



令和 6 年度  
卒業研究論文

題目	人追従搬送ロボットのシステム開発
----	------------------

学 科	電子制御工学科
学籍番号	s9123
氏 名	野口 史遠
提 出 日	令和 7 年 1 月 27 日

指導教員	高木 太郎 准教授
------	-----------



舞鶴工業高等専門学校  
電子制御工学科

# 論文要旨

近年、生産年齢人口の減少が社会的な課題となっており、ロボット技術の導入による作業の効率化が期待されている。例えば、草刈りロボットや運搬ロボットなど、人手不足を補うための自律ロボットが徐々に普及しつつある。しかしながら、多くの自動搬送ロボットには LiDAR や 3D センサーなどの高価なセンサーが搭載されているケースが多い。LiDAR は高精度な距離計測を可能にし、障害物回避や人追従において重要な役割を果たす一方で、その導入コストが非常に高く、特に中小企業や農業現場では導入が難しい現状がある。近年、カメラ映像を用いて物体位置を認識し、自律移動を行うシステムは物流や農業、介護など幅広い分野で需要が高まっている。

本研究では、カメラのみを用いた低コストな人追従搬送ロボットの開発を目指し、Intel RealSense D435i を使用した画像処理技術と追従制御アルゴリズムの実装に取り組んだ。

具体的には、デプスカメラから取得した深度データを用いて、画像上の座標を実空間の物理座標に変換し、人の位置を推定する。また、追従制御には、比例航法 (PN)、修正比例航法 (MPN)、およびゲインスケジューリング下修正比例航法 (GS-MPN) の3つのアルゴリズムを実装し、それぞれの性能を比較評価した。さらに、ROS2 を用いたシステム全体の統合を行い、上位層と下位層を連携させたリアルタイム制御を実現した。

実験では、ロボットが直線および曲線の軌道を持つ目標物を追従する際の精度と滑らかさを評価した。結果として、GS-MPN が最もバランスの取れた性能を示し、急加速を抑えつつ安定した追従を実現した。これにより、従来手法で見られた不安定な動作や追従精度の低下が大幅に改善された。一方で、遮蔽物や複数対象物が存在する場合の課題が残されており、これらの状況に対応するための識別技術や外乱耐性の強化が今後の課題である。

本研究の成果は、コスト効率に優れた人追従ロボットの実現に向けた重要なステップとなり、物流や医療分野など多様な応用への可能性を示唆するものである。今後は、環境適応性の向上や予測制御技術の導入を通じて、さらに高性能で信頼性の高いロボットシステムの開発を目指す。

# 目 次

第 1 章 緒言 .....	1
第 2 章 搬送ロボット制御 .....	2
2.1 2 輪ロボットの運動学 .....	2
2.1.1 順運動学 .....	2
2.1.2 逆運動学 .....	3
2.2 PID 制御とローパスフィルタ .....	3
2.2.1 PID 制御の構造 .....	4
2.2.2 ローパスフィルタの導入 .....	4
第 3 章 物体認識と座標検出 .....	5
3.1 YOLOv5 による物体認識 .....	5
3.2 デプスデータからの人座標検出 .....	5
第 4 章 人追従アルゴリズム .....	8
4.1 比例航法 (Proportional Navigation, PN) .....	8
4.2 修正比例航法 (Modified Proportional Navigation, MPN) .....	8
4.3 ゲインスケジューリング修正比例航法 (Gain-Scheduled Modified Proportional Navigation, GS-MPN) .....	9
第 5 章 システム構成 .....	10
5.1 システム全体図 .....	10
5.2 ハードウェア構成 .....	10
5.2.1 マイコン (STM32 Nucleo Board STM32F446RE) .....	10
5.2.2 エンコーダー (AMT102-V) .....	11
5.2.3 深度カメラ (Intel RealSense D435i) .....	11
5.3 ソフトウェア構成 .....	12
5.3.1 下位レイヤー .....	12
エンコーダーライブラリ (encoder.c, encoder.h) .....	13
モータードライバライブラリ (motor_driver.c, motor_driver.h) .....	13
シリアル通信ライブラリ (serial_lib.c, serial_lib.h) .....	14
メインコード (main.c) .....	16
5.3.2 上位レイヤー .....	17
web_socket_node .....	18
PID_node .....	19
RealSense_node .....	21
serial_read_node .....	23

serial_send_node .....	23
Roboware_node .....	24
PN (Proportional Navigation) .....	24
MPN (Modified Proportional Navigation) .....	25
GS-MPN (Gain-Scheduled Modified Proportional Navigation) .....	25
第 6 章 人追従実験 .....	26
6.1 実験内容 .....	26
6.1.1 実験条件 .....	26
6.1.2 実験の手順 .....	27
6.2 実験結果及び考察 .....	27
6.2.1 実験結果を用いた性能指標 .....	27
6.2.2 追従性能 ( MeanOffset と StdOffset ) .....	29
6.2.3 スムーズさ ( MeanAccel と StdAccel ) .....	29
6.2.4 視野内追従率 ( InFrameRate ) .....	30
6.2.5 総合評価 .....	30
第 7 章 結語 .....	31
参考文献 .....	32
謝辞 .....	33
付録 .....	34
A.1 下位レイヤープログラム .....	34
A.1.1 メインプログラム .....	34
A.1.2 エンコーダーライブラリ .....	41
A.1.3 モータドライバーライブラリ .....	43
A.1.4 シリアル通信ライブラリ .....	44
A.2 上位レイヤープログラム .....	45
A.3 回路 .....	59

# 第 1 章 緒言

近年，日本では少子高齢化の進展に伴い，生産年齢人口の減少が深刻な社会問題となっている．特に農業分野では，熟練した高齢者が農作業の多くを担っている現状があり，後継者不足が課題として浮き彫りになっている．農林水産省の統計によれば，日本の農業従事者の平均年齢は約 67 歳に達しており，農業人口の減少とともに農業現場の担い手不足が顕著化している．このような背景から，効率的な農作業を実現するために，自動化技術やロボット技術への期待が高まっている<sup>1)</sup>．

農業ロボットには，耕運，草刈り，収穫，搬送といった多岐にわたるタスクを自律的に遂行する能力が求められており，これにより農作業の省力化や効率化が期待されている．特に収穫作業においては，人が収穫した作物を運搬する搬送ロボットの需要が高い<sup>2)</sup>．このような搬送ロボットには，収穫者を正確に追従しながら作業をサポートする能力が必要である．

現在市販されている多くの搬送ロボットには，LiDAR や 3D センサーなどの高価なセンサーが搭載されている場合が多い．LiDAR は高精度な距離計測を可能にし，障害物回避や人追従において重要な役割を果たす一方で，その導入コストが非常に高く，特に中小規模の農業現場では採用が難しい．この課題を克服するため，近年ではカメラ映像を用いて低コストかつ高精度な追従を実現する技術の研究が進められている．例えば，カメラ映像のみで物体位置を認識し，自律的に移動するロボット車両の開発が行われている<sup>3)</sup>．

本研究では，農作物収穫時に収穫者の後を追従し，農作物を入れる籠を搬送するロボットを念頭に研究を行う．具体的にはカメラを用いて作業者を認識し，作業者の移動に追従させるアルゴリズムを構築する．人追従には飛翔物の誘導制御をする際に用いられる比例航法<sup>4)5)</sup>を基礎として改良を加えた手法を提案する．また，提案手法を実環境下で評価し，その追従性能および動作の滑らかさを検証する．以上のことにより，低コストで高精度な追従を実現する移動ロボットの可能性を示す．

## 第 2 章 搬送ロボット制御

本章では搬送ロボットの制御について説明する．本研究では，その制御が簡単にできるということから搬送ロボットとして 2 輪ロボットを用いることとした．以下では 2 輪ロボットの運動学とその制御手法について説明する．

### 2.1 2 輪ロボットの運動学

2 輪ロボットは，シンプルな構造でありながら，高い機動性を持つため，広く研究や産業に利用されている．その運動学は，ロボットの速度制御や経路計画を行う上で不可欠な要素である．本節では，2 輪ロボットの運動学および逆運動学を導出する．順運動学を導出する際に用いるモデルを図 2.1 に示す．また，図中の変数は以下の通りである．

- $v$  : ロボットの並進速度 [m/s]
- $\omega$  : ロボットの角速度 [rad/s]
- $r$  : 車輪の半径 [m]
- $L$  : 左右車輪間の距離 [m]
- $\dot{\theta}_R, \dot{\theta}_L$  : 右車輪および左車輪の角速度 [rad/s]

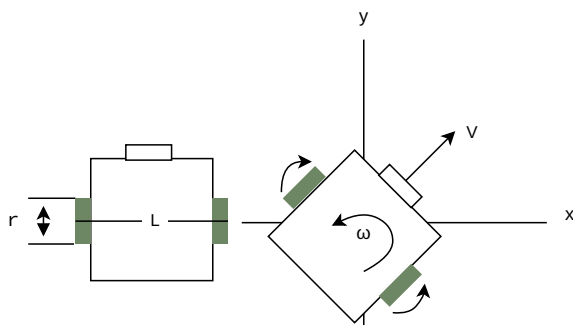


図 2.1 : 2 輪ロボットのモデル図

#### 2.1.1 順運動学

順運動学では，各車輪の角速度  $\dot{\theta}_R$  および  $\dot{\theta}_L$  から，ロボットの並進速度  $v$ ，角速度  $\omega$ ，および自己位置を算出する．自己位置の計算は，ロボットの進行方向と回転を考慮して行う．

ロボットの並進速度  $v$  と角速度  $\omega$  は，次式で求められる．

$$v = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{r}{L}(\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L) \quad (2.2)$$

したがって、ロボットの  $(x, y)$  方向の速度と角速度は次式で得られる。

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad (2.3)$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \quad (2.4)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (2.5)$$

ただし、本研究ではマイコン等により制御を行うため、これらの微分方程式を離散化することで、時刻  $t_k$  における位置と向きを計算する。なお、離散化した式は次式となる。

$$x_{k+1} = x_k + v_k \cos \theta_k \Delta t \quad (2.6)$$

$$y_{k+1} = y_k + v_k \sin \theta_k \Delta t \quad (2.7)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k \Delta t \quad (2.8)$$

ここで、 $\Delta t$  は計算ステップの時間間隔を示す。

### 2.1.2 逆運動学

逆運動学では、ロボットの並進速度  $v$  と角速度  $\omega$  から、車輪の角速度  $\dot{\theta}_R$  および  $\dot{\theta}_L$  を求める。ロボットを動作させる際には目標値となる  $\dot{\theta}_R$  および  $\dot{\theta}_L$  が必要となるため、逆運動学を用いる必要がある。

順運動学により求めた式 (2.1) および式 (2.2) により、次式を得ることができる。

$$\dot{\theta}_R = \frac{1}{r}(v + \frac{L}{2}\omega) \quad (2.9)$$

$$\dot{\theta}_L = \frac{1}{r}(v - \frac{L}{2}\omega) \quad (2.10)$$

これらの式により、目標速度  $v$  と  $\omega$  が与えられた場合に、車輪の角速度  $\dot{\theta}_R$  と  $\dot{\theta}_L$  を算出し、ロボットの各車輪を制御することができる。

## 2.2 PID 制御とローパスフィルタ

PID 制御 (Proportional-Integral-Derivative Control) は制御工学における最も基本的かつ広く使用されているフィードバック制御の手法である。本研究でも車輪の角速度制御に PID 制御を用いることとした。本節では、PID 制御の基本構造とノイズ除去に使用するローパスフィルタについて説明する。



### 2.2.1 PID 制御の構造

PID 制御は、目標値と現在値の偏差を基に制御量を算出し、システムを目標値へ収束させる手法である。基本的な PID 制御手法において制御量  $u(t)$  は次式で定義される：

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

ここで、式中の変数は以下の通りである。

- $e(t)$ ：目標値と現在値の偏差
- $K_P$ ：比例ゲイン（P 制御）
- $K_I$ ：積分ゲイン（I 制御）
- $K_D$ ：微分ゲイン（D 制御）

また、式中の各項の役割は以下の通りである。

- 比例制御（P 制御）：偏差に比例した制御量を生成し、応答の速さを向上させる。
- 積分制御（I 制御）：偏差を累積することで、定常偏差を排除する。
- 微分制御（D 制御）：偏差の変化率を基に、過渡応答の振動を抑制する。

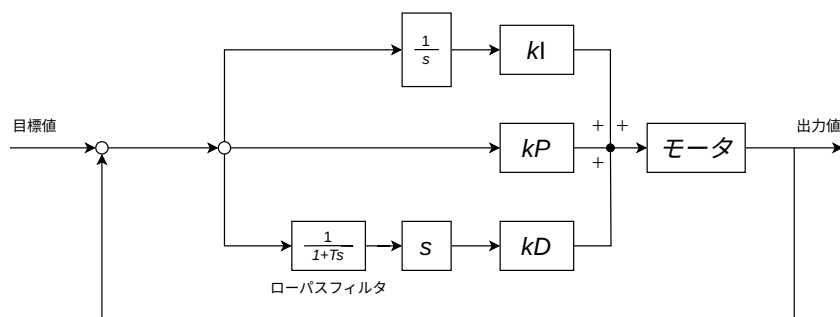


図 2.2：PID 制御器の構成図

図 2.2 に本研究で使用する PID 制御器の構成図を示す。微分項においてはノイズの影響により過大な入力を生成する可能性があるため、本研究では不完全微分を用いることとした。これは実質的にローパスフィルタを導入することと同義である。次節ではローパスフィルタについて説明する。

### 2.2.2 ローパスフィルタの導入

前節でも述べた通り、微分制御（D 制御）は高周波ノイズに敏感であり、そのまま使用するとシステムの安定性を損なう可能性がある。この問題を軽減するために、微分項にローパスフィルタを適用することが一般的である。

ここで、ローパスフィルタを適用した微分制御項は次式で表される。

$$D(s) = \frac{K_D s}{1 + Ts} \quad (2.12)$$

ただし、 $T$  はカットオフ周波数である。カットオフ周波数を適切に設定することで、ローパスフィルタにより高周波ノイズを低減することができ、制御系への影響を軽減することができる。

## 第 3 章 物体認識と座標検出

本研究ではカメラによる人追従制御を行うが、当然ながらカメラ画像から人の認識を行い、ロボットが進むべき座標を導出する必要がある。本章では本研究で使用した物体認識手法と座標検出について説明する。

### 3.1 YOLOv5 による物体認識

本研究では、人の認識に YOLOv5 (You Only Look Once Version 5) を使用する。YOLO はリアルタイムで物体を検出するアルゴリズムであり、1 枚の画像に対して物体のクラスとその位置を同時に出力する特徴を持つ。単一のニューラルネットワークを用いて、画像内の物体のバウンディングボックスとクラスラベルを直接予測する<sup>11)</sup>。そのため他の物体検出モデル (例えば SSD や Faster R-CNN) と比較して、高速な推論速度と高い精度を両立している。このため、リアルタイム性が要求されるロボットシステムにおいて有用である。

ここでは、YOLOv5 を用いてデプスカメラ D435i から得られた RGB 画像内の人を認識することを考える。YOLOv5 は以下のステップで物体を検出する。

1. RGB 画像を入力し、YOLOv5 のバックボーンにより特徴を抽出する。
2. ネックでスケールを調整し、特徴を統合する。
3. ヘッドでバウンディングボックス、クラスラベル (人)、および信頼度スコアを出力する。

出力されたバウンディングボックスは、ピクセル座標で記述されており、これをデプスカメラのデプスマップと組み合わせることで、物理座標を算出することができる。

### 3.2 デプスデータからの人座標検出

デプスカメラは、対象物までの距離を計測するためのデバイスであり、ロボットの環境認識や障害物回避、物体追跡などの応用において重要な役割を果たす。本研究では、インテル® RealSense™ デプスカメラ D435i を使用し、カメラから取得したデプスデータを基に人追従アルゴリズムを実現する。

デプスカメラで取得したデータを用いて、画像上のピクセル座標を実空間の物理座標に変換することで、人の位置を検出する。ピクセル座標系における対象物の位置をカメラ座標系 (図 3.1) に変換する手順を以下に述べる。

デプスカメラのデプスマップは、各ピクセルに深度情報  $L$  (対象物までの斜距離) を格納している。この情報を用いて、画像座標系におけるピクセル座標  $(u, v)$  をカメラ座標系  $(X_c, Y_c)$  に変換する。なお、本研究では人に追従すれば良いため、上下方向 ( $Z$  軸) はを考慮する必要はない。

以下の式を使用することで座標変換することができる。

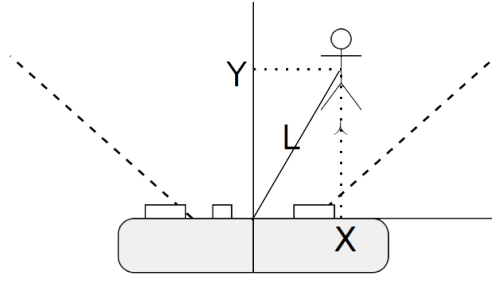


図 3.1 : デプスカメラを用いた座標変換モデル

$$X_c = \frac{(u - c_x) \cdot L}{f_x} \quad (3.1)$$

$$Y_c \approx L \quad (3.2)$$

ここで,  $u$  および  $v$  は画像座標系のピクセル位置,  $c_x$  はカメラの光学中心 ( 水平方向の画面中心 ) のピクセル位置,  $f_x$  はカメラの焦点距離 ( ピクセル単位 ),  $L$  はデプスマップから取得される深度値 ( 対象物までの斜距離 ) である .

