

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Marty Drażkowskiej na temat „Identyfikacja kinematycznych modeli ruchu stawu kolanowego na podstawie sekwencji obrazów RTG”**

(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału  
Informatyki Politechniki Poznańskiej z dnia 26 czerwca 2019 roku)

#### **1. Przedmiot rozprawy**

Analiza obrazów, w szczególności medycznych, oraz włączanie uczenia maszynowego i konwolucyjnych sieci neuronowych w różne procesy przetwarzania danych to najbardziej aktualne tematy badawcze i jednocześnie narzędzia wykorzystywane w różnych dyscyplinach naukowych. Biorąc pod uwagę jedynie publikacje zeszło- i tegoroczne zgromadzone w bibliotece cyfrowej IEEE Explore, można znaleźć ponad 1500 artykułów łączących te dwie frazy. Autorka włączyła się w ten ogólnoświatowy trend i zaproponowała wykorzystanie obu narzędzi w procesie identyfikacji modelu kinematycznego najbardziej skomplikowanego stawu ludzkiego ciała. Zagadnienie modelowania stawu kolanowego nie jest oczywiście nowe, jednak zastosowanie najnowszych technik przetwarzania danych i analizy obrazu pozwoliło Autorce wykorzystać trudne w obróbce dane RTG nieletnich pacjentów z wadami ortopedycznymi, a dalej rozszerzyć wiedzę dostępną w literaturze. Co więcej, zasadniczym celem recenzowanej pracy jest pełna automatyzacja procesu identyfikacji modelu. Temu celowi podporządkowane jest typowe dla automatyki podejście – dopasowanie lub przetworzenie rzeczywistości do postaci umożliwiającej automatyzację oraz zastosowanie odpowiedniego zaawansowanego aparatu matematycznego i informatycznego. Praca zawiera wielokrotnie powtarzające się procesy optymalizacji wielokryterialnej dotyczącej zarówno parametrów, jak i struktur modeli. Praca wpisuje się w trend związany z automatyzacją różnorodnych procesów pomiarowych, identyfikacyjnych lub decyzyjnych oraz w potrzebę lepszej mierzalności postępu procedur medycznych.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Marty Drażkowskiej podejmuje ważną i trudną tematykę. Rozważany problem z całą pewnością można uznać za aktualne zagadnienie naukowe w obszarze automatyki i robotyki, ale także istotny temat badawczy w obszarze medycyny o praktycznym znaczeniu dla lekarzy. Do jego rozwiązania potrzebne były studia literaturowe, samodzielne rozszerzenie znanych wcześniej wyników teoretycznych oraz wykonanie szeregu analiz danych źródłowych w postaci obrazów fluoroskopowych stawu kolanowego i ich opisów wykonanych przez lekarzy specjalistów. Badania przeprowadzono na zdjęciach kolan patologicznych młodych pacjentów, co dodatkowo utrudniało jednoznaczność opisów i analizy obrazu, a w konsekwencji cały proces identyfikacji. Autorka użyła zaawansowanych technik z obszaru analizy obrazu, w tym splotowych sieci neuronowych, co czyni z jej pracy prawdziwie multidyscyplinarny projekt.

## 2. Ocena zawartości rozprawy

Układ pracy jest logiczny i spójny. Podział treści jest właściwy i ściśle podporządkowany uzasadnieniu tezy rozprawy, która została sformułowana następująco:

Właściwe wstępne przetwarzanie danych pomiarowych pochodzących z sekwencji zdjęć fluoroskopowych, z wykorzystaniem wiedzy eksperckiej wspartej działaniem zoptymalizowanej spłotowej sieci neuronowej, pozwala na zautomatyzowaną identyfikację uniwersalnej struktury modelu stawu kolanowego uwzględniającego różnice anatomiczne pacjentów.

Teza ta jest oryginalna i świadczy o bardzo dobrej znajomości aktualnych badań naukowych dotyczących modelowania kinematyki stawu kolanowego i identyfikacji parametrów tego modelu z wykorzystaniem metod analizy obrazu, w tym bazujących na sieciach neuronowych. Wykazuje też, że Autorka potrafi formułować nowe, ambitne zadania badawcze z pogranicza wielu dyscyplin naukowych oraz dążyć do ich co najmniej zadawalającego rozwiązania.

