

Marta MAZUR<sup>1</sup>, Adam CISZKIEWICZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Krakowska, Kraków

## ANALIZA PRZESTRZENI ROBOCZEJ UKŁADU WIĘZADEŁ STAWU SKOKOWEGO GÓRNEGO W PŁASZCZYŹNIE STRZAŁKOWEJ I CZOŁOWEJ - BADANIA WSTĘPNE

**Streszczenie:** Celem pracy była analiza przestrzeni roboczej układu więzadeł stawu skokowego górnego. Na potrzeby badań przygotowano trójwymiarowy model wieloczłonowy górnego stawu skokowego, który zawierał dwa ciała sztywne: nieruchomą goleń i kości stopy. Ciała te połączone były ze sobą układem trójwymiarowych cięgien, które zastępowały więzadła. Przestrzeń roboczą stawu wyznaczono poprzez iteracyjną zmianę położenia kości stopy. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że przestrzeń robocza górnego stawu skokowego zdeterminowana jest głównie przez geometrię więzadeł położonych po jego bocznej stronie.

**Słowa kluczowe:** układ wieloczłonowy, procedura numeryczna, stopa, goleń

### 1. WSTĘP

Górny staw skokowy jest skomplikowaną strukturą anatomiczną kończyny dolnej, wpływa na to różnorodność elementów, które go tworzą [1]. Jednym z nich są więzadła poboczne, których zadaniem jest zapewnienie ruchomości oraz stabilności stawu [2]. Więzadła te mają górne przyczepy na goleni, którą tworzą kość piszczelowa oraz strzałka, natomiast ich dolne przyczepy znajdują się na kości skokowej oraz piętowej. Ze względu na lokalizację przyczepów, więzadła można podzielić na boczne oraz przyśrodkowe. Po stronie bocznej znajdują się trzy więzadła: strzałkowo-skokowe tylne (PTFL), strzałkowo-piętowe (CFL) oraz strzałkowo-skokowe przednie (ATFL). Po stronie przyśrodkowej obecne jest więzadło trójgraniaste, które składa się z trzech pasm. Każde z pasm traktowane jest w literaturze jako niezależne więzadło. Nazwy tych więzadeł to: piszczelowo-skokowe tylne (PTTL), piszczelowo-skokowe przednie (ATTL) oraz piszczelowo-piętowe (TCL).

Modele stawów człowieka służą głównie do wspomagania procesów leczenia schorzeń stawu, wykonywania sprzętów ortotycznych czy protez, a także jako inspiracja do projektowania sztucznych stawów wykorzystywanych w robotach humanoidalnych [3-5]. Można je podzielić na dwie grupy: modele wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES) [4-6] oraz modele wieloczłonowe [7-10].

Modele przygotowane za pomocą MES dają możliwość bardzo szczegółowej analizy układu w zakresie odkształceń i naprężeń struktur kostnych i/lub stawowych. Przykładem użycia tej metody jest model zaprezentowany w [4], który wykorzystano do analizy rozkładu naprężeń kontaktowych kości podczas chodu. W pracy [5] wzięto pod uwagę obecność

więzadeł i mięśni oraz właściwości kości, a geometrię modelu odwzorowano bazując na zdjęciach tomograficznych.

Modele wielocłonowe wykorzystywane są często do opisu stawów o dużym zakresie ruchu. Modele te różnią się pod względem złożoności. Jednakże ich cechą wspólną jest to, że posiadają sztywne segmenty, które najczęściej odwzorowują kości. Zazwyczaj uwzględnienie większej liczby ciał sztywnych zwiększa dokładność modelu, ale utrudnia analizę wyników. W [7] zamodelowano staw skokowy jako trzy sztywne segmenty. Model służył do analizy związków pomiędzy przemieszczeniami kątowymi w stawie. W [8] strukturę stawu skokowego opisano za pomocą czworoboku przegubowego. W żadnej z przedstawionych powyżej prac nie podjęto próby wyznaczenia i analizy przestrzeni roboczej stawu.

