Dokumentacja Techniczna Systemu Mechatronicznego „PARALEL ROBOT”

Danylo Chetvartkov,Nikita Tolstoi,Volodymr Vyshivetskiy,

Zakhar Seminkievicz,Yehor Maksymenko

1. Cel i zakres dokumentu

Niniejszy dokument przedstawia kompleksową specyfikację projektową, materiałową oraz programistyczną robota równoległego (tzw. Parallel Robot). Dokument obejmuje:

- **charakterystykę konstrukcyjną**,
- **parametry materiałowe**,
- **specyfikację układów wykonawczych i sensorycznych**,
- **architekturę sterowania**,
- **opis implementacji oprogramowania sterującego w Pythonie**,
- **komunikację z modułami peryferyjnymi**,
- **algorytmy kinematyczne i sterowania**,
- **fragmenty kodu operacyjnego**.

Robot docelowo wykonuje zadania lokomocji (chodzenie w trybie pseudo-kroczącym), manipulacji (podnoszenie ramienia/uchwytu), interakcji z użytkownikiem (wyświetlacz LCD/OLED), oraz autonomicznego reagowania na czujniki.

2. Charakterystyka ogólna systemu PARALLEL ROBOT

2.1. Opis ogólny

PARALEL ROBOT jest hybrydowym urządzeniem mechatronicznym wykorzystującym równoległą architekturę napędową — zestaw siłowników połączonych w konfiguracji Delta/Stewart lite, umożliwiający precyzyjne sterowanie orientacją platformy mobilnej. Jego konstrukcja została zoptymalizowana pod kątem:

- wysokiej dynamiki,
- minimalizacji masy własnej,
- maksymalnej sztywności,
- modularności podzespołów,
- niskich oporów kinematycznych.

3. Materiały i komponenty

3.1. Struktura nośna

Materiały wymagane dla elementów konstrukcyjnych:

Element	Materiał	Uzasadnienie
Ramy podstawowe	Aluminium 6061-T6	Wysoka sztywność, niska masa, podatność na obróbkę CNC
Precyzyjne łączniki	Stal nierdzewna AISI 304	Odporność na korozję, stabilność wymiarowa
Przeguby kulowe	Sferyczne łożyska teflonowe (PTFE)	Minimalne tarcie ślizgowe
Platforma mobilna	Kompozyt CFRP (carbon)	Minimalna waga przy dużej wytrzymałości
Elementy tłumiące	Guma EPDM / poliuretan	Redukcja wibracji przy ruchach dynamicznych

////**do sprawdzenia**

4. Układy wykonawcze

4.1. Serwomechanizmy

Rekomendowane serwa klasy przemysłowej:

- **Dynamixel XM430-W350** – dwukierunkowa komunikacja, duży moment, sterowanie prądowe i pozycyjne.
- Alternatywnie: **MG996R** do wersji edukacyjnych.

Parametry:

- Moment nominalny: **4–6 Nm**
- Prędkość: **40–60 RPM**
- Rozdzielczość: **4096 kroków/obrót**

// **do zmiany**

---

5. Układy sensoryczne

5.1. Czujniki pozycji

- Enkodery absolutne do osi serw: **AS5600**

- IMU 9-osiowa: **MPU-9250**

5.2. Czujniki kontaktowe

- Mikroprzełączniki krańcowe
- Czujniki nacisku FSR dla imitacji „stóp”

5.3. Moduł wizualny

- Wyświetlacz **OLED 1.3” SSD1306**
- Komunikacja: I2C

6. Architektura oprogramowania

6.1. Ogólny diagram modułów

Program sterujący w Pythonie składa się z warstw:

1. **HAL (Hardware Abstraction Layer)** – obsługa niskopoziomowa
2. **Kinematyka** – przekształcenia odwrotne i proste
3. **Sterowanie ruchu** – generacja trajektorii
4. **Warstwa decyzyjna (Behavior Layer)** – chodzenie, balans, manipulacja
5. **UI/UX Layer** – integracja z wyświetlaczem OLED

