



# Wspomaganie planowania alloplastyki stawu kolanowego przy pomocy nowoczesnych metod inżynierskich

## Supporting of planning total knee replacement with modern engineering methods

Wiktorja Wojnarowska<sup>1\*</sup>, Sławomir Miechowicz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Szkoła Doktorska Nauk Inżynieryjno-Technicznych na Politechnice Rzeszowskiej, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. +48 787 231 362, e-mail: d510@stud.prz.edu.pl

<sup>2</sup> Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

### Wprowadzenie

Z każdym rokiem rośnie zapotrzebowanie na wykonywanie zabiegów alloplastyki stawu kolanowego, co jest spowodowane między innymi przez starzenie się społeczeństwa. Prowadzi to do ciągłego zwiększania się liczby oczekujących. Wobec tego istnieje potrzeba, aby zwiększyć liczbę wykonywanych każdego roku zabiegów. Można to osiągnąć poprzez lepsze przygotowanie lekarzy do operacji, a przez to skracanie czasu przebiegu tych procedur medycznych. Tradycyjnie do planowania zabiegów ortopedycznych wykorzystuje się obrazy z tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego pacjenta. Umożliwiają one wizualizację struktur anatomicznych, jednakże zastosowanie wyłącznie wirtualnych modeli trójwymiarowych nie pozwala

na zaplanowanie położenia wybranych struktur oraz narzędzi chirurgicznych podczas zabiegu. Z pomocą mogą przyjść inżynierowie, którzy wspomogą lekarzy nowoczesnymi technikami inżynierskimi, takimi jak chociażby inżynieria odwrotna.

### Inżynieria odwrotna

Inżynieria odwrotna, która jest również nazywana inżynierią rekonstrukcyjną, to proces, który umożliwia odtworzenie istniejącego obiektu. Pozwala to na uzyskanie informacji o geometrii obiektu, który nie posiada dokumentacji technicznej. Można to osiągnąć poprzez wykonanie pomiarów, które umożliwią uzyskanie postaci cyfrowej danego przedmiotu. Metody te można

414

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano możliwości stosowania nowoczesnych metod inżynierskich w planowaniu zabiegu operacyjnego całkowitej wymiany stawu kolanowego. Został omówiony proces wykonywania wirtualnych i fizycznych modeli stawu kolanowego przy użyciu metod inżynierii odwrotnej. Obiektem wejściowym do realizacji procesu były obrazy DICOM, które pochodziły z badania tomograficznego. Przedstawiono także potencjalne korzyści wynikające z użycia tych technik.

**Słowa kluczowe:** planowanie zabiegu, alloplastyka, szybkie prototypowanie, rekonstrukcja, inżynieria odwrotna

The paper presents the possibility of using modern engineering methods in planning total knee replacement surgery. It was discussed the process of making virtual and physical knee models using methods of reverse engineering. The input object for the process were DICOM images that came from a computed tomography scan. The potential benefits of using these techniques were also presented.

**Key words:** planning procedures, total knee replacement, rapid prototyping, reconstruction, reverse engineering

### Abstract

otrzymano / received:

06.09.2019

poprawiono / corrected:

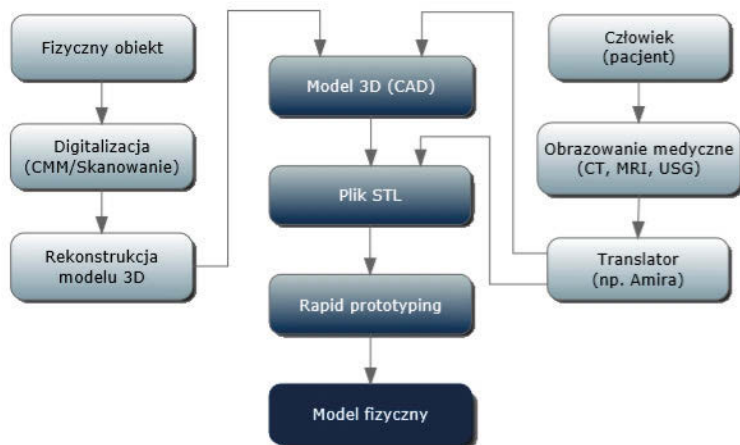
07.10.2019

zaakceptowano / accepted:

10.10.2019

podzielić na stykowe i bezstykowe. Uzyskany model poddaje się obróbce i finalnie można wytworzyć model fizyczny za pomocą dostępnych metod wytwarzania.

