

Dr hab. inż. Marek WYLEŻOŁ
marek.wylezol@polsl.pl
Politechnika Śląska

Mgr inż. Małgorzata MUZALEWSKA
malgorzata.muzalewska@polsl.pl
Politechnika Śląska

METODYKA MODELOWANIA W INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ Z UŻYCIEM INŻYNIERII REKONSTRUKCYJNEJ

Streszczenie: Artykuł dotyczy omówienia metodyki modelowania w inżynierii biomedycznej z zastosowaniem inżynierii rekonstrukcyjnej oraz różnych aspektów modelowania wirtualnego. Autorzy zwrócili szczególną uwagę na uporządkowanie terminologii i systemowe podejście w omówieniu proponowanej metodyki postępowania. Zamieszczono również wybrane przykłady zastosowań według proponowanej metodyki.

Słowa kluczowe: inżynieria rekonstrukcyjna (odwrotna), digitalizacja, obrazowanie medyczne, segmentacja, modelowanie wirtualne, rekonstrukcja.

MODELING METHODOLOGY IN BIOMEDICAL ENGINEERING WITH USE OF REVERSE ENGINEERING

Summary: The paper deals with discussion of modeling methodology in medical bioengineering with use of reverse engineering and various aspects of virtual modeling. The authors pointed a special attention to the arrangement of terminology and systematic approach in the discussion of the proposed methodology proceedings. The paper also contains some examples of applications of the proposed methodology.

Keywords: reverse engineering, digitization, medical imaging, segmentation, virtual modeling, reconstruction.

1. WPROWADZENIE

Wykonywanie modeli wirtualnych w ramach ogólnie rozumianej inżynierii biomedycznej jest obecnie jednym z podstawowych działań służących otrzymaniu np. dopasowanych implantów, protez czy innych obiektów współpracujących z ludzkim ciałem. Dlatego bardzo ważnym i ciągle rozwijanym w ośrodkach naukowych oraz przemysłowych zagadnieniem jest doskonalenie procesu modelowania wirtualnego.

Jedną z podstawowych ścieżek postępowania w inżynierii biomedycznej jest zastosowanie obrazowania medycznego oraz cyfrowej obróbki uzyskanych tym sposobem rezultatów np. tomogramów (pochodzących z tomografii komputerowej) do uzyskania modeli struktur ludzkiego ciała. Modele takie służą zwykle jako wirtualne obiekty będące odniesieniem do uzyskania modeli obiektów medycznych lub rehabilitacyjnych.

Sposób postępowania związany z użyciem obrazowania medycznego wpisuje się w ogólną metodykę postępowania według zasad inżynierii odwrotnej (rekonstrukcyjnej). Natomiast część zadań może być realizowana według postępowania zgodnego z inżynierią klasyczną.

Dlatego też autorzy wskazują na cechy obu sposobów postępowania, akcentując podobieństwa i różnice pomiędzy nimi oraz starając się przyjąć stosowną terminologię.

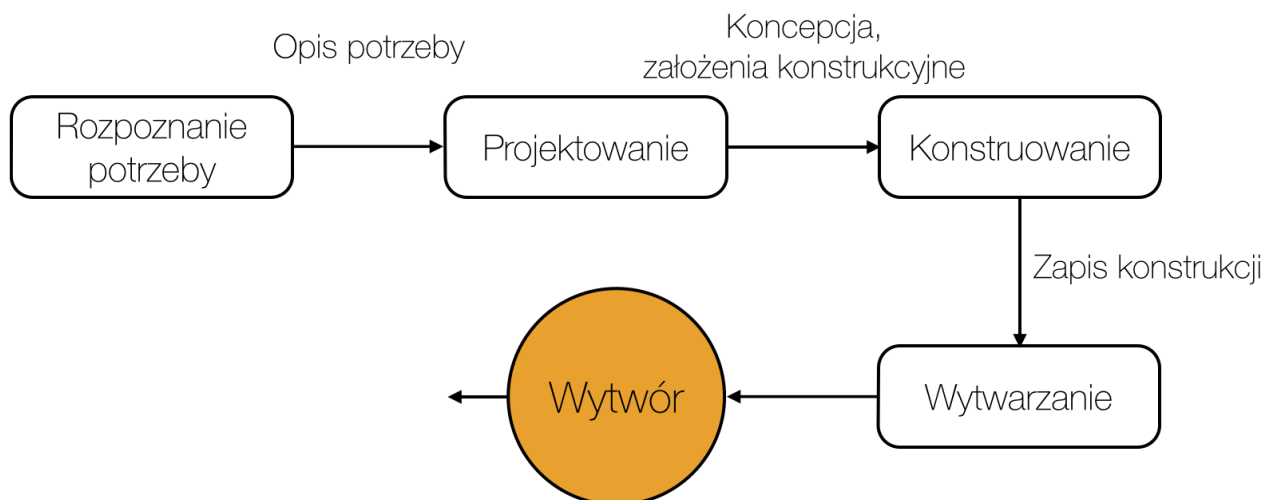
2. INŻYNIERIA REKONSTRUKCYJNA

Inżynieria rekonstrukcyjna (odwrotna, wsteczna [7]) współcześnie zaczyna odgrywać coraz to większą rolę w świecie techniki, ale również medycyny. Możliwości uzyskiwania cyfrowych kopii obiektów fizycznych (w tym również wyselekcjonowanych ludzkich tkanek) otwierają zupełnie nowe możliwości w zakresie modelowania wirtualnego. Przyjrzyjmy się więc jej głównym cechom, ale zaczynając od odniesienia do inżynierii klasycznej.

