

GŁOWIŃSKI Sebastian

ANALIZA POŁOŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ EGZOSZKIELETU KOŃCZYNY GÓRNEJ

Streszczenie

Głównym zadaniem egzoszkieletu jest zwiększenie siły ludzkich mięśni. Od wielu lat przeprowadzono próby poprzez zastosowanie specjalnych urządzeń. W artykule przedstawiono model kończyny górnej. Do opisanego położenia łańcucha kinematycznego wykorzystano notację Denavit-Hartenberga. Model opisuje łańcuch kinematyczny otwarty o siedmiu stopniach swobody. Na podstawie danych antropometrycznych zaimplementowano długość, masę i parametry katowe poszczególnych elementów. Następnym etapem było stworzenie modelu egzoszkieletu kończyny przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink oraz SimMechanics. Przeprowadzono analizę kinematyki. Wyniki symulacji porównano z badaniami rzeczywistymi przemieszczeń katowych poszczególnych segmentów.

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. Określenie pozycji efektora w systemach wielocłonowych, jakim jest kończyna górna jest skomplikowane sposobem analitycznym. Można do tego z powodzeniem wykorzystać pakiet MATLAB-Simulink [7]. W pracy podjęto próbę określenia i zamodelowania parametrów związanych z kończyną górną, stworzenie modelu w oparciu o notację Denavita-Hartenberga przy wykorzystaniu pakietu SimMechanics, zaimplementowaniu zakresu kątów dla każdego łącza oraz przeprowadzenia symulacji polegającej na zmianie położenia katowych wraz z wizualizacją.

1. NOTACJA DENAVITA-HARTENBERGA

Notacja Denavita – Hartenberga (notacja DH) została wynaleziona w 1955 roku przez R.S. Hartenberga i J. Denavita [5]. Za jej pomocą można w prosty i jednoznaczny sposób opisać warunki kinematyczne i rozwiązywać kinematykę mechanizmów przestrzennych w celu wyznaczenia kinematyki prostej i odwrotnej. W literaturze stosuje się cztery różne wersje zapisu DH: prostą, odwrotną, zmodyfikowaną i zmodyfikowaną odwrotną. W tym artykule wykorzystana została wersja prosta do opisu notacji DH. Zgodnie z tą wersją zapisu oś ${}^{i-1}X$ leży na wspólnej prostopadłej do osi par członu $i-1$, oś ${}^{i-1}Z$ znajduje się na osi par łączącej człony $i-1$ z i -tym. Każde ogniwo jest określone za pomocą dwóch parametrów: długości a_i mierzonej wzdłuż osi iX od ${}^{i-1}Z$ do iZ oraz kąta skręcenia ogniwa α_i mierzonego wokół osi iX od ${}^{i-1}Z$ do iZ zgodnie z zasadą śruby prawoskrętnej (Rys.1). Przeguby (złącza) ogniwa są określone również za pomocą dwóch parametrów: przesunięcia liniowego w złączu d_i mierzonego wzdłuż osi ${}^{i-1}Z$ od ${}^{i-1}X$ do iX oraz kąta obrotu przegubu θ_i mierzonego wokół osi

${}^{i-1}Z$ od ${}^{i-1}X$ do iX , zgodnie z zasadą śruby prawoskrętnej. Trzy z powyższych wielkości są zawsze stałe i nazywane są parametrami złączowymi. Jedna jest zmienna i nazywana jest zmienną złączową. Dla złącza translacyjnego, zmienną jest przesunięcie d_i a kąt obrotu złącza θ_i jest stały. Natomiast dla złącza obrotowego kąt obrotu złącza θ_i jest zmienną a przesunięcie d_i jest stałym. Macierz opisująca przekształcenie układu $i-1$ do układu i -tego można zapisać jako

$${}^i\mathbf{A} = \mathbf{ROT}(z, \theta_i) \cdot \mathbf{TRANS}(0,0, d_i) \cdot \mathbf{TRANS}(a_i, 0,0) \cdot \mathbf{ROT}(x, \alpha_i) \quad (1)$$

