

P D III

## 2D-LiDAR と YOLOv8 を用いた人追従システムの開発

指導教員 出村 公成 教授



金沢工業大学  
工学部ロボティクス学科

金澤 祐典

令和 5 年度  
2024 年 2 月 1 日

# 目次

<b>第1章 序 論</b>	<b>1</b>
1.1 はじめに . . . . .	1
1.2 論文構成 . . . . .	2
<b>第2章 従来研究</b>	<b>3</b>
2.1 2D-LiDAR と YOLOv5 を用いた手法 . . . . .	3
2.2 2D-LiDAR の距離データをクラスタリングする手法 . . . . .	5
2.3 従来研究における課題と本プロジェクトの位置づけ . . . . .	7
<b>第3章 提案手法</b>	<b>8</b>
3.1 要求仕様 . . . . .	8
3.2 システム構成 . . . . .	8
3.3 ソフトウェア構成 . . . . .	9
3.4 データセットの作成 . . . . .	10
3.5 YOLOv8 による学習 . . . . .	11
3.6 追従目標の特定 . . . . .	12
3.7 ロボット台車の制御 . . . . .	13
<b>第4章 実験</b>	<b>14</b>
4.1 実験目的 . . . . .	14
4.2 実験方法 . . . . .	14
4.2.1 実験機材 . . . . .	15
4.2.2 実験環境 . . . . .	15
4.2.3 追従実験 . . . . .	15
4.2.4 最大追従速度実験 . . . . .	16
4.3 実験結果 . . . . .	16
4.3.1 追従実験 . . . . .	16

4.3.2 最大追従速度実験 . . . . .	17
4.4 考察 . . . . .	17
<b>第5章 結　言</b>	<b>20</b>
5.1 結言 . . . . .	20
<b>謝　辞</b>	<b>21</b>
<b>参考文献</b>	<b>22</b>
<b>本研究に関する学術発表論文</b>	<b>24</b>

# 図目次

2.1	Image of centroid [5] . . . . .	4
2.2	Data Acquisition Environment [5] . . . . .	4
2.3	Human recognition [7] . . . . .	5
2.4	LIDAR data processing [7] . . . . .	6
2.5	Kitchen scenario [7] . . . . .	6
3.1	System configuration chart . . . . .	9
3.2	Software configuration diagram . . . . .	10
3.3	Example of an overhead view image . . . . .	10
3.4	Example data sets . . . . .	11
3.5	Training results . . . . .	11
3.6	Example of inference results with YOLOv8 using learned weights . . . . .	12
3.7	Target identification methods . . . . .	12
4.1	Happy Edu . . . . .	15
4.2	Image of tracking experiment environment (FMT Laboratory Room 206) . . . . .	15
4.3	Image of tracking experiment environment (FMT Laboratory Room 326) . . . . .	17
4.4	Maximum tracking speed experiment environment image (FMT Laboratory Room 326) . . . . .	18
4.5	Tracking experiment (Real view) . . . . .	18
4.6	Tracking experiment (Internal view) . . . . .	19
4.7	Tracking speed graph . . . . .	19

# 表 目 次

2.1	Success rate of emergency stops on each road [5] . . . . .	3
2.2	THE EFFECT OF TRAJECTORY AUGMENTATION [7] . . . . .	6
4.1	Happy Edu specifications . . . . .	16
4.2	Success rate of traking in each road . . . . .	16
4.3	Maximum tracking speed experimental result . . . . .	17

# 第1章

## 序論

### 1.1 はじめに

近年の日本において、少子高齢社会による人手不足が課題となっている。2023年の65歳以上の人口は3623万人であり、総人口に占める65歳以上の割合(以下、高齢化率)は29.1[%]と過去最高である[1]。また、2070年での高齢化率は38.7[%]に達し、2.6人に1人が65歳以上であると推計されている[2]。加速する少子高齢化により、就業者不足の問題が深刻化しており、解決策の1つとしてロボットによる作業の自動化やサポートの導入が増えている。建設業では、2D-LiDARを用いた自動追従台車である「かもーん」が建設現場で導入されており、運用実績を上げ続けている[3]。また、製造業では2D-LiDARを用いた協働運搬ロボットである「サウザー」が実用化されており、「自動追従走行機能」によって運搬業務をサウザーで行うことができ、製造業界だけでなく空港や市役所などの公共環境における導入例があり、世界各地で約400台の販売実績がある[4]。以上のことから、2D-LiDARを用いた人追従ロボットへの需要と期待は増加し続けていることがわかる。

2D-LiDARを用いた人追従ロボットに関する手法には、深層学習を用いる手法[5][6][7][8]、背景減算によって人の両脚部分を検出する手法[9]、AOAタグを2D-LiDARと組み合わせる手法[10]などがある。これらの手法では、主に距離データをもとに人の両脚部分を検出するが、雑多な環境下では追従が不安定になる可能性があり、また実験環境に椅子や机などのオブジェクトがなく、広域な経路での実験により人追従を評価している。2D-LiDARから提供される距離データでは、椅子や机などの脚部分は人の両脚部分と類似しているため、誤検出により本来の追従対象ではないものに追従してしまうという課題があり、不安定な検出手法のため、追従速度が低速であるという課題もある。

本プロジェクトでは、屋内環境による雑多な環境下での、ロボットの最大直進速度で追従できる人追従システムの開発を目的とし、2D-LiDARとYOLOv8を用いることで人の両

脚部分を検出し、追従目標の特定処理を加えることで、雑多な環境下での人追従が可能なシステムを開発する。

## 1.2 論文構成

本レポートの構成について述べる。第2章では、これまでの2D-LiDARを用いた人追従に関する従来研究について述べる。第3章では、本プロジェクトでの提案手法を述べる。第4章では、提案手法による人追従能力の検証結果について述べる。第5章では本プロジェクトをまとめ、結論及び今後の課題について述べる。

