

**Andrzej A. STĘPNIEWSKI**

UNIwersytet PRZYRODNICZY W LUBLINIE, KATEDRA PODSTAW TECHNIKI

## Analiza geometryczna i ruchowa stawu kolanowego człowieka

Dr hab. inż. Andrzej Anatol STĘPNIEWSKI

Studia – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, doktorat – Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, habilitacja – Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Członek Polskiego Komitetu Teorii Maszyn i Mechanizmów. Od roku 1982 pracownik UP w Lublinie. Specjalność – teoria maszyn i mechanizmów. Autor 58 publikacji z zakresu TMM i robotyki.



e-mail: andrzej.stepniewski@up.lublin.pl

### Streszczenie

W pracy przeprowadzono analizę strukturalną i geometryczno-ruchową płaskiego modelu stawu kolanowego. Wyznaczono ruchliwość i zidentyfikowano więzy bierne. Określono podstawowe wymiary, konieczne do opisanego geometrii stawu. Do analizy ruchowej przyjęto uproszczony model płaski. Wykorzystując przekształcenia układów współrzędnych Denavita-Hartenberga, wyznaczono wektory położenia charakterystycznych punktów kości udowej względem kości piszczelowej. Wyznaczono linię styku kości piszczelowej z udową dla pełnego zakresu ruchu w stawie. Opracowano algorytm wyznaczania współrzędnych położenia punktu przytwierdzenia więzadeł pobocznych do kości udowej dla danego położenia punktu przytwierdzenia względem kości piszczelowej. Zamieszczono przykład obliczeniowy będący ilustracją omówionego algorytmu.

**Słowa kluczowe:** analiza strukturalna, analiza kinematyczna, staw kolanowy.

### Geometrical and mobility analysis of knee joint of man

#### Abstract

The paper presents the structural, geometric and mobility analysis of flat mechanism of the knee joint model. The mobility was determined and passive bonds were identified. The basic dimensions, necessary for description of the joint geometry, were defined. The simplified flat model was assumed for the mobility analysis. Using the transformation of Denavit-Hartenberg systems of coordinates, vectors of position of the femoral bone characteristic points in relation to the tibial bone were determined. The shape of the tibial bone pan assuring solid contact of the bone during full range of movement in the joint was defined. There was worked out an algorithm for determining the position coordinates of the point of attaching marginal ligaments to the femoral bone for the given position of the attaching point in relation to the tibial bone. The example of computations illustrating the algorithm discussed is presented in the paper. It can be stated that in the joint flat model there appear three passive fetters: the point of the bone junction, two marginal ligaments along with the kinematic pair. The relative movement along circle of marginal ligaments ends is loaded with the radial error equal to 0,7 mm.

**Keywords:** structural analysis, kinematical analysis, knee joint.

### 1. Wprowadzenie

Pośród wszystkich stawów, staw kolanowy jest najbardziej złożonym układem połączonych ruchowo elementów - kości, więzadeł i łąkotec, zarówno pod względem geometrycznym jak i strukturalnym [2, 9]. Odnajdujemy w nim znane mechanizmy zaliczane do tzw. mechanizmów dźwigniowych [6]. Więzadło krzyżowe tylne i przednie wraz z obu kośćmi tworzą czworobok przegubowy ze skrzyżowanymi ramionami [1], nazywany również czworobokiem Czebyszewa mającym też szerokie zastosowania techniczne. Wykorzystywany jest praktycznie jako „połączenie” zapewniające względny ruch obrotowy, np. w autobusach przegubowych. Więzadła poboczne ustalają wzajemne położenie odta-

czających się po sobie kości [7], podobnie jak jarzmo utrzymuje koła obiegowe w przekładni obiegowej.

Celem niniejszej pracy jest zidentyfikowanie więzów biernych płaskiego modelu stawu kolanowego i określenie ich geometrii, przy której spełniony jest warunek prawidłowej pracy stawu w pełnym zakresie ruchu. Dla zadanej geometrii główki kości udowej oraz zadanych wymiarów i położenia par kinematycznych więzadeł krzyżowych względem kości udowej, wyznaczono linię styku kości piszczelowej z kością udową oraz położenie kości piszczelowej względem wyznaczonej linii styku i położenie par kinematycznych więzadeł krzyżowych względem kości piszczelowej. Dla tak dobranej geometrii mechanizmu stawu, określono zbiór dopuszczalnych położenia osi par kinematycznych więzadeł pobocznych względem kości udowej dla danego zbioru położenia osi par kinematycznych względem kości piszczelowej zawartego w danym polu kwadratu. Opracowano algorytm obliczeniowy a następnie program symulacyjny do wyznaczania współrzędnych położenia punktów przytwierdzenia więzadeł. Zamieszczono wyniki obliczeń.