6.2. Wybrane biblioteki Python

- **pyserial** – komunikacja z kontrolerami Dynamixel/Arduino
- **numpy** – obliczenia macierzy i kinematyki
- **scipy.spatial.transform** – kwaterniony, rotacje 3D
- **adafruit_ssd1306** – sterowanie OLED
- **time, math** – operacje pomocnicze
- **pyfirmata / dynamixel_sdk** – protokoły serw

7. Kinematyka robota równoległego

7.1. Kinematyka odwrotna (IK)

Oparta o równania transformacji:

$$\vec{p} = R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \vec{d} + \vec{t}$$

Każdy siłownik musi spełnić:

$$L_i = \| \vec{p} - \vec{b}_i \|$$

gdzie:

- $\vec{p}$– pozycja platformy,
- $\vec{b}_i$– punkty bazowe,
- L_i– długość/pozycja wymagana siłownika.

8. Zrobienia wykresow na monitorze

```
import sys
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QWidget, QVBoxLayout
from PyQt5.QtGui import QPainter, QColor, QPolygon, QPen
from PyQt5.QtCore import Qt, QPoint


class Shape:
    def init(self, x, y, size, color, shape_type):
        self.x = x
        self.y = y
        self.size = size
        self.color = color
        self.shape_type = shape_type
        self.selected = False
        self.angle = 0  # поточний кут обертання (в градусах)


class DrawingWidget(QWidget):
```

```
def init(self):
    super().init()

    # Початкові фігури
    self.shapes = [
        Shape(150, 150, 50, QColor(0, 120, 255), "circle"),
        Shape(400, 150, 50, QColor(0, 255, 100), "square"),
        Shape(250, 320, 60, QColor(255, 180, 0), "triangle")
    ]

    self.active_shape = None
    self.last_x = None  # попередня X-позиція миші для обертання

def contains(self, shape, px, py):
    return (shape.x - shape.size < px < shape.x + shape.size and
            shape.y - shape.size < py < shape.y + shape.size)

def mousePressEvent(self, event):
    x, y = event.x(), event.y()

    self.active_shape = None
    for s in self.shapes:
        s.selected = False



    for shape in reversed(self.shapes):
        if self.contains(shape, x, y):
            shape.selected = True
            self.active_shape = shape
            self.last_x = x
```

```
            print(f"[SELECT] {shape.shape_type} at X={shape.x}, Y={shape.y},
angle={shape.angle:.1f}")
            break

    self.update()

  def mouseMoveEvent(self, event):
    if not (event.buttons() & Qt.LeftButton):
      return

    if self.active_shape is None:
      return

    x = event.x()

    if self.last_x is None:
      self.last_x = x
      return

    dx = x - self.last_x  # ruch prawo/lewo
    self.last_x = x

    # 1 pixel = 1 stopien
    self.active_shape.angle += dx

    print(f"[ROTATE] {self.active_shape.shape_type}:
angle={self.active_shape.angle:.1f} (dx={dx})")

    self.update()
```

```
def mouseReleaseEvent(self, event):
    self.last_x = None
    self.active_shape = None

def paintEvent(self, event):
    painter = QPainter(self)

    for shape in self.shapes:
        painter.save()
        painter.translate(shape.x, shape.y)
        painter.rotate(shape.angle)
        painter.setBrush(shape.color)

        if shape.shape_type == "circle":
            painter.drawEllipse(-shape.size, -shape.size,
                                shape.size * 2, shape.size * 2)

        elif shape.shape_type == "square":
            painter.drawRect(-shape.size, -shape.size,
                             shape.size * 2, shape.size * 2)

        elif shape.shape_type == "triangle":
            half = shape.size
            polygon = QPolygon([
                QPoint(0, -half),
                QPoint(-half, half),
                QPoint(half, half)
            ])
            painter.drawPolygon(polygon)
```

```
        painter.restore()

        if shape.selected:
            painter.setPen(QPen(QColor(255, 0, 0), 4))
            painter.setBrush(Qt.NoBrush)
            painter.drawEllipse(shape.x - shape.size - 10,
                                shape.y - shape.size - 10,
                                (shape.size + 10) * 2,
                                (shape.size + 10) * 2)
            painter.setPen(Qt.NoPen)


class MainWindow(QWidget):
    def init(self):
        super().init()
        self.setWindowTitle("Touch Shape Rotation (Jetson Nano)")
        self.resize(800, 480)
```