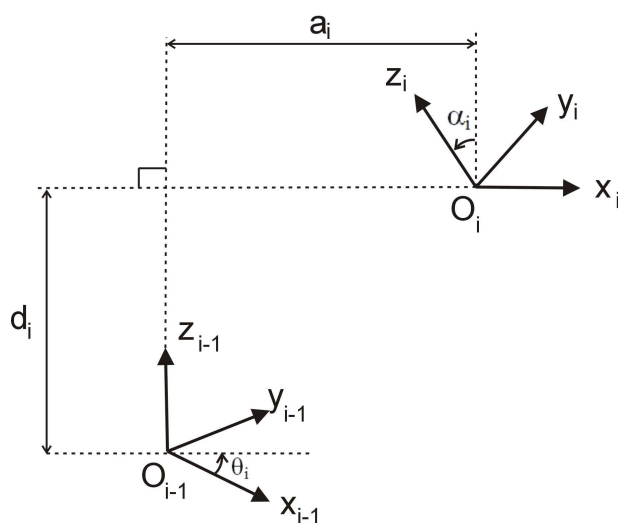
$$\mathbf{ROT}(z, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{TRANS}(0,0, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{TRANS}(a_i, 0,0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{ROT}(x, \alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

po wykonaniu operacji mnożenia otrzymuje się zwartą postać macierzy ${}^i\mathbf{A}$, nazywaną macierzą przekształcenia jednorodnego

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

opisującą transformację dwóch sąsiednich, sztywno powiązanych z ciałami, układów współrzędnych według notacji DH. Pierwsze 3×3 elementy macierzy (2) opisują położenie kątowe (macierz rotacji), 3 wiersze ostatniej kolumny położenie początku układu współrzędnych i -tego w układzie $(i-1)$ (wektor translacji). Trzy kolumny ostatniego wiersza są perspektywą, nie mającą znaczenia w kinematyce mechanizmów, natomiast ostatni element macierzy (2) jest czynnikiem skali, którego wartość równa 1 świadczy o standardowym przedstawieniu współrzędnych jednorodnych.



Rys. 1. Układy współrzędnych w notacji DH

Procedura ustalania układów współrzędnych przy wykorzystaniu notacji DH:

- ponumerowanie ogniwi i złączy (podstawa ma numer 0, czyli i -te ogniwo jest umieszczone między złączami o numerach iZ oraz ${}^{i+1}Z$);
- przyjęcie osi ${}^{i-1}Z$ jako osi przegubu obrotowego iZ lub w przypadku złącza translacyjnego jako równoległą do kierunku ruchu tego złącza. Zwrot tej osi może być przyjęty dowolnie;
- przyjęcie osi iX jako wspólnej normalnej do osi złączy i -tego i $i+1$ i skierowanej w stronę ogniwi o wyższych numerach;
- przyjęcie osi iY jako uzupełnienie dwóch poprzednich osi do prawoskrętnego, kartezyjskiego układu współrzędnych

Transformacja z układu i -tego do układu $i-1$ dokonuje się poprzez:

- obrót układu współrzędnych $i-1$ wokół osi ${}^{i-1}Z$ (o kąt θ_i);
- przesunięcie w kierunku osi ${}^{i-1}Z$ (o odległość d_i);
- przesunięcie w kierunku osi iX (o odległość a_i);
- obrót układu współrzędnych wokół osi iX (o kąt α_i).

Przy wykorzystaniu notacji DH mogą wystąpić przypadki szczególne

- w przegubach o 1 stopniu swobody, jeden z czterech parametrów DH jest współrzędną uogólnioną. W przypadku przegubu obrotowego kąt θ_i jest zmienną przegubu $q_i = \theta_i$ a w przypadku przegubu translacyjnego d_i jest zmienną przegubu $q_i = d_i$;
- jeśli występują równoległe osie przegubów, istnieje nieskończenie wiele wspólnych normalnych, w wyniku czego d_i jest nieoznaczone. W takiej sytuacji należy dowolnie ustalić d_i , np. $d_i = 0$;
- przy przecinających się osiach przegubów musi być $a_i = 0$. Gdy osie przegubów są wzajemnie prostopadłe należy przyjąć $\alpha_i = \pm\pi/2$;
- dla układu bazowego należy korzystać z reguły według której, oś z_0 musi wskazywać w kierunku osi przegubu. Oś x_0 lub y_0 mogą być wybrane dowolnie. W ostatnim członie początek układu współrzędnych może być wybrany dowolnie, jednak zaleca się umieszczenie go w punkcie efektora. Ponadto, oś x_n ostatniego członu powinna wskazywać na przedłużenie normalnej układu poprzedzającego.

