potrafią powiązać swobodne punkty w przestrzeni 3D w strukturę wyższego rzędu – siatkę wielokątów (*polygon mesh*), a najczęściej siatkę trójkątów, są znane od wielu lat. Opracowano różne metody generowania siatek, wiele z nich jest zaimplementowanych w programach użytkowych RE:

- Triangulacja Delaunaya, pierwotnie opracowana dla zagadnień 2D [58], została później rozszerzona na przestrzeń trójwymiarową; algorytm tworzy trójkąty łączące 3 punkty według reguły wymagającej, aby okrąg opisany na trójkącie nie zawierał innych punktów chmury niż jego wierzchołki; uzyskiwane w ten sposób trójkąty mają regularne kształty, np. nie są nadmiernie wydłużone (algorytm maksymalizuje najmniejszy kąt w trójkącie).
- Algorytm BPA (*ball-pivoting algorithm*) [19], opatentowany przez firmę IBM; zakłada, że trójkąt między 3 punktami jest tworzony wówczas, gdy kula o wybranej przez operatora średnicy i styczna do tych punktów nie zawiera ani nie dotyka innego punktu; po znalezieniu takiego trójkąta kula jest obracana wokół jednej z krawędzi trójkąta, utrzymując styczność z jej punktami końcowymi aż do momentu, gdy dotknie nowego punktu – wówczas tworzony jest kolejny trójkąt itd.
- Kształty alfa (*alpha shapes*) [71].
- Rekonstrukcje powierzchni Poissona (*Poisson surface reconstruction*) [125].
- Metoda ruchomej aproksymacji najmniejszych kwadratów (MLS, *Moving Least Squares*) [55].

Zamiana chmury na siatkę trójkątów nie zmienia kształtu 3D – wszystkie punkty 3D stają się wierzchołkami trójkątów siatki i nie zmieniają swojego położenia, więc nie pojawiają się odchyłki współrzędnościowe od kształtu zmierzonego – tabela 6.4.

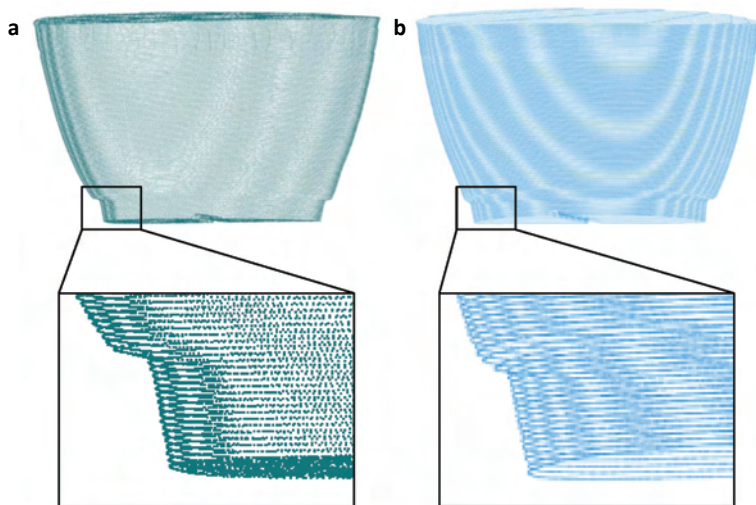
Tabela 6.4. Zapis skutków konwersji chmury punktów na siatkę trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	0 (chmura)	m punktów 3D
i	<program>	Konwersja chmury na siatkę	<parametry>	0	2- (siatka)	n trójkątów

Niektóre algorytmy mają trudności z danymi o lokalnie niewystarczającej gęstości próbkowania lub o gęstości znacząco się zmieniającej. Mogą wówczas pojawiać się zniekształcenia siatki, np. *aliasing* (rozdział 4.2.2), lub braki trójkątów, których nie potrafił skonstruować algorytm (powstają przerwy/„otwory” w siatce – metody ich usuwania opisano w podrozdz. 6.6.2).

6.3.4. Uporządkowane chmury punktów

W niektórych systemach digitalizacji obiektów 3D punkty pomiarowe są mierzone w określonej sekwencji lub sekwencjach na powierzchni obiektów. Skaner laserowy punktowy triangulacyjny DIGIBOT II rejestruje sąsiednie punkty powierzchni w określonym kierunku ruchu talerza obrotowego na kolejnych poziomach, zaczynając od dołu (przy wzrastającej wartości współrzędnej Z układu współrzędnych pomiarowych) – rys. 6.9.

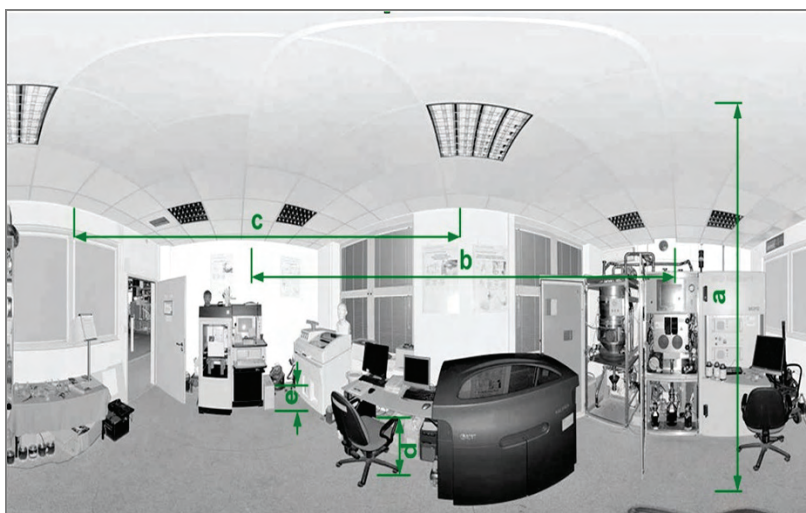


Rys. 6.9. Przykładowe wyniki pomiaru skanerem Digibot II: uporządkowana chmura punktów (a) i równoważny zestaw konturów (b) (oprac. własne)

Zamiast zapisywać komplet wyników pomiaru w postaci jednej chmury punktów (odtąd traktowanej jako nieuporządkowana), można na bazie takich uporządkowanych sekwencji punktów utworzyć zestaw konturów rozpiętych na punktach pomiarowych na każdym z poziomów i w ten sposób zachować informację na temat sąsiedztwa punktów na powierzchniach zmierzonego obiektu. Można w ten sposób uniknąć problemów z identyfikacją tej topologii podczas konwersji nieuporządkowanej chmury punktów na siatkę trójkątów. Oprogramowanie sterujące skanera DIGIBOT II umożliwia utworzenie takich zestawów konturów i zapisanie ich w formacie otwartym DXF jako zbioru elementów typu LINIA, rozpiętych na punktach pomiarowych. Postępowanie z modelami 3D w postaci zestawów konturów opisano w podrozdziale 6.5.

6.3.5. Kolorowe chmury punktów

Niektóre systemy digitalizacji obiektów 3D, oprócz geometrii obiektów, rejestrują także inne ich cechy. Na przykład skaner KONICA MINOLTA VI-9i [129] po zakończeniu pomiarów techniką laserową liniową wykonuje cyfrowe zdjęcie mierzonego obiektu i umożliwia „nałożenie” go na powierzchnię rozpiętą na punktach pomiarowych, co skutkuje opisaniem każdego punktu informacją o lokalnej wartości koloru obiektu. Podobnie skaner FARO FOCUS 3D [74] rejestrując punkty na mierzonych obiektach nie tylko oblicza ich położenie, ale intensywność odbitego w każdym punkcie promienia lasera, co umożliwia opisanie punktu dodatkową cechą – jasnością (rys. 6.10); skaner ten dysponuje także aparatem fotograficznym do rejestracji koloru obiektów w świetle naturalnym.



Rys. 6.10. Kolorowa (w skali szarości) chmura punktów uzyskana z pomiaru skanerem FARO FOCUS 3D

Punkty 3D z przypisaną im dodatkową cechą mogą być zapisywane w zmodyfikowanym formacie ASCII, gdzie każda linia opisuje nie tylko położenie punktu w przestrzeni (trzema liczbami rzeczywistymi), ale też cechę punktu (dla koloru RGB – w postaci trójki liczb, rys. 6.2). Spotyka się wówczas określenia takiego formatu jako XYZRGB, XYZUV itp.

-16.311325	23.502426	11.791306	47	52	42
-16.303513	23.505966	11.784256	49	55	46
-16.008133	21.247574	11.932541	75	94	98
-7.926956	21.224258	17.001022	38	29	20
-7.918747	21.226883	17.007309	38	29	20
-7.890457	21.240829	17.002609	41	32	23

Rys. 6.11. Fragment zapisu chmury punktów z kolorami w formacie ASCII – wariant XYZRGB

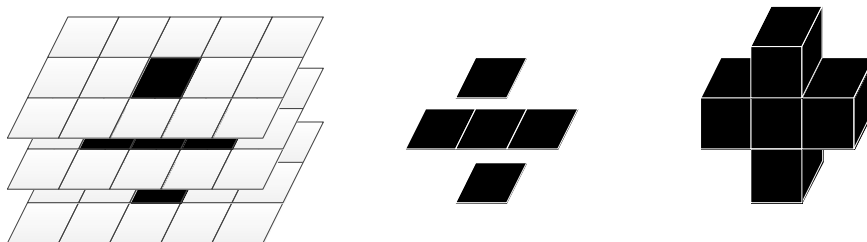
Można uzyskać kolorową chmurę punktów z modelu wokselowego niehomogenicznego (podrozdział 6.4), dla którego źródłem są przecież obrazy rastrowe kolorowe lub z odcieniami szarości. Punkty chmury mają „kolor” przejęty od pikseli obrazów, odpowiadający zależnie od metody pomiaru: kolorowi materiału w świetle białym (w technice pomiarowej niszczącej) lub szarości odpowiadającej pochłanianiałość przez materiał promieniowania rentgenowskiego (w tomografii komputerowej).

Kolorowa chmura punktów może być konwertowana do kolorowej siatki trójkątów – topologia siatki jest rekonstruowana zgodnie z metodami opisanymi w podrozdziale 6.3.3, a kolor punktów jest przenoszony do wierzchołków siatki (podrozdział 6.6.5).

6.4. Modele 3D wokselowe

Modele wokselowe³⁰ są efektem rejestracji zestawu obrazów cyfrowych przedstawiających kolejne przekroje przez obiekt badany w inżynierii odwrotnej technikami transmisyjnymi (tomografia komputerowa, metoda rezonansu magnetycznego, ultrasonografia) lub niszczącymi. Jeśli takie obrazy – zarejestrowane w równych odległościach od siebie i z jednakową rozdzielczością poziomą – ułoży się w stos według rosnącej odległości od pierwszego obrazu, to po umownym wydłużeniu każdego piksela z obrazu niższego wzwyż, do płaszczyzny kolejnego obrazu, powstanie model wokselowy (rys. 6.12).

³⁰ Modele wokselowe homogeniczne są znaną w geometrii 3D metodą reprezentacji brył przez „podział przestrzeni” (*space subdivision*), podobnie jak np. drzewa ósemkowe (*octrees*). Inne metody reprezentacji brył to reprezentacja brzegowa (*boundary representation*, B-rep) i konstruktywna geometria brył (*Constructive Solid Geometry*, CSG).



Rys. 6.12. Zestaw płaskich obrazów jest równoważny modelowi wokselowemu (w tym przypadku homogenicznemu)

Modele wokselowe reprezentowane są przez trójwymiarowe macierze o liczbie komórek zależnej od rozdzielczości obrazów i liczbie obrazów w zestawie. Z k obrazów rastrowych o rozdzielczości $m \times n$ powstaje macierz $m \times n \times k$ wokseli. Każda komórka tej macierzy zawiera liczbę:

- 0 lub 1 dla modeli **homogenicznych** – jednorodnych, bo przedstawiających obiekt geometryczny o jednolitej, stałej właściwości, którego elementy objętości (woksele) oznaczone wartością 1 są zanurzone w otoczeniu, którego woksele oznaczone są wartością 0; modele homogeniczne nazywane są także monochromatycznymi;
- o dowolnej wartości dla modeli **niehomogenicznych** (np. w technicznej tomografii komputerowej z 16-bitowym detektorem są to liczby całkowite od 0 do 65535); wartość woksela odpowiada lokalnej wartości pewnej właściwości reprezentowanego obiektu (gęstości radiologicznej, koloru w świetle białym itp.).

6.4.1. Metody zapisu modeli wokselowych

Model wokselowy może być zapisywany na dwa sposoby: jako zestaw obrazów rastrowych 2D (w wielu plikach), lub jako macierz trójwymiarowa (w jednym pliku). Pierwszy sposób powoduje, że model o rozmiarach $m \times n \times k$ wokseli jest zapisywany w postaci zestawu k plików z obrazami, z których każdy ma rozdzielczość $m \times n$ pikseli. Dla zachowania uporządkowania obrazów nazwy plików zawierają numeryczne oznaczenie ich kolejności lub tworzony jest dodatkowy plik „nagłówkowy” (*header file*), w którym zapisana jest organizacja zestawu (w tym liczba plików z obrazami i odniesienia do nich). Format indywidualnego pliku z obrazem 2D to najczęściej jeden z neutralnych formatów rastrowych: BMP (*bitmap*, [245]), JPG (*JPEG – Joint Photographic Expert Group*, od nazwy zespołu ekspertów, którzy format opracowali [116]) lub TIFF (*Tagged Image File Format*, [248]).

W medycznych zastosowaniach techniki digitalizacji 3D powszechny standard zapisu to DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), opisany normą ISO 12052 [171], w którym występują oddzielne pliki z obrazami 2D i plik nagłówkowy.

Drugi sposób – zapis modelu wokselowego w postaci pojedynczego pliku zawierającego wartości wszystkich komórki macierzy wokseli – nie ma jeszcze powszechnie akceptowalnych standardów. Stosowane są formaty rodzime konkretnych programów do przetwarzania i analizy modeli wokselowych, np. Volume Graphics [236] – plik nagłówkowy VGI z odniesieniem do dużego pliku z trójwymiarową macierzą wokseli.

6.4.2. Kompresja modeli wokselowych

Modele wokselowe zawierają dużą liczbę danych, np. rejestracja $1024 \times 1024 \times 1024$ wokseli z badania metodą technicznej tomografii komputerowej (przy 16-bitowej wartości wokselu) wymaga 2 GB pamięci. Pojawiły się zatem propozycje **kompresji** modeli wokselowych. Największe zainteresowanie budzą w środowisku medycznym, gdzie przy dużej liczbie badań obrazowych 3D (tomografia rentgenowska CT, emisyjna tomografia pozytronowa PET itp., rozdział 5.6.2) nawet niewielkie zmniejszenie jednostkowej objętości ich wyników może przynieść znaczne oszczędności w skali całego ośrodka diagnostycznego oraz ułatwić transfer i przechowywanie danych medycznych.

„Pakowanie” danych może mieć skutki odwracalne (kiedy kompresja jest bezstratna) lub nieodwracalne (kompresja stratna). W kompresji stratnej dane są zwykle pakowane ciasniej (zajmują mniej miejsca), ale ich jakość po odtworzeniu może być niezadowolająca. Techniki kompresji bezstratnej są oparte na kodowaniu entropijnym (np. algorytm Huffmana [113]), słownikowym (np. Lempel-Ziv-Welch [131]) lub predykcyjnym (np. bezstratny JPEG2000 [108]). Techniki kompresji stratnej mogą być oparte na metodzie częstotliwościowej, falkowej [178] lub fraktalowej [237].

Przykład badań różnych metod pakowania medycznych danych wolumetrycznych (modeli wokselowych) przedstawia publikacja [127], w której szacowano także skuteczność diagnostyczną danych skompresowanych – za pomocą miar obiektywnych, takich jak szczytowy stosunek sygnału do szumu (*peak signal to noise ratio*, PSNR), i subiektywnych, takich jak wskaźnik postrzegania przez specjalistów-radiologów różnic między obrazami o podwyższonej dynamice luminancji (*high dynamic range – visual difference predictor*, HDR-VDP). Rezultaty badań wskazują na zachowanie skuteczności diagnostycznej obrazów skompresowanych w stosunku poniżej 6:1.

Niehomogeniczne modele wokselowe, opisujące obiekty badane w systemach do obrazowania medycznego, mają jednak dość specyficzną charakterystykę – ich wartość dla radiologa nie uwzględnia w tak dużym stopniu dokładności geometrycznej, jak w badaniach przemysłowych. W aspekcie przemysłowej inżynierii odwrotnej każda stratna kompresja danych wnosi odchyłki do danych współrzędnościowych, które w spójnym systemie badań należy szacować (np. przez porównanie modelu przed kompresją i po rozpakowaniu z postaci spakowanej) oraz uwzględniać w budżecie niepewności badania.

6.4.3. Metody przetwarzania modeli wokselowych

W inżynierii odwrotnej modele wokselowe są przetwarzane w niewielkim stopniu – albo za pomocą specjalnego programu (praktycznie bezkonkurencyjny jest VG STUDIO MAX firmy Volume Graphics [236]) wykonuje się na nich od razu pomiary dla „raportów pomiarowych” lub tworzy „mapy odchyłek”, albo przeprowadza się ich konwersję do innych postaci, najczęściej do siatek trójkątów. Niekiedy wykonuje się wcześniej prostą korektę modeli, polegającą na usuwaniu niepotrzebnych fragmentów – „zerowanie” wokseli otoczenia lub wyposażenia tomografu (stolika, uchwytów) – taka operacja nie wnosi odchyłek do budżetu niepewności badania (tab. 6.5).

Tabela 6.5. Zapis skutków naprawy modelu wokselowego w rejestrze spójności

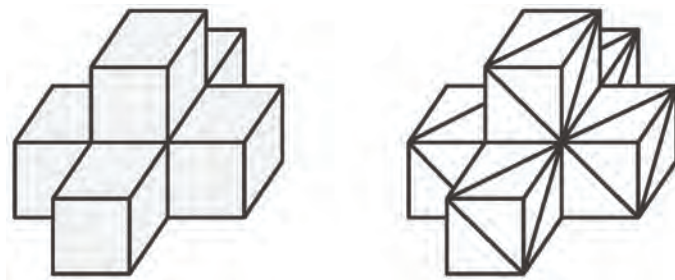
Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
<i>i</i>	<program>	korekta modelu	usunięcie wokseli otoczenia i wyposażenia	0	3– (woksele)	$m \times n \times k$ wokseli niehomogenicznych

Modele wokselowe mogą być przetwarzane, niekiedy według całkiem wyrafinowanych algorytmów, w programach przeznaczonych do innych zastosowań niż inżynieria odwrotna:

- w programach do obróbki danych z systemów obrazowania medycznego (np. MIMICS [155], AMIRA [235]) – operacje są ukierunkowane na analizę i wizualizację zagadnień biomedycznych: antropometrię, biomechanikę, przepływy krwi i powietrza itp.,
- w programach dla projektantów i zaawansowanych uczestników gier komputerowych (np. QUBICLE CONSTRUCTOR [159]) – modele wokselowe służą do projektowania wirtualnego środowiska, w którym odbywa się akcja gry.

6.4.4. Konwersja wokseli na siatki trójkątów

Homogeniczne modele wokselowe są bezpośrednią reprezentacją brył 3D – nie ma wątpliwości, gdzie przebiega granica między bryłą a otoczeniem. Dla utworzenia siatki trójkątów opisującej tę granicę wystarczy dla wszystkich „pełnych” wokseli znaleźć ich ściany zewnętrzne (te, za którymi nie ma sąsiedniego woksela „pełnego”) i utworzyć współpłaszczyznowe z nimi pary trójkątów prostokątnych, rozpiętych na krawędziach tych ścian i stykających się swoimi przeciwprostokątnymi rozpiętymi na przekątnych ścian (rys. 6.13). Taka konwersja nie wnosi odchyłek do kształtu 3D (tab. 6.6).



Rys. 6.13. Zamiana homogenicznego modelu wokselowego na siatkę trójkątów

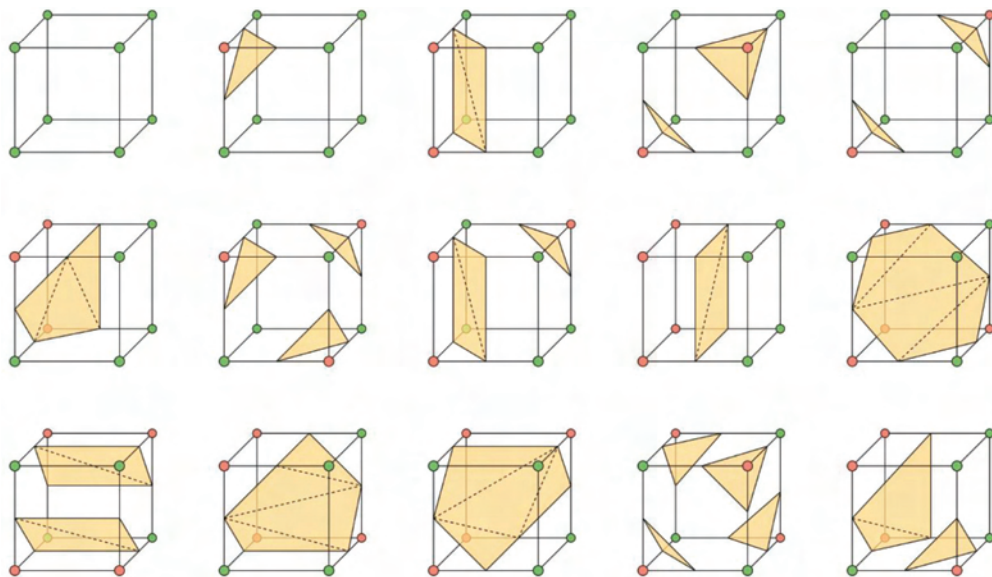
Tabela 6.6. Zapis skutków przekształcenia homogenicznego modelu wokselowego na siatkę trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	3– (woksele)	$m \times n \times k$ wokseli homogenicznych
i	<program>	konwersja na siatkę trójkątów	–	0	2– (siatka)	p trójkątów

Model wokselowy niehomogeniczny przed konwersją na siatkę trójkątów może zostać zamieniony na model homogeniczny w operacji binaryzacji (progowania), ale takie przekształcenie wprowadza odchyłkę do danych 3D, którą można obliczyć, porównując model wynikowy z wejściowym modelem wokselowym niehomogenicznym i wykorzystując wzór (4.16) (tab. 6.7) lub dla uproszczenia oszacować na połowę największego rozmiaru pojedynczego woksela.

