

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Założenia do budowy modelu numerycznego kończyny górnej

Aleksandra Dejneka¹, Łukasz Mazurkiewicz¹, Jerzy Malachowski¹

¹Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: aleksandra.dejneka@wat.edu.pl, lukasz.mazurkiewicz@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Celem publikacji jest zaprezentowanie etapowego procesu rozwoju modelu numerycznego spersonalizowanego układu mięśniowo – kostnego kończyny górnej człowieka z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Opracowany model dyskretny w swojej końcowej postaci został zbudowany z wykorzystaniem elementów belkowych i bryłowych wraz ze zdefiniowanym opisem interakcji pomiędzy poszczególnymi elementami układu. Na opisywany numerycznie układ składają się trzy mięśnie i układ czterech kości. Wymiary geometryczne do zbudowania finalnych modeli geometrycznych, które posłużyły następnie do przekształcenia ich w model numeryczny, pozyskano na podstawie obrazów uzyskanych z rezonansu magnetycznego kończyny górnej. Model numeryczny kończyny charakteryzuje się zaimplementowaniem różnego typu elementów skończonych wraz z przypisaniem do nich modeli konstytutywnych, które w swoim opisie zawierają odwzorowanie zarówno części pasywnej, jak i aktywnej mięśnia. Wartości parametrów opisujących aktywną część mięśnia wyznaczono na podstawie badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Pozostałe parametry zaczerpnięto z literatury ze względu na brak możliwości przeprowadzenia pomiarów *in vivo*. Opracowany model posłuży do odwzorowania w drodze symulacji komputerowej ruchu zgięcie – wyprost realizowanego w stawie łokciowym.

SŁOWA KLUCZOWE: MES, mięśnie, Hill

1. Wstęp

Mięśnie to rodzaj tkanki, która może się kurczyć, tym samym skracać, wytwarzając siłę ciągnącą zdolną do generowania ruchu. W przeciwieństwie do mięśni gładkich czy mięśnia sercowego, mięśnie poprzecznie prążkowane, zwane też mięśniami szkieletowymi, pracują zależnie od naszej woli. Struktura mięśnia szkieletowego składa się z brzośca, który zbudowany jest z włókien mięśniowych oraz ścięgien, które połączone ze strukturą kości pozwalają na realizację ruchu [1].

W ostatnich latach symulacje z wykorzystaniem metody elementów skończonych stały się najbardziej efektywną metodą badań związanych z aktywnością mięśni, znajdując główne zastosowanie w badaniach testowych typu crash [2]. Mięśnie szkieletowe modelowano za pomocą elementów jednowymiarowych opisanych modelem materiałowym Hill'a [3-4]. W przypadku budowy modelu dyskretnego kończyny górnej tylko elementami jednowymiarowymi, dużą trudnością jest poprawny opis procesu interakcji pomiędzy poszczególnymi częściami układu opisującymi złożoną geometrię mięśni. Rozwiązaniem może być podejście hybrydowe, tj. połączenie elementów jednowymiarowych umożliwiających przenoszenie wartości sił oraz elementów trójwymiarowych odwzorowujących objętości mięśni i umożliwiających wyznaczenie towarzyszącego wyężenia [5]. Istnieją prace, w których mięśnie zamodelowano właśnie poprzez dwa typy elementów nadając elementom belkowym charakterystyki aktywne – odpowiedzialne za skurcz mięśni, a elementom objętościowym charakterystykę pasywną. Jednakże ten typ

modelowania nie zapewniał procesu interakcji pomiędzy wspomnianymi częściami mięśnia [2].

Przesłaniem tej pracy jest zaprezentowanie modelu dyskretnego odwzorowującego zarówno część pasywną i aktywną mięśnia poprzez wykorzystanie elementów belkowych i bryłowych z uwzględnieniem współdzielenia węzłów. Należy podkreślić, iż parametry niezbędne do opisu aktywnej fazy pracy mięśnia zostały wyznaczone na drodze testów eksperymentalnych i obliczeń analitycznych.

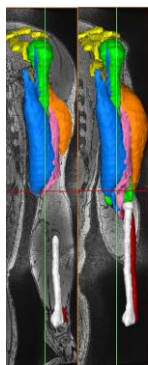
2. Opis badanego układu

Ze względu na występujące różnice fizjologiczne pomiędzy ludźmi, wszystkie badania eksperymentalne oraz prowadzone analizy numeryczne z natury mają charakter spersonalizowany.

Geometria kończyny górnej obejmująca kości oraz mięśnie wyznaczono na podstawie zobrazowania metodą rezonansu magnetycznego (rys. 1). W oprogramowaniu Mimics wyselekcjonowano do analizy objętości trzech mięśni (mięsień dwugłowy ramienia, trójgłowy ramienia, ramienny) i czterech kości (kość ramienna, łokciowa, promieniowa, obojczyk) (rys. 2). Gotową geometrię kończyny zaimplementowano do programu Altair Hypermesh w celu stworzenia siatki elementów skończonych. W kolejnym etapie opracowany model dyskretny przeniesiono do programu LS-PrePost, w którym zdefiniowano warunki początkowo-brzegowe do opisu ruchu kończyny.