つぎに, カメラ座標系における 2 次元位置  $(X_c, Y_c)$  をロボット座標系  $(X_r, Y_r)$  に変換する . この変換は, カメラとロボット間の座標系の相対的な位置関係を記述する回転行列  $R$  と平行移動ベクトル  $T$  を用いることで行われる .

ロボット座標系への変換は, 次の行列式で表される .

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ここで, 式中の変数は以下の通りである .

- $R$  : カメラ座標系からロボット座標系への回転行列
- $T$  : カメラ座標系からロボット座標系への平行移動ベクトル

本研究では, カメラがロボットに平行に取り付けられているため, 回転行列  $R$  は単位行列として扱う . また, カメラがロボットの旋回中心から 200 mm ( 0.2 m ) 前方に取り付けられているため, 平行移動ベクトル  $T$  は以下のように与えられる .

$$T = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

(3.1) ~ (3.4) を用いた計算例を以下に示す . なお, 式中パラメータを次のように仮定する .

- デプスカメラの焦点距離 :  $f_x = 378.09$  [px]
- デプスカメラの光学中心 :  $c_x = 319.39$  [px]
- デプスマップからの深度値 :  $L = 2.5$  [m]
- 対象物の水平ピクセル座標 :  $u = 400$  [px]

- カメラ位置のオフセット： $T_x = 0.2$  [m]

まず，画像座標系でのズレ  $\Delta u$  を計算する．

$$\Delta u = u - c_x = 400 - 319.39 = 80.61 \text{ [px]} \quad (3.5)$$

つぎに，カメラ座標系での水平座標  $X_c$  を求める．

$$X_c = \frac{\Delta u \cdot L}{f_x} = \frac{80.61 \cdot 2.5}{378.09} \approx 0.534 \text{ [m]} \quad (3.6)$$

また，奥行き  $Y_c$  を近似的に求める．

$$Y_c \approx L = 2.5 \text{ [m]} \quad (3.7)$$

最後に，ロボット座標系での位置  $(X_r, Y_r)$  を計算する．

$$X_r = X_c + T_x = 0.534 + 0 = 0.534 \text{ [m]} \quad (3.8)$$

$$Y_r = Y_c + T_y = 2.5 + 0.2 = 4.5 \text{ [m]} \quad (3.9)$$

この計算により，目標物のロボット座標系における位置が得られる．

## 第 4 章 人追従アルゴリズム

前章では人追従に必要な座標を導出した．本章では前章で求められた座標にロボットが移動するための制御手法を示す．具体的には飛翔体の誘導に用いられる比例航法を搬送ロボットに適用することを考えた．

### 4.1 比例航法 (Proportional Navigation, PN)

比例航法は，目標物（人物）の追従において，距離と偏差（横方向のズレ）を用いて制御信号を生成する基本的なアルゴリズムである．本来であれば，目標までの視線角度をもとに計算するが，簡易化のため，横方向のズレを使用する．以下に，本実験で使用する比例航法の式を示す．

$$V = k_v \cdot (P_d - 1.0) \quad (4.1)$$

$$\omega = k_\omega \cdot \frac{P_o}{\max(P_d, 1.0)} \quad (4.2)$$

ただし，式中の変数は以下の通りである．

- $k_v$ ：並進速度の比例ゲイン
- $k_\omega$ ：角速度の比例ゲイン
- $P_d$ ：ロボットと目標間の距離
- $P_o$ ：横方向の偏差

しかし，比例航法では対象までの距離が近づくにつれ横方向の偏差の変化が大きくなりロボットが振動的になると考えられる．そこで次節で修正比例航法を提案する．

### 4.2 修正比例航法 (Modified Proportional Navigation, MPN)

比例方法では，大きな変化に対して大きな出力となり，ロボットの動きが激しくなってしまう．そこで修正比例航法では，偏差の変化率（偏差角速度）を考慮することで，ロボットの動作をより滑らかにする．偏差角速度は以下の式で計算される．

$$\dot{e}(k) = \frac{P_o(k) - P_o(k-1.0)}{\Delta t} \quad (4.3)$$

また，角速度  $\omega$  は以下の式で修正される．

$$\omega(k) = k_\omega \cdot \frac{P_o(k)}{\max(P_d(k), 1.0)} + \lambda \cdot \dot{e}(k) \quad (4.4)$$

ここで，式中の変数は以下の通りである．

- $\lambda$ ：偏差角速度に対するゲイン

- $\Delta t$  : 制御周期

これにより，急激な方向転換や不安定な動作が軽減され，滑らかな動作が可能となると考えられる．しかし，振動を抑えることで直線運動での速応性が低下することが懸念されるため，次節でさらなる手法についても考える．

### 4.3 ゲインスケジューリング修正比例航法 (Gain-Scheduled Modified Proportional Navigation, GS-MPN)

前節の通り，直線運動での速応性が低下することが考えられるため，角速度に応じて  $\lambda$  を変化させることを考える．そこで，ゲインスケジューリング修正比例航法を提案する．本手法では，偏差角速度に基づき動的なゲインスケジューリングを導入する．

前述の通り  $\lambda$  を動的微分ゲイン  $k_d$  として変更する． $k_d$  を次式で定義する．

$$k_d = \lambda_d \cdot \frac{1 - \exp(-a \cdot |\text{offset}|)}{1 + \exp(-a \cdot |\text{offset}|)} \quad (4.5)$$

ただし，式中的変数は以下の通りである．

- $\lambda_d$  : 微分ゲインの最大値
- $a$  : 微分ゲインの変化速度を調整するパラメータ

ここで， $a$  を変化させた際の角速度に基づく動的微分ゲインのグラフを図 4.1 に示す．

また，角速度  $\omega$  は次式で計算される．

$$\omega = k_\omega \cdot \frac{\text{person\_offset}}{\max(\text{person\_distance}, 1.0)} + k_d \cdot \text{offset} \quad (4.6)$$

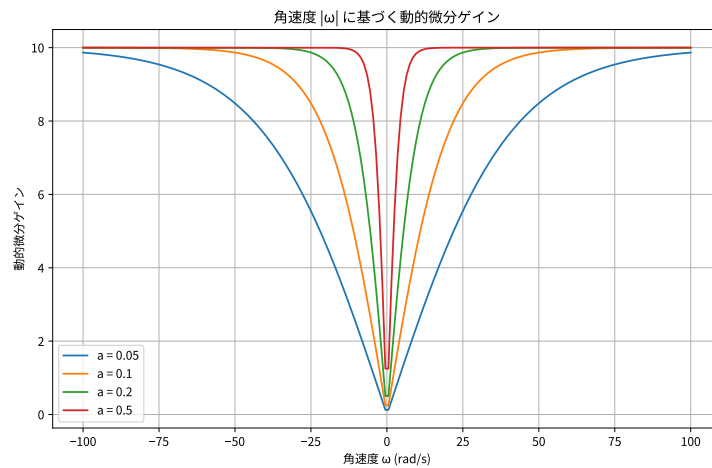


図 4.1 : 動的微分ゲイン

## 第 5 章 システム構成

### 5.1 システム全体図

本研究で構築したシステムの全体図を図 5.1 に示す．本システムは，下位レイヤーと上位レイヤーの 2 つの主要な構成要素からなる．

次節以降では本研究で構成した各レイヤーのハードウェア構成およびソフトウェア構成について説明する．

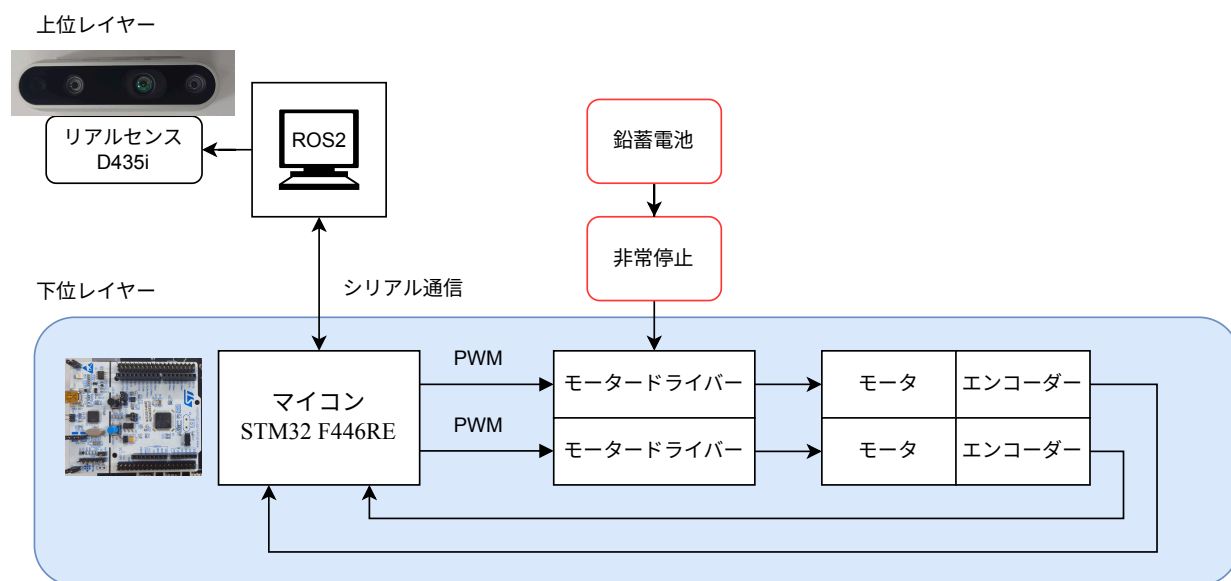


図 5.1 : システム全体図

### 5.2 ハードウェア構成

本システムのハードウェア構成について，以下に各要素を説明する．

#### 5.2.1 マイコン（STM32 Nucleo Board STM32F446RE）

本システムでは，STM32 Nucleo Board STM32F446RE マイコンボードを使用している．STM32 F446RE は高性能な ARM Cortex-M4 プロセッサを搭載しており，以下の特徴を持つ<sup>7)</sup>．

- ・ ST-LINK デバッガ / プログラマが内蔵
- ・ タイマーをエンコーダモードに設定可能
- ・ 開発/評価ボードであり入手性が高い

本マイコンは，モーター駆動，エンコーダーのデータ取得を担当しており，ロボットの下位制御レイヤーを実現している．

### 5.2.2 エンコーダー（AMT102-V）

AMT102-V エンコーダーを採用し，モーターの回転角速度および回転位置を計測している．図 5.2 に使用するエンコーダーを示す．このエンコーダーは最大分解能は5120 PPR( Pulse Per Revolution ) であり，非接触方式である<sup>8)</sup>．エンコーダーからの信号はマイコンで処理され，車輪の速度制御やオドメトリに使用する．

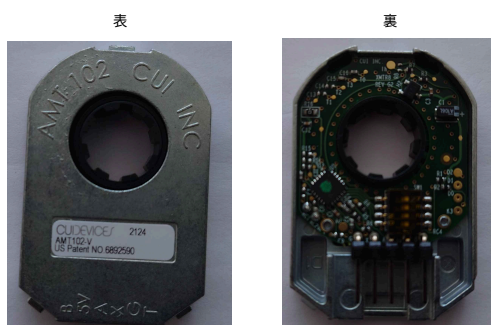


図 5.2 : AMT102-V

### 5.2.3 深度カメラ（Intel RealSense D435i）

深度カメラとして Intel RealSense D435i を採用している．D435i は，ステレオカメラ方式に基づく高精度な距離計測を特徴とし，以下のような仕様を持つ<sup>6)</sup>．

- ・ 最大測定距離：0.1 ～ 10 メートル
- ・ 出力解像度（DepthStream）：最大 1280 x 720
- ・ 出力フレームレート（DepthStream）：最大 90 fps
- ・ RGB 解像度およびフレームレート：1920 x 1080@30 fps
- ・ 深度センサ視野角：水平 85.2°，垂直 58°
- ・ IMU（慣性計測ユニット）搭載

本システムでは，D435i から取得した深度データを用いて目標（人）の位置を検出し，追従アルゴリズムに利用している．

## Intel RealSense D435i

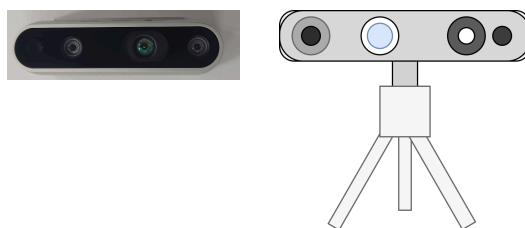


図 5.3 : RealSense



```

1  import pyrealsense2 as rs
2
3  # RealSense パイプラインのセットアップ
4  pipeline = rs.pipeline()
5  config = rs.config()
6  config.enable_stream(rs.stream.depth, 640, 480, rs.format.z16, 30)
7  pipeline.start(config)
8
9  # 深度ストリームのプロファイルからカメラパラメータを取得
10 profile = pipeline.get_active_profile()
11 depth_stream = profile.get_stream(rs.stream.depth) # 深度ストリーム
12 intrinsics = depth_stream.as_video_stream_profile().get_intrinsics()
13
14 # 内部パラメータを取得
15 fx = intrinsics.fx # 焦点距離( $f_x$ )
16 fy = intrinsics.fy # 焦点距離( $f_y$ )
17 cx = intrinsics.ppx # 光学中心 $x$  座標( $c_x$ )
18 cy = intrinsics.ppy # 光学中心 $y$  座標( $c_y$ )
19
20 print(f"焦点距離:  $f_x={fx}$ ,  $f_y={fy}$ ")
21 print(f"光学中心:  $c_x={cx}$ ,  $c_y={cy}$ ")
22
23 # 使用後はパイプラインを停止
24 pipeline.stop()