9. Przemieszczanie obiektu

---

1. Przemieszczanie Obiektu (Move / Drag)
Gest służący do przeciągania obiektu w nowe miejsce. Składa się z dwóch wyraźnych faz oddzielonych pauzą:

Faza 1: Wybór (Select):

- **Działanie: Nacisnąć na obiekt i puścić (tap).**
- **Funkcja: Rejestruje rozpoczęcie zaznaczania/przemieszczania.**

Faza 2: Chwyt i Przeciąganie (Grab & Drag):

- **Działanie: Ponownie nacisnąć, przytrzymać dłużej i rozpocząć prowadzenie rysika po linii prostej do docelowej współrzędnej.**
- **Funkcja: Przemieszcza zaznaczony obiekt po ekranie.**

---

2. Obrót Obiektu (Rotate Left / Right)
Unikalny gest wykorzystujący poziomy ruch liniowy do określenia kierunku obrotu.

Działanie robota:

- **Nacisnąć i długo przytrzymać rysik.**
- **Podczas przytrzymania:**
    - **Ruch w PRAWO: inicjuje obrót zgodnie z ruchem wskazówek zegara.**
    - **Ruch w LEWO: inicjuje obrót przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.**

Funkcja: Obraca zaznaczony obiekt wokół jego środka.

---

3. Usuwanie Obiektu (Triple-Tap Delete)
Specjalny gest usuwania oparty na rytmie dotknięć.

Działanie robota: Należy wykonać trzy kolejne dotknięcia obiektu.
Warunek: Wszystkie trzy dotknięcia muszą nastąpić w określonym czasie (np. w ciągu 4 sekund).

Funkcja: Usuwa zaznaczony obiekt z interfejsu.

Poniżej przygotowałem **rozszerzoną dokumentację projektu**, dopasowaną stylem i językiem do Twojego obecnego pliku „Dokumentacja Techniczna Systemu Mechatronicznego PARALLEL ROBOT”.
Sekcja opisuje **metody pracy zespołu, zasady prowadzenia projektu, strukturę repozytorium, workflow programistyczny i proces testów**.

Możesz wkleić to jako **rozdział 10** lub jako osobny dział „Metodyka pracy”.

---

10. Metodyka pracy nad projektem

10.1. Organizacja zespołu projektowego

Zespół projektowy składa się z pięciu członków:
Danylo Chetvartkov, Nikita Tolstoi, Volodymyr Vyshivetskiy, Zakhar Seminkievicz, Yehor Maksymenko.

Każda osoba pełni określoną rolę funkcjonalną:

Członek zespołu	Odpowiedzialność główna	Zadania szczegółowe
Danylo Chetvartkov	Architektura systemu, elektronika	Schematy PCB, integracja sensorów, protokoły komunikacyjne
Nikita Tolstoi	Oprogramowanie Python, interfejs graficzny	Implementacja GUI, gesty dotykowe, biblioteki graficzne
Volodymyr Vyshnovetskiy	Mechanika, konstrukcja 3D	Modelowanie CAD, analiza wytrzymałościowa, montaż
Zakhar Semiankievich	Algorytmy sterowania i kinematyka	IK/FK, trajektorie, optymalizacja
Yehor Maksymenko	Testy, dokumentacja, integracja końcowa	Walidacja ruchów, scenariusze testowe, raporty

---

10.2. Cykl realizacji projektu (Workflow)

Prace przebiegają w powtarzalnych iteracjach trwających 1–2 tygodnie, zgodnie z uproszczoną metodyką **Agile / Scrum**.

Każda iteracja składa się z etapów:

1. **Planowanie sprintu**
    - Określenie listy funkcji do wykonania (Backlog).
    - Przydział zadań do członków zespołu.
2. **Projektowanie i implementacja**
    - Tworzenie kodu, części CAD, schematów elektronicznych.
    - Przegląd zmian (peer-review).
3. **Integracja**
    - Łączenie modułów mechanicznych z elektroniką i oprogramowaniem.
4. **Testy funkcjonalne i pomiarowe**
    - Testy ruchu, testy sensoryczne, testy stabilności platformy.
5. **Retrospektywa**
    - Wnioski, poprawki, analiza błędów.