Tabela 6.7. Zapis skutków przekształcenia niehomogenicznego modelu wokselowego na homogeniczny w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	3– (woksele)	$m \times n \times k$ wokseli niehomogenicznych
i	<program>	binaryzacja modelu niehomogenicznego	progowanie: <wartość>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$		$m \times n \times k$ wokseli homogenicznych



Rys. 6.14. Podstawowe 15 konfiguracji przecinania wokseli przez izopowierzchnię w algorytmie *Marching Cubes* (pozostałe 241 konfiguracji powstaje przez symetrie, obroty lub inwersje tych podstawowych) [32]

Lepszą jakość rezultatów konwersji niehomogenicznego modelu wokselowego na siatkę trójkątów niż przejście przez postać homogeniczną daje konstruowanie granic między objętościami zawierającymi woksle o wartościach powyżej i poniżej wartości progowej z interpolacją wewnątrz wokseli (*partial-voxel interpolation*) – istnieją dwa podejścia:

- tworzenie zestawów konturów z **izolinii** na każdej warstwie modelu wokselowego niehomogenicznego według któregoś z algorytmów „detekcji krawędzi”, znanych z analizy obrazów (np. [38]); takie podejście „upośledza” jeden kierunek – globalna rozdzielczość (i dokładność) konstrukcji wynikowej nie będzie lepsza niż połowa wysokości wokseli (odległości między obrazami 2D), ale jest łatwiejsze do oprogramowania i wciąż często spotykane w publikacjach,
- tworzenie **izopowierzchni** wewnątrz wokseli w trzech wymiarach, np. według algorytmu „maszerujących kostek” (*Marching Cubes*) ([145], rys. 6.14); to podejście jest trudniejsze, ale daje dokładniejsze rezultaty.

Izolinie w postaci zestawu konturów można zamienić albo na siatkę trójkątów (podrozdział 6.5.3) albo na model powierzchniowy 3D (podrozdział 6.5.4). Izopowierzchnie z algorytmu maszerujących kostek są zapisywane bezpośrednio w postaci siatki trójkątów.

Istnieją też wersje interaktywne algorytmów konwersji modeli wokselowych, które umożliwiają wybór spośród potencjalnie wielu rozłącznych segmentów (fragmentów

objętości modelu wokselowego) spełniających kryterium progowania. Np. w przywoływanym już programie MIMICS, dedykowanym do obróbki modeli z urządzeń do obrazowania medycznego, dostępnych jest wiele interaktywnych narzędzi do wyboru segmentów – wśród nich tzw. „rozrost regionu” (*region growing*), pozwalający na wskazanie woksela „startowego” wewnątrz jednego z segmentów spełniających kryterium progowania i wybranie do konwersji tylko tego zwartego segmentu.

Konwersje modeli niehomogenicznych na zestawy konturów (tab. 6.8) czy na siatki trójkątów (tab. 6.9) wnoszą odchyłki do niepewności badania RE, które należy obliczać i rejestrować.

Tabela 6.8. Zapis skutków konwersji niehomogenicznego modelu wokselowego na zestaw konturów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	3– (woksele)	$m \times n \times k$ wokseli niehomogenicznych
i	<program>	konwersja na zestaw konturów	progowanie: <wartość>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	1 (kontury)	p konturów

Tab. 6.9. Zapis skutków konwersji niehomogenicznego modelu wokselowego na siatkę trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	3– (woksele)	$m \times n \times k$ wokseli niehomogenicznych
i	<program>	konwersja na siatkę trójkątów	progowanie: <wartość>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	2– (siatka)	q trójkątów

6.5. Modele 3D w postaci zestawów konturów

Zestawy krzywych konturowych (zwanych też w literaturze konturami, profilami, profilami 2D, poliliniami) mogą być efektem pomiaru kształtu 3D, w którym punkty pomiarowe są rejestrowane w uporządkowany sposób (podrozdział 6.3.4), lub efektem segmentacji modelu wokselowego niehomogenicznego (podrozdział 6.4.4). Niekiedy powstają jako etap pośredni w procesach przetwarzania kształtów, np. przez generowanie przekrojów przez model powierzchniowy (w tym siatkę trójkątów).

6.5.1. Metody zapisu konturów

Kontury najczęściej zapisywane są w formacie DXF [10], ale może do tego posłużyć także format IGES [227] i STEP [110]. Jako formaty tekstowe każdy z nich może wносить odchyłki do danych 3D (tab. 6.10). Na rysunku 6.15 pokazano fragment przykładowego zapisu konturów w formacie DXF – widać ograniczenie dokładności do 3–4 cyfr dziesiętnych!

Tabela 6.10. Zapis skutków transferu zestawu konturów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
i	<program>	zapis do formatu <format>		$E_{\text{proc},i} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$	1 (kontury)	n konturów

0	0	0	0	...
SECTION	VERTEX	VERTEX	VERTEX	...
2	8	8	8	0
ENTITIES	1	1	1	SEQEND
0	70	70	70	0
POLYLINE	32	32	32	ENDSEC
8	10	10	10	
1	5.79000	6.61000	7.43000	
70	20	20	20	
9	-51.52000	-53.38000	-55.27000	
66	30	30	30	
1	5.01000	5.01000	5.01000	
0	0	0	0	

Rys. 6.15. Fragment zapisu zestawu konturów w formacie DXF (złamany na 5 kolumn)

6.5.2. Metody przetwarzania konturów

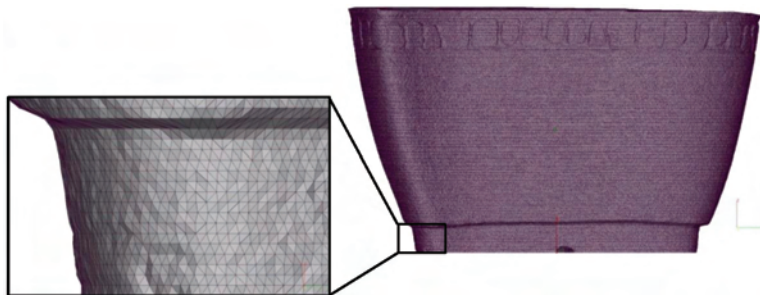
Podobnie jak modele wokselowe, w inżynierii odwrotnej zestawu konturów nie są zazwyczaj przetwarzane w tej postaci, służą jako etap pośredni w łańcuchu badania RE. Skoro są jednak obiektami geometrycznymi 3D, możliwe jest ich modyfikowanie w dowolnym programie do modelowania 3D, np. klasy CAD, który potrafiłby czytać format, w którym zostały zapisane.

W publikacji [89] pokazano metodę przetwarzania modeli biomedycznych, uzyskanych z badania metodą tomografii komputerowej, przez operacje na konturach w systemie CATIA.

6.5.3. Konwersja konturów na siatki trójkątów

Konwersja zestawu konturów na siatkę trójkątną jest stosunkowo prosta – kolejne wierzchołki każdego konturu stają się wierzchołkami trójkątów rozciągających się do

następnego lub poprzedniego konturu (rys. 6.16). Konwersja nie wnosi odchyłek kształtu 3D – tab. 6.11.



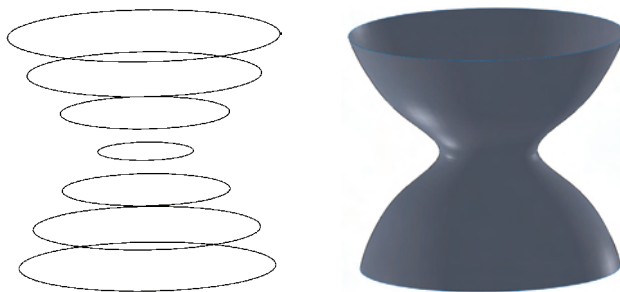
Rys. 6.16. Efekt połączenia zestawu konturów w siatkę trójkątów (oprac. własne)

Tabela 6.11. Zapis skutków konwersji zestawu konturów na siatkę trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	1 (kontury)	n konturów
i	<program>	konwersja na siatkę trójkątów	<parametry>	0	2– (siatka)	m trójkątów

6.5.4. Konwersja konturów na powierzchnie 3D

Zamiana zestawu konturów na powierzchnie 3D polega na konstruowaniu powierzchni NURBS łączących dwa lub więcej sąsiednich konturów w operacji typu *loft*, dostępnej w większości programów do modelowania 3D, w tym klasy CAD (rys. 6.17). Efekt takiej konwersji zależy od zaimplementowanych algorytmów i należy oszacować jej skutki dla kształtu 3D przez porównanie modeli sprzed i po operacji – tabela 6.12.



Rys. 6.17. Połączenie konturów powierzchnią NURBS w operacji LOFT programu CAD (oprac. własne)

Tabela 6.12. Zapis skutków konwersji zestawu konturów na powierzchnię 3D w rejestrze spójności

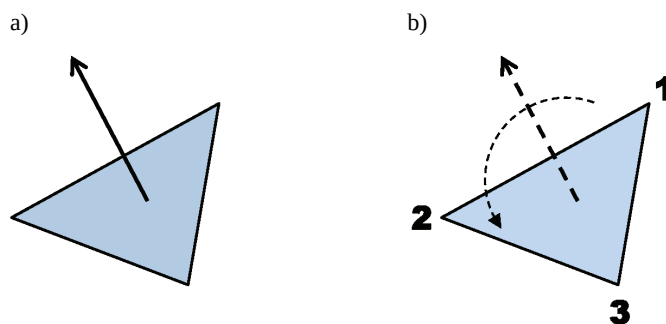
Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	1 (kontury)	n konturów
i	<program>	konwersja na powierzchnię 3D	<parametry>	$E_{proc,i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	2+ (powierzchnie)	m powierzchni NURBS

6.6. Modele 3D w postaci siatek trójkątów

Siatka trójkątów jest polipowierzchnią 3D składającą się z płaskich powierzchni w kształcie trójkątów. Każdy trójkąt jest połączony każdą swoją krawędzią z co najwyżej po jednym sąsiedzie, w wierzchołkach może być styczny do wielu trójkątów.

Modele 3D o strukturze siatek trójkątów są albo bezpośrednim, albo pośrednim efektem pomiarów w inżynierii odwrotnej – wiele systemów pomiarowych zapisuje wyniki pomiaru w postaci punktów 3D (które można zamienić na siatkę) lub w postaci właśnie siatki trójkątów, często już zoptymalizowanej (np. po operacji eliminacji/redukcji szumu lub ujednolicenia gęstości).

Siatkę trójkątów można też uzyskać z dowolnej postaci struktury danych 3D wyższego poziomu: modelu powierzchniowego 3D, bryłowego lub CAD – większość systemów do modelowania geometrycznego ma funkcję konwersji modelu do siatki trójkątów zapisywanej w formacie STL (podrozdział 6.6.1).



Rys. 6.18. Metody określania orientacji trójkąta w siatce:

a) *implicite* (przez definicję wektora normalnego), b) *explicite* (przez kolejność wierzchołków)

W niektórych operacjach przetwarzania siatki korzysta się z informacji o orientacji trójkątów. Siatka może tę informację zawierać bezpośrednio: przez opisywanie każdego trójkąta dodatkowym parametrem – jednostkowym wektorem normalnym do po-

wierzchni trójkąta (rys. 6.18a) lub pośrednio: przez kolejność definiowania wierzchołków trójkąta – wówczas orientacja trójkąta wynika z „reguły śruby prawoskrętnej” (rys. 6.18b). Orientacja trójkąta powinna wskazywać otoczenie – „zewnątrz” obiektu zdefiniowanego przez siatkę.

Kryterium oceny jakości siatki jest liczba trójkątów „zdegenerowanych” – zbyt odległych kształtem od trójkąta równobocznego, bo np. wydłużonych do tego stopnia, że wierzchołki są niemal współliniowe.

6.6.1. Metody zapisu siatki trójkątów

Istnieje wiele możliwości zapisu siatki trójkątów: formaty otwarte, np. binarny i tekstowy STL [3], tekstowy OBJ i jego binarny wariant MOD [249], tekstowe AMF ([7], podrozdział 6.6.4), VRML/X3D [107, 109], PLY ([246], podrozdział 6.6.5), oraz formaty rodzime systemów do modelowania 3D, jeśli tylko akceptują one siatki trójkątów.

Mimo swoich niedostatków najpopularniejszy jest nadal format STL. Na rysunku 6.19 pokazano fragment takiego zapisu w wersji tekstowej.

```
solid <nazwa>
  facet normal 0.000 -0.000 -1.000
    outer loop
      vertex -64.12 -37.78 50.10
      vertex -50.11 -30.20 50.10
      vertex 42.00 -60.42 50.10
    endloop
  endfacet
...
facet normal 0.0705 -0.0752 0.9946
  outer loop
    vertex -47.39 74.04 16.30
    vertex -3.76 101.72 162.02
    vertex -19.70 100.00 163.02
  endloop
endfacet
end solid
```

Rys. 6.19. Fragment zapisu siatki trójkątów w formacie tekstowym STL

Wadą formatu STL jest redundancja: każdy wierzchołek każdego trójkąta jest zapisywany w definicjach innych trójkątów od początku – nie uwidacznia się przez to wspólność tych wierzchołków między trójkątami. Problemem jest też mała dokładność wersji tekstowej formatu – stosowanie tylko 4–5 cyfr znaczących w zapisie liczb rzeczywistych może prowadzić do błędów w geometrii kształtu. Procedura odczytująca model zapisany w formacie STL musi samodzielnie sprawdzać poprawność siatki – jej ciągłość i „zamkniętość”. O poprawnej pod tym względem siatce trójkątów mówi się, że jest „wodoszczelna” (*watertight*).

Przy eksportowaniu siatki trójkątów przez formaty wymiany danych należy uwzględnić możliwe odchyłki w budżecie niepewności (tab. 6.13).

Tabela 6.13. Zapis skutków transferu siatki trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
i	<program>	zapis do formatu <format>		$E_{\text{proc},i} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$	2– (siatka)	n trójkątów

6.6.2. Metody przetwarzania siatki trójkątów

Dostępnych jest wiele komercyjnych i opartych na „otwartym oprogramowaniu” programów przetwarzających siatki trójkątów – oprócz wymienionych już w podrozdziale 6.3.2 programów GEOMAGIC, RAPIDFORM, POLYWORKS, 3DRESHAPER i MESH LAB popularne są także MAGICS i 3-MATIC firmy Materialise [155], GOM INSPECT [84] czy VRMESH [234].

Przetwarzanie siatki trójkątów jest zwykle najdłuższym procesem w łańcuchu przetwarzania danych pomiarowych – to na tym etapie wykonuje się „naprawy” danych, ich wygładzanie lub wyostanie, ucinanie i łączenie siatek, wyrównywanie krawędzi oraz wypełnianie ubytków (algorytmy dla takich operacji można znaleźć np. w książce [32]). Większość programów do przetwarzania siatek udostępnia co najmniej następujące operacje:

- redukcja/usuwanie szumu (*noise reduction/removal*, podobnie jak dla chmur punktów, podrozdział 6.3.2),
- wygładzanie siatki (*smoothing*),
- rozrzedzanie siatki (przez usunięcie części trójkątów i rozciągnięcie pozostałych, *decimating*),
- usuwanie ubytków w siatce (*hole-filling*),
- retriangulacja (zmiana podziału powierzchni wyznaczonej przez siatkę na trójkąty o bardziej regularnych kształtach, *remeshing*, *mesh relaxation*).

Wszystkie te operacje prowadzą do zmiany kształtu 3D reprezentowanego przez siatkę, a zatem wprowadzają odchyłki przetwarzania – tabela 6.14.

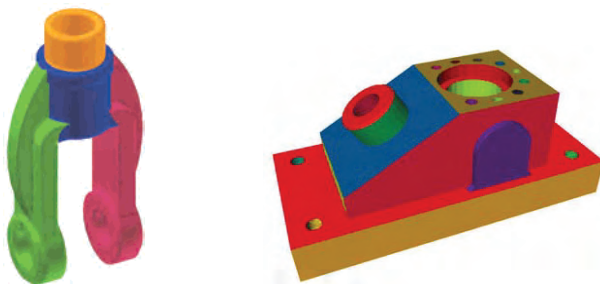
Tabela 6.14. Zapis skutków przekształcenia siatki trójkątów w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	2– (siatka)	m trójkątów
i	<program>	<przekształcenie>	<parametry>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$		n trójkątów

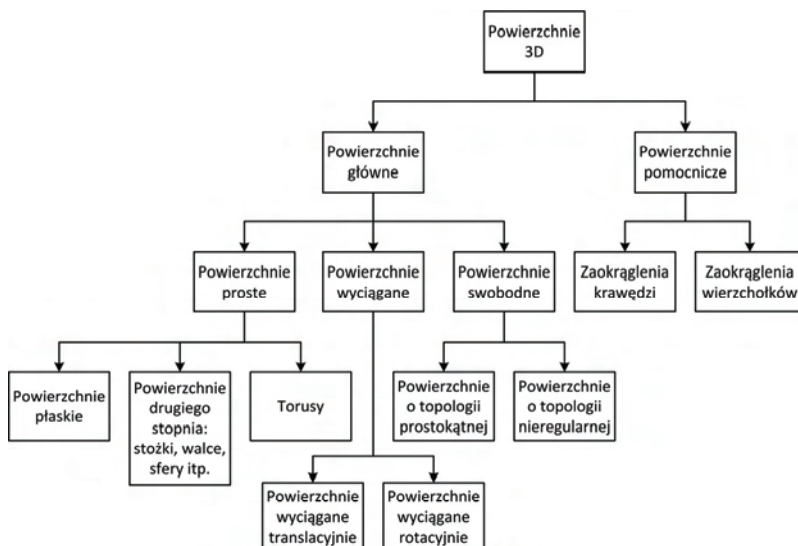
6.6.3. Konwersja siatki na powierzchnie 3D

Siatki trójkątów są pozbawione informacji topologicznych, nie można z nich wnioskować o pochodzeniu czy znaczeniu kształtów, których są aproksymacjami. Są też trudne w przetwarzaniu za pomocą typowych komputerowych narzędzi inżynierskich – programów do modelowania geometrycznego 3D klasy CAD. Dlatego siatki zamienia się na modele powierzchniowe 3D – taki proces dzieli się na dwa etapy: segmentację i dopasowanie.

Segmentacja polega na podziale siatki na fragmenty o podobnej charakterystyce kształtu. Przegląd takich algorytmów, nazywanych *mesh segmentation* lub *shape clustering*, można odnaleźć np. w [8] (rys. 6.20) i w [177]. Niektóre algorytmy podziałowe operują równie dobrze już na chmurach punktów, np. w [40].



Rys. 6.20. Przykłady rezultatów segmentacji modeli 3D według różnych algorytmów [8]



Rys. 6.21. Rodzaje powierzchni identyfikowane w danych 3D (na podst. [229])

Segmentacja kończy się bez identyfikacji rodzaju kształtu każdego fragmentu – to zadanie realizują algorytmy **klasyfikacji** i **dopasowywania powierzchni** (*surface fitting* lub *[auto]surfacing*). W publikacji [229] wyróżnia się powierzchnie do identyfikacji jak na rys. 6.21. W pierwszym kroku segment jest zaliczany do kategorii (np. powierzchni płaskich lub walcowych), w drugim znane równanie takiej powierzchni (np. NURBS) jest dopasowywane do danych 3D. Autorzy publikacji [229] współpracowali z firmą GEOMAGIC, więc operacje dostępne w tym programie oparte są zapewne na takim algorytmie.

Konwersja siatki trójkątów do postaci modelu powierzchniowego prowadzi do zmiany kształtu 3D, a zatem należy ocenić jego zmiany w rejestrze spójności – tabela 6.15.

Tabela 6.15. Zapis skutków konwersji siatki trójkątów na model powierzchniowy 3D w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	2– (siatka)	m trójkątów
i	<program>	konwersja na elementy powierzchniowe	<parametry>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	2+ (powierzchnie)	n elementów

Zidentyfikowane powierzchnie, opisane równaniami NURBS, zapisywane są w formatach przenoszących elementy tego typu, np. IGES [227] lub STEP [110], i importowane do inżynierskich programów CAD, w których model utworzony z danych pomiarowych może być użyty do projektowania nowego wyrobu czy narzędzia. Ponieważ IGES i STEP są formatami tekstowymi, należy oceniać skutki ich zastosowania dla spójności badań RE – tabela 6.16.

Tabela 6.16. Zapis skutków transferu elementów powierzchniowych 3D w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
i	<program>	zapis do formatu <format>		$E_{\text{proc},i} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$	2+ (powierzchnie)	n powierzchni NURBS

6.6.4. Siatki z niepłaskimi trójkątami

Siatki trójkątów stosuje się do zapisu nie tylko kształtów 3D tworzonych w badaniach RE na bazie pomiarów obiektów fizycznych, ale także kształtów wyrobów konstruowanych w programach inżynierskich klasy CAD. Ze względów historycznych

wytworzenie prototypów nowych wyrobów metodami przyrostowymi najczęściej wymaga konwersji modeli CAD do postaci strukturalnej siatki trójkątów, ponieważ tylko takie struktury są powszechnie akceptowane w programach do planowania procesów w technologiach generatywnych. To właśnie w środowisku twórców i użytkowników technologii przyrostowych rozpoczęto poszukiwanie następcy formatu STL, pozbawionego jego wad (podrozdział 6.6.1). Naukowcy i technicy pracujący od 2009 roku nad formatem „STL 2.0” znaleźli wsparcie w międzynarodowym stowarzyszeniu ASTM – specjalnie powołany komitet F42.04 opublikował w 2011 roku standard ASTM F2915 [7], opisujący nowy sposób reprezentacji siatki trójkątów – format AMF (*Additive Manufacturing File Format*).