```

Code 1: RealSense 内部パラメータの取得

D435i の内部パラメータ（焦点距離と光学中心）は Python コードを使用して計測した．使用した Python コードを Code 1 に示す．

Code 1 のコードを実行した結果，D435i の焦点距離と光学中心が以下の通り得られた．

- 焦点距離： $f_x = 378.09$  [pixel] ,  $f_y = 378.09$  [pixel]
- 光学中心： $c_x = 319.39$  [pixel] ,  $c_y = 237.10$  [pixel]

これらの内部パラメータは，ピクセル座標系からカメラ座標系への変換（式 (3.1) , (3.2)）で使用する．

## 5.3 ソフトウェア構成

本システムのソフトウェア構成について，以下に各要素を説明する．初めにマイコンで実行される下位レイヤーについて説明し，つぎに PC で実行される上位レイヤーについて説明する．

### 5.3.1 下位レイヤー

本システムの下位レイヤーソフトウェアでは，モーター制御，エンコーダーのデータ処理，およびシリアル通信を実現するために自作ライブラリを使用している．開発環境は CubeIDE(ver.1.16.1) である．以下に，各ライブラリの詳細について説明する．

## エンコーダーライブラリ (encoder.c, encoder.h)

エンコーダーライブラリは，ロータリーエンコーダー（AMT102-V）の値を取得し，角速度や回転数を計算するための機能をもつ．このライブラリでは，エンコーダーから得られる値を高精度に利用するために4逓倍処理を行い，モーターの速度制御に使用している．Code 2 に使用したエンコーダカウン트의ライブラリコードを示す．

```
1 // エンコーダーカウント値の取得
2 int Encoder_Read(Encoder* encoder)
3 {
4     int16_t count = (int16_t)(__HAL_TIM_GET_COUNTER(encoder->htim) - TIMER_MAX_COUNT / 2);
5     return count;
6 }
7
8 void Encoder_Interrupt(Encoder* encoder, EncoderData* encoder_data)
9 {
10     int count = Encoder_Read(encoder);
11
12     encoder_data->count = count;
13     encoder_data->rot = count / (double)encoder->ppr;
14     encoder_data->deg = encoder_data->rot * 360.0;
15     encoder_data->distance = encoder_data->rot * (PI * encoder->diameter);
16
17     encoder_data->rps = (encoder_data->rot - encoder->before_rot) / (encoder->period * 0.001);
18     encoder_data->velocity = encoder_data->rps * PI * encoder->diameter;
19
20     encoder->before_rot = encoder_data->rot;
21 }
```

Code 2: エンコーダーカウント値の取得

## モータードライバライブラリ (motor\_driver.c, motor\_driver.h)

モータードライバライブラリは，DC モーターの速度と方向を制御するための機能をもつ．このライブラリでは，PWM 信号を用いてモーターを駆動し，回転方向の切り替えや速度制御を行っている．Code 3 にモータドライバのライブラリコードを示す．

```
1
2 // 速度設定関数
3 void MotorDriver_setSpeed(MotorDriver *motor, int speed) {
4     int pwm_value;
5     if (speed > 100) speed = 99; // ブーストラップ回路に対応
6     if (speed < -100) speed = -99; // ブーストラップ回路に対応
7
8     if (speed > 0) {
9         pwm_value = (speed * __HAL_TIM_GET_AUTORELOAD(motor->htimA)) / 100;
10        __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimA, motor->channelA, pwm_value);
11        __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimB, motor->channelB, 0);
12    } else {
13        pwm_value = (-speed * __HAL_TIM_GET_AUTORELOAD(motor->htimA)) / 100;
14        __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimA, motor->channelA, 0);
15        __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimB, motor->channelB, pwm_value);
16    }
17 }
```

Code 3: モーターの速度設定 (motor\_driver.c)

シリアル通信ライブラリ (serial\_lib.c, serial\_lib.h)

シリアル通信ライブラリは、PC や上位システムとのデータ通信を実現するために設計されている。このライブラリでは、固定長および可変長データの送受信をサポートしており、効率的かつ安全な通信を実現している。Code 4 に可変長データの送信および受信関数を示す。

この関数では、データを指定された形式に従ってパケット化し、シリアル通信で送信する。先頭にヘッダー（‘SERIAL\_HEADER1’ と ‘SERIAL\_HEADER2’）を追加し、データ部分は 16 ビット整数をビッグエンディアン形式で格納する。また、送信後に動的に確保したメモリを解放することで、メモリリークを防止している。

受信関数では、指定された形式に従って受信したデータをデコードし、データバッファに格納する。受信データのヘッダーを検証し、データが正しい形式であることを確認した後、各データを 16 ビット整数として復元する。受信データが無効の場合、エラーコードを返すことで通信エラーを適切にハンドリングする。

```

1 // 可変長データの送信関数
2 void Serial_SendData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count) {
3     uint8_t buffer_size = 2 + data_count * 2;
4     uint8_t *buffer = (uint8_t *)malloc(buffer_size);
5
6     buffer[0] = SERIAL_HEADER1;
7     buffer[1] = SERIAL_HEADER2;
8
9     for (uint8_t i = 0; i < data_count; i++) {
10         buffer[2 + i * 2] = (data[i] >> 8) & 0xFF;
11         buffer[3 + i * 2] = data[i] & 0xFF;
12     }
13
14     HAL_UART_Transmit(huart, buffer, buffer_size, HAL_MAX_DELAY);
15     free(buffer);
16 }
17 // 可変長データの受信関数
18 uint8_t Serial_ReceiveData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count) {
19     uint8_t buffer_size = 2 + data_count * 2;
20     uint8_t *buffer = (uint8_t *)malloc(buffer_size);
21
22     if (HAL_UART_Receive(huart, buffer, buffer_size, HAL_MAX_DELAY) == HAL_OK) {
23         if (buffer[0] == SERIAL_HEADER1 && buffer[1] == SERIAL_HEADER2) {
24             for (uint8_t i = 0; i < data_count; i++) {
25                 data[i] = (buffer[2 + i * 2] << 8) | buffer[3 + i * 2];
26             }
27             free(buffer);
28             return 1; // 正常受信
29         }
30     }
31     free(buffer);
32     return 0; // エラー
33 }

```

Code 4: 可変長データの送受信関数 (serial\_lib.c)

## メインコード (main.c)

メインコードでは、自作のエンコーダー、モータードライバ、シリアル通信ライブラリを統合し、システム全体の制御を実現している。このコードは、PC からの制御信号を受信してモーターの速度を設定するとともに、エンコーダーから取得した速度データを PC に送信する役割を果たす。

この制御ループでは、まずシリアル通信ライブラリの 'Serial\_ReceiveData' 関数を使用して PC からの制御信号を受信する。受信した制御信号は右車輪および左車輪の目標速度を表しており、それぞれ 'controlSignalRight' と 'controlSignalLeft' に格納される。これらの速度データは、モータードライバライブラリの 'MotorDriver\_setSpeed' 関数を用いて設定される。

つぎに、エンコーダーデータの送信を行う。10ms ごとにタイマーの値を確認し、タイミングが来た場合にエンコーダーライブラリの 'Encoder\_Interrupt' 関数を使用して速度データを更新する。更新された速度データは、シリアル通信ライブラリの 'Serial\_SendData' 関数を用いて PC に送信される。

このように、メインコードは上位システムとの通信、モーター制御、およびエンコーダーデータの送信を連携させ、ロボット全体のリアルタイム制御を実現している。

Code 5 に一部実装コードを示す。

```
1 // メイン制御ループ
2 while (1)
3 {
4     /* PC からの制御信号を受信*/
5     int16_t receivedData[2];
6     if (Serial_ReceiveData(&huart2, receivedData, 2))
7     {
8         controlSignalRight = receivedData[0];
9         controlSignalLeft = receivedData[1];
10
11         MotorDriver_setSpeed(&motorRight, -1 * controlSignalRight);
12         MotorDriver_setSpeed(&motorLeft, -1 * controlSignalLeft);
13     }
14
15     /* エンコーダーデータの送信 (10[ms] ごとに送信) */
16     if (HAL_GetTick() - lastSendTime >= 10)
17     {
18         lastSendTime = HAL_GetTick();
19
20         /* エンコーダーの速度データを更新*/
21         Encoder_Interrupt(&encoderRight, &encoderDataRight);
22         Encoder_Interrupt(&encoderLeft, &encoderDataLeft);
23
24         /* エンコーダー速度を送信*/
25         int16_t feedbackData[2] = {(int16_t)encoderDataRight.velocity, (int16_t)encoderDataLeft.velocity};
26         Serial_SendData(&huart2, feedbackData, 2);
27     }
28 }
```

Code 5: メイン制御ループ (main.c)

### 5.3.2 上位レイヤー

ロボット技術は産業用から日常生活まで多岐にわたる応用が進んでおり、それに伴い、開発の効率化やシステムの拡張性が求められている。これらの課題に対応するため、オープンソースのロボットフレームワークである ROS ( Robot Operating System ) が開発され、幅広い支持を得ている。ROS は、通信、制御、センサーデータの統合など、ロボット開発における基盤となる機能を提供しており、研究開発において重要な役割を果たしている。

ROS 2 は DDS ( Data Distribution Service ) を通信基盤として採用している。これにより、ノード間通信のリアルタイム性が向上し、複数のロボットやセンサーから成る分散システムの構築が容易となった<sup>9)</sup>。特に、産業用ロボットや自動運転車のように、即時性が求められるシステムにおいて、その利点が顕著である。さらに、クロスプラットフォーム対応も ROS 2 の特徴の一つである。ROS 1 は主に Linux 環境での動作を前提としていたが、ROS 2 では Windows や macOS など複数のプラットフォームで動作するように設計されており、開発環境の柔軟性が大幅に向上した<sup>10)</sup>。これにより、多様なハードウェア環境への適応が可能となり、利用者の裾野が広がった。

これらの特徴により、ROS 2 は、研究開発だけでなく商業用途にも適したフレームワークとして注目を集めている。本研究においても、ROS 2 を採用することで、効率的かつ信頼性の高いロボットシステムの開発を目指す。

本システムの上位レイヤーでは、以下の ROS2 ノードを利用してリアルタイムなデータ処理と通信を実現している。開発環境は ROS2 humble ,Python 3.10.12 である。

本研究で利用した ROS2 ノードは以下の通りである。

- `web_socket_node`: Web ブラウザと通信し、ロボットに指令を与える。
- `PID_node`: PID 制御を用いてモーター制御信号を生成。
- `RealSense_node`: 深度カメラからデータを取得し、ターゲットの位置を推定。
- `serial_read_node`: 下位レイヤーとのシリアル通信を通じてエンコーダーデータを受信。
- `serial_send_node`: モーター制御信号を下位レイヤーに送信。
- `Roboware_node`: ロボット全体の管理、および追従アルゴリズムを搭載。

図 5.4 に `rqt_graph` によりノード間の接続状況を視覚化したものを示す。

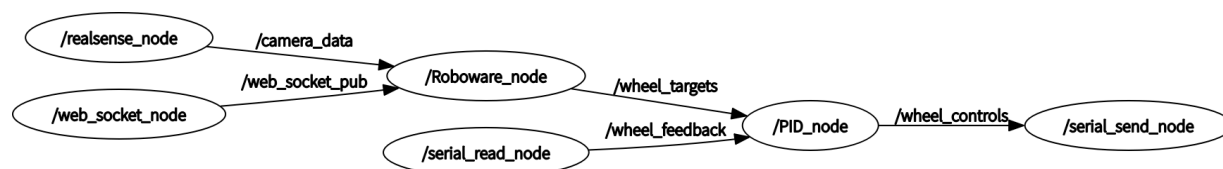


図 5.4 : `rqt_graph`

## web\_socket\_node

web\_socket\_node は ,FastAPI を使用して Web ブラウザと ROS2 ノード間の双方向通信を行う . Web ブラウザからはロボットの制御指令を送信でき , ロボットの現在位置や状態をリアルタイムで取得できる .

FastAPI は軽量かつ高性能な Web フレームワークであり , 非同期通信をサポートするため , WebSocket を用いたリアルタイム通信にも対応している . WebSocket は、HTTP プロトコルを拡張した双方向通信のためのプロトコルであり , 効率的なデータ送受信を可能にする .

- 購読トピック
  - estimated\_position (Float32MultiArray): 推定位置データ
- 発行トピック
  - web\_socket\_pub (String): WebSocket 通信で受信したコマンド

Code 6 に WebSocket 通信の主要な実装部分を示す . この実装では , Web ブラウザから送信された制御信号を ROS トピック 'web\_socket\_pub' にパブリッシュし , ROS2 ノードで処理される . 同時に , ROS2 ノードがサブスクライブしたデータを Web ブラウザに送信することでリアルタイム通信を実現している .

```
1 # FastAPI インスタンスの作成
2 app = FastAPI()
3
4 # WebSocket 通信のエンドポイント
5 @app.websocket('/ws')
6 async def websocket_endpoint(websocket: FastAPIWebSocket):
7     await websocket.accept()
8     try:
9         while True:
10             # クライアントからのデータを受信
11             receive_data = await websocket.receive_text()
12
13             # ROS トピックにデータをパブリッシュ
14             msg = String()
15             msg.data = receive_data
16             self.pub.publish(msg)
17
18             # サブスクライブしたデータをクライアントに送信
19             string_send_data = ",".join(map(str, self.send_data))
20             await websocket.send_text(string_send_data)
21     except Exception as e:
22         print(f'WebSocket error: {str(e)}')
23     finally:
24         print('WebSocket disconnected')
```

Code 6: WebSocket 通信の主要部分 (web\_socket\_node.py)

## PID\_node

PID\_node は、ロボットのモーター制御信号を生成するために PID 制御アルゴリズムを実装したノードである。PID 制御では、目標値と現在値の差（偏差）を基に比例（P）、積分（I）、微分（D）の3要素を組み合わせて制御信号を生成する。さらに、本ノードでは微分項にローパスフィルタを適用し、ノイズの影響を低減している。

本ノードは以下の ROS トピックを使用する。

- 購読トピック
  - wheel\_targets (Float32MultiArray): 目標速度データ（右車輪，左車輪）
  - wheel\_feedback (Float32MultiArray): 現在速度データ（右車輪，左車輪）
- 発行トピック
  - wheel\_controls (Float32MultiArray): 制御信号（右車輪，左車輪）

Code 7 に PID 制御アルゴリズムの主要な実装部分を示す。このアルゴリズムでは、目標速度と現在速度の差を計算し、PID 制御の各要素を基に制御信号を生成する。ローパスフィルタを導入することで、ノイズによる微分項の影響を抑制し、安定した制御信号を生成する。また、Code 8 に制御ループの主要部分を示す。この制御ループでは、以下の手順でモーター制御信号を生成する。

1. 目標速度と現在速度の偏差を計算し、PID 制御を実行。
2. 生成した制御信号を ROS トピック wheel\_controls にパブリッシュ。
3. デバッグ用に制御信号の詳細をログ出力。

これにより、ロボットの速度を目標値に追従させるためのリアルタイム制御が可能となる。



```

1 class PIDController:
2     def __init__(self, kp, ki, kd, tau=0.01):
3         self.kp = kp
4         self.ki = ki
5         self.kd = kd
6         self.tau = tau # ローパスフィルタの時定数
7         self.prev_error = 0.0
8         self.integral = 0.0
9         self.prev_derivative = 0.0 # 前回の微分値
10
11     def compute(self, target, current, dt):
12         error = target - current
13         self.integral += error * dt
14
15         # 微分項にローパスフィルタを適用
16         raw_derivative = (error - self.prev_error) / dt
17         derivative = (self.tau * self.prev_derivative + dt * raw_derivative) / (self.tau + dt)
18         self.prev_derivative = derivative
19         self.prev_error = error
20
21         return self.kp * error + self.ki * self.integral + self.kd * derivative

```

Code 7: PID 制御アルゴリズムの実装 (PID\_node.py)

```

1 def control_loop(self):
2     current_time = self.get_clock().now()
3     dt = (current_time - self.last_time).nanoseconds / 1e9
4     self.last_time = current_time
5
6     # 右車輪と左車輪の制御信号を計算
7     control_signal_right = self.pid_right.compute(self.target_right, self.current_right, dt)
8     control_signal_left = self.pid_left.compute(self.target_left, self.current_left, dt)
9
10    # 制御信号をパブリッシュ
11    control_msg = Float32MultiArray()
12    control_msg.data = [float(control_signal_right), float(control_signal_left)]
13    self.pub.publish(control_msg)

```

Code 8: 制御ループ (PID\_node.py)

## RealSense\_node

RealSense\_node は, Intel RealSense D435i カメラを使用して深度データと RGB 画像を処理し, ターゲットの検出および距離・オフセット情報を生成する. このノードは, YOLOv5 を利用した物体検出アルゴリズムを実装しており, 人物の位置と距離をリアルタイムで推定してパブリッシュする.

