

**A G H**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki**

**KATEDRA AUTOMATYZACJI PROCESÓW**

## **Praca inżynierska**

**Projekt 3-osiowego robota typu SCARA parallel z  
wykorzystaniem silników BLDC**

**Project of a 3-axis SCARA parallel robot with the use of BLDC  
motors**

**Autor:**

**Kierunek studiów:  
Opiekun pracy:**

**Robert Szott-Ludwikowski  
Automatyka i Robotyka  
dr inż. Tymoteusz Turlej**

**Kraków, 2022**



# **Spis treści**

1.	Wstęp .....	5
1.1.	Cel pracy i zakres .....	5
2.	Manipulatory .....	7
2.1.	Podział manipulatorów.....	7
2.1.1.	Konfiguracja kartezjańska (PPP) .....	8
2.1.2.	Konfiguracja cylindryczna (RPP) .....	9
2.1.3.	Konfiguracja sferyczna (RRP) .....	10
2.1.4.	Konfiguracja stawowa (RRR) .....	11
2.1.5.	Konfiguracja SCARA (RRP) .....	12
2.2.	Przegląd manipulatorów SCARA dostępnych na rynku.....	13
2.2.1.	FANUC SR-20iA .....	13
2.2.2.	KR 6 R700 Z200 .....	14
2.2.3.	TS2-100 SCARA.....	14
2.2.4.	SR1000-STZB SCARA –R2.....	15
2.3.	Podsumowanie .....	16
3.	Kinematyka manipulatora SCARA parallel .....	17
3.1.	Kinematyka prosta .....	18
3.2.	Kinematyka odwrotna .....	19
4.	Projekt manipulatora SCARA parallel .....	21
4.1.	Część mechaniczna .....	21
4.1.1.	Podstawa aluminiowa.....	23
4.1.2.	Trzpień .....	23
4.1.3.	Koło zębate napędowe .....	24
4.1.4.	Stelaż stabilizujący .....	25
4.1.5.	Koło zębate napędzane .....	25
4.1.6.	Ramię robota .....	26
4.1.7.	Koszyk.....	27
4.1.8.	Tuleja podtrzymująca .....	28
4.1.9.	Podkładka .....	28
4.2.	Część elektryczna.....	29
4.2.1.	Silniki bezszczotkowe .....	30
4.2.2.	Mikrokontroler .....	32
4.2.3.	Magnetyczny enkoder rotacji .....	33
4.2.4.	Sterownik silników BLDC .....	34
4.2.5.	Zasilanie układu napędowego .....	35

4.2.6. Serwomechanizm .....	35
4.3. Oprogramowanie.....	36
5. Testy weryfikujące .....	39
5.1. Test poprawności obliczeń.....	39
5.2. Test powtarzalności.....	40
5.3. Test dokładności.....	40
5.4. Podsumowanie .....	45
6. Podsumowanie.....	46
Bibliografia.....	47
Spis rysunków .....	49
Spis tabel .....	51
Spis załączników .....	52

# **1. Wstęp**

W dzisiejszych czasach wiele pracy człowieka może zostać zastąpiona zautomatyzowanym robotem przemysłowym. Jest wiele zadań i czynności, które są powtarzalne i mogą zostać zautomatyzowane. Istnieją procesy produkcyjne produktów spożywczych, bądź konsumenckich, gdzie automatyzacja całej linii produkcyjnej jest stosowana od początkowej fazy wyrobu produktu, do gotowego i zapakowanego fabrykatu, dostępnego do sprzedaży w sklepach. Do całkowitego usprawnienia linii produkcyjnej w fabrykach wykorzystywane są manipulatory. Maszyny te są niezbędne w miejscach pracy trudno dostępnych dla człowieka, bądź w niebezpiecznych środowiskach, gdzie człowiek nie mógłby pracować. Wysoka precyzaja i powtarzalność manipulatorów gwarantuje poprawę jakości, ergonomii produkcji danego wyrobu, oraz stabilizacji produkcji.

Manipulator SCARA parallel jest idealnym rozwiążaniem robota wykorzystywanym do przenoszenia wyrobów pomiędzy poszczególnymi etapami procesów technologicznych. Jest to robot, którego ruchy są niezwykle dokładne i powtarzalne. Ponadto że cechuje go wysoka prędkość robocza, zatem przenoszenie produktu pomiędzy taśmociągami w fabryce to idealne zadanie dla tego typu manipulatora. SCARA jest kompaktowym robotem i dobrze współpracuje z miejscami ciasnymi, gdzie inne typy manipulatorów nie mogły by wykorzystać pełnego zakresu roboczego. Szerokie możliwości zastosowania tego typu manipulatora w wielu gałęziach przemysłu, że w pracy została podjęta próba zaprojektowania i wykonania własnej konstrukcji manipulatora.

## **1.1. Cel pracy i zakres**

Celem pracy dyplomowej jest opracowanie prototypu 3-osiowego manipulatora SCARA pracującego w układzie kinematycznym XYZ. Założono, że ramiona w osiach X oraz Y będą powodowały przemieszczenie głowicy roboczej. W osi Z przewidziano ruch narzędzi rysującego (w osi pionowej) z wykorzystaniem serwomechanizmu. Rozwiązanie takie pozwala na manipulację kontaktem pomiędzy narzędziem szkicującym a podłożem roboczym.

Do realizacji celu pracy przewidziano następujący zakres prac:

- Przegląd rozwiązań manipulatorów stosowanych na rynku,
- Zaprojektowanie prototypu manipulatora typu SCARA parallel,
- Dobranie elementów elektronicznych do konstruowanego prototypu,
- Skonstruowanie i oprogramowanie działającego manipulatora,
- Wyregulowanie i przeprowadzenie testów skonstruowanego robota,

W procesie realizacji projektu wykorzystano niskobudżetowe technologie, np. ESP-32, darmowe biblioteki. Większość elementów konstrukcyjnych została zamodelowana oraz wydrukowana samodzielnie.

## **2. Manipulatory**

Definicja manipulatora opisuje robota jako połączenie mechaniczne, którego zdolność sięgania, chwytania i manipulowania obiektem w przestrzeni jest analogiczna do ludzkiego ramienia. Takie manipulatory są zazwyczaj łańcuchami szeregowymi, które są tworzone z par kinematycznych połączonych ogniwami, nietworzące pętli [1].

Każdy manipulator opisują dwa najważniejsze parametry: powtarzalność i dokładność. Dokładność manipulatora wskazuje na to, jak blisko manipulator może dotrzeć do zadanego punktu w swojej przestrzeni roboczej. Miara ta może być zaniżona na przykład poprzez występowanie luzów w przekładniach. Elastyczność poszczególnych członów robota także znaczco moze wpływać na wymieniony parametr, jak i szczegółowość wykonania poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Błędy obliczeniowe przy konstruowaniu i oprogramowywaniu robota także mają znaczny wpływ na dokładność manipulatora.

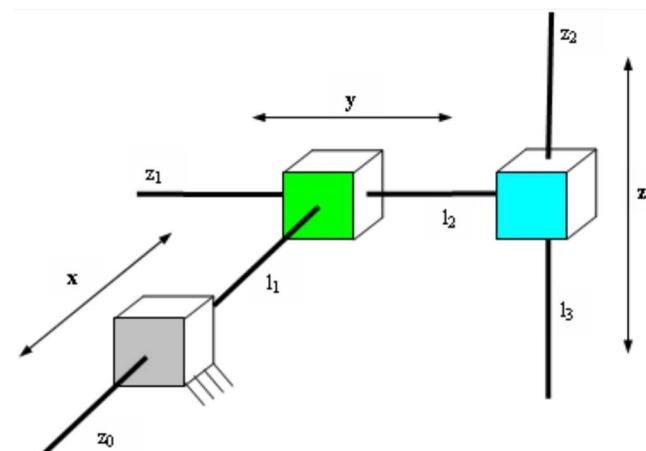
Powtarzalność manipulatora jest to miara określająca jak blisko manipulator może powrócić do pozycji poprzednio osiągniętej. Wpływ na ten parametr ma rozdzielcość układu sterowania robota, czyli najmniejszy przyrost ruchu, który może zostać rozpoznany przez układ sterowania [2].

### **2.1. Podział manipulatorów**

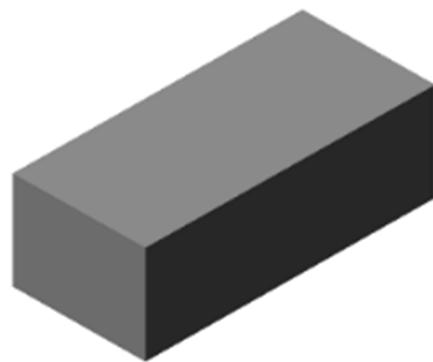
Podział manipulatorów następuje na podstawie struktury kinematycznej łańcucha kinematycznego robota. Struktura kinematyczna jest to schemat połączeń par kinematycznych, wykorzystujący oznaczenie członów [3]. Każdy rodzaj manipulatora wykorzystywany jest w innym konkretnym celu. Nie każdy rodzaj głowicy można zamontować do dowolnego manipulatora. Istnieją łańcuchy kinematyczne nadające się tylko do przenoszenia elementów, takie jak SCARA, a z kolei konfiguracja stawowa, ze względu na swoją budowę i wytrzymałość, może być używana jako manipulator do procesu technologicznego skrawania, czy frezowania. Manipulatory ze względu na swoją uniwersalność odnajdują zastosowanie jako element wykonawczy w maszynach CNC. Powszechnie wycinarki plazmowe, lub frezarki CNC, korzystają z odpowiednio dobranej głowicy, poruszającej się w przestrzeni roboczej łańcucha kinematycznego manipulatora kartezjańskiego.

### 2.1.1. Konfiguracja kartezjańska (PPP)

Manipulator kartezjański cechuje się pryzmatycznym połączeniem członów. Manipulator kartezjański jest najprostszym manipulatorem pod względem kinematycznym. W wymienionej konfiguracji (rys. 2.1), każda z trzech osi manipulatora sterowana jest osobnym napędem, co w wyniku daje pole robocze manipulatora mające kształt prostopadłościanu (rys. 2.2). Przykładem wykorzystania manipulatora kartezjańskiego jest powszechnie stosowana drukarka 3D.



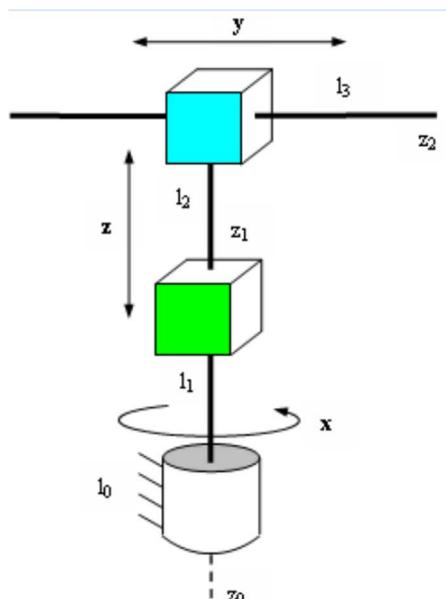
Rys. 2.1. Konfiguracja manipulatora kartezjańskiego [5]



Rys. 2.2. Główna przestrzeń robocza manipulatora kartezjańskiego [3]

### 2.1.2. Konfiguracja cylindryczna (RPP)

W konfiguracji cylindrycznej (rys. 2.3) pierwszy człon manipulatora jest umiejscowiony na obrotowej podstawie. Człon drugi oraz trzeci są zamontowane na pryzmatycznych przegubach, co razem tworzy przestrzeń roboczą manipulatora w postaci niepełnego cylindra (rys. 2.4). Zalety robota cylindrycznego, to między innymi nie zależność od siły grawitacji, bezkolizyjne poruszanie się w przestrzeni oraz prostota w wykonaniu, dzięki dwóm liniowym osiom przesuwu. Wady konfiguracji cylindrycznej to między innymi mała kompatybilność w współpracy z innymi manipulatorami lub robotami przemysłowymi. Dokładność operacji wykonywanych przez robota o cylindrycznej konfiguracji kinematycznej jest niższa niż manipulatora o konfiguracji kartezjańskiej [4].



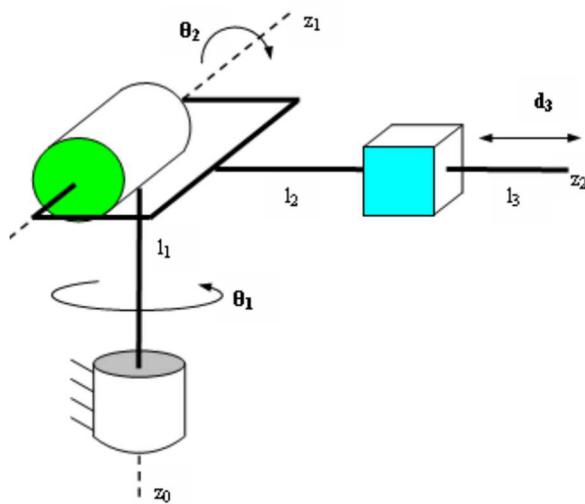
Rys. 2.3. Konfiguracja manipulatora cylindrycznego [5]



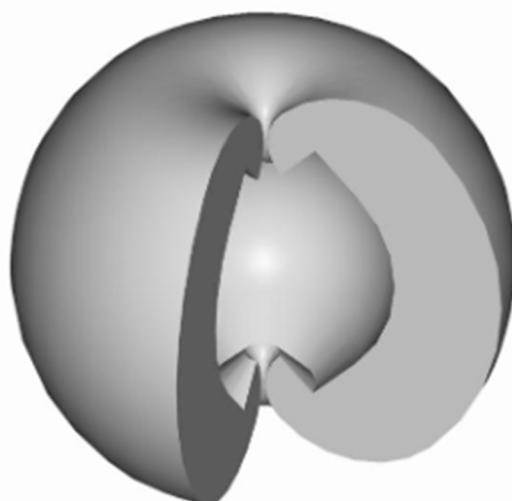
Rys. 2.4. Główna przestrzeń robocza manipulatora cylindrycznego [3]

### 2.1.3. Konfiguracja sferyczna (RRP)

Manipulatory z konfiguracją sferyczną (rys. 2.5) posiadają pierwsze i drugie złącze obrotowe, a trzecie złącze jest pryzmatyczne. Sztywność tego typu manipulatora jest mniejsza niż konstrukcji kartezjańskiej. Można także zauważyć, że dokładność tego typu manipulatora maleje wraz ze zwiększeniem promienia roboczego poprzez człon trzeci o ruchu postępowym [6]. Pole robocze robota z konfiguracją sferyczną ma kształt wydrążonej sfery (rys. 2.6).



