

# Projekt oraz analiza kinematyczna robota typu równoległa SCARA

**Streszczenie.** W pracy opisano projekt robota typu równoległa SCARA. Zaprojektowano i wykonano konstrukcję tego robota, a następnie policzono układ kinematyczny manipulatora. Przydatność tego typu konstrukcji zawarto we wnioskach.

**Abstract.** The paper describes the design of a parallel SCARA robot. The robot was designed and implemented. Subsequently, the computations concerning the kinematic chain of the manipulator were carried out. The usefulness of the developed design was discussed in the conclusions. (Design and kinematical analysis of parallel SCARA type model)

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

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

## Wstęp

W ostatnich latach notuje się znaczny wzrost produkcji robotów o kinematyce równoległej. Roboty te charakteryzują się dużą dokładnością, szybkością i niewielkimi rozmiarami, przez co wykorzystywane są we wszelkiego rodzaju operacjach, w których niezbędna jest duża precyzja. Znajdują zastosowanie przy produkcji niezwykle precyzyjnych części (zegarki, mikroelektronika) jak i w medycynie gdzie duża dokładność powtarzalności ruchów jest bezwzględnie wymagana.[1,2]

## Roboty typu SCARA

Roboty SCARA dzięki swojej konstrukcji przeznaczone są do operacji związanych z pionowym podnoszeniem i opuszczaniem przedmiotów na równoległych płaszczyznach, operacje te noszą nazwę pick'n'place. Do takich operacji można zaliczyć np.: pakowanie produktów, sortowanie produktów, operacje związane ze składaniem części itp.

Roboty typu SCARA cechuje bardzo wysoka sztywność w kierunku pionowym, dzięki czemu robot jest w stanie podnosić detale w szybkim tempie. Konstrukcja robota sprawia również, że podnoszone przedmioty obciążają bezpośrednio jedynie jeden silnik, a pośrednio przez siłę bezwładności pozostałe silniki.

SCARA jest też obciążona wadami, jest bardzo podatna na siły działające poziomo, stąd też pochodzą pierwsze dwa wyrazy w nazwie robota *Selective Compliance*. Dlatego też najczęściej roboty SCARA są niewielkich gabarytów oraz posiadają nieduży udźwig.

W porównaniu z kartezyjskimi robotami, roboty typu SCARA są szybsze, o wiele łatwiejsze w montażu i integracji z linią produkcyjną. Dzięki temu, że robot montowany jest w jednym punkcie na niewielkiej powierzchni. Często przy zastosowaniu równoważnego rozwiązania przy użyciu robota kartezyjskiego, wymagane jest przebudowanie linii produkcyjnej, co przekłada się na dodatkowe koszty i czas potrzebny na wdrożenie zrobotyzowanego systemu.

Roboty typu SCARA przeważnie występują w dwóch wersjach: z trzema stopniami swobody (3-DOF) i z czterema stopniami swobody (4-DOF). Wersja z mniejszą ilością stopni swobody jest łatwiejsza w konstrukcji i używana jest do zadań, gdy nie potrzebne jest ustawianie przenoszonego obiektu w odpowiedniej orientacji. Po za tym wersja 3-DOF jest tańsza w produkcji, ze względu na zastosowanie tylko trzech silników oraz szybsza w

działaniu, gdyż nie jest obliczana w czasie rzeczywistym orientacja obrotowa chwytaka.

Występują różne wersje robota typu SCARA. Są roboty z trzema bądź czterema silnikami, w wersji pojedynczej i równoległej, z chwytakiem klasycznym zwykle pneumatycznym bądź elektrycznym ale także bez łapek chwytających, np chwyt następuje za pomocą przysawki.

Roboty tej wersji są produkowane praktycznie przez wszystkich znanych producentów (rys.1)



RH-5AH firmy MITSUBISHI



SRX600 firmy SONY



YK500XP firmy YAMAHA



Manipulator serii ES firmy SEIKO

Rys. 1 Różni producenci robota typu SCARA

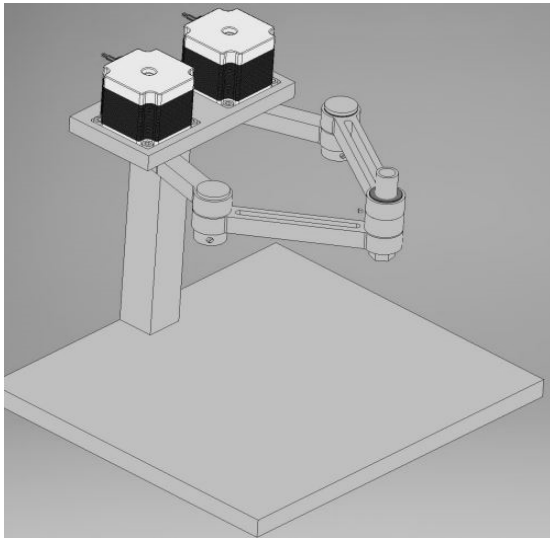
## Projekt i wykonanie robota typu równoległa SCARA