## 第2章

### 従来研究

#### 2.1 2D-LiDARとYOLOv5を用いた手法

飯田一成らの論文 [5] では、リアルタイム物体検出アルゴリズムである YOLOv5 を用いて、2D-LiDAR の距離データから人の脚部を検出している。

提案手法は、Fig. 2.1 のように 2D-LiDAR の距離データを画像化し、学習した YOLOv5 の物体検出により画像から人の脚部を検出する。複数検出する場合があるため、検出する範囲を一定の位置に設定している。また、衝突

実験方法は、追従実験と衝突回避実験がある。追従実験では Fig. 2.2 3つの経路を設定し、1回のみの試行である。衝突回避実験では、人追従中に追従対象者とロボットとの間に障害物を設置し、停止したかを 3つの状況に分けてそれぞれ 10回試行している。実験結果は、追従実験では 3つの経路において 20[m] の人追従ができていたが、雑多な環境下では追従中に停止することがあった。衝突回避実験では Table 2.1 に示すように、すべての試行において衝突回避ができていた。

Table 2.1: Success rate of emergency stops on each road [5]

	Distance between robot and obstacle		
	0.1[m]	0.2[m]	0.3[m]
Straight road	100[%]	100[%]	100[%]
Curved road	100[%]	100[%]	100[%]
Miscellaneous road	100[%]	100[%]	100[%]

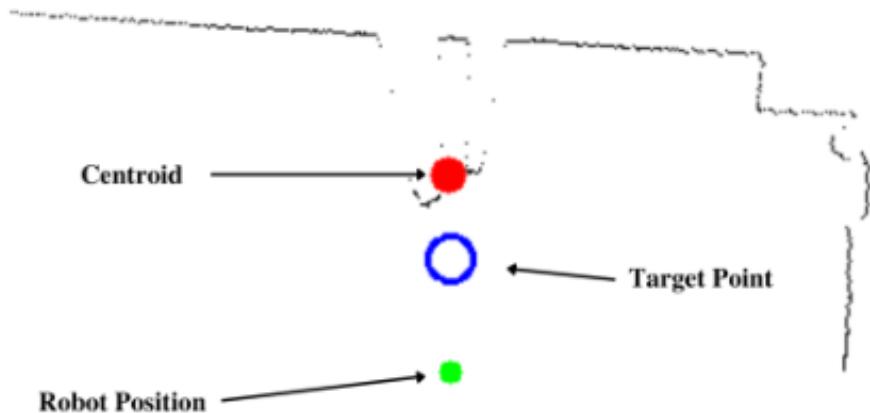


Fig. 2.1: Image of centroid [5]



Fig. 2.2: Data Acquisition Environment [5]

## 2.2 2D-LiDARの距離データをクラスタリングする手法

Fei Luo らの研究 [7] では、キッチン内を想定し、人が歩行した軌跡のクラスタリングを行っている。

提案手法は、Fig. 2.4 が処理の全体像である。Fig. 2.4 (a) では、2D-LiDAR から提供される距離データをプロットしている。Fig. 2.4(b) では、密度ベースのクラスタリングアルゴリズムである DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) を用いて距離データをクラスタリングする。2.4(c) では、Fig. 2.3 のように定義した幾何学的特徴とともにランダムフォレストにより、人間と非人間の 2 つに分類する。Fig. 2.4(c) では、カルマンフィルタを用いて人が移動した軌跡を生成し、ガウスノイズなどの軌跡拡張が行われ、LSTM (Long Short-Term Memory) と TCN (Temporal Convolutional Network) の両方に入力される。活動クラスに分類される。LSTM は、時間経過に伴って変化するデータを学習できる RNN(Recurrent Neural Network) の勾配消失問題を解消したものであり、TCN は時系列データに対して CNN (Convolutional Neural Network) を用いているものである。

実験方法は、学習した LSTM と TCN を用いて、Fig. 2.5 のような環境において 15 種類の歩行パターンを分類させ、LSTM と TCN の分類精度の評価を行う。実験結果は Table 2.2 のようになっており、LSTM より TCN のほうが分類精度が高いことが明らかになっている。

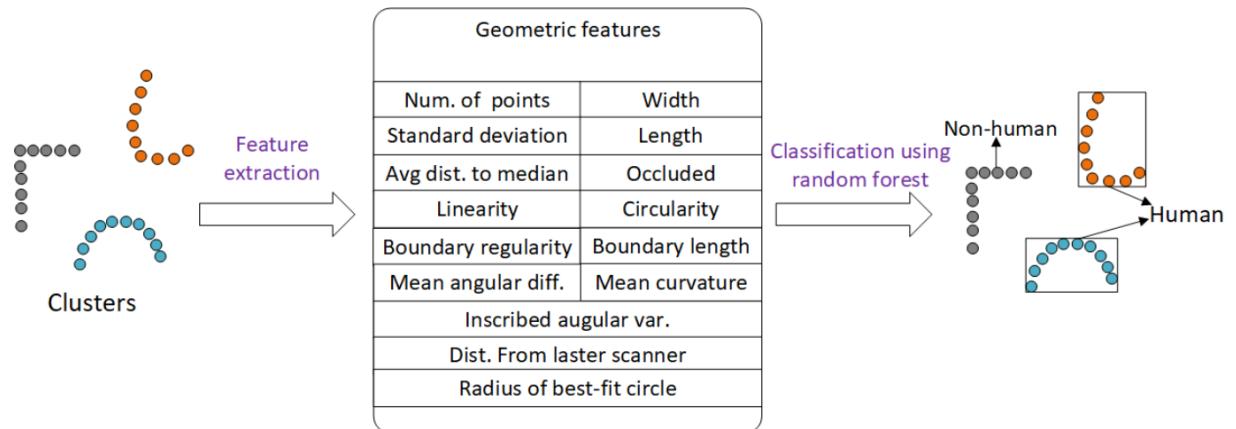


Fig. 2.3: Human recognition [7]

