

KINEMATYKA I DYNAMIKA EGZOSZKIELETU KOŃCZYN DOLNYCH O NAPĘDZIE HYDRAULICZNYM

Streszczenie

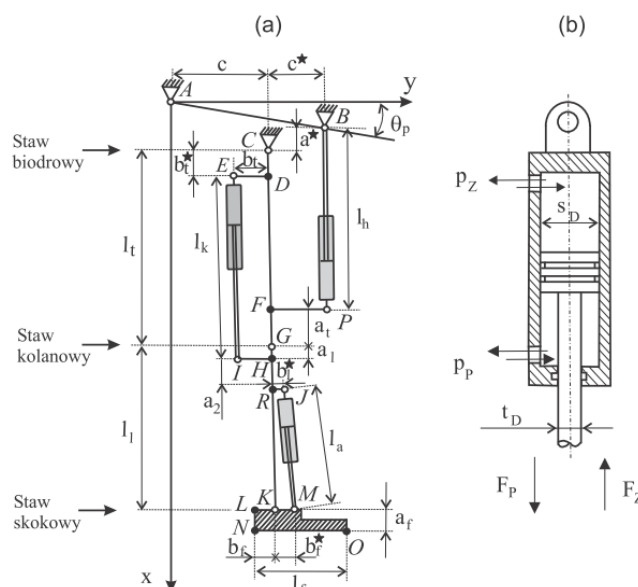
Artykuł wprowadza w problematykę związaną z modelowaniem egzoszkieletu kończyn dolnych z napędem hydraulicznym. Na początku przedstawiono kinematyczny model egzoszkieletu. Wyznaczono położenie każdego z charakterystycznych punktów w przyjętym układzie współrzędnych z wykorzystaniem macierzy kosinusów. Następnie określono zmianę długości każdego z siłowników hydraulicznych podczas chodu i biegu. Drugi etap badań polegał na zamodelowaniu poszczególnych części egzoszkieletu w programie CAD w celu wyznaczenia momentów bezwładności każdego z elementów. Bazując na zaproponowanym modelu egzoszkieletu opracowano równania dynamiki i przeprowadzono symulację zmiany pozycji z przysiadu do pozycji stojącej w czasie 1 s. Uzyskane wyniki zaprezentowano na wykresach. We wnioskach końcowych nakreślono kierunki dalszych badań.

WSTĘP

Wymagania stawiane obecnie projektowanym egzoszkieletem są coraz większe i wraz z ich wzrostem rośnie też zakres przeprowadzanych analiz. Do ich otrzymania wykorzystywane są systemy komputerowe, które zastępują człowieka w wielu czasochłonnych operacjach obliczeniowych. Jako napędy egzoszkieleto- w można wykorzystać systemy pneumatyczne, hydrauliczne i elektryczne. W głównej mierze jest to uzależnione od przeznaczenia urządzenia. Napędy hydrauliczne charakteryzują się dużym współczynnikiem mocy do masy urządzeń. Do ich wad należy zaliczyć możliwość wycieków, oraz konieczność zastosowania odpowiednich pomp w celu wytworzenia wysokiego ciśnienia. Ciśnienie pracy czynnika roboczego w układach hydraulicznych wynosi od 20 do 50 MPa. W artykule przedstawiono kinematykę i dynamikę modelu egzoszkieletu o napędzie hydraulicznym.

1. KINEMATYCZNY MODEL EGZOSZKIELETU Z NAPĘDZIEM HYDRAULICZNYM

Przykładowy model egzoszkieletu kończyny dolnej o napędzie hydraulicznym przedstawiono na rysunku 1. Do napędu kończyny, zastosowano trzy siłowniki hydrauliczne dwustronnego działania [5]. Siłownik pierwszy, jest odpowiedzialny za kąt w stawie biodrowym. Drugi siłownik, umieszczony w tylnej części kończyny (w płaszczyźnie strzałkowej), odpowiada za kąt w stawie kolanowym. Jego cechą charakterystyczną jest dolny przyczep, znajdujący się poniżej stawu kolanowego. Zadaniem ostatniego, trzeciego siłownika jest ustalanie właściwego kąta w stawie skokowym.