Położenie układu współrzędnych i -go w układzie $i-1$ jest możliwe przez podanie sześciu współrzędnych, w tym np. 3-ch kątów Cardana (obrotów wokół osi układu $i-1$):

$$\begin{aligned}
 x_{(i-1)} &= a_i \cos \theta_i, \\
 y_{(i-1)} &= a_i \sin \theta_i, \\
 z_{(i-1)} &= d_i, \\
 R_{x(i-1)}(\theta) &= \arctg\left(\frac{-\cos \theta_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i}\right), \\
 R_{y(i-1)}(\psi) &= \arctg(\sin \theta_i \sin \alpha_i), \\
 R_{z(i-1)}(\theta) &= \arctg\left(\frac{\sin \theta_i \cos \alpha_i}{\cos \theta_i}\right).
 \end{aligned} \tag{3}$$

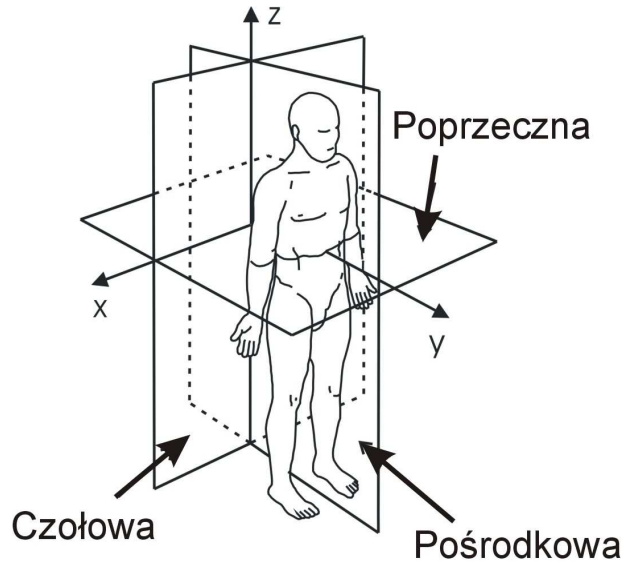
W celu określenia położenia efektora (np. dłoni) w układzie bazowym, którym może być podstawa egzoszkieletu zamocowana w części plecowej należy dokonać operacji mnożenia wszystkich macierzy przekształcenia pomiędzy poszczególnymi elementami egzoszkieletu z określonymi parametrami DH.

2. KOŃCZYNA GÓRNA

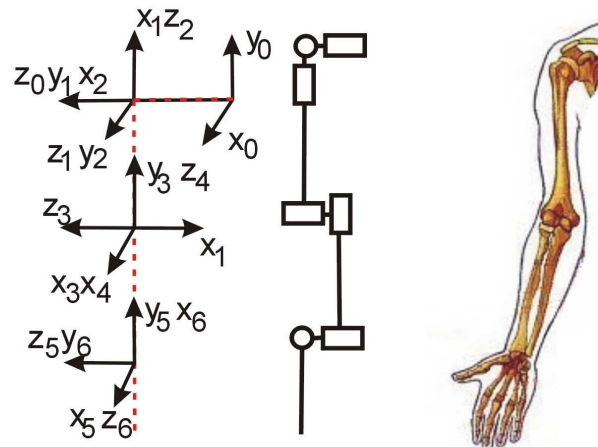
Kończyna górna może być przedstawiona jako otwarty łańcuch kinematyczny o wielu stopniach swobody. Najprostszy model opisujący kończynę górną posiada siedem stopni swobody (Degrees of Freedom DoF) [2]. Trzy stopnie swobody dotyczą stawu barkowego (zginanie – prostowanie, odwodzenie – przywodzenie, rotacja), dwa stopnie opisują staw

łokciowy (zginanie – prostowanie, rotacja przedramienia) oraz dwa stopnie swobody charakteryzują nadgarstek (zginanie grzbietowe i dłoniowe, zginanie promieniowe i łokciowe w nadgarstku).