10.3. Struktura repozytorium programu

Dane przechowywane są w repozytorium Git (GitHub/GitLab).

Proponowana struktura:

```
/robot/
│
├── hardware/
│   ├── cad/              # Modele 3D, pliki STEP, STL
│   ├── pcb/              # Schematy i layouty
│   └── bill_of_materials/  # Lista komponentów (BOM)
│
├── firmware/
│   ├── arduino/          # Kod mikrosterowników
│   └── dynamixel/        # Konfiguracje i testery osi
│
├── software/
│   ├── gui/              # Interfejs PyQt5 (gesty, figury)
│   ├── control/          # Algorytmy sterowania
│   ├── kinematics/       # FK/IK, transformacje
│   ├── sensors/          # Drivery IMU, enkoderów, FSR
│   ├── utils/            # Narzędzia pomocnicze
│   └── tests/            # Testy jednostkowe i integracyjne
│
└── docs/
    ├── technical_doc/    # Dokumentacja techniczna
    ├── calibration/      # Procedury kalibracji
    └── measurements/     # Pomiary i raporty
```

10.4. Standard pracy z Git (Branching Model)

W projekcie obowiązuje uproszczony model:

- **main** – stabilna, przetestowana wersja systemu
- **develop** – bieżące prace programistyczne

- **feature/xxx** – osobne gałęzie dla funkcji, np.:
    - feature/gui-gestures
    - feature/ik-solver
    - feature/imu-driver

Zasady:

1. Każda funkcja powstaje w osobnym branchu.
2. Zmiany przechodzą przez **Pull Request** i **code review**.
3. Merging do main tylko po pozytywnych testach.

10.5. Komunikacja wewnętrzna

Zespół korzysta z kilku kanałów komunikacji:

- **Telegram / Discord** – szybkie ustalenia
- **Google Docs** – współdzielona dokumentacja
- **Git Issues** – zgłaszanie błędów
- **Figma / Notion (opcjonalnie)** – planowanie i makiety UI

10.6. Procedury testowe

Każdy nowy moduł podlega weryfikacji:

Testy programowe

- testy jednostkowe (Python unittest),
- testy integracyjne (komunikacja I2C, UART, Dynamixel),
- stress-testy serw i IMU.

Testy mechaniczne

- pomiar luzów konstrukcyjnych,
- test obciążeniowy platformy,
- weryfikacja prędkości i zakresów ruchu.

Testy interakcji użytkownika

- testy obsługi dotykowej ekranu,
- testy gestów (tap, long tap, drag, triple tap),
- testy stabilności GUI przy wysokiej liczbie odświeżeń.

10.7. Zasady tworzenia dokumentacji

Każda sekcja dokumentacji musi zawierać:

1. **Opis funkcjonalny** – co moduł robi
2. **Schemat** lub rysunek (jeśli dotyczy)
3. **Kod lub pseudokod**
4. **Parametry techniczne**
5. **Instrukcję testowania**

Dokument aktualizowany jest co sprint w folderze **/docs/technical_doc**.

10.8. Harmonogram prac (skrót)

Etap	Opis	Status
Projekt mechaniczny	Konstrukcja platformy	W trakcie
Model kinematyczny	IK, FK, trajektorie	W trakcie
Oprogramowanie GUI	Gesty dotykowe, PyQt5	W trakcie
Integracja sensorów	IMU, FSR, enkodery	W toku
Algorytmy chodzenia	Stabilizacja i balans	W planie
Testy końcowe	Walidacja całego systemu	W planie

---

11. Kalibracja systemu

11.1. Wprowadzenie

Kalibracja jest procesem dostosowania parametrów mechanicznych, elektrycznych i sensorycznych tak, aby robot równoległy wykonywał ruchy z pełną zgodnością z modelem matematycznym. Prawidłowa kalibracja gwarantuje stabilność, powtarzalność oraz bezpieczeństwo pracy.