Rys. 1. Schemat strukturalny z parametrami modelu egzoszkieletu hydraulicznego kończyn dolnych (a), przekrój siłownika hydraulicznego dwustronnego działania (b)

Do wyznaczenia współrzędnych każdego z charakterystycznych punktów egzoszkieletu można wykorzystać macierze kosinusów kierunkowych, które przyjmują postać:

$$\begin{aligned}
 M_h &= \begin{bmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h \end{bmatrix} \\
 M_a &= \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \\
 M_k &= \begin{bmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

natomiast współrzędne poszczególnych punktów egzoszkieletu, w funkcji kątów \$(\theta_h, \theta_k, \theta_a)\$, wyznacza się z zależności:

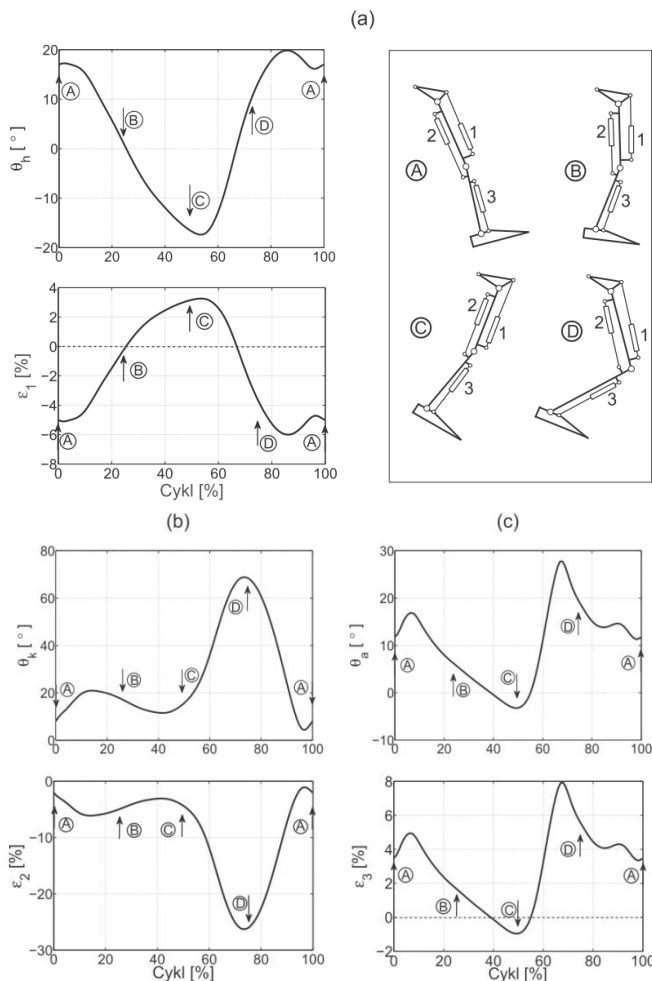
$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} (c+c^*)tg\theta_p \\ c+c^* \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} a^* + (c+c^*)tg\theta_p \\ c \end{bmatrix}, & D &= M_h \begin{bmatrix} b_t^* \\ 0 \end{bmatrix} + C, \\
 E &= M_h \begin{bmatrix} b_t^* \\ -b_t \end{bmatrix} + C, & F &= M_h \begin{bmatrix} l_t - a_t \\ b_t^* \end{bmatrix} + C, \\
 G &= M_h \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} + C, & H &= M_h \left(M_k \begin{bmatrix} a_l \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, \\
 I &= M_h \left(M_k \begin{bmatrix} a_l \\ -b_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, & J &= M_h \left(M_k \begin{bmatrix} a_1 + a_2 \\ b_t^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, \\
 K &= M_h \left(M_k \begin{bmatrix} l_l \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, & L &= M_h \left(M_k \left(M_a \begin{bmatrix} 0 \\ -b_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, \\
 M &= M_h \left(M_k \left(M_a \begin{bmatrix} 0 \\ b_f^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, & N &= M_h \left(M_k \left(M_a \begin{bmatrix} a_f \\ -b_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, \\
 O &= M_h \left(M_k \left(M_a \begin{bmatrix} a_f \\ l_f - b_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C, & P &= M_h \begin{bmatrix} l_t - a_t \\ c^* \end{bmatrix} + C, \\
 R &= M_h \left(M_k \begin{bmatrix} a_1 + a_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_t \\ 0 \end{bmatrix} \right) + C.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Z wyprowadzonych zależności (2), można wyznaczyć zmianę długości tłoczyska od położenia wyjściowego, modelu przedstawionego na rysunku 1:

$$\begin{aligned}
 l_h(\theta_h) &= \sqrt{(P(1,1) - B(1,1))^2 + (P(2,1) - B(2,1))^2} - l_{h0}, \\
 l_k(\theta_k) &= \sqrt{(I(1,1) - E(1,1))^2 + (I(2,1) - E(2,1))^2} - l_{k0}, \\
 l_a(\theta_a) &= \sqrt{(M(1,1) - J(1,1))^2 + (M(2,1) - J(2,1))^2} - l_{a0}, \tag{3} \\
 \varepsilon_{1h}(\theta_h) &= (l_{h0} - l_h(\theta_h)) / l_{h0}, \\
 \varepsilon_{1k}(\theta_k) &= (l_{k0} - l_k(\theta_k)) / l_{k0}, \\
 \varepsilon_{1a}(\theta_a) &= (l_{a0} - l_a(\theta_a)) / l_{a0}.
 \end{aligned}$$

gdzie l_{h0} , l_{k0} , l_{a0} , przedstawiają długość siłownika w położeniu wyjściowym (jak na rysunku 1).

Na rysunkach 2 i 3, przedstawiono zmianę kątów poszczególnych stawów i długości siłowników egzoszkieletu hydraulicznego, w chodzie swobodnym i podczas biegu opracowane na podstawie badań własnych [2]. Długość tłoka siłownika, została określona, jako połowa odległości między punktami mocowania siłowników w położeniu wyjściowym. Poszczególne siłowniki zostały oznaczone na rysunku cyframi od 1 do 3. Wartości ujemne wskazują na zmniejszenie długości. W przypadku stawu biodrowego, maksymalne zmniejszenie długości siłownika numer 1 wynosi ok. 6 % w przypadku chodu i 15 % w przypadku biegu.