2.1 Inżynieria klasyczna

Cechą charakterystyczną postępowania według zasad inżynierii klasycznej jest m.in. wynikowa kolejność realizowanych działań (rys. 2.1). Rozpatrując proces od rozpoznania potrzeby do wytworzenia wytworu, można wyróżnić następującą sekwencję działań i ich celów [2]:

1. rozpoznanie potrzeby → opis potrzeby,
2. projektowanie → projekt (w tym koncepcje i założenia konstrukcyjne),
3. konstruowanie → konstrukcja (wraz z jej zapisem),
4. wytwarzanie → wytwór.



Rys. 2.1 Model działań realizowanych według zasad inżynierii klasycznej

Nieco inna sytuacja występuje w sposobie postępowania zwanym inżynierią rekonstrukcyjną (ang. *reverse engineering*) albo inżynierią odwrotną czy też wsteczną [7].

2.2 Inżynieria rekonstrukcyjna

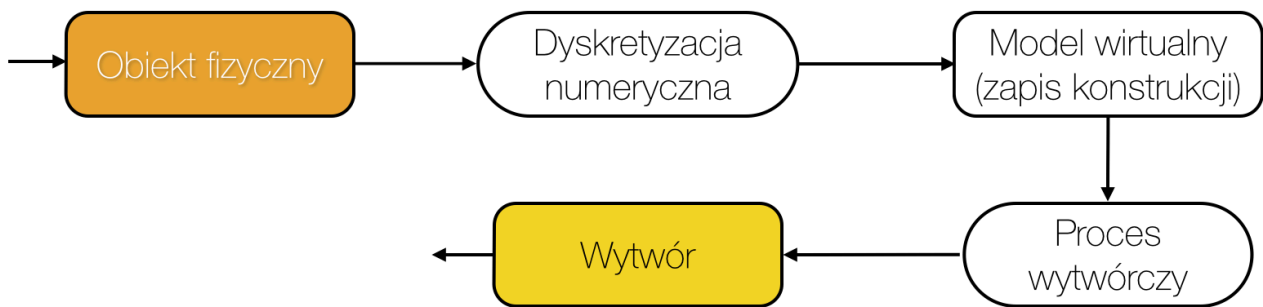
Jak wspomniano w podrozdz. 2.1, cechą charakterystyczną postępowania według zasad inżynierii klasycznej jest przekształcanie konstrukcji – powstałej w umyśle człowieka jako abstrakt – w konkret, którym jest wytwór fizyczny. Taki sposób postępowania uznawany jest współcześnie za klasyczny, wręcz zgodny z intuicją człowieka jako istoty twórczej.

A zatem powstaje pytanie: *Jeśli istnieje ustalony i sprawdzony sposób postępowania, prowadzący do powstania nowych wytworów, to czy jest potrzebny jakiś inny sposób postępowania?* [7]

Odpowiedź zrodziła się na gruncie pragmatyki, a jej podstawą była inaczej zidentyfikowana potrzeba. Najogólniej sformułowana potrzeba dotyczy wytworzenia nowego obiektu na podstawie obiektu już istniejącego. Nowego obiektu będącego kopią (w najbardziej możliwym lub ściśle określonym zakresie) albo też nowego

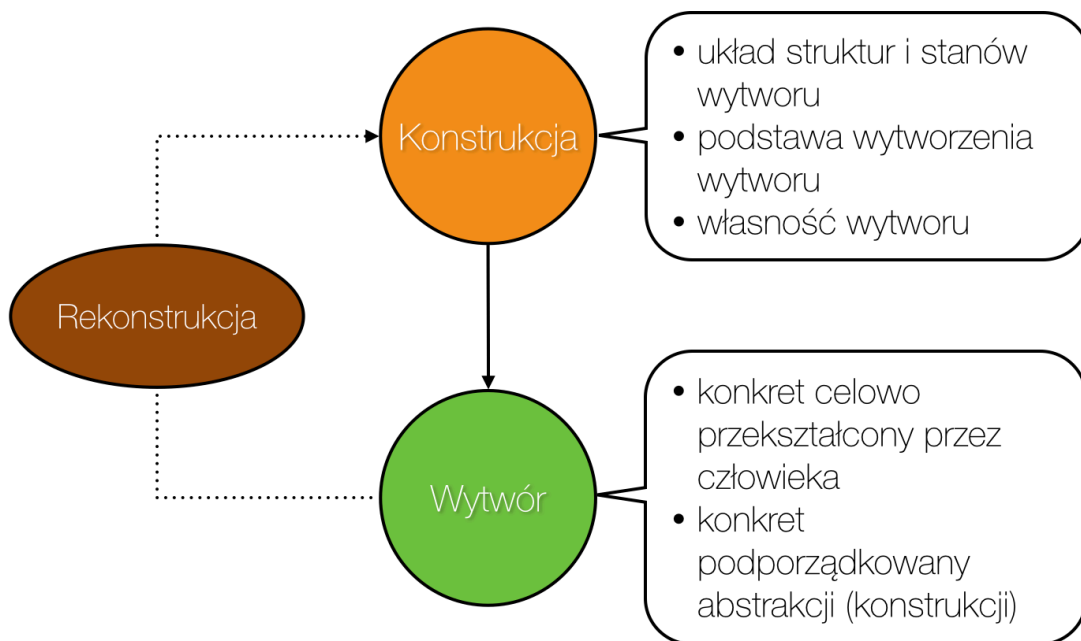
obiektu posiadającego z obiektem istniejącym pewne wspólne cechy postaciowe. Uszczegóławiając tak opisaną potrzebę, należy dodać, że obiekt „bazowy” wprawdzie istnieje, ale – z różnych powodów – nie istnieje zapis jego konstrukcji lub taki zapis nie może istnieć.

