

## Projekt oraz analiza kinematyczna robota pomagającego w rehabilitacji

**Streszczenie.** W pracy opisano projekt robota wspomagającego pracę rehabilitanta. Stworzono konstrukcję do rehabilitacji kończyn górnych, a następnie policzono układ kinematyczny manipulatora. Napisano program w środowisku Scilab, który umożliwia obliczenie kinematyki dowolnego robota wpisując jego parametry w notacji Denavita - Hartenberga.

**Abstract.** In the paper a design of a robot applied in rehabilitation process. A stand for rehabilitation of upper limbs was developed. Next the kinematic chain for the designed manipulator was computed. A piece of software was developed in Scilab environment. It makes it possible to complete the kinematics of any robot if its parameters are written using D-H notation. (**Design and kinematical analysis of a robot supporting rehabilitation**)

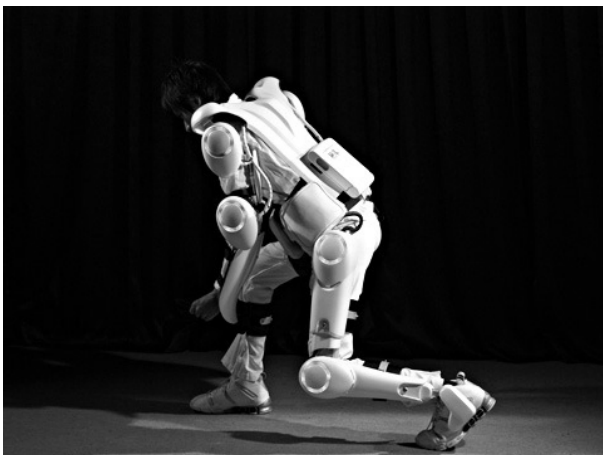
**Słowa kluczowe:** Kinematyka robotów, notacja Denavita - Hartenberga, roboty medyczne

**Keywords:** Kinematic of robots, Denavit - Hartenberg notation, medical robots

### Wstęp

Rzeczywistość robotyki stosowanej w medycynie obserwuje się od lat 50 - tych. Coraz większa dokładność i precyzja manipulatorów umożliwia im coraz szersze zastosowanie w medycynie. Budowane są egzoszkielety umożliwiające poruszanie człowieka, są roboty wykorzystywane przy różnego rodzaju operacjach. Najnowszym trendem są nanoroboty, które umożliwiają poruszanie się w żywych komórkach i odpowiednie ich leczenie.

Ciekawym, ale jednak drogim rozwiązaniem są egzoszkielety. Przykładem takiego urządzenia jest HAL (HybridAssistive Limb, w tłumaczeniu: Hybrydowa Kończyna Wspomagająca) to tzw. egzoskielet, czyli robot który „nosi się na sobie” (rys. 1). Został stworzony przez Japończyka Yoshiyuki Sankaiego. Człowiek wyposażony w egzoskielet staje się silniejszy i bardziej wytrzymały.



Rys.1. Egzoskielet HAL (piąta generacja) [1]

HAL wyposażony jest w wiele czujników np. czujniki bioelektryczne, czujniki zmiany kąta położenia, czy czujniki nacisku. Robot posiada również napędy, zasilanie, komputer, system pomiarowy, bezprzewodową sieć LAN oraz systemy kontroli, które składają się z kontrolera siły i kontrolera regulacji postawy. Jedną z najważniejszych informacji, jakie musi uzyskać robot, stanowi sygnał mówiący o kierunku i prędkości poruszania się. Odbiór takich informacji jest możliwy dzięki czujnikom

przymocowanym na nogach. Wykorzystują one pole elektryczne, a następnie wysyłają przez mózg polecenie do mięśni. Na tej podstawie komputer decyduje o ruchu.

