GNSS と 2D 地図の自己位置推定切替機構を備えたクローラロボットナビゲーションシステム

中村勇太1,吉田侑樹1

1 株式会社 CuboRex

1 はじめに

近年、労働人口の減少や働き方改革により現場での作業の効率化が求められている。こうした背景でロボットには工場や倉庫での運搬作業やビルなどの警備、屋外では工事現場の清掃や農薬の散布などの作業が自動化されることが期待されている。特に、[1][2] のような AGV や AMR は大量生産を行う工場や大規模な物流倉庫での運搬の自動化を進め、[3][4] のような警備ロボットでは実際のビルの警備を少ない人数で運用することに成功している。これらのロボットでは、[5][6] のような手法が用いられ、場所は限定されているが今日でも現場の効率化に絶大な効果を与えている。

しかし、発電所の除草作業や工事現場の運搬作業など、屋外の現場においては大半が自動化されておらず、ラジコン操作や遠隔映像による操作のロボットで実証実験を行うところまでしか進んでいないという現状がある.以上からまだまだロボットによる仕事の効率化や協業、代替に対しては発展途上であると言える.

CuboRex では、一輪車を電動化した "E-cat kit2" や走破性の高いクローラユニット "CuGo" シリーズをリリースし、"現場のツラいをロボティクスで改善する"を掲げ屋外での現場効率化を進める活動をしている。この "CuGo" シリーズにロボット制御ミドルウェアである "ROS"でのアプリケーション開発ができる環境を整えることで、[7][8] のようなロボットの活動範囲を広げることができ、ロボットによる自動化がより一層発展だろう。殊に、つくばチャレンジでは、リアルワールドでの自律走行技術レベルを向上すること目標としていることから、つくばチャレンジでの課題を"CuGo"で実現することが "現場のツラいをロボティクスで改善する"の近道となると考えた。

本年度のつくばチャレンジの取り組みでは、"ROS 開発キット CuGo V3"をベースに走行用ロボットを作成し、GNSS と MAP の位置推定を切り替えることができるナビゲーションシステムを開発した。これにより、本年度から追加された衛星測位を遮る屋根のある区間でも安定して走行することができるロボットとなった。

本走行では、確認走行区間を抜けた先のパイロン 地帯でパイロンの前に停止して断念した.計算資源 が足りなかったことと、設定した経路が未熟であっ たため、もう少し距離を伸ばすことができると考え られる.本年度では、2DLidar、GNSS、ホイールオ ドメトリのみを使ったシンプルなナビゲーションシ ステムで幅広い環境で走行できるシステムを構築す ることができた.

2 ハードウェア



図1 ROS 開発キット CuGo V3

2.1 ハードウェア概要

本年度の実験に使用したロボットの外観を以下の図1に示す. ハードウェアの構成を表1に示す. つくばチャレンジ走行用ロボットには, CuboRex 製自律走行ロボットの開発用プラットフォームである, "ROS 開発キット CuGo V3"をベースに課題に必要な装備を追加した.



図2 つくばチャレンジ仕様 CuGo

2.2 ROS 開発キット CuGo V3

"ROS 開発キット"は、汎用クローラユニットである CuGo V3、それを正確に制御するマイクロコントローラ、ROS を実行する Linux コンピュータ、それを駆動するバッテリーや電源システムがオールインワンとなったパッケージ製品である。これに必要に応じて 3D LiDAR や GNSS、カメラなどの装備を加えることで、最小限の労力で屋外を走行するクローラロボットの開発を開始することができる.