本ノードは以下の ROS トピックを使用する.

- 発行トピック

- camera\_data (Float32MultiArray): 人物の距離とオフセット情報

Code 9 に主要な処理と実装部分を示す. ただし, 距離データは, 近づく場合はそのままの値を使用し, 遠ざかる場合は移動平均フィルタを適用している. このフィルタリングは, 測定誤差やノイズの影響を低減するためである. 距離データのフィルタリングに使用したコードを Code 10 に示す.

以上のノードは, RealSense カメラから取得した深度データと RGB 画像をもとに, YOLOv5 を用いたターゲット検出と距離推定を行い, リアルタイムで ROS トピックに結果をパブリッシュする.

```

1 # RealSense フレームの処理
2 def process_frames(self):
3     try:
4         frames = self.pipeline.wait_for_frames()
5         depth_frame = frames.get_depth_frame()
6         color_frame = frames.get_color_frame()
7         if not depth_frame or not color_frame:
8             return
9
10        # 深度データと RGB データを取得
11        depth_image = np.asanyarray(depth_frame.get_data())
12        color_image = np.asanyarray(color_frame.get_data())
13
14        # YOLOv5 による物体検出
15        results = self.model(color_image)
16        for result in results.xyxy[0]: # 検出結果をループ
17            box, conf, cls = result[:4], result[4], int(result[5])
18            if cls == 0: # クラス (人物) のみ処理 0
19                x1, y1, x2, y2 = map(int, box)
20                center_x, center_y = (x1 + x2) // 2, (y1 + y2) // 2
21
22                # 深度データから距離とオフセットを計算
23                raw_distance = depth_frame.get_distance(center_x, center_y)
24                offset_x = center_x - (color_image.shape[1] // 2)
25                filtered_distance = self.filter_distance(raw_distance)
26
27                # データをパブリッシュ
28                msg = Float32MultiArray()
29                msg.data = [filtered_distance, float(offset_x)]
30                self.publisher.publish(msg)
31
32                # デバッグ情報の表示
33                self.get_logger().info(
34                    f"Published camera data: Distance={filtered_distance:.2f}, Offset={offset_x}"
35                )
36                break
37    except Exception as e:
38        self.get_logger().error(f"Error processing frames: {str(e)}")

```

Code 9: ターゲット検出と距離推定 (RealSense\_node.py)

```

1 def filter_distance(self, current_distance):
2     if current_distance == 0.0: # 無効値は無視
3         return self.previous_distance
4
5     if current_distance < self.previous_distance:
6         # 近づいている場合: そのままの値を使用
7         self.distance_history = [current_distance] # 履歴をリセット
8         return current_distance
9     else:
10        # 遠ざかる場合: 移動平均フィルタを適用
11        self.distance_history.append(current_distance)
12        if len(self.distance_history) > self.history_size:
13            self.distance_history.pop(0) # 古い値を削除
14        return sum(self.distance_history) / len(self.distance_history)

```

Code 10: 距離データのフィルタリング (RealSense\_node.py)

## serial\_read\_node

serial\_read\_node は、下位レイヤーから送信されるエンコーダーデータをシリアル通信を通じて受信し、ROS トピックにパブリッシュする役割を持つ。このノードは非同期通信をサポートしており、リアルタイムでのデータ受信とパブリッシュを実現している。

- 発行トピック

- wheel\_feedback (Float32MultiArray): エンコーダーデータ (右車輪, 左車輪)

Code 12 に主要なコード部分を示す。このノードでは、シリアルポートから受信したエンコーダーデータを解析し、右車輪と左車輪の速度データとしてトピック wheel\_feedback にパブリッシュする。

```
1 class SerialReadNode(Node):
2     def __init__(self):
3         super().__init__('serial_read_node')
4         self.publisher = self.create_publisher(Float32MultiArray, 'wheel_feedback', 10)
5         # シリアル通信の設定
6         self.serial_port = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200, timeout=1)
7         self.create_timer(0.1, self.read_serial_data)
8     def read_serial_data(self):
9         try:
10             if self.serial_port.in_waiting > 0:
11                 data = self.serial_port.read(8) # バイトを読み取る 8
12                 right_speed, left_speed = struct.unpack('>hh', data[2:]) # データのデコード
13                 msg = Float32MultiArray()
14                 msg.data = [float(right_speed), float(left_speed)]
15                 self.publisher.publish(msg)
16                 self.get_logger().info(f"Published wheel_feedback: {msg.data}")
17         except Exception as e:
18             self.get_logger().error(f"Error reading serial data: {str(e)}")
```

Code 11: シリアルデータの受信とトピックへのパブリッシュ (serial\_read\_node.py)

## serial\_send\_node

serial\_send\_node は、上位レイヤーからのモーター制御信号を下位レイヤーに送信する役割を持つ。このノードは、ROS トピックから制御信号を受け取り、指定されたフォーマットでパケット化してシリアル通信を通じて下位レイヤーに送信する。

- 購読トピック

- wheel\_controls (Float32MultiArray): モーター制御信号 (右車輪, 左車輪)

Code 13 に主要なコード部分を示す。このノードでは、モーター制御信号を ROS トピック wheel\_controls から受信し、指定されたフォーマットでパケット化してシリアル通信を通じて送信する。

```

1 class SerialSendNode(Node):
2     def __init__(self):
3         super().__init__('serial_send_node')
4         self.subscription = self.create_subscription(
5             Float32MultiArray,
6             'wheel_controls',
7             self.send_serial_data,
8             10
9         )
10        # シリアル通信の設定
11        self.serial_port = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200, timeout=1)
12    def send_serial_data(self, msg):
13        try:
14            if len(msg.data) == 2:
15                right_control, left_control = int(msg.data[0]), int(msg.data[1])
16                data = struct.pack('>BBhh', 0xA5, 0xA5, right_control, left_control)
17                self.serial_port.write(data)
18                self.get_logger().info(f"Sent wheel_controls: {msg.data}")
19        except Exception as e:
20            self.get_logger().error(f"Error sending serial data: {str(e)}")

```

Code 12: 制御信号の送信 (serial\_send\_node.py)

## Roboware\_node

Roboware\_node は、ロボットの速度制御を実現するためのノードであり、比例航法 (PN)、修正比例航法 (MPN)、およびゲインスケジューリング下修正比例航法 (GS-MPN) をサポートしている。これらのアルゴリズムを用いて、ターゲットを追従する速度と角速度を計算し、逆運動学を用いて車輪ごとの目標速度を決定する。

- 購読トピック
  - web\_socket\_pub (String): 操作モードおよびロボット制御信号
  - camera\_data (Float32MultiArray): 距離とオフセットデータ
- 発行トピック
  - wheel\_targets (Float32MultiArray): 車輪ごとの目標速度

以下に、各アルゴリズムでの速度計算部分を示す。

## PN (Proportional Navigation)

PN アルゴリズムでは、Code 13 に示すように直進速度  $V$  と角速度  $\omega$  を計算する。

```

1 V = self.kp_v * (self.person_distance - 1.0)
2 omega = (self.navigation_constant) * self.kp_omega * self.person_offset / max((self.person_distance), 1.0)

```

Code 13: PN の計算部分 (Roboware\_node\_np.py)

## MPN (Modified Proportional Navigation)

MPN では、偏差角速度の微分を用いて動作をなめらかにするため、Code 14 に示すように計算する。

```
1 offset_rate = (self.person_offset - self.previous_offset) / self.dt # 偏差角速度
2 V = self.kp_v * (self.person_distance - 1.0)
3 omega = (
4     self.navigation_constant * self.kp_omega * self.person_offset / self.person_distance +
5     self.lambda_gain * offset_rate
6 )
7 self.previous_offset = self.person_offset # 偏差を更新
```

Code 14: MPN の計算部分 (Roboware\_node\_mpn.py)

## GS-MPN (Gain-Scheduled Modified Proportional Navigation)

GS-MPN では、動的微分ゲインを導入し、偏差角速度に基づく調整を行う。Code 15 にコードを示す。また、カメラからの座標変換も行っている。座標変換のコードを Code 16 に示す。

本ノードでは、各種追従アルゴリズムを動的に選択できるよう設計されており、追従性能の向上と滑らかな動作を実現している。また、逆運動学を用いることで、車輪ごとの速度制御信号を正確に生成する。

```
1 offset_rate = (self.person_offset - self.previous_offset) / self.dt # 偏差角速度
2 dynamic_kd = self.kd_lambda * (1 - math.exp(-self.a * abs(offset_rate))) / (1 + math.exp(-self.a * abs(
3     offset_rate)))
4 V = self.kp_v * (self.person_distance - 1.0)
5 omega = (
6     self.navigation_constant * self.kp_omega * self.person_offset / self.person_distance +
7     dynamic_kd * offset_rate
8 )
9 self.previous_offset = self.person_offset # 偏差を更新
```

Code 15: GS-MPN の計算部分 (Roboware\_node\_newmpn.py)

```
1 def position_callback(self, msg):
2     if len(msg.data) == 2:
3         pixel_offset = msg.data[1] # カメラ画像上の水平ズレ (ピクセル)
4         depth = msg.data[0] # カメラから取得した深度値 (m)
5         # 座標変換
6         x_camera = (pixel_offset * depth) / self.fx # カメラ座標系の X
7         y_camera = depth # カメラ座標系の Y
8
9         # ロボット座標系への変換
10        x_robot = x_camera + self.camera_offset_x
11        y_robot = y_camera
12
13        # 更新
14        self.person_offset = x_robot # ロボット座標系の X
15        self.person_distance = y_robot # ロボット座標系の Y
```

Code 16: 座標変換

## 第 6 章 人追従実験

### 6.1 実験内容

本章では，各アルゴリズム（PN，MPN，GS-MPN）の性能を比較し，追従精度や滑らかさ，安定性を評価する．また，実環境でのシステム全体の動作を検証する．

#### 6.1.1 実験条件

簡易的に作成した 2 輪移動ロボットを使用した．実験は屋内環境で行った．以下に示すように人を直線運動時と曲線運動時とを追従させ，追従性能，およびロボットのなめらかさを検証する．

- 条件 1: 人（ターゲット）が直線に動く
- 条件 2: 人（ターゲット）が曲線に動く

また，以下に各設定パラメータを示す．

- 比例ゲイン  $v$ : 5000
- 比例ゲイン  $\omega$ : 50.0
- 最大微分ゲイン: 0.1
- 動的微分ゲイン調整パラメータ: 0.1
- 比例航法定数（ $N$ ）: 0.1
- サンプルング間隔: 0.1[s]

実験の様子とロボットを図 6.1 に示す．



図 6.1 : 実験の様子

### 6.1.2 実験の手順

各アルゴリズムについて，以下の手順で実験を行った．

1. ロボットの前方 (1[m]) に追従物 (人) を配置し，カメラの中心に来ていることを確認して実験を始める．
2. 開始後，人が条件 1，2 に則り 10[m] 移動．
3. エンコーダーデータやカメラデータを記録．
4. 記録した csv ファイルを解析．

以上の手順で 3 つのアルゴリズムについて 2 つの条件で実験を行う．

## 6.2 実験結果及び考察

### 6.2.1 実験結果を用いた性能指標

本実験では，各アルゴリズム (PN, MPN, GS-MPN) の性能を比較するために，以下の指標を計測した．

- MeanOffset (px): ターゲット中心からの平均オフセット
- StdOffset (px): オフセットの標準偏差
- MeanAccel ( $\text{mm/s}^2$ ): 平均加速度
- StdAccel ( $\text{mm/s}^2$ ): 加速度の標準偏差

表 6.1 に，各アルゴリズムの実験結果を示す．また，図 6.2 に MeanOffset と StdOffset，図 6.3 に MeanAccel と StdAccel のグラフを示す．

表 6.1 : 各アルゴリズムの実験結果

Experiment	MeanOffset (px)	StdOffset (px)	MeanAccel ( $\text{mm/s}^2$ )	StdAccel ( $\text{mm/s}^2$ )
PN_data1	41.86	54.03	29.08	29109.58
PN_data2	59.89	64.74	128.51	27609.34
MPN_data1	102.42	57.05	202.61	27873.37
MPN_data2	36.15	51.27	55.08	11523.68
GS-MPN_data1	66.29	69.30	101.00	11177.16
GS-MPN_data2	48.94	69.98	50.11	21241.42