Robot przeznaczony jest do pomocy w przemieszczaniu się ludziom starszym. Schorowana osoba porusza się przy jego pomocy samodzielnie przy niewielkim nakładzie sił. Może wykonywać różne czynności, bez narażania się na zbyt częste upadki spowodowane osłabieniem. [1].



Rys.2. System HAL w trakcie rehabilitacji [2]

HAL wykorzystuje się w rehabilitacji. W Polsce jest to możliwe od 2016 roku. Wskazaniami do terapii są: udar mózgu, niecałkowite uszkodzenie rdzenia kręgowego, stwardnienie rozsiane, choroby nerwomięśniowe, dystrofia mięśniowa i uraz czaszkowo-mózgowy. Naukowcy twierdzą, że w trakcie rehabilitacji poprawia się niezależność pacjenta, wzmacniają się jego mięśnie kończyn dolnych, a co za tym idzie polepsza się chód i świadomość równowagi. Inne korzyści z terapii HAL to: poprawa czucia powierzchniowego, większa prędkość chodu, zmniejszenie dolegliwości bólowych na tle

neuropatycznym oraz stymulacja obszarów korowych mózgu. Ważne jest jednak, by jak najwcześniej rozpocząć rehabilitację a po jej ukończeniu wykorzystywać nabyte zdolności. Na rysunku 2 przedstawiono system HAL podczas rehabilitacji [2,3].

### Roboty rehabilitacyjne i ich bezpieczeństwo

W dzisiejszych czasach występuje coraz większe zapotrzebowanie na pomoc osobom starszym lub osobom niepełnosprawnym. Niestety personelu wciąż jest zbyt mało. Wprowadza się zatem roboty medyczne, które mają w danym stopniu zastąpić pracę człowieka, w tym przypadku lekarza, fizjoterapeuty czy pielęgniarki.

Do zalet wykorzystania robotów rehabilitacyjnych zaliczamy:

- zmniejszenie kosztów rehabilitacji,
- lepsza jakość i zwiększona liczba ćwiczeń,
- odciążenie personelu medycznego, którego liczba jest dość ograniczona,
- zastosowanie poprawnych wzorców ruchowych,
- możliwość regulacji stopnia trudności wykonywanych ćwiczeń,
- zwiększenie motywacji pacjenta poprzez wykorzystanie systemów VR – Virtual Reality,
- możliwość rehabilitacji w domu, a co za tym idzie terapia w przyjaznym, rodzinnym otoczeniu oraz uniknięcie problemów z transportem chorego, a także całodobowy dostęp do pomocy,
- zwiększona precyzja oraz powtarzalność pracy robota. Zaprogramowany robot wykonuje swoją pracę dokładnie. Nie wpływa na niego zmęczenie, które mogłoby wpłynąć na pracę fizjoterapeuty. A zatem zmniejszamy ryzyko nieprawidłowej rehabilitacji.

Problemy oraz zagrożenia jakie towarzyszą wprowadzeniu na rynek robotów rehabilitacyjnych to:

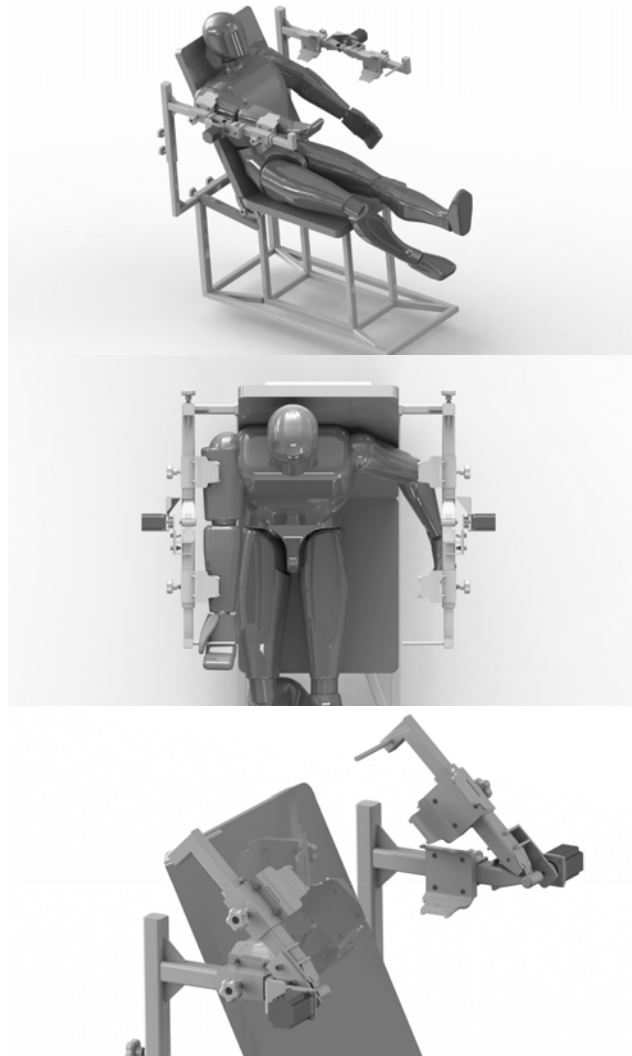
- niechęć i uprzedzenie osób starszych, spowodowane obawą przed nową technologią,
- potrzeba przeszkolenia personelu medycznego,
- konieczność stworzenia nowych procedur medycznych,
- możliwe urazy, wynikające z nieprawidłowego stosowania robota,
- potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa (wyłączników awaryjnych, itp.) [4].

Rehabilitacja z wykorzystaniem robota rehabilitacyjnego może wywołać zagrożenia dla pacjenta oraz fizjoterapeuty. Mogą być one często skutkiem niewłaściwego postępowania człowieka. Możliwe jest także nieprawidłowe funkcjonowanie robota, spowodowane awarią lub błędnym programowaniem. Szczególną uwagę należy zachować przy doborze parametrów dla pacjenta z zaburzeniami neurologicznymi. Taka osoba ma zaburzone czucie i może nieprawidłowo odbierać bodźce, stąd źle dobrane parametry mogą powodować ból, a nawet uszkodzenie tkanki [5,6].

### Projekt robota rehabilitacyjnego

Obecnie powstaje coraz więcej robotów rehabilitacyjnych. Umożliwiają one wielokrotne powtarzanie tych samych ruchów, co potrafi usprawnić pracę personelu medycznego. Można stworzyć prostą konstrukcję, znacznie tańszą od skomplikowanego egzozoskieletu, która znacznie ułatwi rehabilitację człowieka po urazie.

Przykładem jest robot pomagający w leczeniu kończyn górnych (rys. 3).



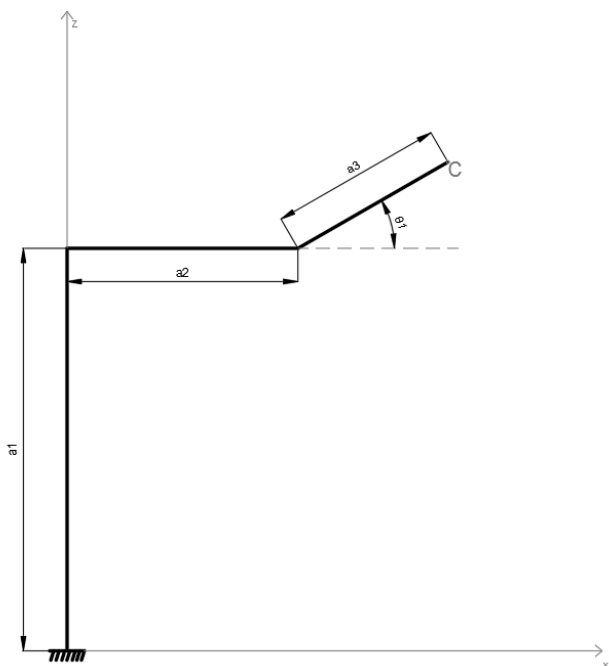
Rys.3. Projekt robota rehabilitacyjnego [7]