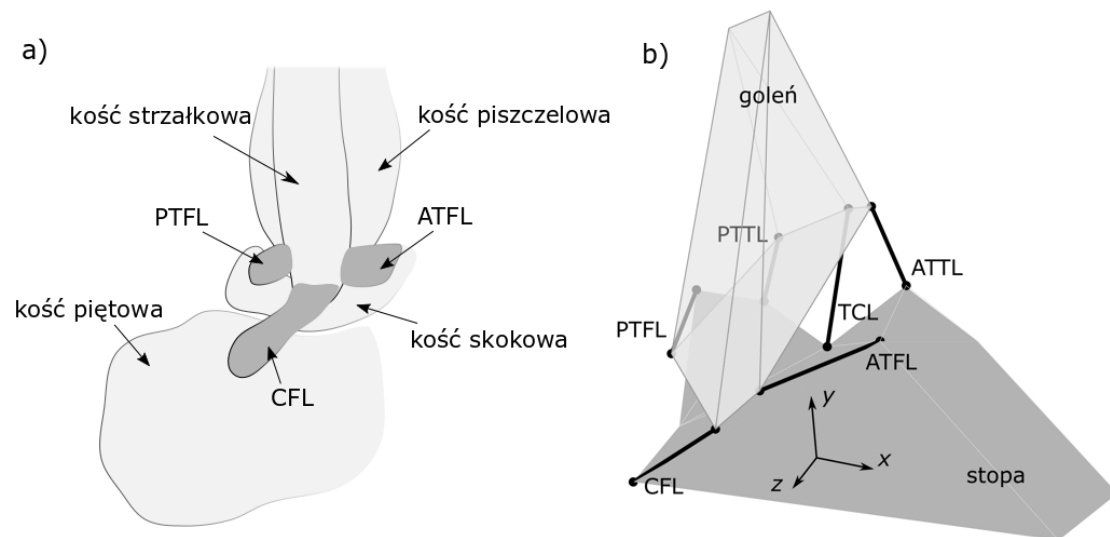
Z uwagi na powyższe, celem niniejszej pracy było wyznaczenie i analiza przestrzeni roboczej układu więzadeł górnego stawu skokowego w dwóch płaszczyznach. Wykorzystano do tego trójwymiarowy, wielocłonowy model górnego stawu skokowego, który został przygotowany na podstawie dwuwymiarowych rzutów przedstawiających staw w płaszczyźnie strzałkowej oraz czołowej.

## 2. METODYKA

### 2.1. Model stawu

Jak wspomniano wcześniej, do wyznaczenia przestrzeni roboczej stawu skokowego, konieczne było opracowanie modelu stawu. Trójwymiarowy model składał się z dwóch ciał sztywnych, związanych układem więzadeł. Jedno ciało reprezentowało goleń, drugie kości stopy. Każdy z segmentów posiadał własny układ odniesienia. W położeniu początkowym układy te były tożsame. Założono, że goleń jest nieruchoma, natomiast stopa może zmieniać swoje położenie względem niej.

Dane do modelu przygotowano na bazie rysunków dostępnych w atlasach anatomicznych, które przedstawiały staw skokowy w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej. Wymiary więzadeł uzyskano dzięki przeskalowaniu modelu na podstawie szerokości kości piszczelowej w przekroju widocznym na rys. 1a. Długości swobodne więzadeł obliczono na podstawie położenia neutralnego stawu - 0 stopni zgięcia grzbietowego [11]. Jest to założenie i uproszczenie, ponieważ zagadnienie wyznaczania długości swobodnych cięgien, które reprezentują więzadła, jest zadaniem trudnym dla stawu skokowego. Na ten temat powstało niewiele prac eksperymentalnych. Niemniej jednak, takie podejście stosowane było już w podobnych i uznanych modelach [8,12,13]. Dwuwymiarowy rzut stawu skokowego oraz trójwymiarową wizualizację więzadeł pokazano na rysunku 1.



**Rys. 1. Staw skokowy: a) rysunek poglądowy przedstawiający staw skokowy, widok od strony zewnętrznej w płaszczyźnie strzałkowej z zaznaczonymi więzadłami strony bocznej, b) trójwymiarowy model układu więzadeł stawu skokowego**

Na podstawie długości swobodnych więzadeł oraz ich dopuszczalnych odkształceń, przyjętych za [14,15], wyznaczono długości krytyczne więzadeł według:

$$l_{kryt-i} = (1.0 + \varepsilon_{max-i})l_{swob-i} \quad (1)$$

gdzie:  $l_{kryt-i}$  - długość krytyczna więzadła  $i$ ,  $l_{swob-i}$  - długość swobodna więzadła  $i$ ,  $\varepsilon_{max-i}$  - dopuszczalne odkształcenie więzadła  $i$ , i przyjmuje wartości ze zbioru {PTFL, CFL, ATFL, PTTL, ATTL, CTL}.