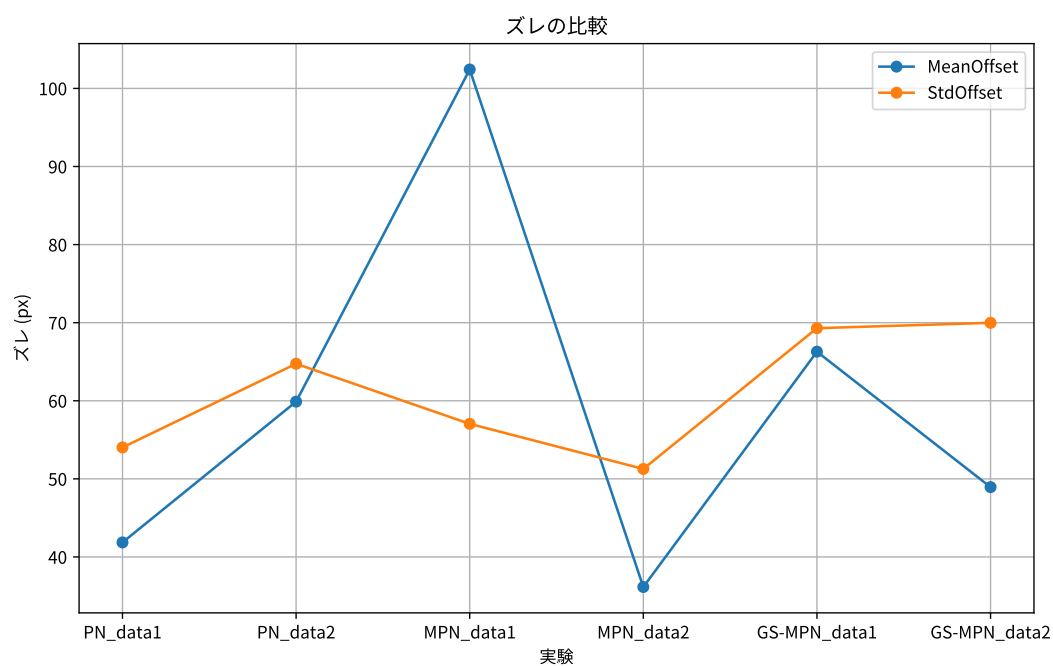


図 6.2 : MeanOffset および StdOffset の比較

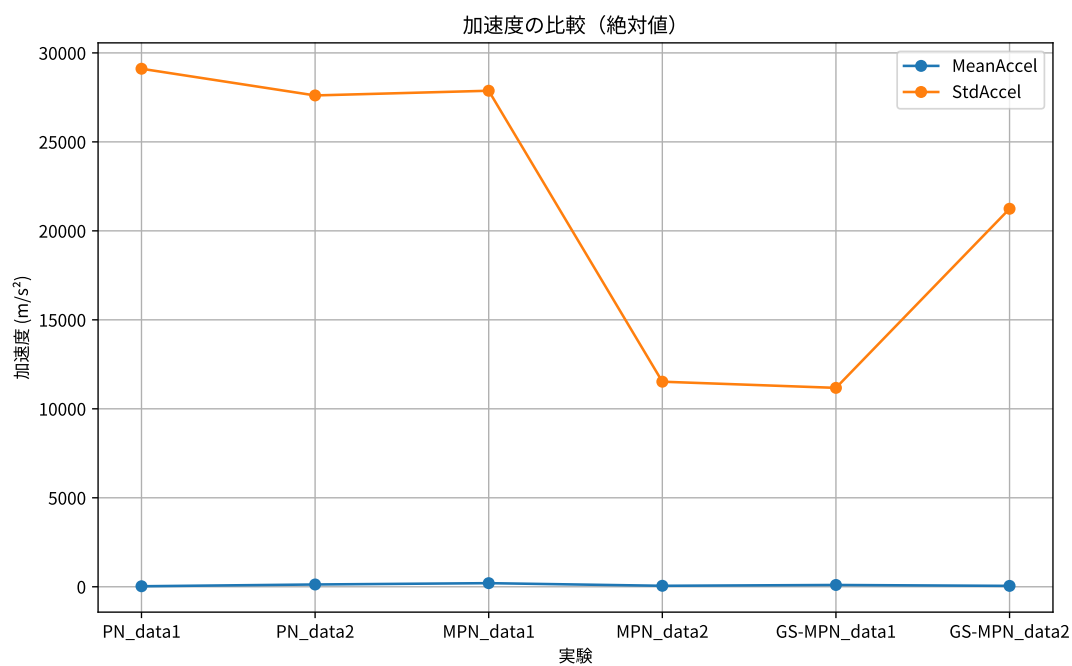


図 6.3 : MeanAccel および StdAccel の比較

### 6.2.2 追従性能 (MeanOffset と StdOffset)

追従性能を評価するために、MeanOffset (画面中心からのズレの平均値) と StdOffset (ズレの標準偏差) を用いた。この指標は、目標物が画面内で中心付近にどれだけ正確に保持されているかを示す。表 6.2 に各アルゴリズムの結果を示す。

PN は直線追従時に最も良好な MeanOffset を示したが、曲線追従ではズレが大きくなり安定性が低下した。一方で、MPN は逆の結果で曲線追従時にズレが減少し、直線追従時にズレが大きくなった。特に GS-MPN は、直線追従時と曲線追従時の両方でバランスの良い結果を示している。

表 6.2 : 追従性能の評価結果

アルゴリズム	MeanOffset (px)	StdOffset (px)
PN_data1	41.86	54.03
PN_data2	59.89	64.74
MPN_data1	102.42	57.05
MPN_data2	36.15	51.27
GS-MPN_data1	66.29	69.30
GS-MPN_data2	48.94	69.98

### 6.2.3 スムーズさ (MeanAccel と StdAccel)

スムーズさの指標として、MeanAccel (加速度の平均値) と StdAccel (加速度のばらつき) を用いた。これらはロボットの動作の安定性と滑らかさを評価する。表 6.3 に結果を示す。

PN は加速度のばらつき (StdAccel) が非常に大きく、急加速が多発する結果となった。MPN では曲線追従時に加速度が抑えられ、StdAccel が減少した。特に GS-MPN は、直線追従時と曲線追従時の両方でバランスの良い結果を示している。

表 6.3 : スムーズさの評価結果

アルゴリズム	MeanAccel (mm/s <sup>2</sup> )	StdAccel (mm/s <sup>2</sup> )
PN_data1	29.08	29109.58
PN_data2	128.51	27609.34
MPN_data1	202.61	27873.37
MPN_data2	55.08	11523.68
GS-MPN_data1	101.00	11177.16
GS-MPN_data2	50.11	21241.42

#### 6.2.4 視野内追従率 (InFrameRate)

視野内追従率 (InFrameRate) は、目標物がカメラの視野内に保持されている割合を示す。すべてのアルゴリズムで視野内追従率は 100% を記録し、目標物が常に視野内に維持されていることが確認された。

#### 6.2.5 総合評価

本実験では、各アルゴリズム (PN, MPN, GS-MPN) を対象に追従性能、スムーズさ、および視野内追従率を評価した。

まず、PN (Proportional Navigation) は直線追従性能において最も良好な結果を示した。MeanOffset が最小値を記録し、目標物を中心付近に保持する能力が高いことが確認された。一方で、StdOffset が増加する傾向があり、特に曲線追従時にはズレが顕著になることが課題として挙げられる。また、加速度のばらつき (StdAccel) が他のアルゴリズムに比べて極めて大きく、急激な動作が多発する結果となった。このことから、PN は直線的な動作には適しているものの、動的環境や急な方向転換を必要とする状況では不安定性が課題となる。

つぎに、MPN (Modified Proportional Navigation) は、PN と比較して曲線追従性能と動作の滑らかさが大幅に改善された。特に StdAccel の減少により、加速度のばらつきが抑制され、急激な加速や減速が少ない安定した動作が確認された。さらに、MPN\_data2 では、MeanOffset と StdOffset の値が他の条件よりも小さく、曲線追従における追従精度と安定性のバランスが良好であることが示されている。しかしながら、直線追従時には MeanAccel が最大値を記録しており、急加速が発生する傾向が見られた。これは、微分項の影響が過大である可能性を示唆しており、直進時の制御パラメータの最適化が求められる。

最後に、GS-MPN (Gain-Scheduled Modified Proportional Navigation) は、全体的に最もバランスの取れた性能を示した。動的微分ゲインを導入することで、急加速を抑制しながら安定した追従動作を実現していることが、MeanAccel および StdAccel の大幅な低下から確認された。さらに、曲線追従においてもズレが抑制され、MPN よりも安定性が向上している。一方で、MeanOffset が PN と比較してやや大きい値を示しており、直線追従精度のさらなる向上が課題として挙げられる。これには、動的微分ゲインの調整や、追加の制御項を導入することが効果的であると考えられる。

本実験の結果から、GS-MPN は滑らかな追従動作を必要とするシナリオにおいて最も有効であることが示唆された。直線および曲線追従の両方において安定性が向上し、加速度のばらつきが最小化されることで、ロボットの動作がより自然で滑らかになることが確認された。一方で、追従精度を向上させるための追加的な制御パラメータの調整や、動的環境における性能検証が今後の研究課題として残されている。

## 第 7 章 結語

本研究では、カメラのみを用いた人追従搬送ロボットの開発を目指し、Intel RealSense D435i から取得したデータを活用して人の位置を推定し、追従アルゴリズムに基づいてロボットを制御するシステムを構築した。特に、修正比例航法 (MPN) やゲインスケジューリング下修正比例航法 (GS-MPN) を用いることで、従来の比例航法 (PN) では対応が難しかった滑らかな動作や安定性の向上を図った。また、デプスカメラの画像データを用いて物理空間での人の座標を高精度に推定する仕組みを実装し、ロボット制御に反映させた。これにより、低コストなセンサーを使用したロボットシステムの可能性を示すことができた。

本研究の成果として、次の点が挙げられる。まず、PN、MPN、GS-MPN の 3 つの追従アルゴリズムを比較評価し、GS-MPN が最もバランスの取れた追従性能と動作の滑らかさを実現することを確認した。また、ロボットのハードウェア構成として、D435i を中心としたカメラシステム、STM32 を使用した下位制御層、および ROS2 による上位制御層を統合したシステムを構築し、それぞれの役割を分担させることで、スムーズなデータ処理と制御を可能にした。さらに、追従性能の評価では、GS-MPN が急加速やズレの少ない安定した追従を実現し、従来手法を上回る性能を示した。

一方で、本研究にはいくつかの課題も残された。まず、カメラの視野内での追従には成功したものの、遮蔽物が発生した場合や複数の対象物が存在する場合における動作安定性については十分に検証が行えていない。特定のターゲットを継続的に追従するための識別アルゴリズムが必要である。さらに、外乱環境下での耐性についても課題が残る。例えば、屋外での風や路面の不整に対する追従性能の検証は未実施であり、システムの実用化に向けてはこれらの外乱要因への対応が求められる。

また、本研究では比例航法を用いて追従制御を行っが、歩行経路の予測を導入することで、人の進行方向に先回りする制御を実現し、応答性を向上させることも今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- 1) 唐橋 需：農業用ロボットへの期待, 農業機械学会誌 57 巻 6 号 pp.145-150 (2021)
- 2) 有山 達也, 伊藤 和寿：農業用搬送台車の自立移動における課題と開発事例, システム/制御/情報 Vol.65, No.12, pp.489-494 (2021)
- 3) 佐賀大学プレスリリース: カメラ映像のみで経路を自律走行するロボット車両を開発, <https://www.saga-u.ac.jp/koho/press/2021120623170>, [Accessed: Dec. 25, 2024].
- 4) 伊藤, 阿部, 今西, 奥野, 辻, 三宅: 比例航法を用いた自立移動ロボットの誘導, 学術講演会前刷集 No.76-10 368-20105161, P13 (2010)
- 5) 出村 公成, 萩原 良信, 升谷 保博, タン ジェフリー トウ チュアン: ROS2 と Python で作って学ぶ AI ロボット入門, 講談社 (2018)
- 6) インテル® RealSense™ デプスカメラ D435i / : <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/sku/190004/intel-realsense-depth-camera-d435i/specifications.html>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .
- 7) STM32 Nucleo-64: <https://www.st.com/ja/evaluation-tools/nucleo-f446re.html>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .
- 8) AMT102: <https://www.sameskydevices.com/product/resource/amt10e-v.pdf>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .
- 9) ROS 2 Design Documents: <https://design.ros2.org/>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .
- 10) ROS 2 Documentation: <https://docs.ros.org/en/humble/index.html>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .
- 11) ultralytics: <https://docs.ultralytics.com/ja/yolov5/>, [Accessed: Dec. 25, 2024] .

## 謝 辞

この研究を遂行するにあたり，指導教員である高木太郎准教授には多大なご助言を賜り，深く感謝申し上げます．また，本研究にご協力くださった三宅君，上西君，広瀬君，中垣君，入谷君，斉藤さんにも厚くお礼申し上げます．

# 付 録

## A.1 下位レイヤープログラム

作成したプログラムを以下に示す．また，[https://github.com/Altairu/2\\_wheel\\_PID\\_control-CubeIED](https://github.com/Altairu/2_wheel_PID_control-CubeIED)に掲載している．

### A.1.1 メインプログラム

```
1  #include "main.h"
2  #include "motor_driver.h"
3  #include "encoder.h"
4  #include "serial_lib.h"
5
6  TIM_HandleTypeDef htim1;
7  TIM_HandleTypeDef htim12;
8  TIM_HandleTypeDef htim4;
9  TIM_HandleTypeDef htim8;
10 UART_HandleTypeDef huart2;
11
12 MotorDriver motorRight, motorLeft;
13 Encoder encoderRight, encoderLeft;
14 EncoderData encoderDataRight, encoderDataLeft;
15
16 #define WHEEL_DIAMETER_MM 365 //129.5
17 #define ENCODER_PULSES_PER_REV 4096
18
19 int16_t controlSignalRight = 0;
20 int16_t controlSignalLeft = 0;
21
22 void SystemClock_Config(void);
23 static void MX_GPIO_Init(void);
24 static void MX_USART2_UART_Init(void);
25 static void MX_TIM1_Init(void);
26 static void MX_TIM12_Init(void);
27 static void MX_TIM4_Init(void);
28 static void MX_TIM8_Init(void);
29
30 int main(void)
31 {
32     HAL_Init();
33     SystemClock_Config();
34     MX_GPIO_Init();
35     MX_USART2_UART_Init();
36     MX_TIM1_Init();
37     MX_TIM12_Init();
38     MX_TIM4_Init();
39     MX_TIM8_Init();
40
41     Serial_Init(&huart2);
42     MotorDriver_Init(&motorRight, &htim12, TIM_CHANNEL_1, &htim12, TIM_CHANNEL_2);
43     MotorDriver_Init(&motorLeft, &htim1, TIM_CHANNEL_4, &htim1, TIM_CHANNEL_1);
44     Encoder_Init(&encoderRight, &htim8, WHEEL_DIAMETER_MM, ENCODER_PULSES_PER_REV, 10);
45     Encoder_Init(&encoderLeft, &htim4, WHEEL_DIAMETER_MM, ENCODER_PULSES_PER_REV, 10);
```

```

46
47     uint32_t lastSendTime = HAL_GetTick();
48
49     while (1)
50     {
51         /* からの制御信号を受信 PC */
52         int16_t receivedData[2];
53         if (Serial_ReceiveData(&huart2, receivedData, 2))
54         {
55             controlSignalRight = receivedData[0];
56             controlSignalLeft = receivedData[1];
57
58             MotorDriver_setSpeed(&motorRight, -1* controlSignalRight);
59             MotorDriver_setSpeed(&motorLeft, controlSignalLeft);
60         }
61
62         /* エンコーダーデータの送信 (10ごとに送信) ms */
63         if (HAL_GetTick() - lastSendTime >= 10)
64         {
65             lastSendTime = HAL_GetTick();
66
67             /* エンコーダーの速度データを更新*/
68             Encoder_Interrupt(&encoderRight, &encoderDataRight);
69             Encoder_Interrupt(&encoderLeft, &encoderDataLeft);
70
71             /* エンコーダー速度を送信*/
72             int16_t feedbackData[2] = {(int16_t)encoderDataRight.velocity, -1*(int16_t)encoderDataLeft.
                velocity};
73             Serial_SendData(&huart2, feedbackData, 2);
74         }
75     }
76 }
77
78
79 /**
80  * @brief System Clock Configuration
81  * @retval None
82  */
83 void SystemClock_Config(void)
84 {
85     RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
86     RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
87
88     /** Configure the main internal regulator output voltage
89     */
90     __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
91     __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE3);
92
93     /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
94     * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
95     */
96     RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
97     RCC_OscInitStruct.HSISState = RCC_HSI_ON;
98     RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue = RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
99     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
100    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;
101    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 16;
102    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;
103    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV4;