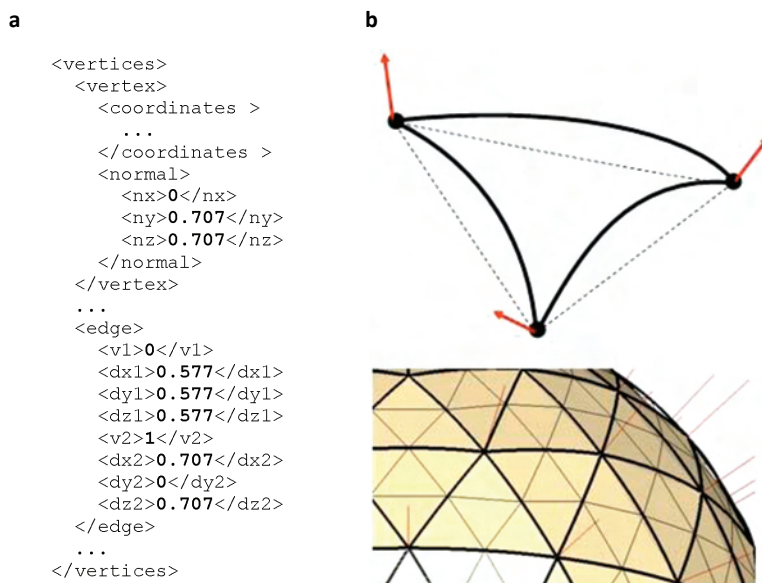
AMF jest oparty na języku formalnym XML, dzięki czemu jest otwarty na przyszłe rozszerzenia. Można w nim zapisywać nie tylko cechy geometryczne siatki trójkątów – węzły i trójkąty, ale także kolory węzłów i trójkątów oraz kolory, materiały i struktury wewnętrzne objętości zawartych w siatce (tzw. wolumenów, *volumes*) – rys. 6.22.

<pre> <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <amf unit="millimeter"> <object id="0"> <mesh> <vertices> <vertex> <coordinates> <x>0</x> <y>1.32</y> <z>3.715</z> </coordinates> </vertex> ... </vertices> </pre>	<pre> <volume> <triangle> <v1>0</v1> <v2>1</v2> <v3>3</v3> <color> <r>0.9</r> <g>0.9</g> 0.2 </color> </triangle> ... </volume> </mesh> </object> </amf> </pre>
--	---

Rys. 6.22. Struktura pliku AMF z opisem jednego trójkąta z nadanym kolorem RGB (zapis złamany na 2 kolumny)

Nowością w formacie AMF jest możliwość nadawania trójkątom **krzywizny powierzchni** – w celu uzyskania lepszego dopasowania do krzywokreślnych powierzchni 3D. Wymaga to definicji wektorów normalnych w wybranych wierzchołkach trójkąta i/lub wektorów stycznych na początku i końcu wybranych krawędzi (rys. 6.23).

Obecnie niektóre programy do przetwarzania siatki trójkątów potrafią już odczytywać i zapisywać format AMF (np. MAGICS) i dostępne są programy do konwersji STL↔AMF, ale nie są znane przypadki implementacji funkcjonalności polegającej na nadawaniu trójkątom siatki krzywizn powierzchni.



Rys. 6.23. Sposób zapisu siatki z trójkątami o zdefiniowanej krzywiznie powierzchni (a) i przykład takiej siatki (b), autor: Hod Lipson

6.6.5. Kolorowe siatki trójkątów

Wspomniano już wcześniej o możliwości przenoszenia przez siatkę trójkątów dodatkowej cechy niegeometrycznej, najczęściej koloru (w świetle widzialnym). O ile opisany w poprzednim podrozdziale format AMF z definicji wspiera siatki „kolorowe”, o tyle dla formatu STL istnieje wiele niestandardowych rozszerzeń, opracowanych i wybiórczo wspieranych przez producentów oprogramowania do modelowania 3D (w inżynierii odwrotnej i w grafice komputerowej) i systemów pomiarowych w RE.

Pewniejsze wsparcie dają w tym przypadku dwa mniej popularne w programach RE, ale mające jeden powszechnie przyjęty standard, formaty wymiany danych geometrycznych 3D w postaci siatki trójkątów: opracowany dla systemów rzeczywistości wirtualnej format VRML (*Virtual Reality Modeling Language*, [107]) i stosowany w środowisku grafiki komputerowej format PLY (*Polygon File Format*, znany także jako *Stanford Triangle Format* [246]).

6.7. Modele 3D powierzchniowe

Modele powierzchniowe 3D to już właściwie dziedzina komputerowego wspomaganego projektowania i programów klasy CAD, ale należy o nich wspomnieć jako

o postaci końcowej niektórych łańcuchów procesów przetwarzania danych w badaniach RE.

Jak wspomniano na początku rozdziału, takie modele zawierają polipowierzchnie, składające się z elementów typu powierzchnia krzywoliniowa, najczęściej reprezentowanych przez niejednorodne ilorazowe bazowe krzywe sklejące (NURBS).

Powierzchnie NURBS powstają w programach CAD przez rozpinanie ich na krzywych NURBS tworzonych na płaskich szkicach (operacje *Fill*, *Loft*) lub w konstrukcjach „wyciągania” takich krzywych po ścieżkach normalnych (*Extrude*), kołowych (*Rotate*) lub dowolnych, w tym krzywoliniowych (*Sweep*) [66, 218].

W przekształceniach danych w badaniach RE powierzchnie NURBS są wynikiem identyfikacji fragmentów danych pomiarowych (najczęściej po ich przekształceniu do postaci siatki trójkątów) – patrz podrozdział 6.6.3. Tam też wskazano sposób oceny odchyłek kształtu i konsekwencji transferu informacji o powierzchniach 3D w odpowiednich formatach wymiany danych.

6.8. Modele 3D bryłowe

Modele bryłowe – podobnie jak modele powierzchniowe – są reprezentacją danych 3D wykorzystywaną w programach CAD, w przekształceniach danych w badaniach RE stosowaną raczej wyjątkowo.

Modele bryłowe opisują elementy objętościowe, ale reprezentowane są najczęściej przez swoje powierzchnie graniczne – w tzw. reprezentacji brzegowej (*B-rep*) wykorzystują także powierzchnie NURBS. W programach CAD bryły powstają również przez rozpinanie ich na krzywych NURBS tworzonych na płaskich szkicach (bryłowe wersje operacji *Fill*, *Loft*) i w konstrukcjach „wyciągania” takich krzywych po ścieżkach normalnych (*Extrude*), kołowych (*Rotate*) lub dowolnych, w tym krzywoliniowych (*Sweep*) [66, 218], ale rezultatami takich operacji są obiekty mające wewnątrz – właśnie bryły.

W przekształceniach danych w badaniach RE modele bryłowe mogą być wynikiem konwersji modeli powierzchniowych 3D, ale takie przekształcenie nie wnosi odchyłek do samego kształtu 3D – zmienia się jedynie struktura danych (tab. 6.17).

Tabela 6.17. Zapis skutków konwersji modelu powierzchniowego na model bryłowy 3D w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	2+ (powierzchnie)	m powierzchni
i	<program>	konwersja na model bryłowy	<parametry>	0	3+ (bryły)	n brył

Modele bryłowe 3D, jeśli powstaną w badaniach RE, mogą być przenoszone np. przez format STEP [110] do inżynierskich programów CAD – szacunek ewentualnych odchylek pokazano w tabeli 6.18.

Tabela 6.18. Zapis skutków transferu modeli bryłowych 3D w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
<i>i</i>	<program>	zapis do formatu <format>		$E_{\text{proc},i} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$	2+ (powierzchnie)	<i>n</i> powierzchni NURBS

6.9. Modele CAD

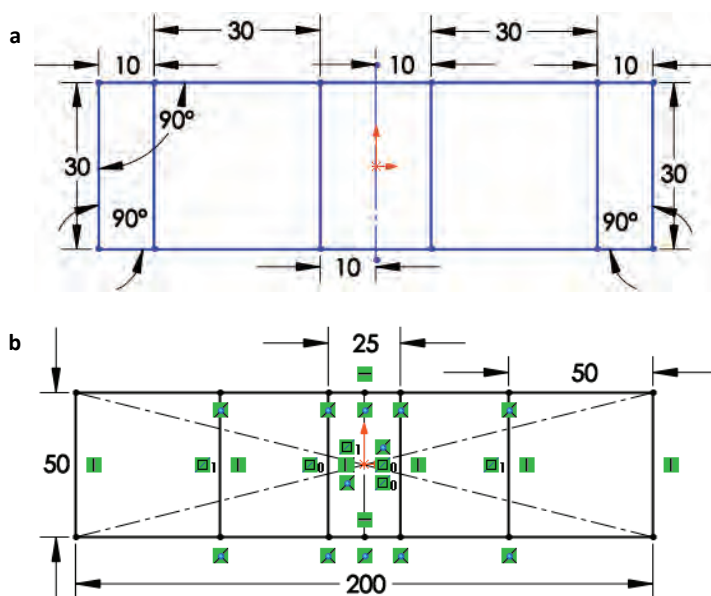
Modele CAD są modelami 3D utworzonymi w programach komputerowych klasy CAD, wspomagających projektowanie inżynierskie. W pełni funkcjonalny model CAD, oprócz zapisu samego kształtu geometrycznego 3D obiektu (w postaci powierzchni lub brył), zawiera też informacje dodatkowe, przechowujące jeszcze więcej „intencji projektanta” (patrz np. [66, 218]). Projektant, wykorzystując specjalne mechanizmy, może zapisać dodatkową wiedzę o elementach projektowanej konstrukcji, której nie da się opisać geometrycznie. Wśród tych mechanizmów są **parametry**, **obiekty** oraz możliwość zapisywania informacji na temat dopuszczalnej **tolerancji** wymiarowej i kształtowej (informacja GD&T, patrz rozdział 2).

6.9.1. Parametryczność modeli CAD

Parametryzacja w modelowaniu CAD to możliwość opisywania cech geometrycznych modelu 3D za pomocą zmiennych **parametrów**: wymiarów liczbowych, wiązań topologicznych i zależności matematycznych między wymiarami, zamiast ustalonych z góry **liczb** [218]. Nie trzeba definiować każdego fragmentu konstrukcji (np. walców, prostopadłościanów czy stożków), wskazując w momencie ich tworzenia konkretne wartości (jako średnice, długości boków czy kąty rozwarcia), ale można wstępnie umieścić takie fragmenty w przestrzeni (najczęściej „naszkicować” ich tworzące na wybranej płaszczyźnie), a następnie ustanowić „reguły”, do których elementy będą dopasowane. Reguły te to właśnie parametry – wymiary, wiązania lub równania. Dzięki sparametryzowaniu modelu zmiany jego konstrukcji można realizować, modyfikując parametry, a nowe rozwiązanie (kształt i rozmieszczenie elementów składowych) jest generowane automatycznie przez tzw. *solver* geometryczny (*Geometric Constraint Solver*, patrz np. [33]), zaimplementowany w każdym parametrycznym programie CAD i traktujący parametry liczbowe, więzy i równania jako „warunki

brzegowe” w poszukiwaniu możliwego rozwiązania geometrycznej „łamigłówki”. Bez mechanizmu parametryzacji ewentualne modyfikacje modelu CAD wymagają ręcznego usuwania „starych” fragmentów konstrukcji i zastępowania ich nowymi.

Parametry w postaci wymiarów liczbowych określają narzucone przez użytkownika rozmiary obiektów geometrycznych – zmieniając ich wartości można sterować wyglądem sparametryzowanych obiektów. Parametrami mogą też być wiązania topologiczne między obiektami modelu, np. relacje prostokątności, równoległości, równości promieni, równości długości, styczności, symetrii itp., które bez użycia parametrów musiałyby być opisywane wieloma liczbami w momencie wstawiania fragmentów konstrukcji (np. zamiast rysować drugą linię pod kątem 90° względem pierwszej można naszkicować je dowolnie i dołożyć relację prostokątności, a zamiast wstawiać drugi okrąg o promieniu o tej samej wartości co pierwszy, można naszkicować drugi okrąg dowolnie i dołożyć relację „równości promieni”). Modele 3D tworzone bez parametrów były mniej czytelne i trudniejsze do tworzenia i modyfikacji – patrz rysunek 6.24.



Rys. 6.24. Fragment modelu CAD (płaski profil w pojedynczym szkicu)
w dwóch równoważnych wersjach: bez parametrów (a – szkic zawiera 11 wymiarów liniowych i kątowych, nie wszystkie zgodne z zasadami rysunku technicznego)
i w wersji z parametrami (b – szkic zawiera tylko 4 wymiary, ale wiele relacji geometrycznych – zaznaczonych symbolami na zielonym tle) (oprac. własne)

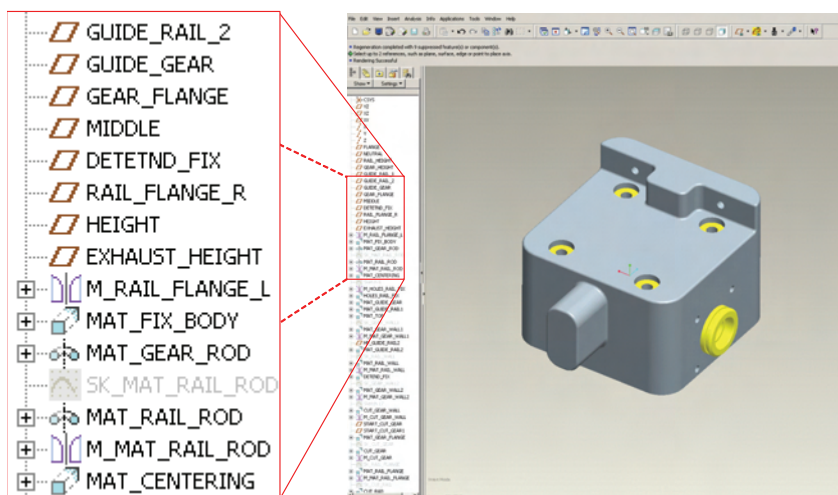
Można też definiować parametry w postaci matematycznych związków między wymiarami liczbowymi – nowy wymiar można uzależnić od wcześniej zdefiniowa-

nych za pomocą równania (np. wskazującego, że średnica danego otworu jest dwa razy mniejsza niż odległość od otworu sąsiadującego). Zmiana wymiarów pierwotnych powoduje wówczas automatyczną zmianę wymiarów pochodnych, powiązanych przez takie równanie.

Parametryzacja – dzięki zapisywaniu relacji zamiast i oprócz samych liczb – umożliwia uchwycenie w modelu CAD znacznie więcej wiedzy i intencji konstruktora – jego *know-how* – niż sama postać geometryczna elementu. Modele 3D pochodzące z pomiarów w inżynierii odwrotnej tych informacji nie zawierają, metody ich odtwarzania w modelach 3D przedstawiono w podrozdziale 6.9.4.

6.9.2. Obiektowość w modelach CAD

Mechanizm „obiektowości” w modelowaniu CAD to możliwość opisywania cech geometrycznych modelu CAD za pomocą **obiektów** (*features*, „konstrukcyjnych obiektów elementarnych”) zamiast **figur** geometrycznych 3D. Projektant, tworząc kształt modelu zamiast prymitywami geometrycznymi, posługuje się „operacjami” skutkującymi zmianą kształtu 3D, np. zamiast tworzyć w przestrzeni bryłę w kształcie walca, aby następnie użyć jej w działaniu boolowskim odejmowania od dotychczasowej bryły w celu uzyskania efektu otworu – zamiast tego wstawia *otwór* wyciągnięty z profilu w kształcie okręgu. Taka zmiana „filozofii” tworzenia modeli CAD – mentalnego powiązania procesu projektowania obiektu z operacjami nawiązującymi do operacji technologicznych – prowadzi do bardziej przyjaznej dla konstruktora pracy z zaawansowanymi programami klasy CAD i ułatwia przyszłe modyfikacje konstrukcji.



Rys. 6.25. Zrzut ekranu z sesji w programie CAD
– po lewej stronie powiększenie fragmentu listy obiektów

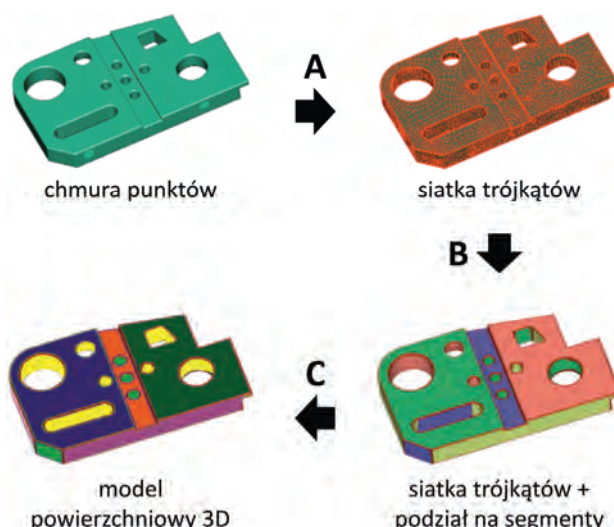
kowego modelu przez specjalistę, który ma wiedzę o metodach i przepisach określających sposób umieszczania takich informacji w modelach CAD dla wyrobów danego rodzaju.

Prowadzone są także badania nad częściowo zautomatyzowanym odtwarzaniem informacji o tolerancjach w badaniach RE, ale jak dotychczas narzędzia takie nie zostały szerzej wdrożone, np.:

- w publikacji [120] zademonstrowano procedurę interaktywnego obliczania **tolerancji położenia** wybranych punktów konstrukcyjnych (np. średnic otworów) od wskazanych przez użytkownika powierzchni bazowych na zmierzonym obiekcie,
- w artykule [56] opisano metodę analizy rezultatów badań RE wielu egzemplarzy tego samego wyrobu, prowadzącą do szacowania **tolerancji wymiarowej** na podstawie rozrzutu zmierzonych wartości wybranych geometrycznych cech wymiarowych,
- praca [121] rozważa automatyczne przypisywanie obiektom zmierzonym w badaniach RE tolerancji wynikającej z warunków ich pracy – pasowaniem zgodnie z normami ISO286 [169] i ISO 2768 [168].

6.9.4. Metody rozpoznawania obiektów i parametrów w modelach RE

Zagadnienie automatycznego rozpoznawania trójwymiarowych kształtów i identyfikowania ich składników jest bardzo złożone – w zależności od tego jaka postać danych



Rys. 6.27. Początkowe etapy procesu rozpoznawania obiektów (oprac. własne, na podst. [43])

jest analizowana i jakie rezultaty są generowane, można w literaturze znaleźć kilka aktywnych obszarów badań w tym zakresie (rys. 6.27):

- A. **Triangulacja** (*triangulation*) – trójki sąsiednich punktów z niezorganizowanej chmury łączone są płaskimi trójkątami i generowane są ciągłe siatki trójkątów – metody takie przedstawiono w podrozdziale 6.3.3.
- B. **Segmentacja** (*segmentation*) – siatka trójkątów dzielona jest na fragmenty (segmenty) na podstawie zmian krzywizny powierzchni – metody opisano w podrozdziale 6.6.3.
- C. **Dopasowywanie powierzchni** (*surface fitting*) – segmenty zidentyfikowane w siatce trójkątów są aproksymowane płatkami powierzchni regularnych lub krzywokreślnych (typu NURBS) i generowane są modele powierzchniowe 3D – patrz podrozdział 6.6.3.

W modelach powierzchniowych 3D lub funkcjonalnie im podobnych modelach bryłowych 3D w reprezentacji powierzchniowej (B-Rep) można już identyfikować figury geometryczne (proces określany jako [*geometric*] *feature recognition*) – może się to odbywać w sposób ręczny lub automatyczny:

- D1. **Automatyczna identyfikacja obiektów geometrycznych** polega na komputerowej analizie pojedynczych lub kilku sąsiadujących płatków powierzchni w celu przypisania im znaczenia w kontekście konstrukcji geometrycznych. W pracach [233, 260] zaprezentowano algorytmy, które rozpoznają obiekty geometryczne, w tym także wycięcia/wyciągnięcia bryłowe na bazie profili płaskich. Ich skuteczność jest przez autorów pozytywnie oceniana, ale ograniczony jest zakres ich stosowalności, nie zostały też wdrożone w programach wspierających inżynierię odwrotną.



Rys. 6.28. Przykład dopasowania prymitywów geometrycznych do siatki trójkątów

- D2. **Ręczna identyfikacja obiektów geometrycznych**, dostępna w większości programów do RE, w tym w GEOMAGIC i RAPIDFORM, polega na wskazywaniu

przez użytkownika wybranego fragmentu chmury punktów lub siatki trójkątów oraz wyborze jednej z figur geometrycznych z repertuaru oferowanego przez program (co najmniej walec, stożek, sfera i płaszczyzna). Efektem jest automatyczne dopasowanie parametrów takiej figury do wybranych danych – automatycznie obliczone zostaje położenie i orientacja figury w przestrzeni oraz jej wymiary charakterystyczne (promień, długości, kąty itp.) – przykład na rysunku 6.28. Zestaw utworzonych w ten sposób figur geometrycznych można eksportować do programu CAD w formatach neutralnych lub natywnych.

Zbiór obiektów geometrycznych rozpoznanych w łańcuchu procesów A-D i umieszczonych we wspólnej przestrzeni 3D nie jest jeszcze tożsamy z pełnym modelem CAD, gdyż nie zawiera hierarchii (historii modelowania), jest jakby „zamrożonym” stanem modelu obiektowego i parametrycznego. Wśród metod odtwarzania modeli w pełni obiektowych istnieją tutaj trzy możliwości:

E1. **Ręczne rozpoznawanie obiektów CAD**

- W niektórych przypadkach rekonstrukcji modeli do postaci obiektowej można budować model w programie CAD od początku metodami ręcznymi (rozpoznając rodzaje obiektów tylko z oglądu rzeczywistego elementu, chmury punktów pomiarowych czy siatki trójkątów i wybierając przybliżone lub wstępnie odczytane z chmury lub siatki wartości parametrów geometrycznych – długości i kąty); po skonstruowaniu modelu CAD następuje iteracyjne porównywanie go z danymi pomiarowymi i poprawianie cech geometrycznych; po kilku-kilkunastu takich krokach model CAD jest dobrą aproksymacją danych pomiarowych.