Projekt takiego robota pokazany jest na rys.2.

Konstrukcję robota zbudowano w oparciu o stop aluminium. Elementy konstrukcji zostały wykonane ze stopu PA4, charakteryzującego się dobrą wytrzymałością oraz łatwością obróbki. Podstawa silników oraz ramiona zostały wykonane za pomocą obróbki skrawającej (frezowanie). Elementy statyczne, pełniące role centrująca lub podtrzymującą nieruchome części konstrukcji zostały wykonane za pomocą druku 3D. Do połączeń śrubowych użyto znormalizowanych śrub i nakrętek.[8]

Podstawa robota składa się z platformy wykonanej z aluminium o grubości 5mm. Grubość podstawy wraz z ożebrowanym spodem wynosi 16mm. Powierzchnia robocza podstawy została zaplanowana metodą

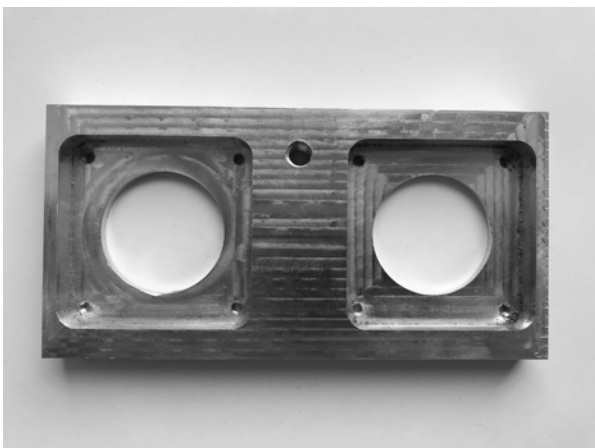
frezowania. Aby zapewnić stabilną pozycję pracy zastosowano gumowe nóżki zapobiegające przemieszczaniu się płyty głównej robota, podczas drgań wynikających z pracy silników krokowych.



Rys.2. Projekt robota typu podwójna SCARA [8]

Do podstawy został przytwierdzony profil aluminiowy 30x30 mm za pomocą szpilki gwintowanej o średnicy 8 mm. Aby zapewnić koncentryczne działanie siły dociskowej, między podstawą, a płytą montażową silników, wykorzystano dystanse centrujące wykonane za pomocą drukarki.

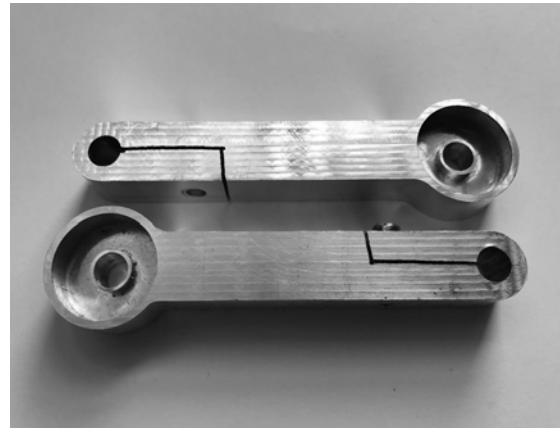
Głównym elementem konstrukcji jest płyta, która umożliwia montaż silników krokowych. Podstawa silników ma za zadanie utrzymywać silniki w stałej pozycji. Wykonana została ze stopu aluminium PA4, metodą obróbki skrawaniem przy pomocy frezarki górnoprzecionowej. Silnik montowany jest we wpuszcisku podstawy, w którym znajduje się otwór centrujący 3D z tworzywa PLA. Dystanse znajdują się zarówno w dolnej, jak i górnej części profilu. (rys. 3)[8]



Rys.3. Płyta pod silniki krokowe [8]