```



```

104     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 2;
105     RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;
106     if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
107     {
108         Error_Handler();
109     }
110
111     /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
112     */
113     RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYCLK
114                                   |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
115     RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
116     RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
117     RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
118     RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
119
120     if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
121     {
122         Error_Handler();
123     }
124 }
125
126 /**
127  * @brief TIM1 Initialization Function
128  * @param None
129  * @retval None
130  */
131 static void MX_TIM1_Init(void)
132 {
133
134     /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 0 */
135
136     /* USER CODE END TIM1_Init 0 */
137
138     TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
139     TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};
140     TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig = {0};
141
142     /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 1 */
143
144     /* USER CODE END TIM1_Init 1 */
145     htim1.Instance = TIM1;
146     htim1.Init.Prescaler = 0;
147     htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
148     htim1.Init.Period = 65535;
149     htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
150     htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
151     htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
152     if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)
153     {
154         Error_Handler();
155     }
156     sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
157     sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
158     if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig) != HAL_OK)
159     {
160         Error_Handler();
161     }
162     sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;

```

```

163     sConfigOC.Pulse = 0;
164     sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
165     sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
166     sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
167     sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
168     sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
169     if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK)
170     {
171         Error_Handler();
172     }
173     if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_4) != HAL_OK)
174     {
175         Error_Handler();
176     }
177     sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
178     sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
179     sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
180     sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 0;
181     sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
182     sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
183     sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput = TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
184     if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig) != HAL_OK)
185     {
186         Error_Handler();
187     }
188     /* USER CODE BEGIN TIM1_Init 2 */
189
190     /* USER CODE END TIM1_Init 2 */
191     HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);
192
193 }
194
195 /**
196  * @brief TIM4 Initialization Function
197  * @param None
198  * @retval None
199  */
200 static void MX_TIM4_Init(void)
201 {
202
203     /* USER CODE BEGIN TIM4_Init 0 */
204
205     /* USER CODE END TIM4_Init 0 */
206
207     TIM_Encoder_InitTypeDef sConfig = {0};
208     TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
209
210     /* USER CODE BEGIN TIM4_Init 1 */
211
212     /* USER CODE END TIM4_Init 1 */
213     htim4.Instance = TIM4;
214     htim4.Init.Prescaler = 0;
215     htim4.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
216     htim4.Init.Period = 65535;
217     htim4.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
218     htim4.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
219     sConfig.EncoderMode = TIM_ENCODERMODE_TI1;
220     sConfig.IC1Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
221     sConfig.IC1Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;

```

```

222     sConfig.IC1Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
223     sConfig.IC1Filter = 0;
224     sConfig.IC2Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
225     sConfig.IC2Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
226     sConfig.IC2Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
227     sConfig.IC2Filter = 0;
228     if (HAL_TIM_Encoder_Init(&htim4, &sConfig) != HAL_OK)
229     {
230         Error_Handler();
231     }
232     sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
233     sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
234     if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim4, &sMasterConfig) != HAL_OK)
235     {
236         Error_Handler();
237     }
238     /* USER CODE BEGIN TIM4_Init 2 */
239
240     /* USER CODE END TIM4_Init 2 */
241
242 }
243
244 /**
245  * @brief TIM8 Initialization Function
246  * @param None
247  * @retval None
248  */
249 static void MX_TIM8_Init(void)
250 {
251
252     /* USER CODE BEGIN TIM8_Init 0 */
253
254     /* USER CODE END TIM8_Init 0 */
255
256     TIM_Encoder_InitTypeDef sConfig = {0};
257     TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
258
259     /* USER CODE BEGIN TIM8_Init 1 */
260
261     /* USER CODE END TIM8_Init 1 */
262     htim8.Instance = TIM8;
263     htim8.Init.Prescaler = 0;
264     htim8.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
265     htim8.Init.Period = 65535;
266     htim8.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
267     htim8.Init.RepetitionCounter = 0;
268     htim8.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
269     sConfig.EncoderMode = TIM_ENCODERMODE_TI1;
270     sConfig.IC1Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
271     sConfig.IC1Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
272     sConfig.IC1Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
273     sConfig.IC1Filter = 0;
274     sConfig.IC2Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
275     sConfig.IC2Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
276     sConfig.IC2Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
277     sConfig.IC2Filter = 0;
278     if (HAL_TIM_Encoder_Init(&htim8, &sConfig) != HAL_OK)
279     {
280         Error_Handler();

```

```

281     }
282     sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
283     sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
284     if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim8, &sMasterConfig) != HAL_OK)
285     {
286         Error_Handler();
287     }
288     /* USER CODE BEGIN TIM8_Init 2 */
289
290     /* USER CODE END TIM8_Init 2 */
291
292 }
293
294 /**
295  * @brief TIM12 Initialization Function
296  * @param None
297  * @retval None
298  */
299 static void MX_TIM12_Init(void)
300 {
301
302     /* USER CODE BEGIN TIM12_Init 0 */
303
304     /* USER CODE END TIM12_Init 0 */
305
306     TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};
307
308     /* USER CODE BEGIN TIM12_Init 1 */
309
310     /* USER CODE END TIM12_Init 1 */
311     htim12.Instance = TIM12;
312     htim12.Init.Prescaler = 0;
313     htim12.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
314     htim12.Init.Period = 65535;
315     htim12.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
316     htim12.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
317     if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim12) != HAL_OK)
318     {
319         Error_Handler();
320     }
321     sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
322     sConfigOC.Pulse = 0;
323     sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
324     sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
325     if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim12, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK)
326     {
327         Error_Handler();
328     }
329     if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim12, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) != HAL_OK)
330     {
331         Error_Handler();
332     }
333     /* USER CODE BEGIN TIM12_Init 2 */
334
335     /* USER CODE END TIM12_Init 2 */
336     HAL_TIM_MspPostInit(&htim12);
337
338 }
339

```

```

340 /**
341  * @brief USART2 Initialization Function
342  * @param None
343  * @retval None
344  */
345 static void MX_USART2_UART_Init(void)
346 {
347
348     /* USER CODE BEGIN USART2_Init 0 */
349
350     /* USER CODE END USART2_Init 0 */
351
352     /* USER CODE BEGIN USART2_Init 1 */
353
354     /* USER CODE END USART2_Init 1 */
355     huart2.Instance = USART2;
356     huart2.Init.BaudRate = 115200;
357     huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
358     huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
359     huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
360     huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
361     huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
362     huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
363     if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
364     {
365         Error_Handler();
366     }
367     /* USER CODE BEGIN USART2_Init 2 */
368
369     /* USER CODE END USART2_Init 2 */
370
371 }
372
373 /**
374  * @brief GPIO Initialization Function
375  * @param None
376  * @retval None
377  */
378 static void MX_GPIO_Init(void)
379 {
380     GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
381     /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_1 */
382     /* USER CODE END MX_GPIO_Init_1 */
383
384     /* GPIO Ports Clock Enable */
385     __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
386     __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
387     __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
388     __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
389
390     /*Configure GPIO pin Output Level */
391     HAL_GPIO_WritePin(LED_GPIO_Port, LED_Pin, GPIO_PIN_RESET);
392
393     /*Configure GPIO pin : B1_Pin */
394     GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
395     GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
396     GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
397     HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
398

```

```

399     /*Configure GPIO pin : LED_Pin */
400     GPIO_InitStruct.Pin = LED_Pin;
401     GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
402     GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
403     GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
404     HAL_GPIO_Init(LED_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
405
406     /* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_2 */
407     /* USER CODE END MX_GPIO_Init_2 */
408 }
409
410     /* USER CODE BEGIN 4 */
411
412     /* USER CODE END 4 */
413
414     /**
415      * @brief This function is executed in case of error occurrence.
416      * @retval None
417      */
418     void Error_Handler(void)
419     {
420         /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
421         /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
422         __disable_irq();
423         while (1)
424         {
425         }
426         /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
427     }
428
429     #ifdef USE_FULL_ASSERT
430     /**
431      * @brief Reports the name of the source file and the source line number
432      * where the assert_param error has occurred.
433      * @param file: pointer to the source file name
434      * @param line: assert_param error line source number
435      * @retval None
436      */
437     void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
438     {
439         /* USER CODE BEGIN 6 */
440         /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
441          ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
442         /* USER CODE END 6 */
443     }
444     #endif /* USE_FULL_ASSERT */

```

Code A.17: メインコード (main.c)

### A.1.2 エンコーダーライブラリ

```

1     // kinematics.h
2
3     #ifndef KINEMATICS_H
4     #define KINEMATICS_H
5
6     typedef enum {

```

```

7     OMNI_3,
8     OMNI_4,
9     MEKANUM
10 } WheelMode;
11
12 typedef struct {
13     float robot_diameter; // ロボットの直径
14     float wheel_radius; // ホイールの半径
15     WheelMode mode; // 動作モード
16 } Kinematics;
17
18 // 初期化関数
19 void Kinematics_Init(Kinematics *kinematics, float robot_diameter, float wheel_radius, WheelMode mode);
20
21 // モーターの目標速度を計算する関数
22 void Kinematics_GetTargetSpeeds(Kinematics *kinematics, float lx, float ly, float rx, float *speedFR,
23     float *speedFL, float *speedBR, float *speedBL);
24
25 #endif // KINEMATICS_H

```

Code A.18: エンコーダーライブラリ (encoder.h)

```

1 #include "encoder.h"
2
3 #define TIMER_MAX_COUNT 65535 // タイマーの最大値 (16 ビットタイマーの場合)
4
5 void Encoder_Init(Encoder* encoder, TIM_HandleTypeDef* htim, double diameter, int ppr, int period)
6 {
7     encoder->htim = htim;
8     encoder->ppr = ppr;
9     encoder->diameter = diameter;
10    encoder->period = period;
11    encoder->limit = 0;
12    encoder->before_rot = 0.0;
13
14    encoder->htim->Init.Prescaler = 0;
15    encoder->htim->Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
16    encoder->htim->Init.Period = TIMER_MAX_COUNT;
17    encoder->htim->Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
18
19    TIM_Encoder_InitTypeDef encoder_init;
20    encoder_init.EncoderMode = TIM_ENCODERMODE_TI12;
21    encoder_init.IC1Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
22    encoder_init.IC1Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
23    encoder_init.IC1Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
24    encoder_init.IC1Filter = 0;
25    encoder_init.IC2Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
26    encoder_init.IC2Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
27    encoder_init.IC2Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
28    encoder_init.IC2Filter = 0;
29
30    HAL_TIM_Encoder_Init(htim, &encoder_init);
31    HAL_TIM_Encoder_Start(htim, TIM_CHANNEL_ALL);
32    __HAL_TIM_SET_COUNTER(htim, TIMER_MAX_COUNT / 2); // カウンタを中央に設定
33 }
34
35 int Encoder_Read(Encoder* encoder)
36 {
37     int16_t count = (int16_t)(__HAL_TIM_GET_COUNTER(encoder->htim) - TIMER_MAX_COUNT / 2);

```

```

38     return count;
39 }
40
41 void Encoder_Interrupt(Encoder* encoder, EncoderData* encoder_data)
42 {
43     int count = Encoder_Read(encoder);
44
45     encoder_data->count = count;
46     encoder_data->rot = count / (double)encoder->ppr;
47     encoder_data->deg = encoder_data->rot * 360.0;
48     encoder_data->distance = encoder_data->rot * (PI * encoder->diameter);
49
50     encoder_data->rps = (encoder_data->rot - encoder->before_rot) / (encoder->period * 0.001);
51     encoder_data->velocity = encoder_data->rps * PI * encoder->diameter;
52
53     encoder->before_rot = encoder_data->rot;
54 }
55
56 void Encoder_Reset(Encoder* encoder)
57 {
58     __HAL_TIM_SET_COUNTER(encoder->htim, TIMER_MAX_COUNT / 2); // カウンタを中央にリセット
59 }

```

Code A.19: エンコーダーライブラリ (encoder.c)

### A.1.3 モータドライバライブラリ

```

1  #ifndef MOTOR_DRIVER_H
2  #define MOTOR_DRIVER_H
3
4  #include "stm32f4xx_hal.h"
5
6  typedef struct {
7      TIM_HandleTypeDef* htimA; // タイマー A
8      uint32_t channelA; // タイマーチャンネル A
9      TIM_HandleTypeDef* htimB; // タイマー B
10     uint32_t channelB; // タイマーチャンネル B
11 } MotorDriver;
12
13 // モータドライバを初期化する関数
14 void MotorDriver_Init(MotorDriver* motor, TIM_HandleTypeDef* htimA, uint32_t channelA,
15                      TIM_HandleTypeDef* htimB, uint32_t channelB);
16
17 // モーターの速度を設定する関数
18 void MotorDriver_setSpeed(MotorDriver* motor, int speed);
19
20 #endif /* MOTOR_DRIVER_H */

```

Code A.20: モータドライバライブラリ (motor\_driver.h)

```

1  #include "motor_driver.h"
2
3  // 初期化関数
4  void MotorDriver_Init(MotorDriver* motor, TIM_HandleTypeDef* htimA, uint32_t channelA,
5                      TIM_HandleTypeDef* htimB, uint32_t channelB) {
6      motor->htimA = htimA;
7      motor->channelA = channelA;

```



```

8      motor->htimB = htimB;
9      motor->channelB = channelB;
10
11     // PWM 開始
12     HAL_TIM_PWM_Start(htimA, channelA);
13     HAL_TIM_PWM_Start(htimB, channelB);
14 }
15
16 // 速度設定関数
17 void MotorDriver_setSpeed(MotorDriver *motor, int speed) {
18     int pwm_value;
19     if (speed > 100) speed = 99;
20     if (speed < -100) speed = -99;
21
22     if (speed > 0) {
23         pwm_value = (speed * __HAL_TIM_GET_AUTORELOAD(motor->htimA)) / 100;
24         __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimA, motor->channelA, pwm_value);
25         __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimB, motor->channelB, 0);
26     } else {
27         pwm_value = (-speed * __HAL_TIM_GET_AUTORELOAD(motor->htimA)) / 100;
28         __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimA, motor->channelA, 0);
29         __HAL_TIM_SET_COMPARE(motor->htimB, motor->channelB, pwm_value);
30     }
31 }

```

Code A.21: モータドライバーライブラリ (motor\_driver.c)

#### A.1.4 シリアル通信ライブラリ

```

1  #ifndef SERIAL_LIB_H
2  #define SERIAL_LIB_H
3
4  #include "main.h"
5
6  // シリアルヘッダーの定義
7  #define SERIAL_HEADER1 0xA5
8  #define SERIAL_HEADER2 0xA5
9
10 // 関数プロトタイプ
11 void Serial_Init(UART_HandleTypeDef *huart);
12 void Serial_SendData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count);
13 uint8_t Serial_ReceiveData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count);
14
15 #endif // SERIAL_LIB_H