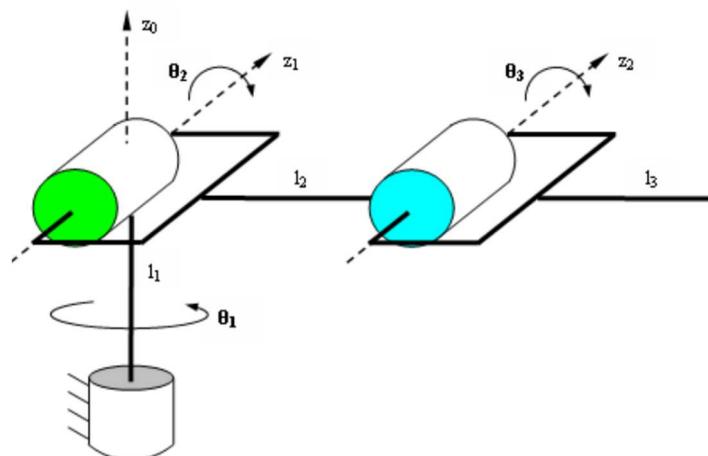
Rys. 2.5. Konfiguracja manipulatora sferycznego [5]



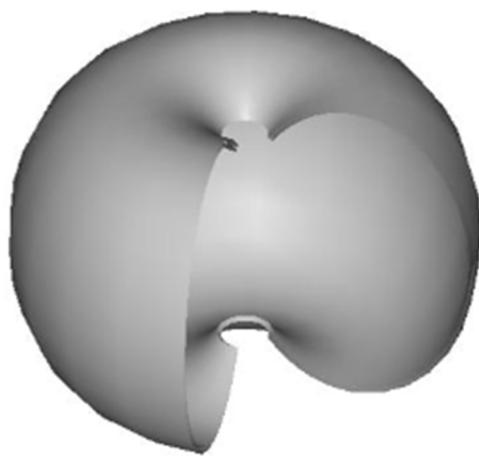
Rys. 2.6. Główna przestrzeń robocza manipulatora sferycznego [3]

#### 2.1.4. Konfiguracja stawowa (RRR)

Konfiguracja stawowa (rys 2.7) cechowana jest trzema złączami obrotowymi. Manipulatory posiadające tą konfigurację zwane są także antropomorficznymi. Ich struktura przypomina budowę łokcia. Pole robocze manipulatora z konfiguracją stawową jest sferyczne (rys. 2.8). Każde kolejne ramię wchodzące w konstrukcję manipulatora z konfiguracją stawową jest zależne od poprzedniego, toteż dokładność z jaką może operować manipulator jest zależna od pozycji końcówki roboczej w sferycznym polu roboczym manipulatora [6]. Częstym zastosowaniem takiego robota jest praca w fabrykach jako współpraca z maszynami CNC lub jako robot spawalniczy w fabrykach samochodowych.



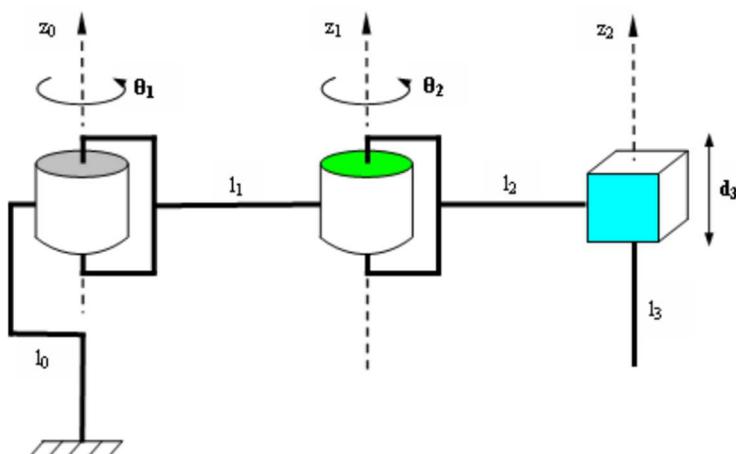
Rys. 2.7. Konfiguracja manipulatora antropomorficznego [5]



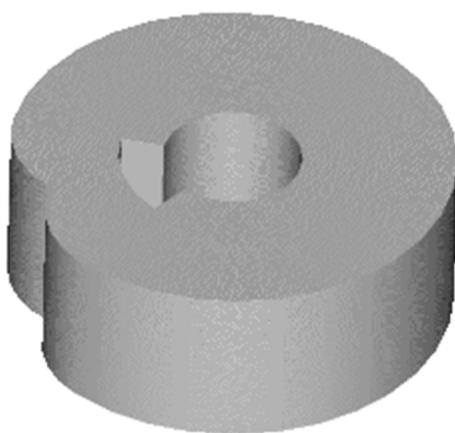
Rys. 2.8. Główna przestrzeń robocza manipulatora stawowego [3]

### 2.1.5. Konfiguracja SCARA (RRP)

Manipulatory trzyosiowe wykorzystujące konfigurację typu SCARA (rys. 2.9) posiadają dwa pierwsze człony obrotowe, a ostatni pryzmatyczny. Wszystkie osie zarówno obrotowe pierwszych dwóch członów, jak i trzeciego postępowego są skierowane prostopadle do podłoża, względem osi pionowej Z. Pole robocze w jakim może pracować robot ma postać cylindryczną (rys. 2.10). Zastosowanie manipulatorów SCARA to głównie montowanie elementów i podzespołów w aplikacjach, gdzie występuje powtarzalna czynność przenoszenia detali oraz ich sortowania. Jednym z najczęstszych zastosowań robota z konfiguracją SCARA jest współpraca przy montowaniu elementów w procesach produkcji obwodów elektronicznych [7].



Rys. 2.9. Konfiguracja manipulatora typu SCARA [5]



Rys. 2.10. Główna przestrzeń robocza manipulatora typu SCARA [3]

## 2.2. Przegląd manipulatorów SCARA dostępnych na rynku

Manipulatory SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) są jedne z często wykorzystywanych typów robotów przemysłowych na rynku. Ich głównym celem jest montaż elementów i sortowanie. Główne zalety robotów klasy SCARA, to stosunkowo duża sztywność konstrukcji, wysoka dokładność i precyzja manipulatora.

### 2.2.1. FANUC SR-20iA



Rys. 2.11. Manipulator SCARA firmy Fanuc [8]

FANUC SR-20iA jest ro robot SCARA produkowany przez firmę FANUC. Ten konkretny model ma największe pole robocze oraz dopuszczalne obciążenie dla manipulatorów SCARA oferowanych przez firmę FANUC. Roboty FANUC SCARA posiadają kopertę pracy  $360^\circ$  oraz zajmują mało miejsca dzięki montażowi na podeście. Jedną z ich zalet jest całkowicie schowane okablowanie robota w jego obudowie. Manipulatory tej firmy są dostępne z inteligentnymi funkcjami takimi jak, iRVision oraz iRPickTool [8].

### **2.2.2. KR 6 R700 Z200**



Rys. 2.12. Manipulator SCARA firmy Kuka [9]

KR 6 R700 Z200 jest to robot KR SCARA firmy KUKA. Wykorzystywane są do montażu i łączenia elementów oraz zastosowań Pick & Place. Temperatura otoczenia podczas pracy tego robota powinna mieścić się w zakresie od 5°C do 40°C (278 K do 313 K). Ogromnym atutem tych manipulatorów SCARA są krótkie czasy cykli. KR SCARA posiada także zintegrowane 4 przewody pneumatyczne, co ponadto kalibracja urządzenia jest bardzo wygodna dzięki narzędziowi EMD [9].

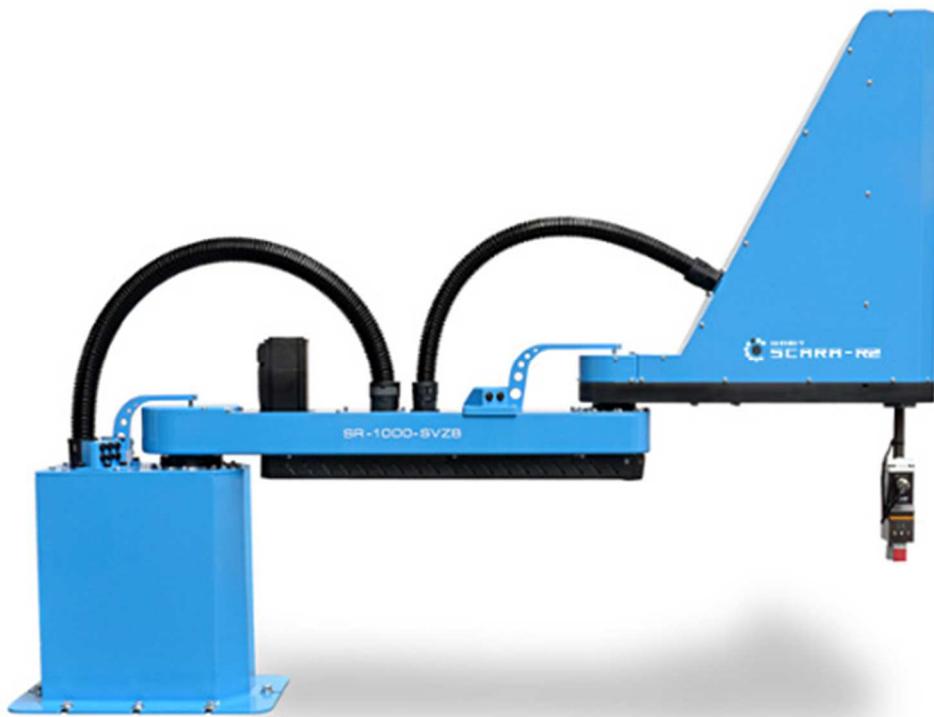
### **2.2.3. TS2-100 SCARA**

Seria TS2 SCARA firmy Stäubli posiada 4 stopnie swobody. Napęd dla tego robota jest wykonany opatentowaną technologią JCS, która charakteryzuje się minimalnym czasem cykli i wysoką powtarzalnością. Konstrukcja TS2 jest hermetyczna, co pozwala na pracę w ciężkich warunkach. Dzięki okablowaniu znajdującym się całkowicie wewnątrz obudowy TS2 SCARA osiąga cylindryczne pole robocze o maksymalnym zasięgu ramienia w każdym kierunku. Dla robotem TS2-100 maksymalna ładowność wynosi 8,4 kg z 1 metrowym zasięgiem. Do sterowania tym manipulatorem wykorzystuje się kontroler CS9. Dla robota dostępny jest także zintegrowany zmieniacz narzędzi, co pozwala na zmianę chwytaka podczas pracy robota. TS2 oferuje także mocowanie manipulatora zarówno na podłodze jak i suficie [10].



Rys. 2.13. Manipulator SCARA firmy Stäubli [10]

#### 2.2.4. SR1000-STZB SCARA –R2



Rys. 2.14. Manipulator SCARA firmy WObit [11]

Robot R1000-STZB SCARA –R2 jest produktem polskiej firmy WObit. Robot ten jest manipulatorem SCARA czterooosiowym o maksymalnym udźwigu 5kg. Dzięki swojej prostej

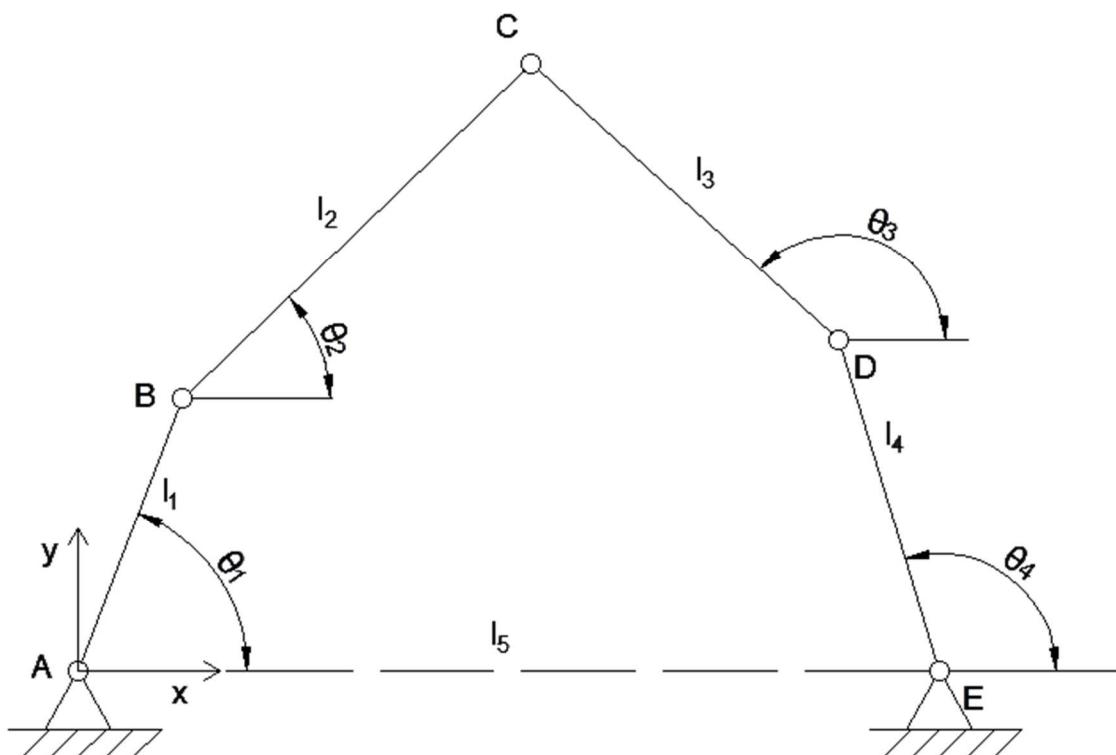
konstrukcji, manipulator ten cechuje się niezawodnością podczas pracy. Jest to druga wersja tego robota. Różni się od pierwszej silnikami napędzającymi ramiona robota. Pierwsza wersja posiadała silniki krokowe oraz enkodery inkrementalne, zapewniające powtarzalność oraz optymalną prędkość pracy. W wersji drugiej zastąpiono je silnikami prądu zmiennego, co poskutkowało znaczną poprawą dynamiki funkcjonowania manipulatora SCARA. Manipulator posiada przyłącze elektryczne i powietrzne, co pozwala na podłączenia chwytaka elektrycznego i pneumatycznego [11].

### **2.3. Podsumowanie**

Manipulatory z konfiguracją kinematyczną SCARA, to niezwykle dynamiczne i precyzyjne roboty. Dzięki swojej prostocie i kompaktowości, są wykorzystywane jako główne roboty pakujące lub montujące. Manipulatory SCARA są zdatne do pracy w miejscach trudno dostępnych, gdyż mogą przemieszczać się po układzie współrzędnych równoległego do podłoża robota, bez zmiany wysokości członów w osi Z. Do projektu dyplomowego wybrano konfigurację SCARA parallel, ze względu na przystępny sposób prototypowania w warunkach laboratoryjnych. Wersja równoległa wymaga mniejszego wkładu finansowego niż standardowa SCARA jednoramienna z silnikiem między członami, ponieważ nie tworzą się dodatkowe momenty gnące na ramieniu robota w postaci masy silnika w połowie ramienia. Wybór konfiguracji parallel pozwolił na wykorzystanie technologii druku 3D w procesie projektowania manipulatora.