## 2.2. Przestrzeń robocza

Przestrzeń robocza stawu to zbiór takich położań kości stopy względem goleni, gdzie długość każdego z więzadeł nie przekracza jego długości krytycznej. Przestrzeń robocza stawu została wyznaczona poprzez iteracyjną zmianę położań stopy względem goleni w dwóch płaszczyznach - strzałkowej i czołowej. Położenie kości stopy jednoznacznie zdefiniowane było przez wektor przemieszczenia układów  $\mathbf{p}$  oraz kąty obrotu układów, na podstawie których przygotowywano macierz rotacji  $\mathbf{R}$ . W ramach tej pracy zmieniane były tylko wartości współrzędnych wektora  $\mathbf{p}$  - szczegóły zostały podane w rozdziale opisującym wyniki.

Przy każdej iteracji wektory przyczepów więzadeł do kości stopy z układu kości stopy transformowano do układu goleni wykorzystując wzór:

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{R}\mathbf{b}_i^s + \mathbf{p} \quad (2)$$

gdzie:  $\mathbf{R}$  - macierz rotacji 3x3 zawierająca cosinusy kątów obrotu układów;  $\mathbf{b}_i^s$  - wektor przyczepu więzadła  $i$  do stopy wyrażony w jej układzie lokalnym,  $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  - wektor przemieszczenia układów (modyfikowany w ramach wyznaczania przestrzeni roboczej). Następnie wyznaczano długość więzadła według wzoru:

$$l_i = |\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i| \quad (3)$$

gdzie:  $l_i$  - długość więzadła  $i$ ,  $\mathbf{a}_i$  - wektor współrzędnych przyczepu więzadła  $i$  do goleni wyrażony w jej układzie odniesienia. Po podstawieniu (2) do (3):

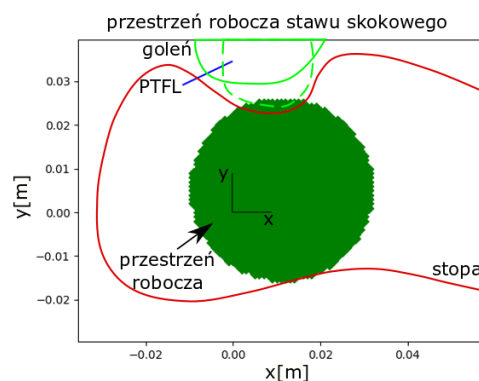
$$l_i = |Rb_i^s + p - a_i| \quad (4)$$

Jeśli otrzymane długości więzadeł były mniejsze od ich długości krytycznych, to położenie stopy było dodawane do listy dozwolonych położań. Powyższe obliczenia powtórzono dla każdego z rozpatrywanych położań stopy dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej oraz czołowej. Otrzymano w ten sposób wykresy przedstawiające obszary bezpiecznej pracy stawu skokowego oraz rozmiary ich powierzchni dla poszczególnych więzadeł oraz ich grup.

### 3. WYNIKI

#### 3.1. Test procedury dla układu z jednym więzadłem

Test przedstawiony w tym podrozdziale został wykonany w celu zweryfikowania przygotowanej procedury numerycznej. W ramach testu wyznaczono przestrzeń roboczą układu z jednym więzadłem - PTFL - dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej, modyfikowane były składowe  $p_x$  i  $p_y$  wektora  $p$ . Próbkę podjęto, ponieważ dla układu z jednym więzadłem przestrzeń roboczą można wyznaczyć analitycznie. Jest to okrąg o promieniu zależnym od długości krytycznej i trójwymiarowej geometrii więzadła, przesunięty zgodnie z tym, jak umieszczony jest przyczep więzadła względem początku układu współrzędnych kości ruchomej. Wynik otrzymany numerycznie przedstawiono na rys. 2.