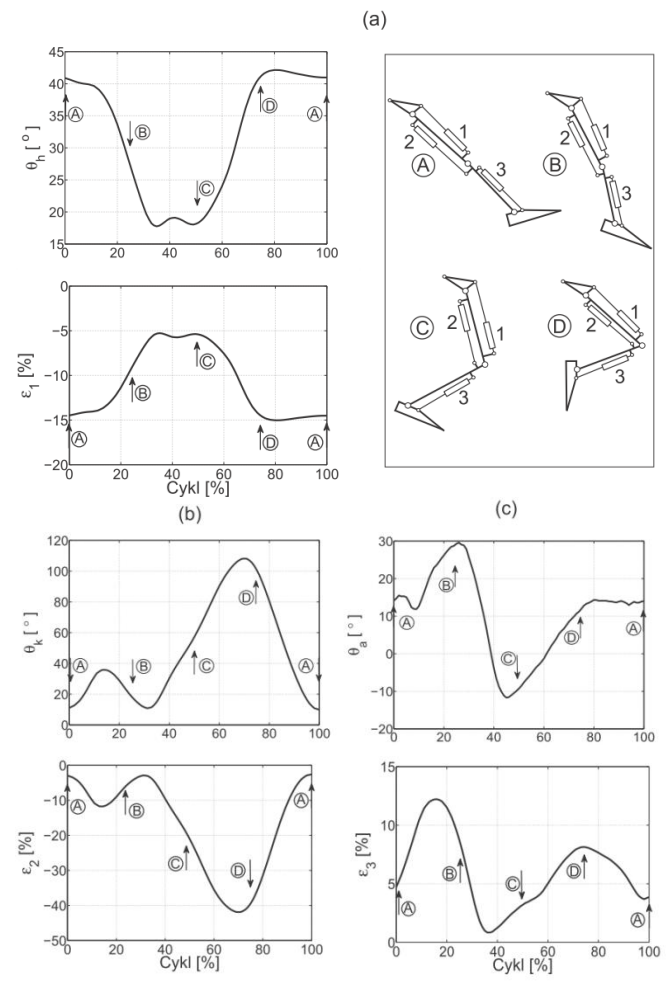


Rys. 2. Zmiana kątów w stawach i długości siłowników egzoszkieletu hydraulicznego, w chodzie swobodnym, staw biodrowy (a), staw kolanowy (b), staw skokowy (c)

Siłownik numer 2 stawu kolanowego zmniejsza swoją długość o 26 % w chodzie i o 42% podczas biegu. W przypadku siłownika odpowiadającego za kąt w stawie skokowym w większej części cyklu jego długość zwiększa się w porównaniu do pozycji wyjściowej o wartość 8 i 12 %.

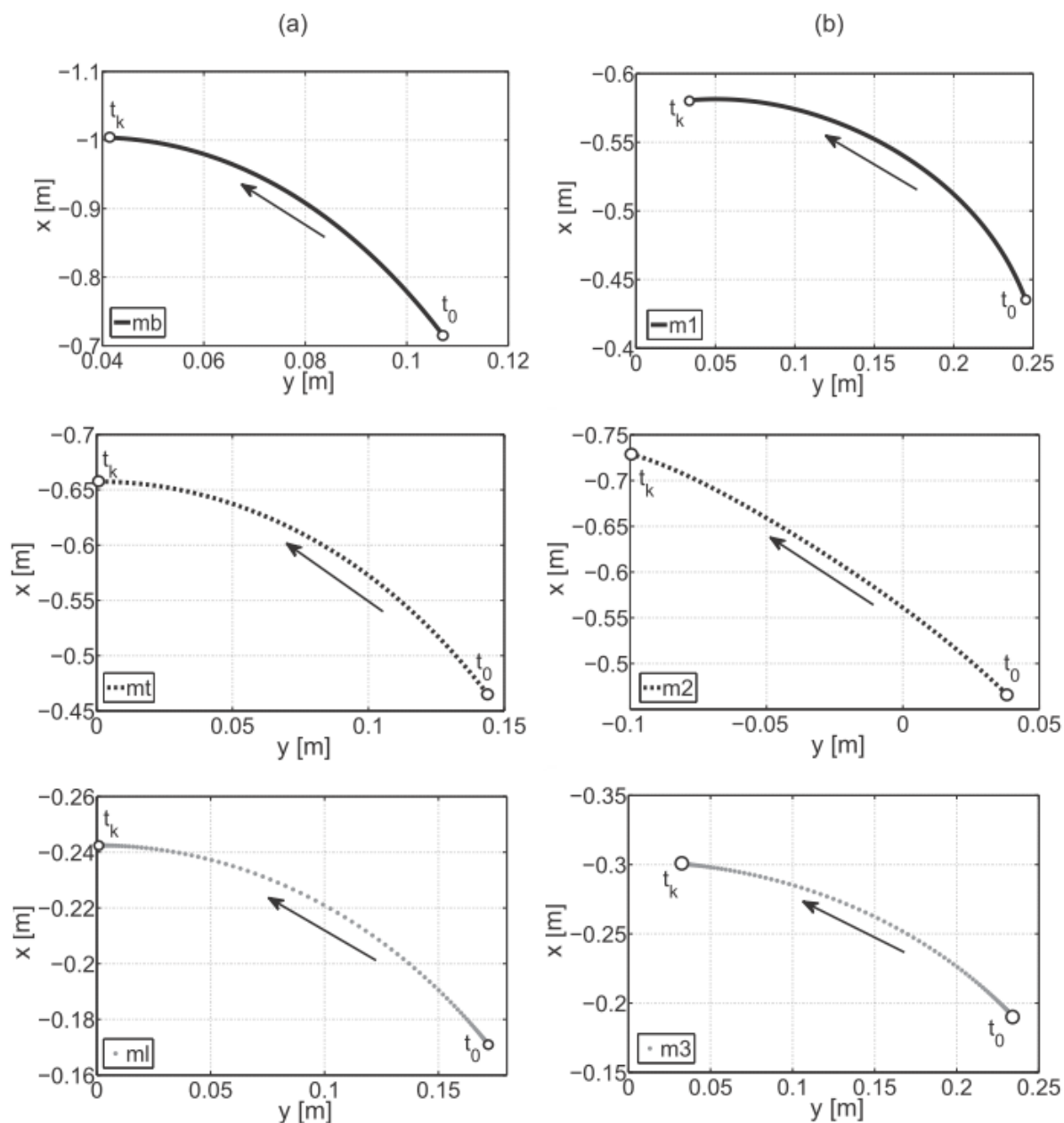
2. MODEL DYNAMIKI EGZOSZKIELETU KOŃCZYN DOLNYCH O NAPĘDZIE HYDRAULICZNYM PODCZAS WSTAWANIA Z PRZYSIADU