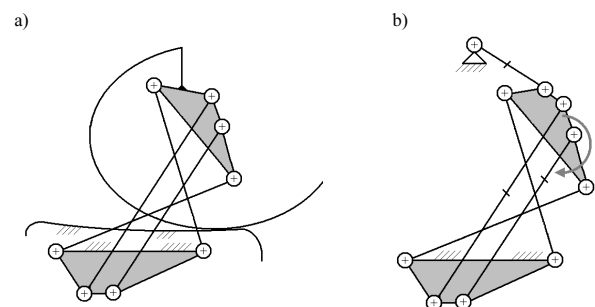
### 2. Struktura i geometria stawu

Traktując mechanizm stawu jako płaski, można przyjąć, że cztery więzadła (2 krzyżowe i 2 poboczne) są połączone z kośćmi parami klasy piątej – łącznie 8 par kinematycznych klasy piątej, natomiast dwupunktowe połączenie (styk) kości tworzy parę kinematyczną klasy czwartej (rys. 1a). Dla mechanizmu płaskiego, wzór na ruchliwość ma postać [6]

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1)$$

gdzie:  $n$  - liczba członów ruchomych,  $p_i$  - liczba par kinematycznych klasy  $i$ , przy czym klasa pary kinematycznej określona jest liczbą odebranych stopni swobody.

Ruchliwość mechanizmu, względem kości piszczelowej, zgodnie ze wzorem będzie wynosić  $W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 8 - 1 = -2$ , co oznacza, że w mechanizmie są 3 więzy bierne. Są to: para kinematyczna klasy czwartej i dwa więzadła poboczne, ponieważ więzadła krzyżowe wchodzą w skład mechanizmu podstawowego zapewniającego wymaganą realizację ruchu.

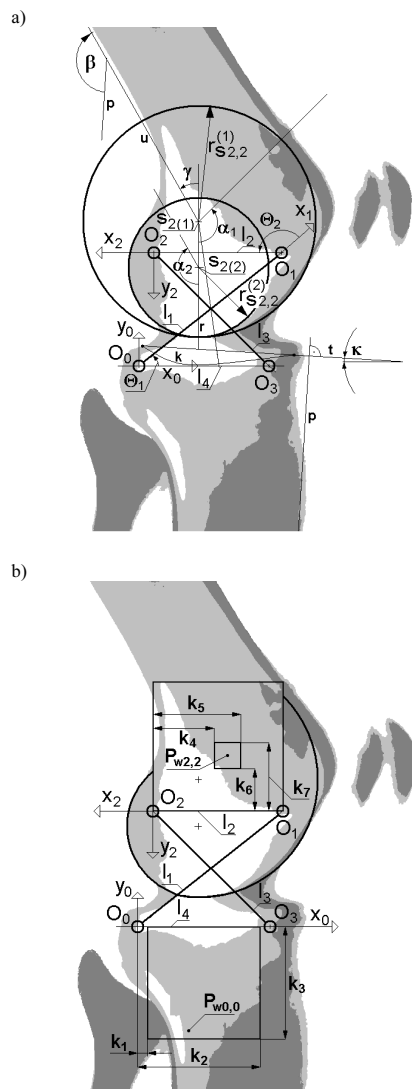


Rys. 1. Struktura płaskiego modelu stawu kolanowego; a, b – opis w tekście  
Fig. 1. Structure of flat mechanism of knee joint model; a, b – explanations in the text

Po zastosowaniu zamienników par kinematycznych, otrzymuje się schemat strukturalny przedstawiony na rysunku 1b. Po odrzuceniu więzów biernych (trzech członów dwułącznych i 6 par klasy piątej), otrzymuje się schemat strukturalny tożsamy ze schematem czworoboku przegubowego ( $W = 1$ ), z członem napędowym – łącznikiem, z którego wydzielenie grup strukturalnych (w tym

przypadku – klasy drugiej) nie jest możliwe. Wiadomo jednak, że mechanizm na pewno będzie pracował, gdyż zmiana członu napędowego w mechanizmie, który da się podzielić na grupy strukturalne nie zmienia jego ruchliwości.