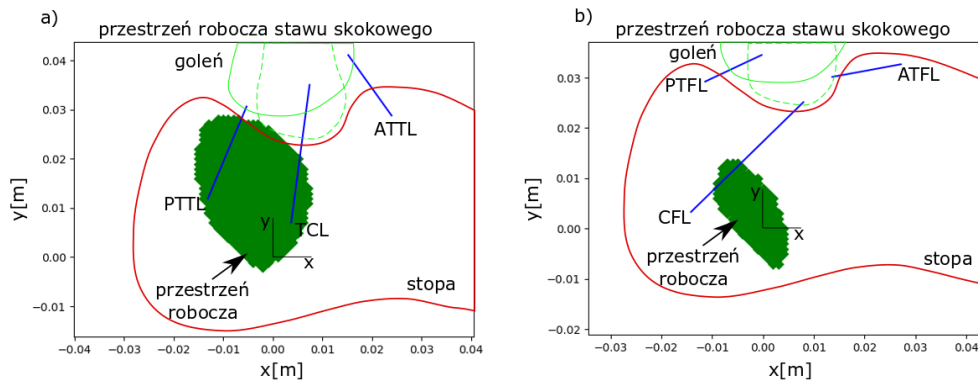
Rys. 2. Przestrzeń robocza dla wyizolowanego więzadła PTFL dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej

Przestrzeń robocza wyznaczona numerycznie jest okręgiem o odpowiednim promieniu. Okrąg ten jest zbiorem wszystkich położań początku układu stopy, w których długość żadnego z więzadeł nie przekracza wartości krytycznej. W ten sam sposób przygotowano wykresy dla przypadków przedstawionych w kolejnych podrozdziałach. Wynik potwierdza poprawność działania przygotowanej procedury numerycznej. W dalszych etapach badań wykorzystywany był już kompletny zbiór więzadeł.

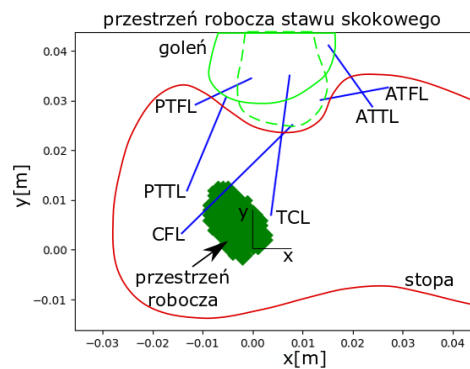
#### 3.2. Przestrzeń robocza stawu dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej

Na potrzeby analizy wyników więzadła stawu skokowego podzielono na dwie grupy: więzadła od strony bocznej (PTFL, ATFL, CFL) oraz więzadła od strony przyśrodkowej (PTTL, ATTL, TNL). W tej próbie ponownie modyfikowane były składowe  $p_x$  i  $p_y$  wektora  $p$ . Otrzymane w ten sposób przestrzenie dla układów z więzadłami bocznymi oraz przyśrodkowymi przedstawiono na rysunkach 3a i 3b. Część wspólna tych przestrzeni to

przestrzeń robocza dla pełnego układu więzadeł stawu dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej  
 - rysunek 4.



**Rys. 3. Przestrzeń robocza dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej dla: a) układu z więzadłami od strony przyśrodkowej, b) układu z więzadłami od strony bocznej**

