

GPS とセンサの組み合わせによる自己位置推定システムの開発（第3報）

Development of localization system by GPS and other sensors (3rd report)

技術開発部 生産・加工科 吉田英一 菅野雄大 近野裕太 柿崎正貴 清野若菜

本研究では、GPS による位置推定のほか、GPS 等の測位衛星からの信号が受信できない環境下でも利用可能な、安価なセンサの組み合わせによる自己位置推定システムを開発する。今年度は GPS と慣性センサの融合による自己位置推定システムを開発して自律走行実験を行った。また、昨年度開発した北陽電機製レーザレンジファインダ（以後、「LRF」と呼ぶ）UTM-30LX による自己位置推定システムをロボットに搭載して、屋外環境で地図を作成して自律走行実験を行った。その結果、LRF、GPS と IMU センサ融合による自己位置推定システムにより屋外環境でロボットが自律走行できることを確認し、システムの有用性が確認できた。

Key words: GPS、自己位置推定、障害物検出、YOLO

1. 緒言

近年、自律走行ロボットの研究開発が盛んに行われており、GPS トラクターや農作物の無人運搬ロボットなど屋外の様々な環境を走行可能なロボットの実用化が期待されている。

しかし、屋外で自律走行するロボットの多くは位置情報を取得するために GPS を利用するが、GPS アンテナ周辺に壁等の障害物がある環境では位置情報の誤差が大きくなる課題がある。また、自律走行を実現するためには多くの要素技術を開発する必要があり、開発コストや技術者不足の面から中小企業だけで全て開発することは難しく、ロボット関連産業の参入障壁の一つとなっている。

そこで本研究では、自律走行を実現するために必要な自己位置推定技術において、GPS からの位置情報による位置推定のほか、位置情報が正確に取得できない環境でも、各種センサを組み合わせることでロボットの位置を推定するシステムを開発する。

また、深層学習による画像認識技術を活用して障害物の認識と回避を行うシステムも併せて開発する。

本研究の概要を図1に示す。

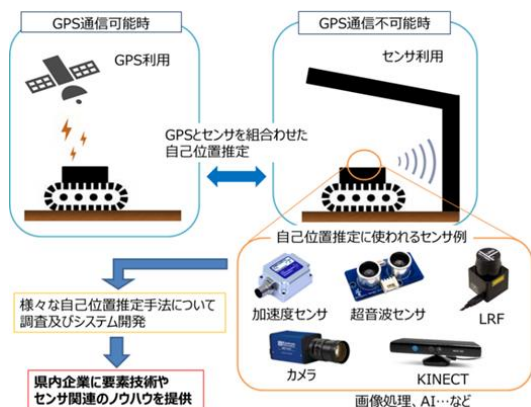


図1 研究概要

昨年度は北陽電機製LRFのUTM-30LXによる自己位置推定システムを構築し、ロボットに搭載して屋内外で環境地図の作成や自律走行実験を行った。また、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、深層学習による物体検出システムを用いて、屋外における物体の学習モデル作成と評価を行った。さらに、製作した自律走行評価ロボットにシステムを搭載して、認識実験や自律走行実験を行った。

本稿では今年度行った u-blox 社製 RTK 対応 GPS モジュール ZED-F9P とアナログ・デバイス社製の慣性センサ ADIS16470 の融合による自己位置推定システムの開発と、動作を確認するために行った自律走行実験について述べる。また、昨年度開発したLRFによる自己位置推定システムを検証するため、環境地図作成と自律走行実験も行ったので、その結果についても述べる。さらに、深層学習を活用した障害物の学習モデル作成と評価結果や、ロボットの障害物回避についても述べる。

2. 実験と結果

2. 1. 自己位置推定システムの概要

本研究では GPS、バイズフィルタ、自律航法による位置推定手法を組み合わせた自己位置推定システムの開発を行った。自己位置推定とは既存の地図やセンサデータから走行中のロボットの位置や向きを推定する技術のことで、自律走行に必須の技術となっている。