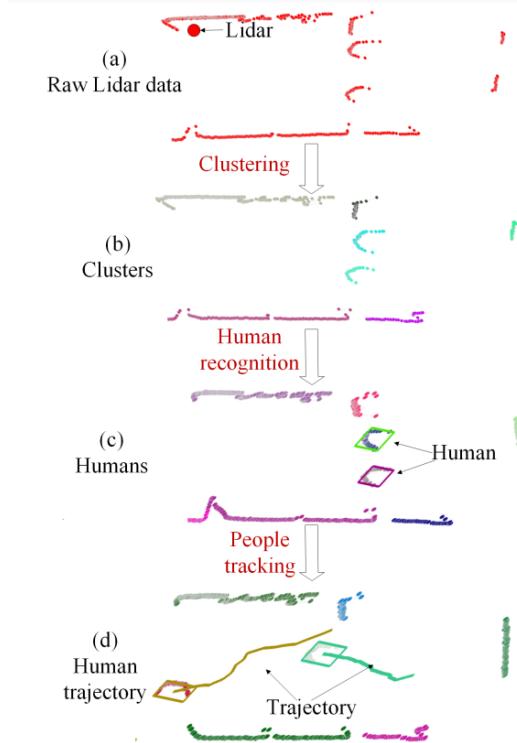


Fig. 2.4: LIDAR data processing [7]

Table 2.2: THE EFFECT OF TRAJECTORY AUGMENTATION [7]

	OA	Recall	F1
TCN with trajectory augmentation	99.49%	99.53%	99.51%
TCN without trajectory augmentation	97.96%	97.93%	97.96%
LSTM with trajectory augmentation	99.39%	99.41%	99.39%
LSTM without trajectory augmentation	97.65%	97.79%	97.65%



Fig. 2.5: Kitchen scenario [7]

## 2.3 従来研究における課題と本プロジェクトの位置づけ

従来研究の課題として、2D-LiDAR と YOLOv5 を用いた手法では、雑多な環境下において人追従中に周囲の環境に影響され、特定の追従目標を追従できない点が挙げられる。また、検出範囲が固定であることから、人間がロボットの検出範囲に合わせながら歩行しなければならず、人の歩行速度の低下に伴いロボットの追従速度も低下している点が課題として挙げられる。

2D-LiDAR の距離データをクラスタリングする手法では、人の脚部が幾何学的特徴からの検出であり、脚部に類似している物体が乱雑に配置されていた場合、人の脚部ではない物体が誤検出されてしまう課題が考えられる。

本プロジェクトでは、雑多な環境下において特定の人を追従し続けながら、ロボットの最大直進速度で追従し続けるような人追従システムを提案する。

## 第3章

# 提案手法

### 3.1 要求仕様

本プロジェクトでは、雑多な環境下においてロボットの最大直進速度で追従できる人追従システムの開発を目的としているため、以下の構成で要求仕様を設定する。2023年に開催されたRoboCup 2023で開発したロボットであるHappy Eduを使用する。Happy Eduのロボット台車は、ROBOTISのTurtleBot3 Big Wheelであり、ロボット台車の前方に2D-LiDARを搭載している。2D-LiDARは、北表電気株式会社のUTM30-LXを使用している。制御PCは、NVIDIA GeForce RTX 4070 8GBを搭載しているノートPCを選定した。

以上の構成で以下の要求仕様を設定する。

- (1) 2D-LiDARのデータで人追従ができる
- (2) 雜多な状態の空間でも人追従ができる
- (3) 0.5[m/s]以下の歩行速度で追従する

### 3.2 システム構成

本プロジェクトでは、Fig. 3.1のような人追従システムを提案する。2D-LiDARから提供される距離データを俯瞰画像に変換し、YOLOv8のリアルタイム物体検出モデルにより人の両脚部分を検出する。YOLOv8による人の両脚部分の検出は、別の物体を誤検出することがあるため、追従対象の特定処理を実装している。追従対象の特定後、ロボットが追従すべき目標座標を生成し、ロボットから目標座標までの距離と角度の偏差を収束させるため、PID制御によりロボット台車を制御する。

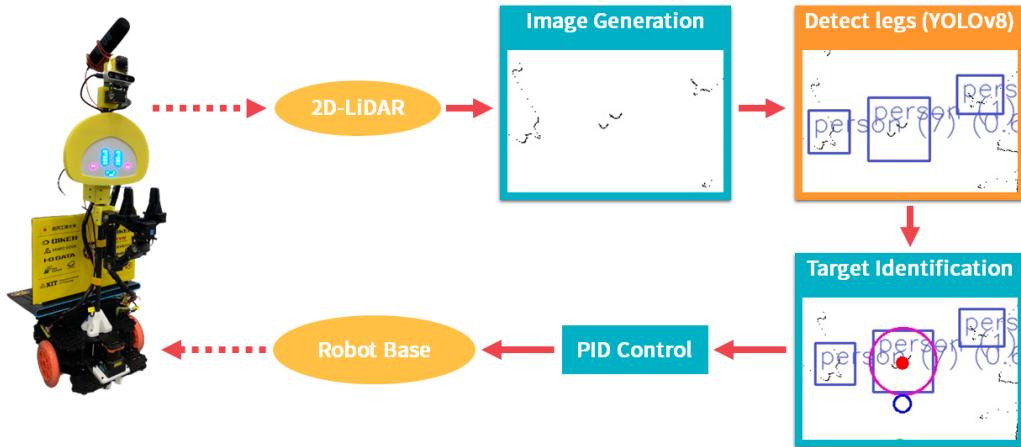


Fig. 3.1: System configuration chart

### 3.3 ソフトウェア構成

ロボット用ノートPC内のソフトウェア構成をFig. 3.2に示す。ロボット用ノートPCのオペレーティングシステムにはUbuntu22.04を使用し、ミドルウェアにはRobot Operationg System 2(以下、ROS2)を用いている。ロボットのソフトウェア開発には、主にPython言語を使用し、YOLOv8のROS2パッケージにはyolov8\_rosパッケージを用いている。今回開発した人追従システムは、ROS2パッケージになっており、Fig. 3.2のfollow\_me Package上の構成となっている。