W celu wyznaczenia sił potrzebnych do podniesienia ciała człowieka z pozycji przysiadu do pozycji stojącej, początek układu współrzędnych związano ze stawem skokowym. Następnie określono współrzędne każdego z punktów w położeniu początkowym i końcowym. Za pomocą wielomianu piątego stopnia wyznaczono trajektorie charakterystycznych punktów egzoszkieletu, które zobrażowano na rysunku 4. Położenie wyjściowe odpowiada przysiadowi, w chwili t_0 , natomiast pozycja stojąca chwili t_k . Czas przemieszczenia z pozycji wyjściowej do końcowej określono na 1 s. Uwzględniono masę całego egzoszkieletu z układem zasilania oraz masę ładunku przenoszonego przez użytkownika. Na rysunku 4, strzałkami zaznaczono kierunek ruchu środków mas, względem przyjętego początku układu współrzędnych. Największą wartość przemieszczenia obserwuje się, w przypadku masy tułowia, które wzdłuż osi x wynosi $-0,28$ m. Największą wartość przemieszczenia wzdłuż osi y zauważalna jest w przypadku siłownika 3, napędzającego staw skokowy, którego wartość wynosi $0,2$ m. Najmniejszą wartość



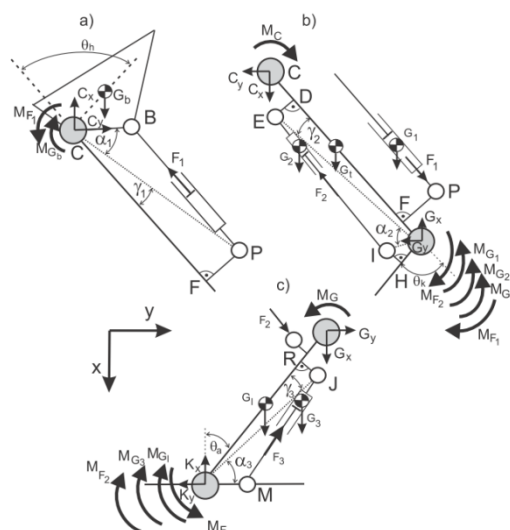
Rys. 3. Zmiana kątów w stawach i długości siłowników egzoszkieletu hydraulicznego, podczas biegu, staw biodrowy (a), staw kolanowy (b), staw skokowy (c)

przemieszczenia wzdłuż osi x obserwuje się w przypadku śm. podudzia o wartość $0,072$ m, co jest zrozumiałe, ze względu na niewielką odległość od początku układu współrzędnych. Do wyznaczenia trajektorii zastosowano wielomian 5 stopnia ze względu na fakt, że na początku i końcu ruchu wartości prędkości i przyspieszeń wynoszą 0.



Rys. 4. Trajektoria ruchu śm. tułowia, uda i podudzia (a), tor ruchu śm. siłowników 1,2,3 (b)

Siłowniki zamodelowano w pakiecie CAD korzystając z danych katalogowych [5,6], przez co uzyskano momenty bezwładności każdego z elementów [7]. Dane antropometryczne opracowano na podstawie [3,4]. Po wyznaczeniu prędkości i przyspieszeń każdego z punktów egzoszkieletu, wykorzystując metodę kinetostatyczną opracowano model dynamiki całego egzoszkieletu. Plany poszczególnych członów zobrażowano na rysunku 5.