Cechą charakterystyczną postępowania według inżynierii rekonstrukcyjnej jest kolejność wykonywania działań zgodnie z rys. 2.2. W stosunku do inżynierii klasycznej główna różnica dotyczy tu początku procesu, a dokładnie nośnika informacji wejściowych. Głównym nośnikiem informacji, pozwalającym na rozpoczęcie procesu, jest postać obiektu fizycznego. Może to być nie tylko obiekt fizyczny rozumiany jako wytwór techniczny i nietechniczny, dzieło sztuki, fizyczny model wytworu itp., ale też np. ludzkie ciało (rozumiane nie tylko w kontekście postaci zewnętrznej, ale też jego struktur wewnętrznych).



Rys. 2.2 Model działań realizowanych według zasad inżynierii rekonstrukcyjnej

Tak więc najważniejszą cechą postępowania zgodnie z inżynierią rekonstrukcyjną jest przejście od obiektu fizycznego (np. wytworu) do uzyskania jego zapisu konstrukcji (w możliwym tego zakresie). Reprezentantem konstrukcji w takim wypadku będzie trójwymiarowy model wirtualny. Należy przy tym stosować rozumienie terminów *konstrukcja* oraz *wytwór* zgodnie z informacjami podanymi na rys. 2.3.



Rys. 2.3 Istota znaczenia rekonstrukcji

Takie rozumienie *konstrukcji* oraz *wytworu* powoduje pewną nieścisłość w kontekście używania terminu *rekonstrukcja* w stosunku do struktur anatomicznych (np. człowieka).

2.3 Odzworowanie w inżynierii biomedycznej

Jak wcześniej wspomniano, termin rekonstrukcja dotyczy działań na obiektach, którym przysługuje konstrukcja, jako ich własność. W kontekście struktur anatomicznych, które nie są ani wytworami, ani dziełami sztuki, ani innymi efektami celowego działania człowieka, stosowanie terminu rekonstrukcja jest w takim razie niewłaściwe.

Owszem, procedura postępowania dla uzyskania modelu wirtualnego danego fragmentu struktury anatomicznej (np. uzyskanie modelu wirtualnego wydzielonego fragmentu tkanki kostnej czy miękkiej) jest praktycznie identyczna z zasadami inżynierii rekonstrukcyjnej. Dla zaznaczenia jednak różnicy pomiędzy działaniami rekonstrukcyjnymi względem obiektów, którym konstrukcja przysługuje a obiektami, którym konstrukcja nie przysługuje – autorzy proponują używać terminu ogólniejszego: *odzworowanie* (rys. 2.4).



Rys. 2.4 Odzworowanie struktury anatomicznej za pomocą modelu wirtualnego

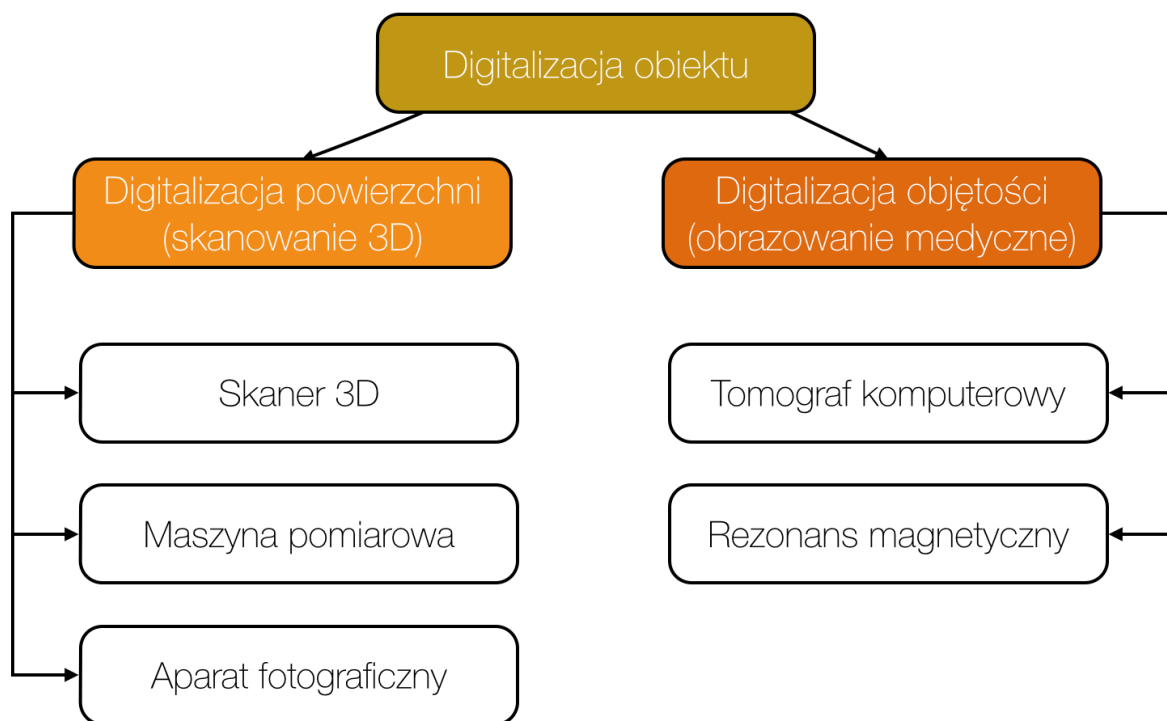
Niezależnie od nazwy procesu (rekonstrukcja - odzworowanie), pierwszym etapem działań jest zawsze digitalizacja obiektu wejściowego (dyskretyzacja numeryczna). Podstawą realizacji tego procesu jest posiadanie stosownych urządzeń pomiarowych; różnych w zależności od obiektów podlegających digitalizacji.