ロボットの自律走行の実現には自己位置推定のほか、地図作成、障害物検出と回避、経路・動作計画などの機能を実装する必要があり、膨大なソフトウェア全てを自前で実装することは現実的ではない。

そこで本研究では ROS^{1) 2)} (Robot Operating System) を使用し、自律走行機能を持つ ROS パッケージ (任意の機能を含むソフトウェアの集合) と GPS

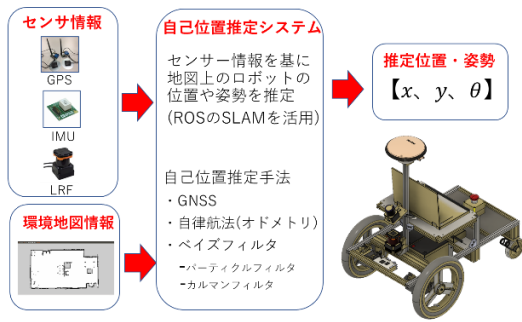


図2 自己位置推定システムの概要

や自律航法の位置推定手法を組み合わせることで自己位置推定システムを構築した。

また、利用するセンサは位置推定や障害物検出に使用するGPS、LRF、慣性センサ、カメラ、超音波センサとし、ROSのセンサドライバやデータ送受信機能を利用して、センサデータの取得や送信を行った。自己位置推定システムの概要を図2に示す。

センサ情報や環境地図情報などから自己位置推定手法によりロボットの推定位置座標(x, y)とロボットの向き θ を推定し、目標地点までの経路を計画して自律走行する。また、ロボットは深層学習により障害物を画像認識して停止や回避行動を行う。

2. 2. 自律走行実験

2. 2. 1. センサ評価用ロボットの概要

ROSを用いた自己位置推定システムの動作を確認するため、LRFを搭載したセンサ評価用ロボットを試作し、環境地図の作成、環境地図を利用したロボットの位置推定及び自律走行実験を行った。

センサ評価用ロボットは i-Cart middle³⁾ をベースとしたロボットで、ツジ電子社製のT-frog二軸ブラシレスモータドライバTF-2MD3-R6を搭載した。センサ評価用ロボットの外観を図3に示す。

TF-2MD3-R6とオープンソースの移動ロボット走行制御プラットフォームYP-Spurを組み合わせ、2台のブラシレスモータを搭載した二輪差動駆動の移動ロボットを構築した³⁾。ロボットの仕様を表1に示す。

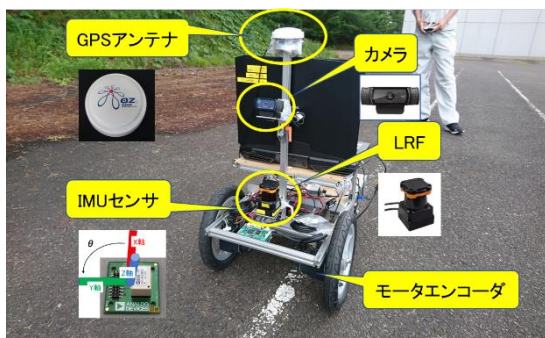


図3 センサ評価ロボットの外観

搭載したセンサ類を表2に示す。

自己位置推定のためのセンサとして、ロボット前方上段にGPSアンテナ、下段に2次元LRFを搭載した。

ロボット前方中段にはカメラを搭載した。下段のLRFで周囲の建造物などの形状データを取得し、ロボットのホイールオドメトリと併せて自己位置推定を行う。ロボット走行中の前方画像を中段のカメラで取得し、深層学習により障害物を認識し、ロボットの停止や回避動作を行う。システム構成図を図4に示す。

センサデータやリモコンからの信号はUbuntu16.04 LTSとROSを搭載したロボット制御用ノートPCで処理し、ROSノード(ROSパッケージ内の複数の独立したプログラム)を介してロボットの速度指令をモータドライバに送信して制御を行う。