### 3. Kinematyka manipulatora SCARA parallel

W celu zaprojektowania manipulatora wyznaczono równania kinematyki prostej i odwrotnej dla robota. Kinematyka pozwala na zbadanie położenia, prędkości oraz przyspieszenia danego ciała. Wynikiem obliczeń kinematyki prostej są współrzędne końcówki roboczej, gdzie danymi wejściowymi są kąty obrotu podstaw manipulatora. Kinematyka odwrotna pozwala na poruszanie manipulatorem w układzie kartezjańskim zadając położenie współrzędnych jako dane wejściowe. Wynikiem równania kinematycznego odwrotnego są kąty obrotu podstaw manipulatora SCARA względem początkowego układu współrzędnych. W pracy przyjęto, że ruch w osi Z realizowany jest poprzez podniesienie lub opuszczenie rysika, zatem nie będzie rozpatrywany przy obliczeniach kinematyki.



Rys. 3.1. Schemat kinematyczny manipulatora SCARA parallel

A – ognisko przy podstawie będące w miejscu zerowym układu współrzędnych manipulatora, sterowane przez silnik,

B – Ognisko łączące człony  $l_1$  oraz  $l_2$ ,

C – Ognisko łączące człony  $l_2$  oraz  $l_3$ , będące jednocześnie efektem końcowym manipulatora, dla którego wyznaczono równania kinematyki prostej i odwrotnej,

D – Ognisko łączące człony  $l_3$  oraz  $l_4$ ,

E – Ogniwo przy podstawie manipulatora będące oddalone o długość  $l_5$  od punktu A wzdłuż osi X i jednocześnie znajdujące się na takiej samej wysokości Y co punkt A. Ogniwo jest sterowane przez drugi silnik wchodzący w układ sterowania manipulatora,

$l_1, l_2, l_3, l_4$ , – ramiona manipulatora,

$l_5$  – odległość pomiędzy podstawami manipulatora SCARA.

W celu wyznaczenia obliczeń kinematyki prostej i odwrotnej przyjęto następujące długości ramion robota:

- $l_1 = 200$  mm,
- $l_2 = 200$  mm,
- $l_3 = 200$  mm,
- $l_4 = 200$  mm.

Dobrano odległość pomiędzy podstawami manipulatora wynoszącą  $l_5 = 225$  mm.

Do obliczeń kinematyki prostej i odwrotnej przyjęto następujące oznaczenia nachyleń poszczególnych ramion do osi X kartezjańskiego układu współrzędnych:

- $\theta_1$  – kąt nachylenia ramienia  $l_1$ , sterowany za pomocą silnika 1 prototypu manipulatora SCARA parallel,
- $\theta_2$  – kąt nachylenia ramienia  $l_2$ , wynikający z obliczeń analitycznych kinematyki. Kąt ten nie jest sterowalny i jego wartość wynika z kątów  $\theta_1$  oraz  $\theta_4$ ,
- $\theta_3$  – kąt nachylenia ramienia  $l_3$ , wynikający z obliczeń analitycznych kinematyki. Kąt ten nie jest sterowalny i jego wartość wynika z kątów  $\theta_1$  oraz  $\theta_4$ ,
- $\theta_4$  – kąt nachylenia ramienia  $l_4$ , sterowany za pomocą silnika 2 prototypu manipulatora SCARA parallel.

### **3.1. Kinematyka prosta**

W powszechnych manipulatorach dostępnych na rynku istnieje możliwość sterowania robotem, poprzez zadanie konkretnego obrotu danego silnika, obsługującego manipulator. Program poprzez zmianę kąta nachylenia ramienia przemieszcza głowicę roboczą manipulatora, co powoduje zmianę współrzędnych końcówki manipulatora. Do obliczenia współrzędnych efektora stosuje się obliczenia kinematyki prostej, gdzie danymi wejściowymi są kąty nachylenia ramion robota do układu współrzędnych, a wynikiem końcowym współrzędne głowicy roboczej w układzie kartezjańskim. W manipulatorach typu SCARA parallel wymieniony sposób sterowania robotem nie jest stosowany. Ze względu na konstrukcję

manipulatora SCARA parallel i połączony układ ramion, zastosowano jedynie równania kinematyki odwrotnej do sterowania położeniem końcówki roboczej manipulatora.

Poniżej przedstawiono równania pozwalające na obliczenie położenia końcówki roboczej, w układzie współrzędnym kartezjańskim XY, wynikające ze schematy kinematycznego manipulatora SCARA paralel.

$$x_c = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = l_5 + l_4 \cos \theta_4 + l_3 \cos \theta_3 \quad (3.1)$$

$$y_c = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 \quad (3.2)$$

### 3.2. Kinematyka odwrotna

Kinematyka odwrotna, przeciwnie do kinematyki prostej, zajmuje się wyliczeniem kątów nachyleń ramion manipulatora do początkowego układu współrzędnych na podstawie zadanych przez użytkownika, lub współrzędnych wejściowych głowicy roboczej manipulatora. Równania kinematyki odwrotnej w manipulatorach często występują jako równania nieliniowe oraz mogą posiadać więcej niż jedno rozwiązanie. Wynika to z możliwości osiągnięcia zadanego punktu w przestrzeni przez manipulator z użyciem różnych konfiguracji kątów nachylenia ramion. Idealnym przykładem jest konfiguracja kinematyczna manipulatora RRP typu SCARA paralel, gdzie odległość między podstawami manipulatora jest większa od zera. Istnieją punkty w przestrzeni dla manipulatora SCARA parallel, gdzie układ równań kinematyki odwrotnej posiada nawet 3 rozwiązania. W projekcie inżynierskim manipulatora SCARA parallel założono, że pięciokąt jaki tworzą ramiona manipulatora z podstawą, jest zawsze wielokątem wypukłym. Takie założenie pozwoliło na ograniczenie liczby rozwiązań kinematyki odwrotnej prototypu manipulatora tworzonego w ramach pracy inżynierskiej do jednego.

Z równania (3.1) i (3.2) wyliczono kąty  $\theta_1$  oraz  $\theta_4$ :

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{-A - C} \right] \quad (3.3)$$

gdzie

$$A = x_c$$

$$B = y_c$$

$$C = \frac{l_1^2 - l_2^2 + x_c^2 + y_c^2}{2 * l_1}$$

oraz:

$$\theta_4 = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{-A - C} \right] \quad (3.4)$$

gdzie:

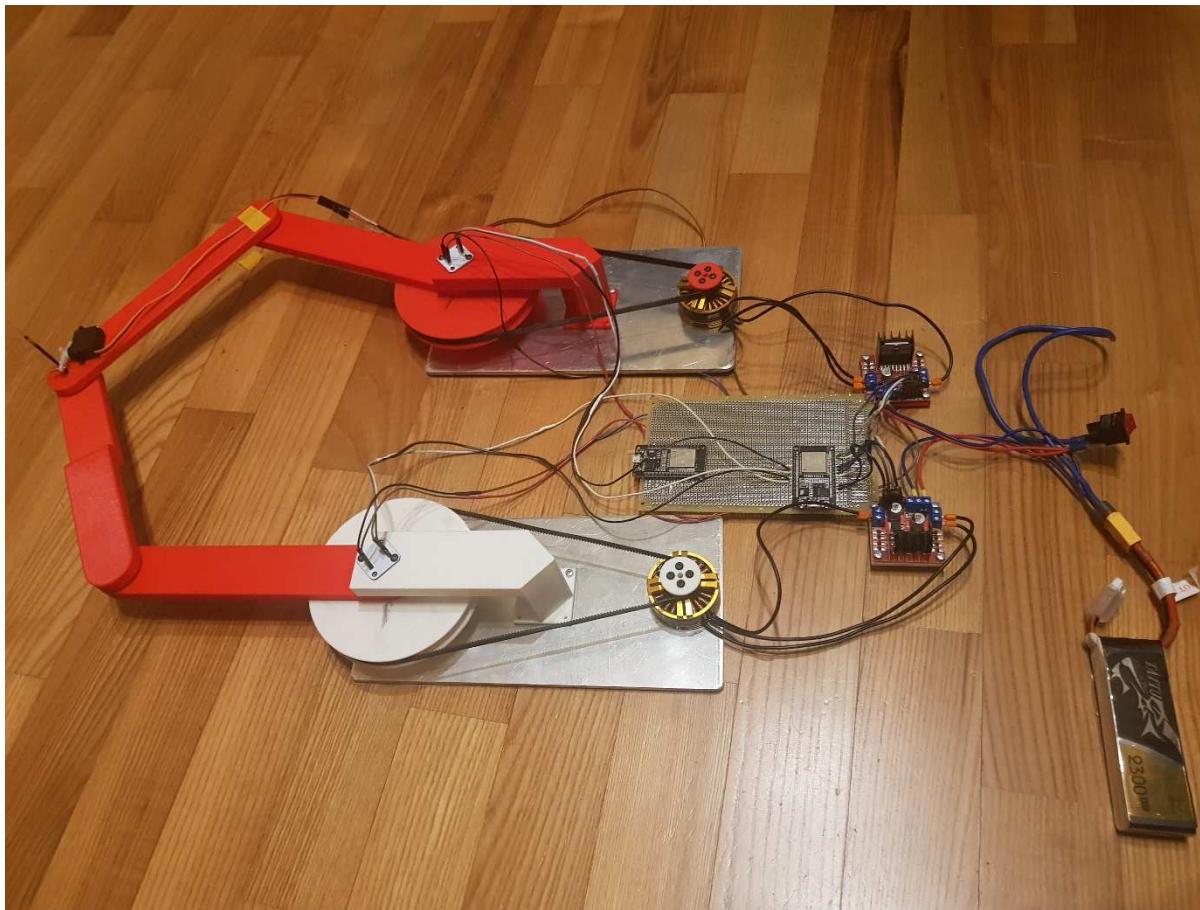
$$A = x_c - l_5$$

$$B = y_c$$

$$C = \frac{l_4^2 + l_5^2 - l_3^2 + 2x_c l_5 + x_c^2 + y_c^2}{2 * l_4}$$

## 4. Projekt manipulatora SCARA parallel

Niezbędnym krokiem do wykonania danego urządzenia jest jego część projektowa. W dzisiejszych czasach, kiedy dostęp do programów CAD jest powszechny, projektowanie części maszynowych i złożenia projektu stało się bardzo wygodne. Do zamodelowania wszystkich komponentów wykorzystano program Fusion 360 firmy Autodesk. Jest to bardzo prosty i intuicyjny w obsłudze program pozwalający na swobodne modelowanie i projektowanie części maszynowych. Większość elementów konstrukcyjnych została wydrukowana na drukarce 3D

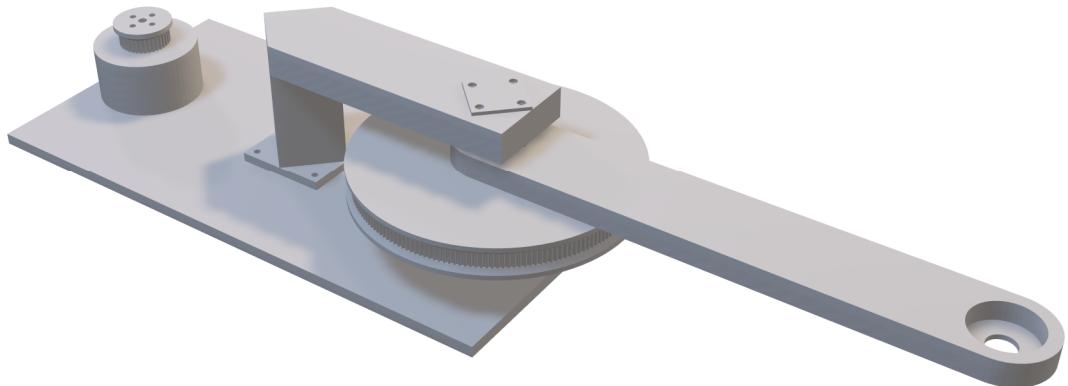


Rys. 4.1. Zdjęcie prototypu manipulatora SCARA parallel

### 4.1. Część mechaniczna

Istotnym elementem przy konstruowaniu robota jest odpowiednie dobranie materiałów poszczególnych komponentów. Rozkład sił i momentów działających na konkretną część jest istotnym czynnikiem wpływającym na dobór materiału z którego zostanie wykonany komponent. W celu zrealizowania zadania inżynierskiego wykorzystano technologię druku 3D. Druk 3D pozwala na dokładne jak i szybkie wykonanie elementu zaprojektowanego w programie CAD-owskim. Jedną z największych zalet technologii druku 3D jest wykonanie

całego elementu bez ingerencji człowieka podczas procesu wykonywania części. Druk 3D idealnie nadaje się do prototypowania części maszynowych, ze względu na budżetowość wykonania elementu. Do wydrukowania następujących elementów użyto drukarki E2 firmy Raise 3D. Drukarka ta posiada dwie głowice drukujące, co pozwala na drukowanie dwóch identycznych elementów na raz, bądź wykonywanie elementu i jego odbicia lustrzanego w tym samym czasie. Drukarka cechuje się niezawodnością i precyzją, co widać na elementach wydrukowanych (rys. 4.1, rys. 4.2).



Rys. 4.2. Model 3D jednej z dwóch podstaw manipulatora SCARA parallel

W tabeli 4.1. zawarto listę elementów niezbędnych do zaprojektowania przekładni pasowej będącej napędem dla jednego z dwóch ramion manipulatora SCARA paralel. Zamieszczono również materiał, z którego został wykonany dany element.

Tab. 4.1. Spis części mechanicznych manipulatora

Nazwa	Materiał
Podstawa aluminiowa	PA9 (AW-7075A)
Trzpień	X46Cr13
Koło zębate napędowe	PLA
Stelaż stabilizujący	PLA
Koło zębate napędzane	PLA
Ramię robota	PLA
Koszyk	PLA
Tuleja podtrzymująca	PLA
Podkładka	PLA
Łożysko	–

#### **4.1.1. Podstawa aluminiowa**

Do wykonania podstawy użyte zostało aluminium. Jest to miękki metal nadający się idealnie do obróbki, jak i sztywny na tyle aby utrzymać wszystkie elementy znajdujące się na podstawie w jednym miejscu. W płycie aluminiowej będącej podstawą pod komponenty napędowe robota SCARA wykonano otwory przelotowe 2,5 mm w zaprojektowanych miejscach (rys. 4.3), po czym nagwintowano wykonane otwory gwintownikiem M3



Rys. 4.3. Model 3D podstawy manipulatora

#### **4.1.2. Trzpień**

Konstrukcja trzpienia została wykonana ze stali nierdzewnej. Stal tego typu to głównie mieszanka żelaza i chromu. Mieszanka ta dobrze chroni metal przed działaniem odczynów kwaśnych substancji. Jedną z zalet stali nierdzewnej jest odporność na korozję i wysokie temperatury. Dobrano ten rodzaj metalu ze względu na jego wytrzymałość. Zastosowano trzpień jako element podatny na momenty gnące w manipulatorze. Dzięki doborowi trzpienia ze stali nierdzewnej został zachowany pion konstrukcji ramienia manipulatora SCARA parallel.