2.4 Digitalizacja obiektów w inżynierii technicznej i biomedycznej

Digitalizację obiektów można rozpatrywać przez pryzmat ich jawności (rozumianej jako dostępność od zewnątrz). Tak więc można rozróżnić obiekty jawne i niejawne [7]. Do digitalizacji obiektów jawnych stosowane są urządzenia pomiarowe, jak [1],[7]: skanery 3D, maszyny pomiarowe, aparaty fotograficzne itp. Digitalizacji podlega wtedy wyłącznie powierzchnia tych obiektów.

Nieco inna sytuacja występuje podczas digitalizacji obiektów niejawnych, np. struktur anatomicznych ciała człowieka (nieдоступnych do obserwacji i pomiarów technikami nieprzenikliwymi). Wtedy to digitalizacji podlega nie powierzchnia obiektów, ale ich cała objętość.

Proces pozyskiwania danych jest wtedy nawet podwójnie dyskretny. Objętość obiektu dzielona jest na oddzielne warstwy (w zależności od zastosowanej techniki, rys. 2.5). Jest to więc pierwsza dyskretyzacja. Każdy przekrój jest reprezentowany za pomocą grafiki rastrowej (w praktyce obrazy rastrowe zapisywane są w postaci standardu DICOM [6]), gdzie obraz jest kodowany za pomocą dyskretnych pikseli – to druga dyskretyzacja.



Rys. 2.5 Digitalizacja obiektów jawnych i niejawnych

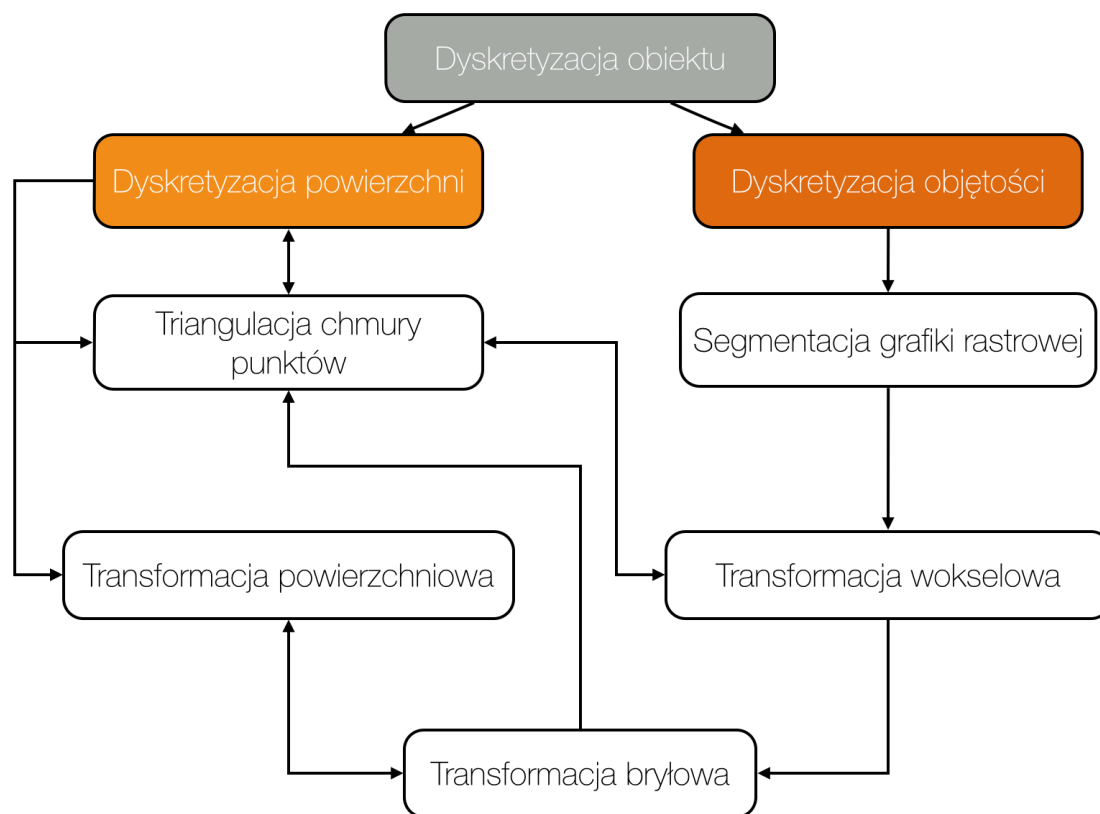
2.5 Transformacje modelu

Natywną formą digitalizacji powierzchni obiektów jest chmura punktów (zbiór punktów). Stanowi ona dyskretne i dość ubogie strukturalnie odwzorowanie powierzchni. Taka forma reprezentowania modelu jest mało przydatna do dalszych działań modelowych, szczególnie w kontekście użycia systemów klasy CAx. Dlatego też podlega kolejnym transformacjom, w zależności od celu wykonywania modelu 3D (rys. 2.6).

Natywną formą digitalizacji objętości jest grafika rastrowa, a właściwie zbiór takich grafik, reprezentowanych w formie standardu DICOM. Taka forma reprezentowania modelu jest zwykle przydatna wyłącznie w środowiskach specjalizowanych systemów obrazowania medycznego. Możliwa jest oczywiście transformacja w formę odpowiednią do zastosowania np. w systemach klasy CAx. Wymaga to jednak wykonania szeregu działań o charakterze transformacyjnym i edycyjnym (rys. 2.6).

Mając na uwadze np. działania o charakterze inżynierskim – niezależnie od sposobu otrzymania modelu (na podstawie digitalizacji powierzchni czy objętości) – najwłaściwszymi formami reprezentowania modeli 3D są: model bryłowe i powierzchniowy.