Ramię pierwszego członu (rys. 4), montowane na osi silnika, jest krótsze od ramienia drugiego członu robota. Dla obu osi silnika ramię jest identyczne, ale obrócone o 180 stopni względem siebie. Oś silnika umieszczona jest w 5mm otworze ramienia. Wzdłuż ramienia, od otworu osi silnika wykonano szczelinę o długości 20mm, następnie pod kątem 60 stopni szczelina dociera do bocznej ściany ramienia. W bocznej ścianie wykonano otwór przelotowy M5 do momentu osiągnięcia głębokości szczeliny, a następnie otwór gwintowany M4. Śruba zaciskająca

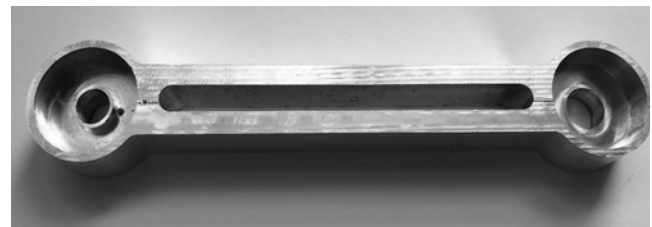
szczelinę jednocześnie zaciskając oś silnika w otworze montażowym, uniemożliwia przemieszanie się osi silnika względem ramienia. Siły działające oraz powierzchnia styku osi z otworem jest w tym przypadku znacznie większa niż w rozwiązaniu kontrowania samą śrubą.[8]



Rys.4. Pierwsze ramię robota [8]

Przeciwną stronę ramienia wyposażona jest we wpust łożyska wraz z wypustem montażowym pierścienia wewnętrznego łożyska. Powierzchnia pierścienia zewnętrznego łożyska znajduje się nad powierzchnią ramienia i pełni rolę kontaktu z ramieniem drugiego członu robota. Dzięki ciasnemu pasowaniu pierścienia w wypuszcisku oraz sile ściskowej działającej na powierzchnię ramion, luzy międzyramienne praktycznie nie występują, a ramiona poruszają się płynnie.

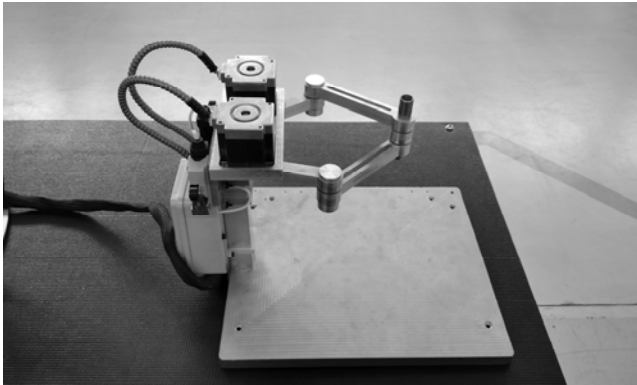
Ramię drugiego członu (rys.5) robota jest znacznie dłuższe od ramienia pierwszego członu. W celu odchudzenia konstrukcji, wzdłuż ramienia została wyfrezowana szczelina o szerokości 6mm, która obniżyła moment bezwładności podczas ruchu robota, jednocześnie nie zmniejszając sztywności konstrukcji.[8]



Rys.5. Drugie ramię robota [8]

Ramię składa się z dwóch wpustów na łożyska kulkowe wzdłużne, mieszczących się naprzeciwległych końcach ramienia. Wpust dla łożyska w miejscu kontaktu z czopem łączeniowym obu członów robota został wyposażony w dodatkowy wypust dla talerza wewnętrznego łożyska. Otwór montażowy przeciwną stronę ramienia ma większą średnicę w celu montażu elementu wykonawczego robota.