Jest to prosta konstrukcja składająca się z trzech członów i jednego przegubu. Robot ma za zadanie pomóc w usprawnieniu kończyny po jej urazach np. zwichnięcie stawu łokciowego wraz z rozerwaniem przyśrodkowego aparatu torebkowo-więzadłowego. Po takim uszkodzeniu zakres ruchu kończyny jest ograniczony, szczególnie jej wyprost oraz zgięcie. Klasyczna terapia obejmuje ćwiczenia z fizjoterapeutą, ćwiczenia kinezyterapii w UGUL-u (Uniwersalny Gabinet Usprawniania Leczniczego), metody z zakresu światłolecznictwa (takie jak: laseroterapia oraz naświetlanie IR), a także leczenie prądem (np. prądy TENS, jonoforeza). Urządzenie należy odpowiednio dostosować do pacjenta i zaprogramować. Poprzez użycie robota unika się błędów wynikających np. z braku doświadczenia rehabilitanta lub spowodowanych jego zmęczeniem. Efektem tego jest prawidłowo przeprowadzona rehabilitacja, a co za tym idzie, szybsza rekonwalescencja.

Urządzenie posiada możliwość rehabilitacji kończyny górnej lewej oraz prawej. Ze względu na opcję regulacji wysokości oraz długości ramion, osoby, które mogą korzystać z terapii to zarówno osoby dorosłe, jak i dzieci.[7]

### Analiza kinematyki manipulatora

Do opisanie układu kinematycznego (rys.4) posłużymy się zapisem układu w notacji Denavita - Hartenberga.[8,9] Elementy rotacji i przesunięć podane są w tabeli 1.



Rys.4. Schemat kinematyczny[7]

Tabela 1. Parametry w notacji D-H

układ	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	0	$a_1$	0	0
2	0	0	$a_2$	$90^\circ$
3	$\theta_{1,var}$	0	0	$-90^\circ$
4	0	0	$a_3$	0

Obliczając kolejne punkty otrzymujemy:

$$(1) \quad R_1 = T_{z,a_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(2) \quad R_2 = T_{z,a_1} \cdot R_{x,90} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ) & -\sin(90^\circ) & 0 \\ 0 & \sin(90^\circ) & \cos(90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(3) \quad R_3 = R_{z,\theta_1} \cdot R_{x,-90} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) & 0 \\ 0 & \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(4) \quad R_4 = T_{x,a_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(5) \quad R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & a_2 + a_3 \cdot \cos(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & a_1 + a_3 \cdot \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Korzystając z środowiska Scilab napisano program sprawdzający poprawność obliczeń. Można operować zarówno na wartościach symbolicznych jak i konkretnych liczbach.

W powyższym przypadku sprawdzono obliczenia dla następujących wartości początkowych:

ramię  $a_1 = 700\text{mm}$ , ramię  $a_2 = 400\text{mm}$ ,  $a_3 = 300\text{mm}$ , kąt obrotu  $\theta_1 = 30^\circ$ .

```

Scilab 5.5.2 Console
Plik Edycja Sterowanie Narzędzia ?
[Icons]
Scilab 5.5.2 Console

Proszę podać liczbę układów tabeli D-H: 4

Układ 1
theta_1 = 0
d_1 = 700
a_1 = 0
alpha_1 = 0

Układ 2
theta_2 = 0
d_2 = 0
a_2 = 400
alpha_2 = 90

Układ 3
theta_3 = 30
d_3 = 0
a_3 = 0
alpha_3 = -90

Układ 4
theta_4 = 0
d_4 = 0
a_4 = 300
alpha_4 = 0

```

Rys.5. Okno programu Scilab [7]

