

GŁOWIŃSKI Sebastian

MODELOWANIE DYNAMIKI STAWU KOLANOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono budowę i scharakteryzowano liczbę stopni swobody stawu kolanowego. Na podstawie modelu rzeczywistego opracowano model komputerowy stawu z zaimplementowanymi parametrami charakteryzującymi układ mięśniowy. W modelu uwzględniono oddziaływania mięśni oraz więzadeł na układ szkieletowy, zjawiska kontaktu pomiędzy udem i podudziem, a także pomiędzy udem i rzepką. Model został wykorzystany do przeprowadzenia symulacji ruchu kolana. Zaproponowany model przestrzenny stawu kolanowego umożliwił dokonanie analizy rozkładu sił i momentów oddziałujących na poszczególne części stawu. Przeanalizowano deformację ścięgien mięśniowych i uzyskane wyniki zobrazowano na wykresach.

WSTĘP

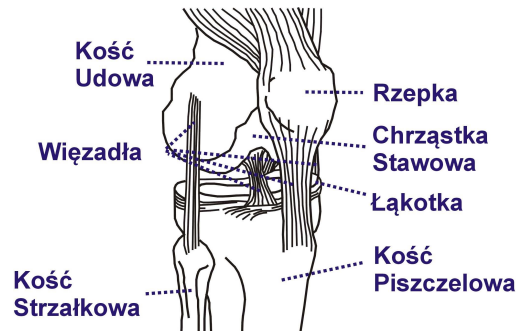
Badanie i analiza obciążeń stawu kolanowego (łac. *articulatio genus*) jest od wielu lat w ciągłym zainteresowaniu naukowców [5]. Bardzo duża liczba operacji kolana przeprowadzanych na całym świecie świadczy o konieczności dokładnego poznania mechanizmu i sił występujących podczas ruchu człowieka w stawie kolanowym [4]. Jest to drugi (po stawie skokowym) najbardziej narażony na obciążenia staw człowieka i siły które są przenoszone przez niego osiągają maksymalne wartości nawet 3000 N, dlatego też niezbędne jest opracowanie modelu komputerowego, który pozwoli na analizę sił i oddziaływań pomiędzy poszczególnymi elementami stawu. Opracowany model może być z powodzeniem wykorzystany do analizy wytrzymałościowej stawu kolanowego osób narażonych na deformacje i szybsze zużycie jak w przypadku sportowców i osób starszych.

1. STAW KOLANOWY

1.1. Budowa

Przed rozpoczęciem modelowania niezbędne jest poznanie budowy i podstawowych funkcji stawu kolanowego. Szczegółowy opis można znaleźć przykładowo w [1, 8, 9]. Staw kolanowy należy do największych stawów człowieka i ma złożoną budowę (jest to staw zawiasowy zmodyfikowany). Składa się z powierzchni stawowych trzech kości: udowej, piszczelowej i rzepki (trzeszczki). Płaską stawową powierzchnię piszczeli uzupełniają dwie półksiężycowe chrząstki włókniste, które nazywa się łąkotkami stawowymi (łac. *menisci articulares*). Staw kolanowy umożliwia ruchy zginania i prostowania, ale w zgięciu możliwe są również ruchy rotacyjne z wyjątkiem maksymalnego kąta). Wzmocniony jest więzadłami zewnętrznymi (pobocznym i torebki stawowej) i krzyżowymi (przednim i tylnym). Więzadła poboczne są napięte przy wyprostowanym kolanie i uniemożliwiają ruchy boczne goleni przy tym położeniu (rysunek 1). Podstawowym ruchem zachodzącym pomiędzy kością udową

a piszczelową jest połączenie ruchu toczenia ze ślizganiem [2]. Na ten ruch nakłada się dodatkowo ruch rotacyjny. W początkowej fazie zginania kolana występuje ruch toczenia bez poślizgu, następnie do tego ruchu dołącza się poślizg. W czasie zginania więzadła poboczne rozluźniają się i zmniejsza się stabilność kolana w płaszczyźnie czołowej. W tym momencie istnieje możliwość ruchów rotacyjnych w stawie. W końcowej fazie wyprostowania dochodzi do ruchu rotacji zewnętrznej piszczeli i do zablokowania stawu w wyproście.