E2. **Wspomagane rozpoznawanie dowolnych obiektów CAD** – wymaga pracy interaktywnej, z udziałem człowieka, np.:

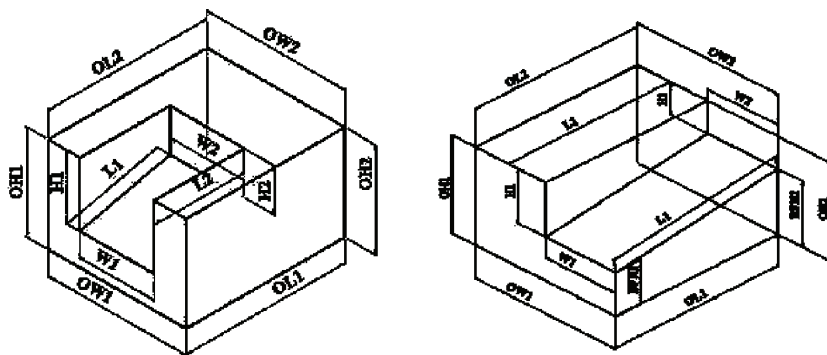
- w pracy [223] zaprezentowano prosty system interaktywnego odtwarzania obiektów CAD, będących wyciągnięciami płaskich profili w kierunku prostopadłym do ich powierzchni;
- algorytm opisany w pracy [233] został rozwinięty komercyjnie i zaimplementowany w kilku programach CAD do analizy modeli bryłowych 3D i wygenerowania listy obiektów CAD (w systemie SOLIDWORKS jest dostępny jako moduł FeatureWorks – oprócz rozpoznawania wspomagane jest także jego praca w trybie automatycznym, ale wyniki nie są zadowolające),
- w pracach [65], [95] opisano środowisko interaktywne budowania modeli CAD na bazie obiektów geometrycznych rozpoznanych automatycznie w danych 3D; użytkownicy tych programów wybierają opcje rekonstrukcji takich obiektów CAD, jakie są najlepsze pod kątem ich wiedzy o planowanej technologii wytwarzania projektowanych wyrobów,
- w pracach [31, 162, 226] opisano rezultaty badań nad (pół)automatycznym odtwarzaniem prymitywów w modelach obiektów architektonicznych,

np. okna czy drzwi w budynkach zdigitalizowanych technikami laserowymi,

- artykuł [42] na bazie doświadczeń z różnymi komercyjnymi systemami RE, ułatwiającymi odtwarzanie obiektów CAD, dowodzi przewagi programu RAPIDFORM XOR, w którym po raz pierwszy zaimplementowano interaktywny sposób konstruowania całego obiektowego modelu CAD na bazie siatki trójkątów; ponieważ RAPIDFORM jest zbudowany wokół jądra modelowania bryłowego Parasolid, praca z nim wygląda bardzo podobnie do sesji w programie CAD, ale zamiast tworzyć obiekty, wybierając je z menu i wpisując wartości parametrów liczbowych, użytkownik wskazuje proponowany przez program segment siatki (rozpoznany jako potencjalny obiekt CAD) i akceptuje sugerowaną wartość parametru liczbowego, być może zaokrąglając ją nieco – przykład takiego projektu przedstawiono w rozdziale 7.1.4.

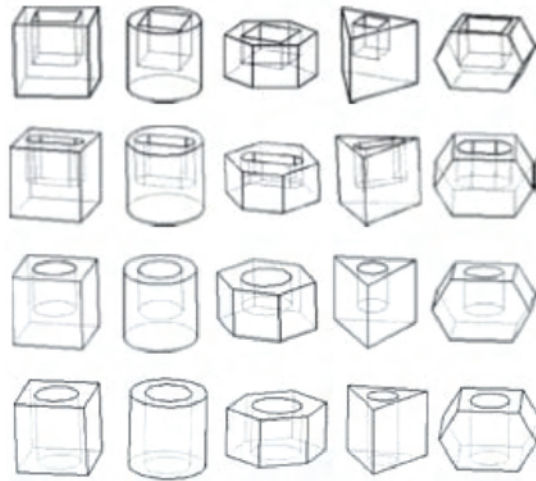
E3. Automatyczne rozpoznawanie typowych obiektów CAD – możliwe dotychczas dla ograniczonego repertuaru obiektów, wybranych spośród często spotykanych w konstrukcjach przemysłowych, np.:

- W pracy [6] przedstawiono system rozpoznawania 195 rodzajów obiektów: otworów przelotowych, otworów ślepych, stopni oraz kieszeni, wszystkich różnymi wariantami zakończenia (krawędziowe, sfazowane, zaokrąglone itp.) w modelach bryłowych 3D – rys. 6.29.



Rys. 6.29. Przykładowe złożone obiekty CAD
rozpoznawane automatycznie przez algorytm opisany w pracy [6]

- W pracy [36] opisano algorytm generowania reguł dla systemu ekspertowego do rozpoznawania 4 klas obiektów „użytkowych” (kieszeni, otworów, rowków i stopni) oraz jednej klasy obiektów „przyrostowych” (występów) w modelach bryłowych 3D – rys. 6.30.



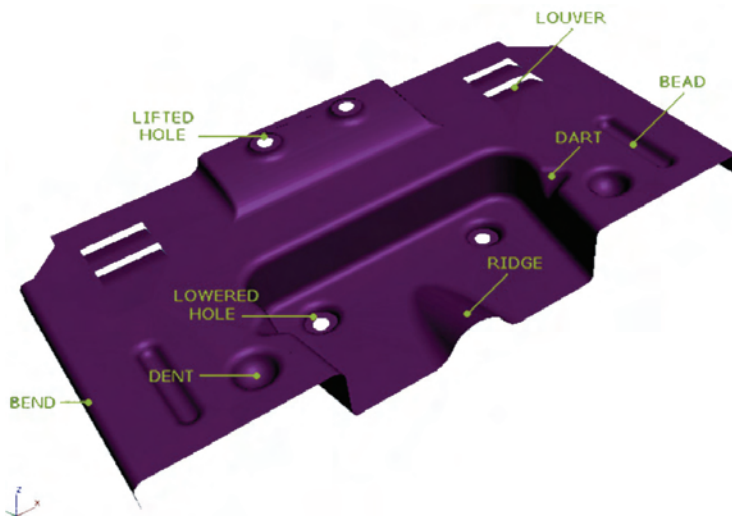
Rys. 6.30. Przykładowe obiekty CAD rozpoznawane automatycznie przez algorytm z pracy [36]

- W pracach [16] i [124] przedstawiono metody rozpoznawania stałośrednicowych rurociągów – obiektów powstałych przez wyciąganie okręgu wzdłuż krzywoliniowych ścieżek (rys. 6.31); algorytmy działają już na chmurach punktów i nie wymagają opisanych poprzednio procesów A-D.



Rys. 6.31. Identyfikacja obiektu typu „rura” jako ciągłego i gładkiego połączenia walców i torusów [16]

- W pracy [196] przedstawiono metody rozpoznawania różnych rodzajów okien w modelach zeskanowanych budynków; algorytmy działają na chmurach punktów i też nie wymagają procesów A-D.



Rys. 6.32. Efekt automatycznego rozpoznania branżowych obiektów CAD w panelu karoserii samochodu [217]. Tłumaczenie terminów: *lifted hole* = podniesiony otwór, *lowered hole* = obniżony otwór, *louver* = żaluzja, *bead* = listwa, *dart* = fałd, *ridge* = grzbiet, *dent* = wgłębienie, *bend* = zagięcie

- W publikacji [217] zaprezentowano środowisko programowe przeznaczone dla przemysłu samochodowego, w którym z siatek trójkątów (algorytm integruje też procesy B-D) rozpoznawane są obiekty stosowane w projektowaniu paneli z tłoczonej blachy: otwory, przetłoczenia, żaluzje, zagięcia itp., w wersjach płaskich, podniesionych, obniżonych itp. (rys. 6.32).

Tabela 6.19. Zapis skutków konwersji siatki trójkątów na model CAD w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
$i-1$	...	...	...	...	2– (siatka)	m trójkątów
i	<program>	konwersja na model CAD	<parametry>	$E_{\text{proc},i} = \frac{ b_i - a_i }{2}$	4 (model CAD)	n obiektów CAD

W łańcuchu przekształceń danych w badaniu RE największe odchyłki mogą powstawać na etapie budowania modelu CAD. Dane pomiarowe na początku łańcucha są już obciążone odchyłkami wynikającymi ze zmian modeli 3D podczas planowania technologii i samego wytwarzania oraz oczywiście niepewnością pomiaru, a efekt końcowy łańcucha przekształceń ma odpowiadać konstrukcyjnemu modelowi CAD. Dlatego szczególnie starannie należy obliczać odchyłki na etapie budowania modelu

CAD – przy wyjściu od siatki trójkątów i porównaniu jej z modelem CAD sposób zapisu w rejestrze spójności pokazano w tabeli 6.19.

6.9.5. Metody zapisu modeli CAD

Modele CAD zapisywane są w rodzimych formatach programów, w których zostały zbudowane. Każdy zapis w innym formacie: formacie natywnym innego programu lub formacie neutralnym (np. IGES lub STEP) nie wnosi odchyłek kształtu poza błędami dyskretyzacji (zwłaszcza w formatach tekstowych), ale może skutkować utratą informacji niegeometrycznych – obiektów, parametrów czy tolerancji i będzie równoważny wygenerowaniu modelu bryłowego 3D zamiast modelu CAD. Dla budżetu niepewności badania wpływ transferu z wykorzystaniem nierodzimego formatu pokazano w tabeli 6.20.

Tabela 6.20. Zapis skutków transferu modeli CAD w rejestrze spójności

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
<i>i</i>	<program>	zapis do formatu <format>		$E_{\text{proc},i} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$	3+ (bryły)	<i>n</i> obiektów CAD

6.10. Wnioski

W rozdziale przedstawiono różne postacie struktury danych 3D pozyskiwanych w ramach badań w inżynierii odwrotnej: chmury punktów, zestawy konturów, siatki trójkątów, modele 3D powierzchniowe i bryłowe, modele wokselowe oraz obiektowe i parametryczne modele CAD. Opisano także metody przetwarzania danych 3D: operacje przekształceń, zmieniające reprezentowany przez nie kształt, operacje konwersji, zmieniające ich strukturę, oraz operacje transferu, pozwalające je przenosić między różnymi środowiskami programowymi.

Dla proponowanej w monografii metodyki zapewnienia spójności istotne było opracowanie metod rejestrowania odchyłek, jakie powstają podczas przetwarzania modeli 3D w różnych operacjach. Zaproponowano sposób uwzględniania tych odchyłek w budżecie niepewności badania RE oraz sposób zapisu efektów różnych przekształceń danych w tzw. rejestrze spójności.

7. Przykłady zastosowania metodyki zapewnienia spójności

W ramach zaproponowanej metodyki przeprowadzono kilka badań różnych rodzajów obiektów zgodnie z jej założeniami. Badania przeprowadzono w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING na Politechnice Wrocławskiej na obiektach typowych dla badań przemysłowych i medycznych, ale nieobjętych tajemnicą przedsiębiorstw zlecających takie badania.

7.1. Tworzenie modelu obiektu technicznego o kształtach regularnych

Celem pierwszego projektu było badanie metodami inżynierii odwrotnej obiektu o regularnych kształtach w celu opracowania dwóch wersji modeli 3D: modelu powierzchniowego i modelu parametrycznego i obiektowego CAD. Obiekt jest wykonany z aluminiowej płyty, z jednej strony planowanej, i ma kilka otworów wierconych przelotowo i kilka ślepych, gwintowanych (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Badany obiekt ze stopu aluminium (widoczne markery stosowane w pomiarach optycznych)

7.1.1. Analiza potrzeb i plan badania RE

Oczekiwanym efektem badania jest model 3D, w pierwszej wersji powierzchniowy, w drugiej bryłowy CAD (odpowiednio: poziom 2+ i 4). Plan badania zakłada pomiary optyczne, z wykorzystaniem skanera z oświetleniem strukturalnym, szacunki niepewności pochodzą z danych historycznych (i doświadczenia personelu):

- szacowana niepewność pomiaru 0,1 mm,
- szacowana odchyłka przetwarzania 0,1 mm,
- suma geometryczna – oczekiwana całkowita niepewność badania 0,14 mm.

W ramach przetwarzania danych siatka trójkątów pochodząca ze skanera powinna być źródłem informacji wymiarowych dla prymitywów geometrycznych zidentyfikowanych przez operatora. Przedstawiono różne wersje badań w kolejnych podrozdziałach:

- a – manualna indentyfikacja wybranych prymitywów geometrycznych w programie GOM Inspect i eksport wyników powierzchni NURBS do systemu SOLIDWORKS w formacie IGES,
- b – praca interaktywna w programie RAPIDFORM XOR polegająca na konstruowaniu modelu obiektowego CAD na bazie siatki trójkątów i eksport wyników do systemu SOLIDWORKS w trybie *LiveTransfer* (wywoływanie przez program RAPIDFORM operacji programu SOLIDWORKS, obydwa programy są aktywne).

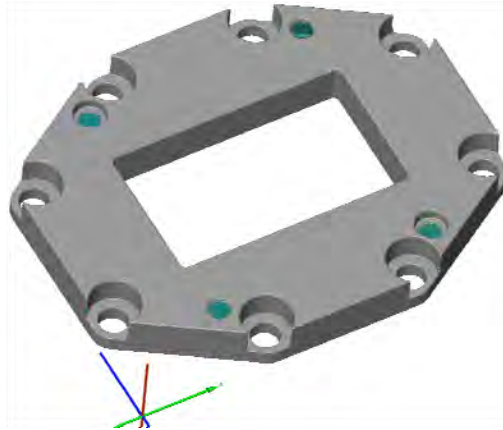
7.1.2. Pomiary danych 3D

Pomiary wykonano skanerem ATOS II firmy GOM. Element wymagał pokrycia warstwą przeciwefleksyjną. Niepewność pomiaru według wewnętrznej procedury LRE wynosiła 0,081 mm. Model zapisano w binarnym formacie STL.

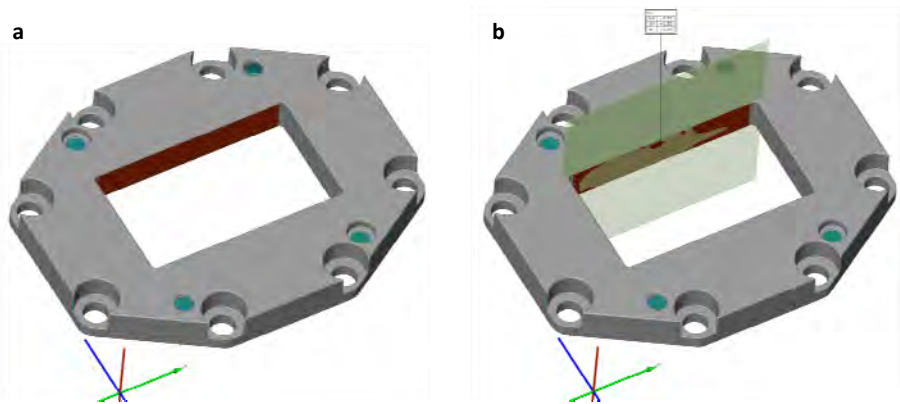
7.1.3. Konwersja danych pomiarowych na model bryłowy 3D

Na rysunku 7.2 przedstawiono model w postaci siatki trójkątów po imporcie do programu GOM INSPECT. Model został zorientowany w przestrzeni przez dopasowanie płaszczyzn do 3 boków elementu, a następnie zastosowanie funkcji „3-2-1 *Transformation*” (bazowanie płaszczyzna–linia–punkt).

Po zorientowaniu modelu nastąpiła identyfikacja prymitywów geometrycznych (w przypadku badanego obiektu są to płaszczyzny i walce). Na rysunku 7.2 przedstawiono automatyczne zaznaczenie trójkątów do wstawienia płaszczyzny (funkcja *Plane-based selection*) i efekt wstawienia tego prymitywu.



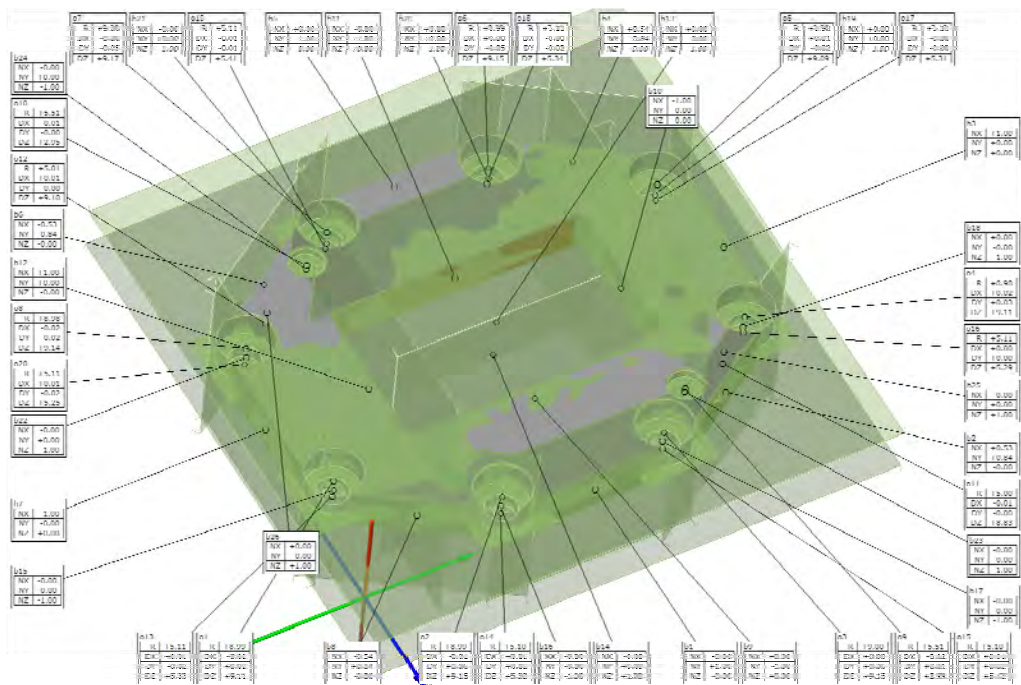
Rys. 7.2. Siatka trójkątów zorientowana w globalnym układzie współrzędnych programu GOM Inspect



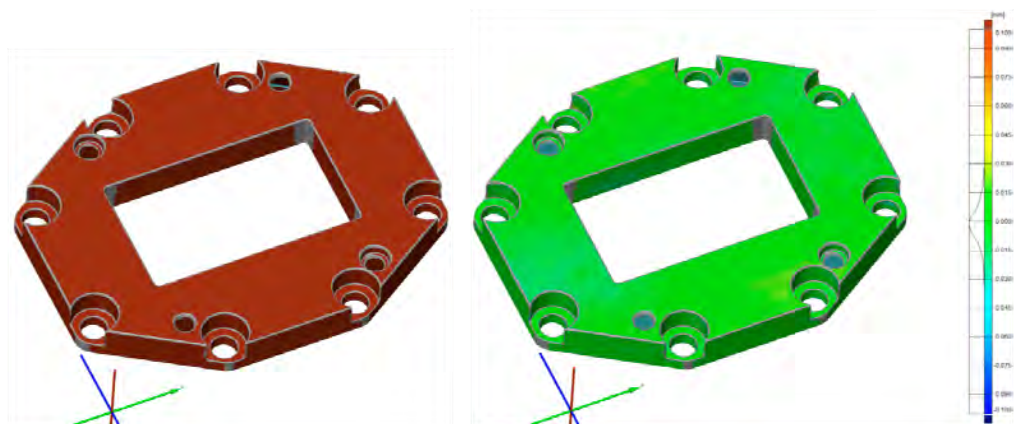
Rys. 7.3. Wybór trójkątów (a) i płaszczyzna aproksymująca zaznaczony obszar (b)

W podobny sposób dokonano wyboru fragmentów siatki dla wstawienia kolejnych prymitywów. Na rysunku 7.4 pokazano wszystkie płaszczyzny i walce oraz ich parametry geometryczne.

W konstrukcji prymitywów pominięto niektóre fragmenty siatki trójkątów, w których dopasowanie prymitywów było niemożliwe – małe zaokrąglenia na bocznej powierzchni elementu i jeszcze mniejsze zaokrąglenia krawędzi otworów zawierały stosunkowo mało trójkątów i nie dało się z dużą pewnością wyznaczyć ich parametrów, ich identyfikacja byłaby obciążona nadmiernymi błędami, niepotrzebnie zwiększającymi odchyłki operacji rozpoznawania prymitywów. Brakujące zaokrąglenia zostały wykonane ręcznie już w programie CAD.



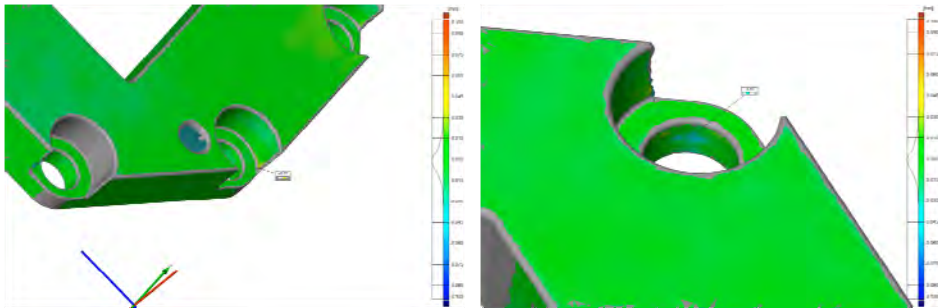
Rys. 7.4. Komplet powierzchniowych prymitywów geometrycznych do skonstruowania modelu bryłowego 3D, w odnośnikach – praktycznie nieczytelne z powodu małego rozmiaru obrazu z ekranu – opisane są identyfikatory prymitywów i ich parametry (dla walców: współrzędne środka okręgu tworzącego i jego promień, dla płaszczyzn: współrzędne wektora normalnego)



Rys. 7.5. Porównanie wynikowego modelu powierzchniowego z danymi pomiarowymi

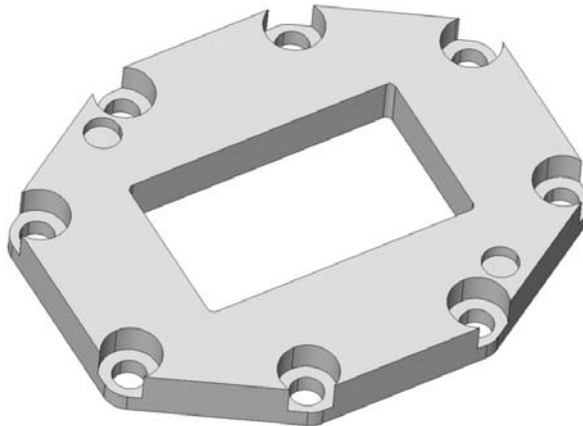
Aby obliczyć odchyłki przetwarzania, przeprowadzono porównanie modelu wynikowego z danymi pomiarowymi. Na rysunku 7.5 pokazano zbiór trójkątów wybrany

do porównania (bez fragmentów opisujących małe zaokrąglenia, o których mowa w poprzednim akapicie) oraz rezultat porównania. Maksymalne zarejestrowane odchyłki wyniosły $-0,05$ mm i $+0,05$ mm. Na rysunku 7.5 widać powiększenia tych miejsc, w których wystąpiły odchyłki ekstremalne.



