



Sebastian GŁOWIŃSKI, Sebastian PECOLT

EGZOSZKIELETY – NOTACJA DENAVITA HARTENBERGA

Streszczenie

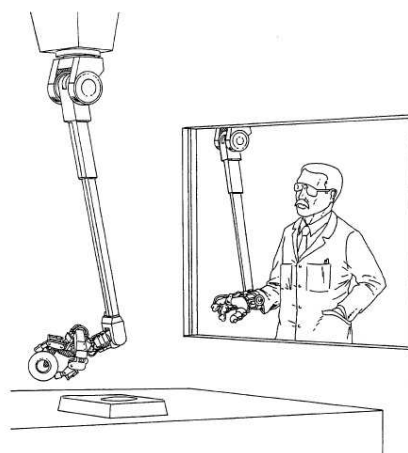
W artykule przedstawiono koncepcję budowy egzoszkieletu kończyny górnej o 9 stopniach swobody (9 DoF). Opracowano kinematykę prostą egzoszkieletu przy wykorzystaniu notacji Denavita – Hartenberga (DH) z określeniem parametrów DH wraz z implementacją w pakiecie MATLAB.

WSTĘP

Rozwój techniki w XXI wieku umożliwia zwiększenie możliwości operacyjnych człowieka. Może się to odbyć poprzez zastosowanie urządzeń wspomagających ruch kończyn górnych i dolnych. Ma to decydujące znaczenie w przypadku służb ratunkowych jak np. straż pożarna, pogotowie ratunkowe. Podczas katastrof i wypadków wykorzystywane są urządzenia pneumatyczne, hydrauliczne do rozcinania pojazdów w celu ratowania życia ludzkiego. Wykorzystanie egzoszkieletu ułatwi i umożliwi sprawne wydostanie ofiary w miejscach trudno dostępnych w przypadku braku możliwości zastosowania urządzeń hydraulicznych. Niezbędne więc wydaje się wyposażenie załóg w egzoszkielety i wykorzystanie ich w akcjach ratowniczych. W rehabilitacji mogą służyć jako pomoc do wspomagania poprawnej trajektorii ruchu kończyn. W zastosowaniach wojskowych egzoszkielet zwiększa mobilność żołnierza na polu walki, pozwala na zwiększenie ładowności i możliwość pokonania większej odległości przy mniejszym wysiłku fizycznym. Może być również wykorzystany do podnoszenia pocisków raketowych, bomb oraz innego uzbrojenia do podwieszenia na belkach podskrzydłowych statków powietrznych.

1. EGZOSZKIELETY

Egzoszkielet jest rodzajem mobilnego antropomorficznego robota wspomagającego pracę mięśni człowieka. Z reguły jest dopasowany do budowy ludzkiego ciała. Rozróżnia się egzoszkielety kończyn górnych, dolnych lub w połączeniu dają one egzoszkielet kompletny. Pierwsze badania nad egzoszkieletami rozpoczęto w latach 50 XX wieku. Model pierwszego manipulatora opracowano w Argonne National Laboratory w 1954 roku. Prezentował on elastyczne możliwości manipulatora, który był kontrolowany elektronicznie bez połączeń mechanicznych z ludzką ręką (rys.1.).



Rys.1. Model pierwszego manipulatora sterowanego ludzką ręką [1]

Do dnia dzisiejszego są prowadzone z powodzeniem przez np. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), np. projekt *Exoskeletons for Human Performance Augmentation programme* [8]. Powstały w USA egzozskielet *Sarcos* wspomaga układy mięśniowe całego ciała użytkownika. Zasilaniem jest zewnętrzne źródło energii, natomiast jako układy wykonawcze zastosowano hydrauliczne siłowniki obrotowe umieszczone na napędzanych przegubach urządzenia. Inny opracowany model to *BLEEX (Berkley Lower Extremity Exoskeleton)*, który wspomaga użytkownika w przenoszeniu ładunku. W Japonii opracowano egzozskielet *HAL-5 (Hybrid Assistive Leg – hybrydowa noga wspomagająca)*, który jest wykorzystywany do zwiększania możliwości siłowych człowieka i do celów rehabilitacyjnych. Głównym zadaniem *HAL-5* jest zwiększenie momentów w stawach kolanowym, biodrowym i skokowym. Zastosowane silniki prądu stałego z przekładnikami falowymi są umiejscowione dokładnie w osi przegubu i zapewniają prostowanie i zginanie kolana i biodra. Cechą charakterystyczną urządzenia *HAL-5* jest przenoszenie obciążenia na powierzchnię ziemi z wykorzystaniem układu kostnego człowieka. Warto wspomnieć również o projekcie egzozskieletu opracowanym w Instituto de Biomechanica de Valencia w Hiszpanii pod nazwą *WOTAS (The Wearable Orthosis For Tremor Assessment And Suppression)*. Waga całego systemu wynosi jedynie 850 g i może być on wykorzystany do rehabilitacji.