各ノードの処理内容は以下の通りである。

- YOLOv8 Nodes: 俯瞰画像から人の両脚部分を検出する。
- laser\_to\_image Node: 2D-LiDARの距離データを俯瞰画像に変換する。
- person\_detector Node: 推論結果をもとに、追従対象を特定し目標座標を生成する。
- base\_controller Node: 目標座標までの距離と角度の偏差をPID制御により収束させる。

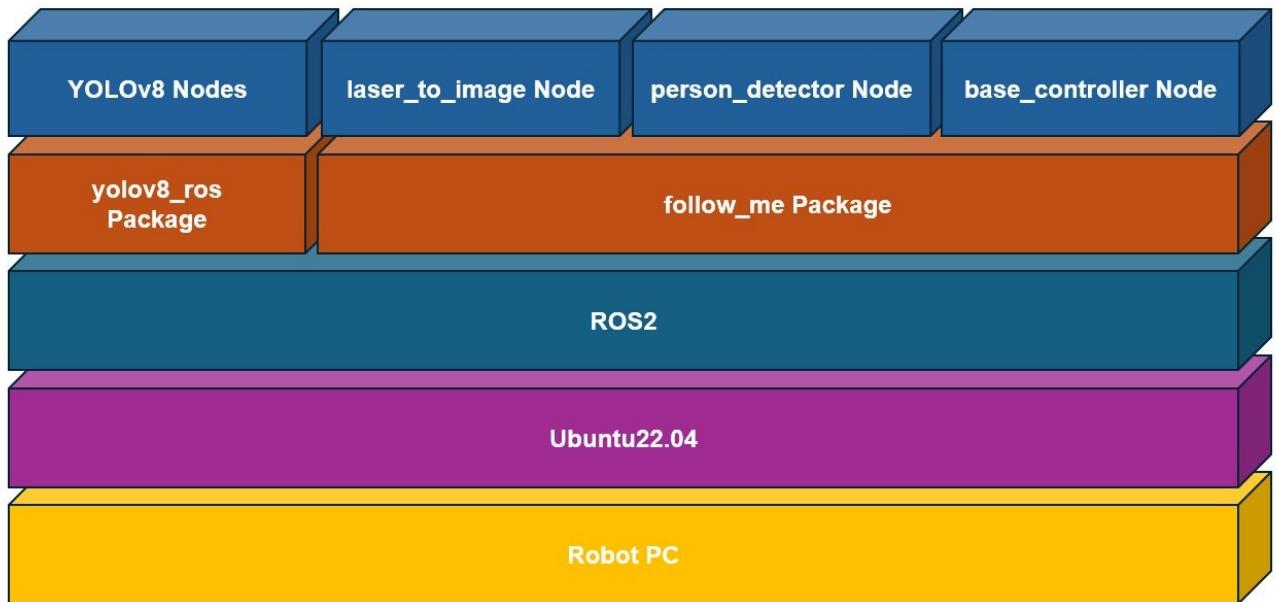


Fig. 3.2: Software configuration diagram

### 3.4 データセットの作成

2D-LiDARのデータを Fig. 3.3 のように俯瞰画像へ変換し、データセットを作成する。データセットを作成するときの環境は、ロボットが静止した状態において、タイとパンツとワイドパンツを履いた2人が大股や小股などで歩行し、歩行パターンはランダムである。これを5分間を行い、俯瞰画像をトピック通信で発信し続け、ROS2 Bag を保存する。ROS2 Bag は、ROS2におけるトピックの保存機能である。ROS2 Bag のデータをから 12032枚の画像データを生成し、人の脚部を person クラスとしてアノテーションを行った。Fig. 3.4 にデータセットの例を示す。また、データセットには、画像の回転処理、モザイク処理、2枚の画像を合成し、新しく1枚の画像を生成する Mix Up 処理をすることでデータ拡張を行った。