Celem analizy geometrycznej jest określenie podstawowych wymiarów stawu, umożliwiających matematyczny opis jego geometrii. Analizę przeprowadzono na podstawie zdjęcia rentgenowskiego stawu kolanowego – rysunek 2a.



Rys. 2. Staw kolanowy; a – geometria, b – pola więzadeł pobocznych  
Fig. 2. Knee joint; a – geometry, b – fields of marginal ligaments

Przyjęto, że danych jest 10 następujących wielkości, wyjaśnionych na rysunku 2a: wymiary czworoboku przegubowego więzadeł krzyżowych:  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , współrzędne środków promieni względem układu kości udowej:  $s_{2(1)}, s_{2(2)}$ , promień większego łuku  $r_{s_{2,2}}^{(1)}$ , długości kątów łuków:  $\alpha_1, \alpha_2$  i kąt  $\gamma$ .

Wprowadza się układy współrzędnych  $\{x_1, y_1\}$   $\{x_2, y_2\}$  o początkach odpowiednio  $O_1$  i  $O_2$ , leżących w odległości  $l_2$  – rysunek 2a. Ze środka  $s_{2(1)}$  o współrzędnych określonych względem układu  $\{x_2, y_2\}$  zakreśla się łuk o promieniu  $r_{s_{2,2}}^{(1)}$  i linię  $r$  łączącą środki  $s_{2(1)}$  i  $s_{2(2)}$ . Punkt przecięcia linii  $r$  z łukiem jest punktem styczności obu łuków. Z punktu styczności wykreśla się łuk o środku  $s_{2(2)}$ . Długości kątów łuków określone są kątami  $\alpha_1, \alpha_2$  odmierzonymi od linii  $r$ . Od linii  $r$  względem środka  $s_{2(1)}$  odmierza się kąt  $\gamma$  wyznaczający kierunek prostej  $u$  określający usytuowanie kości udowej względem układu  $\{x_2, y_2\}$ . Usytuowanie kości piszczelowej określa linia  $p$ , prostopadła do linii  $t$  przecinającej skrajne

punkty krzywoliniowego odcinka kontaktu kości  $k$ . Kąt  $\beta$  zawarty pomiędzy liniami  $p$  i  $u$  jest kątem „zgięcia” kolana.

### 3. Analiza odwzorowania ruchu

Analizę ruchową przeprowadzono dla uproszczonego, płaskiego modelu mechanizmu stawu kolanowego. Do przekształcenia wektorów położenia  $r_{oz,n}$  punktów o oznaczeniu „oz”, określonych w układach „n” w wektory  $r_{oz,0}$  określone względem układu nieruchomego  $\{x_0, y_0\}$  zastosowano metodę macierzową kinematyki, wykorzystującą przekształcenia układów współrzędnych Denavita-Hartenberga [3, 6]. Układem nieruchomym jest układ, którego oś  $x$  przechodzi przez punkty mocowań więzadeł krzyżowych do kości piszczelowej.

$$r_{oz,0} = T_{1,n} r_{oz,n}, \quad (2)$$

gdzie

$$T_{1,n} = \prod_{i=1}^{i=n} A_i, \quad (3)$$

przy czym

$$T_{i,i} = A_i,$$

$$r_{oz,0} = \begin{bmatrix} x_{oz,0} & y_{oz,0} & z_{oz,0} & 1 \end{bmatrix}^T,$$

gdzie

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & l_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -s\theta_i s\alpha_i & l_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & \lambda_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$r_{oz,n}$  – wektor położenia punktu „oz” względem układu współrzędnych „n”,  $s\theta_i = \sin \theta_i$ ,  $c\theta_i = \cos \theta_i$ ,  $s\alpha_i = \sin \alpha_i$ ,  $c\alpha_i = \cos \alpha_i$ ,  $l_i, \alpha_i$  – odległość i kąt między osiami par obrotowych członu  $i$ ,  $\lambda_i, \theta_i$  – odległość i kąt obrotu między członami  $i-1$  i  $i$ .