Rys. 1. Budowa stawu kolanowego

1.2. Modele stawu kolanowego – analiza strukturalna

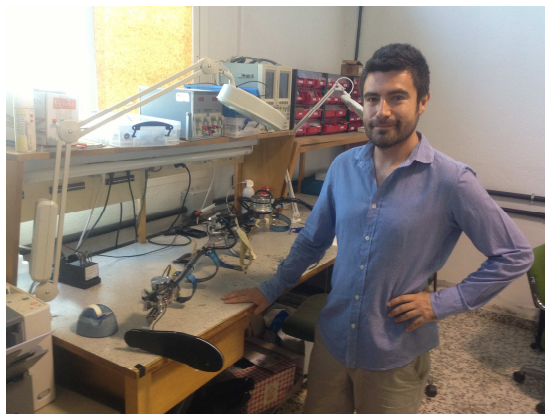
Jedną z najważniejszych rzeczy jest dobranie układu współrzędnych i określenie liczby stopni swobody stawu kolanowego. Staw kolanowy jest określony przez sześć stopni swobody: trzy stopnie przesunięcia (o kierunku przednio - tylnym, przyśrodkowo – bocznym oraz kompresja – dystrakcja) i trzy stopnie ruchów obrotowych (prostowanie – zginanie, przywodzenie – odwodzenie oraz rotacja wewnętrzna - zewnętrzna). Ruchliwości stawu kolanowego można dokonać przy użyciu wzoru Kutzbacha

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (1)$$

gdzie:

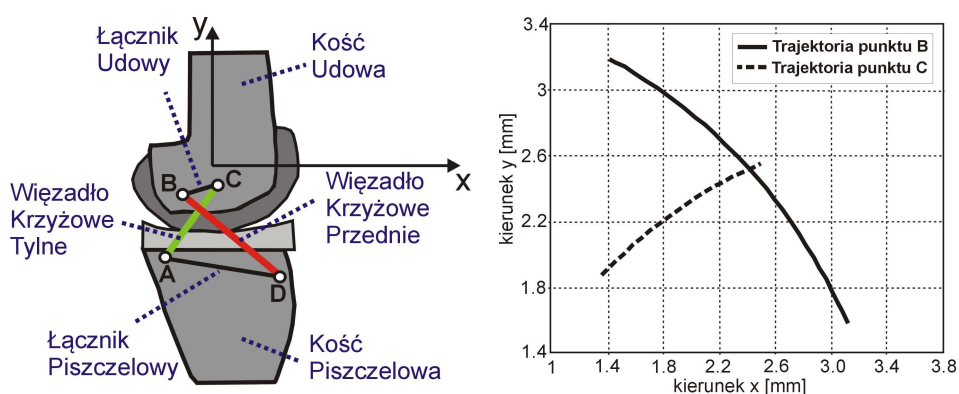
- n - liczba członów ruchomych;
- p_i - liczba par kinematycznych klasy i .

Najprostsze modele traktują staw kolanowy jako posiadający jeden stopień swobody [6]. Bardziej skomplikowany model uwzględniający rzeczywisty ruch stawu kolanowego zaproponowany przez Goodfellow i O'Connor [7], jest oparty na zamkniętym łańcuchu kinematycznym.



Rys. 2. Egzoszkielet kończyny dolnej z 4-członowym mechanizmem stawu kolanowego
Źródło: [8]