表1 センサ評価用ロボットの仕様

最大外形	L700×W490×H730[mm]
重量	21[kg]
使用センサ	GPS受信機、LRF、カメラ
車輪	4輪(前方2輪が駆動輪、後方2輪が従動輪) 前輪直径:300[mm]
ロボット主電源用バッテリー	廣隆光電社製密閉式鉛蓄電池WP12-12(電圧12[V]、容量12[Ah])を2個直列
ブラシレスモータ(2個)	ツジ電子社製TF-M30-24-3500-G200L、TF-M30-24-3500-G200R ギヤ比200:1
モータドライバ基板	ツジ電子社製TF-2MD3-R6

表2 ロボットに搭載したセンサ類

センサ	型番	メーカー
2次元レーザ	UTM-30LX	北陽電機
GPS受信機	C099-F9P	u-blox
IMUセンサ	ADIS16470	ANALOG DEVICES
カメラ	Webcam C920r	Logicool

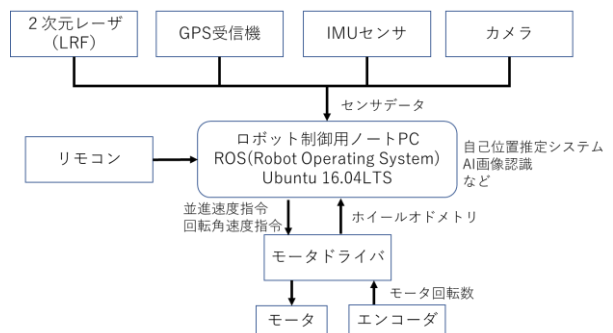


図4 システム構成図

2. 2. 2. LRF による自己位置推定システムの構築

ROSを利用して北陽電機製LRFのUTM-30LXによる自己位置推定システムを構築した。ロボットの自律走行は、2次元の占有格子地図と呼ばれる環境地図を使用することが基本となっている。2次元占有格子地図の作成にはgmappingを使用した。ロボットの自己位置推定にはamclを使用した。amclはパーティクルフィルタを利用した自己位置推定手法であるMonte Carlo Localization (MCL)にKullback-Leibler Divergence (KLD)サンプリング等のテクニックを加えたものである²⁾。ロボットが走行する経路計画にはROSパッケージのmove_baseを使用した。

ROSを利用してロボットが自律走行する時のノードとトピック(ノード間の一方方向のデータ送受信経路)の相関図を図5に示す。図ではノードを丸囲み、トピックを四角囲みで表している。

yvspur_ros ノードはモータドライバからロボットのオドメトリ情報を取得し、odomトピックを出力する。amcl ノードはLRFからのスキャン情報scanトピックを入力し、オドメトリから計算される座標系情報tfトピックを出力する。move_base ノードはロボットへの速度指令cmd_velトピックをyvspur_rosノードに送信し、ロボットのモータ制御を行っている。

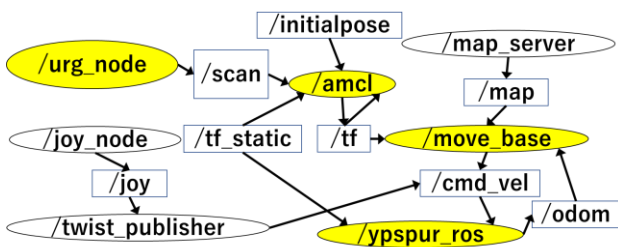


図5 自律走行時のデータ入出力

2. 2. 3. 環境地図の作成

環境地図の作成実験場所として使用したハイテクプラザ敷地内の中庭の画像を図6左に示す。この場所は周囲が建物に囲まれていて、GPS等の測位衛星からの電波が建物に遮断されて測位精度が悪化する環境である。そのため、LRFによる自己位置推定と自律走行の実験場所として中庭を選んだ。

ロボットの自律走行に利用する環境地図を事前に作成するため、LRFを搭載したロボットをリモコンで操作し、約58m×約22mの中庭において屋外での環境地図の作成実験を行った。地図の作成にはgmappingを使用した。