Praca została podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów, podsumowanie i dwa dodatki. Literatura obejmująca 121 pozycji jest bardzo trafnie dobrana, i niemal wszystkie zestawione publikacje są cytowane w rozprawie. Niewiele, bo tylko dwie z tych pozycji są współautorstwa mgr Drażkowskiej i są to artykuły konferencyjne, jednakże posiada ona w swoim dorobku także dwie publikacje w czasopismach z listy JCR i kilka dalszych artykułów z konferencji międzynarodowych.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autorka przedstawia ogólne spojrzenie na proces identyfikacji modelu kinematyki, rozumianego jako związki geometryczne występujące między poszczególnymi elementami stawu ludzkiego. Omawia kolejne kroki związane z tym procesem, które dalej będą rozwinięte jako kolejne części pracy. Wprowadza podstawowe oznaczenia układów współrzędnych dla konkretnie badanego stawu kolanowego, formułuje problem badawczy, proponowaną dekompozycję na model pozycji i orientacji oraz stosowaną nomenklaturę. Daje ogólny opis istniejących rozwiązań, do których porównane zostaną wyniki uzyskane w pracy. Autorka formułuje tezę i szczegółowe założenia rozprawy oraz precyzyjnie (w tym za pomocą czytelnego grafu Sch. 1.1) pokazuje proces rozwiązywania problemu.

Kolejny rozdział to solidny przegląd literatury przedmiotu, zarówno w odniesieniu do stosowanych modeli stawu kolanowego, jak i podejścia do identyfikacji modelu na podstawie zdjęć medycznych. Recenzowana praca stosuje podejście funkcjonalne i empiryczne do tworzenia i analizy modelu, które wymaga więcej danych pomiarowych, ale ma szansę być bardziej precyzyjne i odporne na błędy w analizie obrazu.

Cztery następne rozdziały szczegółowo omawiają proces przygotowania i przetwarzania danych, określania konfiguracji stawu, właściwej identyfikacji modeli i porównanie wszystkich modeli rozważanych w pracy oraz znanych z literatury. Na etapie wstępnego przetwarzania danych Autorka korzysta z medycznej wiedzy eksperckiej do wyboru anatomicznych cech kości stawu kolanowego, a następnie pokazuje dwie metody ekstrakcji tych cech kluczowych w sekwencjach obrazów fluoroskopowych. Wybór właściwych cech jest niebanalny z uwagi na rodzaj zebranych danych i możliwość automatycznego oznaczenia punktów kluczowych definiujących te cechy, różnorodność wieku pacjentów, patologie i ciała obce w obrębie stawu

oraz protokół badań, który nie był opracowywany specjalnie dla potrzeb identyfikacji, ale na potrzeby innych procedur medycznych. Te trudne warunki początkowe wymagały od Autorki sporych umiejętności w odpowiednim doborze narzędzi analizy obrazu, nie wspominając o nakładzie pracy. Przedstawia dwie metody wykrywania punktów kluczowych: klasyczna obróbka obrazu z wykorzystaniem adaptacyjnego progowania oraz zastosowanie uczenia maszynowego i konwolucyjnych sieci neuronowych. Obie metody okazały się niezbędne, gdyż żadna z nich nie umożliwiała automatycznego wyznaczenia wszystkich kluczowych cech kości. W pierwszej metodzie Autorka analizuje błędy automatycznej estymacji cech w porównaniu z oznaczeniem przez eksperta, które okazują się bardzo niskie. W drugiej metodzie istotą była optymalizacja struktury sieci, którą udało się Autorce zautomatyzować. Proces optymalizacji zakładał możliwą zmienność aż 17 parametrów, przy czym kilka z nich wykazywało szeroki zakres zmienności – uzyskany efekt był wielokrotnie lepszy niż wynikły z ręcznego doboru parametrów. Szczegóły techniczne związane z procesem uczenia maszynowego opisano w Dodatku B.

Kolejny etap – opisany w rozdziale czwartym – wymagał niezależnego określenia konfiguracji obu kości na podstawie punktów kluczowych i dalej wyliczenia konfiguracji stawu kolanowego. Z uwagi na różnorodne źródła określenia punktów kluczowych Autorka rozróżnia także różne konfiguracje stawu, które dalej wykorzystywane są w różny sposób w procesach identyfikacji, walidacji i porównania z innymi modelami znanymi z literatury. W rozdziale tym pojawia się także zagadnienie nakładania obrazów z danej serii z wykorzystaniem oznaczonych punktów kluczowych kości udowej. Choć nie jest to zagadnienie bezpośrednio wykorzystane w dalszej identyfikacji, pokazuje możliwość automatyzacji tego użytecznego dla lekarzy procesu oraz niewielką rozbieżność w jakości nałożenia ręcznego oraz automatycznego dla trzech różnych metod optymalizacji. Pokazuje także poprawność poprzednich kroków badań, w tym właściwy dobór cech anatomicznych kości.