Osobną kategorię stanowią modele 3D reprezentowane w formie wokselowej. Ze względu na możliwości ich kształtowania bardzo dobrze nadają się do zastosowań nieco innych niż inżynierskie, np. do kształtowania modeli struktur anatomicznych (lub korekcji modeli tych struktur utworzonych za pomocą obrazowania medycznego) oraz obiektów, które powinny docelowo z nimi współpracować (np. implanty). Taka forma reprezentowania modeli niesie za sobą też pewne utrudnienia, np. brak możliwości bezpośredniej transformacji w formę modelu bryłowego.



Rys. 2.6 Transformacje podczas dyskretyzacji

3. METODYKA MODELOWANIA

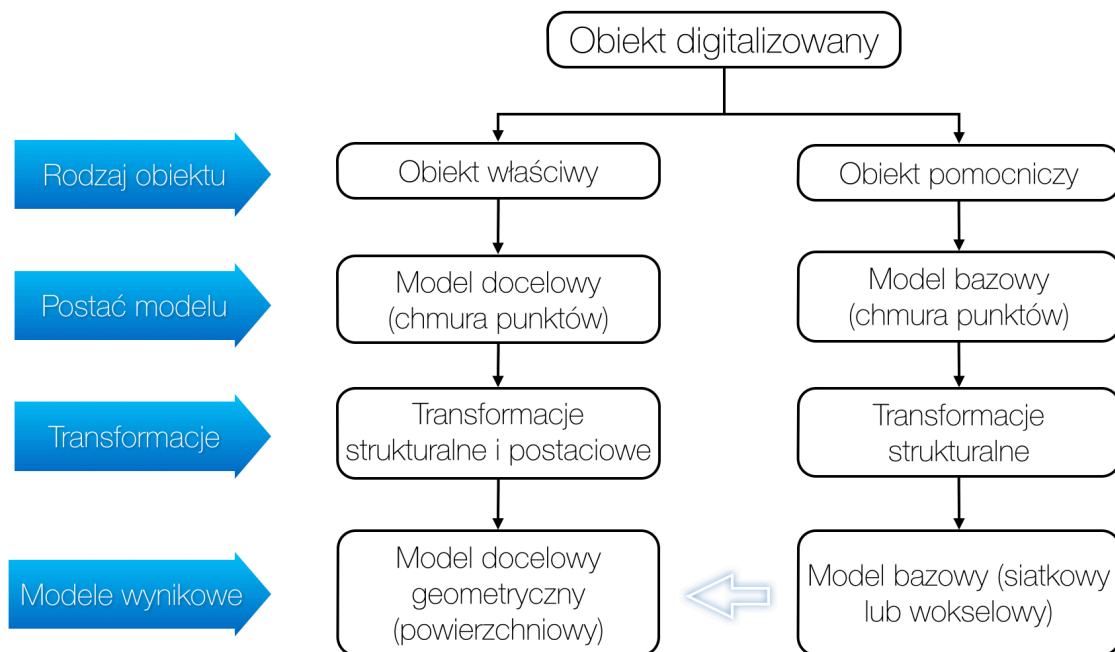
Założenia dotyczące metodyki modelowania:

- wszystkie etapy modelowania będą realizowane z użyciem komputerowego wspomaganie,
- musi zostać zapewniony dostęp do obiektów podlegających digitalizacji, w tym do osób,
- digitalizacji podlegać będą obiekty rzeczywiste albo ich pozytywowe i negatywowe kopie,
- proces modelowania będzie realizowany z użyciem trzech rodzajów systemów komputerowych:
 - o system digitalizacji (obiektów jawnych i niejawnych),
 - o system modelowania powierzchniowego i bryłowego,
 - o system modelowania wokselowego realizowanego haptycznie.

Według zaproponowanej metodyki postępowania [7] proces modelowania jest realizowany z użyciem tzw. obiektów właściwych i pomocniczych (rys. 3.1).

Obiekty właściwe, to te które podlegają digitalizacji, a docelowo służą do otrzymania docelowego modelu wirtualnego.

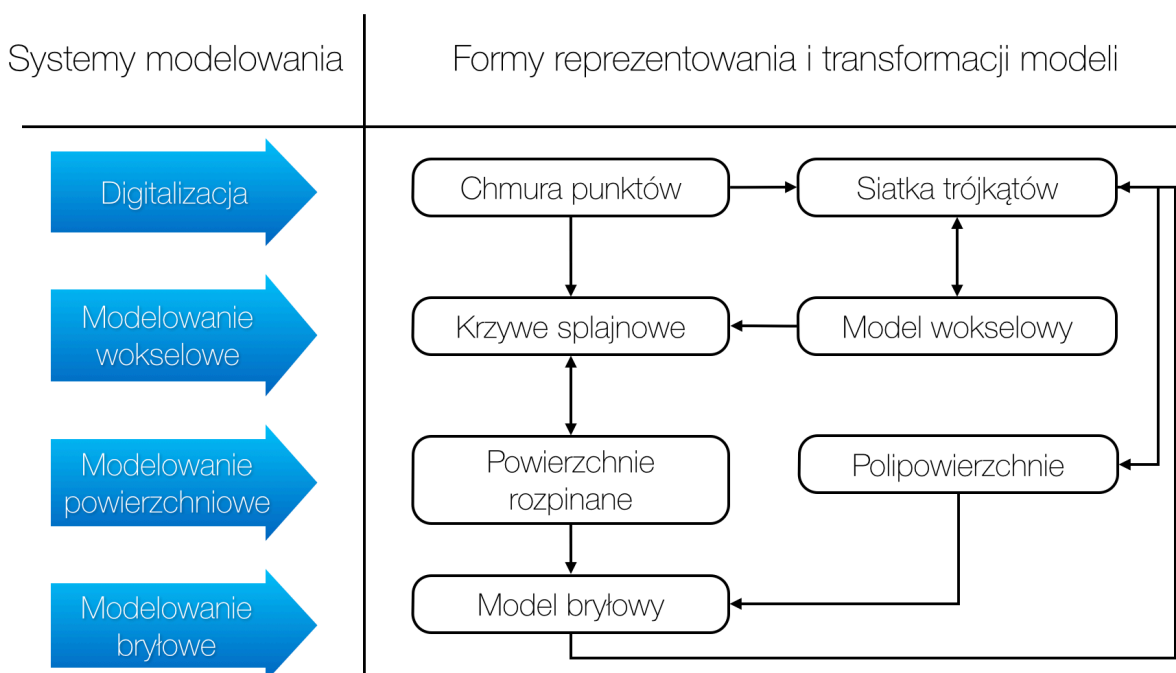
Obiekty pomocnicze to takie, których fragmenty podlegające digitalizacji służą zwykle do otrzymania modelu wirtualnego, będącego dopiero podstawą uzyskania modelu docelowego (przykładem może być uzyskanie modelu czaszki człowieka z ubytkiem kostnym, który jest podstawą zamodelowania dopasowanego implantu).