Geometria struktur anatomicznych u każdego człowieka jest trochę inna. Dlatego też inżynieria odwrotna znajduje zastosowanie przy odwzorowywaniu ich geometrii i tworzeniu modeli cyfrowych, które mogą być wykorzystane do wytwarzania modeli fizycznych. Takie modele pozwalają na dokładne określenie zasięgu zmiany patologicznej, jak i zaplanowanie zabiegu operacyjnego. Proces otrzymywania modeli biomedycznych zależy od tego, co chcemy odwzorować. Jeżeli chcemy poddać digitalizacji rękę lub kość, która znajduje się poza ciałem, to do wykonania modelu używa się systemów pomiarowych optycznych lub stykowych (np. maszyna współrzędnościowa). Natomiast jeżeli chcemy uzyskać model struktury, która znajduje się w ciele istoty żywej, to należy najpierw wykonać badanie obrazowe (np. tomografię komputerową), a następnie uzyskane dane w formacie DICOM przetworzyć przy pomocy specjalistycznego oprogramowania rekonstrukcyjnego, czyli translatora (Budzik). Etapy uzyskiwania modeli biomedycznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Etapy projektowania modeli biomedycznych  
Źródło: [1].

W niniejszym artykule zostanie przedstawiona metoda uzyskiwania modeli z wykorzystaniem obrazowania medycznego i specjalistycznego oprogramowania.

## Oprogramowanie

Trójwymiarowe modele danych struktur anatomicznych można uzyskać przy pomocy specjalistycznego oprogramowania dedykowanego do obróbki obrazów w formacie DICOM. W większości przypadków cena takiego oprogramowania komercyjnego jest bardzo wysoka. Koszt uzyskania licencji może wynieść nawet kilkaset tysięcy złotych [2].

Przykładem takiego oprogramowania jest Mimics od firmy Materialise. Pozwala on na wczytywanie obrazów w formacie DICOM z tomografii komputerowej, obrazowania metodą

rezonansu magnetycznego, ultrasonografii 3D czy też mikroskopii konfokalnej. Jakość tego oprogramowania potwierdzają specjalne certyfikaty medyczne. Jest to program bardzo rozbudowany i bardzo drogi. Przeciętny użytkownik używający tego oprogramowania na potrzeby wykonywania modeli struktur kostnych wykorzystuje niewielką część jego potencjału [3].

Na rynku znajdują się również bezpłatne programy typu open-source przeznaczone do tworzenia modeli na podstawie obrazów DICOM. Są to między innymi: ITK-SNAP, InVesalius, Seg3D czy też 3D Slicer. Programy te mają bardzo duże możliwości. Niestety część z nich charakteryzuje się nieintuicyjnym interfejsem użytkownika.

Generalnie uzyskanie modeli przestrzennych w oprogramowaniu komercyjnym czy też typu open-source składa się z kilku podstawowych kroków [4, 5]:

- wczytanie sekwencji obrazów z obrazowania medycznego,
- oznaczenie interesującej struktury anatomicznej, której model 3D chce się uzyskać,
- konwersja danych dwuwymiarowych w formie pikseli do danych trójwymiarowych w formie wokseli,
- konwersja wokseli do postaci obiektu typu mesh,
- obróbka wygenerowanego modelu, w tym usunięcie artefaktów,
- zapis modelu w formacie stl, obj lub innym stosowanym do przechowywania modeli 3D.

## Akwizycja danych

Akwizycja danych (ang. *Data Acquisition* – DAQ) jest jednym z pierwszych etapów przetwarzania sygnałów pomiarowych. Proces ten polega na zbieraniu, próbkowaniu, kwantowaniu oraz obróbce i testowaniu danych. W inżynierii odwrotnej struktur anatomicznych najczęściej używa się danych zebranych podczas tomografii komputerowej (ang. *Computed tomography*) oraz obrazowania metodą rezonansu magnetycznego (ang. *Magnetic resonance imaging* – MRI) [6].

Do uzyskania geometrii stawu kolanowego zostały użyte obrazy 2D w formacie DICOM, pozyskane z badania tomograficznego wykonanego za pomocą tomografu SIEMENS SOMATOM Perspective w ZOZ przy Szpitalu MSWiA w Krakowie. U pacjentki stwierdzono zwyrodnienie stawu kolanowego.

## Rekonstrukcja stawu kolanowego

Do przetworzenia danych użyto programu 3D Slicer. Jest to oprogramowanie typu open-source. Obrazy 2D wczytywane są w kolejności ich utworzenia. Zaimportowany plik składał się z 226 zdjęć, a grubość skanowanych przekrojów wynosiła 1,5 mm. Używany program pozwolił na utworzenie wizualizacji badanego stawu (Rys. 2).