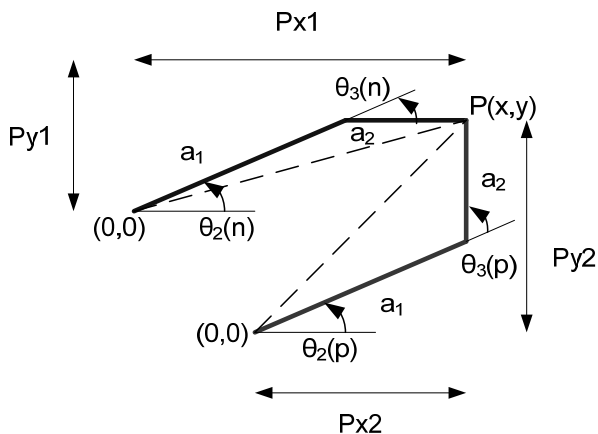
Łącznikiem końcowym jest wałek wykonany ze stali za pomocą tokarki ręcznej, składający się z powierzchni wystającej z nad ramion robota oraz powierzchni przechodzącej przez otwory montażowe ramion oraz tulei dystansowych w tym łożysk. Wałek zakończony jest gwintem, a wzdłuż wałka wykonano otwór o szerokości 12mm w celu montażu efektora oraz o szerokości 5mm w pozostałej części wałka. Element ten odpowiada za przyleganie powierzchni ramion do łożysk za pomocą śruby M10, która zakręcona na wałku, dociska ramiona do siebie.[8] Całość pokazana jest na rys.6



Rys.6. Gotowy robot podwójna SCARA

### Analiza kinematyki manipulatora

Gdy mechanizm połączony jest w łańcuch kinematyczny powstają dwa problemy. Pierwszy to jaką pozycję w przestrzeni przyjmie efektor, dla podanych ustawień połączeń. Polega to na rozwiązaniu układu dla parametrów zastępczych w notacji D-H (tab. 1).[3,4,6,7]



Rys.7. Część schematu kinematycznego w 2D (Płaszczyzna xy)

Tabela 1. Parametry w notacji D-H

uk.	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	0	$a_1$	0	0
2	$\theta_{2,var}$	0	$a_2$	0
3	$\theta_{3,var}$	0	$a_3$	0
4	0	$-a_{4,var}$	0	0

Obliczając kolejne punkty otrzymujemy:

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & a_1 - a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sytuacja wygląda inaczej, gdy chcemy obliczyć pozycje każdego członu dla znanej pozycji. W przypadku robotów jest to niezbędne i jest to zadanie bardzo trudne ze względu na to, iż wiele rodzajów robotów ma bardzo skomplikowane łańcuchy kinematyczne. Dlatego rozwiązanie kinematyki odwrotnej musi uwzględniać ograniczenia ruchów, unikanie kolizji jak i optymalne wybieranie rozwiązań pod różnymi kryteriami np. czasu całej operacji.

Z wyliczonego układu otrzymujemy:

$$(1) \quad P_x = a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos(\theta_2),$$

$$(2) \quad P_y = a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin(\theta_2),$$

$$(3) \quad P_z = a_1 - a_4.$$

Musimy z tego wyliczyć  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  oraz  $a_4$ . Podnosząc dwa pierwsze równania do kwadratu i dodając do siebie stronami otrzymujemy

$$(4) \quad \theta_3 = \arccos \frac{P_x^2 + P_y^2 - a_2 - a_3}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}$$

skąd uzyskujemy dwie wartości kąta  $\theta_3$  (tzw. rozwiązanie pozytywne i negatywne) gdyż ten sam punkt można uzyskać na 2 sposoby ułożenia ramion. Znając kąt  $\theta_3$  łatwo możemy obliczyć  $\theta_2$ .

$$(5) \quad \theta_2 = \arctan \frac{P_x}{P_y} + \arcsin \frac{a_3 \cdot \sin(\theta_3)}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}.$$

Ze względu na występowanie kąta  $\theta_3$  również otrzymamy 2 rozwiązania. Ostatnią zmienną wyliczymy z 3 równania

$$(6) \quad a_4 = P_z - a_1.$$

W przypadku równoległego połączenia sprawa wygląda nieco inaczej. Silniki sterujące całym robotem umieszczone są na początku każdego z pierwszych ramion, czyli nie ma silnika bezpośrednio sterującego drugim ramieniem jak w pojedynczej konstrukcji SCARA. Natomiast położenie drugiego ramienia wymusza koniec pierwszego oraz wspólne połączenia końców drugich ramion.

Jak wynika z równania (4) i (5) kąty  $\theta_2$  i  $\theta_3$  posiadają 2 rozwiązania. Przy obliczaniu kinematyki pierwszego łańcucha zaznaczonego na rys.7 kolorem niebieskim wybieramy negatywne rozwiązanie, a dla drugiego łańcucha zaznaczonego na czerwono rozwiązanie pozytywne dzięki czemu dostajemy kształt zbliżony do "deltoidu". Czyli pierwszym silnikiem sterujemy tak aby uzyskać rozwiązanie  $\theta_2(n)$ , a drugim  $\theta_2(p)$ . Natomiast drugie ramiona automatycznie ustawiają się w pozycji kątów  $\theta_3(n)$  oraz  $\theta_3(p)$  co powoduje uzyskanie punktu końcowego  $P(x,y)$

Należy oczywiście pamiętać, że zasięg ramion jest ograniczony o promieniu w przybliżeniu  $a_1 + a_2$ . Czyli przed policzeniem kinematyki odwrotnej należy sprawdzić czy punkt  $P(x,y)$  leży w przestrzeni roboczej robota.