LRFで作成した中庭の環境地図を図6右に示す。昨年度も同じ場所の環境地図の作成を行ったが、地図に歪みが生じるという課題があった。今年度の実験では

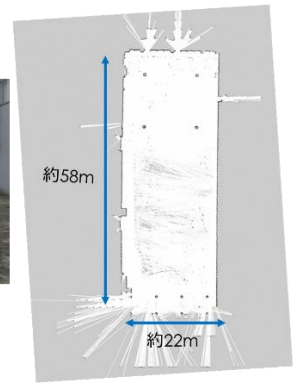


図6 中庭の環境地図

LRFやgmappingのパラメータ値を見直し、歪みの少ない地図を作成することができた。

2. 2. 4. 自律走行実験

はじめに、LRFにより検出した建物の壁や柱などの形状と、あらかじめ作成しておいた環境地図とをマッチングして、ロボットの自己位置推定ができるかを確認した。自己位置推定にはamclを使用した。

中庭の画像を図7右、LRFのスキャンデータと環境地図をマッチングして得られたロボットの位置推定結果を図7左に示す。実験の結果、LRFにより検出した壁や柱のスキャンデータと、あらかじめ作成しておいた環境地図の壁や柱とをマッチングして、ロボットの位置を推定できることが確認できた。

次に、ロボットが推定位置を使って自律走行できるかを実験した。実験では、スタート/ゴール地点と通過地点である目標点(ウェイポイント)の座標値を3点設定して自律走行できるかを確認した。ロボットの移動にはmove_baseを使用した。実験の結果、図7左に示すように、推定したロボットの現在位置を基に目標地点までの経路計画と経路追従を行い、自律走行できることを確認した。

これらの実験により、構築したLRFによる自己位置推定システムが正常に機能し、ロボットの位置や方位を推定できることや、自律走行に必要な精度が得られることが確認できた。

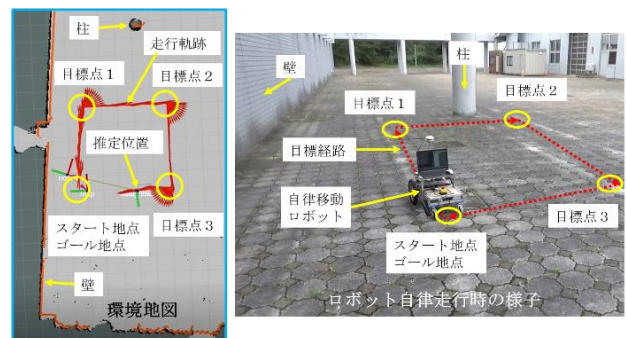


図7 LRFによる位置推定と屋外自律走行実験

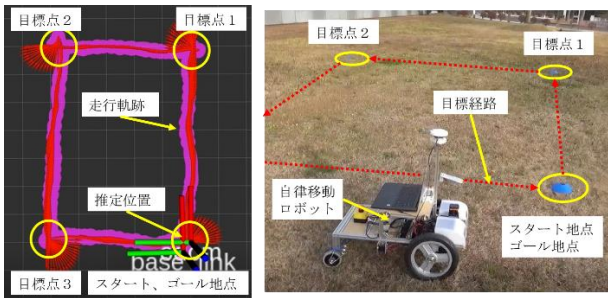


図8 GPSとIMUセンサ融合による位置推定と屋外自律走行実験

2. 2. 5. GPSとIMUセンサ融合による自己位置推定システムの構築と自律走行実験

昨年度はu-blox社製の1周波RTK対応GPS受信機C94-M8Pと2周波RTK対応GPS受信機C099-F9Pの測位精度、初期化時間及びFix持続性について実験を行った。その結果、2周波RTK対応GPS受信機が高精度の測位データを安定して取得できることが分かった。

今年度は2周波RTK対応GPS受信機C099-F9Pと、アナログ・デバイス社の慣性センサADIS16470のセンサを融合したロボットの自己位置推定システムを構築した。センサ融合にはROSのrobot_localizationパッケージを使用した。robot_localizationは拡張カルマンフィルタにより複数のセンサ情報を融合し、ロボットの位置や姿勢を推定するためのパッケージである。