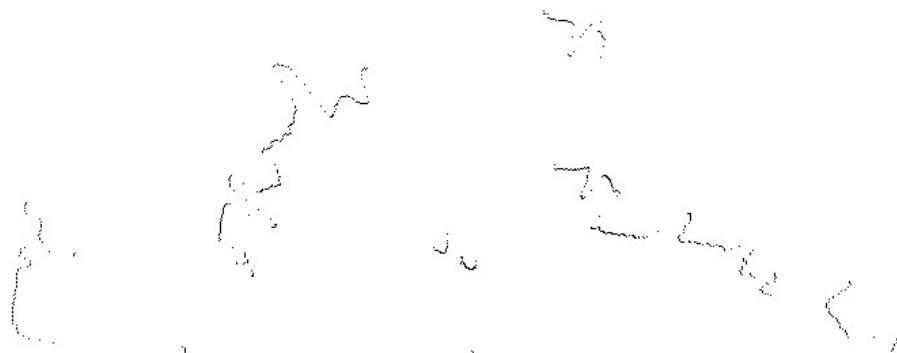


Fig. 3.3: Example of an overhead view image

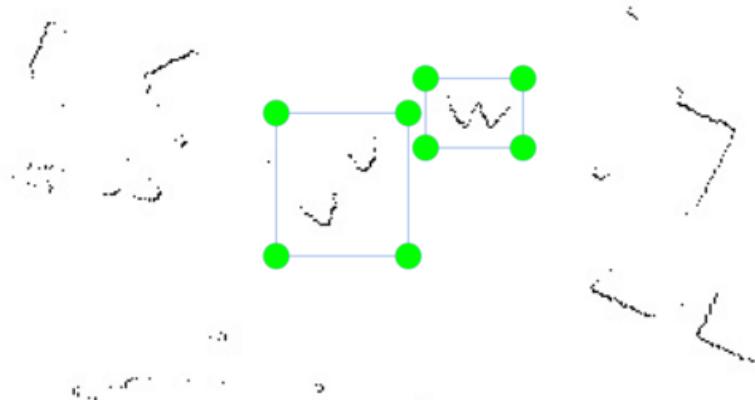


Fig. 3.4: Example data sets

### 3.5 YOLOv8による学習

作成したデータセットとYOLOv8を用いて人の両脚検出器を作成する。学習には、リアルタイム物体検出アルゴリズムであるYOLO (You Only Look Once)を使用し、学習モデルの初期重みは、ロボットに搭載するノートPCの性能が高いため、最もパラメータ数の多いYOLOv8xを選定した。学習するPCは、NVIDIA GeForce RTX 4090 16GBを搭載しているPCを使用し、バッチサイズは12、エポック数は500で学習を行った。過学習を防ぐため、過学習が発生する直前または発生したらすぐに学習を終了させる処理を100エポック以降でを設定した。

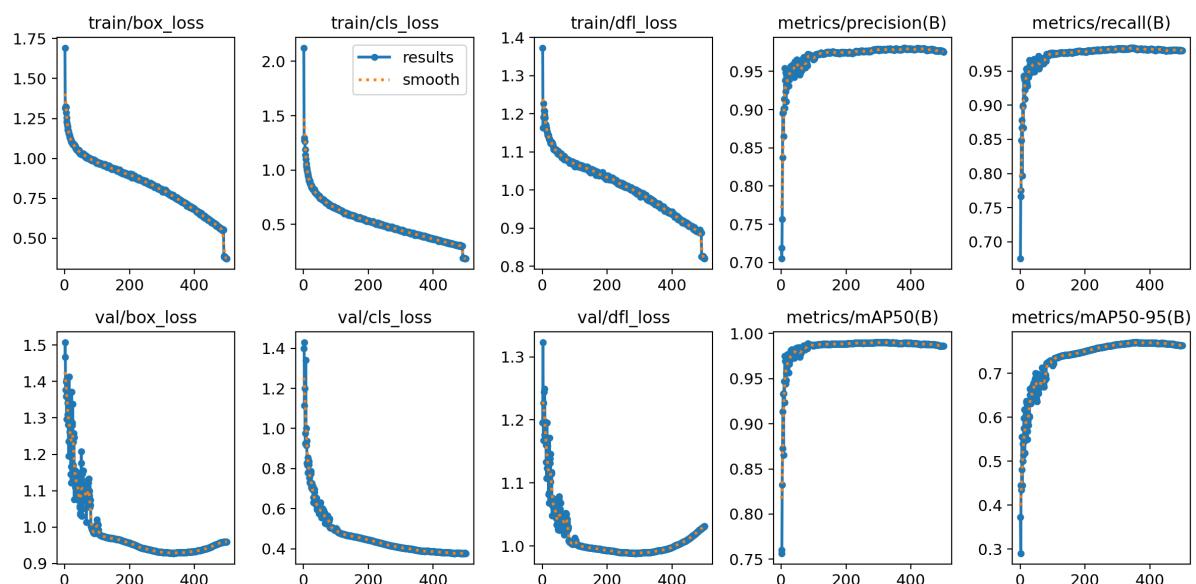


Fig. 3.5: Training results

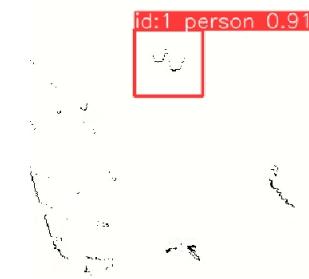


Fig. 3.6: Example of inference results with YOLOv8 using learned weights

### 3.6 追従目標の特定

YOLOv8による推論結果を用いて追従目標の特定をする。YOLOv8には、Byte Trackなどの追跡アルゴリズムが標準機能で搭載されており、検出した物体にIDを付与することができる。しかし、1度検出を外れ、再度同じ物体が検出されてもIDが変わってしまうという問題がある。そこで、動的検出範囲を実装することで特定の追従目標を追従し続ける。

本プロジェクトで実装した追従目標の特定方法をFig. 3.7に示す。1フレーム前における追従目標のバウンディングボックスを中心とした、半径0.5[m]の円型範囲を現在のフレームに設定し、範囲内にバウンディングボックスの中心があればそれを追従対象とする。円型範囲の半径は、ROS2のパラメータ通信で実装しているため、動的な値の変更が可能であり、歩行速度に合わせて円型範囲を拡大縮小することが可能である。