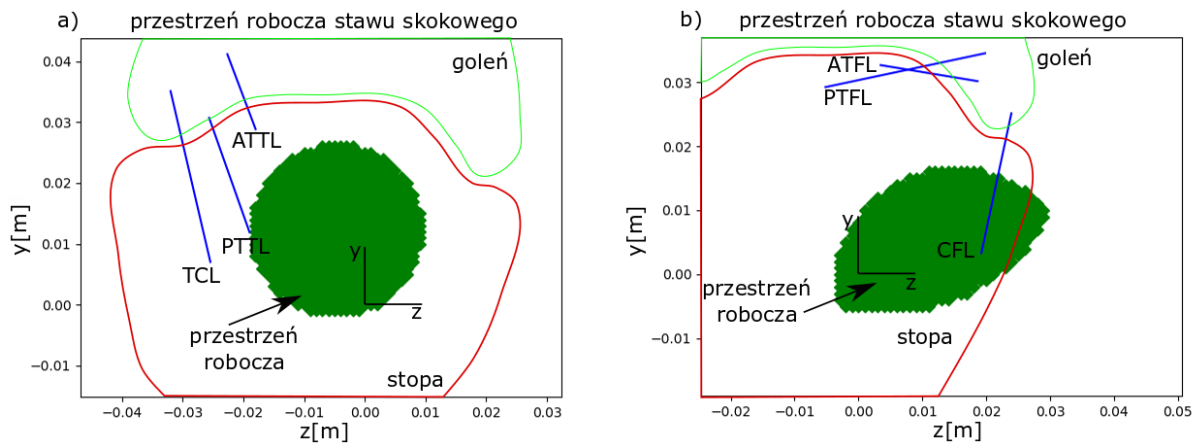


**Rys. 4. Przestrzeń robocza układu więzadeł stawu skokowego dla przemieszczeń w płaszczyźnie strzałkowej**

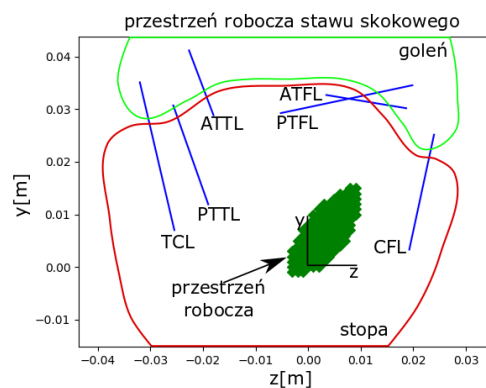
Analiza wyników przedstawionych na rysunkach 3 oraz 4 prowadzi do wniosku, że przestrzeń robocza stawu w płaszczyźnie strzałkowej zdeterminowana jest głównie przez więzadła strony bocznej.

### 3.3. Przestrzeń robocza dla przemieszczeń w płaszczyźnie czołowej

W ramach kolejnej analizy zbadano przestrzeń roboczą stawu dla przemieszczeń w płaszczyźnie czołowej - modyfikowane były składowe  $p_y$  i  $p_z$  wektora  $p$ . W tym przypadku ponownie podzielono więzadła na dwie grupy i wyliczono przestrzenie robocze stawu dla tych dwóch przypadków - rys. 5. Przestrzeń dla układu ze wszystkimi więzadłami przedstawiono na rys. 6.



**Rys. 5. Przerznie robocza dla przemieszczeń w płaszczyźnie czołowej dla: a) układu z więzadłami od strony przyśrodkowej, b) układu z więzadłami od strony bocznej**



**Rys. 6. Przerznie robocza układu więzadeł stawu skokowego dla przemieszczeń w płaszczyźnie czołowej**

Podobnie jak w przypadku płaszczyzny strzałkowej przestrzeń roboczą stawu najbardziej determinują więzadła po stronie bocznej, co widać na rysunku 5.

### 3.4. Porównanie powierzchni przestrzeni roboczych stawu dla obu płaszczyzn

Ostatnia analiza przeprowadzona w ramach tej pracy dotyczyła porównania powierzchni przestrzeni roboczej stawu skokowego dla płaszczyzny czołowej i strzałkowej.

**Tabela 1. Porównanie rozmiarów przestrzeni roboczych**

	<b>powierzchnia przestrzeni roboczej w płaszczyźnie strzałkowej [m<sup>2</sup>]</b>	<b>powierzchnia przestrzeni roboczej w płaszczyźnie czołowej [m<sup>2</sup>]</b>
<b>więzadła boczne</b>	0.000167	0.000529
<b>więzadła przyśrodkowe</b>	0.000503	0.000731
<b>wszystkie więzadła</b>	0.000027	0.000123

Analizując wartości podane w tabeli 1 można zauważyć, że w płaszczyźnie czołowej powierzchnia przestrzeni roboczej stawu skokowego dla układu z więzadłami bocznymi była ponad 3-krotnie większa niż w przypadku płaszczyzny strzałkowej, a w przypadku układu ze wszystkimi więzadłami powierzchnia ta była ok. 6-krotnie większa.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy analizowano przestrzeń roboczą stawu skokowego w zależności od płaszczyzny w jakiej został on przedstawiony. Dzięki rysunkom ilustrującym staw w pozycji neutralnej przygotowano uproszczony trójwymiarowy model stawu skokowego. Składał się on z dwóch ciał sztywnych, gdzie każde z nich posiadało swój lokalny układ współrzędnych. Korzystając z modelu, na podstawie długości krytycznych więzadeł, wyznaczano przestrzeń roboczą stawu skokowego. Długości krytyczne obliczono korzystając z dopuszczalnych odkształceń oraz z odczytanych długości swobodnych więzadeł.