W wyniku obliczeń dostajemy następujący rezultat:

$$\begin{bmatrix} 0.8660254 & 0 & -0.5 & 0.8660254*300+400 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.8660254 & 0.5*300+700 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

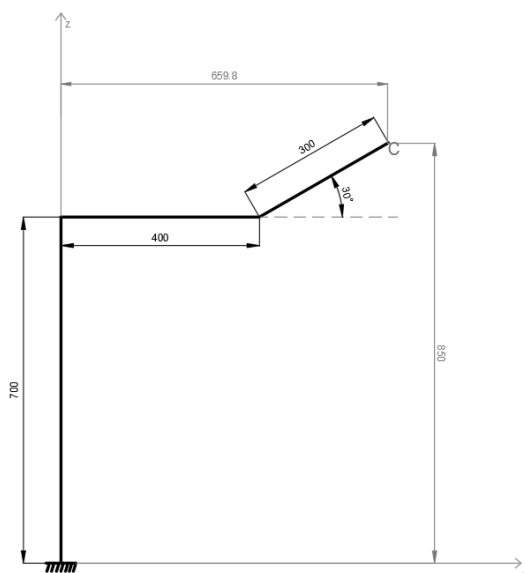
Końcówka robocza chwytaka znajduje się w następujących współrzędnych:

$$x = 0.8660254*300+400 = 659.8$$

$$y = 0$$

$$z = 0.5*300+700 = 850$$

co pokazano na rys. nr 4.



Rys.4. Schemat robota rehabilitacyjnego z określonymi współrzędnymi[7]

### Wnioski

Zaprojektowany robot rehabilitacyjny umożliwia ćwiczenia kończyny górnej w zakresie ruchów wyprostnych i zginających. Z obliczeń wynika, że urządzenie zapewnia wymaganą funkcjonalność. Urządzenie umożliwia regulację długości oraz wysokości ramion, dzięki czemu w łatwy sposób można dostosować go do wzrostu pacjenta. Jest to projekt otwarty, można rozbudować go np do

rehabilitacji kończyn dolnych. Taki robot to proste i niedrogie rozwiązanie, w stosunku do choćby egzoszkieletu, które znacząco wspomaga pracę rehabilitantów. Jego zadaniem jest przede wszystkim efektywniejsza rehabilitacja, a co za tym idzie, szybszy powrót do zdrowia osoby chorej.

**Autorzy:** dr inż. Borys Borowik, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. AK 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: borys.borowik@pcz.pl; dr inż. Michał Gruca, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.gruca@pcz.pl; dr inż. Michał Pyrc, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.pyrc@pcz.pl.

### LITERATURA

- [1] <http://www.asimo.pl/modele/HAL.php>
- [2] <http://jedyna-taka.pl/news,168,aktywny-egzoszkielet-hal-.html>
- [3] <https://constancecare.pl/wyposazenie/hal-r-hybrid-assistive-limb>
- [4] Mikołajewska E. Mikołajewski D., Możliwość wykorzystania robotów pomocniczych i obsługowych w opiece domowej, Gerontologia Polska, 2012 tom 19, nr 3–4, 176–180
- [5] Mikołajewska E., Mikołajewski D., Bezpieczeństwo pracy z robotami rehabilitacyjnymi, Bezpieczeństwo Pracy, 2012, Nr 2
- [6] Nawrat Z., Wprowadzenie do robotyki medycznej, MedicalRoboticsReports – 1/2012
- [7] Tomalska S., Analiza kinematyki robotów stosowanych w medycynie - Praca Magisterska, Częstochowa 2019
- [8] Rygałto A., Robotyka dla mechatroników, Częstochowa: Politechnika Częstochowska, 2008.
- [9] Borowik B., Analiza kinematyki manipulatorów na przykładzie robota liniowego o czterech stopniach swobody, Mechanik, 7 (2015),45-50