Rys. 4.4. Model 3D trzenia

Na trzpień o średnicy 10 mm (rys. 4.4) wykonany ze stali nierdzewnej X46Cr13 osadzono łożyska na dwóch końcach oraz komponenty wykonane z druku 3D takie jak:

- Koło zębate napędzane,
- Tuleje podtrzymującą,
- Ramię manipulatora

Trzpień skrócono do długości 57 mm, aby spełniał wymagania określone w założeniach projektowych prototypu manipulatora SCARA parallel

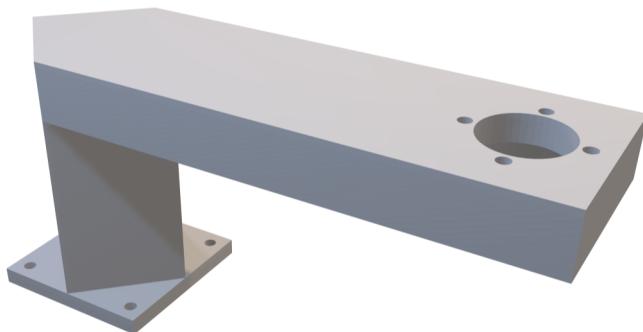
#### **4.1.3. Koło zębate napędowe**

Do wykonania koła zębatego napędzającego przekładnie pasową z pasem zębatym GT2 użyto materiał PLA oraz technologii druku 3D. Koło zębate (rys. 4.5) posiada 36 zębów, 4 otwory o średnicy 3 mm oraz otwór wewnętrzny o średnicy 4 mm. Pasowanie mieszane otworu wykonanego na środku koła zębatego pozwala zabezpieczyć przemieszczanie się elementu wydrukowanego podczas pracy na silniku BLDC.



Rys. 4.5. Model 3D koła zębatego napędowego

#### 4.1.4. Stelaż stabilizujący

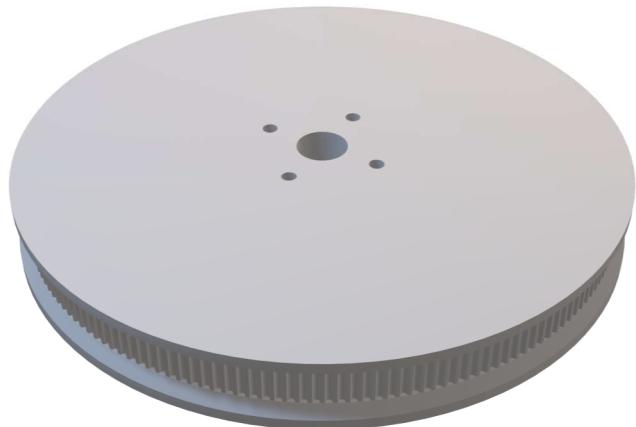


Rys. 4.6. Model 3D stelażu podtrzymującego

Stelaż (rys. 4.6) wykonany z materiału PLA służy do utrzymania trzpienia w pozycji pionowej. Komponent jest przykręcany do podstawy przy pomocy śrub M3. Stelaż posiada 4 otwory 2,5 mm aby przykręcić magnetyczny enkoder rotacji na wierzch. Do stelaża mocuje się łożysko 6000 2RS o normie ISO9001. Między stelażem a łożyskiem występuje pasowanie ściśliwe.

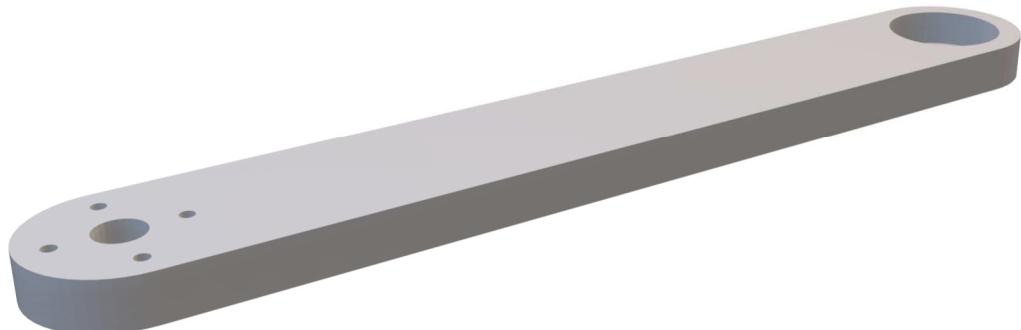
#### 4.1.5. Koło zębate napędzane

Kolejne koło (rys. 4.7) zaprojektowane do wykorzystania w pracy jest napędzane pasem zębataym GT2. Zaprojektowany element posiada kołnierz z obu stron koła zębatego, aby pas zębaty nie przesuwał się podczas pracy wzdłuż osi koła. 4 otwory o średnicy 3 mm pozwalają na przykręcenie koła zębatego do tulei podtrzymującej, znajdującej się pod kołem oraz do ramienia robota mocowanego na wierzch przedstawionego wyżej elementu.



Rys. 4.7. Model 3D koła zębatego napędzanego

#### 4.1.6. Ramię robota



Rys. 4.8. Model 3D ramię 1 i 4 manipulatora SCARA

Ramiona (rys. 4.8÷4.10) wykonano z materiału PLA z mocowaniem na łożysko. Pierwsze ramię posiada otwór przelotowy o średnicy 10 mm do osadzenia na trzpienie oraz 4 otwory 3 mm do przykręcenia ramienia do koła zębatego napędzanego. Wszystkie ramiona manipulatora posiadają długość 200 mm. Długość dobrano ze względu na ograniczenia co do długości drukowanego elementu, jaki posiada drukarka 3D wykorzystana do produkcji elementów mechanicznych wykonanych z materiału PLA.



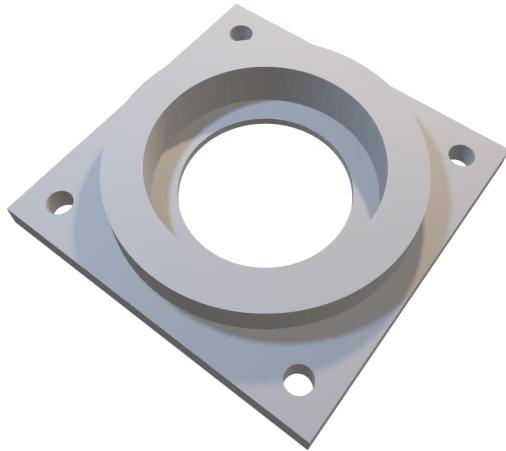
Rys. 4.9. Model 3D ramię 2 manipulatora SCARA



Rys. 4.10. Model 3D ramię 3 manipulatora SCARA

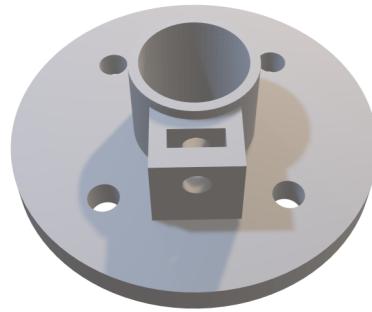
#### 4.1.7. Koszyk

Koszyk (rys. 4.11) zamontowano na podstawie aluminiowej czterema śrubami M3. Celem tego elementu jest stabilizacja trzpienia w pozycji pionowej. Otwór na łożysko tworzy z zewnętrzną ścianą łożyska pasowanie ściśliwe, co zapobiega poślizgowi łożyska wewnątrz koszyka. Cztery otwory jakie posiada koszyk mają średnice 3 mm.



Rys. 4.11. Model 3D koszyka na łożysko

#### 4.1.8. Tuleja podtrzymująca



Rys. 4.12. Model 3D koszyka na łożysko

Przedstawiony na rys. 4.12 komponent zamontowano pomiędzy łożyskiem osadzonym w koszyku, a kołem zębatym napędzanym przez pas zębaty. Zadaniem tulei podtrzymującej jest zapewnienie konkretnej odległości koła zębatego od podłoża, aby znalazło się na równi z kołem zębatym napędowym zamontowanym na silniku. Tuleja posada otwór na nakrętkę sześciokątną M2,5 i otwór 2,5 mm na śrubę M2,5 pomagającą utrzymać stałą orientację wszystkich komponentów przykręconych do tulei względem trzpienia.

#### 4.1.9. Podkładka

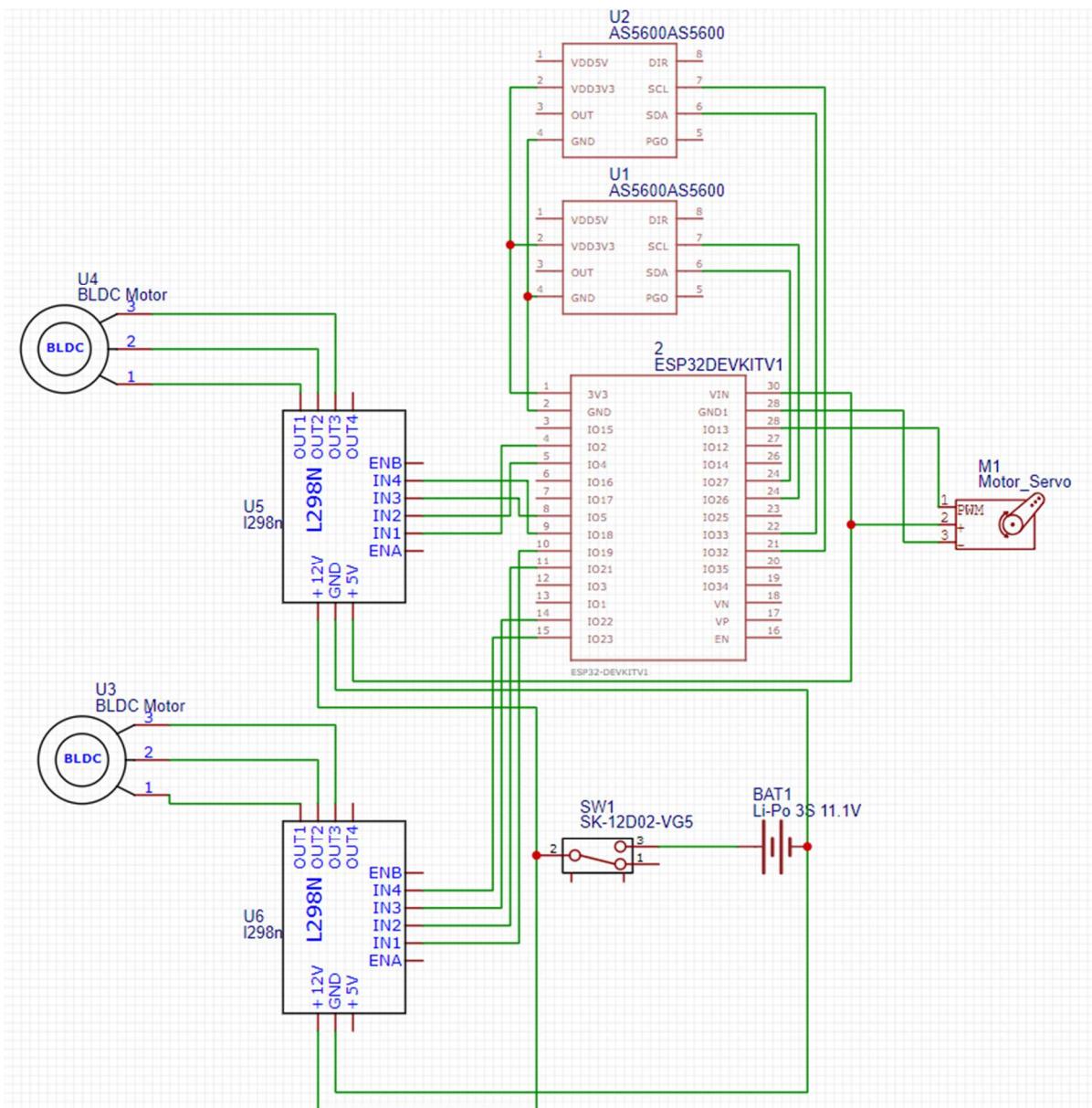
Podkładka pod sterownik (rys. 4.13) pozwala na odizolowanie sterownika od podłoża, co zapobiega zwarciu całego układu elektronicznego. Jest to jeden z najważniejszych elementów w projekcie, ponieważ pozwala na bezpieczną pracę i prowadzenie testów bez ryzyka zwarcia.



Rys. 4.13. Model 3D podkładki pod sterownik silnika

## 4.2. Część elektryczna

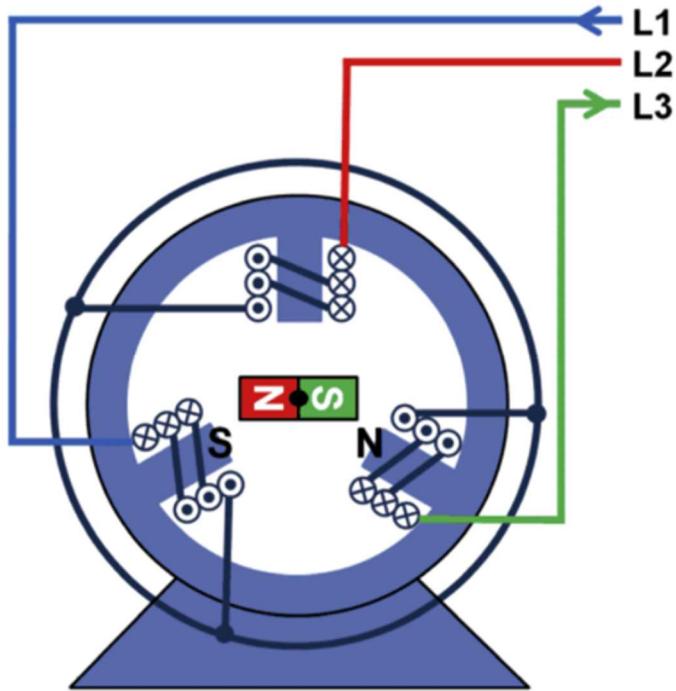
Do wyznaczenia zadanej trajektorii użyto dwóch silników BLDC. Silniki te są obsługiwane za pomocą mikrokontrolera ESP 32. Sterowanie prędkością silnika odbywa się poprzez sterowniki L298N. Do odczytywania rotacji użyto enkoderów magnetycznych firmy AMS. Jako zasilanie sterowników do silników użyto akumulatora Litowo-Polimerowego o trzech ogniwach. Dzięki temu zapewniono zasilanie 11,1 V. Zasilanie jednostki sterującej jest poprowadzone z wyjścia 5 V [12] z jednego ze sterowników L298N. Do przeprowadzanych testów weryfikacyjnych poprowadzono zasilanie z portu USB komputera, zamiast ze sterownika, co pozwoliło na komunikację po Serial Porcie ESP32 z komputerem. Na rysunku 4.14 przedstawiono kompletny schemat elektroniczny manipulatora SCARA, pozwalający na sterowanie robotem za pomocą smartfonu poprzez standard komunikacji krótkiego zasięgu Bluetooth.