Rys. 5. Plany członów swobodnych egzoszkieletu i kończyny dolnej z siłami i momentami sił bezwładności sił reakcji

Następnie wyznaczono dziewięć równań, określających siły w charakterystycznych punktach egzoszkieletu. Po lewej stronie pozostają wielkości niewiadome:

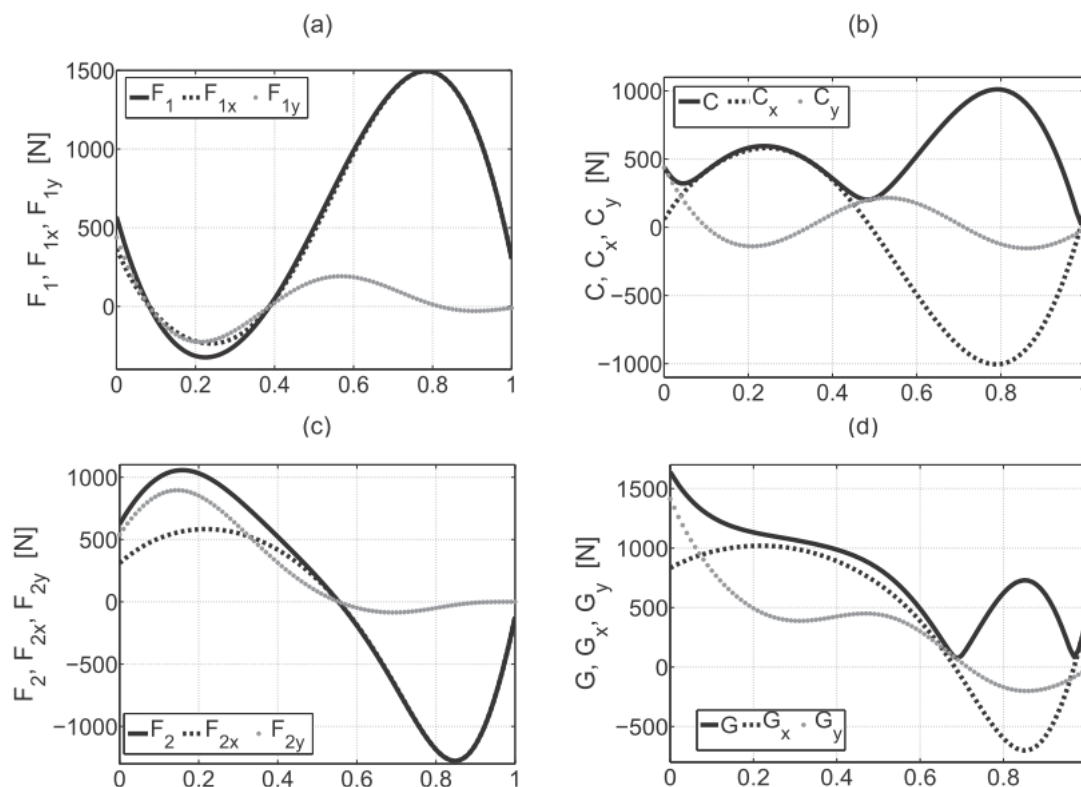
$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{I_{hC}\ddot{\theta}_h - m_b g r_{(bCy)}}{r_{(BCy)} \cos(\xi_{F1}) + r_{(BCx)} \sin(\xi_{F1})}, \\
 C_x &= m_b (\ddot{x}_b - g) - F_1 \cos(\xi_{F1}), \\
 C_y &= m_b \ddot{y}_b + F_1 \sin(\xi_{F1}), \\
 F_2 &= \frac{C_y r_{(CGx)} - C_x r_{(CGy)} - g(m_2 r_{(2Gy)} + m_t r_{(tGy)} + m_l r_{(lGy)}) + I_{kG}\ddot{\theta}_k + F_1(r_{(PGx)} \sin(\xi_{F1}) + r_{(PGy)} \cos(\xi_{F1}))}{r_{(2Gx)} \sin(\xi_{F2}) - r_{(2Gy)} \cos(\xi_{F2})}, \\
 G_x &= F_2 \cos(\xi_{F2}) + F_1 \cos(\xi_{F1}) + (m_1 + m_2 + m_t)g - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2 - m_t \ddot{x}_t - C_x, \\
 G_y &= F_1 \cos(\xi_{F1}) - F_2 \sin(\xi_{F2}) - C_y - m_1 \ddot{y}_1 - m_2 \ddot{y}_2 - m_t \ddot{y}_t, \\
 F_3 &= \frac{-G_y l_1 \cos(\theta_a) - G_x l_1 \sin(\theta_a) + g(m_3 r_{(3Ky)} + m_t r_{(tKy)}) + I_{lK}\ddot{\theta}_a + F_2(r_{(lKy)} \cos(\xi_{F2}) + r_{(lKx)} \sin(\xi_{F2}))}{r_{(JKx)} \sin(\xi_{F3}) - r_{(JKy)} \cos(\xi_{F3})}, \\
 K_x &= G_x + (m_3 + m_t)g - m_3 \ddot{x}_3 - m_t \ddot{x}_t + F_2 \cos(\xi_{F2}) - F_3 \sin(\xi_{F3}), \\
 K_y &= -F_2 \sin(\xi_{F2}) - F_3 \sin(\xi_{F3}) + m_3 \ddot{y}_3 + m_t \ddot{y}_t - G_y, \\
 M_x &= F_3 \cos(\xi_{F3}), \\
 M_y &= F_3 \sin(\xi_{F3}).
 \end{aligned} \tag{4}$$