### Wnioski

Praktyka w poruszaniu robotem wskazuje, że należy pamiętać o tym aby nie "zakleszczyć" robota. Ponieważ bezpośrednio nie możemy sterować drugimi ramionami należy mieć na uwadze aby ciąg ramion (na rys 7. oznaczony kolorem niebieskim i czerwonym) był zawsze w kształcie "deltoidu", czyli inaczej mówiąc należy dla kątów  $\theta_3(n)$  i  $\theta_3(p)$  wybrać odpowiednie rozwiązanie. Można to łatwo zrealizować za pomocą odpowiednich ograniczników (krańcówek) umieszczonych między pierwszym a drugim ramieniem robota. Ta niedogodność wynika z tego, że początki obu łańcuchów kinematycznych są w różnych miejscach na płaszczyźnie xy.

Przy projektowaniu należy pamiętać, że długości drugich ramion powinny być większe od długości pierwszych ramion. Dzięki temu omija się problem z tzw. wklęsłością robota, czyli sytuacji w której punkt P byłby bliżej początku układu w osi x niż końcówki pierwszych ramion. Wtedy również robot mógłby się zakleszczyć, a ponieważ silniki są usytuowane tylko na pierwszych ramionach to bez manualnej interwencji nie dało by się z tej pozycji uwolnić. Można oczywiście zastosować ograniczenia w postaci krańcówek.

Zaprojektowany i wykonany robot umożliwia wykonanie prostych procesów paletyzacji, oraz innych zadań. Prosta konstrukcja oraz podwójne ramię umożliwia szybką i precyzyjną realizację wymagających procesów. Realizacja podwójnego ramienia (dwa punkty podparcia) znacznie zwiększa stabilność i sztywność robota.

Przed zakupem należy pamiętać że konstrukcja podwójnego ramienia zawęża obszar roboczy robota. W zwykłym robocie SCARA obszar działania to praktycznie cała płaszczyzna (możliwość obrotu 360°), natomiast przy podwójnej konstrukcji to maksymalnie pół płaszczyzny czyli 180°.

Analiza kinematyczna i praktyka dowodzi, że dzięki zastosowaniu konstrukcji typu podwójna SCARA niektóre punkty w przestrzeni roboczej robota są znacznie łatwiej osiągalne niż przy użyciu tradycyjnej pojedynczej konstrukcji.

Dzięki zastosowaniu silników krokowych oraz sterownika możemy małym kosztem skonstruować bardzo praktycznego robota.

**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 Sobiepański, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.sobiepański@pcz.pl.

#### LITERATURA

- [1] Rygałło A., Robotyka dla mechatroników, Częstochowa: Politechnika Częstochowska, 2008.
- [2] Honczarenko J., Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie. Warszawa WNT 2004
- [3] Davoud Karimi, Mohammad Javad Nategh: Kinematic nonlinearity analysis in hexapod machine tools: Symmetry and regional accuracy of workspace, Mechanism and Machine Theory vol.71 01.2014 str. 115-125
- [4] Jaemin Lee, Nicolas Mansard, Jaeheung Park: Intermediate Desired Value Approach for Task Transition of Robots in Kinematic Control, IEEE Transactions on Robotics vol. 28 11.2012 str. 1260-1277
- [5] Borowik B., Analiza numeryczna planowania trajektorii robotów na przykładzie robota fanuc S-420f., Mechanik, 7 (2014), 45-50
- [6] Borowik B., Analiza kinematyki manipulatorów na przykładzie robota liniowego o czterech stopniach swobody, Mechanik, 7 (2015), 45-5
- [7] Borowik B., Pyrc M. Gruca M. Projekt oraz analiza kinematyczna robota pomagającego w rehabilitacji. Przegląd Elektrotechniczny 1/2023, pp. 290-293
- [8] Słabik Piotr., Budowa robota typu Parallel Scara - Praca Inżynierska, Częstochowa 2018