

Kraków, 16.05.2017

dr hab. inż. Marek Iwaniec, prof. ndzw. AGH  
Katedra Automatykacji Procesów  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Pawła Turka pt.:

## **Metodyka projektowania oraz wytwarzania modeli medycznych żuchwy**

Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

### **1. Wstęp**

Podstawą prawną niniejszej recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej Prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 09 marca 2017 roku oraz decyzja Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 08 marca 2017 r.

Podstawę do przygotowania rozprawy stanowiły badania Autora opublikowane w latach 2012–2016 w 40 publikacjach. Należy podkreślić, że 2 z opublikowanych artykułów ukazały się w czasopiśmie z listy A MNiSW, a 19 prac znalazło się na liście B. Wyniki badań Autora były prezentowane na 12 konferencjach krajowych. Ponadto Doktorant jest współautorem 3 rozdziałów monografii oraz rozprawy doktorskiej. 5 prac zostało opublikowanych w języku angielskim.

### **2. Analiza treści rozprawy**

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim ze streszczeniem w języku angielskim. Praca liczy 167 stron, składa się z 8 rozdziałów oraz obszernego zestawienia literatury, obejmującego

204 pozycje, w tym adresy stron internetowych. Praca zawiera także wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, który ułatwia i przyspiesza rozumienie omawianych zagadnień.

Rozdział 1 zawiera krótki wstęp do problemu rekonstrukcji obiektów o skomplikowanym kształcie. Jest to problem spotykany w wielu dziedzinach, a z uwagi na złożoność modeli ma szczególne znaczenie w medycynie. Jako przykład nie w pełni rozwiązanego problemu Doktorant przedstawił zagadnienie rekonstrukcji tkanek z obszaru twarzoczaszki. Następnie Autor przedstawił przegląd zagadnień dotyczących metod obrazowania medycznego, projektowania modeli twarzoczaszki, metod ich wytwarzania oraz oceny ich jakości, a zwłaszcza oceny dokładności odtworzenia geometrii modeli medycznych. Przegląd omawianych zagadnień uzupełniono bogatym zestawieniem literatury przedmiotu. Doktorant przekonująco uzasadnia zasadność podjęcia badań w tej dziedzinie, których celem jest opracowania kompleksowej metodyki projektowania oraz wytwarzania modeli medycznych żuchwy.

W osobnym podrozdziale została sformułowana teza pracy oraz przedstawiono cel i zakres pracy. Aby zrealizować cel pracy Autor zdefiniował 7 zadań, które doprowadziły do udowodnienia postawionej tezy i umożliwiły realizację celu pracy.

W rozdziale 2 przedstawiono metody pomiaru oraz numerycznego odtwarzania geometrii złożonych obiektów z wykorzystaniem metod obrazowania medycznego obiektów „in vivo” oraz metod stosowanych w przemysłowej technice pomiarowej i diagnostyce, które mogą być zastosowane do wizualizacji tkanek „in vitro”. Omawiając kolejne metody i techniki pomiarowe oraz algorytmy przetwarzania obrazu 2D w celu rekonstrukcji modeli 3D Autor dokonał przeglądu ich najważniejszych cech, funkcjonalności oraz mankamentów i wad. Autor także przeanalizował zastosowanie przemysłowych systemów optycznych, stykowych oraz rentgenowskich systemów diagnostycznych w zastosowaniu do wizualizacji tkanek wyekstrahowanych z organizmu żywego.

W rozdziale 3 podstawiono analizę porównawczą metod wytwarzania złożonych modeli medycznych metodami ubytkowymi, przyrostowymi, hybrydowymi oraz rapid manufacturing.

Autor przedstawił siłą rzeczy skrótowy, aczkolwiek szeroki przegląd istniejących metod i urządzeń stosowanych do wywarzania modeli medycznych. Szczególną uwagę poświęcił analizie parametrów oraz uzyskiwanej dokładności wytwarzanych modeli medycznych. Zamieszczone opisy zostały wzbogacone o schematy oraz zdjęcia urządzeń technologicznych, jak również przykładowych modeli wykonywanych omawianymi technikami.