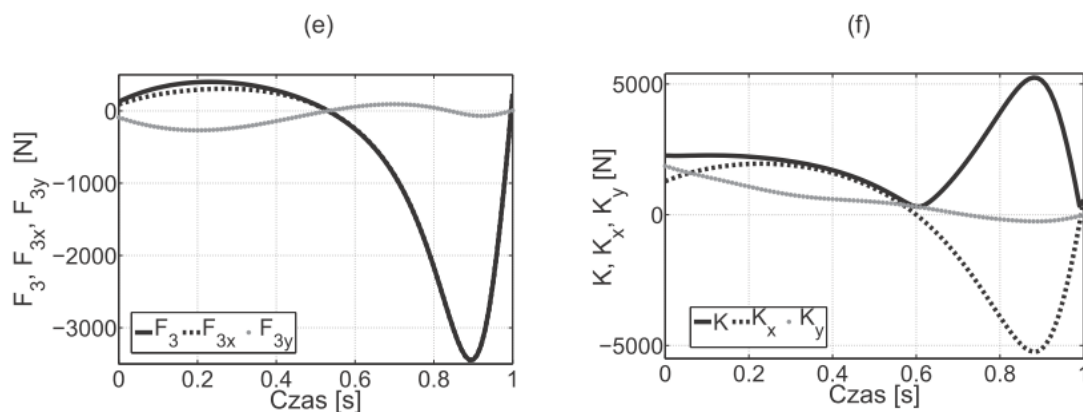
w których $r_{BCx,y}$, $r_{PGx,y}$, $r_{CGx,y}$, $r_{JKx,y}$ oznaczają składowe x , y odległości punktów BC, PG, CG, JK.

Siły występujące w punkcie M zamocowania tłoczyska cylindra 3, wynoszą odpowiednio $M_x = F_3x$ oraz $M_y = F_3y$. W modelu dynamicznym uwzględniono momenty bezwładności, wynikające z ruchu układu. Wyniki symulacji zilustrowano na rysunku 6. Bezwładność układu, czas przemieszczenia z pozycji wyjściowej do

końcowej, ma decydujący wpływ na siły niezbędne do przyspieszenia i hamowania układu. W modelu dynamiki, siła mięśni człowieka wynosi również 0. Jak wspomniano wcześniej, opis dynamiki eg-

zoszkieletu hydraulicznego kończyny dolnej ma charakter nieliniowy. Inercja układu zależy od zmiennych złączowych, co świadczy o sprzężeniach dynamicznych między poszczególnymi osiami egzoszkieletu. Istotną rolę odgrywają w tym przypadku sprzężenia prędkościowe, czyli siły odśrodkowe i siły Coriolisa. Aktualna konfiguracja egzoszkieletu wpływa też na siły grawitacyjne oddziałujące na dynamikę urządzenia.