Macierze przekształceń układów współrzędnych zerowego w pierwszy i pierwszego w drugi będą więc miały postać

$$A_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & l_i c_i \\ s_i & c_i & 0 & l_i s_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ gdzie } i = 1, 2. \quad (5)$$

Wektory położenia środków par kinematycznych  $O_1$  i  $O_2$ , w układzie nieruchomym na podstawie zależności (2) będą miały postać:

$$r_{O1,0} = T_{1,1} r_{O1,1} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 \\ l_1 s_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$r_{O2,0} = T_{1,2} r_{O2,2} = \begin{bmatrix} f_1 & -f_2 & 0 & f_1 l_2 + l_1 c_1 \\ f_2 & f_1 & 0 & f_2 l_2 + l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 l_2 + x_{O1,0} \\ f_2 l_2 + y_{O1,0} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

gdzie:

$$f_1 = c_1 c_2 - s_1 s_2,$$

$$f_2 = s_1 c_2 + c_1 s_2,$$

przy czym

$$s_i = \sin \Theta_i,$$

$$c_i = \cos \Theta_i.$$

Na podstawie rysunku 2a można napisać, że

$$l_3^2 = (x_{O3,0} - x_{O2,0})^2 + y_{O2,0}^2. \quad (8)$$

Po uwzględnieniu zależności (8), wykonaniu działań i pogrupowaniu otrzymuje się

$$D = Ac_2 + Bs_2, \quad (9)$$

gdzie:

$$A = 2l_2(l_1 - l_4c_1),$$

$$B = 2l_2l_4s_1,$$

$$D = -l_1^2 - l_2^2 + l_3^2 - l_4^2 + 2l_1l_4c_1,$$

stąd wyznacza się wartość kąta  $\Theta_2$

$$\Theta_2 = 2\arctan\left(\frac{B + \sqrt{A^2 + B^2 - D^2}}{A + D}\right). \quad (10)$$

Następnie oblicza się współrzędne punktu skrzyżowania więzadeł krzyżowych  $(x_{13,0}, y_{13,0})$ . Z rozwiązania układu równań prostych pokrywających się z osiami więzadeł:

$$x_{13,0} = \frac{b_{13}}{\tan \Theta_1 - a_{13}}, \quad (11)$$

$$y_{13,0} = \frac{b_{13} \tan \Theta_1}{\tan \Theta_1 - a_{13}}$$

gdzie:

$$a_{13} = \frac{y_{O2,0}}{x_{O2,0} - x_{O3,0}},$$

$$b_{13} = \frac{x_{O2,0}y_{O2,0}}{x_{O3,0} - x_{O2,0}} + y_{O2,0}.$$

Współrzędne położenia środków krzywizn główki kości udowej w układzie nieruchomym  $(x_{s2,0}^{(i)}, y_{s2,0}^{(i)})$  na podstawie zależności (2), ze względu na brak współrzędnej z, można przedstawić w prostszej formie (pierwszy i drugi wiersz macierzy wynikowej)

$$x_{s2,0}^{(i)} = f_1x_{s2,2}^{(i)} - f_2y_{s2,2}^{(i)} + x_{O2,0}, \quad (12)$$

$$y_{s2,0}^{(i)} = f_2x_{s2,2}^{(i)} + f_1y_{s2,2}^{(i)} + y_{O2,0},$$

gdzie  $(x_{s2,2}^{(i)}, y_{s2,2}^{(i)})$  – współrzędne położenia środków krzywizn główki kości udowej w układzie współrzędnych kości udowej ( $i = 1$  dla promienia większego,  $i = 2$  dla promienia mniejszego).