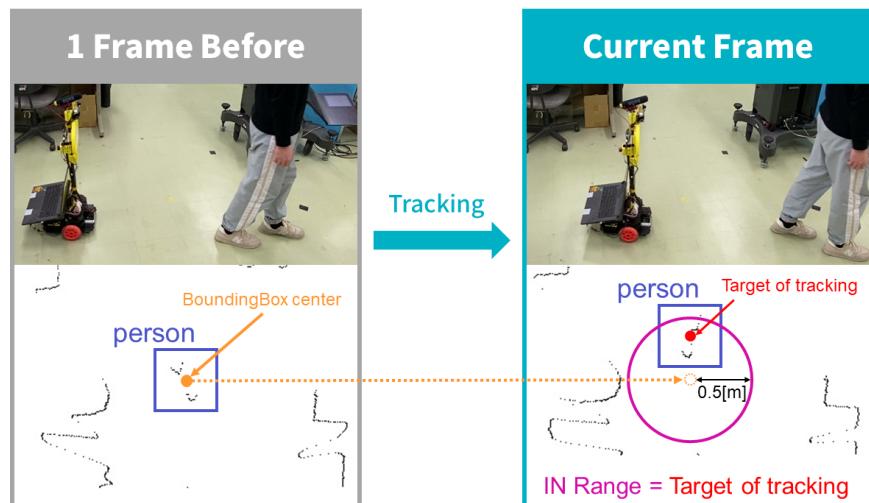


Fig. 3.7: Target identification methods

### 3.7 ロボット台車の制御

追従目標の特定により、追従目標のバウンディングボックスの中心から後方に定数で目標座標を生成し、ロボットから目標座標までの距離と角度の偏差を収束させるため PID 制御を実装した。

時刻  $t$  での、ロボットの座標から目標座標までの角度の偏差を  $\theta(t)$  とし、ロボット台車のエンコーダから取得できる旋回速度を  $\omega(t)$  とする。また、追従目標への角度の偏差が  $3.0[\text{deg}]$  未満である場合に積分制御を開始する時刻を  $t_1$  としたとき、ロボット台車の旋回速度の制御量  $u_{angle}(t)$  は以下のようになる。

$$u_{angle}(t) = K_{AP} \cdot \theta(t) + K_{AI} \cdot \int_{t_1}^{t-t_1} \theta(t) dt + K_{AD} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} \theta(t) - \omega(t) \right\} \quad (3.1)$$

$K_{AP}$ 、 $K_{AI}$ 、 $K_{AD}$  は調整パラメータであり、 $K_{AP}$  は 0.005、 $K_{AI}$  は 0.0002、 $K_{AD}$  は 0.0009 で設定している。(3.1) 式の第 1 項は、ロボットの座標から目標座標までの角度の偏差を比例制御している。第 2 項は、ロボットが追従対象者の方向を定常偏差なく向くため、目標座標までの角度の偏差を積分制御している。第 3 項では、実機での制御を考慮し、不足しているまたは過多な制御量を微分制御により調整している。積分制御を常にしていないのは、角度の偏差が大きくなった場合に、積分値が時間経過に伴い過多になりすぎることで、ロボットが左右に振動してしまうからである。

また、追従目標への距離の偏差を  $L(t)$  としたとき、ロボット台車の直進速度の制御量  $u_{linear}(t)$  は以下のようになる。

$$u_{linear}(t) = K_{LP} \cdot L(t) \quad (3.2)$$

$K_{LP}$  は調整パラメータである。(3.2) 式は、追従目標への距離の偏差を比例制御しており、 $K_{LP}$  は 0.3 で設定している。

# 第4章

## 実験

### 4.1 実験目的

本プロジェクトでは、雑多な環境下においてロボットの最大直進速度で追従できる人追従システムの開発を目的としている。これに伴った実験の目的は、雑多な環境下での人追従の制限とロボットの最大直進速度での人追従性能の2つの検証をすることである。以上のこ<sup>と</sup>から、追従実験と最大追従速度実験により、開発した人追従システムの性能を検証する。

### 4.2 実験方法

実験では、雑多な環境を作成し追従実験と最大追従速度実験をする。実験中は、人は追従対象の1人のみとする。

要求仕様(2)を検証するため、追従実験では直線経路、曲線経路、直角経路をそれぞれ10回実験し、成功率を算出する。追従の成功率が平均90%以上であった場合に要求仕様(2)を満たしたものとする。また、要求仕様(3)を検証するため、10[m]以上の直線経路にて最大追従速度実験をする。0.1[m/s]から、0.1ずつ速度を上昇させ、追従できなくなる速度の直前を最大追従速度とする。Turtlebot3 Big Wheelの最大直進速度が0.5[m/s]であるため、開発した人追従システムの最大追従速度が0.5[m/s]であった場合に要求仕様(3)は満たされる。以上の実験は、2D-LiDARのデータを用いた実験であるため、要求仕様(2)、(3)が満たされたら、要求仕様(1)も満たされたものとする。



Fig. 4.1: Happy Edu

#### 4.2.1 実験機材

#### 4.2.2 実験環境

#### 4.2.3 追従実験

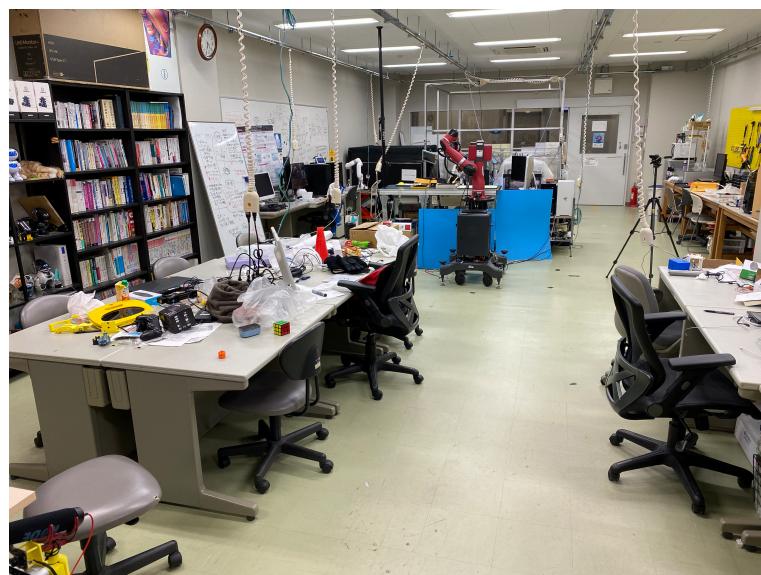


Fig. 4.2: Image of tracking experiment environment (FMT Laboratory Room 206)