Rys. 4.14. Schemat układu elektrycznego prototypu manipulatora SCARA parallel

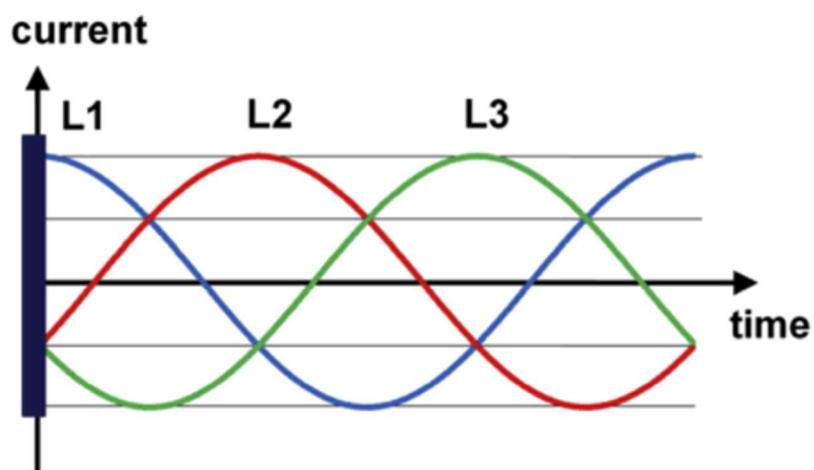
#### 4.2.1. Silniki bezszczotkowe

W prototypie manipulatora SCARA parallel użyto silników bezszczotkowych trójfazowych przeznaczonych do urządzeń stabilizacji obrazu typu Gimbal (rys. 4.15). Silniki te posiadają nieruchome cewki osadzone na statorze oraz magnesy osadzone wokół wirnika silnika. Istnieją także silniki bezszczotkowe, gdzie magnes znajdujący się na rotorze jest zamocowany wewnętrz trzpienia i cewki obracające rotorem za pomocą zmiennego pola magnetycznego są na zewnętrznej stronie silnika. Taka budowa jest najprostszą budową silnika bezszczotkowego.



Rys. 4.15. Ilustracja budowy silnika BLDC [13]

Jedną z zalet silników bezszczotkowych jest minimalizacja oporów ruchu pomiędzy rotorem a statorem. Silniki BLDC trójfazowe cechuje wysoka precyzaja oraz możliwość kontroli prędkości obrotowej niezależnej od momentu obrotowego silnika. Obrót silnika bezszczotkowego trójfazowego polega na podanie prądu zmiennego na każdą fazę silnika. Każda kolejna amplituda prądu podawanego na kolejną fazę silnika jest przesunięta o  $120^\circ$  aby obrót silnika był ruchem płynnym jednostajnym [13] (rys. 4.16).



Rys. 4.16. Ilustracja sterowania silnika bldc [13]

Do prototypu manipulatora SCARA parallel dobrano silniki BGM4108-130 firmy DYS (rys. 4.17). Dzięki ich kompaktowości oraz wystarczającym momencie obrotowym użyto ich jako napęd przekładni pasowej projektowanego robota. Jego parametry zestawiono w tabeli 4.2.



Rys. 4.17. Ilustracja silników BLDC DYS BGM4108-130 [14]

Tab. 4.2. Dane techniczne silnika DYS BGM4108-130 [14]

Silnik	Wartość
Ilość cewek	24
Ilość magnesów	22
Masa	90 g
Średnica trzpienia	4 mm
Średnica silnika	46 mm
Wysokość silnika	25 mm
Moment obrotowy	700 g/m @ 5V & 0,43 A

#### 4.2.2. Mikrokontroler

Jako układ sterujący robotem parallel SCARA dobrano moduł ESP32 (rys. 4.18). Moduł posiada zintegrowany moduł Wi-Fi jak i Bluetooth co powoduje przyjemną obsługę urządzenia podczas jego pracy. Jedną z zalet ESP32 jest rozległy przedział temperatury operacyjnej mieszczący się od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$  [15]. ESP32 cechuje się także niskim poborem prądu.



Rys. 4.18. Ilustracja mikrokontrolera ESP32 [16]

Do oprogramowania ESP32 użyto ESP32-DevKitC (rys. 4.19). Jest to podstawowa płytka rozwojowa należąca do serii ESP32, nadająca się idealnie do prototypowania. Dzięki swojej kompatybilności z Arduino oraz portem USB programowanie i testowanie jest bardzo wydajne. Wyjścia płytki ESP32-DevKitC są zoptymalizowane, aby umożliwić prototypowanie na płytce prototypowej. Urządzenie posiada 32 piny GPIO, w gdzie znajdują się między innymi UART, ADC, DAC, I2C [15], które mogą być używane zarówno jako wejście i wyjście.

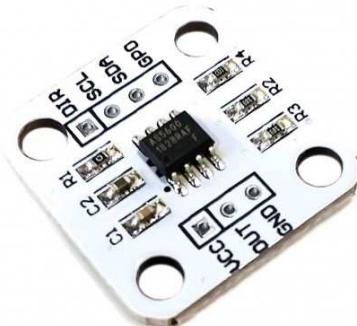


Rys. 4.19. Ilustracja płytki rozwojowej ESP32-DevKitC [17]

#### 4.2.3. Magnetyczny enkoder rotacji

Aby rozpoznać w jakim położeniu znajduje się aktualnie silnik BLDC potrzebny jest czujnik rotacji. Do prototypu manipulatora SCARA parallel dobrano enkoder AS5600 (rys. 4.20). Jest to produkt firmy AMS służący do odczytywania obrotu w pełnym zakresie  $360^\circ$  z 12-bitową rozdzielczością [18]. Do współpracy z czujnikiem wymagany jest magnes, który

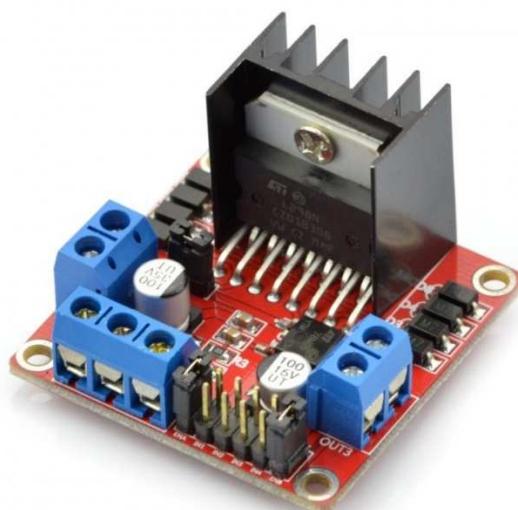
przymocowano na wierzch trzpienia stalowego ramienia robota. Czujnik odczytuje obrót ramienia, na podstawie zmiany pola magnetycznego obracającego się wraz z ramieniem magnesu. Ten rodzaj odczytywania kąta obrotu jest bezkontaktowy, także nie tworzą się dodatkowe opory ruchu pomiędzy silnikiem a enkoderem. Dane z AS5600 odczytano za pomocą dwukierunkowej magistrali szeregowej I<sup>2</sup>C.



Rys. 4.20. Ilustracja enkodera magnetycznego AS5600 [19]

#### 4.2.4. Sterownik silników BLDC

Jako sterownik silników BLDC dobrano moduł L298N (rys. 4.21). Jest to dwukanałowy sterownik silników prądu stałego pozwalający na pracę od 5 do 12 V przy maksymalnym prądzie wynoszącym 2 A [20]. Głównym przeznaczeniem sterownika jest sterowanie silnikami szczotkowymi DC, lecz dzięki możliwości kontroli każdego kanału osobno poprzez sygnał PWM, istnieje możliwość wykorzystania sterownika L298N do silników trój fazowych BLDC.



Rys. 4.21. Ilustracja sterownika L298N [20]

#### **4.2.5. Zasilanie układu napędowego**

Silniki BLCD współpracują z akumulatorami Litowo-Polimerowymi posiadającymi od 3 do 6 ogniw. Dobrany sterownik operuje napięciem od 5 V do 12 V [20]. Uwzględniając wspomniane parametry dobrano akumulator litowo-polimerowy firmy Tattu (rys. 4.22) 11,1 V posiadający 3 ogniska, każde po 3,7 V. Jego pojemność to 2300 mAh a prąd rozładowania: ciągły 45C [21].



Rys. 4.22. Ilustracja dobranego akumulatora Tattu [21]

#### **4.2.6. Serwomechanizm**

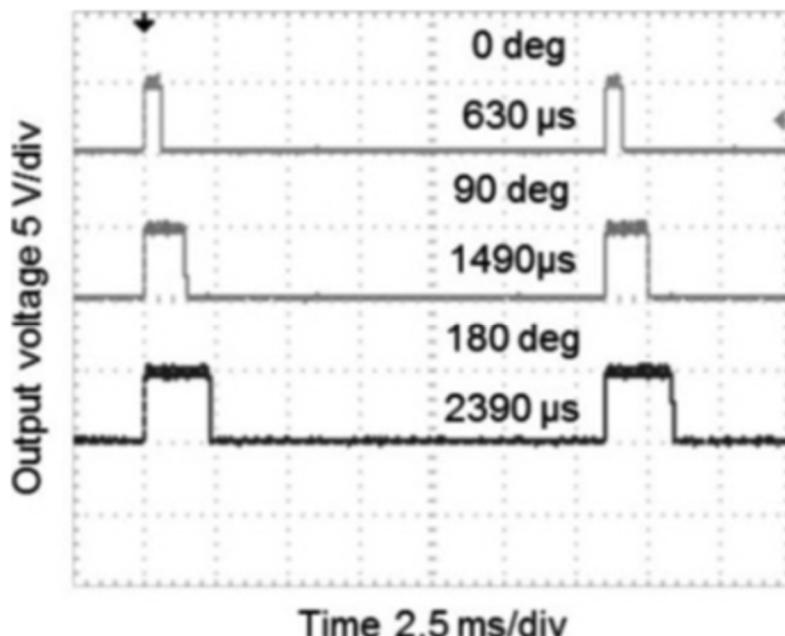
Realizacja osi pionowej Z prostopadłej do podłoża roboczego prototypu manipulatora SCARA parallel została wykonana za pomocą serwomechanizmu firmy ES-08MA II firmy EMAX (rys. 4.23). Serwomechanizm ten cechuje się dużym momentem obrotowym 1,6 kg/cm, dla 4,8 V [22] oraz wytrzymałością przy długotrwałej pracy pod obciążeniem, ze względu na zastosowanie metalowej przekładni w budowie komponentu. Zadaniem serwomechanizmu w projektowanym robocie jest kontrola pozycji narzędzia rysującego znajdującej się w centrum ogniska głowicy roboczej manipulatora.



Rys. 4.23. Ilustracja serwomechanizmu EMAX ES-08MA II [22]

Serwomechanizmy są sterowane poprzez sygnał PWM (Pulse Width Modulation). Do poprawnej pracy poza samym sygnałem należy doprowadzić zasilanie 4,8÷6 V [22] oraz zewrzeć masę (GND) serwomechanizmu z masą układu elektrycznego.

Pozycjonowanie serwomechanizmu poprzez sygnał PWM polega na modyfikacji czasu wypełnienia impulsu podawanego do serwomechanizmu. W zależności od wypełniania, czyli od czasu przez jaki jest utrzymywany stan wysoki, to o taki kąt, proporcjonalnie do skali impulsu, obróci się serwomechanizm(rys. 4.21) [23].



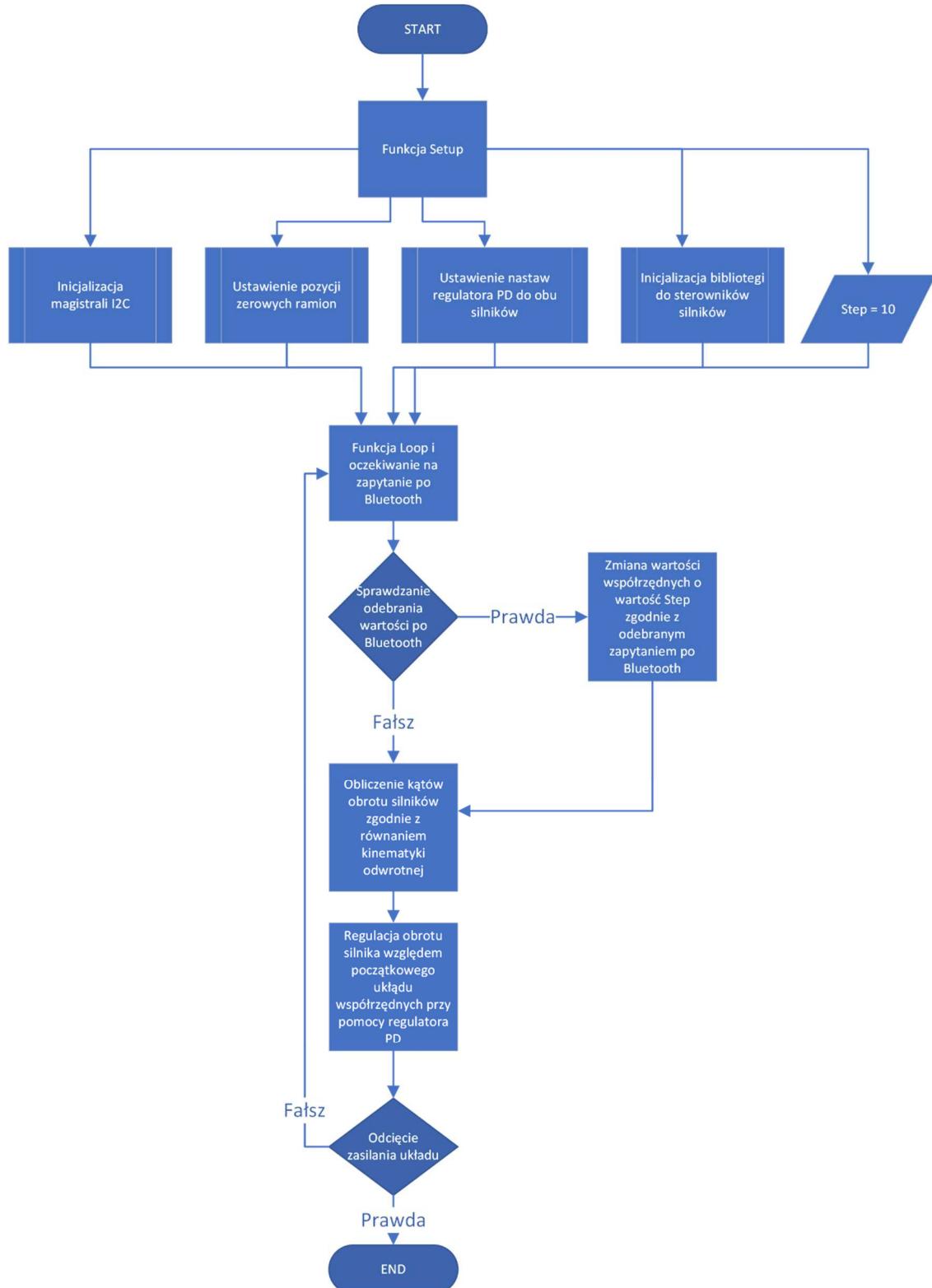
Rys. 4.24. Przykład doboru kąta serwomechanizmu w zależności od wypełnienia impulsu [23]

Powyżej zilustrowano przykład doboru kąta serwomechanizmu do długości trwania impulsu sygnału PWM. W omawianym przypadku kąt  $0^\circ$  jest osiągany dla czasu trwania impulsu wynoszącego  $630 \mu\text{s}$ , a kąt  $180^\circ$  jest ustawiany w przypadku podania sygnału PWM z wypełnieniem trwającym  $2390 \mu\text{s}$ .