Następnym etapem utworzenia postaci cyfrowej danego stawu było wyodrębnienie interesującej struktury, czyli w tym wypadku stawu kolanowego. Zostało to osiągnięte poprzez



zastosowanie dostępnej w tym programie metody segmentacji. Oparta jest ona na analizowaniu intensywności pikseli. Podczas segmentacji obraz dzielony jest na obszary, które są homogeniczne ze względu na wybraną własność. Może to być poziom szarości, barwa lub struktura. Struktury anatomiczne mają określoną gęstość radiologiczną zgodnie ze współczynnikiem Hounsfielda. Dlatego też przydział pikseli do danego obszaru odbywa się na podstawie progu gęstości HU.

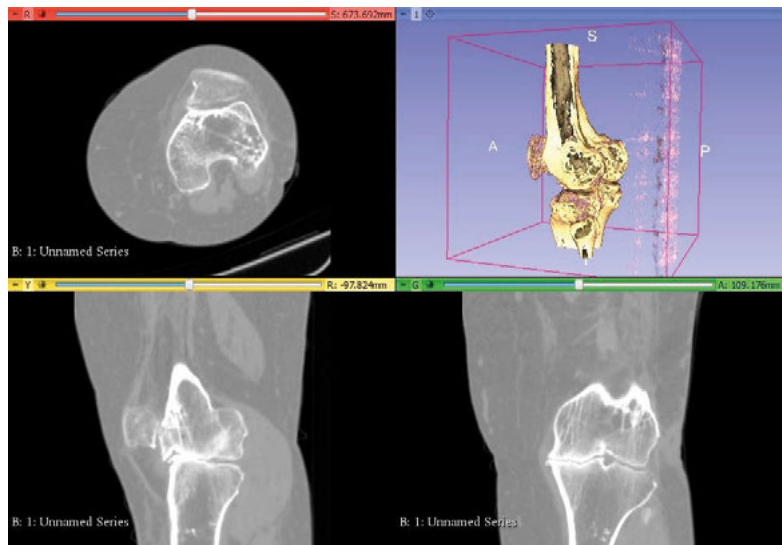
Podstawowy algorytm stosowany w metodzie segmentacji, używanej w programie 3D Slicer oparty jest na progowaniu (ang. *Thresholding*). Dla danego obrazu ustalane są progi gęstości HU. Piksele, które są jaśniejsze od danego progu, przydzielane są do jednej klasy, a te, które są ciemniejsze do drugiej. W przypadku oprogramowania 3D Slicer można stosować binaryzację z podwójnym progiem. Oznacza to, że wyznacza się dwa progi jasności. Maskę segmentacji nakładana jest na piksele, które znajdują się w zakresie progowym. Pozostałe piksele traktuje się jako tło lub inne objekty [7]. Zakres został ustalony tak, aby maska obejmowała swoim zasięgiem kości wchodzące w skład stawu kolanowego (Rys. 3).

W wyniku progowania może dojść do sytuacji, gdy maska zostanie nałożona na piksele, które nie należą do danej struktury anatomicznej. W kolejnych operacjach należało usunąć te piksele z zasięgu maski. W tym celu użyto między innymi narzędzia *SavelslandEffect*, które pozwala na usunięcie pikseli niebędących w bezpośrednim kontakcie z maską. Natomiast w przypadku pikseli, które stykały się z maską, użyto narzędzia *EraseLabel*, które usuwa maskę z wybranych pikseli.

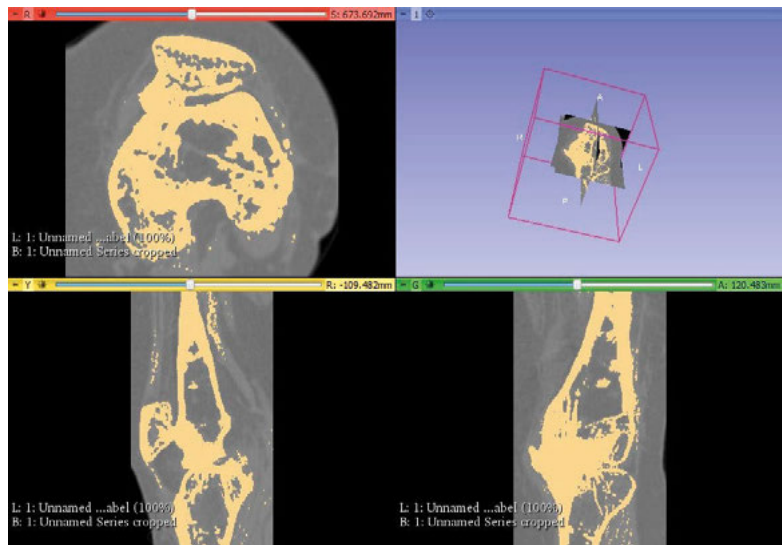
W ostatnim etapie użyto narzędzia *MakeModelEffect*, które w wyniku obliczeń utworzyło na podstawie wykonanej maski trójwymiarowy model stawu kolanowego. Cały proces modelowania działa w tle, natomiast gotowy model pojawia się w widoku 3D (Rys. 4).