Rys. 3.1 Obiekty wejściowe i wyjściowe procesu digitalizacji

Jedną z konsekwencji przyjętych założeń proponowanej metodyki postępowania jest konieczność synergicznego stosowania wielu systemów modelowania wirtualnego, a co za tym idzie potrzeba stosowania wielu form reprezentowania modeli oraz wykonywania ich transformacji postaciowych oraz strukturalnych (rys. 3.2). Działania te muszą być wykonywane z dużą ostrożnością, gdyż możliwą konsekwencją takich transformacji jest utrata lub częściowa zmiana pożądanego postaci geometrycznej modelu.

Szczegóły przytoczonej metodyki postępowania zostały opisane w [7].



Rys. 3.2 Formy reprezentowania modeli w kontekście programów komputerowych

4. ZASTOSOWANIA

W dalszej części artykułu zostały skrótowo omówione wybrane przykłady zastosowań metod modelowania i odwzorowywania w inżynierii biomedycznej, zgodnie z przedstawioną metodyką postępowania.

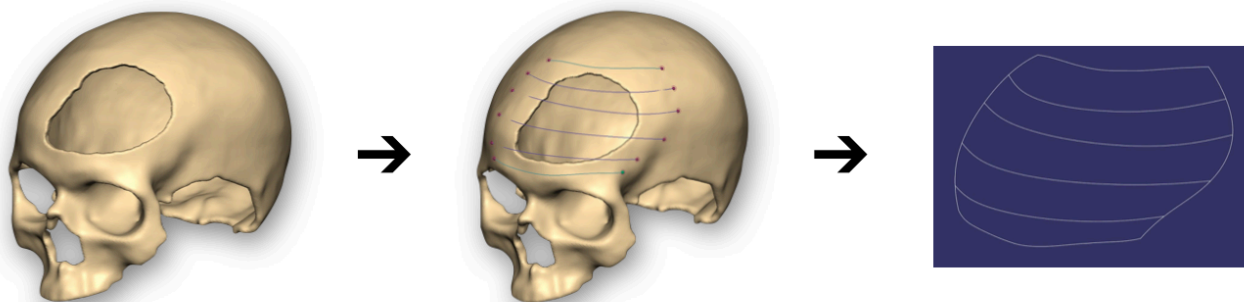
4.1. Modelowanie implantów czaszkowych

Realizacja metody miejscowych krzywych powierzchniowych [7] została podzielona na trzy główne etapy (poza uzyskaniem modelu triangularnego czaszki, będącego uogólnionym odwzorowaniem rzeczywistej czaszki):

1. uzyskanie splajnowych krzywych powierzchniowych na podstawie modelu wokselowego,
2. wykonanie nadmiarowego modelu implantu,
3. wykonanie dopasowanego modelu implantu.

Ad. 1

Podstawą uzyskania splajnowych krzywych powierzchniowych jest posiadanie modelu wokselowego czaszki z ubytkiem kostnym (rys. 4.1). Taka forma modelu umożliwia tworzenie krzywych splajnowych na powierzchni modelu, pod warunkiem korzystania z systemu modelowania haptycznego ClayTools [7]. Liczba i rozmieszczenie krzywych powierzchniowych zależy od postaci i wielkości otworu w czaszce oraz od indywidualnej oceny zastanej sytuacji przez osobę wykonującą model. Przy tym wymagane jest doświadczenie związane zarówno z modelowaniem haptycznym, jak i z modelowaniem powierzchniowym. Efekt wykonanych działań jest widoczny na rys. 4.1.



4.1. Proces otrzymywania zbioru krzywych powierzchniowych

Ad. 2

Uzyskane krzywe splajnowe posłużyły do wykonania modelu powierzchniowego. Aby to jednak było możliwe, należało je najpierw wyeksportować do formatu neutralnego - iges. Tak zapisany zbiór krzywych został użyty do zamodelowania gładkiego płata powierzchni rozpiętego pomiędzy nimi. Proces ten został zrealizowany w środowisku modułu Generative Shape Design systemu CATIA v5 [8]. Za pomocą stosownych narzędzi programowych płat powierzchni uzyskał stosowną „grubość”, proporcjonalną do grubości płata kości czaszki w miejscu wstawienia protezy (rys. 4.2).