Rozdział 4 rozpoczyna zasadniczą część pracy. Dokumentuje on sposób projektowania oraz wytworzenia modelu wzorcowego odcinka boczno-łykciowego żuchwy oraz fizycznych modeli anatomicznych ubytków kości żuchwy. Model wzorcowy zaprojektowano w środowisku Geomagic, a wykonano ze stopu aluminium AW-7075 na centrum obróbkowym DMU 100monoBLOCK stosując oprogramowanie CAD/CAM NX 9.0. Wykonany fizyczny model wzorcowy posłużył do określenia

błędów systemu oraz powtarzalności procedury pomiarowej. Następnie przy współpracy z Kliniką Szpitala Wojewódzkim nr 1 im Fryderyka Chopina w Rzeszowie, wykorzystując dane pomiarowe z tomografu wielorzędowego opracowano najpierw model w postaci chmury punktów, a następnie model powierzchniowy określony za pomocą krzywych NURBS który posłużył do zdefiniowania modelu bryłowego. Model bryłowy został wykorzystany także do wykonania modeli fizycznych odcinka żuchwy w wybranych technologiach przyrostowego wytwarzania: FDM, SLS, JS-PolyJet, MEM i CJP. Wytwarzając modele fizyczne w różnych technologiach Autor starał się zapewnić, o ile to możliwe, powtarzalne warunki takie jak np. orientację modelu w przestrzeni, minimalną grubość warstwy itp.

Kolejny rozdział jest poświęcony analizie dokładności wykonania modeli numerycznych żuchwy. Autor przedstawił metodykę oceny błędów projektowania modeli medycznych powstających na kolejnych etapach: błędów urządzeń i procedury pomiarowej stosowanej w akwizycji danych, błędów przetwarzania danych oraz błędów modelowania CAD. Analizując błędy niemedycznej aparatury pomiarowej, Autor wykorzystując własny model wzorcowego odcinka boczno-kłykciowego żuchwy przeanalizował dokładność pomiaru metodami wykorzystującymi oświetlenie światłem strukturalnym, światłem laserowym oraz mikrotomografię. Dla każdej z tych metod przedstawił procedurę wzorcowania wykorzystywanej aparatury pomiarowej oraz określił wartość dokładności granicznej  $2\sigma$ . Następnie został przedstawiony proces przetwarzania danych pomiarowych. Szczególną uwagę Autor poświęcił jakości konstruowanych modeli i błędom powstającym na tym etapie projektowania skomplikowanych modeli medycznych. W przedstawionej analizie szczególnie cenne jest porównanie dokładności edycji danych z wykorzystaniem medycznych i niemedycznych metod pomiarowych

Wyniki analizy zostały przedstawione w postaci licznych raportów dotyczących poszczególnych etapów przetwarzania danych dla wzorcowego oraz anatomicznych modeli numerycznych.

Rozdział 6 poświęcono ocenie metod wytwarzania modeli fizycznych uzupełnień protetycznych kości żuchwy. W trakcie badań wykonano zaproponowany przez Autora model wzorcowego odcinka boczno-kłykciowego żuchwy oraz wcześniej analizowane modele anatomiczne ubytków kości żuchwy czterech pacjentów. Prototypy te zostały wykonane za pomocą wybranych technologii wytwarzania metodami przyrostowymi, a w procesie wytwarzania została szczegółowo zbadana ich geometryczna dokładność wykonania oraz czas potrzebny do wytworzenia prototypów. Analizując dokładność wykonanych prototypów zastosowany został test Shapiro-Wilka w celu weryfikacji hipotezy rozkładu normalnego analizowanych danych, której potwierdzenie umożliwiło wybór odpowiednich miar w celu analizy badanych szeregów.

W rozdziale 8 zawarto podsumowanie kolejnych etapów procesu projektowania i wytwarzania prototypów

Rozdział 7 zawiera podsumowanie rozprawy. Zawarto w nim wnioski wynikające z wykonanych badań, uwagi końcowe oraz przewidywane kierunki dalszych prac.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

#### **3.1. Uwagi ogólne**

Sposób tworzenia oraz techniki wytwarzania modeli uzupełnień protetycznych w tym złożonych modeli żuchwy są istotnym problemem badawczym. Postępy protetyki, implantologii inżynierii tkankowej, których celem jest opracowanie substytutów umożliwiających regenerację lub zastąpienie zmienionych chorobowo tkanek, a nawet całych organów są przedmiotem lawino rosnącej liczby publikacji. Intensywny rozwój tej dziedziny skutkuje wielością nowych metod i rozwiązań konstrukcyjnych. Prace prowadzone są w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie. Zauważalnym trendem ostatnich lat są stale zwiększające się wymagania odnośnie jakości wykonania oraz stosowania coraz doskonalszych materiałów i konstrukcji. Praca wpisuje się więc w nurt aktualnych prac badawczych i ma duże znaczenie praktyczne.