Utworzony model został zapisany i następnie wyeksportowany do formatu STL (ang. *Stereolithography*), który jest powszechnie stosowany w druku 3D.

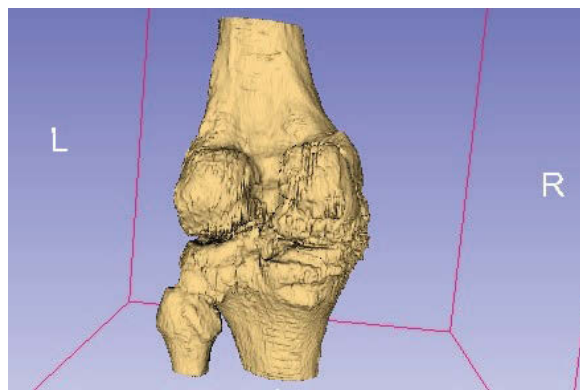
Jednym z wymogów, które musi spełniać model, aby jego wydruk przebiegł prawidłowo, jest to, aby na jego powierzchni nie występowały żadne nieciągłości. Dlatego też model został importowany do programu *Meshmixer*, który m.in. pozwala na usuwanie błędów w strukturze siatki. Przy pomocy narzędzia *Inspector* sprawdzono siatkę, a wykryte ubytki uzupełniono w sposób automatyczny. Dokonane zmiany zapisano, a efekt pracy wyeksportowano do formatu STL.



**Rys. 2** Widok zdjęcia tomografii komputerowej w płaszczyźnie poprzecznej, strzałkowej oraz czołowej wraz z przestrzenną wizualizacją zbadanego stawu  
Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 3** Wybrane obrazy w płaszczyźnie poprzecznej, strzałkowej oraz czołowej z nałożoną maską segmentacji  
Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 4** Utworzony trójwymiarowy model w widoku 3D  
Źródło: Opracowanie własne.

## Wytworzenie modelu przy zastosowaniu druku 3D

Drukowany element miał posłużyć do planowania zabiegu operacyjnego. W związku z tym nie istniała konieczność używania do jego wytworzenia technik, które zapewniają drukowanym elementom odpowiednią biogodność. W tym przypadku wystarczająca była technika FDM, która polega na nanoszeniu warstwa po warstwie materiału ograniczonego do jego temperatury topnienia.


Przed rozpoczęciem drukowania należy najpierw odpowiednio zaprogramować drukarkę. Do tego celu służą programy nazywane slicerami (ang. *slice* – kroić w plastry), które generują g-code, czyli dokładną instrukcję dla drukarki zawierającą takie informacje, jak np. współrzędne punktów, w których ma być nakładany filament. W tym przypadku posłużono się bezpłatnym programem Cura, działającym na licencji wolnego oprogramowania LGPLv3. W programie ustawiono parametry dotyczące rodzaju wypełnienia i jego gęstości, temperaturę dyszy oraz stołu. Po ustawieniu wszystkich parametrów wygenerowano G-code,

który przestano do drukarki. Wydruk modelu trwał 10 godzin (Rys. 5), a po jego zakończeniu usunięto jeszcze suporty (Rys. 6).

Uzyskany model fizyczny odzwierciedla faktyczny stan danej struktury anatomicznej, dlatego też może stanowić nieocenioną pomoc przy planowaniu zabiegu operacyjnego.