Rys. 6. Wartości sił ze składowymi x, y w siłownikach F_1 (a), F_2 (c), F_3 (e), reakcje stawów ze składowymi x, y biodrowego (b), kolanowego (d), skokowego (f)

WNIOSKI

Przedstawiona w artykule koncepcja egzoszkieletu kończyny dolnej umożliwia zaprojektowanie "krok po kroku" urządzenia o napędzie hydraulicznym, które może być wykorzystane do celów rehabilitacyjnych, militarnych itp. Przedstawione wyniki symulacji wskazują na możliwość wykorzystania napędów hydraulicznych w egzoszkieleciech kończyn dolnych. Główną zaletą tych układów jest duża wartość mocy w stosunku do jego masy. Na podstawie przeprowadzonej symulacji istnieje możliwość doboru każdego siłownika w zależności od zastosowanej pomy hydraulicznej. Zmniejszenie wartości sił niezbędnych do wykonania określonego ruchu można osiągnąć poprzez dobór odpowiedniej długości elementów egzoszkieletu i miejsc zamocowania siłowników. Zwiększenie ramienia działania siły umożliwia zastosowanie siłowników o mniejszej średnicy, ew. ich działania pod niższym ciśnieniu czynnika roboczego.

Dalsze badania powinny być ukierunkowane na weryfikację modeli symulacyjnych poprzez badania na modelach rzeczywistych oraz dobór najbardziej optymalnych miejsc zamocowania siłowników.

BIBLIOGRAFIA

1. Festo Round cylinders DSNU/DSNUP/DSN/ESNU/ESN, (www.festo.com), Katalog 2015/06.
2. Głowiński S., Identyfikacja parametrów chodu swobodnego i biegu metodami numerycznymi, Logistyka w ratownictwie, 4/2015.
3. Knudson D., Fundamentals of Biomechanics, Second Edition, Springer, 2007.
4. Winter D.A., Biomechanics and motor control, Wiley, 2009.
5. <http://www.hydroster.com.pl/kategoria,3,2,Cylindry-hydrauliczne.html>, Karta katalogowa cylindrów hydraulicznych, Hydroster Sp.z o.o., Gdańsk, (dostęp 10.07.2015r.).
6. <https://www.parker.com>, Katalog siłowników hydraulicznych z serii MMB, okrągłych, typu hutniczego, (dostęp 10.07.2015).
7. <http://www.solidworks.pl/>, Licencja na użytkowanie pakietu SolidWorks w Wydziale Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej, 2015.

KINEMATICS AND DYNAMICS OF THE HYDRAULIC EXOSKELETON OF LOWER LIMB

Abstract

This paper concerns the kinematics and dynamics of human leg exoskeleton. The biomechanics of human leg was studied and three degrees of freedom model of human leg was obtained. The article introduced in the hydraulic exoskeleton lower leg modelling. The human parts of body mass and inertial parameters were obtained from recent literature, and these parameters were used for modelling human leg and MATLAB package. On this basis, the model of the exoskeleton of the lower limbs with hydraulic actuator was proposed. As the actuators the three hydraulic motors were used. Kinematic model was developed with the appointment of kinematic parameters describing the dependence between various elements of the exoskeleton. To determine the coordinates of the landmarks of the direction cosine matrices were used. The Euler equations were determined and simulation was done by using Matlab package. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed approach that can be utilized to analyze the kinematics and dynamics of exoskeletons for the purpose of selection of their actuators.

Autor:

Głowiński Sebastian - Politechnika Koszalińska, Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, tel. 94 34 78 395, sebastian.glowinski@tu.koszalin.pl