Autor przeprowadził wyczerpującą analizę literatury w badanej dziedzinie. Znaczną część cytowanych przez Niego prac stanowią prace prowadzone przez inne ośrodki, publikowane w literaturze o zasięgu światowym, a także prace własne. Zestawienie obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i najnowsze artykuły w periodykach naukowych oraz adresy stron internetowych.

Rozpoczynając pracę Autor sformułował tezę cel i zakres pracy, a następnie konsekwentnie realizował postawione zadania badawcze, których podstawą był dobrze zaplanowany eksperyment.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny i interdyscyplinarny. W wielu miejscach ze względu na złożoność badanych procesów i wieloetapowość metod omawiane badania zostały przedstawione skrótowo, bez opisu wszystkich operacji, co jednak na ogół nie sprawia problemów z odtworzeniem badanych procesów. Znaczna ilość schematów i rysunków dobrze ilustruje omawiane zagadnienia i stanowi wystarczającą dokumentację otrzymanych wyników.

Silną stroną pracy jest duża wiedza teoretyczna i praktyczna dotycząca metod pomiarowych, modelowania oraz metod wytwarzania - zarówno ubytkowych jak i przyrostowych. Należy podkreślić, że wyzwania związane z realizacją celu pracy z uwagi na trudność w pozyskaniu geometrii obiektu, jak też nieporównywalnie bardziej skomplikowany kształt obiektów medycznych są znacznie większe niż w przypadku przemysłowego wytwarzania części maszyn. Autor wykazał się znajomością wielu procesów wytwórczych, ale też biegłością obsługi urządzeń oraz planowania i realizacji procesów technologicznych. Wiele z tych działań zostało wykonanych przy wsparciu zaawansowanych programów. Autor wykazał się znajomością różnych środowisk programowania oraz specjalistycznych programów takich jak np. deVide, NX, WORKPIECE, Geomagic, GOM oraz

programów wbudowanych w wykorzystywane urządzenia. Większość prac została przeprowadzona w jednym laboratorium z wykorzystaniem często najnowszego sprzętu z zachowaniem odpowiednich standardów i procedur.

Pomimo pozytywnej oceny całości pracy, nasuwa się jednak kilka uwag dyskusyjnych, zarówno ogólnych, jak i szczegółowych.

W ramach uwag dyskusyjnych, proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

- Nie sformułowano i wyczerpująco uzasadniono wszystkich wymagań stawianych w procesie rekonstrukcji ubytków kości żuchwy.
- Brak jest szerszej dyskusji kwestii, czy zaproponowana technologia jest skalowalna; czy może być przeniesiona i zastosowana do wytwarzania innych modeli medycznych np. w protetyce stomatologicznej, narządu ruchu itd.?
- Jaki jest tryb postępowania, jeżeli tkanki uległy wcześniejszemu zniszczeniu i nie są dostępne archiwalne badania?
- Jaka może być przyczyna pojawiania się rozkładów bimodalnych danych pomiarowych?
- Nie podano uzasadnienia wyboru miar statystycznych i dyskusji otrzymanych wyników dokładności odwzorowania geometrii modeli wykonanych różnymi metodami Rys. 6.3-6.22.

### 3.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe odnoszą się głównie do zauważonych w rozprawie drobnych błędów w znacznej części edycyjnych, jak np.:

- Str 25, omyłkowe użycie sformułowania „przekształceń medycznych” w opisie metod przetwarzania obrazów
- Str 28, pisownia przemienna filtr „górnoprzepustowy” i „dolnoprzepustowy”
- W opisie zasady pomiaru triangulacji laserowej zamieszczonym na str 38 i 39 kilkakrotnie użyto terminu „światła lub wiązki światła rozpraszane” podczas gdy w metodzie wykorzystywane jest moim zdaniem głównie zjawisko odbicia, a rozpraszanie ma znaczenie efektu ubocznego - szkodliwego dla dokładności pomiarów i korygowanego przez obiektyw.
- Str 50, w pierwszym akapicie omyłkowo użyto słowa „materiału” zamiast modelu
- Str 59, „różnica metod” – nie do końca wiadomo, co Autor miał na myśli