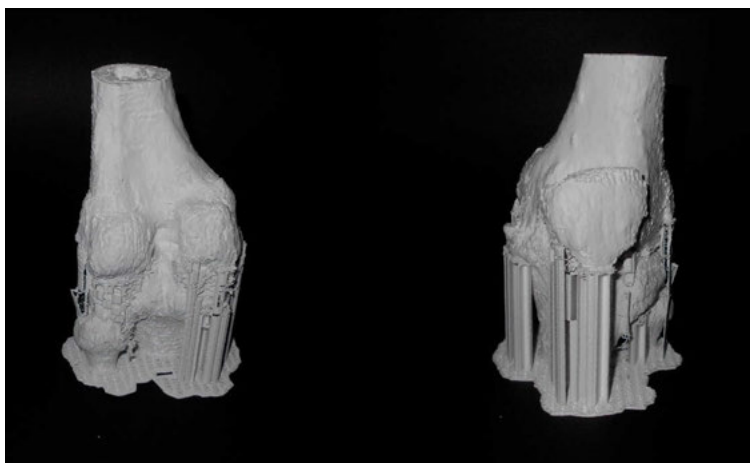
## Wnioski

W artykule przedstawiono proces otrzymania fizycznego modelu struktury anatomicznej przy pomocy technik CAD oraz szybkiego prototypowania. Tak uzyskany staw obrazuje rzeczywisty stan danej struktury i umożliwia przeprowadzenie na nim symulacji zabiegu. Dzięki temu możliwe jest wcześniejsze dopasowanie odpowiedniej techniki operacyjnej, dobranie odpowiednich narzędzi. Skutkuje to skróceniem czasu zabiegu, a tym samym ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo pacjenta. Zminimalizowana jest możliwość infekcji i zakrzepicy. Pozwala na dokładniejsze zapoznanie się z danym przypadkiem medycznym przez lekarza, a przez to obniża prawdopodobieństwo powikłań po zabiegu.

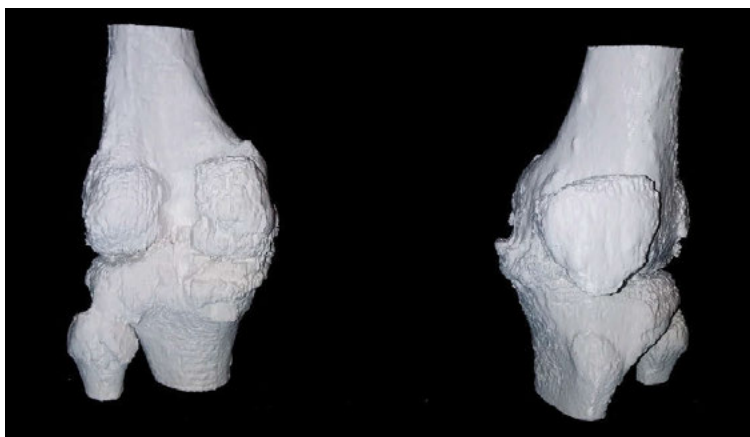
Powszechne stosowanie technik CAD i RP w przedoperacyjnym planowaniu może przyczynić się do wzrostu jakości systemu opieki zdrowotnej. Wydrukowane modele mogą również wspomóc lekarzy przy wyjaśnianiu przebiegu operacji pacjentom, dzięki czemu będą oni lepiej rozumieć cel zabiegu oraz jego potencjalne wyniki. 

## Literatura

1. G. Budzik, J. Burek, T. Dziubek, O. Markowska, P. Turek: *Rekonstrukcja geometrii żuchwy i korony zęba przy użyciu optycznych systemów pomiarowych*, Problemy Nauk Stosowanych, 2, 2014, 121-130.
2. M. Cykowska-Błasiak, P. Ozga: *Wydruk 3D jako narzędzie do planowania zabiegów ortopedycznych*, Budownictwo i Architektura, 14(1), 2015, 15-23.
3. J. Piękoś, K. Dominiak, P. Siemiński: *Zastosowanie bezpłatnych wersji programów do drukowania modeli kości*, Mechanik 4, 2016, 320-321.
4. J.Y. Choi, J.H. Choi, N.K. Kim, Y. Kim, J.K. Lee, M.K. Kim, J.H. Lee, M.J. Kim: *Analysis of errors in medical rapid prototyping models*, Int. J. Oral Maxillofac. Surg., 31, 2002, 23-32.
5. F. Rengier, H. Tengg-Kobligk, C. Zechmann, H.U. Kauczor, F.L. Giesel: *Beyond the eye – medical applications of 3D rapid prototyping objects*, Eur. Med. Imag. Rev., 1, 2009, 76-80.
6. D. Pijanka, S. Miechowicz, T. Kudasik, J. Cymbryłowicz, P. Trębacz: *Zastosowanie technik RP/AM na potrzeby weterynarii*, Przegląd Mechaniczny 1, 2019, 20-24.
7. S. Miechowicz: *Synteza modelowania złożonych struktur geometrycznych w zastosowaniach medycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.



Rys. 5 Wydruk modelu stawu kolanowego  
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 6 Wydruk modelu stawu kolanowego po usunięciu podpór  
Źródło: Opracowanie własne.