Na początku określono płaszczyzny w których odbywa się ruch i początek układu współrzędnych (Rys.2).



Rys. 2. Płaszczyzny z przyjętym układem odniesienia w modelu egzoszkieletu



Rys. 3. Model kończyny prawej o siedmiu stopniach swobody

Zgodnie z notacją DH oraz parametrami antropomorficznymi zaprezentowanymi w [4], opracowano model egzoszkieletu kończyny górnej o 7 DoF, który przedstawiono na rysunku 3. Określono parametry notacji DH poszczególnych połączeń, które przedstawiono w tabeli 1. Długość i masę elementów kończyny oparto na podstawie badań antropomorficznych [3] i wprowadzono do skryptu pakietu MATLAB, co pozwala na automatyczny dobór parametrów DH w zależności od masy i wzrostu użytkownika. Zakres kątów możliwych do osiągnięcia przez poszczególne połączenia ustalono na podstawie [6].

Tab. 2. Parametry modelu kończyny górnej prawej

Połączenie	Zakres kątów	Parametry notacji DH				Masa	s_{cx}	s_{cy}	s_{cz}
		θ	d	a	α				
Baza (z_0)		0	$-d_b$	0	0	0	0	0	0
Bark (z_1)	$-60^\circ + 165^\circ$	$\theta_1 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$	0	0	0	0
Bark (z_2)	$-180^\circ + 60^\circ$	$\theta_2 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$	0	0	0	0
Bark (z_3)	$-180^\circ + 80^\circ$	$\theta_3 + \pi/2$	$-d_r$	0	$\pi/2$	M_r	0	0	$-s_{cr}$
Łokiec (z_4)	$-10^\circ + 145^\circ$	θ_4	0	0	$-\pi/2$	0	0	0	0
Łokiec (z_5)	$\pm 90^\circ$	θ_5	$-d_{prz}$	0	$\pi/2$	M_{prz}	0	0	$-s_{cprz}$
Nadgarstek (z_6)	$-90^\circ + 70^\circ$	$\theta_6 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$	0	0	0	0
Nadgarstek (z_7)	$-15^\circ + 40^\circ$	θ_7	0	$-a_d$	$\pi/2$	M_d	s_{cd}	0	0

gdzie:

$$d_b = 20$$

– odległość od kręgosłupa do silnika zamocowanego na plecach [cm];

W

– wysokość człowieka [m];

$$d_r = 17,4 \cdot W$$

– długość ramienia (od barku do łokcia) [m];

$$d_{prz} = 15,6 \cdot W$$

– długość przedramienia [cm];

$$a_d = 10,79 \cdot W$$

– długość dłoni [cm];

M

– masa ciała człowieka [kg];

$$M_r = 0,0271 \cdot M$$

– masa ramienia [kg];

$$M_{prz} = 0,0162 \cdot M$$

– masa przedramienia [kg];

$$M_d = 0,0061 \cdot M$$

– masa dłoni [kg];

$$s_{cr} = 57,72 \cdot d_r$$

– położenie środka ciężkości ramienia [cm];