Ad. 3

Widoczny na rys. 4.2 model powierzchniowy jest znacznie większy od otworu w modelu czaszki (rys. 4.2) oraz ma nieco inny kształt linii brzegowej. Na tym etapie działań jest to model postaciowo nadmiarowy, ale – co ważne – zawiera w sobie pożądaną brakujący fragment modelu czaszki. Tak utworzony model powierzchniowy został przekształcony

w postać wokselową (przez pośrednią konwersję w formę triangularną), aby w środowisku systemu modelowania haptycznego nadać implantowi ostateczną formę. Uzyskanie pożądanej postaci modelu implantu stało się możliwe dzięki zastosowaniu operacji odejmowania boole'owskiego. Od modelu „nadmiarowego implantu” została odjęta objętość modelu czaszki (rys. 4.2).

Tym sposobem uzyskano model implantu dopasowany dokładnie w zakresie powierzchni brzegowej do otworu w modelu czaszki (rys. 4.3).



4.2. Odejmowanie boole'owskie



4.3. Widok końcowej postaci implantu osadzonego w miejscu braku kostnego

Modelowanie w odwzorowaniu twarzowej części czaszki człowieka jest wykorzystywane coraz częściej w wielu obszarach medycyny. W operacjach plastycznych, rekonstrukcjach twarzy czy leczeniu obszarów objętych jednostką chorobową.

U pacjentów przeprowadza się tomografię komputerową, coraz częściej jest to tomografia stożkowa (CBCT) [1], która jest metodą dokładniejszą i jednocześnie bezpieczniejszą dla pacjentów. Uzyskane w tym badaniu obrazy DICOM [1] można zaimportować do specjalistycznego oprogramowania, w którym po odpowiedniej obróbce - w tym segmentacji - można odwzorować model danej struktury anatomicznej.

Przykładami mogą być przypadki kliniczne, w których wykorzystano modele odwzorowujące części twarzowe czaszki [3],[4],[5].

4.2. Opis przypadków klinicznych dotyczących modelowania w odwzorowaniu części twarzowej czaszki

- Odwzorowanie żuchwy objętej nowotworem

Odwzorowaniu podlegała żuchwa pacjenta objęta nowotworem. Model odwzorowano na podstawie obrazów DICOM uzyskanych z tomografii stożkowej, a następnie

wykorzystano go do wytworzenia modelu fizycznego za pomocą druku 3D. Na tak uzyskanym modelu fizycznym zaplanowano linie resekcji kości (linie cięcia kości w celu usunięcia jej fragmentu), miejsca przytwierdzenia płytki rekonstrukcyjnej. Następnie model wykorzystano do dopasowania tytanowej płytki rekonstrukcyjnej. Płyta ta została podczas operacji utwierdzona do żuchwy pacjenta w celu zachowania jej ciągłości [5].



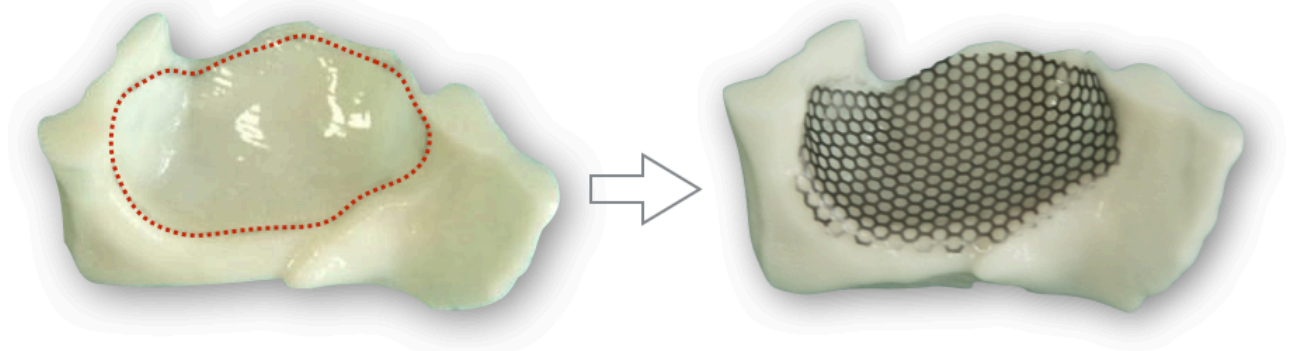
Rys. 4.4 Dopasowanie płytki rekonstrukcyjnej do kształtu modelu fizycznego żuchwy

- Odwzorowanie i odbudowa złamania dna oczodołu

Przypadek dotyczy pacjenta z nieprawidłowym zrośnięciem (nie leczonym) izolowanego złamania dna oczodołu, przez co u chorego pojawiło się podwójne widzenie. Leczenie operacyjne polegało na wprowadzeniu siatki rekonstrukcyjnej dna oczodołu.

Rola inżynierów polegała tutaj na uzyskaniu modelu odwzorowującego twarzową część czaszki obejmującą obszary wokół oczodołów. Pierwszym krokiem postępowania było zastosowanie lustrzanego odbicia modelu dna oczodołu części zdrowej na część ze złamaniem. W dalszej kolejności wygładzono i zamknięto przestrzeń odwzorowującą nowe dno oczodołu, wysegmentowano tę część i dzięki technologii druku 3D, uzyskano fizyczny model dna oczodołu.

Na modelu tym zaznaczono linię osadzenia tytanowej siatki rekonstrukcyjnej, a następnie docięto i ukształtowano taką siatkę do modelu, tak aby podczas operacji można było ją bezpośrednio wykorzystać do zrekonstruowania dna oczodołu chorego (rys. 4.5).