```

Code A.22: シリアル通信ライブラリ (serial\_lib.h)

```

1  #include "serial_lib.h"
2  #include <stdlib.h>
3
4  // シリアル通信の初期化
5  void Serial_Init(UART_HandleTypeDef *huart) {
6      HAL_UART_Init(huart);
7  }
8
9  // 可変長データの送信関数
10 void Serial_SendData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count) {

```

```

11     uint8_t buffer_size = 2 + data_count * 2;
12     uint8_t *buffer = (uint8_t *)malloc(buffer_size);
13
14     buffer[0] = SERIAL_HEADER1;
15     buffer[1] = SERIAL_HEADER2;
16
17     for (uint8_t i = 0; i < data_count; i++) {
18         buffer[2 + i * 2] = (data[i] >> 8) & 0xFF;
19         buffer[3 + i * 2] = data[i] & 0xFF;
20     }
21
22     HAL_UART_Transmit(huart, buffer, buffer_size, HAL_MAX_DELAY);
23     free(buffer);
24 }
25
26 // 可変長データの受信関数
27 uint8_t Serial_ReceiveData(UART_HandleTypeDef *huart, int16_t *data, uint8_t data_count) {
28     uint8_t buffer_size = 2 + data_count * 2;
29     uint8_t *buffer = (uint8_t *)malloc(buffer_size);
30
31     if (HAL_UART_Receive(huart, buffer, buffer_size, HAL_MAX_DELAY) == HAL_OK) {
32         if (buffer[0] == SERIAL_HEADER1 && buffer[1] == SERIAL_HEADER2) {
33             for (uint8_t i = 0; i < data_count; i++) {
34                 data[i] = (buffer[2 + i * 2] << 8) | buffer[3 + i * 2];
35             }
36             free(buffer);
37             return 1; // 正常受信
38         }
39     }
40     free(buffer);
41     return 0; // エラー
42 }

```

Code A.23: シリアル通信ライブラリ (serial\_lib.c)

## A.2 上位レイヤープログラム

作成したプログラムを以下に示す。また、[https://github.com/Altairu/Person\\_Tracking\\_Roboware](https://github.com/Altairu/Person_Tracking_Roboware) に掲載している。

```

1  import rclpy
2  from rclpy.node import Node
3  from std_msgs.msg import Float32MultiArray
4
5  class PIDController:
6      def __init__(self, kp, ki, kd):
7          self.kp = kp
8          self.ki = ki
9          self.kd = kd
10         self.prev_error = 0.0
11         self.integral = 0.0
12
13     def compute(self, target, current, dt):
14         if target == 0.0 and current == 0.0:
15             self.reset()
16             return 0.0 # 特別条件: 目標値と現在値がの場合は出力も 00
17

```

```

18     error = target - current
19     self.integral += error * dt
20     derivative = (error - self.prev_error) / dt
21     self.prev_error = error
22
23     return self.kp * error + self.ki * self.integral + self.kd * derivative
24
25     def reset(self):
26         self.prev_error = 0.0
27         self.integral = 0.0
28
29     class PIDNode(Node):
30         def __init__(self):
31             super().__init__('PID_node')
32
33             self.create_subscription(Float32MultiArray, 'wheel_targets', self.target_callback, 10)
34             self.create_subscription(Float32MultiArray, 'wheel_feedback', self.feedback_callback, 10)
35             self.pub = self.create_publisher(Float32MultiArray, 'wheel_controls', 10)
36
37             self.pid_right = PIDController(kp=0.003, ki=0.00005, kd=0.0)
38             self.pid_left = PIDController(kp=0.003, ki=0.00005, kd=0.0)
39
40             self.target_right = 0.0
41             self.target_left = 0.0
42             self.current_right = 0.0
43             self.current_left = 0.0
44
45             self.create_timer(0.1, self.control_loop)
46             self.last_time = self.get_clock().now()
47
48         def target_callback(self, msg):
49             if len(msg.data) == 2:
50                 self.target_right = msg.data[0]
51                 self.target_left = msg.data[1]
52             else:
53                 self.get_logger().error(f"Invalid data received in 'wheel_targets'. Expected 2 floats, got {
54                     len(msg.data)}")
55
56         def feedback_callback(self, msg):
57             if len(msg.data) == 2:
58                 self.current_right = msg.data[0]
59                 self.current_left = msg.data[1]
60             else:
61                 self.get_logger().error(f"Invalid data received in 'wheel_feedback'. Expected 2 floats, got {
62                     len(msg.data)}")
63
64         def control_loop(self):
65             current_time = self.get_clock().now()
66             dt = (current_time - self.last_time).nanoseconds / 1e9
67             self.last_time = current_time
68
69             control_signal_right = self.pid_right.compute(self.target_right, self.current_right, dt)
70             control_signal_left = self.pid_left.compute(self.target_left, self.current_left, dt)
71
72             # 制御信号が有効な範囲内か検証
73             if not (self.is_valid_float(control_signal_right) and self.is_valid_float(control_signal_left)):
74                 self.get_logger().error("Control signals contain invalid values. Skipping this loop.")
75                 return

```

```

75     # 制御信号をパブリッシュ
76     control_msg = Float32MultiArray()
77     control_msg.data = [float(control_signal_right), float(control_signal_left)]
78     self.pub.publish(control_msg)
79
80     # デバッグ情報を出力
81     self.get_logger().info(
82         f"Target: Right={self.target_right}, Left={self.target_left} | "
83         f"Current: Right={self.current_right}, Left={self.current_left} | "
84         f"Control: Right={control_signal_right}, Left={control_signal_left}"
85     )
86
87     def is_valid_float(self, value):
88         try:
89             float_value = float(value)
90             return float('-inf') < float_value < float('inf') # 有限数の検証
91         except ValueError:
92             return False
93
94     def main(args=None):
95         rclpy.init(args=args)
96         node = PIDNode()
97         rclpy.spin(node)
98         rclpy.shutdown()
99
100     if __name__ == '__main__':
101         main()

```

Code A.24: PID\_node.py

```

1     import rclpy
2     from rclpy.node import Node
3     from std_msgs.msg import Float32MultiArray
4     import pyrealsense2 as rs
5     import numpy as np
6     import torch
7     import cv2
8
9     class RealSenseNode(Node):
10         def __init__(self):
11             super().__init__('realsense_node')
12             self.publisher = self.create_publisher(Float32MultiArray, 'camera_data', 10)
13
14             # 設定 RealSense
15             self.pipeline = rs.pipeline()
16             config = rs.config()
17             config.enable_stream(rs.stream.depth, 640, 480, rs.format.z16, 30)
18             config.enable_stream(rs.stream.color, 640, 480, rs.format.bgr8, 30)
19             self.pipeline.start(config)
20
21             # モデルロード YOLO
22             self.model = torch.hub.load('/home/altair/Roboware/ultralytics/yolov5', 'custom',
23                                         path='/home/altair/Roboware/ultralytics/yolov5/yolov5s.pt',
24                                         source='local')
25             self.create_timer(0.1, self.process_frames)
26
27             # フィルタ用変数
28             self.previous_distance = 0.0 # 前回の距離値
29             self.distance_history = [] # 距離履歴

```

```

30     self.history_size = 5 # 移動平均履歴の最大サイズ
31
32     def process_frames(self):
33         try:
34             frames = self.pipeline.wait_for_frames()
35             depth_frame = frames.get_depth_frame()
36             color_frame = frames.get_color_frame()
37             if not depth_frame or not color_frame:
38                 return
39
40             depth_image = np.asanyarray(depth_frame.get_data())
41             color_image = np.asanyarray(color_frame.get_data())
42             results = self.model(color_image)
43
44             for result in results.xyxy[0]: # 検出結果をループ
45                 box, conf, cls = result[:4], result[4], int(result[5])
46                 if cls == 0: # クラス(人物)のみ処理
47                     x1, y1, x2, y2 = map(int, box)
48                     center_x, center_y = (x1 + x2) // 2, (y1 + y2) // 2
49
50                     raw_distance = depth_frame.get_distance(center_x, center_y)
51                     offset_x = center_x - (color_image.shape[1] // 2)
52
53                     # 距離の処理
54                     filtered_distance = self.filter_distance(raw_distance)
55
56                     # Publish camera data
57                     msg = Float32MultiArray()
58                     msg.data = [filtered_distance, float(offset_x)]
59                     self.publisher.publish(msg)
60
61                     self.get_logger().info(f"Published camera data: Distance={filtered_distance:.2f},
62                                             Offset={offset_x}")
63
64                     # 画面に検出結果を描画
65                     cv2.rectangle(color_image, (x1, y1), (x2, y2), (0, 255, 0), 2)
66                     cv2.putText(color_image, f"Distance: {filtered_distance:.2f}m", (x1, y1 - 10),
67                                 cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 255, 0), 2)
68                     cv2.putText(color_image, f"Offset: {offset_x}", (x1, y1 - 30),
69                                 cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 255, 0), 2)
70
71                     self.previous_distance = filtered_distance # 前回の距離を更新
72                     break
73
74                     # カメラ映像を表示
75                     cv2.imshow("RealSense Detection", color_image)
76                     cv2.waitKey(1)
77
78             except Exception as e:
79                 self.get_logger().error(f"Error processing frames: {str(e)}")
80
81     def filter_distance(self, current_distance):
82         """ 距離が近づく場合はそのまま、遠ざかる場合はフィルタリングする。
83
84         """
85         if current_distance == 0.0: # 無効値は無視
86             return self.previous_distance
87
88         if current_distance < self.previous_distance:

```

```

88         # 近づいている場合: そのままの値を使用
89         self.distance_history = [current_distance] # 履歴をリセット
90         return current_distance
91     else:
92         # 遠ざかる場合: 移動平均フィルタを適用
93         self.distance_history.append(current_distance)
94         if len(self.distance_history) > self.history_size:
95             self.distance_history.pop(0) # 古い値を削除
96         return sum(self.distance_history) / len(self.distance_history)
97
98     def destroy_node(self):
99         self.pipeline.stop()
100         cv2.destroyAllWindows()
101         super().destroy_node()
102
103 def main(args=None):
104     rclpy.init(args=args)
105     node = RealSenseNode()
106     rclpy.spin(node)
107     node.destroy_node()
108     rclpy.shutdown()
109
110 if __name__ == '__main__':
111     main()

```

Code A.25: RealSense\_node.py

```

1  import rclpy
2  from rclpy.node import Node
3  from std_msgs.msg import String, Float32MultiArray
4  import csv
5  import os
6  import math
7
8  class RobowareNode(Node):
9      def __init__(self):
10         super().__init__('Roboware_node')
11         self.subscription = self.create_subscription(
12             String,
13             'web_socket_pub',
14             self.listener_callback,
15             10
16         )
17         self.position_subscription = self.create_subscription(
18             Float32MultiArray,
19             'camera_data',
20             self.position_callback,
21             10
22         )
23         self.publisher = self.create_publisher(Float32MultiArray, 'wheel_targets', 10)
24
25         self.mode = 0 # Initial mode (Control: 0, Follow: 1)
26         self.target_right = 0.0
27         self.target_left = 0.0
28         self.person_distance = 0.0
29         self.person_offset = 0.0
30         self.previous_offset = 0.0 # 前回のオフセット
31         self.kp_v = 5000.0 # Proportional gain for velocity
32         self.kp_omega = 50.0 # Proportional gain for angular velocity

```

```

33     self.kd_lambda = 0.1 # 最大微分ゲイン
34     self.a = 0.1 # 動的微分ゲイン調整パラメータ
35     self.navigation_constant = 2.0 # Proportional navigation constant (N)
36     self.dt = 0.1 # サンプリング間隔 (秒)
37
38     # ファイルの設定 CSV
39     self.csv_file = "new_MPN_data.csv"
40     self.initialize_csv()
41
42     # タイマー設定
43     self.timer = self.create_timer(0.1, self.record_data) # 0.1 秒ごとに実行
44     self.recording = False # 記録中フラグ
45
46     def initialize_csv(self):
47         """CSV ファイルを初期化し、ヘッダーを記録"""
48         if not os.path.exists(self.csv_file):
49             with open(self.csv_file, mode='w', newline='') as file:
50                 writer = csv.writer(file)
51                 writer.writerow([
52                     'Time', 'PersonDistance', 'PersonOffset', 'V', 'Omega',
53                     'TargetRight', 'TargetLeft'
54                 ])
55
56     def save_to_csv(self, time, distance, offset, v, omega, right_speed, left_speed):
57         """データを CSV ファイルに追記"""
58         with open(self.csv_file, mode='a', newline='') as file:
59             writer = csv.writer(file)
60             writer.writerow([time, distance, offset, v, omega, right_speed, left_speed])
61
62     def listener_callback(self, msg):
63         try:
64             data = list(map(float, msg.data.split(',')))
65             if len(data) != 6:
66                 self.get_logger().warn("Received invalid data length.")
67                 return
68
69             mode, rx, ry, lx, ly, stop = data
70             self.mode = int(mode)
71
72             if stop == 1:
73                 self.target_right = 0.0
74                 self.target_left = 0.0
75                 self.recording = False # 記録停止
76                 self.get_logger().info("Emergency stop activated.")
77             elif self.mode == 0: # Control Mode 手動モード ()
78                 V = float((int(ry) - 106) * 200)
79                 omega = float(-1 * (int(lx) - 102) * 100)
80                 self.target_right = V + omega
81                 self.target_left = V - omega
82                 self.recording = False # 記録停止
83             elif self.mode == 1: # Follow Mode 画像処理モード ()
84                 self.follow_person()
85                 self.recording = True # 記録開始
86
87             # Publish the wheel targets
88             self.publish_targets()
89
90         except ValueError as e:
91             self.get_logger().error(f"Error parsing message: {e}")

```

```

92
93     def position_callback(self, msg):
94         if len(msg.data) == 2: # Assuming message contains [distance, offset]
95             self.person_distance = msg.data[0]
96             self.person_offset = msg.data[1]
97             self.get_logger().info(f"Updated position: Distance={self.person_distance}, Offset={self.
                person_offset}")
98         else:
99             self.get_logger().warn("Invalid position data received.")
100
101     def follow_person(self):
102         # 修正比例航法 (MPN)
103         distance = max(self.person_distance, 1.0)
104         offset_rate = (self.person_offset - self.previous_offset) / self.dt # 偏差角速度
105
106         # 動的微分ゲイン
107         dynamic_kd = self.kd_lambda * (1 - math.exp(-self.a * abs(offset_rate))) / (1 + math.exp(-self.a *
                abs(offset_rate)))
108
109         # 直進速度
110         V = self.kp_v * (distance - 1.0)
111
112         # 修正された角速度
113         omega = (
114             -1 * self.navigation_constant * self.kp_omega * self.person_offset / distance +
115             dynamic_kd * offset_rate
116         )
117
118         V = max(min(V, 50000.0), -50000.0) # Max forward/backward velocity
119         omega = max(min(omega, 30000.0), -30000.0) # Max rotational velocity
120
121         self.current_v = V
122         self.current_omega = omega
123
124         # Calculate target velocities for left and right wheels
125         self.target_right = V + omega
126         self.target_left = V - omega
127
128         # 前回の偏差を更新
129         self.previous_offset = self.person_offset
130
131         self.get_logger().info(f"Follow mode | Distance={self.person_distance}, Offset={self.person_offset
                }, OffsetRate={offset_rate} | Kd={dynamic_kd:.2f} | V={V}, Omega={omega} | Target Right={self
                .target_right}, Left={self.target_left}")
132
133     def publish_targets(self):
134         msg = Float32MultiArray()
135         msg.data = [self.target_right, self.target_left]
136         self.publisher.publish(msg)
137
138     def record_data(self):
139         """0.1 秒ごとにデータをCSV に記録"""
140         if self.recording: # 記録中のみデータを保存
141             current_time = self.get_clock().now().to_msg().sec # 現在時刻を秒単位で取得
142             self.save_to_csv(
143                 current_time,
144                 self.person_distance,
145                 self.person_offset,
146                 self.current_v,