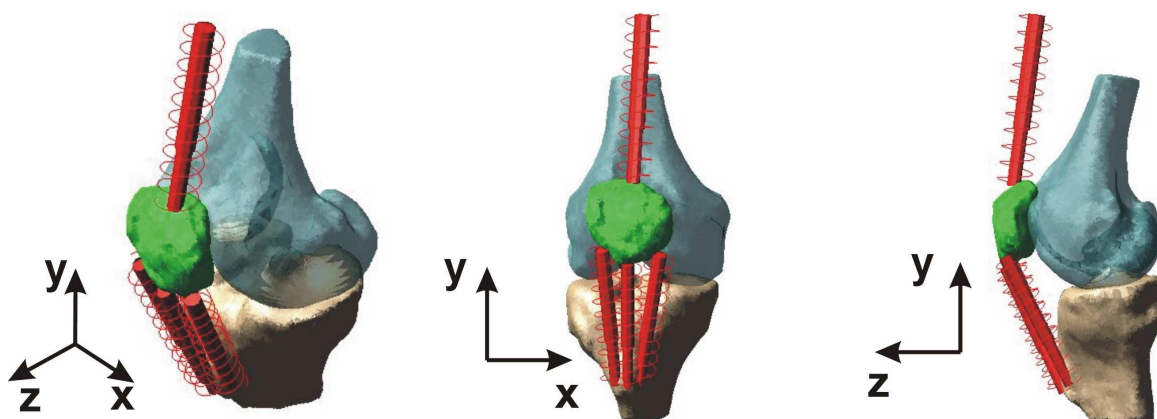
Taki mechanizm pracuje jak staw kolanowy, jednak podczas ruchu istnieje możliwość „zakleszczania się” oraz może wystąpić utrata właściwych konfiguracji przy rzeczywistych obciążeniach. Ponadto może wystąpić przekroczenie dopuszczalnych sił działających na elementy stawu, co prowadzi do jego uszkodzenia. Z tą problematyką spotkano się podczas opracowywania egzoskieletu kończyn dolnych w Group Bioengineering CSIC Madryt [8]. Jako połączenie części udowej z piszczelową zastosowano ten mechanizm (rysunek 2), jednak po wielu testach zrezygnowano na rzecz mechanizmu o jednym stopniu swobody, bardziej uproszczonego i stwarzającego mniej problemów. Po wprowadzeniu parametrów antropometrycznych do skryptu opracowanego w pakiecie Matlab w zakresie zginania stawu kolanowego od stanu wyprostowanego 0° do maksymalnej wartości 150° , uzyskano trajektorie punktów B i C (rysunek 3).



Rys. 3. Elementy modelu stawu kolanowego z trajektorią ruchu punktów B i C

1.3. Model komputerowy

Najważniejszą częścią symulacji jest dobór odpowiednich parametrów poszczególnych elementów stawu kolanowego. Jest to model kolana mężczyzny w wieku 77 lat o wzroście 196 cm i masie 99,8 kg (rysunek 4). Model kostny składa się z rzepek, główki kości piszczelowej i główki kości udowej. Mięśnie zamodelowano jako połączenie elementu sprężynującego z tłumiącym [3, 9]. Współczynniki sztywności i tłumienia dobrano na podstawie literatury. Założono, że pomiędzy elementami stawu nie występuje tarcie. Zaimplementowane parametry przedstawia tabela 1.



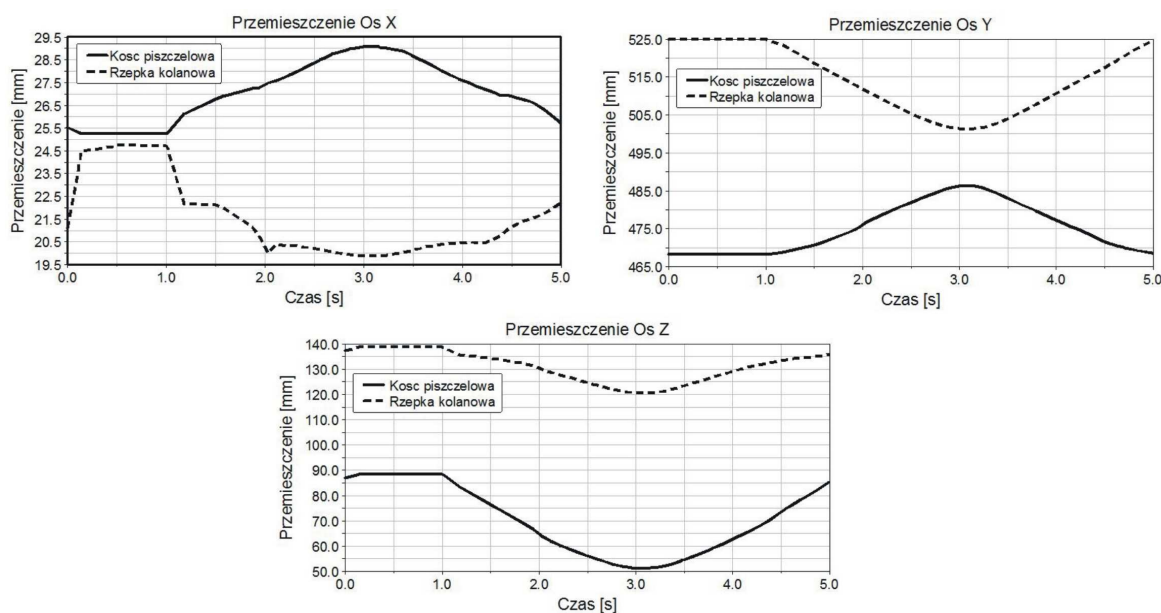
Rys. 4. Model komputerowy stawu kolanowego