GPSと慣性センサの融合による自己位置推定システムを検証するため、オープンスカイ環境でGPS等の測位衛星からの電波を受信しやすいテニスコートや、北側のみに建物がある芝生などのハイテクプラザ屋外敷地内で実験を行った。実験場所として使用した芝生の画像を図8右に示す。実験の結果、GPS受信機により取得した測位データと、慣性センサの方位データを融合して、ロボットの位置を推定できることが確認できた。また、ウェイポイントを4点設定して、推定位置を基に自律走行できることも確認した。自律走行実験したときの推定位置結果が図8左の画像である。

この実験結果より、構築したGPSと慣性センサの融合による自己位置推定システムでロボットの位置や方位を推定できることや、推定位置を使ったロボットの自律走行ができることが確認できた。

2. 3. YOLOを用いた物体検出システムの開発

本研究では、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)によるリアルタイム物体検出アルゴリズムYOLO⁴⁾ ⁵⁾を用いて、屋外における物体検出の学習モデルを作成し、物体検出度を評価した。本研究では、Darknet⁶⁾で実装されたYOLO v3, YOLO v3-tiny, YOLO v4-tinyをgithubのサイト⁷⁾からダウンロードして使用した。

2. 3. 1. 学習モデルの作成

YOLOによる物体検出では、自律走行ロボットに搭載したLRFでは検出が難しい地面付近に存在する障害物を検出し回避することを想定した。従って検出対象物は、実験場所であるハイテクプラザ敷地内の9つの物体を選定し、画像を取得した(図9)。検出対象物とその画像の枚数を表3に示す。画像は、ハイテクプラザ敷地内を撮影した動画から静止画を抽出し、取得した。取得した画像の総数は7,348枚であった。

YOLOのデータセットには検出対象物の画像とその中に映る対象物の位置情報が必要である。検出対象物の位置情報は、アノテーションツールであるBBBox-Label-Toolを用いて作成した。ただし、表3のクラスNo.9「人間」については、アノテーション済みデータセットであるMSCOCO(Microsoft Common Objects in Context) datasetから画像と位置情報を抽出して使用した。



図9 検出対象物のサンプル写真

2. 3. 2. 学習

学習には、YOLO v3、YOLO v3-tiny 及び YOLO v4-tiny を使用し、それぞれの性能を評価した。学習に用いたマシンのスペックは表4のとおりである。

繰り返し学習数であるイテレーション数は、YOLO v3 が 50,000、YOLO v3-tiny が 50,020、YOLO v4-tiny が 50,000 とした。

学習モデルの評価指標には、mAP 及び IoU を用いた。mAP (mean Average Precision) は、各クラス No. ごとの平均適合率 (AP) を全クラス分平均したものであり、クラスの分類精度を示す。IoU (Intersection over Union) は、予測した領域が正確に検出対象を囲んでいる割合であり、物体の領域の検出精度を示す。表5に各学習モデルの mAP 及び Average IoU の値を示した。mAP の値が最も高かったのは、YOLO v3 であった。MS COCO dataset を用いた事前学習済みモデルの mAP は、YOLO v3 が 55.3%、YOLO v3-tiny が 33.1%、YOLO v4-tiny が 40.2% である⁷⁾ ことから、今回作成した学習モデルはいずれも学習済みモデルの分類精度を上回った。Average IoU の値はいずれの学習モデルも 50% を超えており、予測領域が検出対象をほぼ捉えられているといえる。

2. 3. 3. 評価

作成した学習モデルを用いて、ロボットに搭載した WEB カメラの画像からリアルタイムに物体を検出できるか評価した。YOLO の実装には、NVIDIA Jetson AGX Xavier 開発者キットを用いた。物体検出の処理速度を示す Average FPS の値を表5に示す。YOLO v3 は約 10 フレーム/秒とリアルタイムからはやや遅延が生じたが、YOLO v3-tiny 及び YOLO v4-tiny は約 50 フレーム/秒とリアルタイムに物体を検出することができた。