Table 4.1: Happy Edu specifications

Type of equipment	Product name	Specifications
Robot base	Turtlebot3 Big Wheel	Maximum straight speed: 0.6[m/s] Maximum rotation speed: 3.14[rad/s] Maximum payload: 30[kg] Size(length x width x height): 281mm x 306mm x 170.30 [mm]
Robot laptop	ASUS ROG Strix G16	CPU: Corei7 13650HX GPU: GeForce RTX4070 8GB Weight: 2.5 [kg] Size: 26.4 x 35.4 x 2.26 [cm]
2D-LiDAR	UTM-30LX	Maximum detection distance: 60 [m] Scan range: 270 [deg] Angle resolution energy: 0.25 [deg] Scan time: 25 [ms] Weight: 210 [g]

#### 4.2.4 最大追従速度実験

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 追従実験

Table 4.2: Success rate of traking in each road

Road	Success rate [%]
Straight road	100
Curved road	100
Right angle road	100

直線経路、曲線経路、直角経路、最大追従速度の実験結果を Fig. ??に示す。追従実験では、直線経路と直角経路がそれぞれ 10 回中 10 回成功した。曲線経路では、10 回中 9 回成功した。

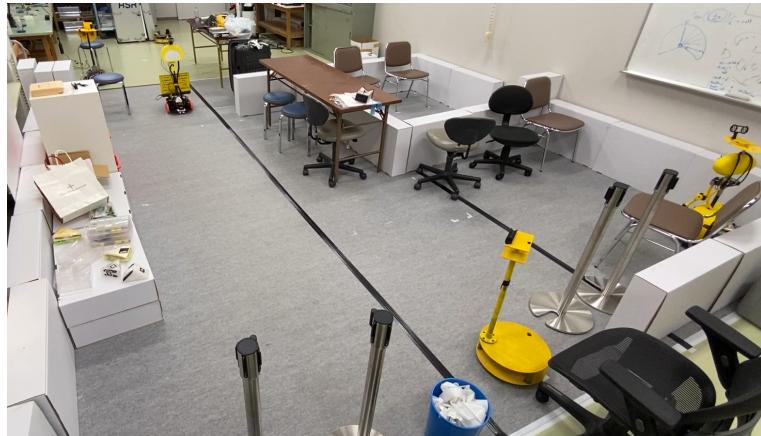


Fig. 4.3: Image of tracking experiment environment (FMT Laboratory Room 326)

Table 4.3: Maximum tracking speed experimental result

Tracking speed [m/s]	Travel distance tracked [m]
0.1	11.73
0.2	11.31
0.3	11.58
0.4	11.53
0.5	11.48
0.6	6.231

### 4.3.2 最大追従速度実験

最大追従実験では、0.5[m/s] が最大追従速度となった。0.6[m/s] で 3 回実験したが、追従は確認されなかった。

## 4.4 考察

実験結果から直線経路と直角経路では、雑多な環境において一度も止まらず安定した挙動で要求仕様を満たすことができた。しかし、曲線経路では一度だけ停止した。曲線経路で停止した原因は、ロボット用ノート PC のバッテリー低下だと考えられる。ロボットが停止しなかった場合の ROS2 bag では、システム全体の通信が平均 10[Hz] 以上で安定しているのに対し、曲線経路で停止したときは、平均 4.9[Hz] であった。実験が成功している ROS2 bag では、通信速度の低下は確認されず、ノート PC のバッテリーが 10% 以下であったのは、曲線経路で停止した場合のみであった。



Fig. 4.4: Maximum tracking speed experiment environment image (FMT Laboratory Room 326)

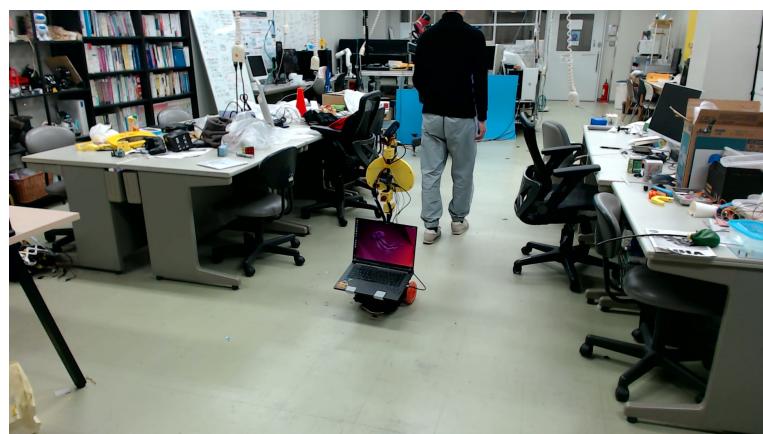


Fig. 4.5: Tracking experiment (Real view)

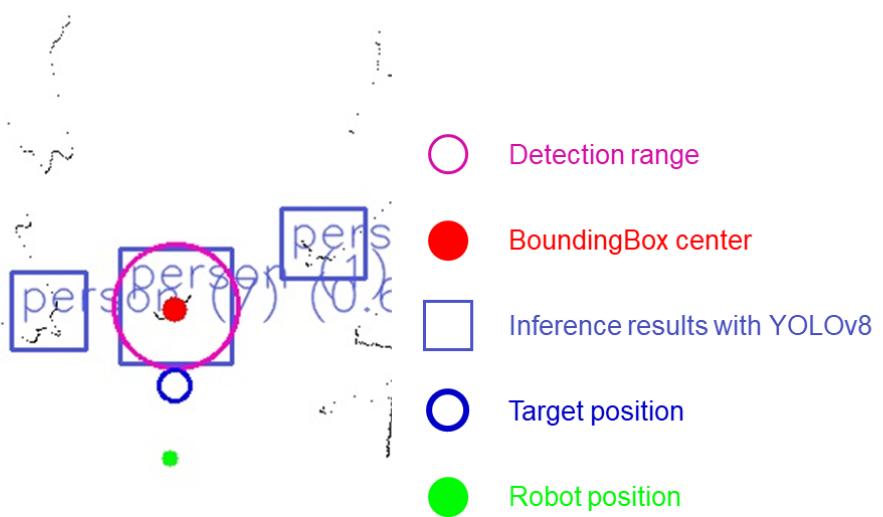


Fig. 4.6: Tracking experiment (Internal view)