Rozdział 5 to zasadniczy proces identyfikacji modelu kinematyki przeprowadzony dwiema drogami: z przyjętą strukturą modelu i z szukaniem struktury, przy czym struktura dotyczy niezależnie podmodeli pozycji i orientacji przyjętych na początku pracy. W pierwszym podejściu Autorka porównuje cztery struktury dla modelu pozycji – przy czym zaproponowane przez nią uogólnienie znanej z literatury aproksymacji okręgiem przez aproksymację elipsą daje najlepsze wyniki. W przypadku podmodelu orientacji struktura jest nieco prostsza (wyrażona wielomianem o stopniach 1 i 2). Dla tych struktur Autorka dokonuje identyfikacji parametrów modelu dla pięciu pacjentów i stara się wyciągnąć uogólniające wnioski. W drugim podejściu poszukiwanie struktury modelu zostaje uporządkowane na dwa sposoby: w grupie modeli analitycznych wyrażonych w postaci wielomianów o stopniach do 4 włącznie oraz w grupie modeli wykorzystujących jednokierunkowe sieci neuronowe o ograniczonej liczbie warstw ukrytych (do 4) i neuronów w warstwie (do 50 w przypadku modelu pozycji i 120 w przypadku modelu orientacji). Przy czym poza kryterium występowania jednej struktury dla wszystkich pacjentów i najlepszego dopasowania do danych pomiarowych, wprowadzono wymóg minimalizacji skomplikowania struktury (wyrażony minimalizacją liczby parametrów). W przypadku doboru struktury sieci neuronowej Autorka zgrabnie przeformułowała zadanie identyfikacji oraz przygotowuje dane uczące, aby poradzić sobie z problemem uwikłanej postaci zależności w modelu pozycji oraz wymogiem zachowania jednej struktury sieci dla

opisu modelu przy indywidualizacji jego postaci dla poszczególnych pacjentów. W obszarze wyszukiwania optymalnej postaci modelu Doktorantka korzysta z kolejnego narzędzia matematycznego i informatycznego, jakim jest teoria grafów i odpowiednio zmodyfikowany algorytm A\*. Rozdział kończy rozbudowana prezentacja otrzymanych wyników i wybór najlepszych modeli do dalszej analizy, którą stanowi walidacja i porównanie z modelami znanymi z literatury.

Walidacja trzech zaproponowanych modeli następuje dla innych zbiorów danych niż wcześniejsza identyfikacja i pokazuje przewagę modeli analitycznych nad bazującymi na sieciach neuronowych. Spośród tych pierwszych rozwiązanie bardziej złożone wykazuje co prawda mniejsze błędy wyjściowe dla całościowego modelu stawu kolanowego, jednak dodatkowy test statystyczny F pokazał, że różnica błędów między tym rozwiązaniem a rozwiązaniem prostszym nie jest statystycznie znacząca. Model M1 stworzony przez Doktorantkę został dalej porównany z trzema modelami znanymi z literatury przedmiotu, pokazując nieznacznie lepszą dokładność odwzorowania kinematyki stawu kolanowego niż model czworoboku przegubowego oraz zdecydowanie lepszą dokładność niż modele predykcyjne zaczerpnięte z publikacji 52 i 65. Dyskusja przedstawiona w tym rozdziale jest dojrzała naukowo, a wnioski logiczne.