Z pracy wynikają następujące wnioski:

- w przypadku obu płaszczyzn, rozmiar przestrzeni bezpiecznej pracy stawu skokowego jest zdeterminowany przez więzadła boczne;
- w przypadku obu płaszczyzn układ z wyizolowanym ATTL posiada najmniejszą przestrzeń roboczą ze wszystkich możliwych układów o jednym więzadle;
- w płaszczyźnie strzałkowej największą przestrzeń roboczą otrzymano rozważając układ z wyizolowanym CFL, a w czołowej – układ z TCL;
- z uwagi na geometrię układu więzadeł na powierzchnię przestrzeni roboczej stawu duży wpływ ma to, w której płaszczyźnie odbywają się jego przemieszczenia.

Opracowana w ramach artykułu metodyka wyznaczania przestrzeni roboczej więzadeł stawu skokowego oraz otrzymane wyniki mogą być przydatne podczas projektowania układów protez i ortez stawu skokowego, a także mechanizmów zastępczych stawu do wykorzystania w robotach humanoidalnych.

#### LITERATURA

- [1] Ziółkowski M. (red.): Anatomia prawidłowa człowieka, Tom I Układ ruchu, RU ZSP AM, Wrocław, 1991.
- [2] Bochenek A., Reicher M.: Anatomia Człowieka - Tom I Układ Ruchu, PZWL, Warszawa, 2010.
- [3] Ciszakiewicz A., Milewski G.: Ligament-based spine-segment mechanisms, Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, vol. 66(5), 2018, p.705-712.
- [4] Park S., Lee S., Yoon J., Chae S.W.: Finite element analysis of knee and ankle joint during gait based on motion analysis, Medical Engineering and Physics, vol. 63, 2005, p.33-41.
- [5] Mondal S., Ghosh R.: A numerical study on stress distribution across the ankle joint: Effects of material distribution of bone, muscle force and ligaments, Journal of Orthopaedics, vol. 14, 2017.
- [6] Ciszakiewicz A., Milewski G.: Path planning for minimally-invasive knee surgery using a hybrid optimization procedure, Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, vol. 21(1), 2018, p. 47-54.
- [7] Moseley L., Smith R., Hunt A., Gant R.: Three-dimensional kinematics of the rearfoot during the stance phase of walking in normal young adult males, Clinical Biomechanics, vol.11(1), 1996, p.39-45.
- [8] Leardini A., O'Connor J.J., Catani F., Giannini S.: A geometric model of the human ankle joint, Journal of Biomechanics, vol. 32(6), 1999, p.585-591.
- [9] Ciszakiewicz A., Knapczyk J.: Load analysis of a patellofemoral joint by a quadriceps muscle, Acta of bioengineering and biomechanics, vol. 18(2), 2016, p.111-119.
- [10] Ciszakiewicz A., Milewski G.: A novel kinematic model for a functional spinal unit and a lumbar spine, Acta of bioengineering and biomechanics, vol. 18(1), 2016, p.87-95.

- [11] Sobotta J., Paulsen F., Waschke J., Jędrzejewski K., Woźniak W.: Atlas Anatomii Człowieka Ogólne Pojęcia Anatomiczne Narządy Ruchu, Edra Urban & Partner, Wrocław, 2012.
- [12] Wei F, Hunley SC, Powell JW, Haut RC: Development and validation of a computational model to study the effect of foot constraint on ankle injury due to external rotation. *Ann Biomed Eng*, vol.39(2), 2011, p.756-765.
- [13] Machado M, Flores P, Claro JCP, et al: Development of a planar multibody model of the human knee joint. *Nonlinear Dyn*, vol.60, 2010, p.459-479.
- [14] Nie B., Forman J.L., Panzer M.B., Mait A.R., Donlon J.P., Kent R.W.: Determination of the in situ mechanical behavior of ankle ligaments, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 65, 2017, p.502-512.
- [15] Siegler S.: The Mechanical Characteristics of the Collateral Ligaments of the Human Ankle Joint, *Foot & ankle*, vol.8, 1988, p.234-242.

## **A WORKSPACE ANALYSIS FOR A LIGAMENT SYSTEM OF AN UPPER ANKLE JOINT IN SAGITTAL AND FRONTAL PLANE - A PRELIMINARY STUDY**

**Abstract:** The aim of this study was to analyze the workspace of a ligament system of an upper ankle joint. To facilitate this research, a spatial multibody model of an upper ankle joint was prepared. The model contained two rigid bodies corresponding to the lower leg and the foot. The bodies were connected by a system of three-dimensional cables representing the ligaments. The workspace was computed by iteratively modifying the location of the foot. The obtained results suggest that the workspace of the upper ankle joint is mostly determined by the geometry of the ligaments located on its medial side.