Rys. 7.6. Miejsca występowania największych odchyłek przetwarzania na poziomie ± 50 μ m

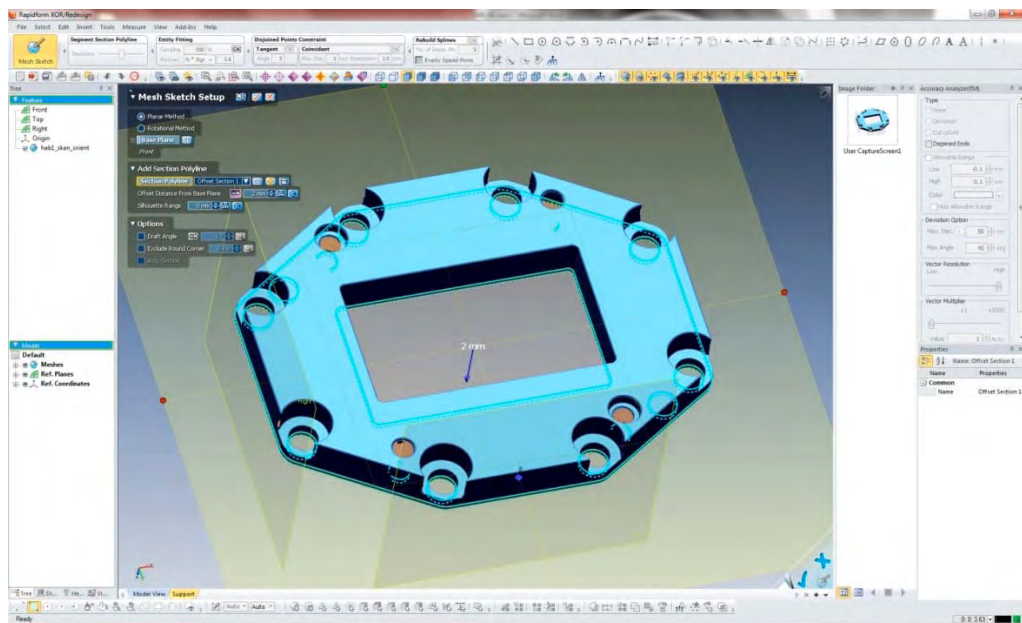
Po zapisaniu prymitywów w formacie IGES model powierzchniowy został zaimportowany do programu SOLIDWORKS – rys. 7.6.



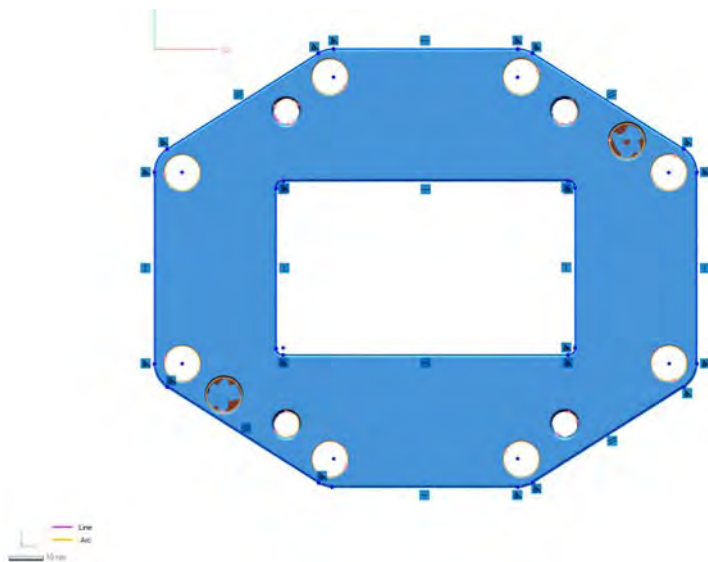
Rys. 7.7. Wynikowy model powierzchniowy 3D

7.1.4. Konwersja siatki trójkątów na model CAD

Drugą metodą osiągnięcia celu było użycie programu RAPIDFORM XOR do konstruowania bryłowego modelu obiektowego na bazie danych pomiarowych. Na rysunku 7.8 przedstawiono siatki trójkątów po zaimportowaniu pliku w formacie STL.



Rys. 7.8. Wejściowa siatka trójkątów zaimportowana do programu RAPIDFORM XOR

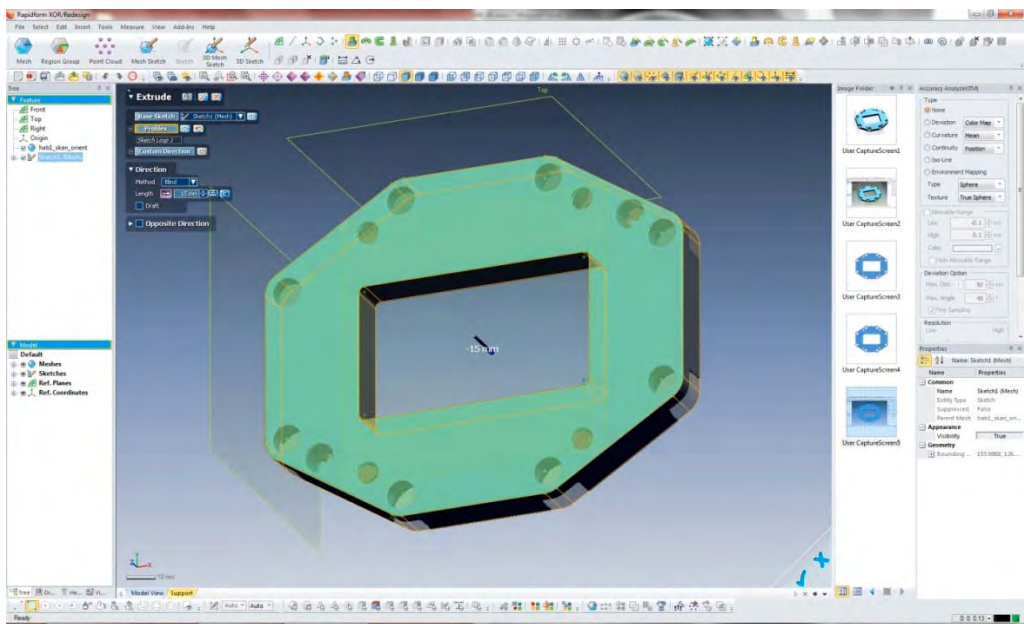


Rys. 7.9. Automatyczny szkic wygenerowany z przekroju przez siatkę trójkątów

Praca w programie RAPIDFORM XOR wygląda, jak w typowym programie CAD. Najpierw tworzy się płaski sparametryzowany profil 2D, a potem się go wyciąga,

tworząc nowy obiekt CAD. W odróżnieniu od pracy z typowym programem CAD w RAPIDFORMIE nie trzeba jednak szkicować profilu samodzielnie – można go wygenerować (funkcją *Autosketch*) wskazując płaski przekrój przez siatkę trójkątów pochodzącą z pomiaru. Na rysunku 7.9 widać przekrój, w którym program automatycznie rozpoznał linie i łuki oraz relacje między nimi (równoległość, pionowość, poziomość i styczność – zaznaczone niebieskimi symbolami).

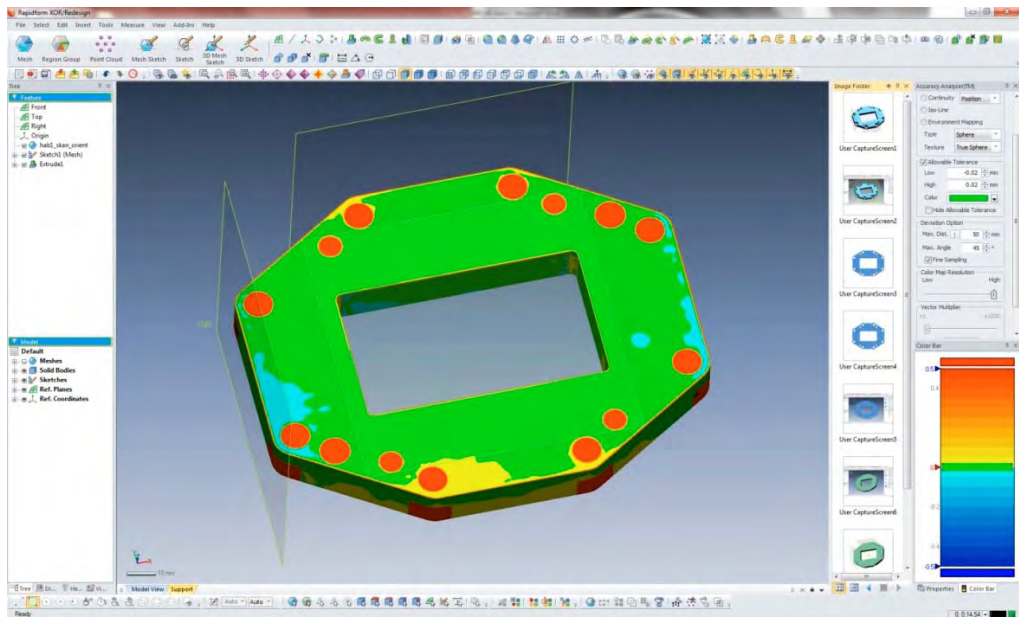
W kolejnym kroku następuje wyciąganie szkicu w operacji *Extrude* dla utworzenia obiektu CAD. Długość wyciągnięcia jest obliczana przez program dla optymalnego (według metody RMS – patrz rozdział 6.2) dopasowania do danych pomiarowych – rys. 7.10.



Rys. 7.10. Obiekt CAD automatycznie sparametryzowany przez program RAPIDFORM XOR

Po każdej operacji można sprawdzić jakość dopasowania tworzonego modelu do danych pomiarowych. Na rysunku 7.11 pokazano odchyłki między pierwszym obiektem a siatką trójkątów (czerwone obszary odpowiadają otworom, które jeszcze nie zostały utworzone w modelu CAD).

Po skonstruowaniu w ten sposób wszystkich obiektów CAD, dzięki funkcji *LiveTransfer* przeniesiono rezultat modelowania do programu CAD – SOLIDWORKS. Wynikowy model – obiektowy i parametryczny model CAD – pokazano na rysunku 7.12.

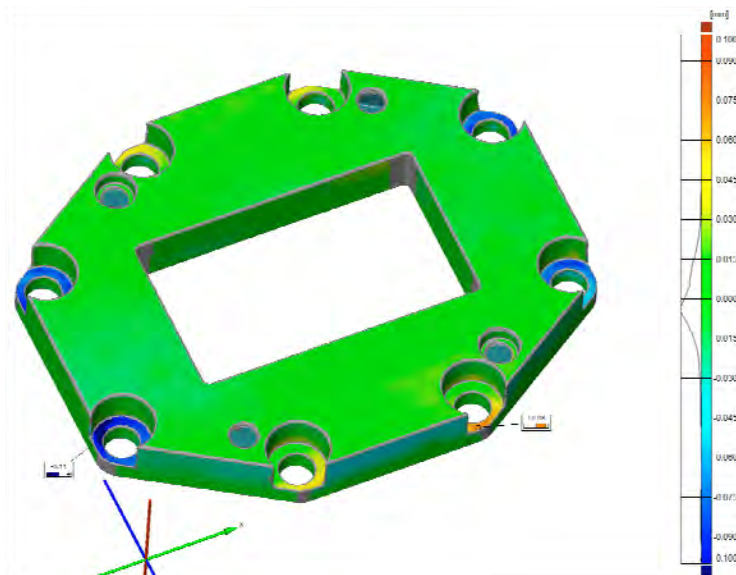


Rys. 7.11. Dopasowanie częściowego modelu CAD do danych pomiarowych



Rys. 7.12. Wynikowy model CAD

Aby obliczyć odchyłki przetwarzania, przeprowadzono porównanie modelu wynikowego z danymi pomiarowymi. Na rysunku 7.6 przedstawiono rezultat porównania – maksymalne zarejestrowane odchyłki wyniosły $-0,11$ mm i $+0,08$ mm. Z kolorowej mapy odchyłek widać, że niektóre z bocznych ścian elementu nie są pionowe, jak zakładał sposób konstruowania modelu CAD, oraz że głębokość poszerzeń niektórych pionowych otworów przy obrysie elementu nie jest taka sama (a przy takim założeniu były konstruowane).

Rys. 7.13. Miejsca występowania ekstremalnych odchyłek przetwarzania: -110 i $+80\ \mu\text{m}$

7.1.5. Ocena jakości badania

Dla pierwszej metody badania RE, której efektem był model powierzchniowy 3D, zawierający zidentyfikowane prymitywy geometryczne, przebieg badania pod kątem spójności podano w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Rejestr spójności badania RE pierwszą metodą

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
1	GOM Software	pomiar skanerem z oświetleniem strukturalnym Atos II	pole pomiarowe MV250, poligonizacja: odzworowanie szczegółów wysokie, postprocessing normalny	0,081 mm (niepewność pomiaru)	2–	303 990 trójkątów
2		zapis w binarnym formacie STL				< 1 μm
3	GOM Inspect	identyfikacja powierzchniowych prymitywów geometrycznych	płaszczyzny i walce	0,05 mm	2+	46 prymitywów NURBS
4		zapis w formacie IGES				< 1 μm
Rozszerzona niepewność złożona badania				0,095 mm		

Dla drugiej metody, której efektem był parametryczny i obiektowy model CAD, przebieg badania pod względem spójności pokazano w tabeli 7.2.

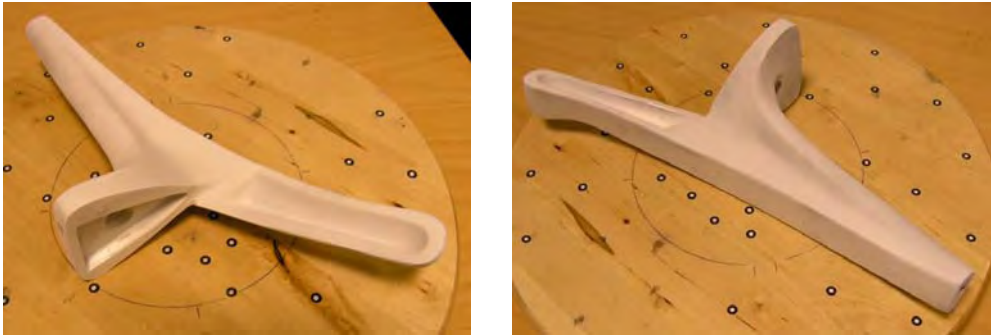
Tabela 7.2. Rejestr spójności badania RE drugą metodą

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
1	GOM Software	pomiar skanerem z oświetleniem strukturalnym Atos II	pole pomiarowe MV250, poligonizacja: odwzorowanie szczegółów wysokie, postprocessing normalny	0,081 mm (niepewność pomiaru)	2–	303 990 trójkątów
2		zapis w binarnym formacie STL		< 1 μm		„detail.stl”
3	Rapidform XOR	konstruowanie obiektów CAD	wyciągnięcia i wycięcia profilu 2D	0,095 mm	4	4 obiekty CAD
4		transfer do programu Solidworks		< 1 μm		„detail.sldprt”
Rozszerzona niepewność złożona badania				0,12 mm		

Różnica w niepewności badania dla obydwu metod tworzenia modelu 3D wynika z połączenia w drugiej metodzie działań rekonstrukcyjnych na danych pomiarowych z działaniami „projektowymi” – operator programu RAPIDFORM XOR jest jednocześnie inżynierem RE i konstruktorem CAD, projektując nominalny kształt geometryczny wyrobu z wykorzystaniem informacji z pomiaru. O ile w metodzie automatycznej identyfikacji prymitywów geometrycznych orientacja każdej z płaszczyzn i walców jest obliczana tak, aby najlepiej pasowała do danych pomiarowych (i zwykle nie jest wówczas ortogonalna do osi układu współrzędnych), oraz cechy wymiarowe różnych prymitywów nie są ze sobą powiązane, o tyle w tworzeniu obiektów CAD w drugiej metodzie decyzją projektanta jest zorientowanie osi otworów/walców prostopadle do płaszczyzny podstawy czy zrównanie głębokości poszerzeń otworów. Wynik drugiej metody jest bardziej przydatny w konstruowaniu lub reengineeringu wyrobu, ale wynik pierwszej jest bardziej wierny danym z pomiaru.

7.2. Tworzenie modelu obiektu technicznego o kształtach swobodnych

Celem kolejnego projektu było badanie metodami inżynierii odwrotnej obiektu o kształtach nieregularnych w celu opracowania jego modelu powierzchniowego opisanego powierzchniami typu NURBS. Obiekt jest wykonany z aluminium, odlwanego w formie i wykańczanego za pomocą obróbki ubytkowej CNC (rys. 7.14).



Rys. 7.14. Badany obiekt ze stopu aluminium, pokryty warstwą przeciwrefleksyjną

7.2.1. Analiza potrzeb i plan badania RE

Oczekiwanym efektem badania jest model powierzchniowy 3D (poziom 2+). Plan badania zakłada pomiary optyczne, z zastosowaniem skanera z oświetleniem strukturalnym:

- szacowana niepewność pomiaru 0,1 mm,
- szacowana odchyłka przetwarzania 0,1 mm,
- wynikowa oczekiwana całkowita niepewność badania 0,14 mm.

W ramach przetwarzania danych siatka trójkątów pochodząca ze skanera powinna być przetworzona na elementy powierzchniowe typu NURBS.

7.2.2. Pomiary danych 3D

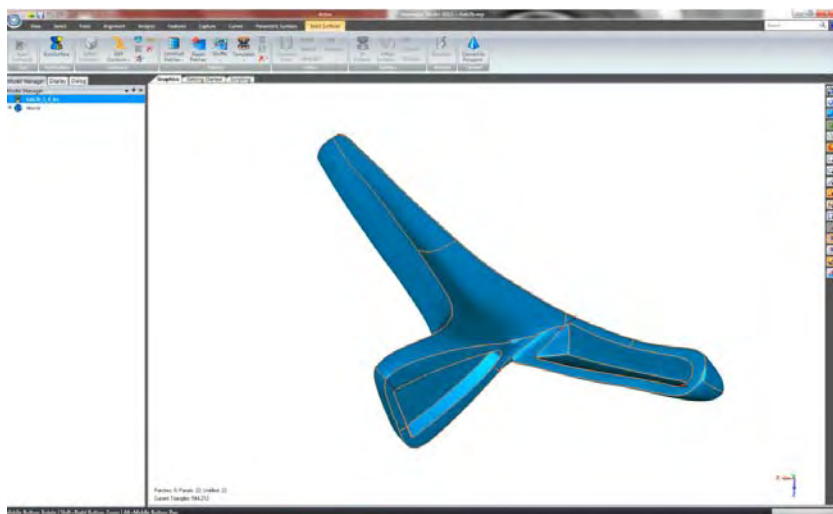
Pomiary elementu wykonano skanerem ATOS II firmy GOM. Niepewność pomiaru według wewnętrznej procedury LRE wyniosła 0,099 mm. Na rysunku 7.15 przedstawiono wynikowy model 3D, zapisany przez program sterujący procesem pomiarowym w binarnym formacie STL.



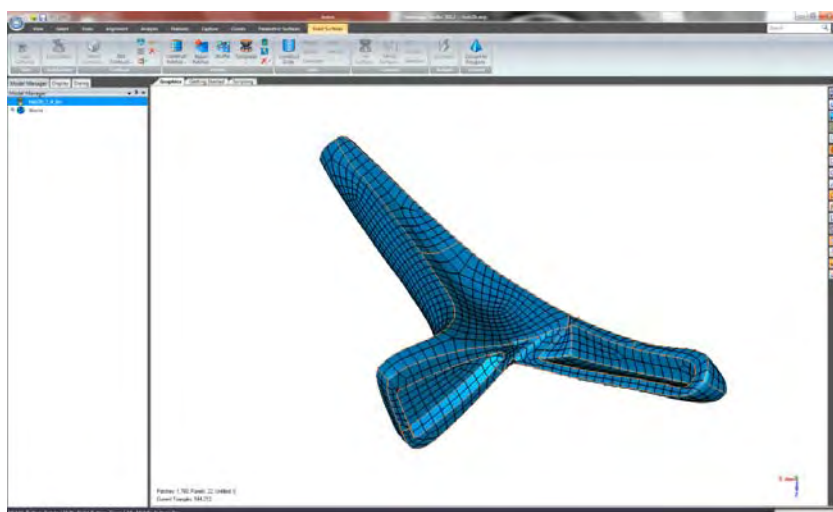
Rys. 7.15. Model powierzchniowy
w postaci siatki trójkątów

7.2.3. Konwersja danych pomiarowych na model powierzchniowy 3D

Przetwarzanie danych zrealizowano w programie GEOMAGIC STUDIO. Kolejne kroki polegały na segmentacji kształtu (wygenerowaniu konturów, operacja *Contours*) (rys. 7.16) i aproksymacji poszczególnych segmentów powierzchniami NURBS (operacja *Patches*) (rys. 7.17).