```



```

147         self.current_omega,
148         self.target_right,
149         self.target_left
150     )
151
152     def main(args=None):
153         rclpy.init(args=args)
154         node = RobowareNode()
155         rclpy.spin(node)
156         node.destroy_node()
157         rclpy.shutdown()
158
159     if __name__ == '__main__':
160         main()

```

Code A.26: Roboware\_node.py

```

1     import rclpy
2     from rclpy.node import Node
3     from std_msgs.msg import Float32MultiArray
4     import serial
5     import struct
6
7     class SerialReadNode(Node):
8         def __init__(self):
9             super().__init__('serial_read_node')
10
11             # シリアルポート設定
12             self.serial_port = "/dev/ttyACM0"
13             self.baudrate = 115200
14             self.timeout = 0.01
15
16             try:
17                 self.ser = serial.Serial(self.serial_port, self.baudrate, timeout=self.timeout)
18                 self.get_logger().info(f"Connected to serial port: {self.serial_port}")
19             except serial.SerialException as e:
20                 self.get_logger().error(f"Failed to connect to serial port: {e}")
21                 self.ser = None
22
23             # パブリッシャ設定
24             self.publisher = self.create_publisher(Float32MultiArray, 'wheel_feedback', 10)
25
26             # タイマーで定期的にデータを読む
27             self.timer = self.create_timer(0.01, self.read_from_serial)
28
29     def read_from_serial(self):
30         if self.ser is not None and self.ser.in_waiting >= 6:
31             try:
32                 received_data = self.ser.read(6)
33                 if len(received_data) == 6 and received_data[0] == 0xA5 and received_data[1] == 0xA5:
34                     _, _, right_speed, left_speed = struct.unpack('>BBhh', received_data)
35                     msg = Float32MultiArray()
36                     msg.data = [float(right_speed), float(left_speed)]
37                     self.publisher.publish(msg)
38
39                 # デバッグログ
40                 self.get_logger().info(f"Received from serial: Right={right_speed}, Left={left_speed}")
41             else:
42                 self.get_logger().error("Invalid data format received from serial.")

```

```

43         except Exception as e:
44             self.get_logger().error(f"Error reading data from serial: {e}")
45
46     def main(args=None):
47         rclpy.init(args=args)
48         node = SerialReadNode()
49         rclpy.spin(node)
50         rclpy.shutdown()
51
52     if __name__ == '__main__':
53         main()

```

Code A.27: serial\_read\_node.py

```

1  import rclpy
2  from rclpy.node import Node
3  from std_msgs.msg import Float32MultiArray
4  import serial
5  import struct
6
7  class SerialSendNode(Node):
8      def __init__(self):
9          super().__init__('serial_send_node')
10
11         # シリアルポート設定
12         self.serial_port = "/dev/ttyACMO"
13         self.baudrate = 115200
14         self.timeout = 0.01
15
16         try:
17             self.ser = serial.Serial(self.serial_port, self.baudrate, timeout=self.timeout)
18             self.get_logger().info(f"Connected to serial port: {self.serial_port}")
19         except serial.SerialException as e:
20             self.get_logger().error(f"Failed to connect to serial port: {e}")
21             self.ser = None
22
23         # サブスクリバ設定
24         self.subscription = self.create_subscription(
25             Float32MultiArray,
26             'wheel_controls',
27             self.control_callback,
28             10
29         )
30
31     def control_callback(self, msg):
32         if self.ser is not None:
33             try:
34                 if len(msg.data) == 2:
35                     right_control, left_control = msg.data
36                     send_data = struct.pack('>BBhh', 0xA5, 0xA5, int(right_control), int(left_control))
37                     self.ser.write(send_data)
38
39                     # デバッグログ
40                     self.get_logger().info(f"Sent to serial: Right={right_control}, Left={left_control}")
41             except:
42                 self.get_logger().error("Invalid control data length. Expected 2 values.")
43         except Exception as e:
44             self.get_logger().error(f"Error sending data to serial: {e}")
45

```

```

46 def main(args=None):
47     rclpy.init(args=args)
48     node = SerialSendNode()
49     rclpy.spin(node)
50     rclpy.shutdown()
51
52 if __name__ == '__main__':
53     main()

```

Code A.28: serial\_send\_node.py

```

1  import threading
2  import rclpy
3  from rclpy.node import Node
4  from std_msgs.msg import String, Float32MultiArray
5
6  from fastapi import FastAPI, WebSocket as FastAPIWebSocket
7  from fastapi.responses import HTMLResponse
8  import uvicorn
9  import os
10 from socket import SO_REUSEADDR, SOL_SOCKET, socket
11
12
13 # アドレスとポートの指定 IP
14 ipaddress_ = '192.168.11.47'
15 port_ = 8080
16
17 # ファイルのパス HTML
18 path = '/home/altair/Roboware/UI.txt'
19
20 # のインスタンスを作成 FastAPI
21 app = FastAPI()
22
23 # ファイルが存在するか確認し、読み込み HTML
24 if not os.path.exists(path):
25     raise FileNotFoundError(f'File not found: {path}')
26
27 with open(path, 'r') as f:
28     html = f.read()
29
30 # ROS 2 ノードの定義
31 class WebSocketNode(Node):
32     def __init__(self):
33         msg = String()
34         super().__init__('web_socket_node')
35         self.send_data = ''
36
37     # パブリッシャーを作成
38     self.pub = self.create_publisher(String, 'web_socket_pub', 10)
39
40     # サブスクリプションを作成し、コールバック関数を設定
41     self.sub = self.create_subscription(Float32MultiArray, 'estimated_position', self.callback, 10)
42
43     # ルートの定義 FastAPI
44     @app.get("/")
45     async def get():
46         return HTMLResponse(html)
47
48     # エンドポイントの定義 WebSocket

```

```

49     @app.websocket('/ws')
50     async def websocket_endpoint(websocket: FastAPIWebSocket):
51         await websocket.accept()
52         try:
53             while True:
54                 # クライアントからのデータを受信
55                 receive_data = await websocket.receive_text()
56
57                 # 受信したデータをトピックにパブリッシュ ROS
58                 msg.data = receive_data
59                 self.pub.publish(msg)
60                 print(msg.data)
61                 # サブスクライブしたデータをクライアントに送信
62                 string_send_data = ",".join(map(str, self.send_data))
63                 await websocket.send_text(string_send_data)
64             except Exception as e:
65                 print(f'WebSocket error: {str(e)}')
66             finally:
67                 print('WebSocket disconnected')
68
69         # サブスクリプションのコールバック関数
70         def callback(self, sub_msg):
71             self.send_data = sub_msg.data
72
73     # ROS ノードを実行する関数 2
74     def run_ros2():
75         rclpy.init()
76         node = WebSocketNode()
77         rclpy.spin(node)
78         rclpy.shutdown()
79
80     # サーバーを実行する関数 FastAPI
81     def run_fastapi():
82         # の設定を作成 Uvicorn
83         config = uvicorn.Config(app, host=ipaddress_, port=port_, log_level="info")
84
85         # サーバーを作成 Uvicorn
86         server = uvicorn.Server(config)
87
88         # サーバーを起動 FastAPI
89         server.run()
90
91     # メイン関数
92     def main():
93         # ROS の 2をメインスレッドで実行 spin
94         ros2_thread = threading.Thread(target=run_ros2)
95         ros2_thread.start()
96
97         # サーバーを別のスレッドで実行 FastAPI
98         fastapi_thread = threading.Thread(target=run_fastapi)
99         fastapi_thread.start()
100
101         # 両方のスレッドが終了するのを待つ
102         ros2_thread.join()
103         fastapi_thread.join()
104
105     if __name__ == '__main__':
106         main()

```

---

Code A.29: web\_socket\_node.py

---

```
1  <!DOCTYPE html>
2  <html lang="en">
3  <head>
4      <meta charset="UTF-8">
5      <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6      <title>Robot Control</title>
7      <style>
8          body {
9              font-family: Arial, sans-serif;
10             text-align: center;
11             margin: 0;
12             padding: 0;
13         }
14         .container {
15             padding: 20px;
16         }
17         .button {
18             width: 200px;
19             height: 50px;
20             margin: 10px;
21             font-size: 16px;
22             font-weight: bold;
23             background-color: #007bff;
24             color: white;
25             border: none;
26             border-radius: 5px;
27             cursor: pointer;
28         }
29         .button:active {
30             background-color: #0056b3;
31         }
32         .toggle-button {
33             width: 200px;
34             height: 50px;
35             font-size: 16px;
36             font-weight: bold;
37             margin: 20px auto;
38             background-color: #ff5722;
39             color: white;
40             border: none;
41             border-radius: 5px;
42             cursor: pointer;
43         }
44         .toggle-button.active {
45             background-color: #4caf50;
46         }
47         .status {
48             margin-top: 20px;
49             font-size: 18px;
50         }
51         .status.connected {
52             color: green;
53         }
54         .status.disconnected {
55             color: red;
56         }
```

```

57     </style>
58 </head>
59 <body>
60     <div class="container">
61         <h1>Robot Control Panel</h1>
62         <button class="toggle-button" id="modeToggle" onclick="toggleMode()">Mode: Control</button>
63         <div class="status" id="status">Status: Disconnected</div>
64     </div>
65
66     <script>
67         let websocket;
68         let currentMode = 0; // Control: 0, Follow: 1
69         let stop = 0; // Emergency stop: 1 = Stop, 0 = Running
70         let lx = 100, ly = 100, rx = 100, ry = 100; // Joystick default values
71         const reconnectInterval = 5000;
72
73         function connectWebSocket() {
74             websocket = new WebSocket("ws://192.168.11.47:8080/ws");
75
76             websocket.onopen = function () {
77                 document.getElementById('status').innerText = "Status: Connected";
78                 document.getElementById('status').className = "status connected";
79             };
80
81             websocket.onclose = function () {
82                 document.getElementById('status').innerText = "Status: Disconnected";
83                 document.getElementById('status').className = "status disconnected";
84                 setTimeout(connectWebSocket, reconnectInterval);
85             };
86
87             websocket.onerror = function (error) {
88                 console.error("WebSocket error:", error);
89             };
90         }
91
92         function toggleMode() {
93             const modeButton = document.getElementById("modeToggle");
94             currentMode = currentMode === 0 ? 1 : 0;
95
96             if (currentMode === 1) {
97                 modeButton.innerText = "Mode: Follow";
98                 modeButton.classList.add("active");
99             } else {
100                 modeButton.innerText = "Mode: Control";
101                 modeButton.classList.remove("active");
102             }
103
104             sendCommand();
105         }
106
107         function updateGamepadValues() {
108             const gamepads = navigator.getGamepads();
109             const gamepad = gamepads[0];
110
111             if (gamepad) {
112                 lx = gamepad.axes[0] * 100 + 100;
113                 ly = gamepad.axes[1] * -100 + 100;
114                 rx = gamepad.axes[2] * 100 + 100;
115                 ry = gamepad.axes[3] * -100 + 100;

```

```

116
117         // Send updated joystick values
118         sendCommand();
119     }
120 }
121
122 function sendCommand() {
123     if (websocket && websocket.readyState === WebSocket.OPEN) {
124         const command = [currentMode, rx, ry, lx, ly, stop];
125         websocket.send(command.join(","));
126     }
127 }
128
129 function setupGamepad() {
130     setInterval(updateGamepadValues, 100);
131 }
132
133 document.addEventListener('contextmenu', event => event.preventDefault());
134 connectWebSocket();
135 setupGamepad();
136 </script>
137 </body>
138 </html>

```

Code A.30: UI.txt

### A.3 回路

作成した回路を以下に示す．また，[https://github.com/Altairu/AltairMD\\_V7](https://github.com/Altairu/AltairMD_V7)，[https://github.com/Altairu/ALTAIR\\_MDD\\_V2](https://github.com/Altairu/ALTAIR_MDD_V2) に掲載している．

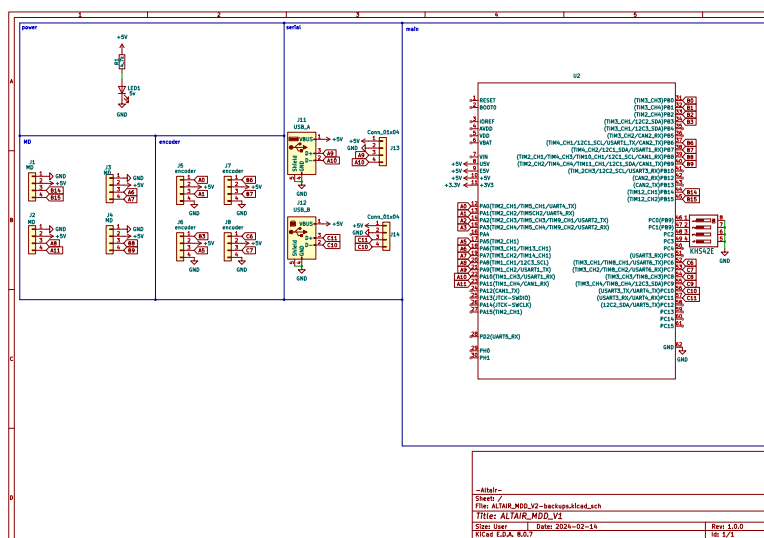


図 A.1 : モータドライバードライバー V2 回路図

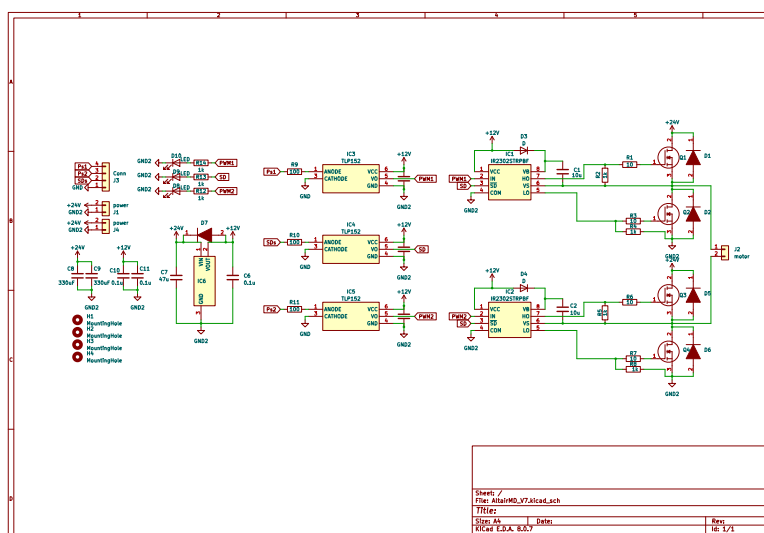


図 A.2 : モータドライバ V7 回路図