Praca jest zakończona zwięzłym podsumowaniem odnoszącym się do tezy i założeń rozprawy oraz wskazującym dalsze ambitne kierunki badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autorki rozprawy uważam:

- Dobór zestawu cech anatomicznych kości stawu kolanowego oraz punktów kluczowych definiujących te cechy, pozwalających na automatyzację ich oznaczenia na zdjęciach fluoroskopowych, przy zapewnieniu dużej odporności na różnorodność wieku pacjentów, patologie i ciała obce w obrębie stawu oraz sposób wykonania zdjęć. Stworzenie algorytmów obróbki obrazu do wyznaczania pozycji tych punktów, w tym wykorzystanie (z dobrym skutkiem) konwolucyjnych sieci neuronowych. Ten etap projektu wymagał ścisłej współpracy z lekarzami oraz zapoznania się i wykorzystania zaawansowanych narzędzi z obszaru analizy obrazu i uczenia maszynowego.
- Zaproponowanie dekompozycji modelu stawu kolanowego na submodel pozycji i orientacji, co uprościło proces identyfikacji.
- Opracowanie szeregu algorytmów pozwalających na automatyczny dobór struktury tych modeli i identyfikację ich parametrów. Umiejętne zautomatyzowanie tego procesu pozwoliło na analizę bardzo dużej liczby możliwych rozwiązań i wybór optymalnych. Porównanie uzyskanego opisu z modelami znanymi z literatury pokazuje poprawę dokładności odwzorowania rzeczywistości. Stworzona metodologia wydaje się dość uniwersalna do zastosowania w rozwiązaniu innych problemów inżynierskich lub z obszaru medycyny.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Biorąc pod uwagę złożoną strukturę modelu o skomplikowanym kształcie, jak np. funkcję  $S_q(3,4)$  pokazaną na Rys. 5.7, w jaki sposób odbywa się wyznaczenie zbioru dyskretnego

$[\hat{x}_q, \hat{y}_q]$  według schematu (1.11)? Jak rozumiany jest wówczas rzut ortogonalny na krzywą, jak uniknąć wieloznaczności?

2. Na stronie 62 wiersz 10 od góry opisane jest przekształcenie obrazów za pomocą macierzy transformacji o wymiarze  $3 \times 3$ , przekształceniu zaś mają podlegać wektory kolumnowe o wymiarze  $2 \times 1$ , jak realizowane jest to przekształcenie?
3. Ważnym elementem pracy jest automatyzacja procesu identyfikacji, a w automatyzacji zazwyczaj ważnym wyznacznikiem jest skrócenie czasu trwania procesu. Jednak w końcowym porównaniu modeli brana jest pod uwagę jedynie precyzja odwzorowywania rzeczywistości. Czy możliwe jest porównanie także czasów tworzenia (i może kosztu obliczeniowego) różnych modeli stawu kolanowego określonych pacjentów?
4. W całej pracy stosowana jest forma oparty o... (np. algorytm oparty o splotowe sieci neuronowe), podczas gdy w tym kontekście właściwa w języku polskim jest forma oparty na... lub wykorzystujący...
5. W pracy dostrzegłem niewielką liczbę usterek technicznych i językowych: s. 19 w. 12 od góry: *przedstawionej*, s. 20 w. 13 od góry: *z akwizycją*, s. 24 w. 18 od dołu: *Opiekunowie*, s. 26 Rys. 3.2: *piętnastolatka*, s. 31 w. 20 od góry: *wyznaczone są na bazie*, s. 31 w. 12 od dołu: *przedstawiona*, s. 32 w. 19 od dołu: *wykazują tę samą*, s. 32 w. 16 od dołu: *chyba powinno być kolorem czerwonym*, s. 32 w. 7 od dołu: *na ustaleniu*, s. 43 brak numeru wzoru, s. 61 w. 16 od dołu: *opisywały tę część*, s. 62 w. 12 od dołu: *dodatkowe punkty*, s. 75 w. 20 od góry: *chyba powinno być zmiennej x wyższe niż*, s. 79 w. 11 od góry: *opisanego w Tab. 3.4*, s. 79 w. 11 od dołu: *odpowiadających*, s. 84 Tablica 5.7 ma odwrotnie oznaczone kolorowe linie, s. 88 Rys. 5.11 powinien mieć jednakową skalę na obu osiach podobnie jak Rys. 5.7, aby można je wizualnie porównać, s. 93 w. 8 od góry błąd gramatyczny, s. 100 w. 9 od dołu: *predykcyjne* s. 103 w. 16 od dołu: *może ugięte pod różnymi kątami*.

#### 4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wymienione uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie umniejszają podstawowych zalet rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że mgr inż. Marta Drażkowska wykazała się znakomitymi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka i robotyka. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy odpowiada w pełni wymogom stawianym przez art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Praca jest obszerna i bardzo starannie zredagowana, i może być bazą dla rozwoju kariery naukowej Autorki.