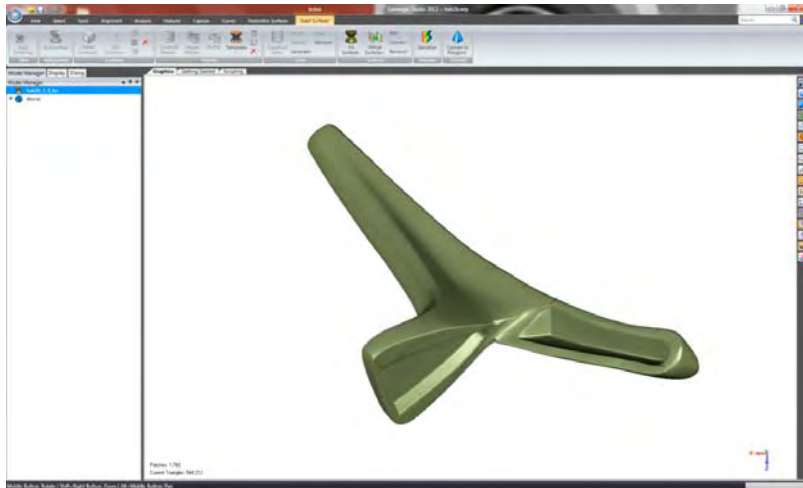


Rys. 7.16. Kontury po segmentacji siatki trójkątów



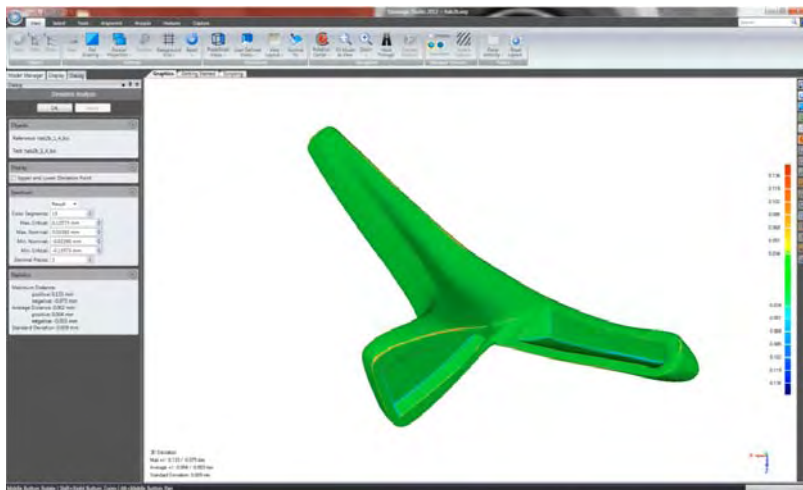
Rys. 7.17. Powierzchnie NURBS rozpięte na poszczególnych segmentach siatki

Efekt końcowy – model powierzchniowy 3D – przedstawiono na rysunku 7.18.



Rys. 7.18. Model z powierzchniami NURBS

W celu oceny jakości dopasowania do danych pomiarowych przeprowadzono porównanie z nimi modelu wynikowego – rys. 7.4. Minimalna i maksymalna odchyłka wyniosły odpowiednio: $-0,075$ i $+0,133$ mm. Największe odchyłki wystąpiły na krawędziach elementu.



Rys. 7.19. Porównanie rezultatów przetwarzania z danymi pomiarowymi

Rezultat badania zapisano w tekstowym formacie IGES.

7.2.4. Ocena jakości badania

Przebieg badania ze względu na spójność udokumentowano w tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Rejestr spójności badania RE

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
1	GOM Software	pomiar skanerem z oświetleniem strukturalnym Atos II	pole pomiarowe MV250, poligonizacja: odwzorowanie szczegółów wysokie, postprocessing normalny	0,099 mm (niepewność pomiaru)	2– (siatka)	544 212 trójkątów
2		zapis w binarnym formacie STL		<1 μm		„detail.stl”
3	Geomagic Studio	segmentacja i aproksymacja powierzchniami NURBS	<parametry>	0,104 mm	2+ (powierzchnie)	1760 powierzchni NURBS
4		zapis w formacie IGES		<1 μm		„detail.igs”
Rozszerzona złożona niepewność badania				0,14 mm		

7.3. Tworzenie modelu obiektu biomedycznego

W ramach ostatniego projektu badano metodami inżynierii odwrotnej obiekt o złożonej strukturze wewnętrznej w celu opracowania jego modelu do zastosowania w pracach nad systemami nawigacji chirurgicznej. Badanym obiektem był fantom ludzkiej czaszki w skali naturalnej, zaopatrzony w tytanowe śruby i plastikowe pierścienie do pozycjonowania modelu w systemie nawigacyjnym (rys. 7.20).



Rys. 7.20. Badany obiekt i jego widok w komorze tomografu

7.3.1. Analiza potrzeb i plan badania RE

Oczekiwaną postacią danych wynikowych badania był model 3D czaszki w formacie STL. Oczekiwaną dokładność odbiorcy wyników badań określili rzędu $\pm 0,5$ mm lub lepszą, ze względu na planowane zastosowanie modelu końcowego do weryfikacji dokładności geometrycznej systemu planowania operacji i nawigacji śródoperacyjnej, gdzie spodziewali się osiągnąć wynik lepszy niż spotykany w literaturze błąd pozycjonowania rzędu 1 mm.

Uwzględniając skomplikowany kształt obiektu, jedyną techniką pomiarową zapewniającą możliwość odtworzenia pełnego kształtu była dostępna w LRE techniczna tomografia komputerowa. Co prawda ważny dla odbiorców był jedynie kształt zewnętrzny czaszki, który można by badać metodami optycznymi, ale obecność wielu otworów w powierzchni zewnętrznej, prowadzących do wewnętrznych struktur czaszki, znacząco utrudniałyby skanowanie optyczne (algorytm skanowania próbowałby mimo wszystko budować powierzchnie rozciągające się do wnętrza) i obróbkę danych 3D uzyskanych z obiektu (trzeba by odcinać niepotrzebne fragmenty kanałów prowadzących do wnętrza).

We wstępnym szacunku niepewności pomiarowej, na bazie danych historycznych i znajomości rozmiarów i kształtu obiektu, określono ją na 0,1–0,2 mm. Możliwe odchyłki kształtu podczas operacji przetwarzania danych oceniono na 0,3–0,5 mm. Daje to w sumie szacunek złożonej niepewności badania na poziomie 0,54 mm, co pozwala na akceptację takiego planu dla badania RE.

7.3.2. Pomiary danych 3D

Pomiar wykonano z użyciem tomografu technicznego METROTOM 1500 firmy Zeiss według wewnętrznej procedury pomiarowej LRE. Parametry skanowania podano w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Parametry procesu pomiaru czaszki metodą tomografii komputerowej

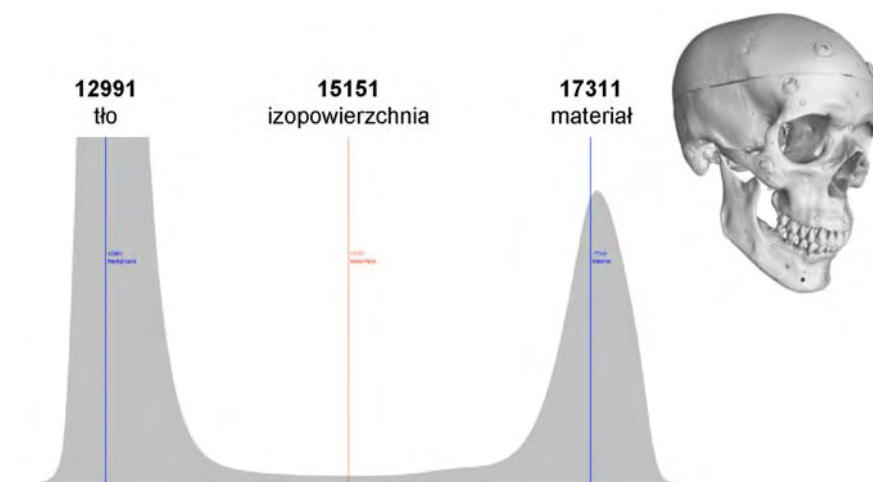
Lampa rentgenowska		Detektor		Parametry rekonstrukcji	
Prąd	450 μ A	Czas integracji	1.5 s	Liczba projekcji	1 000
Napięcie	200 kV	Wzmocnienie sygnału	8×	Wielkość woksela	216 μ m
Pre-filtr	0,5 mm Cu	Filtr obrazów	medianowy	Filtr	Sheep–Logan

Na podstawie znajomości warunków pomiaru przeprowadzono szacowanie niepewności pomiaru według wewnętrznej procedury LRE – osiągnięty rezultat to 0,079 mm.

Dane pomiarowe zapisano w binarnym formacie Volume Graphics z 16-bitową głębokością szarości (taki format nie wprowadza większych błędów kwantyzacji).

7.3.3. Konwersja danych pomiarowych na model powierzchniowy 3D

Przetwarzanie danych przeprowadzono w programie VG STUDIO MAX. Izopowierzchnię skonstruowano z automatycznie dobraną wartością graniczną w skali szarości (15 151 jednostek, na rysunku 7.21 pokazano histogram: po lewej stronie granicy progowania – woksele należące do otoczenia, po prawej – woksele obiektu).

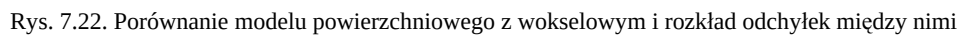


Rys. 7.21. Histogram dla wyboru granicznej wartości szarości oraz widok uzyskanego modelu powierzchniowego

Jakość generacji siatki oszacowano, porównując źródłowy model wokselowy i wynikowy model powierzchniowy w programie VG STUDIO MAX. Na rysunku 7.22 pokazano mapę odchyłek między nimi – odchyłki mieszczą się między $-0,038$ mm i $+0,039$ mm – oraz histogram z rozkładem odchyłek kształtu.

Model powierzchniowy zapisano w strukturalnej postaci siatki trójkątów w binarnym formacie STL (błędy kwantyzacji pomijalne).

Po zaimportowaniu pliku z modelem, siatkę trójkątów przetworzono w programie GEOMAGIC STUDIO: naprawiono te fragmenty siatki, które się wzajemnie przecinały i 10-krotnie zredukowano liczbę trójkątów. Model w postaci końcowej zapisano ponownie w binarnym formacie STL.



Przebieg badania pod kątem spójności podano w tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Rejestr spójności badania RE czaszki

Lp.	Pomiary i przekształcenia danych 3D			Rozszerzona odchyłka (budżet niepewności)	Postać danych 3D	
	program	operacja	parametry		struktura	cechy
1	Metrotom OS	pomiar metodą tomografii	parametry w tab. 7.4	0,12 mm (niepewność pomiaru)	3– (woksele)	1020×1020×848 wokseli niehomogenicznych
2		zapis w formacie VGL		<1 μm		„czaszka.VGI” + „czaszka.SCV”
3	VG Studio Max 2.0	segmentacja i konwersja do siatki trójkątów	wartość progowania: 15 151	0,039 mm	2– (siatka)	4 121 271 trójkątów
4		zapis w binarnym formacie STL		<1 μm		„czaszka0.STL”
5	Geomagic Studio 12	korekcja siatki	naprawa samoprzecięć	0,125 mm		4 121 233 trójkątów
6		redukcja liczby trójkątów	10%, priorytet dla krzywizny	0,638 mm		412 123 trójkąty
7		zapis w binarnym formacie STL		<1 μm		„czaszka.STL”
Rozszerzona niepewność złożona badania				0.66 mm		

Na rysunku 7.23 przedstawiono końcowy model 3D czaszki.

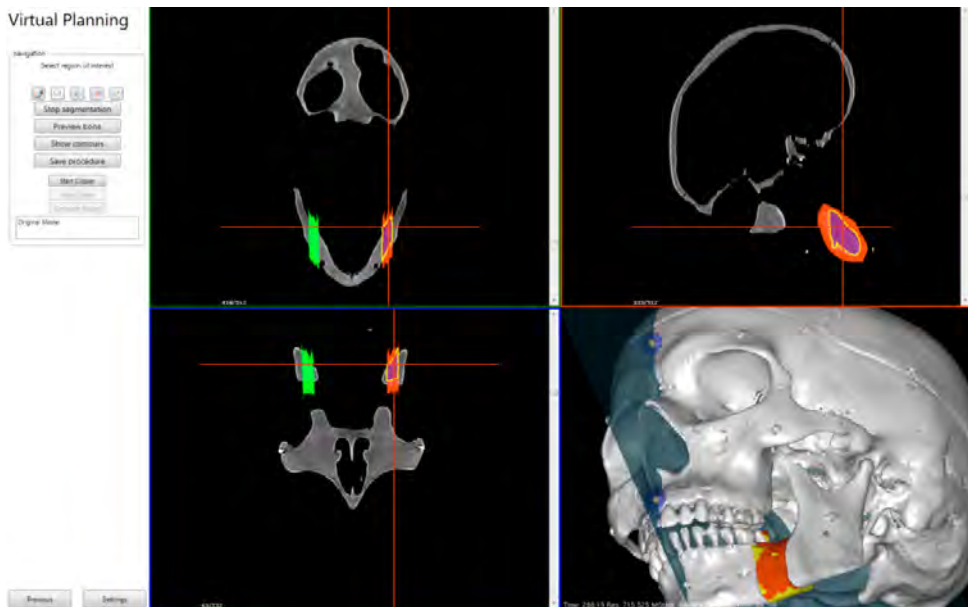


Rys. 7.23. Wynikowy model powierzchniowy czaszki (w widoku z trójkątami i widoku cieniowanym)

7.3.5. Zastosowanie wyników badania

Utworzony w badaniu RE model czaszki wykorzystano w badaniach dokładności systemu do planowania interwencji chirurgicznych [220] (rys. 7.24), prowadzonych w Zakładzie Inżynierii Biomedycznej i Mechaniki Eksperymentalnej na Politechnice Wrocławskiej [257]. Dzięki uzyskaniu dokładności rekonstrukcji czaszki (niepewności

badania RE) na poziomie 0,66 mm, udało się osiągnąć średni błąd rejestracji punktów charakterystycznych kształtu w systemie nawigacji na poziomie poniżej 1 mm.



Rys. 7.24. Program do wirtualnego planowania operacji z modelem czaszki zrekonstruowanym metodą tomografii (źródło: ZIBiME PWiR.)

7.4. Wnioski

W rozdziale przedstawiono kilka rzeczywistych badań RE – łańcuchów procesów prowadzących od pomiaru technikami optyczną i tomograficzną do uzyskania końcowej postaci struktur danych 3D. Opisane przykłady potwierdzają stawianą przez autora tezę o istotnym i wartym rejestrowania wpływie procesów przetwarzania danych na jakość rezultatów badań w inżynierii odwrotnej – w każdym z przedstawionych przypadków różnica między *niepewnością samego pomiaru* (odpowiednio w kolejnych projektach: 0,081 mm, 0,099 mm i 0,12 mm) a *całkowitą niepewnością badania RE* (0,095/0,12 mm, 0,14 mm i 0,66 mm) jest znacząca i wynosi **od kilkudziesięciu do kilkuset procent**. Posługiwanie się tylko niepewnością pomiaru nie dawałoby podstaw do wiarygodnej oceny wierności danych 3D w odniesieniu do cech geometrycznych zmierzonego obiektu.

Zademonstrowano też zaproponowany w monografii sposób rejestracji efektów przekształceń danych 3D w postaci tzw. *rejestracji spójności*, pokazującego niepewności częściowe (niepewność pomiaru i odchyłki poszczególnych procesów przetwarzania danych) i ostateczną złożoną **niepewność badania RE**.

8. Podsumowanie i perspektywy dalszych badań

Przedstawiona w pracy **metodyka zapewnienia spójności badań w przemysłowej inżynierii odwrotnej**, obejmująca pomiary trójwymiarowych kształtów obiektów fizycznych i przetwarzanie uzyskanych danych, porządkuje te działania ze względu na jakość ich rezultatów. Jak napisano w rozdziale 1, bez wdrożenia takiej metodyki nie można wyników badania RE traktować z pełnym zaufaniem, porównywać z innymi ani powtarzać w celu weryfikacji. Zdaniem autora jego propozycja jest pierwszą, która temat traktuje globalnie – starając się objąć swoim zasięgiem wszystkie etapy prac w inżynierii odwrotnej, wliczając w to planowanie badań, pomiary, konwersje struktur danych 3D, przetwarzanie danych w różnych postaciach, a nawet transfery modeli 3D za pomocą formatów wymiany danych geometrycznych.

Rozdział 2 monografii przedstawia różnorodne zastosowania inżynierii odwrotnej w tworzeniu i odtwarzaniu trójwymiarowych modeli obiektów technicznych, biomedycznych i artystycznych, opisując równocześnie wymagania dotyczące struktury i jakości oczekiwanych wyników badań RE w tak różnych obszarach. Wskazano w nim także wiele projektów zrealizowanych w LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING.

W rozdziale 3 opisano cele pracy, spośród których najważniejszym było opracowanie metodyki zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej. Metodyka jest oparta na wprowadzonym w rozdziale 4 pojęciu **niepewności badania RE**, które ma w intencji autora służyć do oceny wpływu na rezultat badania wszystkich błędów i odchyłek wymiarowych danych 3D w łańcuchu procesów prowadzącym od pomiaru „analogowego” obiektu aż do utworzenia pliku z zapisem ostatecznej postaci strukturalnej opisującego go cyfrowego modelu 3D. Metoda obliczania sumarycznej niepewności bazuje na powszechnie przyjętym modelu obliczania niepewności pomiaru (budżet niepewności) i traktuje kolejne odchyłki w przetwarzaniu danych jakby były one częścią „pomiaru RE”, obejmującego faktyczny pomiar 3D wraz z późniejszymi modyfikacjami danych.

W rozdziale 5 monografia zawiera przegląd najważniejszych technik pomiarowych stosowanych w badaniach RE. Techniki sklasyfikowano pod względem stosowanego w nich oddziaływania fizycznego – od skanowania niszczącego, przez techniki styko-

we, optyczne, nieoptyczne aż do multisensorycznych. Opisowi poszczególnych technik towarzyszy prezentacja znanych metod oceny ich zdolności pomiarowych oraz szacowania niepewności pomiarów z ich udziałem.

Kolejny rozdział zawiera charakterystykę różnych struktur danych 3D i opis najczęściej stosowanych procedur ich przetwarzania i konwersji – od chmur punktów, przez zestawy konturów, siatki trójkątów, kontury, woksele, modele powierzchniowe i bryłowe aż do pełnych parametrycznych i obiektowych modeli CAD. Każde przekształcenie, konwersja i transfer danych jest opisywany rozszerzoną odchyłką kształtu 3D, która powiększa niepewność badania RE. Przedstawione w tym rozdziale narzędzia szacowania niepewności przekształceń są oryginalnym dorobkiem autora, stworzonym dla zaproponowanej w pracy metodyki.

W rozdziale 7 zaprezentowano kilka przykładów badań różnych obiektów zrealizowanych w LRE zgodnie z proponowaną metodyką. Analiza rejestru spójności potwierdza istotny wpływ odchyłek wymiarowych wnoszonych do danych 3D podczas ich przetwarzania, przesyłania i konwersji na ostateczny rezultat badań RE, co uzasadnia przydatność proponowanego mechanizmu obliczania i rejestrowania tych odchyłek.

Monografia spełnia główny cel postawiony w rozdziale 3 i zawiera:

1. Założenia i opis **metodyki zapewnienia spójności badań** w inżynierii odwrotnej.
2. Narzędzia oceny jakości **pomiarów danych 3D**.
3. Narzędzia oceny jakości **procesów przekształcania danych 3D**.
4. Przykłady **wdrożeń** opracowanej metodyki.
5. Ocenę **efektów** jej zastosowania.

Przedstawiona propozycja metodyki zapewnienia spójności nie wyczerpuje tematu zobiektywizowanej oceny badań w dziedzinie inżynierii odwrotnej. Autor monografii zamierza w ramach działalności LABORATORIUM REVERSE ENGINEERING kontynuować zarówno badania dostępnych technik pomiarowych i metod przetwarzania danych 3D, jak i poszukiwania nowych zastosowań tej dyscypliny badań naukowych i wzbogacania jej o nowe narzędzia.

Jednym z perspektywicznych kierunków badań może być zagadnienie akwizycji, przetwarzania i oceny jakości danych niewspółrzędnościowych uzyskiwanych w niektórych technikach pomiarów. Informacje o innych niż kształt geometryczny cechach obiektów, np. ich kolorze, lokalnej gęstości materiału, rodzaju i lokalnej wielkości porowatości lub innych zarejestrowanych właściwościach materiałowych, są, jak dotychczas, tylko pomocą w obliczeniach kształtów 3D, ale przecież znajomość ich przestrzennego rozkładu jest też wartościowa i może podlegać analizie. Należałoby opracować metodykę oceny jakości także takich danych, wymagającą opracowania lub doboru miary do porównywania takich modeli niehomogenicznych i metod analizy przestrzennej dystrybucji właściwości mierzonego obiektu.

Literatura

- [1] 3D Systems, 3D Systems Buys Rapidform, <http://www.rapidform.com/about-us/press-news/3d-systems-buys-rapidform>, dostęp: listopad 2012.
- [2] 3D Systems, 3D Systems To Acquire Geomagic, <http://www.rapidform.com/about-us/press-news/3d-systems-to-acquire-geomagic>, dostęp: styczeń 2013.
- [3] 3D Systems, Stereolithography Interface Specification, Valencia, California, USA, 1989.
- [4] Arámbula K., Siller H., de Chiffre L., Rodríguez C., Cantatore A., *Evaluation of metrology technologies for free form surfaces*, International Journal of Metrology and Quality Engineering, 1/2012, 55–62.
- [5] Arendarski J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [6] Arivazhagan A., Mehta N.K., Jain P.K., *Development of a feature recognition module for tapered and curved base features*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3–4/2008, 319–332.
- [7] ASTM F2915 – Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF), 2012.
- [8] Attene M., Katz S., Mortara M., Patane G., Spagnuolo M., Tal A., *Mesh Segmentation – A Comparative Study*, Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI'06) 2006.
- [9] Augustyniak M., Barczewski M., Andrzejewski J., *Wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej w badaniach tworzyw sztucznych*, Pomiary, Automatyka, Robotyka, 2/2012, 48–51.
- [10] Autodesk, Drawing Exchange Format, 2008.
- [11] Bagci E., *Reverse Engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies*, Advances in Engineering Software, 6/2009, 407–418.
- [12] Balasubramanian N., Fridge D., Kasdan H.L., *Inspection and Metrology Based on Two Dimensional and Three Dimensional Image Digitizers*, Modern Plastics, 1980, Vol. 1, 505–516.
- [13] Baltsavias E.P., *A comparison between photogrammetry and laser scanning*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2–3/1999, 83–94.
- [14] Bartscher M., Hilpert U., Goebbels J., Weidemann G., *Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1/2007, 495–498.
- [15] Bartscher M., Neuschaefer-Rube U., Staude A., Ehrig K., Goebbels J., *Application of an industrial CT reference standard for cast free-form shaped work pieces*, Proceedings of International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, referat We.4.3, 2011.
- [16] Bauer U., Polthier K., *Generating parametric models of tubes from laser scans*, Computer-Aided Design, 10/2009, 719–729.
- [17] Bentley, Pointools, <http://www.pointools.com>, dostęp: marzec 2013.
- [18] Beraldin J.A., *Integration of laser scanning and close-range photogrammetry – The last decade and beyond*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science Congresss, Istanbul, Turkey, 2004, 972–983.

