

Raspberry Pi を用いた物体検出の実装と救助ロボットとの統合

高橋力良^{*1}・千田結月^{*2}

指導教員：徳竹圭太郎^{*3}

Email: t25393jka@toyo-ushiku.jp

*1: 私立東洋大学附属牛久中学校・高等学校 2 年

*2: 私立東洋大学附属牛久中学校・高等学校 1 年

*3: 私立東洋大学附属牛久中学校・高等学校

◎Key Words

物体検出, 自律移動ロボット, 災害救助ロボット

1. はじめに

ロボカップジュニア・レスキューライン部門では、被災状況を模したフィールド上において、自律移動ロボットが要救助者の探索及び救助を行う競技である⁽¹⁾。競技では、ライントレースによる走行制御に加え様々な障害を切り抜けながら、救助エリアにおいて要救助者を発見し、属性に応じた適切な場所へ搬送する能力が求められる。しかし、従来の単純なセンサ判定では要救助者の位置や種類を柔軟に認識することが難しい場面が多く、カメラ画像に基づく認識処理の導入が有効であると考えられる。

一方で、ロボットに搭載できる計算資源や電力には制約があり、高精度な画像認識モデルをそのまま搭載することは容易ではない。また、競技においては単に対象を認識することだけでなく、検出結果を走行制御へ変換し、実際の救助動作に移行する必要がある。従って、限られた計算資源の中でリアルタイムに物体検出を行い、その結果を制御系へ統合するシステムの構築が重要な課題となる。

そこで本研究では、エッジデバイスである Raspberry Pi 5 上に軽量の物体検出モデルである YOLOv8n を実装し、搭載カメラから取得した映像に対して救助対象の検出を行うシステムを構築した。更に、検出した対象のクラス情報および位置情報を制御パラメーターへ変換し、シリアル通信を介して下位制御マイコンに送信することで、救助ロボット全体へ統合する構成を採用した。

本稿では、ロボカップジュニア・レスキューライン部門における救助課題を整理した上で、構築したロボットシステム、YOLOv8n を用いた物体検出手法、及び制御系との統合方法について述べる。最後に現在の実装状況と今後の展望について報告する。

2. ロボカップジュニア・レスキューライン部門における救助課題

2.1 救助エリアの概要

ロボカップジュニア・レスキューライン部門では、ロボットは黒いラインに沿ってライントレースで走行した後、救助エリアへ進入し要救助者の探索及び搬送を行う。救助エリアでは、床面上に配置された救助対象を回収し、その属性に応じて指定された救助エリアへ搬送しなければならない。

RoboCupJunior Rescue Line の公式ルールでは、救助対象は直径 4~5cm, 最大重量 80g の球体であり、以下の 2

種類が存在する。

- ・銀ボール: 生存者を表す。反射性があり、導電性を有する。ロボットはこれを緑色の救助エリアへ搬送する必要がある。

- ・黒ボール: 死亡者を表す。導電性を持たない。ロボットはこれを赤色の救助ゾーンへ搬送する必要がある。

また、救助エリアには複数のボールがランダムに配置されるため、ロボットは単に物体を見つける能力だけでなく、対象の種類を判別し、位置に応じて接近し、適切なゾーンへ搬送する能力が求められる。このことから、位置に基づいて「検出」「分類」「接近」「回収」「搬送」を一連の流れとして実装する必要がある

2.2 理想的な救助動作

救助エリアにおける理想的な救助動作は、以下ののような流れで表される。

1. 救助エリア内を探索し、カメラ画像から救助対象を検出する
2. 検出結果から、対象が銀ボールか黒ボールかを判別する
3. ボールの画像上の位置からロボットに対する相対位置を推定する
4. 対象の方向へロボットを向けて接近する
5. 十分に近づいた後、回収機構又は救助アームにより対象を回収する。
6. 対象のクラスに応じて、銀ボールなら緑エリアへ、黒ボールなら赤エリアへ搬送する
7. 出口領域を検出し、救助エリアから脱出する

このように、画像認識系には単なるクラス分類だけでなく、走行制御や救助機構へ利用可能な位置情報を出力する役割が求められる。また、本研究では上記の一連の救助動作のうち、1 の探索から 4 の対象への接近のみを実装対象とした。回収機構及び搬送については今後実装を進める予定である。