### 4.3. Oprogramowanie

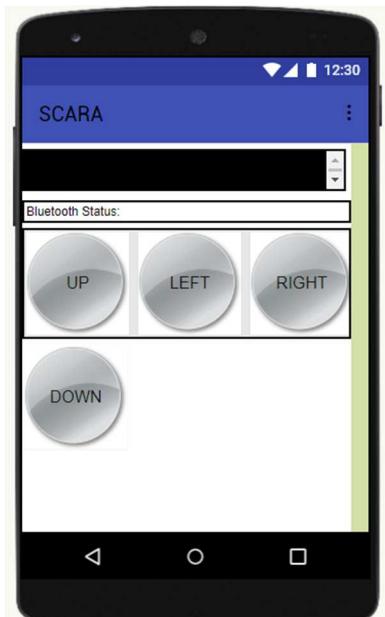
Program sterujący całym manipulatorem napisano w języku C++ przy użyciu środowiska Arduino. W programie użyto popularnych bibliotek do komunikacji po magistrali szeregowej I<sup>2</sup>C, komunikacji Bluetooth ze smartfonem, oraz biblioteki do sterowania silnikami BLDC za pomocą sterowników L298N. Kontrola obrotów silnikami odbywa się przy pomocy regulatora PD, który uwzględnia jednocześnie proporcjonalne odchylenie wartości zadanej i zmierzonej,

jak i prędkość obrotu silnika, co zostało zapisane jako różnicę zmierzonych wartości kątowych w czasie wykonywania programu. Do regulacji silnika pominięto człon całkujący, ponieważ siły poprzeczne działające na manipulator są stosunkowo małe, aby można było zastosować sam regulator proporcjonalno-różniczkujący.

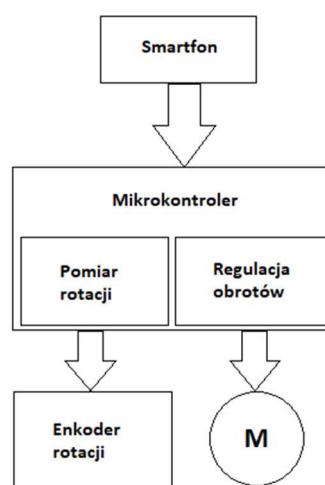


Rys. 4.25. Schemat blokowy programu obsługującego manipulator

Kontrola nad robotem odbywa się za pomocą aplikacji na telefon napisanej w programie MIT App Inventor (rys. 4.25). Do połączenia aplikacji z mikrokontrolerem należy najpierw wybrać z dostępnej listy sparowanych urządzeń ESP 32. Po połączeniu następuje ukazanie się ekranu widocznego na poniższej ilustracji. Aplikacja posiada 4 przyciski (rys. 4.26), służące do sterowania końcówką roboczą manipulatora SCARA w układzie kartezjańskim XY. Komunikacja aplikacji z układem sterowania manipulatora polega na przesyłanie słowa bitowego do ESP 32 (rys. 4.27). Na podstawie otrzymanej danej, manipulator zmienia w programie zadane współrzędne końcówki roboczej o konkretną wartość zapisaną w kodzie źródłowym oprogramowania.



Rys. 4.26. Widok ekranu głównego aplikacji do sterowania położeniem



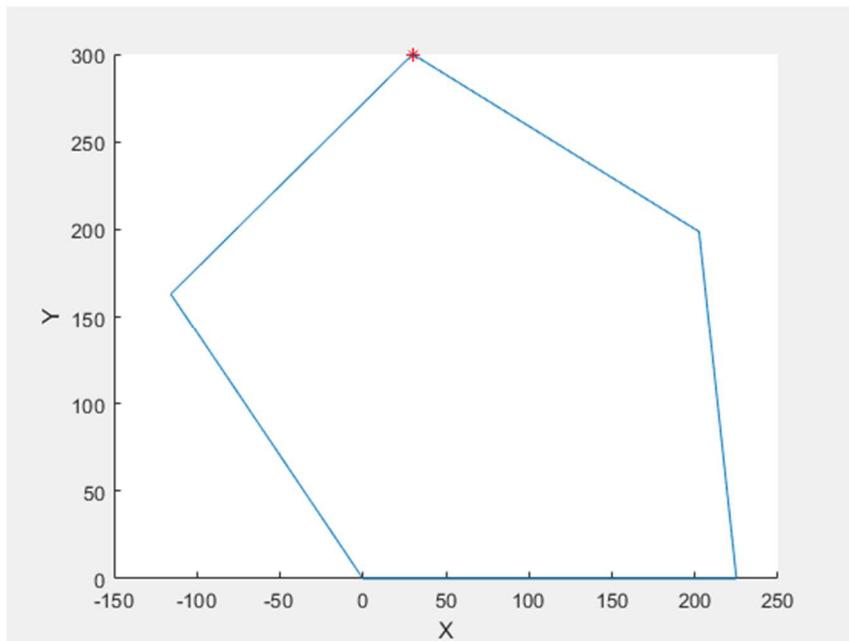
Rys. 4.27. Schemat ideowy sterowania silnikiem

## 5. Testy weryfikujące

Po skonstruowaniu całego manipulatora SCARA parallel, przeprowadzono testy weryfikujące poprawność ruchu oraz otrzymywania zadanej pozycje przez manipulator. Pierwszym z testów jaki przeprowadzono na robocie, był test poprawności obliczeń oraz kodu źródłowego. W tym celu napisano aplikację w programie MatLab, aby sprawdzić poprawność ułożenia ramion robota SCARA parallel dla zadanych punktów początkowych końcówki roboczej. W programie przyjęto długości ramion jako 200 mm oraz odległość między podstawami 225 mm.

### 5.1. Test poprawności obliczeń

W ramach testu przeprowadzono weryfikację obliczeń analitycznych kinematyki odwrotnej, stosując wizualizację numeryczną w programie MatLab. Test miał na celu sprawdzenie, czy dobrane kąty ramion są prawidłowe dla zadanego punktu w przestrzeni. W wynikach otrzymano wizualizację pozycji manipulatora, oraz sprawdzono poprawność na podstawie długości narysowanych na wykresie ramion. Z analizy wynikało, że każde czterech ramion posiadało 200 mm, czyli tak jak zostało przyjęte w założeniach konstrukcyjnych robota.



Rys. 5.1. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab

Wynik przeprowadzonego testu był pozytywny, co sugerowało o poprawności obliczeń analitycznych, zweryfikowanymi obliczeniami numerycznymi.

## **5.2. Test powtarzalności**

Ze względu na wysoką rozdzielcość magnetycznych enkoderów rotacji oraz precyzyjne sterowanie silnikami BLDC, osiągnięto wysoką powtarzalność układu. Manipulator wraca za każdym razem do pozycji zadanej z niedokładnością 2 mm. Test przeprowadzono w następujący sposób:

1. Ustawiono manipulator w zadanej pozycji początkowej (domyślnie jest to X: 30, Y: 300),
2. Wyłączono zasilanie sterowników silników,
3. Zmieniono ręcznie położenie końcówki roboczej manipulatora do innej pozycji niż domyślnie zadana,
4. Uruchomiono ponownie sterowniki silników, poprzez doprowadzenie źródła zasilania 11,1 V.

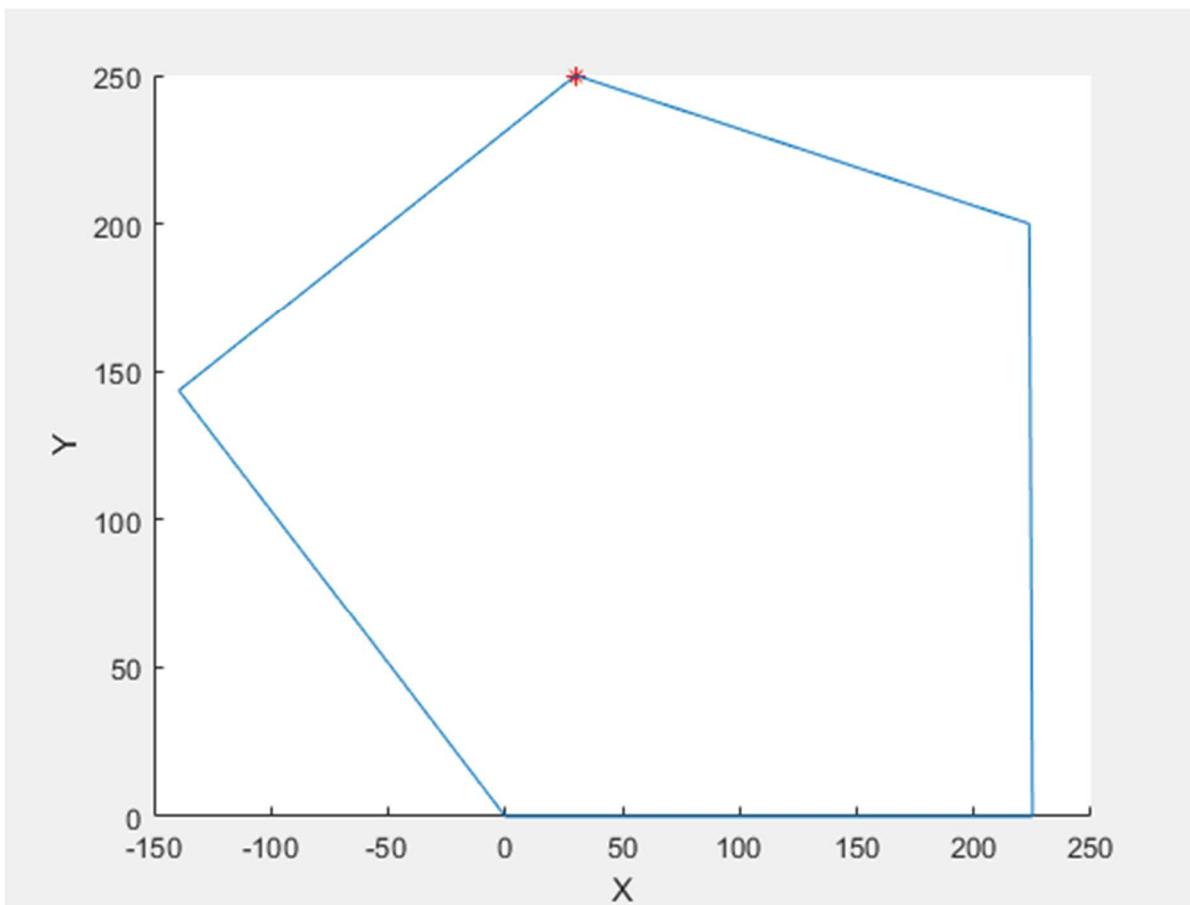
Z przeprowadzonego testu zaobserwowano średnie odchyłki 2 mm przy pracy testowej robota. W przypadku konstrukcji prototypu wykonanego na drukarce 3D (niedoskonałości modeli zależne od użytego materiału lub rozdzielcości drukarki) odchyłki te są akceptowalnym zakresie

## **5.3. Test dokładności**

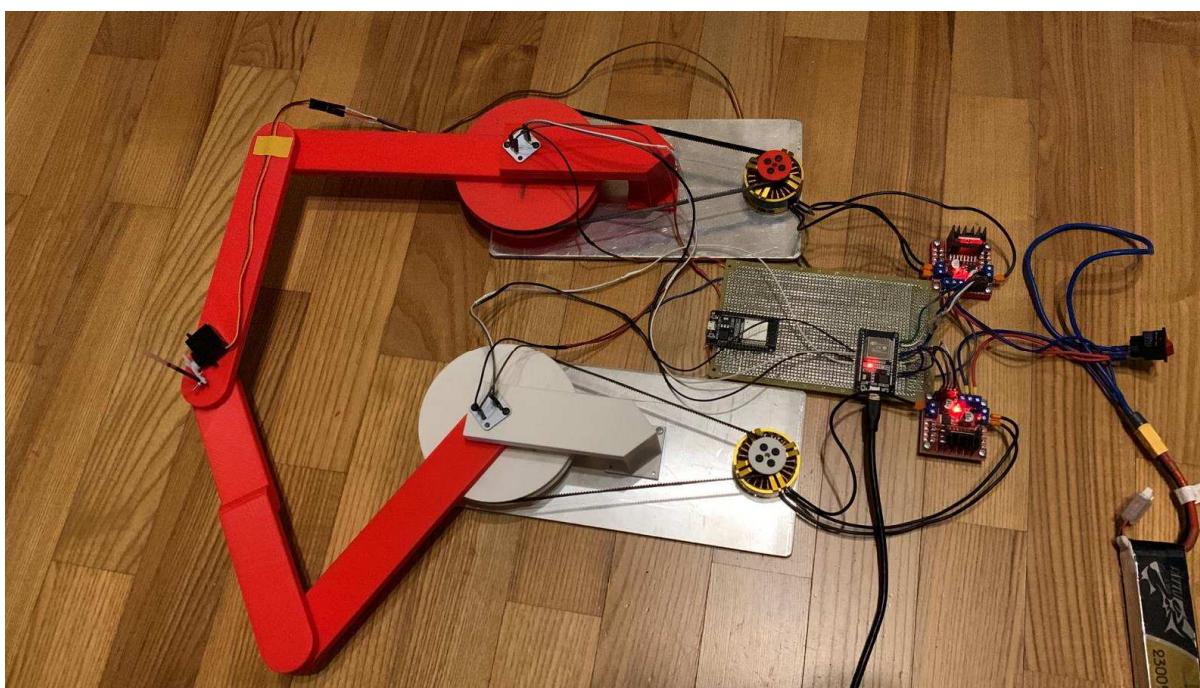
Dokładność manipulatora z kolei posiada odchyłki do 15 mm, co wynika z luzów pomiędzy ogniwami manipulatora, oraz materiału z jakiego jest wykonany cały stelaż manipulatora. Test przeprowadzono badając odchyłki położenia fizycznego punktu roboczego manipulatora, od zadanego punktu do otrzymania dla różnych danych wejściowych. Na dokładność ma ogromny wpływ precyzyjne ustawienie pozycji zerowej, co w przypadku tego konkretnego prototypu może posiada niedokładność nawet  $0,5^\circ$ .