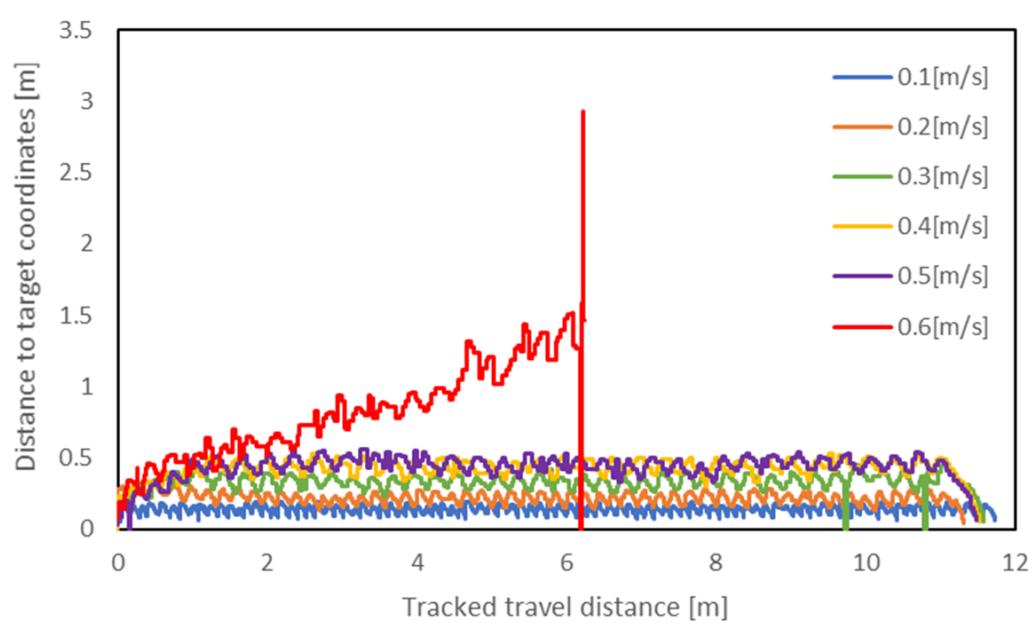


Fig. 4.7: Tracking speed graph

# 第5章

## 結 言

### 5.1 結言

本プロジェクトでは、2D-LiDARのデータとYOLOv8を用いた人追従システムの開発を行い、雑多な環境でも目標人物を追従することができた。

今後の課題として、追従対象とロボットの間を他の人間が遮る状態での追従精度を向上させる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり全体を通してご指導、ご教授、議論などのご助力をいただきました本学ロボティクス学科の出村公成教授に深く感謝いたします。

令和4年2月

## 参考文献

- [1] 総務省統計局, ”統計からみた我が国の高齢者”, (<https://www.stat.go.jp/data/topics/pdf/topics138.pdf>, 2024年2月1日閲覧).
- [2] 内閣府, ”高齢化の現状と将来像”, ([https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/zenbun/pdf/1s1s\\_01.pdf](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/zenbun/pdf/1s1s_01.pdf), 2024年2月1日閲覧).
- [3] 宮口幹太, “近年の建設工事用ロボット開発について” 計測と制御 第61巻 第9号, p. 641-644, 2022.
- [4] 大島章, 城吉宏泰, 柄川索, 松下裕介, 阪東茂, ”既存 AGV を超える特長を持った協働運搬ロボット「サウザー」”, 日本ロボット学会誌 第39巻 第1号, p. 65-66, 2021.
- [5] 飯田一成, 出村公成, ”深層学習を用いた人追従機能の開発”, 令和4年度金沢工業大学工学部ロボティクス学科プロジェクトデザイン III, 2023.
- [6] Claudia Álvarez-Aparicio, Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Francisco Javier Rodríguez-Lera, Jonatan Ginés Clavero, Francisco Martín Rico and Vicente Matellán, ”People Detection and Tracking Using LIDAR Sensors”, Robotics 2019, 8, 75.
- [7] Fei Luo, Stefan Poslad, and Eliane Bodanese, ”Temporal convolutional networks for multi-person activity recognition using a 2D LIDAR”, IEEE Internet of Things Journal, Volume: 7, Issue: 8, 2020.
- [8] Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Claudia Álvarez-Aparicio, María Carmen Calvo Olivera, Francisco J. Rodríguez-Lera, Camino Fernández-Llamas, Francisco Martín Rico and Vicente Matellán, ”Tracking People in a Mobile Robot From 2D LIDAR Scans Using Full Convolutional Neural Networks for Security in Cluttered Environments”, Frontiers in Neurorobotics, Volume 12, Article 85, 2019.

- [9] Mahmudul Hasan, Junichi Hanawa, Riku Goto, Hisato Fukuda, Yoshinori Kuno and Yoshi-nori Kobayashi, "Tracking People Using Ankle-Level 2D LiDAR for Gait Analysis", Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering, pp 40-46, 2020
- [10] DAPING JIN , ZHENG FANG, (Member, IEEE), AND JIEXIN ZENG, "A Robust Au-tonomous Following Method for Mobile Robots in Dynamic Environments", IEEE Access, Volume: 8, pp. 150311-150325, 2020.

## 本研究に関する学術発表論文