3. システム構成

3.1 ハードウェア構成

本研究では、画像認識系と走行制御系を統合した救助

ロボットを開発した。ロボットの主要構成要素は以下の通りである。

- ・画像認識用計算機：Raspberry Pi 5 (8GB)
- ・カメラ：Raspberry Pi Camera Module 3
- ・下位制御マイコン：ESP32-S3
- ・駆動系：STS3032 シリアルサーボモータ 4 基
- ・サーボ通信変換基板：FE-URT-1
- ・電源系：NiMH バッテリー
電源分岐基板 (ユニバーサル基板にて実装)

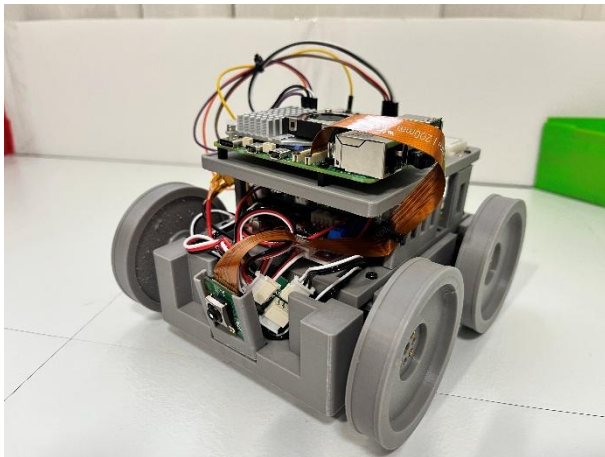


図1 実際に開発したロボット

Raspberry Pi 5は画像認識処理を担当し、Raspberry Pi Camera Module 3から取得した画像に対してYOLOv8nによる推論を実行し、検出結果をUART通信によってESP32-S3へ送信する。ESP32-S3はRaspberry Pi 5から受信した情報に基づく走行制御の実行を担当する。また、駆動用モータであるSTS3032はFE-URT-1を介して制御する構成とした。

3.2 処理分担の設計方針

本システムでは、画像認識処理と走行制御処理を異なる計算機へ分離して実装した。物体検出は深層学習モデルによる推論を伴うため計算負荷が大きく、リアルタイム制御と同一プロセッサ上で実行すると制御周期の乱れを招く可能性がある。そこでRaspberry Pi 5を画像認識専用計算機として用い、YOLOv8nによる推論、対象選択及び制御パラメータの生成を担当させた。一方、ESP32-S3にはリアルタイム性が要求されるライントレース制御およびモータ制御を担当させた。

両者はUART通信によって接続されており、Raspberry Pi 5は画像認識結果から生成した制御パラメータのみをESP32-S3へ送信する。この構成により、計算負荷の高い画像認識処理と周期性が重要なモータ制御を分離し、それぞれの処理特性に合わせた計算機上で実行できるシステムを構築した。

4. 物体検出システムの実装

4.1 検出対象とデータセット

本研究で検出対象とするクラスは、救助対象である「silver ball」及び「black ball」の2クラスである。

データセット作成にあたっては、実際の競技環境に近い条件で撮影し、銀ボール700枚、黒ボール700枚の計1400枚の画像を用意した。これらの画像に対し、手作業でアノテーションを付与した。ボールまでの距離や画面内での位置の偏り等を含めることを意識した。推論時の頑健性向上のため、視点の高さやカメラ角度が異なる画像も含めた。

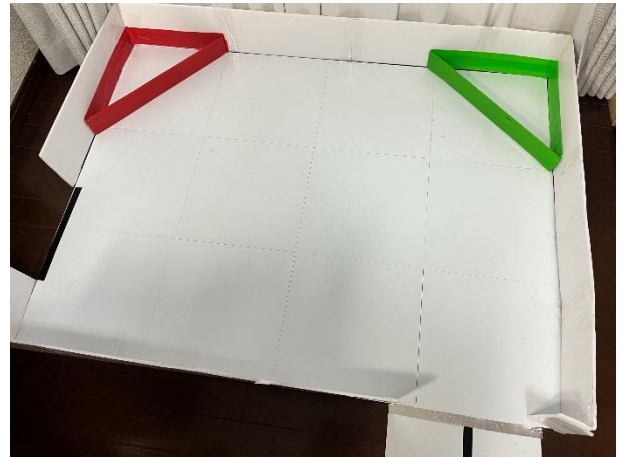


図2 学習用画像の撮影に使用した救助エリア

4.2 YOLOv8nによる推論

物体検出モデルには、軽量でエッジデバイス上でも動作しやすいYOLOv8nを用いた。Raspberry Pi Camera Module 3から取得した映像に対して、Raspberry Pi 5上で逐次推論を実行する構成とした。現在のシステムでは、入力画像サイズを640×480pixelとしている。これにより、Raspberry Pi 5上でも比較的扱いやすい計算量で推論を行うことができる。推論結果として、各検出対象のクラスラベル、信頼度、バウンディングボックス座標を取得し、これらをロボット制御に利用する。