表3 検出対象物と取得した画像の枚数

クラス No.	検出対象物	数
01	排水溝	466
02	四角の蓋	510
03	スロープ	260
04	コンクリート台	444
05	コンクリート縁 (ピンク)	824
06	コンクリート縁 (グレー)	696
07	鉄製マンホール	860
08	コンクリート製マンホール	288
09	人間	3,000

表4 学習に用いたマシンスペック

OS	ubuntu 16.04 LTS
CPU	Intel® Xeon (R) W-2123 CPU @ 3.60GHz × 8
GPU	TITAN RTX/PCIe/SSE2
OS 種別	64 ビット
メモリ	491.1 GB

表5 学習モデルの性能評価

学習モデル	mAP [%]	Average IoU [%]	Average FPS (Jetson AGX Xavier)
Yolo v3 best weights	90.9	65.4	10.8
Yolo v3-tiny best weights	89.2	63.0	54.3
Yolo v4-tiny best weights	90.0	59.8	52.3

(xmin,ymin)

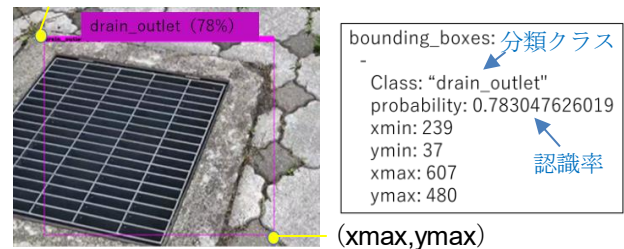


図10 排水溝の認識結果

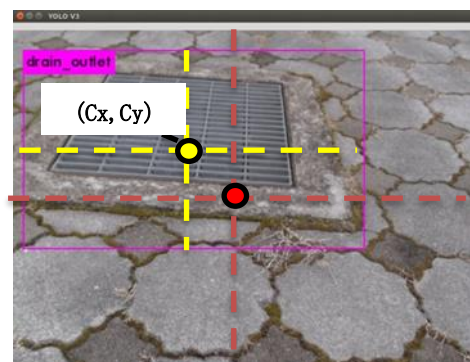


図11 認識画像とカメラ中心位置

$$Cx = \frac{1}{2}(xmin + xmax) \quad (1)$$

$$Cy = \frac{1}{2}(ymin + ymax) \quad (2)$$

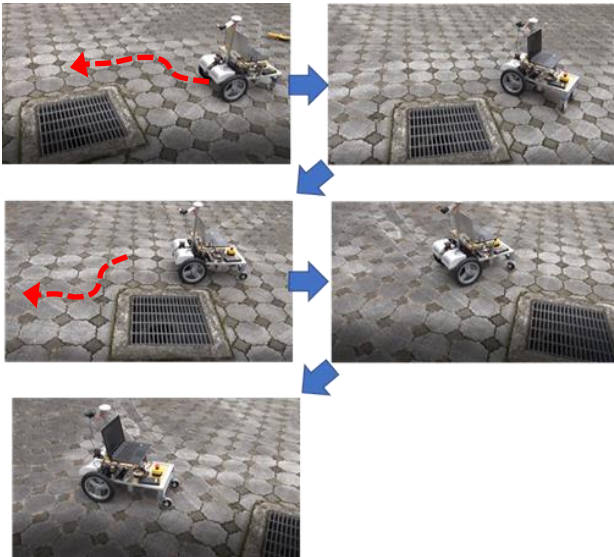


図12 ロボットの障害物回避走行

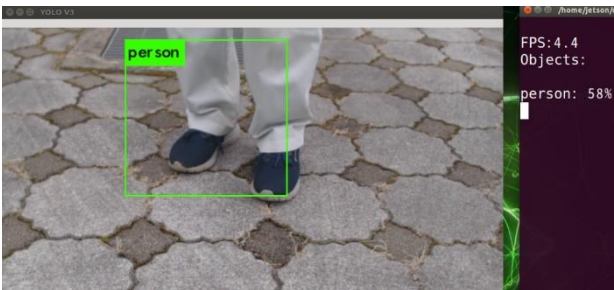


図13 人間の認識結果

2. 3. 4. 障害物回避走行

作成したYOLOの学習モデルを使用し、屋外で障害物を検出し回避が可能であるかを確認した。YOLOのバージョンはmAPの値が最も高かったYOLO v3を使用した。

本実験の検出対象物は、図9-01のようなロボットが走行すると車輪が溝に挟まり走行が不可能となる、大きさが850[mm]×850[mm]の排水溝や図9-09の人間を検出対象とした。ロボットに搭載した障害物検出用のカメラは地上から650[mm]の高さに、俯角45°を撮るように取り付けた。ロボットが障害物を検出した後の回避行動は、検出結果に応じて予め設定した回避行動をとるようにした。図10のようにYOLOでは認識率や検出した画像の領域を知ることができる。ロボットが排水溝を避ける際、検出した障害物画像の中心位置を式(1)、式(2)から求め、図11のように、検出した障害物画像の中心位置がカメラ画像の中心位置よりも左側にある場合は、ロボットは右旋回で障害物を避け、障害物画像の中心位置がカメラ画像の中心位置よりも右側にある場合は、左旋回で避けるようにした。実際にロボットに搭載したカメラでロボットの目の前にある排水溝を検出すると、図12のように予め設定した排水溝を回避する行動に移り、排水溝を回避できることを確認した。しかし、予め行動を設定して

いるため、回避行動の際、障害物からの距離（マージン）を大きく設定しないと、障害物に接触するという課題がある。