$$s_{cprz} = 45,74 \cdot d_{prz}$$

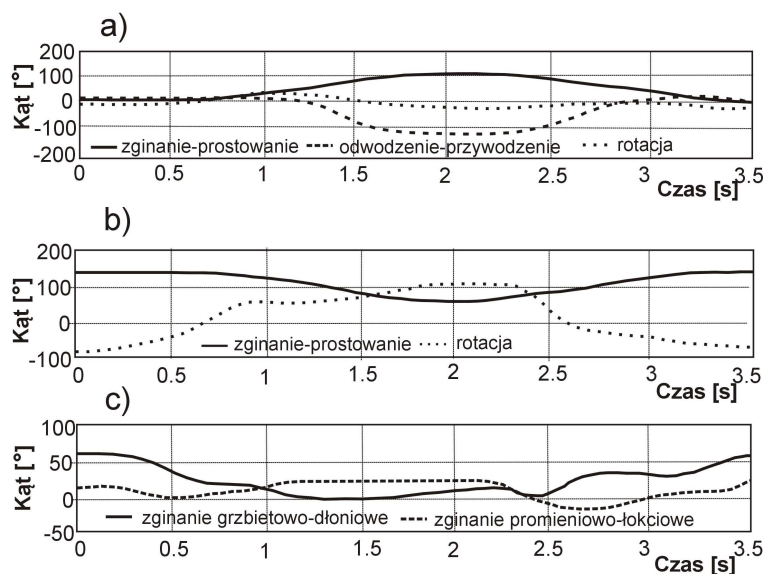
– położenie środka ciężkości przedramienia [cm];

$$s_{cd} = 36,24 \cdot a_d$$

– położenie środka ciężkości dłoni [cm].

3. KINEMATYKA KOŃCZYNY GÓRNEJ

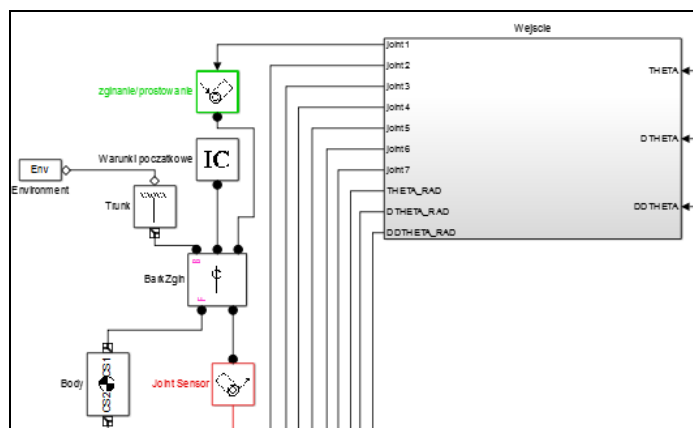
Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy literatury stwierdzono, że kolejność angażowania się w ruch poszczególnych stawów jest zawsze taka sama [6]. Ruch rozpoczyna się od dłoni (część dystalna kończyny) a kończy się w stawie barkowym (część proksymalna).



Rys. 4. Przebieg kątów w stawach podczas pierwotnego i powrotnego ruchu w stawach: a) barkowym, b) łokciowym c) nadgarstkowym [3]

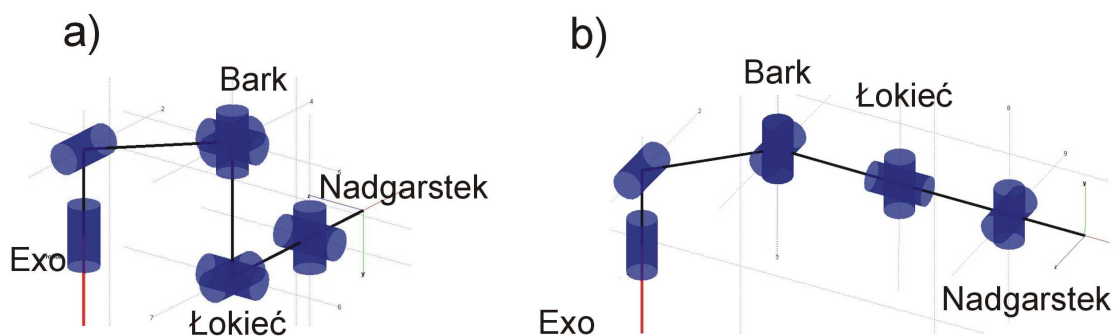
Ruch powrotny nie odbywa się po tej samej trajektorii co ruch pierwotny. Przykładowy przebieg zmiany kątów przeanalizowanych na podstawie rzeczywistych pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Ruch powrotny rozpoczyna się od drugiej sekundy.

Opierając się na uzyskanych wynikach opracowano model komputerowy w programie MATLAB-Simulink [7]. Zbudowano model kończyny górnej korzystając z pakietu SimMechanics (Rys. 5). Wprowadzono warunki początkowe i przeprowadzono symulację ruchu kończyny górnej.