4.3 対象選択と位置情報の算出

YOLOv8nによる推論では、1フレームに複数の検出結果が得られる場合がある。そのため、本研究ではロボットが接近対象とするボール1つに決定するアルゴリズムを実装した。

まず、各検出結果をクラスごとに分類し、「silver ball」と「black ball」に分ける。競技ルールでは、銀ボールは生存者を表し、救助の優先度が高いことから、本システムでは銀ボールを優先的に追従対象として選択することにした。銀ボールが検出されなかった場合には、黒ボールを対象とする。更に、同一クラスのボールが複数検出された場合には、画像中で最も面積の大きいボールを制御対象として選択する。画像上で面積の大きいボールほどロボットから近い位置に存在すると考えられるため、最も効率よく接近できる対象として採用した。

制御対象となるボールが決定した後、バウンディングボックスから位置情報を算出する。YOLOv8nの推論では、各検出対象について左上座標(x_1, y_1)と右下座標(x_2, y_2)が得られる。本研究では、この座標からボール中心を算出し、ロボットの進行方向を決定するための基礎情報として利用する。

ボール中心座標(x_c, y_c)は式(1)で求められる。
式(1)

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y_c = \frac{y_1 + y_2}{2},$$

また、本研究では対象との距離を直接計測するセンサを用いていないため、画像中に占めるボールの見かけの大きさを距離推定の指標として利用した。具体的には、バウンディングボックス面積を画像全体の画素数で正規化し、面積比を算出する。

バウンディングボックス面積を A_{box} 、画像全体の画素数を A_{img} とすると、面積比 r は式(2)で表される。
式(2)

$$r = \frac{A_{box}}{A_{img}} \times 100$$

面積比が大きいほどボールがロボットに近いと判断できるため、現段階ではこの値を用いてボールへの接近動作を実装している。

5. Raspberry Pi 5 と ESP32-S3 の統合

5.1 制御用パラメータの生成

検出対象へロボットを接近させるため、本システムでは画像から得られた位置情報を制御パラメータへ変換している。画像中心の水平方向座標を x_{ref} 、検出対象中心を x_c とすると、偏差 e は次式で表される。

$$e = x_{ref} - x_c$$

5.2 シリアル通信による情報伝達

Raspberry Pi 5 と ESP32-S3 の間は UART によって通信し、Raspberry Pi 5 側で得られた認識結果を文字列形式で送信する構成とした。送信データには、検出対象のクラス、操舵量、画像上の縦方向位置、および面積比を含める。例えば、対象を検出した場合には以下のような形式で送信する。

“SILVER, steer_val, center_y, area_ratio”

また、対象が検出されなかった場合には、未検出を表す情報を送信し、探索動作へ移行できるようにしている。この、認識結果を制御に利用しやすい低次元のパラメータへ変換して送信することで、ESP32-S3 側では受信値に応じた探索・接近・救助動作を実装しやすくなる。

5.3 Raspberry Pi 5 側の処理フロー

Raspberry Pi 5 側では、カメラ画像の取得、物体検出、制御量生成、及びシリアル送信を繰り返し実行する。処理の流れを以下に示す。

1. Raspberry Pi Camera Module 3 からフレーム画像を取得する
2. カメラの搭載方向に応じて画像の向きを補正する
3. YOLOv8n により silver ball と black ball を検出する
4. 銀ボール優先・同一クラス内では面積最大という規則に基づいて制御対象を選択する
5. 対象の中心座標と面積比を算出する
6. 必要に応じて操舵量を計算する
7. クラス名、位置情報、面積比などを UART で ESP32-S3 に送信する

また、開発効率向上及びデバックのため、推論結果を重畳表示した映像を Flask により配信し、ブラウザから確認できるようにしている。これにより、推論結果と制御パラメータの変化を同時に確認しながら調整を進めることができる。