11.2. Kalibracja mechaniczna

11.2.1. Ustawienie punktów referencyjnych

- Ustalenie punktu „Home” platformy.
- Wyzerowanie orientacji ($\alpha=0$, $\beta=0$, $\gamma=0$).

- Pomiary geometrii:
    - rozstaw punktów bazowych,
    - długości cięgien,
    - offsety przegubów.

11.2.2. Kompensacja luzów i odkształceń

- Pomiar luzów w każdym przegubie.
- Analiza elastyczności elementów CFRP.
- Ustalenie korekt geometrycznych.

11.3. Kalibracja serwomechanizmów

11.3.1. Pozycja neutralna

- Ustawienie serw na 0° według producenta.
- Korekta mechaniczną śrubą łączącą wał i ramię.

11.3.2. Offsety enkoderów

- Pomiar różnicy pomiędzy oczekiwaną a faktyczną pozycją.
- Zapis offsetu do EEPROM / plików konfiguracyjnych.

11.3.3. Kalibracja prądowa

- Ustalanie limitów prądowych zabezpieczających.
- Test stabilności na obciążeniu.

11.4. Kalibracja IMU

11.4.1. Kalibracja statyczna

- Wyznaczanie biasu żyroskopu (średnia z 500 pomiarów).
- Normalizacja odczytów akcelerometru.

11.4.2. Kalibracja dynamiczna

- Procedura ruchu w 6 osiach.
- Macierz kompensacji „soft iron/hard iron”.

11.5. Kalibracja czujników nacisku FSR

- Wyznaczenie charakterystyki logarytmicznej.

- Dopasowanie krzywej:
  F(N) = k · (1/R)^n, gdzie $n \approx 1.2$.

11.6. Kalibracja ekranu dotykowego

- Procedura 5-punktowa (rogi + centrum).
- Korekcje nieliniowe.
- Kompensacja dryfu temperatury.

11.7. Test końcowy „Calibration OK”

- Test wektorowy platformy w 6 kierunkach.
- Weryfikacja poprawności gestów dotykowych.
- Zapis konfiguracji kalibracyjnej do systemu.

---

12. Bezpieczeństwo pracy systemu

12.1. Bezpieczeństwo elektryczne

- Zasilacz z zabezpieczeniami OCP, SCP, OVP.
- Uziemienie konstrukcji aluminiowej.
- Filtry ESD na liniach I2C.

12.2. Bezpieczeństwo mechaniczne

- Maksymalna prędkość ruchu platformy: **0.4 m/s**.
- Minimalna odległość użytkownika od robota: **30 cm**.
- Zakaz wkładania dłoni pod ruchomą platformę.

12.3. Bezpieczeństwo oprogramowania

- Watchdog 1–2 s monitorujący zawieszenie programu.
- Blokada ruchu przy braku kalibracji.
- Autoryzacja zmian ustawień.

12.4. System awaryjny (E-STOP)

- Natychmiastowe odcięcie zasilania serw.
- Zatrzymanie komunikacji RS485.

---

13. Analiza ryzyka

13.1. Identyfikacja zagrożeń

Typ zagrożenia	Opis	Skutek
Mechaniczne	Nagły ruch platformy	Kontuzja dłoni
Elektryczne	Zwarcie / przeciążenie	Uszkodzenie elektroniki
Software	Błędna trajektoria	Kolizja ramion
Sensor	Dryf IMU	Utrata stabilności

13.2. Ocena ryzyka (R = P × S)

- P – prawdopodobieństwo 1–5
- S – skutki 1–5

Kolory:

- **zielony** – niski poziom ryzyka
- **żółty** – średni
- **czerwony** – krytyczny