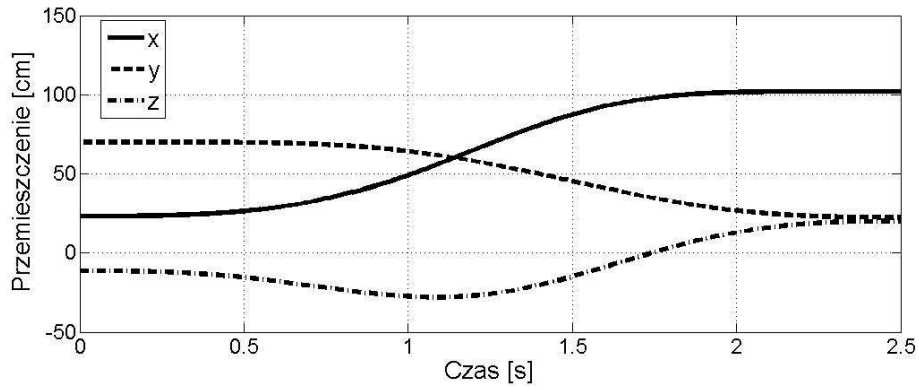


Rys.5. Fragment modelu w opracowanym pakiecie MATLAB-Simulink

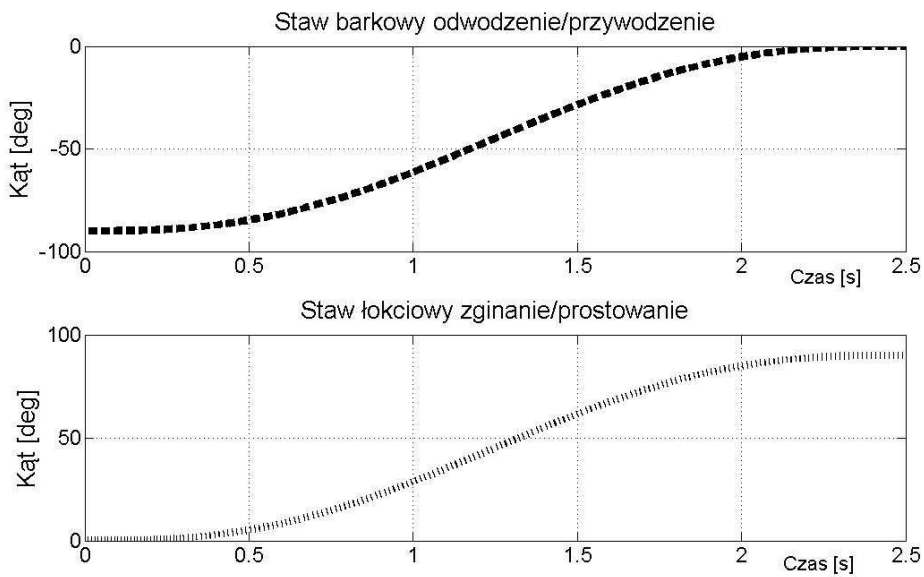
Jako parametry wyjściowe podano kąty określające położenie ręki w układzie współrzędnych związanym z bazą (kręgosłup). Ramię skierowane wzdłuż tułowia, łokieć zgięty o kąt 90° , nadgarstek wierzchem dłoni skierowany na zewnątrz (Rys.6a). Na podstawie kinematyki prostej określono położenie efektora w bazowym układzie współrzędnych dla człowieka o wzroście 180 cm jako $x_p=23,22$ cm, $y_p=70,00$ cm, $z_p=-11,32$ cm. W przedziale czasowym $0 \div 2,5$ s przeprowadzono symulację ruchu do położenia w którym ramię jest prostopadłe do tułowia i łokieć wyprostowany (Rys.6b). Wizualizację egzoszkieletu opracowano przy wykorzystaniu pakietu Robotics [1]. Położenie efektora wyniosło $x_k=102,04$ cm, $y_k=22,50$ cm, $z_k=20,00$ cm. W drugim etapie symulacji dokonano obrotu stawu barkowego z jednoczesnym zginaniem stawu łokciowego do kąta 90° . Współrzędne końcowe określające położenie efektora wyniosły $x_k=-24,28$ cm, $y_k=53,82$ cm, $z_k=20,00$ cm. Zmianę współrzędnych i kątów przedstawiono na rysunkach 7-8 i rysunkach 10-11.