YOLO Detection Stream

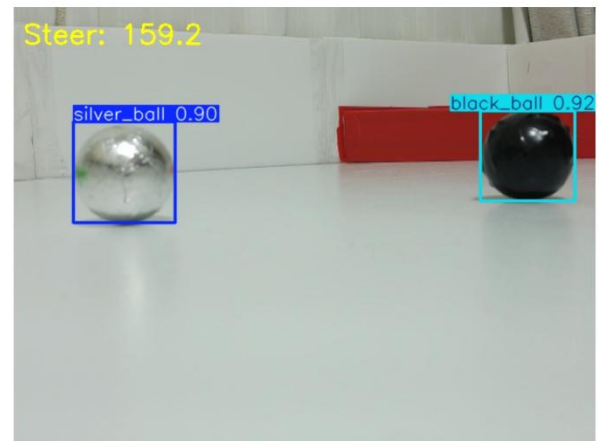


図3 Flask から確認した映像

5.4 ESP32-S3 側の駆動制御

ESP32-S3 側では、STS3032 サーボモータ 4 基を用いた走行制御を行う。STS3032 は半二重シリアル通信方式を採用しているため、ESP32-S3 の UART とは通信方式が異なるため、通信変換基板である FE-URT-1 を介して通信している。これにより、ESP32-S3 から送信した速度指令を各モータへ伝達し、4 輪独立駆動による走行制御を実装した。

6. 現在の実装状況と初期評価

本研究は、ロボカップジュニア・レスキューライン部門に向けて実際に運用する救助ロボットの開発の一環として進めている。従って本稿で述べた物体検出システムは、単体の画像認識実験ではなく、実機ロボット上での運用を前提とした統合システムとして設計されている点に特徴がある。

現在までに、上述のハードウェアを搭載したロボットを開発し、学習済み YOLOv8n モデルを Raspberry Pi 5 上で動作させ、銀ボール及び黒ボールの検出に成功している。これにより、救助対象を画像から検出し、位置情報を抽出するという基礎機能については、実機上での有効性を確認することができた。

一方で、実際の競技環境における完全な自律制御を安定して実現するためには、まだ改良の余地がある。特に、照明条件の変化、床面反射、ロボットの姿勢変動などは認識制度や接近動作に影響を与える可能性があるため、今後は実環境に近い条件下での評価とパラメータの調整を進めている段階である。

7. 今後の展望

本システムの高度化に向け、以下の拡張を計画している。

1. 状況認識の拡張：現段階では、2クラスのボールの検出に焦点を当てているが、緑エリア、赤エリア、出口領域も検出対象として追加し、救助エリア全体の状況認識をカメラベースで実現したいと考えている。これにより、要救助者の発見のみならず、属性に応じた搬送エリアの認識や救助エリアからの脱出口も含め、より統合的な救助行動が可能になると期待される。
2. 制御とセンシングの融合：現在は主として画像中のボールの面積比を利用して対象との距離を縮める方式を採用しているが、将来的には画像中心との偏差に基づくPD制御によって対象方向へ直進し、さらにタッチセンサー等の物理センサによる接触を確認した上で、救助アーム等による回収動作に移行する方式へ発展させる予定である。このように、画像認識による遠距離・中距離での接近制御と、物理センサによる近距離での確実な検出を組み合わせることにより安定した救助動作を実現したい。
3. 視野の拡張：現在のシステムでは推論時の入力解像度を $640 \times 480 \text{ pixel}$ とし安定した推論を図っている一方で、一度に観測できる範囲が狭く、救助エリア全体を探索効率や遠距離からの検出可能範囲に制約がある。そのため、将来的にはカメラの画角や配置方法の改善に加え、推論時の入力画像サイズを拡張し、救助エリアにおける探索効率の向上と救助成功率の向上を目指す。

8. おわりに

本研究では、ロボカップジュニア・レスキューライン部門における自律的救助を目的とし、Raspberry Pi 5上にYOLOv8nを用いた物体検出システムを実装し、下位制御マイコンによる駆動制御を統合したロボットシステムを提案・開発した。現段階で、エッジ環境下における救助対象のリアルタイム検出と位置情報の取得、及びシリアル通信を介した制御パラメータの伝達機構を確立した。今後は救助エリアなどの検出クラス追加やPD制御・物理センサを融合した救助動作を実装し、実環境の救助エリアを模した環境で評価を行う予定である。本研究で得られる知見は、計算資源に制約のある小型自立ロボットにおける画像認識と制御の統合に有用であり、競技ロボットのみならず、エッジ環境で動作する小型救助ロボットの高度化にも寄与すると考えられる。

参考文献

- (1) ロボカップジュニアレスキューライン 2025 競技ルール
<https://drive.google.com/file/d/1ehjgXts0oMskBu-sNlrfKR2JlNuKo7/view>