Niektóre z opracowanych projektów egzozskieletów i ich podstawowych danych technicznych przedstawiono w tabeli 1.

Tab.1. Wybrane egzozskielety i ich podstawowe parametry techniczne

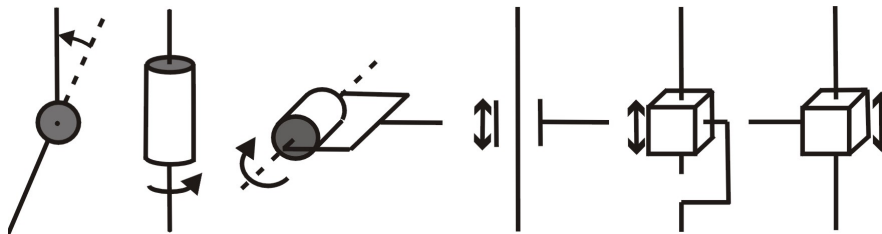
Lp.	Nazwa	DOF	Waga	Układ wykonawczy
1	A Myosignal-Based Powered Exoskeleton System	2	5 kg	1 silnik elektryczny
2	Exoskeleton System for Human Hupper Limb Motion Assist	3	–	3 silniki elektryczne
3	Soft Actuated Exoskeleton	7	2 kg	pneumatyczny
4	Muscle Suit For Upper Body	6	4.6 kg	pneumatyczny
5	Hydraulic Extender (Berkley)	6	–	hydrauliczny
6	WOTAS	2	0.85 kg	elektryczny
7	ASSIST	1	0.39 kg	pneumatyczny
8	PERCO L_EXOS	4	–	silniki elektryczne
9	BLEEX	10	78 kg	hydrauliczny
10	SARCOS	8	90 kg	hydrauliczny

Podczas projektowania egzozskieletu należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- przeznaczenie (militarne, rehabilitacja, wspomaganie pracy odpowiednich służb (straż pożarna, personel medyczny));
- odpowiednia konstrukcja nie ograniczająca zakresu ruchu kończyn, dostosowywana do osób o różnych parametrach antropomorficznych;
- warunki atmosferyczne w jakich układ będzie wykorzystywany;
- zastosowanie układu wykonawczego (hydrauliczny, pneumatyczny lub elektryczny);
- odpowiednia moc silników zapewniająca osiągnięcie określonej prędkości z podniesieniem i utrzymaniem ładunku (wraz z ciężarem kończyny i ładunku);
- zasilanie i łatwość sterowania operatora;
- bezpieczeństwo użytkownika;
- budowa modułowa (umożliwiająca zmianę wykorzystania egzoszkieletu).

2. NOTACJA DENAVITA HARTENBERGA

Notacja Denavita – Hartenberga (notacja DH) została wynaleziona w 1955 roku przez R.S. Hartenberga i J. Denavita [3]. Wykorzystywana jest do systematycznego opisu warunków kinematycznych i służy do rozwiązywania kinematyki mechanizmów przestrzennych. Znalazła szerokie zastosowanie w mechanice mechanizmów, szczególnie w technice robotycznej (kinematyka prosta i odwrotna). Ze względu na jednoznaczność opisu i powtarzalność, wykorzystywana jest przede wszystkim do opisu łańcuchów kinematycznych. W notacji DH rozróżnia się złącza przesuwne i translacyjne (rys.2).

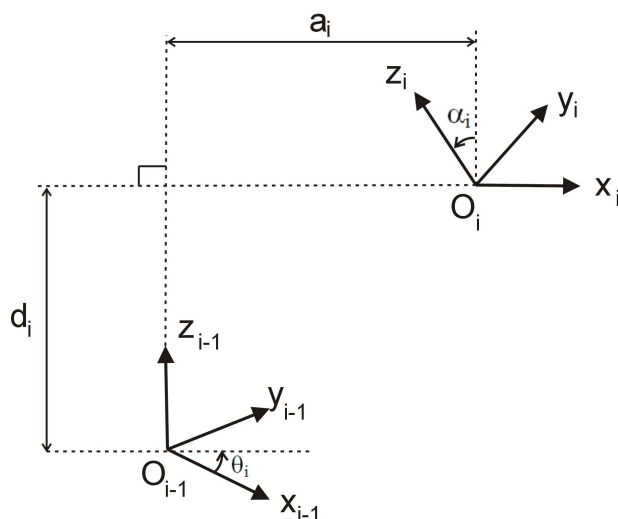


Rys.2. Przeguby obrotowe i translacyjne – reprezentacja graficzna [7]