Przykłady ustawienia ramion prototypu manipulatora SCARA parallel wykonanego w ramach pracy dyplomowej oraz przykłady ułożen teoretycznych wykonanych w programie MatLab zamieszczono na rysunkach 5.2÷5.9.

- Test ułożenia ramion dla X: 30 mm i Y: 250 mm

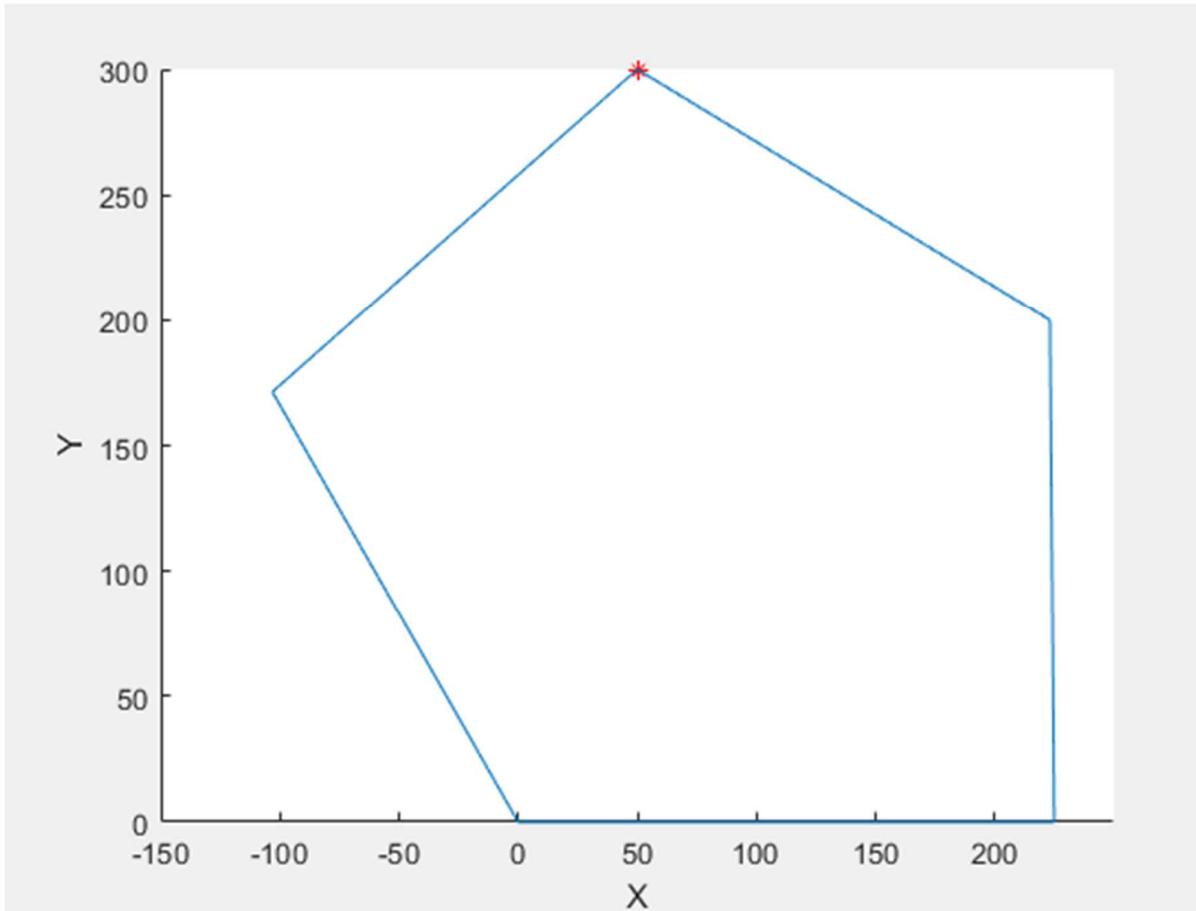


Rys. 5.2. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab

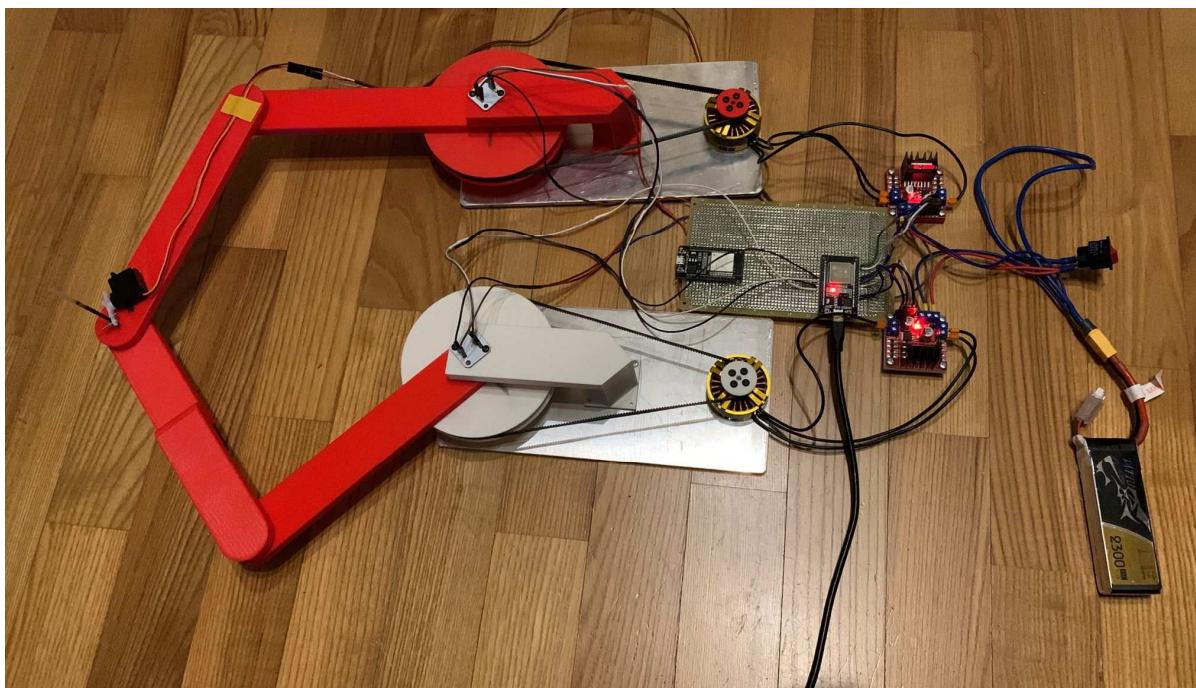


Rys. 5.3. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel

- Test ułożenia ramion dla X: 50 mm i Y: 300 m

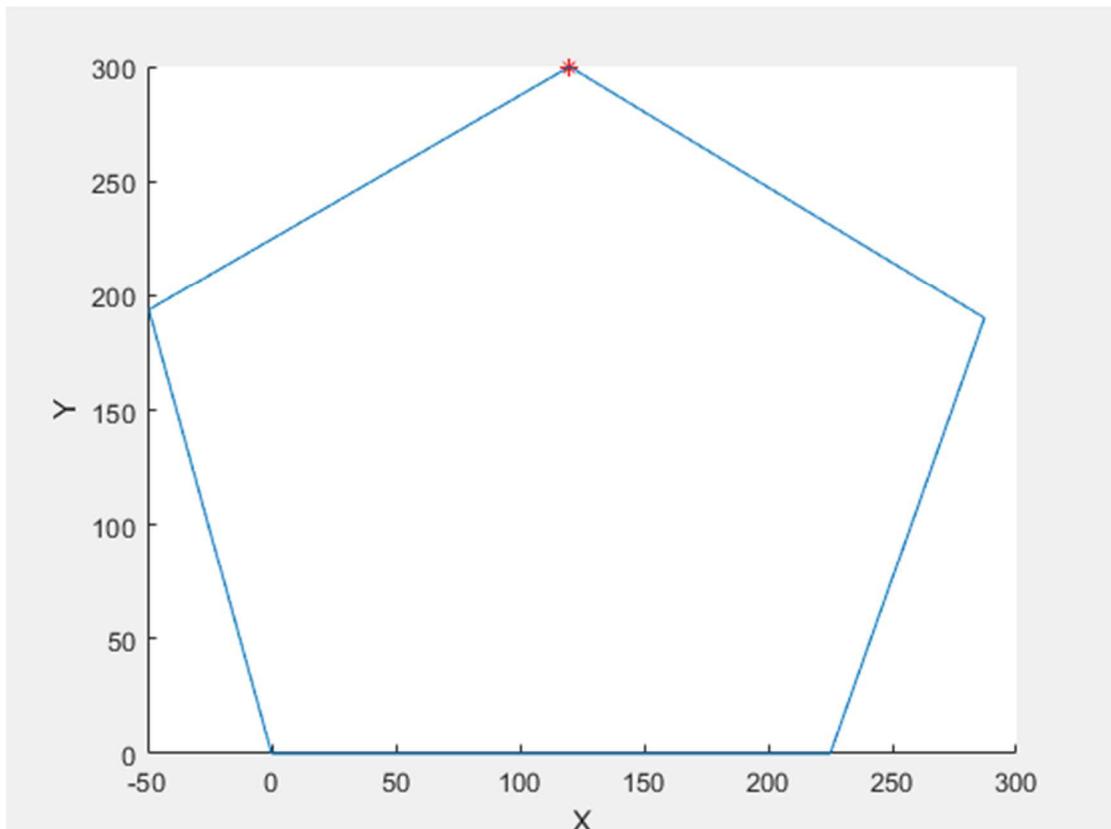


Rys. 5.4. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab

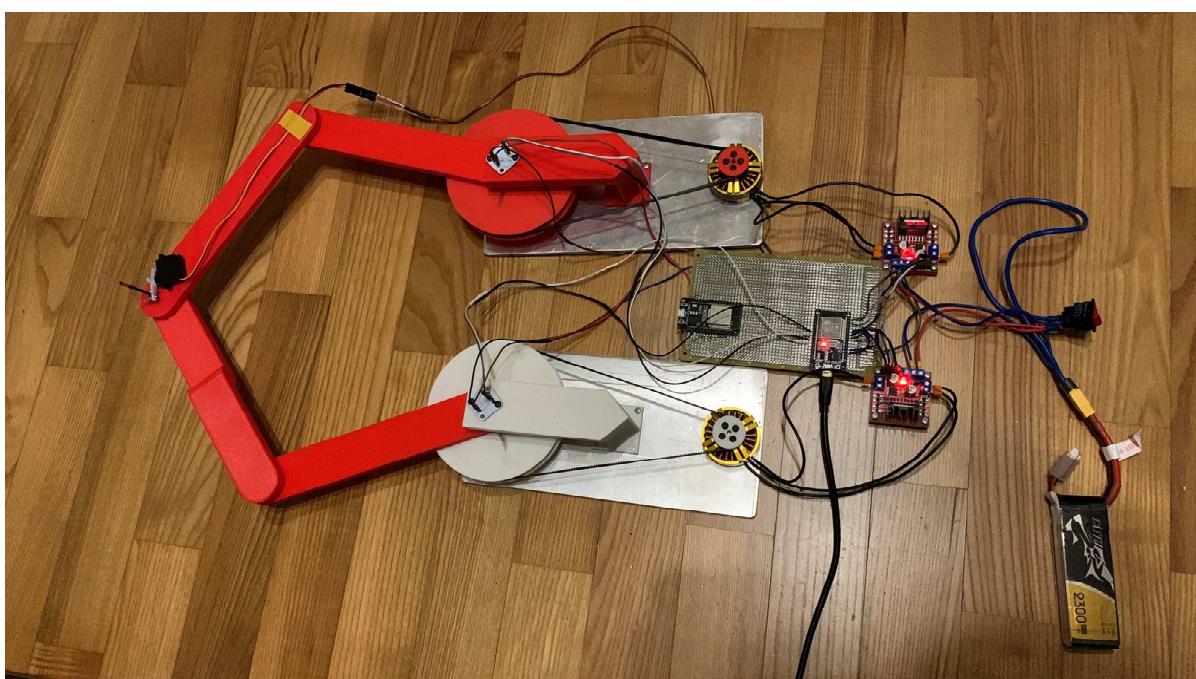


Rys. 5.5. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel

- Test ułożenia ramion dla X: 120 mm i Y: 300 mm

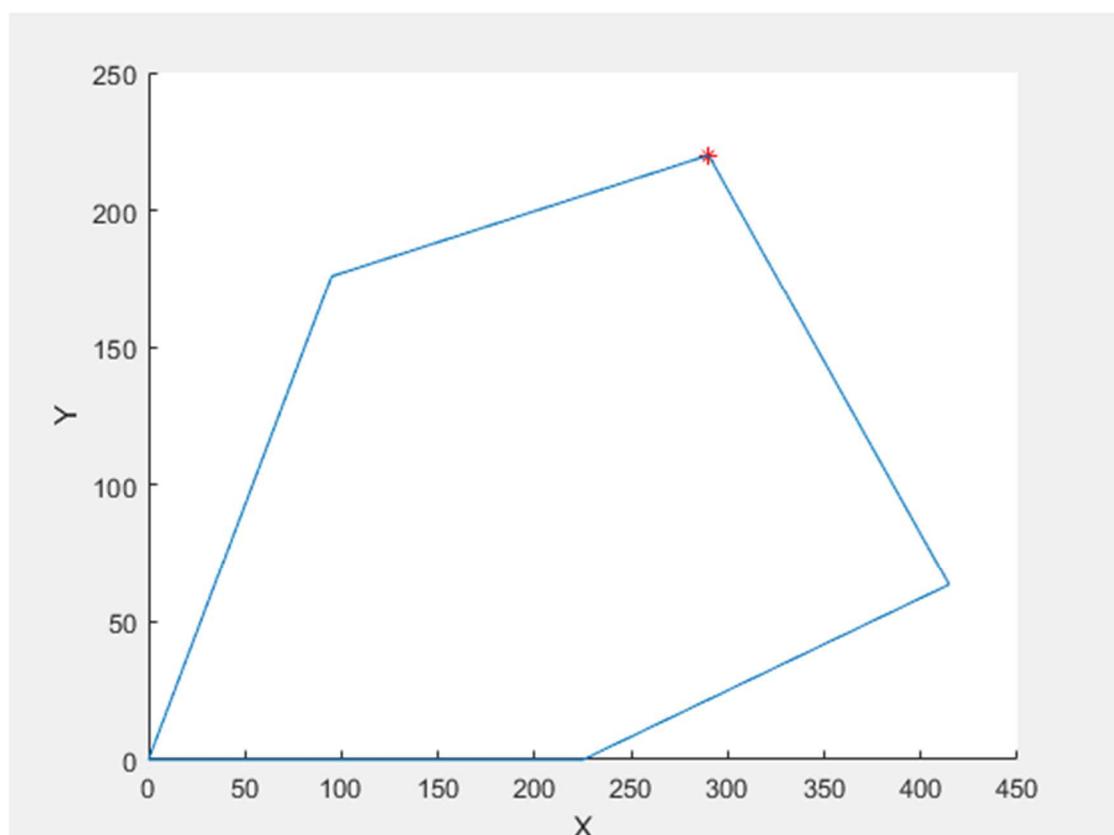


Rys. 5.6. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab

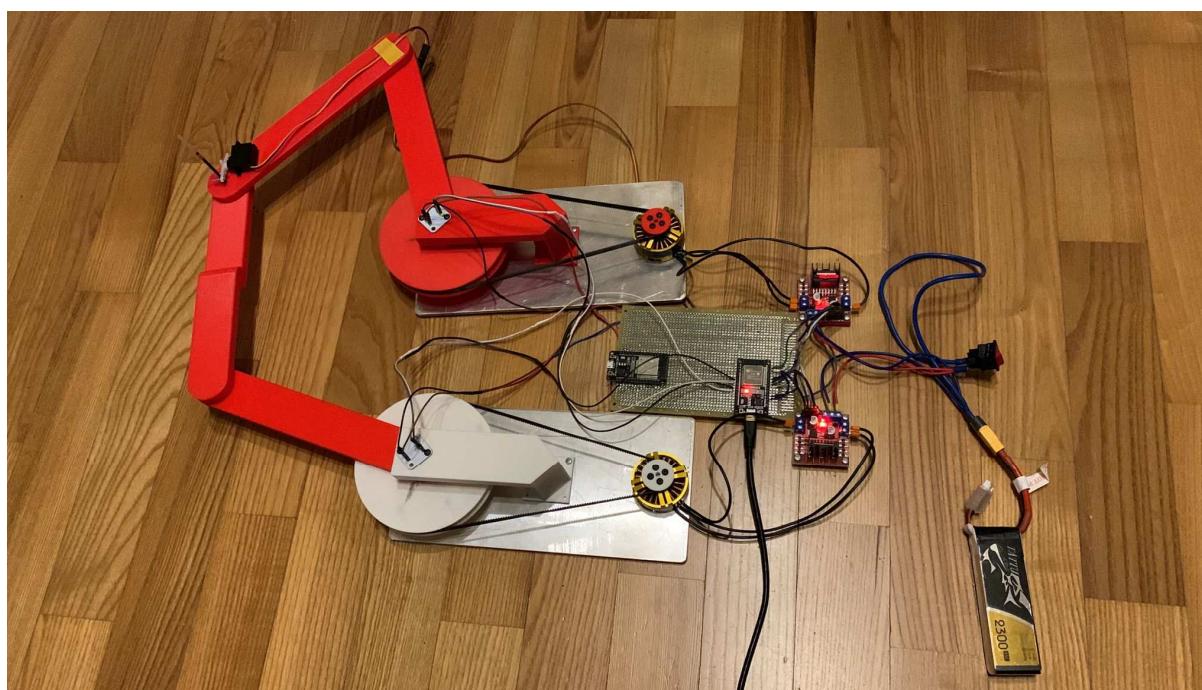


Rys. 5.7. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel

- Test ułożenia ramion dla X: 290 mm i Y: 220 mm



Rys. 5.8. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab



Rys. 5.9. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel

Dzięki stabilniejszej konstrukcji oraz mocowaniu podstaw manipulatora, a także idealnego ustawienia pozycji zerowej ramion, można zwiększyć znacząco dokładność prototypu manipulatora SCARA parallel.

#### **5.4. Podsumowanie**

Testy przeprowadzone w celu analizy powtarzalności prototypowanego manipulatora zakończyły się satysfakcyjnym rezultatem. Robot powracał do pozycji poprzednio mu zadanej z odchyleniem do 2 mm. Wysoka rozdzielcość magnetycznych enkoderów rotacji oraz niezwykła czułość silników pozwoliły na precyzyjne sterowanie manipulatorem. Z drugiej strony testy przeprowadzone na dokładność nie dały pozytywnego rezultatu. Brak automatycznej kalibracji urządzenia przy każdym uruchomieniu, oraz luźne ustawienie rozstawu podstaw manipulatora sprawiły że niedokładność otrzymania zadanej pozycji przez prototyp manipulatora SCARA parallel wynosiła nawet do 15mm.

## **6. Podsumowanie**

Celem pracy dyplomowej jest opracowanie prototypu 3-osiowego manipulatora SCARA pracującego w układzie kinematycznym XYZ, przy założeniu, że ramiona w osiach X oraz Y będą powodować przemieszczenie głowicy roboczej, a w osi Z przewidziano ruch narzędzi rysującego (w osi pionowej) z wykorzystaniem serwomechanizmu.

W toku pracy dyplomowej zaprojektowano komponenty potrzebne do zbudowania gotowego prototypu manipulatora, dobrano niezbędne części elektroniczne niezbędne do prawidłowego funkcjonowania robota oraz oprogramowano układ sterujący manipulatorem SCARA parallel przy pomocy powszechnie dostępnych bibliotek. Podczas realizacji projektu rozwiązyano następujące problemy, takie jak np.: problem sterowania silnikiem BLDC przy użyciu różnego rodzaju sterowników, regulacji nastaw regulatora PD, aby manipulator nie wpadał w oscylacje, a sprawnie zmieniał położenie końcówki roboczej zgodnie z zadanimi parametrami przez użytkownika.

Przeprowadzone testy weryfikujące potwierdziły, że skonstruowany manipulator posiada założone funkcjonalności, osiągnięta została powtarzalność na zadowalającym poziomie.

W dalszym rozwoju pracy przewidziano usztywnienie podstaw manipulatora SCARA. Dzięki tej modyfikacji będzie możliwe zrealizowanie automatycznego kalibrowania robota przy każdym ponownym uruchomieniu. Przewidziano także usztywnienie ramion manipulatora, w celu poprawienia dokładności, co pozwoli na implementację nowego programu sterowania robotem. Istnieje możliwość zaprojektowania i napisania aplikacji komputerowej w języku C++ zajmującej się obsługą robota. W programie uwzględniono możliwość sterowania ręcznego, sterowania poprzez zadanie konkretnej pozycji, oraz funkcja plotera, gdzie zadaniem robota byłoby naszkicować rysunek zaprojektowany w programie AutoCAD.

## Bibliografia

- [1] Robotics, Computer Simulations for. John M. Hollerbach, in Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 2003
- [2] Wykład Podstawy Robotyki. dr inż. Mieczysław Zaczek Dostępny:  
[https://home.agh.edu.pl/~zaczek/Podstawy\\_robota/Pods\\_rob\\_2019\\_cz1.pdf](https://home.agh.edu.pl/~zaczek/Podstawy_robota/Pods_rob_2019_cz1.pdf) (Dostęp: 16.01.2022r.)
- [3] Bezpieczna obsługa oraz praca robota na stanowisku przemysłowym. Dr inż. Tomasz Buratowski
- [4] Robotics. Autorzy: Appu K. K. Kutta Wydawnictwo: I.K. International
- [5] Klasyfikacja i systematyzacja robotów Dostępny: [http://e-learning.prz.edu.pl/pluginfile.php/94599/mod\\_resource/content/1/W4.pdf](http://e-learning.prz.edu.pl/pluginfile.php/94599/mod_resource/content/1/W4.pdf) (Dostęp: 18.01.2022)
- [6] Robotics and Control Autorzy: R. K. Mittal, I. J. Nagrath
- [7] Roboty i manipulatory. Autor: Damian Żabicki 30 września 2020 r.
- [8] <https://www.fanuc.eu/pl/pl/roboty/robot-strona-filtrowania/scara-series> (Dostęp: 16.01.2022)
- [9] <https://www.kuka.com/pl-pl/produkty-i-us%C5%82ugi/systemy-robot%C3%B3w/roboty-przemys%C5%82owe/kr-scara> (Dostęp: 16.01.2022)
- [10] <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/industrial-robots/4-axis-scara-robots/> (Dostęp: 16.01.2022)