- [19] Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C., Taubin G., *The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1/1999, 349–359.
- [20] Besic I., van Gestel N., Kruth J.P., Bleys P., Hodolic J., *Accuracy improvement of laser line scanning for feature measurements on CMM*, Optics and Lasers in Engineering, 11/2011, 1274–1280.
- [21] Besl P.J., McKay N.D., *A method for registration of 3-D shapes*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2/1992, 239–256.
- [22] Będza T., Dybała B., Kolinka P., *Szacowanie niepewności pomiaru dla procedury badawczej PB-301: Cyfrowy pomiar kształtu powierzchni metodą stykową*, (wyd. 4) [materiał niepublikowany], 2012.
- [23] Będza T., Dybała B., *Szacowanie niepewności pomiaru dla procedury badawczej PB-302: Cyfrowy pomiar kształtu powierzchni metodą WLT*, (wyd. 2) [materiał niepublikowany], 2012.
- [24] Będza T., Frankiewicz M., Dybała B., Chlebus E., *Inżynieria odwrotna w procesie odtwarzania uszkodzonych lub zużytych części maszyn i narzędzi*, Górnictwo Odkrywkowe, 3/2010, 99–103.
- [25] Będza T., Garbicz G., Dybała B., *Integracja metod inżynierii odwrotnej w rekonstrukcji modeli 3D obiektów fizycznych*, Mechanik, 2/2009, 136–137.
- [26] Będza T., Garbicz G., Dybała B., *Rekonstrukcje modeli 3D z jednoczesnym zastosowaniem różnych technologii inżynierii odwrotnej*, CA systems and technologies: systems – equipment – process, SOP'2008, Cracow University of Technology, 2008, 18–25.
- [27] Będza T., *Opracowanie hybrydowej metody rekonstrukcji obiektów fizycznych w inżynierii odwrotnej*, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 2009.
- [28] Bibb R., *Medical modelling. The application of advanced design and development techniques in medicine*, CRC Press, Boca Raton, Cambridge, 2006.
- [29] Bocian P., *Zastosowania technologii generatywnych w wytwarzaniu implantów dopasowanych twarzoczaszki*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2012.
- [30] Bosché F., Turkan Y., Haas C.T., Haas R., *Fusing 4D modelling and laser scanning for construction schedule control*, Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2010 – Proceedings of the 26th Annual Conference 2010.
- [31] Bosché F., *Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction*, Advanced Engineering Informatics, 1/2010, 107–118.
- [32] Botsch M., Kobbelt L., Pauly M., Alliez P., Lévy B., *Polygon mesh processing*, A K Peters, Natick, 2010.
- [33] Bouma W., Fudos I., Hoffmann C., Cai J., Paige R., *Geometric constraint solver*, Computer-Aided Design, 6/1995, 487–501.
- [34] Brajlilić T., Tasić T., Drstvensek I., Valentan B., Hadzisteć M., Pogacar V., Balic J., Acko B., *Possibilities of using three-dimensional optical scanning in complex geometrical inspection*, Strojniški Vestnik, Journal of Mechanical Engineering, 11/2011, 826–833.
- [35] Breckon T.P., Fisher R.B., *Non-parametric 3D Surface Completion*, Proceedings of 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2005, 573–580.
- [36] Brousseau E., Dimov S., Setchi R., *Knowledge acquisition techniques for feature recognition in CAD models*, Journal of Intelligent Manufacturing, 1/2008, 21–32.
- [37] Budzik G., Oleksy M., Grzelka M., Wiczerowski M., Magniszewski M., Słota J., *The application of optical measurements for the determination of accuracy of gear wheels casts manufactured in the RT/TP process*, Archives of Foundry Engineering, 10/2010, 395–398.
- [38] Canny J., *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6/1986, 679–698.

- [39] Capture Geometry Internally, <http://www.cgiinspection.com>, dostęp: czerwiec 2012.
- [40] Carlsson E., Carlsson G., de Silva V., *An Algebraic Topological Method for Feature Identification*, International Journal of Computational Geometry & Applications, 4/2006, 291–314.
- [41] Centre for Evidence-based Purchasing NHS, *Advanced CT scanners for coronary angiography*, <http://nhscep.useconnect.co.uk/ShowDocument.aspx?id=586&i=true>, dostęp: marzec 2012.
- [42] Chang K., Chen C., *3D shape engineering and design parameterization*, Computer-Aided Design and Applications, 5/2011, 681–692.
- [43] Chang K., *A Review on Shape Engineering and Design Parameterization in Reverse Engineering*, [w:] A.C. Telea (red.), *Reverse Engineering – Recent Advances and Applications*, Rijeka, Croatia, 2012, 161–186.
- [44] Chikofsky E.J., Cross J.H. II, *Reverse Engineering and Design Recovery – A Taxonomy*, IEEE Software, 1990.
- [45] Chlebus E., Będziński R., Lewandowska M., Dybała B., Ściagała K., Świąszkowski W., Kuźnicka B., Boratyński T., Filipiak J., Kurzynowski T., Andrzejczuk M., Będza T., Brynk T., Bucki J., Ciesielski M., Ciupiński Ł., Dąbrowski B., Dziecielska-Kosmyk A., Frankiewicz M., Garbicz H., Garbicz G., Gąbka M., Gonera K., Heljak M., Kolinka P., Kukła D., Kurzac J., Lipowicz A., Madeja M., Manaj W., Matysiak H., Michalski J., Mroczkowski L., Paradowski K., Pilarska B., Płociński T., Rocznik P., Roźniatowski K., Rusińska M., Sidorowicz M., Spychalski M., Spychalski W., Wejrzanowski T., Wieciński P., Zagórski A., *Nowe materiały i technologie w inżynierii biomedycznej, w tym dla wytwarzania implantów zindywidualizowanych: sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego rozwojowego nr R13 016 02*, Politechnika Wrocławska [materiał niepublikowany], 2009.
- [46] Chlebus E., Boratyński T., Dybała B., *Modele geometryczne CAD w projektowaniu i zintegrowanym rozwoju produktu*, Mechanik, 8–9/2003, 529–533.
- [47] Chlebus E., Ocoś K.E., Dybała B., Boratyński T., *Nowoczesne technologie w rozwoju wyrobu*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje Nr 78, Wrocław 2000, 79–106.
- [48] Chlebus E., Urbanik A., Zapala J., Dybała B., Kuźnicka B., Boratyński T., Frankiewicz M., Kolinka P., Czajka J., Krot K., Chrzan R., Witkowski R., Rusiński E., Barnaś G., Bolewicz P., Wąsowicz W., Będza T., Lipowicz A., Cholewa M., *Opracowanie metod integracji modeli CAD i CT z technikami Reverse Engineering, Rapid Prototyping i Rapid Tooling dla zastosowań medycznych – sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego 5 T07C 060 23*, Politechnika Wrocławska [materiał niepublikowany], 2007.
- [49] Chlebus E., Ziółkowski G., Dybała B., *Zastosowanie przemysłowej tomografii komputerowej w analizie złoża*, Mechanik, 5–6/2013, 422–426.
- [50] Chlebus E., *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [51] Chomicz M., *Zastosowania technologii Rapid Prototyping i Rapid Tooling w wytwarzaniu anatomicznych fantomów szkoleniowych*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2008.
- [52] Chow J.C., Lichti D.D., Te W.F., *Accuracy assessment of the FARO Focus 3D and Leica HDS6100 panoramic-type terrestrial laser scanners through point-based and plane-based user self-calibration*, FIG Working Week 2012: Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 6–10 May 2012.
- [53] Ciągła M., *Zastosowanie technik Rapid Tooling/Rapid Prototyping w medycynie – implanty metalowe*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2004.
- [54] Cierniak R., *Tomografia komputerowa: Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne*, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2005.
- [55] Cuccuru G., Gobbetti E., Marton F., Pajarola R., Pintus R., *Fast low-memory streaming MLS reconstruction of point-sampled surfaces*, Proceedings – Graphics Interface Conference, 25–27 May, Kelowna, British Columbia, Canada, 2009.

- [56] Curtis S., Stephen P., Mattson C., *A generic formulaic characterization of the time to reverse engineer the tolerances of a product*, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2009, Lake Buena Vista, Florida, USA, 13–19 November 2009, 2010.
- [57] Czernuszewicz A., *Opracowanie i walidacja metody pomiarów 3D przy pomocy ramienia pomiarowego*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [58] Delaunay B., *Sur la sphère vide: A la me moire de Georges Voronoi*, Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et na 1934, 793–800.
- [59] Dey T.K., Giesen J., *Detecting undersampling in surface reconstruction*, Proceedings of the Annual Symposium on Computational Geometry, 2001.
- [60] Dey T.K., Goswami S., *Tight Cocone: A Water-tight Surface Reconstructor*, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 4/2003, 302–307.
- [61] Digibotics, <http://www.digibotics.com>, dostęp: 2005.
- [62] Drake P (ed.), *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, McGraw-Hill Professional, 1999.
- [63] Drygała Ł., *Zastosowanie Technik Rapid Prototyping i Rapid Tooling w medycynie – implanty ceramiczne*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2004.
- [64] Dudziak M., Humienny Z., Kołodziej A., *Znaczenie specyfikacji geometrii wyrobów w procesie konstruowania i wytwarzania części maszyn*, Mechanik, 5–6/2010, 356.
- [65] Durupt A., Remy S., Ducellier G., Eynard B., *From a 3D point cloud to an engineering CAD model: a knowledge-product-based approach for Reverse Engineering*, Virtual and Physical Prototyping, 2/2008, 51–59.
- [66] Dybała B., *Inżynieria Odwrotna*, Notatki do wykładu *Technologie Rozwoju Produktu* (materiał niepublikowany), 2012.
- [67] Dybała B., Będzia T., Ziółkowski G., *Techniczna tomografia komputerowa w metrologii wielkości geometrycznych i kontroli jakości*, Mechanik, 7/2013, 526–529.
- [68] Dybała B., Dźwiałek M., Będzia T., Jankowski J., *Wirtualny model systemu wytwórczego do analizy stref zagrożenia i wspomagania doboru systemów ochronnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, 1/2011.
- [69] Dybała B., Kolinka P., *Geometrical reconstruction of 3D models with Reverse Engineering technologies*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje, 2004, nr 85, 99–106.
- [70] Dźwilewska M., *Zastosowanie przemysłowej tomografii komputerowej w metrologii*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [71] Edelsbrunner H., Mücke E.P., *Three-dimensional alpha shapes*, ACM Transactions on Graphics, 1/1994, 43–72.
- [72] Eos Systems, *Photomodeler*, <http://www.photomodeler.com>, dostęp: listopad 2012.
- [73] European cooperation for Accreditation (EA), *EA-4/02 – Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*, 1999.
- [74] Faro, <http://www.faro.com>, dostęp: październik 2011.
- [75] Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [76] Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W., *Practical cone-beam algorithm*, Journal Optical Society of America, A 6/1984, 612–619.
- [77] Ferraz E.G., Andrade L.C.S., Santos A.R.D., Torregrossa V.R., Freire M.D.R.S., Sarmiento V.A., *Effect of different surface processing protocols in three-dimensional images for rapid prototyping*, Advances in Engineering Software, 6/2011, 332–335.
- [78] Frankiewicz M., Będzia T., Dybała B., Boratyński T., *Ocena czynników technologicznych w zintegrowanym rozwoju produktu*, Górnictwo Odkrywkowe, 3/2010, 135–138.

- [79] Gamage R.E., Joshi A., Zheng J.Y., Tuceryan M., *A high resolution 3D tire and footprint impression acquisition for forensics applications*, Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2013.
- [80] Gazeta Wyborcza, *Obronił Wrocław, teraz ma swoje święto*, http://wroclaw.gazeta.pl/wroclaw/56,35751,12160529,Obronił_Wrocław_teraz_ma_swoje_swieto.html, dostęp: lipiec 2012.
- [81] Gendarz P., *Parametryczny zapis uporządkowanych rodzin konstrukcji maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
- [82] Geomagic, <http://www.geomagic.com>, dostęp: wrzesień 2012.
- [83] Germani M., Mandorli F., Mengoni M., Raffaelli R., *CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control*, Precision Engineering, 2010, nr 34, 7–15.
- [84] Gesellschaft für Optische Messtechnik (GOM), <http://www.gom.com>, dostęp: maj 2011.
- [85] Gessner A., Staniek R., *Evaluation of accuracy and reproducibility of the optical measuring system in cast machine tool body assessment*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 1/2012, 65–72.
- [86] Goo J., Tongdee T., Tongdee R., Yeo K., Hildebolt C., Bae K., *Volumetric measurement of synthetic lung nodules with multi-detector row CT: Effect of various image reconstruction parameters and segmentation thresholds on measurement accuracy*, Radiology, 3/2005, 850–856.
- [87] Główny Urząd Miar, *Wyrażanie niepewności pomiaru: Przewodnik*, Warszawa, 1999.
- [88] Grimm T., *3D Scanners: Selection Criteria for Common Applications*, <http://www.tagrimm.com>, dostęp: maj 2010.
- [89] Groesel M., Gfoehler M., Peham C., *Alternative solution of virtual biomodeling based on CT-scans*, Journal of Biomechanics, 12/2009, 2006–2009.
- [90] Grün A., *Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique*, South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 3/1985, 175–187.
- [91] Grzelka M., Chajda J., Budzik G., Gessner A., Wieczorowski M., Staniek R., Gapiński B., Koteras R., Krasicki P., Marciniak L., *Optical coordinate scanners applied for the inspection of large scale housings produced in foundry technology*, Archives of Foundry Engineering, 10/2010, 255–60.
- [92] Guarneri A., Remondino F., Vettore A., *Digital Photogrammetry and TLS Data Fusion Applied to Cultural Heritage 3D Modeling*, Proceedings of ISPRS Communication V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”, 2006.
- [93] Guidi G., Beraldin J., Ciofi S., Atzeni C., *Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 4/2003, 667–676.
- [94] Hankiewicz S., *Zastosowanie technologii prototypowania wirtualnego i fizycznego w wytwarzaniu obiektów szkoleniowych w medycynie*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2006.
- [95] Hayasi M.T., Asiabanpour B., *Extraction of manufacturing information from design-by-feature solid model through feature recognition*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 11–12/2009, 1191–1203.
- [96] Heritage3D.org, *3D Laser Scanning for Heritage* (2nd ed.), English Heritage Publishing, 2011.
- [97] Hexagon, *3Dreshaper*, <http://www.3dreshaper.com>, dostęp: styczeń 2013.
- [98] Hiller J., *Evaluation strategies in CT scanning – A case study*, CT Conference, 12th June 2012, DTU, 2012.
- [99] Hounsfield G.N., *Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system*, British Journal of Radiology, 1973, Vol. 46, 1016–1022.
- [100] Humienny Z. (red.), *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS): Podręcznik europejski*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [101] Humienny Z., *Tolerancje geometryczne – jak mierzyć zgodnie z nowymi normami ISO*, Pomiar, Automatyka, Kontrola, 9bis/2007, 497–498.

- [102] Hylewski D., *Inżynieria odwrotna z wykorzystaniem zaawansowanych technik wytwarzania*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013.
- [103] Ibrahim D., Broilo T.L., Heitz C., de Oliveira M.G., de Oliveira H.W., Nobre S.M.W., dos Santos Filho J.H.G., Silva, D.N., *Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet models in the reproduction of mandibular anatomy*, Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 3/2009, 167–173.
- [104] Inus Technology, *Rapidform*, <http://www.rapidform.com>, dostęp: wrzesień 2012
- [105] Innovmetric, *Polyworks*, <http://www.innovmetric.com>, dostęp: grudzień 2012.
- [106] ISO/IEC 646:1991 – *Information technology – ISO 7-bit coded character set for information interchange*, International Organization for Standardization, Geneva, 1991.
- [107] ISO/IEC 14772 – *Information technology – Computer graphics and image processing – The Virtual Reality Modeling Language (VRML)*, International Organization for Standardization, Geneva, 2004.
- [108] ISO/IEC 15444 – *Information technology – JPEG 2000 image coding system*, International Organization for Standardization, Geneva, 2005
- [109] ISO/IEC 19775-19777 – *Information technology – Computer graphics and image processing – Extensible 3D (X3D)*, International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- [110] ISO 10303, *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange*, International Organization for Standardization, Geneva.
- [111] Ishikawa K., *Guide to quality control*, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1976.
- [112] Iuliano L., Minetola P., Salmi A., *Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers*, Measurement Science and Technology, 10/2010.
- [113] Jakobsson M., *Huffman coding in bit-vector compression*, Information Processing Letters, 6/1978, 304–307.
- [114] Janik W., *Metoda recyrkulacji środków technicznych z uwzględnieniem inżynierii odwrotnej*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2012.
- [115] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*, 2008.
- [116] Joint Photographic Expert Group, <http://www.jpeg.org>, dostęp: lipiec 2012.
- [117] Kabała K., *Fotorealistyczna prezentacja modelu produktu w oparciu o dane z procesu skanowania 3D*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [118] Kacalak W., *Granice dokładności obróbki*, Mechanik, 7/2005, 585–587.
- [119] Kachel S., Kozakiewicz A., *Zastosowanie inżynierii odwrotnej do modelowania wlotu silnika samolotu wielozadaniowego na potrzeby badań przepływowych*, Biuletyn WAT 2/2012, 311–30.
- [120] Kaisarlis G.J., Diplaris S., Sfantsikopoulos M., *Geometrical position tolerance assignment in Reverse Engineering*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1/2008, 89–96.
- [121] Kaisarlis G.J., *A Systematic Approach for Geometrical and Dimensional Tolerancing in Reverse Engineering*, [w:] A.C. Telea (red.), *Reverse Engineering – Recent Advances and Applications*, Rijeka, Croatia, 2012, 133–160.
- [122] Kalender W., *X-ray computed tomography*, Physics in Medicine and Biology, 13/2006, R29–R43.
- [123] Karbowski K., *Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania*, Monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008.
- [124] Kawashima K., Kanai S., Date H., *Automatic recognition of a piping system from large-scale terrestrial laser scan data*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, ISPRS Calgary Workshop, 29–31 August, Calgary, Canada, 2011, 283–288.
- [125] Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H., *Poisson Surface Reconstruction*, The Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006.

- [126] Kiekens K., Tan Y., Welkenhuyzen F., Kruth J-P, Dewulf W., *Uncertainty Determination for Dimensional Measurements with Computed Tomography*, Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, 19–21 September 2012.
- [127] Kim K., Kim B., Mantiuk R., Richter T., Lee H., Kang H., Seo J., Lee K.H., *A comparison of three image fidelity metrics of different computational principles for JPEG2000 compressed abdomen CT images*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 8/2010, 1496–1503.
- [128] Koch S., *Automated 4 Axis Adaptive Scanning With the Digibotics Laser Digitizer*, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 9–11, 1993, 150–157.
- [129] Konica Minolta, <http://www.konicaminolta.com>, dostęp: listopad 2012.
- [130] Kościuk J., *Modern 3D scanning in modelling, documentation and conservation of architectural heritage*, Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation, 32/2012, 82–88.
- [131] Kotze H.C., Kuhn G.J., *An evaluation of the Lempel-Ziv-Welch data compression algorithm*, COMSIG 1989: Proceedings of Southern African Conference on Communications and Signal Processing, Stellenbosch, South Africa, 23 June 1989, 65–69.
- [132] Kowal J., Sioma A., *Model 3D – kontrola jakości narzędzia i produktu*, XVII Konferencja Metody i środki projektowania wspomagane komputerowo, 7–9 października 2009, Krasiechyn, Mechanik, 1S/2010, 110–117.
- [133] Kowal J., Sioma A., *Surface defects detection using a 3D vision system*, Proceedings of the 2012 13th International Carpathian Control Conference ICCS, 2012, 382–387.
- [134] Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., de Chiffre L., Weckenmann A., *Computed tomography for dimensional metrology*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2/2011, 821–842.
- [135] Kubka M., *Reengineering układu napędowego motocykla Honda CBR 1000F przy pomocy inżynierii odwrotnej i szybkiego prototypowania*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2011.
- [136] Kujawińska M., Malesa M., Malowany K., Piekarczyk A., Tyminska-Widmer L., Targowski P., *Digital image correlation method: A versatile tool for engineering and art structures investigations*, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 8011, 2011.
- [137] Kumor P., *Praktyczne zastosowania technologii RP i RT w wytwarzaniu fantomów badawczych i szkoleniowych w medycynie*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2005.
- [138] Laboratorium Reverse Engineering, <http://www.lre.pwr.wroc.pl>, dostęp: sierpień 2013
- [139] Leica, <http://www.leica-geosystems.pl>, dostęp: kwiecień 2011.
- [140] Lethaus B., Poort ter Laak M., Laeven P., Beerens M., Koper D., Poukens J., Kessler P., *A treatment algorithm for patients with large skull bone defects and first results*, Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 6/2011, 435–440.
- [141] Lettenbauer H., Georgi B., Weiss D., *Verification of the Accuracy of CT Systems for Measuring Technology*, Carl Zeiss Innovation Special Metrology, 2008, Vol. 10, 24–27.
- [142] Li Y., Gu P., *Automatic Localization and Comparison for Free-Form Surface Inspection*, Journal of Manufacturing Systems, 4/2006, 251–268.
- [143] Lichti D.D., Jamtsho S., *Angular resolution of terrestrial laser scanners*, Photogrammetric Record, 21/2006, 141–60.
- [144] Lipowicz A., *Development of designing and fabrication methodology of biomedical models with generative technologies*, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 2008.
- [145] Lorensen W.E., Cline H.E., *Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm*, SIGGRAPH Computer Graphics, 4/1987, 163–169.
- [146] Loughborough University, *Restoring China's Forbidden City*, http://www.lboro.ac.uk/service/publicity/news-releases/2012/64_Forbiddn-city.html, dostęp: luty 2012.
- [147] Lv Y., Yi J., Liu Y., Zhao L., Zhang Y., Chen J., *Research on Reverse Engineering for plastic operation*, Proceedings – 2009 International Forum on Information Technology and Applications, IFITA, 2009, 389–391.