Nie trudno dowiedzieć, że punkt chwilowego kontaktu kości udowej z piszczelową musi leżeć na linii łączącej punkt środka krzywizny główki z punktem skrzyżowania więzadeł krzyżowych a w momencie zmiany promienia krzywizny, punkty środków obu krzywizn, punkt skrzyżowania więzadeł krzyżowych i punkt kontaktu kości muszą leżeć na jednej prostej. Współrzędne punktu kontaktu kości w układzie nieruchomym  $(x_{k2,0}^{(i)}, y_{k2,0}^{(i)})$  określa się według zależności

$$x_{k2,0}^{(i)} = \frac{x_{13,0} + \lambda_2^{(i)} x_{s2,0}^{(i)}}{1 + \lambda_2^{(i)}}, \quad (13)$$

$$y_{k2,0}^{(i)} = \frac{y_{13,0} + \lambda_2^{(i)} y_{s2,0}^{(i)}}{1 + \lambda_2^{(i)}},$$

gdzie

$$\lambda_2^{(i)} = \frac{1}{r_{s2,2}^{(i)}} \sqrt{(x_{s2,0}^{(i)} - x_{13,0})^2 + (y_{s2,0}^{(i)} - y_{13,0})^2} - 1. \quad (14)$$

Po wykreśleniu linii punktów kontaktu, do pierwszego i ostatniego punktu kontaktu, dopasowywane jest położenie kości piszczelowej względem kości udowej.

Warunkiem prawidłowej pracy stawu kolanowego jest prawidłowa praca więzadeł pobocznych, pełniących rolę stabilizującą właściwe usytuowanie względne kości [4, 5]. Względem położenia punktu osi obrotu więzadła pobocznego, drugi punkt osi obrotu leżący na drugiej kości, musi pozostawać wciąż w tej samej odległości, czyli poruszać się po okręgu. Jest to warunek, który musi być spełniony w przypadku chirurgicznej interwencji, polegającej na zastąpieniu uszkodzonego więzadła sztucznym [8]. W tym miejscu pojawia się pytanie – czy można zmienić położenie punktu mocowania więzadła pobocznego i w jakim zakresie? Każda zmiana dotychczasowego położenia więzadła na jednej kości wymaga określenia jego długości i współrzędnych mocowania na drugiej kości. W tym celu opracowana została procedura „przeszukiwania” dopuszczalnych współrzędnych mocowań względem obu kości.

Przyjęto, że zadane współrzędne położenia punktów mocowań więzadła pobocznego względem kości piszczelowej  $P_{w0,0}$ , zawarte są w polu kwadratu usytuowanego względem układu  $\{x_0, y_0\}$  (rys. 2b). Jeden bok kwadratu pokrywa się z osią  $x_0$ , natomiast położenie pozostałych boków określają wymiary  $k_1, k_2, k_3 = k_2 - k_1$ . Współrzędne punktów mocowań więzadła do kości udowej  $P_{w2,2}$ , zawarte są w polu kwadratu usytuowanego względem układu  $\{x_2, y_2\}$ . Położenie boków określają wymiary  $k_4, k_5, k_6, k_7$ .

Dla zadanych współrzędnych położenia punktu  $P_{w0,0}$ , zmieniających z przyjętym krokiem, obliczane są współrzędne mocowań więzadła do kości udowej  $(x_{w2,0}, y_{w2,0})$  względem nieruchomego układu współrzędnych podczas pełnego ruchu w stawie kolanowym z przyjętym krokiem zmian kąta  $\Theta_1$ .