Tab. 1. Parametry modelu stawu kolanowego

Numer elementu modelu stawu kolanowego	Nazwa elementu	Współczynnik sztywności [N/mm]	Współczynnik tłumienia [N s/mm]
1	Ścięgno mięśnia czworogłowego	33	1
2,3,4	Wiązadła rzepki	158	1
5-6	Rzepka vs. kość udowa	500	5
6-7	Kość udowa vs. kość piszczelowa	500	5

2. NUMERYCZNA ANALIZA DYNAMIKI STAWU KOLANOWEGO

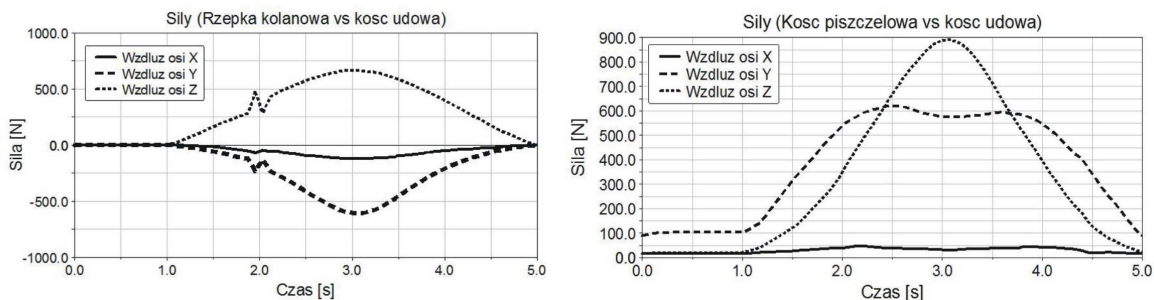
Polega na wyznaczeniu wartości sił działających w poszczególnych połączeniach podczas ruchu stawu kolanowego przy użyciu oprogramowania komputerowego. Podczas symulacji zakłada się, że kość udowa nie zmienia swojego położenia. Czas symulacji ustawiono na 5 sekund, podczas których model wykonuje zgięcie stawu kolanowego o kąt 60° i powrót do położenia wyjściowego. Rysunek 5 obrazuje przemieszczenie kości piszczelowej i rzepki kolanowej. Rzepka kolanowa przemieszcza się wzdłuż osi Y o maksymalną wartość 23,64 mm, osi X o 18,39 mm i osi Z o 4,86 mm. Kość piszczelowa przemieszcza się o maksymalną wartość wzdłuż osi X o 18,14 mm, osi Y o 3,84 mm oraz osi Z o 37,32 mm.

**Rys. 5.** Przemieszczenie elementów modelu względem osi x,y,z

Przeanalizowano deformację ścięgna mięśnia czworogłowego i więzadeł rzepki (rysunek 6). Otrzymano wydłużenia 1) max wartość 28,26 mm, 2)3)4) o 1,72 mm. Na rysunku 7 przedstawiono wartości sił w funkcji czasu pomiędzy rzepką kolanową i kością udową oraz kością piszczelową i kością udową wzdłuż osi x,y,z. W przypadku oddziaływania kość piszczelowa – kość udowa największy wzrost siły zaobserwowano wzdłuż osi Z (877 N), następnie wzdłuż osi Y (534 N) oraz osi X (31 N). Siły występujące pomiędzy rzepką kolanową i kością udową osiągnęły wartości: wzdłuż osi X – max. 607 N, wzdłuż osi Y-121 N oraz wzdłuż osi Z – 664 N.