また、図13のように人間を検出した場合は、ロボットが停止するように設定した。人間の検出は、人間の足を見て検出する。実験では人間を検出後、ロボットが停止することを確認した。しかし、人間の場合、服装や靴の違い、体の向きの違いにより認識率が落ちる場合があった。今後は学習の際、さまざまな服装や体の向きのパターンのサンプルを増やしモデルを作成する必要がある。また、ロボットが今回の人間のような動的な障害物を回避するためには、障害物と接触しないよう、更に早く認識する必要があるため、今後はYOLO v4、YOLO v5等の処理速度の早いモデルを使用した検証が必要である。

3. 結言

今年度は、周囲を建物に囲まれた中庭の環境地図を作成し、LRFによる自己位置推定システムで位置推定が可能であるかを確認した。また、推定位置を基に自律走行実験を行った。その結果、LRFで得た屋外環境のスキャンデータと環境地図とをマッチングしながら自己位置を推定し、ロボットが自律走行できることを確認した。

また、GPSと慣性センサのセンサ融合による自己位置推定システムを構築して実験を行い、オープンスカイ環境で位置推定と自律走行ができることも確認した。

さらに、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、深層学習による物体検出システムYOLOを実装し、人や物体をリアルタイムで認識し、障害物回避ができることも確認できた。

今後は本研究で得たノウハウを整理して県内企業への技術移転を行う予定である。

参考文献

- 1) 原 祥堯, “ROSを用いた自律走行”, 日本ロボット学会誌, Vol.35 No.4, p.286~290, 2017.
- 2) 上田隆一, “移動ロボットのためのROSパッケージの紹介と実機への導入方法”, 計測と制御, 第57巻 第10号 2018年10月号, p.715~720.
- 3) 渡辺敦志, “移動ロボット用二軸ブラシレスモータドライバの開発とオープンソースプラットフォームを用いた走行制御”, <http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/~ohya/pdf/RSJ2013-AWD.pdf>.
- 4) Joseph Redmon. “YOLO”. YOLO:Real-Time Object Detection. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. (参照 2019-04-03).

- 5) Redmon, Joseph, et al. "You only look once: Unified, real-time object detection." arXiv preprint arXiv:1506.02640,2015.
- 6) Joseph Redmon. "YOLO:Real-Time Object Detection". <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. (参照 2021-1-29) .
- 7) GitHub. "AlexeyAB/darknet". <https://github.com/AlexeyAB/darknet> (参照 2021-1-29) .