$$x_{w2,0} = f_1x_{w2,2} - f_2y_{w2,2} + x_{O2,0}, \quad (15)$$

$$y_{w2,0} = f_2x_{w2,2} + f_1y_{w2,2} + y_{O2,0}.$$

Następnie obliczana jest długość więzadła  $l_w$

$$l_w = \sqrt{(x_{w2,0} - x_{w0,0})^2 + (y_{w2,0} - y_{w0,0})^2}. \quad (16)$$

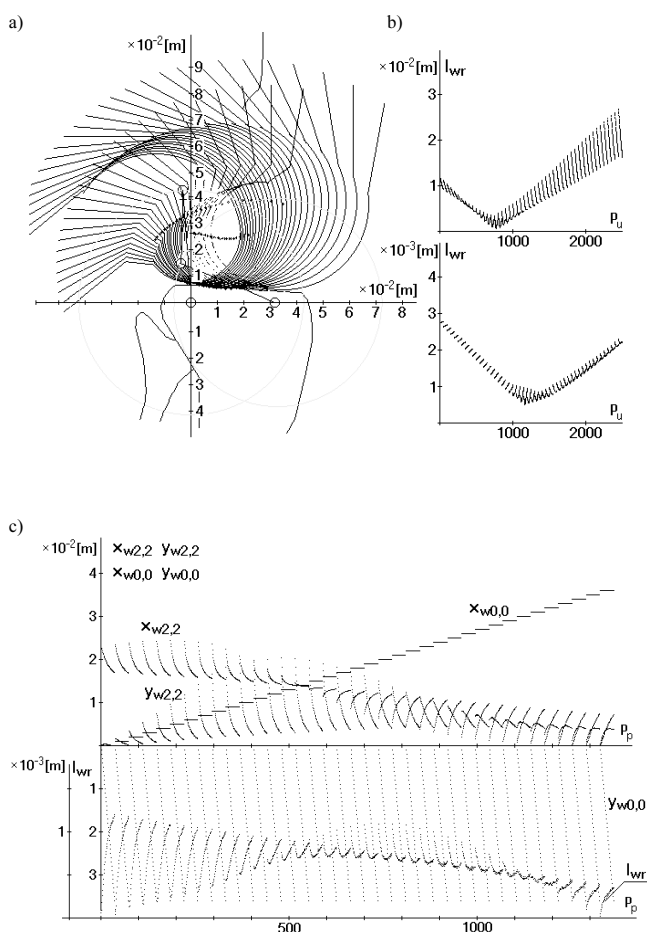
Podczas obliczeń wyszukiwana jest wartość minimalna  $l_{wmin}$  i maksymalna  $l_{wmax}$  długości więzadła i obliczana różnica wartości maksymalnej i minimalnej  $l_{wr}$ . Tylko dla najmniejszej wartości  $l_{wr}$  zapamiętywane są współrzędne punktu mocowania względem kości udowej  $P_{w2,2}$ . Celem dokładniejszego określenia tych współrzędnych, przyjmowany jest nowy przedział (mniejszy kwadrat), tym razem „w otoczeniu” obliczonych współrzędnych i obliczenia wykonywane są ponownie z mniejszym krokiem dla pełnego zakresu ruchu w stawie kolanowym (rys. 2b).

#### 4. Przykład liczbowy

Na podstawie przedstawionego algorytmu napisano program symulacyjny przy wykorzystaniu dialektu kompilatora języka Quick Basic. Do obliczeń symulacyjnych przyjęto następujące dane:  $l_1 = 3,8 \cdot 10^{-2}$  m,  $l_2 = 2,3 \cdot 10^{-2}$  m,  $l_3 = 4,4 \cdot 10^{-2}$  m,  $l_4 = 3,6 \cdot 10^{-2}$  m,

$x_{s2,2}^{(1)} = -0,9 \cdot 10^{-2}$  m,  $y_{s2,2}^{(1)} = -1,0 \cdot 10^{-2}$  m,  $x_{s2,2}^{(2)} = -1,16 \cdot 10^{-2}$  m,  $y_{s2,2}^{(2)} = 0,37 \cdot 10^{-2}$  m,  $r_{s2,2}^{(1)} = 3,3 \cdot 10^{-2}$  m, kąt łuku promienia pierwszego (dużego)  $\alpha_1 = 138^\circ$ , kąt łuku promienia drugiego (małego)  $\alpha_2 = 150^\circ$ , zmiana kąta  $\theta_1$  od 0,6 rad do 1,9 rad z krokiem 0,05 rad, zmiana współrzędnych  $x_{w0,0}$  od  $k_1 = 0$  do  $k_2 = l_4$  i  $y_{w0,0}$  od 0 do  $k_3 = -l_4$  z krokiem  $-1,00 \cdot 10^{-3}$  m (łącznie  $p_p = 1369$  punktów) przeszukiwanie współrzędnych  $x_{w2,2}$  od  $k_4 = 0,5l_2$  do  $k_5 = -1,5l_2$  i  $y_{w2,2}$  od  $k_6 = 0$  do  $k_7 = 2l_2$  z krokiem równym 1/50 zakresu zmian danej współrzędnej ( $p_u = 2500$  punktów) – dla pierwszego cyklu obliczeniowego, dla kolejnych przybliżeń „w otoczeniu” znalezionej punktu  $P_{w2,2}$  o współrzędnych  $(x_{w2,2}, y_{w2,2})$  w polu kwadratu  $\{x_{w2,2} \pm 0,04(k_5 - k_4), y_{w2,2} \pm 0,04(k_7 - k_6)\}$  również z jednakowym krokiem równym 1/50 zakresu zmian danej współrzędnej.