- [148] Łagocki M., *Projekt produktu zindywidualizowanego na przykładzie uchwytu korpusu aparatu fotograficznego*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [149] Madisetti V.K. (red.), *The Digital Signal Processing Handbook: Digital Signal Processing Fundamentals* (2nd edition), CRS Press / Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2010.
- [150] Maksymowicz K., Żołna M.M., Kościuk J., Dawidowicz B., *Dokumentowanie przebiegu i wyników eksperymentu procesowo-kryminalistycznego oraz możliwości przeprowadzenia wirtualnego eksperymentu procesowego przy zastosowaniu technik laserowego skanowania 3D*, Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii, 4/2010, 292–297.
- [151] Maniak K., *Zastosowanie fotogrametrii cyfrowej w rekonstrukcji modeli komputerowych systemów produkcyjnych*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2013.
- [152] Maravelakis E., David K., Antoniadis A., Manios A., Bilalis N., Papaharilaou Y., *Reverse Engineering techniques for cranioplasty: a case study*, Journal of Medical Engineering Technology, 2/2008, 115–121.
- [153] Markowski T., Markowska O., Miechowicz S., *Material density consideration on the possibility of engine parts imaging with computed tomography*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 15/2008, 311–318.
- [154] Martínez S., Cuesta E., Barreiro J., Álvarez B., *Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 5–8/2010, 621–629.
- [155] Materialise, <http://www.materialise.com>, dostęp: grudzień 2011.
- [156] Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M., *Recent trends in surface metrology*, Wear, 3–4/2011, 494–508.
- [157] Meshlab, <http://meshlab.sourceforge.net>, dostęp: listopad 2011.
- [158] Miceli A., Thierry R., Flisch A., Sennhauser U., Casali F., Simon M., *Monte Carlo simulations of a high-resolution X-ray CT system for industrial applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2–3/2007, 313–323.
- [159] Minddesk, *Qubicle Constructor*, <http://www.minddesk.com>, dostęp: luty 2013.
- [160] Minetola P., *The importance of a correct alignment in contactless inspection of additive manufactured parts*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2/2012, 211–218.
- [161] Müller P., Hiller J., Cantatore A., Bartscher M., de Chiffre L., *Investigation on the influence of image quality in X-ray CT metrology*, Conference on Industrial Computed Tomography (ICT), 19–21 September 2012, Wels, Austria 2012.
- [162] Murphy M., McGovern E., Pavia S., *Historic building information modelling (HBIM)*, Structural Survey, 4/2009, 311–327.
- [163] Natusiewicz M., *Rozwój produktu opartego na istniejącym, przestrzennym projekcie artystycznym z wykorzystaniem narzędzi inżynierii odwrotnej*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [164] de Oliveira Santos Junior J., Vrubel A., Bellon O.R., Silva L., *3D reconstruction of cultural heritages: Challenges and advances on precise mesh integration*, Computer Vision and Image Understanding, 12/2012, 1195–1207.
- [165] Pack J., Noo F., Clackdoyle R., *Cone-beam reconstruction using the backprojection of locally filtered projections*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 1/2005, 70–85.
- [166] Peng T., *Algorithms and models for 3-D shape measurement using digital fringe projections*, Praca doktorska, University of Maryland, 2006.
- [167] Philips, Brilliance CT 64-channel scanner, http://www.healthcare.philips.com/us_en/products/ct/products/ct_brilliance_64_channel/index.wpd, dostęp: marzec 2013.
- [168] PN-EN 22768 – *Tolerancje ogólne*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1999.

- [169] PN-EN ISO 286-2:2010 – *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – System kodowania ISO dla tolerancji wymiarów liniowych – Część 2: Tablice klas tolerancji normalnych oraz odchyłek granicznych otworów i wałków*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010.
- [170] PN-EN ISO 10360 – *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM)*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2003.
- [171] PN-EN ISO 12052 – *Informatyka w ochronie zdrowia – Obrazowanie cyfrowe i przesyłanie obrazów w medycynie (DICOM), łącznie z przepływem zadań i zarządzaniem danymi*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2012.
- [172] PN-EN ISO 14253 – *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Kontrola wyrobów i sprzętu pomiarowego za pomocą pomiarów*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2011.
- [173] PN-EN ISO 15530 – *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM): Technika wyznaczania niepewności pomiaru*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2011.
- [174] PN-EN ISO/IEC 17025:2005 – *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2005.
- [175] Poniatowska M., *Model przestrzenny odchyłek geometrycznych powierzchni swobodnych wyznaczanych w pomiarach współrzędnościowych*, Przegląd Mechaniczny, 10/2011, 21–27.
- [176] Polo M., Felicísimo Á.M., Villanueva A.G., Martínez-del-Pozo J., *Estimating the Uncertainty of Terrestrial Laser Scanner Measurements*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 11/2012, 4804–4808.
- [177] Poullis C., *A Framework for Automatic Modeling from Pointcloud Data*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1/2007.
- [178] Przelaskowski A., *Falkowe Metody Kompresji Danych Obrazowych*, Monografia habilitacyjna, Politechnika Warszawska, 2002.
- [179] Qualup SAS, *Rhinophoto for Rhino*, <http://www.rhinophoto3d.com>, dostęp: styczeń 2013.
- [180] Ratajczyk E., *Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych*, Mechanik, 2–5/2011, 112–117, 226–231, 326–331, 474–479.
- [181] Ratajczyk E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [182] Reiner J., Stankiewicz M., *Eliminacja zniekształceń geometrycznych obrazu w metodzie triangulacji laserowej*, Pomiar, Automatyka, Kontrola 1/2010, s. 54–57.
- [183] Rekow Jr. M., *Method for Reverse Engineering*, Instrumentation in the Aerospace Industry, 1984, Vol. 30, 619–625.
- [184] Relvas C., Ramos A., Completo A., Simões J., *Accuracy control of complex surfaces in Reverse Engineering*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 6/2011, 1035–1042.
- [185] Remondino F., Girardi S., Gonzo L., Rizzi A., *Multi-resolution modeling of complex and detailed Cultural Heritage*, The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 2008.
- [186] Remondino F., *Detailed image-based 3D geometric reconstruction of heritage objects*, DGPF Tagungsband. Trination Conference of SGPMF, DGPF 2007.
- [187] Rengier F., Mehndiratta A., Tengg-Kobligk H., Zechmann C.M., Unterhinninghofen R., Kauczor H., Giesel F.L., *3D printing based on imaging data: review of medical applications*, International Journal of Computer Assisted Radiology, 4/2010, 335–341.
- [188] Riviere C., Gangloff J., de Mathelin M., *Robotic compensation of biological motion to enhance surgical accuracy*, Proceedings of the IEEE, 9/2006, 1705–1715.
- [189] Rodeghero D.R., *Digitizing legacy mechanical components for Reverse Engineering*, Praca magisterska, Bradley University, Peoria, Illinois, USA, 2006.

- [190] Rysiński J., Wróbel I., *Oszacowanie rozmiaru pittingu w przekładni zębatej przy wykorzystaniu skanera 3D*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 12/2008, 851–853.
- [191] Salomon D., *Curves and surfaces for computer graphics*, Springer, New York, 2006.
- [192] Salvi J., Fernandez S., Pribanic T., Llado X., *A state of the art in structured light patterns for surface profilometry*, Pattern Recognition, 8/2010, 2666–2680.
- [193] San José Alonso J.I., Martínez Rubio J., Fernández Martín J.J., García Fernández J., *Comparing Time-of-Flight and Phase-shift. The Survey of the Royal Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León)*, International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-5/W16, 2011, 377–385.
- [194] Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F., *State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry*, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation, Sensors, 1/2009, 568–601.
- [195] Savio E., de Chiffre L., Schmitt R., *Metrology of freeform shaped parts*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2/2007, 810–835.
- [196] Schindler K., Bauer J., *A model-based method for building reconstruction*, Proceedings of IEEE Workshop on Higher-Level Knowledge in 3D Modelling and Motion in Conjunction with 9th International Conference on Computer Vision, 2003, 74–82.
- [197] Schmitt R., Isenberg C., Niggemann C., *Knowledge-Based System to improve dimensional CT Measurements*, Conference on Industrial Computed Tomography (ICT), 19–21 September 2012, Wels, Austria 2012.
- [198] Schmitt R., Niggemann C., *Uncertainty in measurement for x-ray-computed tomography using calibrated work pieces*, Measurement Science Technology, 5/2010.
- [199] Schmitt R., Pollmanns S., Nau M., *Accuracy Study of medical CT Systems for Image-Guided Surgery according to VDI/VDE GMA 2630 Guideline*, Conference on Industrial Computed Tomography (ICT), 19–21 September 2012, Wels, Austria 2012.
- [200] Scott Page Design, *3D Laser Scanning Projects*, <http://www.scottpagedesign.com/3d-laser-scanning-projects>, dostęp: styczeń 2013
- [201] Senin N., Colosimo B., Pacella M., *Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1/2013, 39–52.
- [202] Shahbazian M., Jacobs R., Wyatt J., Willems G., Pattijn V., Dhoore E., van Lierde C., Vinckier F., *Accuracy and surgical feasibility of a CBCT-based stereolithographic surgical guide aiding auto-transplantation of teeth: In vitro validation*, Journal of Oral Rehabilitation, 11/2010, 854–849.
- [203] Shannon C.E., *Communication in the presence of noise*, Proceedings of the I.R.E., 1/1949, 10–21.
- [204] Sidzina M., Wróbel I., *Wykorzystanie robota przemysłowego do precyzyjnego skanowania tłoczników*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 3/2010, 272–274.
- [205] Sitnik R., Karaszewski M., Załuski W., Bolewicki P., *Automated full-3D shape measurement of cultural heritage objects*, O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II, Proceedings of SPIE, Vol. 7391, 2009, K-1–K-10.
- [206] Sitnik R., Karaszewski M., Załuski W., Bunsch E., *3DMADMAC|AUTOMATED: synergistic hardware and software solution for automated 3D digitization of cultural heritage objects*, Proceeding of XXIII CIPA Symposium, Prague, Czech Republic 2011.
- [207] Skoczypiec S., Karbowski K., Ruszaj A., *Zastosowanie metod inżynierii rekonstrukcyjnej do wytwarzania elektrod do obróbki elektrochemicznej*, Mechanik, 2/2009, 132–133.
- [208] Śladek J., Błaszczuk P.M., Kupiec M., Sitnik R., *The hybrid contact-optical coordinate measuring system*, Measurement, 3/2011, 503–510.
- [209] Śladek J., Kowalski M., Ryniewicz A., Gacek K., *Charakteryzacja porównawcza współrzędnościowej techniki pomiarowej i tomografii komputerowej*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 8/2010, 942–945.

- [210] Śladek J., Ostrowska K., Gąska A., *Wirtualne Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe (WWRP)*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1/2010, 75–77.
- [211] Śladek J., *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [212] Śladek J., Sitnik R., Kupiec M., Błaszczuk P., *The Hybrid Coordinate Measurement System as a Response to Industrial Requirements*, Metrology and Measurement Systems, 1/2010, 109–118.
- [213] Solidworks, <http://www.solidworks.com>, dostęp: sierpień 2010.
- [214] Spring A.P., Peters C., Minns T., *Using Mid-Range Laser Scanners to Digitize Cultural-Heritage Sites*, IEEE Computer Graphics and Applications, 2010.
- [215] Stark R., Grosser H., Müller P., *Product analysis automation for digital MRO based on intelligent 3D data acquisition*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2013.
- [216] Stróżyk P., Nowak R., *Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy stabilności zespołów stosowanych przy strzałkowej osteotomii gałęzi żuchwy*, Dent. Med. Probl., 2/2011, 157–164.
- [217] Sunil V., Pande S., *Automatic recognition of features from freeform surface CAD models*, Computer-Aided Design, 4/2008, 502–517.
- [218] Sydor M., *Wprowadzenie do CAD: Podstawy komputerowo wspomaganego projektowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2009.
- [219] Ściagała K., Będziński R., Filipiak J., Chlebus E., Dybała B., *Application of generative technologies in the design of reduced stiffness stems of hip joint endoprosthesis*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 3/2011, 753–767.
- [220] Świętek-Najwer E., Majak M., Popek M., Pietruski P., Szram D., Jaworowski J., *The Maxillo-Facial Surgery System for Guided Cancer Resection and Bone Reconstruction*, 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2–4 July, 2013.
- [221] Thali M.J., Bolliger S.A., *Quality Aspects in Autopsy versus Virtopsy*, [w:] M.J. Bogusz (red.), *Quality Assurance in the Pathology Laboratory: Forensic, technical, and ethical aspects*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2011, 121–135.
- [222] Thali M.J., Dirnhofer R., Vock P (red.), *The virtopsy approach: 3D optical and radiological scanning and reconstruction in forensic medicine*, CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA, 2009.
- [223] Thompson W.B., Owen J.C., de St. Germain H.J., Stark Jr. S.R., Henderson T.C., *Feature-based Reverse Engineering of mechanical parts*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1/1999, 57–66.
- [224] Tomaszewska A., Żelazniewicz A., Boryślawski K., *Mumia na receptę*, Wiedza i Życie, 2/2012, 58–61.
- [225] Turbell H., *Cone-Beam Reconstruction Using Filtered Backprojection*, Praca doktorska, Linköping University, 2001.
- [226] Urbanic R.J., Kilani M., Hassoun A., *Targeted Reverse Engineering techniques for generating architectural solid models for additive manufacturing fabrication*, Computer-Aided Design and Applications, 4/2013, 585–602.
- [227] U.S. Product Data Association, IPO-100-1996 – Initial Graphics Exchange Specification (IGES), 1996.
- [228] Vaezi M., Soleymani M., *Quality control of quick response products by used of Reverse Engineering technologies*, Journal of Applied Sciences, 9/2009, 2424–2430.
- [229] Várady T., Facello M.A., Terék Z., *Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction*, Computer-Aided Design, 5/2007, 379–388.
- [230] Várady T., Martin R.R., Cox J., *Reverse Engineering of geometric models – an introduction*, Computer-Aided Design, 4/1997, 255–268.

- [231] VDI/VDE 2630 – *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik (Computed tomography in dimensional measurement)*, Verein Deutscher Ingenieure / Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Düsseldorf, 2009.
- [232] VDI/VDE 2634 – *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktformiger Antastung (Optical 3D measuring systems – Imaging systems with point-by-point probing)*, Verein Deutscher Ingenieure / Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Düsseldorf, 2002.
- [233] Venkataraman S., Sohoni M., Vinay K., *A graph-based framework for feature recognition*, Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications (SMA'01), 2001, 194–205.
- [234] VirtualGrid, VRMesh, <http://www.vrmesh.com>, dostęp: lipiec 2012.
- [235] Visualization Sciences Group, Amira, <http://www.amira.com>, dostęp: grudzień 2011.
- [236] Volume Graphics, VG Studio Max, <http://www.volumegraphics.com>, dostęp: czerwiec 2011.
- [237] Walczak W., *Fractal Compression of Medical Images*, Praca magisterska, Blekinge Institute of Technology, 2008.
- [238] Wang W., *Reverse Engineering. Technology of reinvention*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2011.
- [239] Weckenmann A., Jiang X., Sommer K., Neuschaefer-Rube U., Seewig J., Shaw L., Estler T., *Multi-sensor data fusion in dimensional metrology*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2/2009, 701–721.
- [240] Weckenmann A., Krämer P., Hoffmann J., *Manufacturing Metrology – State of the Art and Prospects*, 9th International Symposium on Measurement and Quality Control (9th ISMQC), November 21–24, IIT Madras 2007.
- [241] Werth Messtechnik GmbH, <http://www.werth.de>, dostęp: czerwiec 2012.
- [242] Widmann G., Stoffner R., Bale R.J., *Errors and error management in image-guided craniomaxillofacial surgery*, Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 5/2009, 701–15.
- [243] Wieczorowski M., Grzelka M., Budzik G., Augustyn-Pieniążek J., *The use of optical scanning for analysis of casting shape*, Archives of Foundry Engineering, 11/2011, 217–221.
- [244] Wieczorowski M., Ruciński M., Koterak R., *Application of optical scanning for measurements of castings and cores*, Archives of Foundry Engineering, 10/2010, 265–268.
- [245] Wikipedia, *BMP file format*, http://en.wikipedia.org/wiki/BMP_file_format, dostęp: luty 2012.
- [246] Wikipedia, *PLY (file format)*, [http://en.wikipedia.org/wiki/PLY_\(file_format\)](http://en.wikipedia.org/wiki/PLY_(file_format)), dostęp: luty 2012.
- [247] Wikipedia, *STL (file format)*, [http://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](http://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)), dostęp: luty 2012.
- [248] Wikipedia, *Tagged Image File Format*, http://en.wikipedia.org/wiki/Tagged_Image_File_Format, dostęp: luty 2012.
- [249] Wikipedia, *Wavefront .obj file*, http://en.wikipedia.org/wiki/Wavefront_.obj_file, dostęp: luty 2012.
- [250] Wnuczko M., *Opracowanie i validacja metody pomiarów 3D przy pomocy tomografu komputerowego*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2011.
- [251] Woźniak K., Rzepecka-Woźniak E., Moskała A., Pohl J., Latacz K., Dybała B., *Weapon identification using antemortem computed tomography with virtual 3D and rapid prototype modeling. A report in a case of blunt force head injury*, Forensic Science International, 1–3/2012, e29–e32.
- [252] Wróbel I., *Inżynieria rekonstrukcyjna łopatek turbin parowych stosowanych w energetyce*, Energetyka, 8/2012, 451–454.
- [253] Wyleżoł M., *Metodyka modelowania dla potrzeb inżynierii rekonstrukcyjnej*, Monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
- [254] Wyleżoł M., *Analiza jakości dopasowania polipowierzchni do powierzchni triangularnej*, Mechanik, 5–6/2013, 472–474.

-
- [255] Yang C., Medioni G., *Object modelling by registration of multiple range images*, Image and Vision Computing, 3/1992, 145–155.
- [256] Yang X., *Geometry of cone-beam reconstruction*, Praca doktorska, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [257] Zakład Inżynierii Biomedycznej i Mechaniki Eksperymentalnej, Politechnika Wrocławska, <http://www.biomech.pwr.wroc.pl>, dostęp: styczeń 2013.
- [258] Zhang L., Dugas-Phocion G., Samson J., Seitz S., *Single-view modelling of free-form scenes*, Journal of Visualization and Computer Animation, 4/2002, 225–35.
- [259] Zhang S.J., Raja V.H., Fernandes K.J., Ryall C., Wimpenny D., *Rapid prototyping models and their quality evaluation using Reverse Engineering*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, s. 217.
- [260] Zhang X., Wang J., Yamazaki K., Mori M., *A surface based approach to recognition of geometric features for quality freeform surface machining*, Computer-Aided Design, 8/2004, 735–744.
- [261] Zhang Z., *Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces*, International Journal of Computer Vision, 2/1994, 119–152.
- [262] Zhixue S., Guohai Z., *Study of the automobile modeling design on the basis of Reverse Engineering*, 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010.
- [263] Ziółkowski G., Dybała B., Chlebus E., *Analysis of material discontinuity and porosity by computed tomography*, International Conference "Production Engineering", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, 55–62.
- [264] Zitová B., Flusser J., *Image registration methods: a survey*, Image and Vision Computing, 11/2003, 977–1000.
- [265] Żak K., *Modernizacja wyrobów z wykorzystaniem metod inżynierii odwrotnej oraz szybkiego prototypowania*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2011.
- [266] Żelawski T., *Potencjalne zastosowania zasady wytwarzania produktów indywidualizowanych w wybranych gałęziach przemysłu*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2004.
- [267] Żuk P., Płatek P., *Zastosowanie inżynierii odwrotnej w wariantowaniu konstrukcji lemieszki mieszalnikowych*, Mechanik, 1/2011, 71.

Integration and traceability of Reverse Engineering models

Selected aspects of technical and medical applications of RE

The study presents selected aspects of industrial Reverse Engineering – investigations of physical objects leading to computer 3D models describing geometry of those objects. Industrial Reverse Engineering may be applied in examining not only technical subjects but also medical, artistic and others. RE investigations comprise two stages: capturing an object's shape (digitisation) and processing measurement data to a 3D model of required structure. The publication contains a review of technologies used in capturing 3D shapes, classified based on the measurement principle – from destructive, through optical, non-optical (including computed tomography) to multisensor methods. Covered are also successive levels of 3D geometric data structures, depending on their basic elements – from a point cloud, through a set of contours, a triangle mesh, a set of parametric surfaces, a voxel model, a solid model, to a fully functional CAD model – and three groups of 3D data processing operations: conversions between structure levels, processing within a structure and transfers with the use of geometric data exchange formats.

The main goal of the author was the development of a quality measure for Reverse Engineering processes, taking into account the trueness and sureness of 3D data. Proposed is a method of traceability assurance in Reverse Engineering, which should guarantee that results of RE investigations may be treated with a defined confidence, may be compared with other results of investigations of the same objects and may be repeated in other laboratories for verification. In the author's opinion this method is the first to approach the subject of RE data accuracy and integrity in a global manner, covering all stages of RE processing – from measuring to obtaining the final 3D model. The method expands the known concept of measurement uncertainty to include data processing steps. The resulting “combined RE uncertainty” indicates probable differences between the real shape of a measured object and its final 3D geometric representation. The new method uses known tools for evaluating measurement uncertainty and newly developed tools for evaluating uncertainty of data processing operations. Presented is also a concept of “uncertainty record” – a list of all operations on 3D data, not only those changing the shape and increasing the uncertainty but also those changing the data structure without affecting the shape. The complete record may be used to confirm the integrity of the final model and allows for repeating and comparing RE process chains.

The method presented was verified with examples, including investigations of a regularly shaped object (resulting in reconstruction of a feature-based and parametric CAD model), irregularly shaped object (measured with an optical technology) and an object with non-homogeneous internal structure (captured with a technical X-ray computed tomography). Evaluated RE uncertainty clearly indicates the predominant influence of data processing operations – the combined uncertainty was larger than the

measurement uncertainty by percentage of tens and hundreds. This validates the necessity of calculating and recording data uncertainty in all Reverse Engineering processes.

The study also suggests possible directions for continuing research on data traceability and integrity in Reverse Engineering, including, for example, investigations of objects with non-homogeneous internal structure.

Monografia dotyczy przemysłowej inżynierii odwrotnej – dziedziny badań obiektów fizycznych, których celem jest tworzenie lub odtwarzanie ich geometrycznych modeli komputerowych. Jakość takiego badania zależy zarówno od dokładności pomiaru za pomocą odpowiedniego skanera 3D, jak i od odchylek wnoszonych przez operacje na danych 3D – przekształcenia różnych struktur danych (chmury punktów, siatki trójkątów czy modelu wokselowego), konwersje między strukturami oraz transfery danych. Autor wprowadza metodykę zapewnienia spójności badań w inżynierii odwrotnej oraz narzędzia do szacowania ich niepewności.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni,
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-796-2