Rys. 1.
Rezonans
magnetyczny



Rys. 2. Model geometryczny po przetworzeniu obrazów DICOM w Mimics

3. Opis modelu numerycznego i definicja warunków początkowo-brzegowych

Chcąc jak najdokładniej odwzorować nieregularny kształt kości zamodelowano je za pomocą elementów czworościennych typu tetra. Płaski mięsień ramienny, znajdujący się pod mięśniem dwugłowym ramienia i nieaktywujący się podczas założonego ruchu układu zamodelowano elementami czworościennymi typu tetra II rzędu. Geometrię mięśnia dwugłowego i trójgłowego ramienia podzielono na części, wydzielając obszar bliiski ścięgom, charakteryzujący się zwężeniami oraz obszar brzucha mięśniowego. Obszary bliskie ścięgom odwzorowano elementami czworościennymi typu tetra II rzędu a brzusce mięśniowe elementami sześciennymi typu heksa w celu uwzględnienia współdzielenia węzłów z elementami belkowymi opisującymi aktywne właściwości mięśni. Ścięgna mięśni opisano dyskretnymi elementami sprężystymi.

Tabela 1. Zestawienie typów i liczby elementów skończonych w modelu numerycznym kończyny górnej

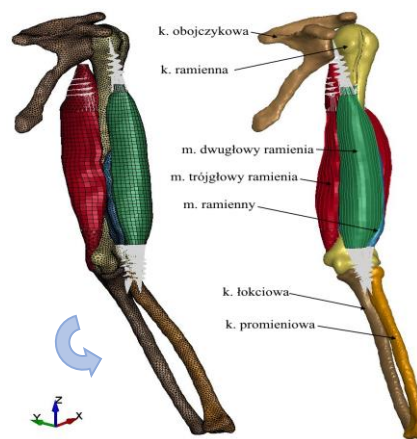
3D	Heks	Tetra II rzędu	Tetra
l. elem.	5 554	37 411	124 281
1D	Belki	Sprężyny	Razem 3D i 1D
l. elem.	6 815	488	167 246

Materiał kości opisano sprężystym modelem materiałowym MAT_ELASTIC. W celu uwzględnienia nieliniowej charakterystyki pasywnej części mięśnia wykorzystano hiperelastyczny (nieściśliwy) model MAT_O_OGDEN_RUBBER. W obu przypadkach wartości parametrów materiałowych zaczerpnięto z literatury [3, 5]. Belki, opisujące aktywną część mięśni, opisano materiałem Hill'a – MAT_MUSCLE, gdzie wartości parametrów materiałowych oraz przebiegi charakterystyk wyznaczono na drodze badań eksperymentalnych i obliczeń analitycznych. Ścięgna opisano nieliniowym modelem materiałowym SPRING_NONLINEAR_ELASTIC. Właściwości mechaniczne elementów sprężystych zaczerpnięto z literatury [6].

Projektowana w rozwijanym modelu dyskretnym symulacja ma odwzorować ruch zgięcia i wyprostu w stawie łokciowym w płaszczyźnie YZ (rys. 3). W związku z tym, w miejscu stawu łokciowego stworzono połączenie obrotowe (zawiasowe) umożliwiające wykonanie założonego ruchu kości. Wymuszenie układu

następuje w wyniku skracania elementów belkowych reprezentujących aktywną część mięśnia. Model mięśni Hill'a pozwala wytworzyć siłę mięśni zgodnie z poziomem aktywacji. Krzywe aktywacji poszczególnych mięśni wyznaczono na podstawie badań elektromiograficznych. Wykorzystanie w modelu elementów objętościowych umożliwi uwzględnienie interakcji pomiędzy mięśniami i strukturą kostną poprzez implementację procedur kontaktowych typu SLIDING_ONLY_PENALTY pozwalających realizację wzajemnego przemieszczenia się segmentów elementów względem siebie odwzorowując interakcję mięsień – mięsień, mięsień – kość.

Analizy numeryczne zostaną przeprowadzone przy użyciu niejawnej metody całkowania (schemat Newmarka) z wykorzystaniem solvera LS-DYNA (LSTC, USA).



Rys. 3. Model dyskretny kończyny górnej

4. Podsumowanie

Proces opracowania modelu składał się z trzech głównych etapów:

- I. Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego badanego układu kończyny górnej.
- II. Przetworzenie obrazów DICOM w celu wyznaczenia geometrii i jej obróbka w celu wypracowania finalnych kształtów.
- III. Opracowanie finalnej wersji modelu dyskretnego wraz ze zdefiniowaniem warunków początkowo-brzegowych do opisu ruchu kończyny.

Kolejnym etapem badań będą analizy testowe i walidacja modelu na bazie otrzymanych wyników analiz odnosząc się do przeprowadzonych badań eksperymentalnych na stanowisku Biodex.

Praca została napisana w ramach realizacji uczelnianego grantu badawczego wspieranego przez Wojskową Akademię Techniczną (nr UGB 22-765/2022).

Literatura

- [1] Bober T., Zawadzki J., *Biomechanika układu ruchu człowieka*, 2006
- [2] Toyota Central R&D Labs., INC., *Total Human Model for Safety (THUMS) AM50 Occupant Model v. 6.1.*, 2021.
- [3] Silvestri Ch., Mongiardini M., Ray M. H., *Improvements and Validation of an Existing LSDYNA Model of the Knee-Thigh-Hip of a 50th Percentile Male Including Muscles and Ligaments*, 7th European LS-DYNA Conference, 2009.
- [4] LS-DYNA R10.0 *Keyword User's Manual*, vol. II, Material Models
- [5] Fan L., Hongeng L., Wei H., Sicheng S., Bingyu W., *Simulation of muscle activation with coupled nonlinear FE models*, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Vol. 16, No. 6, 2016.
- [6] Wojnicz W., *Biomechaniczne modele układu mięśniowo-szkieletowego człowieka*, 2018.