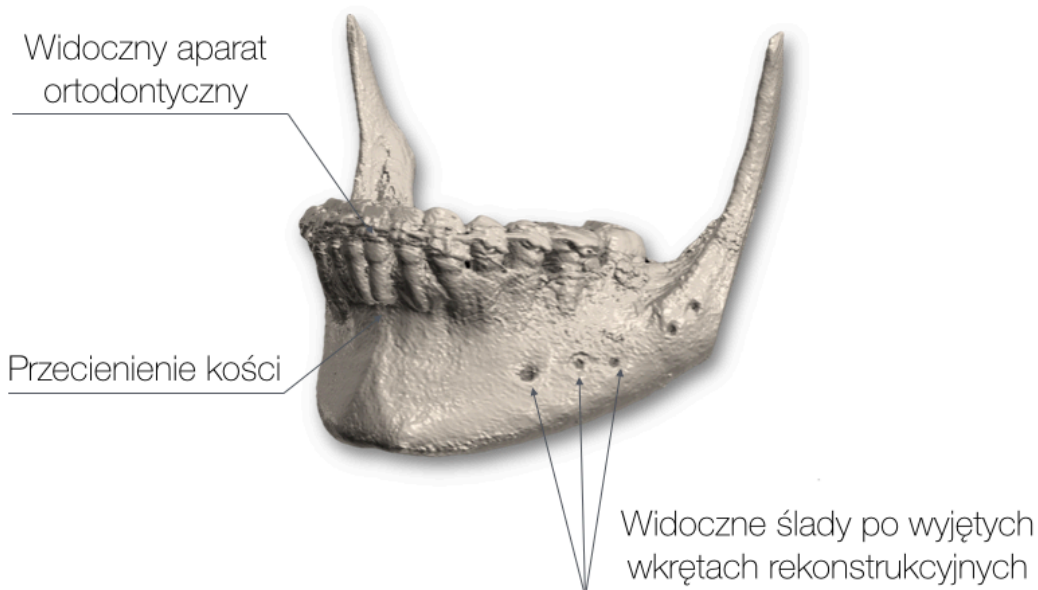


Rys. 4.5 Zastosowanie modelu fizycznego odtworzonego oczodołu pacjenta (widoczny zaznaczony obszar osadzenia siatki rekonstrukcyjnej oraz widoczna siatka po ukształtowaniu i osadzeniu)

- Odwzorowanie żuchwy z przecienieniem kości

Kolejny przykład dotyczy pacjentki z przecienieniem kości żuchwy, które najprawdopodobniej powstało z powodu nieprawidłowego leczenia ortodontycznego. W tym przypadku wygenerowano model odwzorowanej żuchwy pacjentki, tak aby sama chora mogła zaobserwować nieprawidłowości w budowie jej kości, a także aby model mógł posłużyć do ewentualnego zaplanowania operacji augmentacji kości i/lub przeszczepu kości z kolca biodrowego celem odbudowy prawidłowej struktury żuchwy.

Na modelu wirtualnym można zaobserwować aparat ortodontyczny (który spowodował dużą ilość artefaktów na zdjęciach tomograficznych), ślady po wyjętych śrubach rekonstrukcyjnych (zastosowanych w leczeniu ortodontycznym), przecienienie kości żuchwy w części przedniej oraz bogatą strukturę wewnętrzną żuchwy, którą należało usunąć, aby można było efektywnie wytworzyć model fizyczny technologią druku 3D (również celem przekazania zainteresowanej pacjentce) [4].



Rys. 4.6 Model odwzorujący żuchwę pacjentki



Rys. 4.7 Widok modelu przed i po usunięciu zbędnych artefaktów

5. WNIOSKI

Wraz z objaśnieniem proponowanej metodyki modelowania można przedstawić kilka wniosków, dla przykładu:

- metodyka modelowania w inżynierii rekonstrukcyjnej stosowanej w technice oraz inżynierii biomedycznej jest praktycznie taka sama,
- modele wirtualne i fizyczne struktur anatomicznych, jako efekt działań współpracy inżyniera z lekarzem, stanowią swego rodzaju ogniwo łączące świat inżynierii ze światem medycyny,
- proces odwzorowania struktur anatomicznych za pomocą modelowania wirtualnego nie jest jednoznaczny (jakość uzyskanego modelu wirtualnego w dużym stopniu zależy od stopnia zaawansowania stosowanego oprogramowania oraz umiejętności jego operatora),
- modele wirtualne oraz ich fizyczne odpowiedniki pozwalają na planowanie zabiegów operacyjnych, co wiąże się ze znacznym skróceniem czasu wykonania zabiegu i mniejszym obciążeniem samego pacjenta.

LITERATURA

- [1] Cierniak R.: Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [2] Dietrych J.: System i konstrukcja, WNT, Warszawa 1985.
- [3] Otrębska M., Wyleżoł M.: Modelowanie implantów w kranioplastyce - od tomografii komputerowej do modelu wirtualnego. Mechanik 2014, 2 (dysk optyczny), s. 1-9.
- [4] Otrębska M., Wyleżoł M.: Doskonalenie modelu triangularnego żuchwy uzyskanego na podstawie obrazowania medycznego. Mechanik 2014,10, s. 852-855.
- [5] Otrębska M., Szczodry B., Samolczyk-Wanyura D.: Planowanie zabiegu resekcji i rekonstrukcji żuchwy z użyciem komputerowego wspomaganie oraz technologii generatywnych, Mechanik 2014, 2 (dysk optyczny), s. 1-7.
- [6] Piętka E.: Standard DICOM w archiwizacji i transmisji obrazów medycznych, Sieci komputerowe. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1999, s. 651-660, bibliogr. 12. (Zeszyty Naukowe nr 1414 Informatyka; z. 36).
- [7] Wyleżoł M.: Metodyka modelowania na potrzeby inżynierii rekonstrukcyjnej, Monografia nr 428, Gliwice, Politechnika Śląska, 2013.
- [8] CATIA v5: Internet (lipiec 2014): <http://www.3ds.com>.