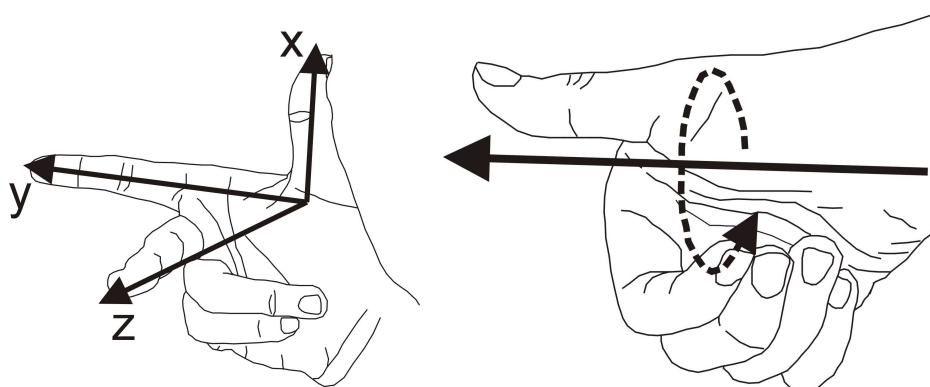
Zgodnie z notacją DH cztery charakterystyczne wielkości opisują położenie kolejnego układu współrzędnych względem układu poprzedniego (rys.3):

- **kąt skręcenia ogniwa α** mierzony wokół osi iX od ${}^{i-1}Z$ do iZ zgodnie z zasadą śruby prawoskrętnej (rys.4);
- **kąt obrotu złącza θ** mierzony wokół osi ${}^{i-1}Z$ od ${}^{i-1}X$ do iX , zgodnie z zasadą śruby prawoskrętnej;
- **długość ogniwa a_i** mierzona wzdłuż osi iX od ${}^{i-1}Z$ do iZ ;
- **przesunięcie liniowe w złączu d_i** mierzone wzdłuż osi ${}^{i-1}Z$ od ${}^{i-1}X$ do iX .

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 parametrem. Każde złącze posiada jeden stopień swobody – 1 DOF (Degrees Of Freedom). Osie przegubów mechanizmu są wybierane jako osie współrzędnych, a każde złącze posiada swój układ.



Rys.3. Układy współrzędnych w notacji DH



Rys.4. Układ współrzędnych (reguła śruby prawoskrętnej) i obrót wokół wektora

3. ALGORYTM NOTACJI DH

Przy ustalaniu układów współrzędnych przy wykorzystaniu notacji DH, należy zastosować następującą procedurę [3,4,5]:

- 1) Ponumerowanie ogniw i złączy (podstawa ma numer 0, czyli i -te ogniwo jest umieszczone między złączami o numerach iZ oraz ${}^{i+1}Z$);
- 2) 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;
- 3) Przyjęcie osi iX jako wspólnej normalnej do osi złączy i -tego i $(i+1)$ -go i skierowanej w stronę ogniw o wyższych numerach;
- 4) Przyjęcie osi iY jako uzupełnienie dwóch poprzednich osi do prawoskrętnego, kartezjańskiego układu współrzędnych.

Transformacji z układu i -tego do układu $(i-1)$ -go dokonuje się poprzez:

- 1) Obrót układu współrzędnych $(i-1)$ -go wokół osi ${}^{i-1}Z$ (o kąt θ_i) (Rys.4);
- 2) Translacja w kierunku osi ${}^{i-1}Z$ (o odległość d_i);
- 3) Translacja w kierunku osi iX (o odległość a_i);
- 4) Obrót wokół osi iX (o kąt α_i).