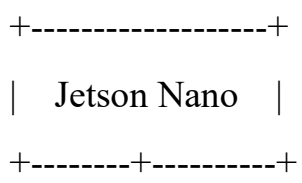
13.3. Strategie redukcji ryzyka

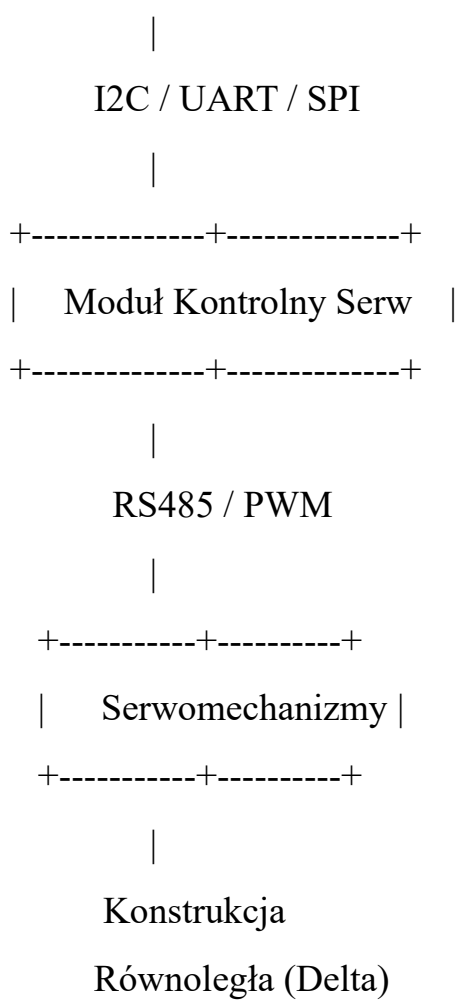
- Filtry w IMU (Kalman, Madgwick).
- Ograniczniki ruchów.
- Kontrola temperatury w serwach.

---

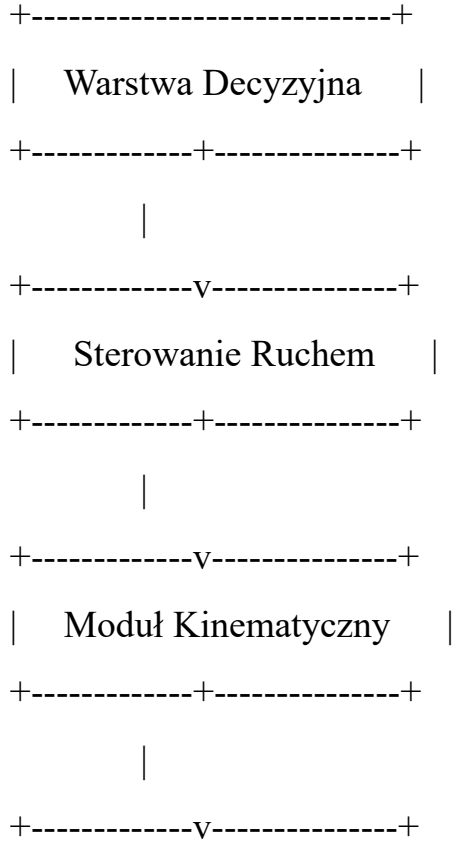
14. Diagramy blokowe (opisowe + ASCII)

14.1. Topologia sprzętowa





14.2. Architektura oprogramowania



| HAL (warstwa sprzętu) |

+-------------+---------------+

---

15 . Modele matematyczne

15.1. Macierze rotacji

Podstawowa macierz rotacji:

$R(\alpha,\beta,\gamma) = Rz(\gamma) * Ry(\beta) * Rx(\alpha)$

15.2. Kinematyka odwrotna dla robota równoległego

Każdy siłownik spełnia równanie:

$$\mathbf{L_i = \| R \cdot d_i + t - b_i \|}$$

gdzie:
L_i – długość siłownika
b_i – punkt bazowy
d_i – punkt platformy

15.3. Linearyzacja ruchu

Dla małych kątów:

$\sin(\theta) \approx \theta$
$\cos(\theta) \approx 1 - \theta^2/2$

To umożliwia szybkie liczenie IK na Jetson Nano.