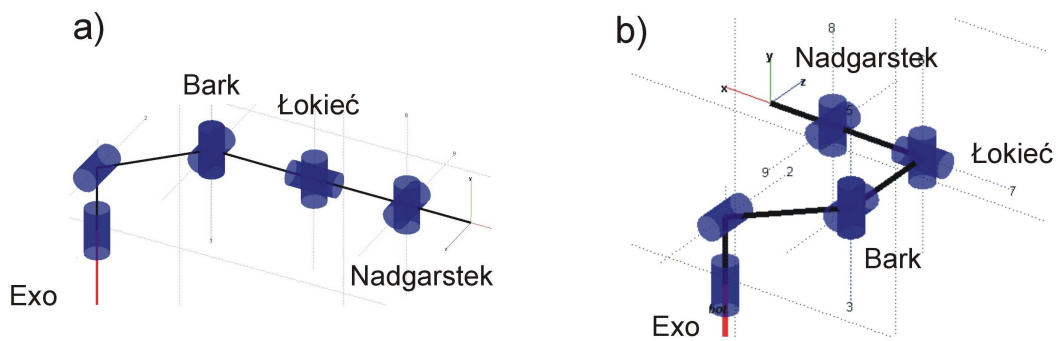
Rys. 6. Położenie a) wyjściowe b) końcowe egzoszkieletu podczas symulacji I



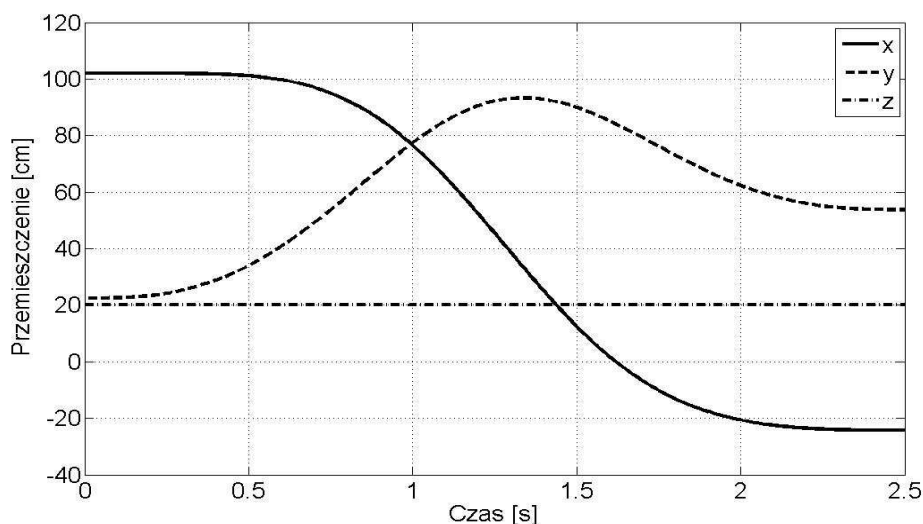
Rys. 7. Zmiana współrzędnych podczas ruchu egzoszkieletu z położenia I do II