- str 65, Autor Wskazując na błędy modeli powstające podczas tworzenia modeli numerycznych i konieczność naprawy tych błędów np. „naprawa zgrubień szczelin i dziur na powierzchni” nie podał w jaki sposób te błędy zostały usunięte.
- Na str 66 i 82 Autor opisał zastosowanie testu do wykrywania błędów w modelu powierzchniowym, ale nie podał jaki to był test.
- Na str 70 użyto zamiennie terminu ‘konwersja’ i „zamiana” określając proces konwersji siatki trójkątów na powierzchnie. Moim zdaniem termin konwersja lepiej odzwierciedla przeprowadzane operacje matematyczne.
- Na str 86 autor wspomina o konieczności uzupełnienia brakujących fragmentów geometrii, ale nie podał jak duże są to braki, gdzie występują i w jaki sposób zostały uzupełnione?

W pracy znalazły się też błędy natury stylistycznej i językowej nie wykazane powyżej z uwagi na ich dużą liczbę. W wielu miejscach nie udało się także uniknąć używania żargonu technicznego np. „gotowy model, rozkład wielopikowy” itp. Szkoda, że Autor nie znalazł więcej czasu na wyeliminowanie tych błędów, co poprawiłyby odbiór całości pracy.

#### **4. Główne osiągnięcia rozprawy**

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy są:

- Opracowanie autorskiej metody pomiaru złożonych modeli medycznych oraz obiektywne określenie dokładności tego procesu poprzez pomiary na modelu wzorcowym zaproponowanym przez Doktoranta.
- Przeprowadzenie oceny metod pomiaru oraz otrzymywanej dokładności rekonstrukcji modeli numerycznych ubytków kostnych żuchwy. W ocenie uwzględniono błędy powstające w fazie pomiarów, przetwarzania danych oraz tworzenia modeli CAD.
- Przeprowadzenie w jednym laboratorium analizy porównawczej dokładności wytwarzania różnymi technikami przyrostowymi: FDM, SLS, JS-PolyJet, MEM i CJP modelu wzorcowego odcinka boczno-łykciowego żuchwy oraz modeli anatomicznych ubytków kości żuchwy czterech pacjentów. Analiza pozwoliła na ilościową ocenę dokładności oraz przydatności badanych metod do wytwarzania prototypów implantów kostnych żuchwy metodami szybkiego prototypowania.

- Utylitarnym osiągnięciem jest holistyczna ocena przydatności, funkcjonalności, dokładności i szybkości poszczególnych sposobów wywarzania prototypów ubytków kostnych żuchwy wykonywanych w procesach obejmujących zastosowanie różnorodnych metod pomiarowych, wizualizacji danych, oraz wytwarzania metodami przyrostowymi, a także wskazanie najlepszej metodyki projektowania i wytwarzania modeli medycznych wykonywanych z zachowaniem wymaganej dokładności i czasu trwania procesu.

Uzyskane wyniki mają znaczenie poznawcze jak również znaczenie praktyczne precyzując sposób postępowania oraz umożliwiając osiągnięcie wymaganej jakości wykonywanych implantów, szablonów i narzędzi wykorzystywanych nie tylko podczas zabiegów odtwarzających ciągłość geometrii żuchwy, ale także w wielu różnych zabiegach medycznych przeprowadzanych w leczeniu innych schorzeń – głównie układu kostnego.

## 5. Ocena końcowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Turka poświęcona opracowaniu metodyki projektowania oraz wytwarzania modeli medycznych żuchwy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Uważam, że rozprawa zasługuje na ocenę pozytywną, a opisany sposób rozwiązania problemu naukowego jest poprawny. Zaprezentowane wyniki są użyteczne z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

Sposób realizacji badań naukowych, których rezultaty przedstawiono w recenzowanej rozprawie, a także dorobek naukowy liczący około 40 publikacji (w tym 2 artykuły opublikowane w czasopiśmie z listy A MNiSW, oraz 19 artykułów z listy B) świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia działalności naukowo-badawczej.

W związku powyższym stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Pawła Turka pt. „**Metodyka projektowania oraz wytwarzania modeli medycznych żuchwy**” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być przedmiotem publicznej obrony.

M. Iwaniec