Rys. 6. Wydluzenie ścięgna mięśnia czworogłowego i więzadeł rzepki w funkcji czasu



Rys. 7. Wartość sił w funkcji czasu pomiędzy rzepką kolanową i kością udową oraz kością piszczelową i kością udową wzdłuż osi x, y, z

PODSUMOWANIE

W celu dokładnego poznania zjawisk zachodzących podczas ruchu stawu kolanowego niezbędne jest przeprowadzenie analizy numerycznej. Jest to podyktowane tym, że urazy stawu kolanowego są bardzo częste, ponieważ jest to staw najbardziej mobilny w codziennej aktywności człowieka. Na przykład podczas zawodów sportowych, najczęściej dochodzi do zerwania więzadeł, w szczególności pobocznego przyśrodkowego. Gwałtowne przemieszczanie ku przodowi i tyłowi przy zgiętym kolanie może prowadzić do zerwania więzadeł krzyżowych przedniego i tylnego. Wykorzystanie programów komputerowych, np. OpenSim 3.0, MATLAB-Simulink, MSC Adams, ułatwia analizę i umożliwia ustalenie przyczyn defektów stawu kolanowego. W tym celu należy opracować model CAD stawu, dobrać właściwe wartości współczynników sztywności i tłumienia. Uzyskane wyniki wskazują na poprawność doboru parametrów, natomiast model stawu kolanowego może być z powodzeniem wykorzystany do analizy kinematyki i dynamiki stawu w sytuacjach z życia codziennego.

BIBLIOGRAFIA

1. Agur A.M.R., Dalley A.F.: Grant's Atlas of Anatomy, 13th Edition, Wolters Cluwer, 2012.
2. Będziński R.: Biomechanika inżynierska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.
3. Blankevoort L., Kuiper J.H., i in.: Articular Contact in a Three – Dimensional Model of the Knee, Journal of Biomechanics, Vol. 24, pp. 1019-1031, 1991.
4. Erdemir A., McLean S., Herzog W. i in.: Model-based Estimation of Muscle Forces Exerted During Movements, Clinical Biomechanics, Vol. 22, pp. 131-154, 2006.
5. Eshuis P.: Knee Modeling, Aalborg University, 2004.

6. Głowiński S.: Pobyt stażowy w Bioengineering Group Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Spanish National Research Council, Madrid, Arganda del Ray, 02.09.2013 – 11.09.2013.
7. Goodfellow J.W., O'Connor J.J.: The Role of Congruent Meniscal Bearings in Knee Arthroplasty, *The Knee*, Scott & W., New York, pp. 1143-1156, 1994.
8. Sommerville R.: *The Medical Advisor The Complete Guide To Alternative & Conventional Treatments*, Time Warner Inc, 1998.
9. Wismans J., Veldpaus F., i in.: A Three-Dimensional Mathematical Model of the Knee-Joint, *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, pp. 677-685, 1980.

NUMERICAL SIMULATION OF THE HUMAN KNEE JOINT

Abstract

In this paper the results of the research based on dynamic simulation of human knee virtual model were presented. Starting from the parts, virtual models (tibia, femur and patella) are realized by using Computational Aided Design software. The coefficients of stiffness and damping were implemented to the model. The model takes into account the impact of the muscles and ligaments in the skeletal system, the phenomenon of contact between the thigh and the lower thigh and between the thigh and the kneecap. The model was used to simulate the movement of the knee. The proposed three-dimensional model of the knee has allowed to analyze the distribution of forces and moments acting on the parts of the joint. The results are illustrated in the graphs and discussed.

Autor:

dr inż. **Sebastian Głowiński** – Politechnika Koszalińska, Zakład Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, sebastian.glowinski@tu.koszalin.pl