W wyniku iloczynu czterech macierzy elementarnych powyższych operacji, w kolejności tych przekształceń, uzyskuje się macierz jednorodną o wymiarach 4×4 , która wiąże uogólniony opis położenia dowolnego punktu w układach $(i-1)$ oraz i -tym. Jeśli mamy

opisane położenie dowolnego punktu w układzie i -tym poprzez podanie wektora ${}^i \mathbf{r}$, możemy zapisać

$${}^{i-1} \mathbf{r} = {}^i \mathbf{A} {}^i \mathbf{r} \quad (1)$$

gdzie:

$${}^i \mathbf{A} = \text{ROT}(z, \theta_i) \cdot \text{TRANS}(0, 0, d_i) \cdot \text{TRANS}(a_i, 0, 0) \cdot \text{ROT}(x, \alpha_i) \quad (2)$$

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

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

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

$${}^{i-1} \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

opisującą transformację dwóch sąsiednich, sztywno powiązanych z ciałami, układów współrzędnych według notacji DH. Pierwsze 3×3 elementy macierzy (3) opisują położenie katowe (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 (3) jest czynnikiem skali λ , którego wartość równa 1 świadczy o standardowym przedstawieniu współrzędnych jednorodnych.

Przy wykorzystaniu notacji DH należy zwrócić uwagę na przypadki szczególne [4]:

- 1) W zastosowaniach technicznych w przegubach o 1 stopniu swobody, jeden z czterech parametrów DH jest współzrzedną 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 ($q_i = d_i$);
- 2) W przypadku równoległych osi przegubów istnieje nieskończenie wiele wspólnych normalnych, w wyniku czego d_i jest nieoznaczone. W takiej sytuacji należy dowolnie ustalić d_i , np. $d_i = 0$;
- 3) Przy przecinających się osiach przegubów musi być $a_i = 0$. Gdy osie przegubów są wzajemnie prostopadłe należy przyjąć $\alpha_i = \pm\pi/2$;
- 4) 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 6 współrzędnych, w tym np. 3-ch kątów Cardana (obrotów wokół osi układu $(i-1)$ -go):

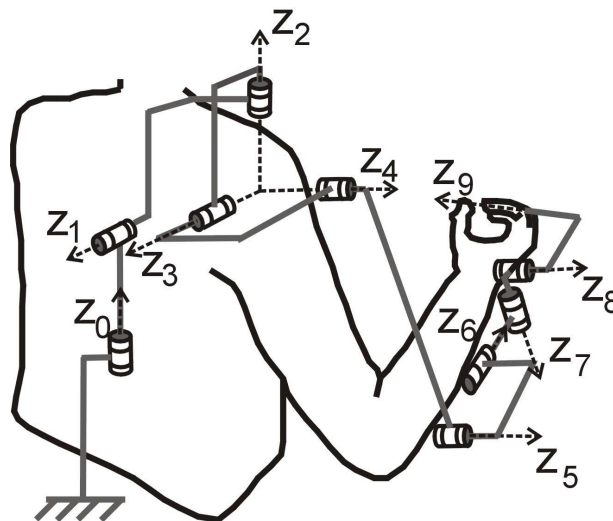
$$\begin{aligned}
x_{(i-1)} &= a_i \cos \theta_i, \\
y_{(i-1)} &= a_i \sin \theta_i, \\
z_{(i-1)} &= d_i, \\
R_{x_{(i-1)}}(\phi) &= \operatorname{arctg}\left(\frac{-\cos \theta_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i}\right), \\
R_{y_{(i-1)}}(\psi) &= \operatorname{arctg}(\sin \theta_i \sin \alpha_i), \\
R_{z_{(i-1)}}(\theta) &= \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin \theta_i \cos \alpha_i}{\cos \theta_i}\right).
\end{aligned} \tag{4}$$

W celu określenia położenia np. wskazującego palca 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.

4. MODEL EGZOSZKIELETU KOŃCZYNY GÓRNEJ

Minimalna liczba stopni swobody (DOF) egzoszkieletu według [1] wynosi:

- bark – 3 DOF:
 - o medial rotation/lateral rotation (skręcanie wokół osi II do kręgosłupa);
 - o abduction/adduction (przywodzenie / odwodzenie);
 - o flexion/extension (zginanie / prostowanie wokół osi \perp do kręgosłupa);
- łokieć – 2 DOF:
 - o flexion/extension (zginanie / prostowanie);
 - o pronation/supination (skręcanie przedramienia);
- nadgarstek – 2 DOF:
 - o flexion/extension (zginanie / prostowanie);
 - o abduction/adduction (przywodzenie / odwodzenie).



Rys.5. Schemat egzoszkieletu kończyny górnej

Opierając się na powyższych zaleceniach opracowano model egzoszkieletu kończyny górnej o 9 DOF przedstawiony na rysunku 5. Określono parametry notacji DH poszczególnych połączeń, które przedstawiono w Tab.2. Długość i masę elementów kończyny oparto na podstawie badań antropomorficznych [2] 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 [8].