- [11] <https://wobit.com.pl/produkty/1387/roboty-przemyslowe-scara/> (Dostęp: 16.01.2022)
- [12] <https://www.espressif.com/en/products/devkits/esp32-devkitc> (Dostęp 18.01.2022)
- [13] Brushless Motors and Controllers Autor: Roland Büchi, 2012
- [14] <http://www.dys.hk/product/BGM4108-130.html> (Dostęp: 18.01.2022)
- [15] [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf) (Dostęp: 18.01.2022)
- [16] <https://www.digikey.pl/pl/products/detail/espressif-systems/ESP32-WROOM-32-8MB/9381728> (Dostęp: 18.01.2022)
- [17] <https://botland.com.pl/moduly-wifi-i-bt-esp32/8893-esp32-wifi-bt-42-platforma-z-modulem-esp-wroom-32-zgodny-z-esp32-devkit-5904422337438.html> (Dostęp: 18.01.2022)
- [18] <https://ams.com/en/as5600> (Dostęp: 18.01.2022)
- [19] <https://kamami.pl/enkodery/580650-modul-enkodera-magnetycznego-z-ukladem-as5600.html> (Dostęp: 18.01.2022)
- [20] <https://botland.com.pl/sterowniki-silnikow-moduly/3164-l298n-dwukanalowy-sterownik-silnikow-modul-12v-2a-5904422359317.html> (Dostęp: 18.01.2022)
- [21] <https://rc.susco.pl/p/24/11089/akumulator-tattu-2300mah-11-1v-45c-3s1p-gens-ace-tattu-akumulatory.html> (Dostęp: 18.01.2022)

[22] <https://www.gammodel.pl/serwo-emax-es-08ma-ii-12g-2-0kgcm-p-408.html> (Dostęp: 18.01.2022)

[23] Interdisciplinary Mechatronics: Engineering Science and Research Development

Autorzy: M. K. Habib, J. Paulo Davim

## Spis rysunków

Rys. 2.1. Konfiguracja manipulatora kartezańskiego [5].....	8
Rys. 2.2. Główna przestrzeń robocza manipulatora kartezańskiego [3] .....	8
Rys. 2.3. Konfiguracja manipulatora cylindrycznego [5] .....	9
Rys. 2.4. Główna przestrzeń robocza manipulatora cylindrycznego [3].....	9
Rys. 2.5. Konfiguracja manipulatora sferycznego [5].....	10
Rys. 2.6. Główna przestrzeń robocza manipulatora sferycznego [3].....	10
Rys. 2.7. Konfiguracja manipulatora antropomorficznego [5] .....	11
Rys. 2.8. Główna przestrzeń robocza manipulatora stawowego [3] .....	11
Rys. 2.9. Konfiguracja manipulatora typu SCARA [5] .....	12
Rys. 2.10. Główna przestrzeń robocza manipulatora typu SCARA [3].....	12
Rys. 2.11. Manipulator SCARA firmy Fanuc [8] .....	13
Rys. 2.12. Manipulator SCARA firmy Kuka [9] .....	14
Rys. 2.13. Manipulator SCARA firmy Stäubli [10].....	15
Rys. 2.14. Manipulator SCARA firmy WObit [11] .....	15
Rys. 3.1. Schemat kinematyczny manipulatora SCARA parallel .....	17
Rys. 4.1. Zdjęcie prototypu manipulatora SCARA parallel.....	21
Rys. 4.2. Model 3D jednej z dwóch podstaw manipulatora SCARA parallel .....	22
Rys. 4.3. Model 3D podstawy manipulatora .....	23
Rys. 4.4. Model 3D trzpienia .....	24
Rys. 4.5. Model 3D koła zębatego napędowego .....	25
Rys. 4.6. Model 3D stelażu podtrzymującego .....	25
Rys. 4.7. Model 3D koła zębnego napędzanego .....	26
Rys. 4.8. Model 3D ramię 1 i 4 manipulatora SCARA.....	26
Rys. 4.9. Model 3D ramię 2 manipulatora SCARA.....	27
Rys. 4.10. Model 3D ramię 3 manipulatora SCARA.....	27
Rys. 4.11. Model 3D koszyka na łożysko .....	28
Rys. 4.12. Model 3D koszyka na łożysko .....	28
Rys. 4.13. Model 3D podkładki pod sterownik silnika.....	29
Rys. 4.14. Schemat układu elektrycznego prototypu manipulatora SCARA parallel.....	30
Rys. 4.15. Ilustracja budowy silnika BLDC [13] .....	31
Rys. 4.16. Ilustracja sterowania silnika bldc [13] .....	31
Rys. 4.17. Ilustracja silników BLDC DYS BGM4108-130 [14] .....	32
Rys. 4.18. Ilustracja mikrokontrolera ESP32 [16] .....	33
Rys. 4.19. Ilustracja płytki rozwojowej ESP32-DevKitC [17] .....	33
Rys. 4.20. Ilustracja enkodera magnetycznego AS5600 [19] .....	34
Rys. 4.21. Ilustracja sterownika L298N [20] .....	34
Rys. 4.22. Ilustracja dobranego akumulatora Tattu [21] .....	35
Rys. 4.23. Ilustracja serwomechanizmu EMAX ES-08MA II [22] .....	35
Rys. 4.24. Przykład doboru kąta serwomechanizmu w zależności od wypełnienia impulsu [23] .....	36
Rys. 4.25. Schemat blokowy programu obsługującego manipulator .....	37
Rys. 4.26. Widok ekranu głównego aplikacji do sterowania położeniem .....	38
Rys. 4.27. Schemat ideowy sterowania silnikiem .....	38
Rys. 5.1. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab .....	39
Rys. 5.2. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab .....	41
Rys. 5.3. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel .....	41

Rys. 5.4. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab .....	42
Rys. 5.5. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel .....	42
Rys. 5.6. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab .....	43
Rys. 5.7. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel .....	43
Rys. 5.8. Wizualizacja kątów nachylenia ramion robota w programie MatLab .....	44
Rys. 5.9. Fotografia wykonanego manipulatora SCARA parallel .....	44

## **Spis tabel**

Tab. 4.1. Spis części mechanicznych manipulatora .....	22
Tab. 4.2. Dane techniczne silnika DYS BGM4108-130 [14] .....	32

## **Spis załączników**

1. Film demonstracyjny (SCARA.mp4).
2. Kod źródłowy aplikacji mobilnej MIT App Inventor (SCARA\_controll.aia).
3. Kod źródłowy sterujący manipulatorem SCARA (SCARA\_manipulator.zip).
4. Zaprojektowane części mechaniczne (SCARA\_czesci.zip).
5. Schemat elektryczny(SCARA\_schemat.pdf).