Przykładową symulację ruchu stawu przedstawiono na rysunku 3a, na wykresach – rys. 3b: górnym – pierwsze, dolnym – drugie przeszukiwanie współrzędnych kości udowej – przebiegi różnic długości więzadła pobocznego jako funkcji numeru kolejnego poszukiwanego punktu  $p_u$ . Na rysunku 3c przedstawiono wyniki obliczeń dla przyjętych danych liczbowych – przebiegi zadanych i obliczonych współrzędnych mocowań i różnicy długości więzadła pobocznego jako funkcji numeru kolejnego punktu  $p_p$  mocowania względem kości piszczelowej.



Rys. 3. Symulacja ruchu stawu kolanowego; a, b, c – opis w tekście  
Fig. 3. Simulation of knee joint movement; a, b, c – explanations in the text

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz – strukturalnej i ruchowej można sformułować następujące wnioski:

- Podstawowym mechanizmem zapewniającym prawidłowe odwzorowanie ruchu stawu kolanowego jest mechanizm czworoboku przegubowego ze skrzyżowanymi ramionami, który tworzą więzadła krzyżowe wraz z kośćmi udową i piszczelową.
- Staw kolanowy w swojej budowie strukturalnej zawiera trzy więzy bierne, w przypadku modelu płaskiego są to: –para kinematyczna, którą tworzy punkt styku kości udowej i piszczelowej, –dwa dodatkowe człony wraz z parami kinematycznymi, którymi są więzadła poboczne strzałkowe i piszczelowe.
- Prawidłowa praca stawu jest możliwa wówczas, gdy spełnione są ściśle określone warunki dotyczące geometrii więzów biernych.
- Otrzymane wyniki należy traktować orientacyjnie, gdyż dotyczą uproszczonego, płaskiego mechanizmu stawu, w którym przyjęto człony idealnie sztywne a współrzędne punktów mocowań więzadeł krzyżowych do kości udowej i piszczelowej oraz długości więzadeł przyjęto w przybliżeniu.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

- Dokładny ruch po okręgu jednej pary kinematycznej więzadła pobocznego względem drugiej, teoretycznie jest możliwy tylko względem par, których osie pokrywają się z osiami par więzadeł krzyżowych.
- Każde inne usytuowanie więzadła pobocznego, wiąże się z błędem wynikającym z niezachowania dokładnego ruchu względnego po okręgu par kinematycznych więzadła.
- W całym przeszukanym obszarze, największy błąd wynosi 1,19 mm, jednak praktycznie dla każdej współrzędnej  $x_{w0,0}$  punktu mocowania więzadła do kości piszczelowej w danym polu, znajduje się punkt na kości udowej zapewniający ruch więzadła pobocznego z błędem nie przekraczającym 0,7 mm, co wydaje się prawidłowe ponieważ więzadła powinny być napięte w pozycji stojącej.

## 6. Literatura

- [1] Andrzejewski T, Trytek – Pysiewicz A.: Leczenie uszkodzeń więzadeł krzyżowych stawu kolanowego. Fizjoterapia Polska. Vol. 4, Nr 4, 2004, 331 – 336.
- [2] Bochenek A., Reicher M.: Anatomia człowieka . Tom I. PZWL. Warszawa 1997.
- [3] Denavit J., Hartenberg R. S.: A Cinematic Notation for Lower-Pair Mechanism based on Matrices. Journ. Appl. Mechanics 22, 1955, 215-222.
- [4] Gaździk T. S.: Ortopedia i traumatologia. PZWL. Wyd. 2. Warszawa 2008.
- [5] Kuś W. M.: Urazowe uszkodzenia kolana. PZWL. Warszawa 1984.
- [6] Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K.: Teoria mechanizmów i manipulatorów. WNT, Warszawa 2002.
- [7] Świątkowski J.: Badanie radiologiczne w uszkodzeniach więzadeł krzyżowych stawu kolanowego. Acta Clinica, tom 1 nr 4, s. 307-313.
- [8] Trzaska T.: Aktualne metody rekonstrukcji więzadeł krzyżowych kolana. Medicina Sportiva 6. 2002, s.19 – 22.
- [9] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Staw\\_kolanowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Staw_kolanowy).