Tab.2. Podstawowe parametry notacji DH egzoszkieletu kończyny górnej

Połączenie	Zakres możliwych kątów	Numer połączenia	α_i	a_i	d_i	θ_i
Baza (z_0)	$\pm 45^0$	1 (0→1)	$\pi/2$	0	d_{baza}	q_1
Kręgosłup (z_1)	$\pm 15^0$	2(1→2)	$-\pi/2$	a_2	d_2	q_2
Bark (z_2)	$-60^0 + 165^0$	3(2→3)	$\pi/2$	0	0	q_3
Bark (z_3)	$-180^0 + 60^0$	4(3→4)	$\pi/2$	0	0	q_4
Bark (z_4)	$-180^0 + 80^0$	5(4→5)	0	$l_{\text{ramię}}$	0	q_5
Łokieć (z_5)	$-10^0 + 145^0$	6(5→6)	$\pi/2$	0	0	q_6
Łokieć (z_6)	$\pm 90^0$	7(6→7)	$-\pi/2$	0	l_{przedr}	q_7
Nadgarstek (z_7)	$-90^0 + 70^0$	8(7→8)	$-\pi/2$	0	0	q_8
Nadgarstek (z_8)	$-15^0 + 40^0$	9(8→9)	0	$l_{\text{dłoń}}$	0	q_9

gdzie:

- d_{baza} – odległość od 1 s-ka do s-ka zamocowanego na plecach (dowolna wartość);
- d_2 – odległość od 2 silnika do środka barku (wzdłuż osi z_1);
- a_2 – odległość od osi kręgosłupa do środka barku (wzdłuż osi x_1);
- $l_{\text{ramię}}$ – długość ramienia;
- l_{przedr} – długość ramienia;
- $l_{\text{dłoń}}$ – długość dłoni.

Po wprowadzeniu wektora zmiennych złączowych zdefiniowanego jako

$$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7 \ q_8 \ q_9] \quad (5)$$

dotyczącego egzoszkieletu w położeniu jak na rysunku 5, dla człowieka o wzroście 180 cm i $d_{\text{baza}} = 20$ cm, otrzymuje się współrzędne położenia końca palca wskazującego w układzie bazowym jako

$${}^0x_9 = 23.220 \text{ [cm]},$$

$${}^0y_9 = 70.002 \text{ [cm]},$$

$${}^0z_9 = -11.320 \text{ [cm]}$$

PODSUMOWANIE

Artykuł wprowadza w problematykę związaną z projektowaniem egzoszkieletów. Przedstawiono algorytm Denavita Hartenberga, który następnie posłużył do opisanego stworzonego modelu egzoszkieletu kończyny górnej. Przy wykorzystaniu notacji DH, po wprowadzeniu danych dotyczących wzrostu osoby użytkującej egzoszkielet i danych antropomorficznych zaimplementowanych do pakietu MATLAB w prosty sposób można określić położenie efektora w układzie bazowym. Następnym celem badań będzie opracowanie zakresu ruchu egzoszkieletu (przestrzeni roboczej) przy wykorzystaniu możliwych kątów oraz opracowanie kinematyki odwrotnej.

EXOSKELETONS – THE DENAVIT HARTENBERG CONVENTION

Abstract

This paper is focused on modeling of arm exoskeleton in the form of 9 DoF open kinematic chain. The Denavit Hartenberg convention with parameters was used to describe exoskeleton kinematic chain. Parameters DH were implemented to MATLAB package.

BIBLIOGRAFIA

1. Crowell H.P.: *Human Engineering Design Guidelines for a Powered Full Body Exoskeleton*, Army Research Laboratory, ARL-TN-60, 1995.
2. Davies D.V. , Davies F: *Gray's Anatomy*, 33 ed. Green & Co Ltd., 1962.
3. Hartenberg R.S, Denavit J.: *A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices*, Journal of Applied Mechanics, vol. 77, pp. 215–221, June 1955.
4. Heimann B., Gerth W., Popp K.: *Mechatronika, Komponenty, metody, przykłady*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
5. Jazar R.N., *Theory of Applied Robotics, Kinematics, Dynamics and Control*, Springer, 2007.
6. Jezierski E.: *Dynamika robotów*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2006.
7. Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: *Planowanie zadań i programowanie robotów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1999.
8. Pons J.: *Wearable robots: Biomechatronic exoskeletons*, John Willey and Sons, USA, 2008.

Autorzy:

mjr rez. pil. dr inż. Sebastian GŁOWIŃSKI – Politechnika Koszalińska,
Zakład Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej

dr inż. Sebastian PECOLT – Politechnika Koszalińska, Zakład Mechatroniki i Mechaniki
Stosowanej