

Problematyka numerycznego odwzorowania dynamicznej pracy mięśni

Damian Kołodziejczyk^{1,a)}, Kamil Sybilski^{1,b)}, Jerzy Małachowski^{1,c)}

*Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2, 01 – 476*

^{a)} damian.kolodziejczyk@wat.edu.pl

^{b)} kamil.sybilski@wat.edu.pl,

^{c)} jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Abstrakt. W pracy przedstawiono przegląd obecnie stosowanych metod modelowania mięśni w analizach dynamicznych. Bazując na nim opracowano modele numeryczne, które następnie testowano w aspekcie poprawności odwzorowywania wybranych grup mięśni. Na podstawie wyników przedstawiono wady i zalety oraz ograniczenia stosowania poszczególnych podejść.

WPROWADZENIE

Współczesne kody obliczeniowe pozwalają na modelowanie układów biomechanicznych w dowolnych konfiguracjach [1, 2]. Modele tego typu rozwijane są dwukierunkowo: modele pozwalające na analizę systemu pobudzenia mięśniowego, w tym mechanizmy sterowania podczas ruchu oraz modele realistycznie odwzorowujące wybrane grupy mięśni, w tym całych układów biomechanicznych [3]. Znajdują one zastosowanie między innymi do modelowania ruchu oraz do obserwacji zjawisk fizjologicznych. Modele stanowiące drugi kierunek wymagają skomplikowanych, czasochłonnych obliczeń, stąd też ich stosowanie ogranicza się do odwzorowywania pojedynczych mięśni, rzadko do opisu ruchu większych grup mięśni czy stawów. Modelowanie układów biomechanicznych w kontekście analizy ruchu możliwe jest na kilka sposobów. Różnorodność numerycznych modeli mięśni pozwala na wybór modeli materiałowych dedykowanych dla poszczególnych grup mięśniowych, w zależności od ich specyfikacji [2, 4].

SPOSOBY MODELOWANIA MIĘŚNI

Celem niniejszej pracy była analiza właściwości mechanicznych oraz stabilności dynamicznej mięśnia przy użyciu różnych podejść do modelowania. Rozpoczynając od uproszczonych modeli 1D, w których pojedynczy mięsień zastępuje się elementem jednowymiarowym sprężystym lub belkowym, aż po modele stanowiące połączenie dwóch podejść 1D/2D oraz 1D/3D. Podejście z wykorzystaniem elementu 1D pozwala na odwzorowanie sprężystego zachowania się mięśnia, w tym również na uruchomienie procedury aktywacji (skurczu) tego mięśnia [5, 6]. Elementy dyskretne typu sprężyna umożliwiają zdefiniowanie podstawowych parametrów sprężystych mięśnia, a specjalna krzywa aktywacji umożliwia wprowadzenie skurczu mięśnia w ściśle określony sposób. Model materiałowy przypisywany elementowi sprężystemu oparty jest na teorii Hilla.

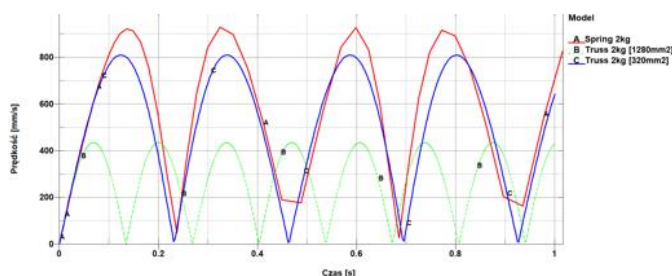
Równanie Hilla to pierwsze, do dziś jedno z podstawowych, podejście do numerycznego opisu pracy mięśnia. Hill jak pierwszy wyprowadził model funkcjonalny mięśnia. Model numeryczny z wykorzystaniem sprężyny pozwala zdefiniować początkową długość mięśnia, maksymalną prędkość skracania oraz szczytową siłę izometryczną. Rozwinięciem tego modelu jest model 1D wykorzystujący element typu belka do odwzorowania pracy mięśnia. Podobnie jak w elemencie typu sprężyna, pojedynczy element belki zastępuje pojedynczy mięsień. Model ten pozwala

na zdefiniowanie gęstości mięśnia, powierzchni przekroju poprzecznego, początkowego współczynnika rozciągania, maksymalnej szybkości odkształcania, szczytowego naprężenia izometrycznego i stałej tłumienia [5].

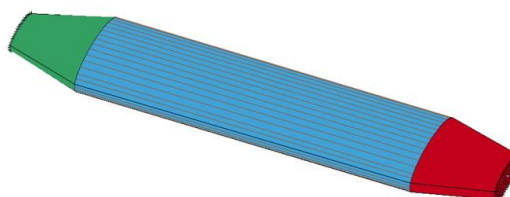
Kolejnym podejściem do modelowania jest połączenie elementów 1D z elementami płytowymi lub bryłowymi [5, 7]. W układach takich elementy 2D oraz 3D odpowiadają za odwzorowanie części pasywnej mięśnia natomiast elementy 1D usytuowane na konkretnych kierunkach odwzorowują skurcz poszczególnych włókien, część aktywna mięśnia, odpowiadają tym samym za jego pracę. W rozwiązaniach takich możliwe jest odwzorowanie pełnego modelu mięśnia.

WYNIKI ANALIZ

W niniejszej pracy przeanalizowano wszystkie wymienione w punkcie wyżej podejścia. Przeanalizowane warianty posiadały zarówno zalety jak i wady, dzięki czemu możliwe było wykazanie, dla jakich wariantów modelowania mięśni skuteczne są konkretne podejścia. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki analiz.



Rysunek 1. Przykładowy przebieg prędkości końca swobodnego mięśnia pod wpływem obciążenia



Rysunek 2. Trójwymiarowy model MES mięśnia

PODZIĘKOWANIE: Praca powstała w ramach projektu “3D-JAW” (*Opracowanie trójwymiarowego modelu stawu skroniowo-żuchwowego w celu odwzorowania działania aparatu kostno-chrzęstno-więzadłowego dla efektywnej komercjalizacji wyników w protezycie, ortodoncji i chirurgii ortognatycznej*; POIR.04.01.02-00-0029/17).

REFERENCJE

1. T. Erhat, *Pulley Mechanism for Muscle or Tendon Movements along Bones and around Joints*, Livermore Software Technology Corp., October 2012.
2. B. Fréchéde, Y. Lafon, 2016, *Volumic deformable approaches for muscles in musculoskeletal modelling: Issues and perspectives*, Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Choc, Université Claude Bernard Lyon 1.
3. J. Margielewicz, *Modelowanie numeryczne w rozpoznawaniu stanów biomechanicznych układu stomatognatycznego*, Monografia, Polskie Towarzystwo Inżynierii Medycznej, Zabrze 2010.
4. *Ls-Dyna Keyword User's Manual Volume II Material Models*, Ls-Dyna R7.1, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), May 19, 2014 (revision : 5442).
5. S. Mendes, *The development of an improved finite element muscle model and the investigation of the pre-loading effects of active muscle on the femur during frontal crashes*, Master of Science Thesis, Worcester Polytechnic Institute, April 29, 2010.
6. A. T. Dibb, A. Narvekar, R. W. Nightingale, and B. S. Myers, *A Comparison of Methods for Modeling Neck Muscle Wrapping in Finite Element Models*, Injury Biomechanics Research, Proceedings of the Thirty-Fifth International Workshop.
7. FAN LI, *Simulation of muscle activation with coupled nonlinear fe models*, Journal of Mechanics in Medicine and Biology Vol. 16, No. 6 (2016) 1650082 (14 pages).