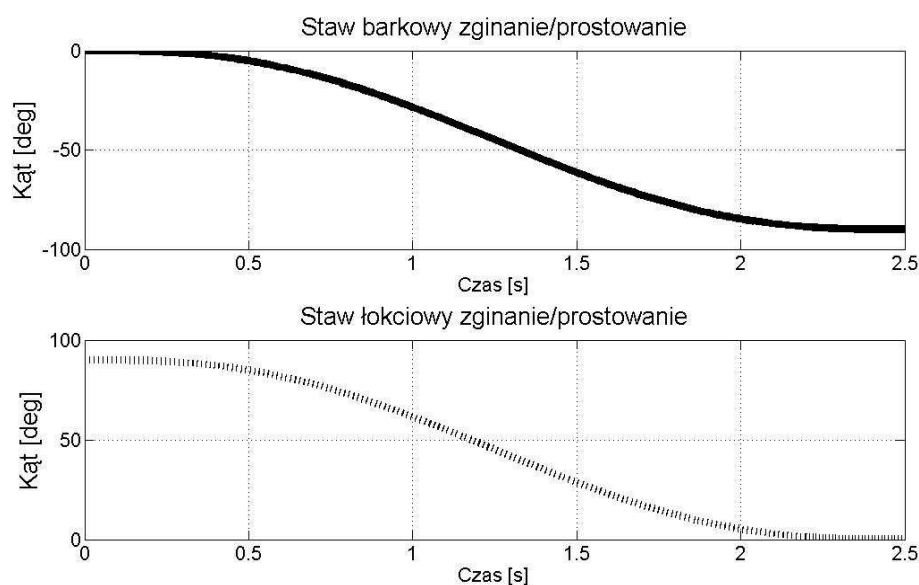
Rys. 8. Zmiana kątów w stawie barkowym i łokciowym



Rys. 9. Położenie a) wyjściowe b) końcowe egzoszkieletu podczas symulacji II



Rys. 10. Zmiana współrzędnych podczas ruchu egzozszkieletu z położenia II do III



Rys. 11. Zmiana kątów w stawie barkowym i łokciowym

WNIOSKI

Przedstawiona w artykule koncepcja egzozszkieletu kończyny górnej o siedmiu stopniach swobody została opracowana w ten sposób, aby spełniał on wszystkie postawione mu wymagania pod względem kinematyki ruchu. Do stworzenia modelu wykorzystano notację Denavita-Hartenberga wraz z wprowadzeniem parametrów opartych na podstawie badań antropometrycznych. W modelu uwzględniono dopuszczalny zakres kątów odpowiadający poszczególnym stawom. Przy wykorzystaniu pakietu SimMechanics opracowano model i następnie dokonano analizy kinematyki ruchu egzozszkieletu kończyny górnej pod względem zmiany kątów z którego wynika, że opracowany w pakiecie MATLAB model odpowiada możliwościom ruchowym kończyny górnej. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że każdy z ludzi ma inny wzorec ruchu kończyny, ponadto inny zakres kątów dopuszczalnych w stawach, więc dobór modelu do egzozszkieletu powinien uwzględniać te parametry. Celem

dalszych badań jest uwzględnienie mas oraz momentów bezwładności poszczególnych elementów i analiza dynamiki egzoszkieletu.

BIBLIOGRAFIA

1. Corke P.: *Robotics, Vision and Control*, Springer, Vol.73, 2011.
2. Crowell H.P.: *Human engineering Design Guidelines for a Powered Full Body Exoskeleton*, Army Research Laboratory, ARL-TN-60, 1995.
3. Davies D.V., Davies F: *Gray's Anatomy*, 33 ed. Green & Co Ltd., 1962.
4. Głowiński S., Pecolt S., *Modelowanie kinematyki bezpośredniej egzoszkieletu kończyny górnej*, TTS Technika Transportu Szynowego, pp. 241-246. 2012.
5. Hartenberg R.S., Denavit J.: *A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanism Based on Matrices*, Journal of Applied Mechanics, vol. 77, pp. 215-221, June 1955.
6. Michnik R., Jurkojć J., i in.: *Analiza Kinematyki Ruchów Kończyny Górnej Podczas Wykonywania Ćwiczeń Metodą PNF*, Modelowanie Inżynierskie, vol. 36, pp. 243-248, 2008.
7. www.matlab.com (08/15/2013)

KINEMATIC ANALYSIS OF EXOSKELETON FOR HUMAN ARM

Abstract

The main task of the exoskeleton is increasing the muscle power. Paper discussed the kinematic exoskeleton suit for human arms. The model of exoskeleton consist of nine degrees of freedom was calculated by using Denavit-Hartenberg notation. Based on anthropometrical parameters data were implemented to MATLAB-Simulink package and analysis of kinematics was done. The simulation results were compared with the angular displacement tests of individual segments.

Autor:

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