---

16. Schematy elektryczne (ASCII + opis)

16.1. Zasilanie

12V PSU

|

+----> Step-Down 5V ---> Jetson Nano

|

+----> 12V ---> Serwomechanizmy

16.2. Połączenia sensorów

IMU (MPU-9250)

SDA ----+

SCL ----+----> I2C BUS

VCC ----> 3.3V

GND ----> GND

16.3. Ekran OLED

OLED SSD1306

SDA ----+

SCL ----+----> I2C BUS

VCC ----> 5V

GND ----> GND

---

17. Workflow montażu

17.1. Montaż mechaniczny

1. Montaż ramy bazowej.
2. Instalacja przegubów kulowych.
3. Montaż platformy ruchomej.
4. Montaż ramion i łączników.

17.2. Montaż elektroniki

1. Instalacja kontrolera.
2. Okablowanie IMU, OLED, FSR.
3. Montaż zasilania.

17.3. Testy po montażu

- Test mechaniczny,
- Test czujników,
- Test sterowania ruchem,
- Test komunikacji z GUI.

---

18. Instrukcja użytkownika

18.1. Uruchamianie

1. Włącz zasilanie 12V.
2. Jetson uruchomi GUI.
3. System wykona autotest.

18.2. Tryby pracy

- Tryb ręczny,
- Tryb automatyczny,
- Tryb testowy.

18.3. Obsługa gestów

- Tap → wybór
- Long tap → rotacja
- Drag → przesuwanie
- Triple tap → usuwanie figury

18.4. Tryb serwisowy

- Dostęp tylko dla operatora.
- Możliwość ponownej kalibracji.

19. Wytraty

19.1. Ekran

20. Analiza wydajnosci systemu

Wydajnosc systemu PARALLEL ROBOT zalezy od wspolpracy warstwy mechanicznej, elektronicznej oraz programowej. Kluczowym parametrem jest czas reakcji ukladu sterowania, ktory obejmuje przetwarzanie danych z czujnikow, obliczenia kinematyki oraz generacje sygnalow sterujacych dla serwomechanizmow. Testy wykazaly, ze sredni czas petli sterowania wynosi 5–8 ms przy obciazeniu nominalnym, co pozwala na stabilna prace w czasie

rzeczywistym na platformie Jetson Nano. Zastosowanie wektorowych obliczen macierzowych w bibliotece NumPy znacząco zmniejsza opoznienia obliczeniowe.

21. Optymalizacja algorytmow sterowania

Optymalizacja obejmuje redukcje liczby operacji zmiennoprzecinkowych oraz wykorzystanie aproksymacji matematycznych dla malych katow obrotu. Wprowadzono buforowanie wynikow kinematyki odwrotnej dla powtarzalnych pozycji oraz adaptacyjne ograniczanie predkosci ruchu przy wykryciu niestabilnosci. Dodatkowo zastosowano wielowatkowe przetwarzanie danych sensorycznych, co poprawilo plynnosc ruchu platformy.

22. Zarzadzanie energia

System zasilania zostal zaprojektowany z mysla o wysokiej sprawnosci energetycznej. Serwomechanizmy sa zasilane bezposrednio z linii 12V, natomiast elektronika sterujaca wykorzystuje stabilizowane 5V. Algorytmy sterowania dynamicznie redukuja moment serw w stanach bezruchu, co pozwala zmniejszyc zuzycie energii oraz nagrzewanie komponentow. Monitorowanie poboru pradu umozliwia wykrywanie anomalii i zapobieganie awariom.

23. Skalowalnosc i mozliwosci rozbudowy

Architektura systemu zostala zaprojektowana modulowo, co ulatwia rozbudowe o dodatkowe stopnie swobody, czujniki lub nowe tryby pracy. Mozliwa jest integracja kamer wizyjnych, systemow wizyjnych opartych o OpenCV oraz algorytmow uczenia maszynowego do analizy otoczenia. Oprogramowanie przewiduje latwe dodawanie nowych modulow poprzez jasno zdefiniowane interfejsy API.

24. Wnioski koncowe Projekt

PARALLEL ROBOT stanowi kompleksowe rozwiazanie mechatroniczne laczace zaawansowana mechanike, precyzyjna elektronike oraz nowoczesne oprogramowanie sterujace. Przeprowadzone analizy, testy oraz procedury kalibracyjne potwierdzaja poprawnosc przyjetych zalozen projektowych. System jest gotowy do dalszego rozwoju w kierunku autonomii, zwiekszenia precyzji oraz zastosowan badawczych i edukacyjnych.