2.3 つくばチャレンジ仕様

本年度のつくばチャレンジでは、"ROS 開発キット"に GNSS、デバッグ用モニター、モニター確認用のひさし、機体拡張のため押しやすい位置に非常停止スイッチを再設置する変更を行った。後述するが、ナビゲーションシステムに使用したセンサは2DLidar、GNSS、ホイールオドメトリのみという非常にシンプルな構成となっている。計算資源としてもJetson Orin NX というシングルボードコンピュータ1台とモータ制御用のArduino UNO R3 のコントローラで構成されており、比較的安価で製造しやすい屋外走行ロボットとなった。

3 ナビゲーションシステム

3.1 ナビゲーション概要

本年度のつくばチャレンジのナビゲーションシステム構成図を図4に示す.このシステムでは,基本的にみちびきのセンチメーター級測位補強信号を使って補正した GNSS の位置を使用して目的地を目指す.2023年のコースから GNSS の信号を遮る屋根や建物の直下を通るようになったため,対策が必要である.このエリアを通過するとき,図 X のよう

日本語 Japanese ほげほげ ふげふげ 英語 English hogehoge fugefuge

図3 ロボット諸元

に GNSS の測位精度の悪化を確認できたため、このエリアに限って地図を作成し地図に対して自己位置推定を行った。 GNSS を使用しないエリアを通過した後、ふたたび GNSS の自己位置推定に切り替えて走行することにより、大規模な地図を作成することなく長距離の自律走行を実現した。この章では、以下の順番でナビゲーションシステムの詳細について説明する。 GNSS による自己位置推定 2D MAP による自己位置推定センサフュージョン GNSS と MAPの位置推定の切り替え Waypoint の設定経路計画障害物回避その他開発支援ツール

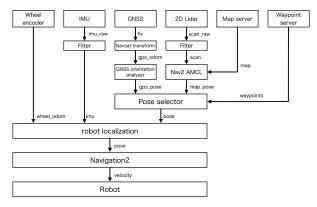


図4 ナビゲーションシステム概要図

3.2 GNSS による自己位置推定

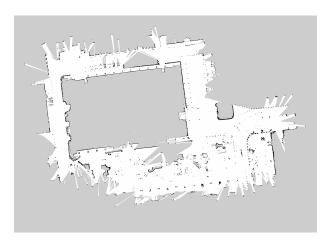


図5 作成した確認走行区間の 2D 地図

3.3 2D MAP による自己位置推定

ロボット下部に取り付けられた 2DLidar を使って図 5 のつくば市庁舎周辺の地図を作成した. 2DLidar は地面から 120mm の位置に取付てあり,周囲 360 度,最大 30m までの距離を得ることができる. SLAM は Cartographer[9] を利用した. 確認走行区間のルートをを 1.5 周するセンサデータを使い,パラメータを調整して地図を作成した. 作成した地図は図 X に示す. 実際のナビゲーションでは,北の屋根があるエリアからピロティを抜けた区間まではこの地図の位置を使用した. (場合によってカットする) 地図を作成する際に,ループクローズが発生するが直線の精度が最も高くなるように調整した. この調整をしないと,ループクローズしたときの誤差の勾配がちょうど北エリアで詳細するため,GNSS と地図の位置にずれが発生する.

3.4 センサフュージョン

このナビゲーションシステムでは、図4のようにロボットの位置推定にホイールオドメトリ、IMU、GNSS、MAP Localizationを入力している。IMU は9軸で地磁気を利用して絶対確を取得していたが、市庁舎北エリアの急速充電器付近で非常に強いノイズを受け屋根ありエリアでの姿勢角の精度悪化が無視できないため共分散を無限大に設定していて、実質使用していない。

ホイールオドメトリの値は、作動二輪モデルから nav msgs Odometry の値を算出して利用している. GNSS の姿勢は前項の通り、直前の連続した位置からロボットの向いている方向を推定し nav msgs Odometry に格納している. MAP Localization は nav2

AMCL を利用している. AMCL の自己位置推定結果は tf での出力は無効化して, nav msgs Odometry に変換して利用している.

3 つの nav msgs Odometry を robot localization[10] パッケージを利用して EKF 処理をし、ロボットの自己位置としてナビゲーションに利用している.

3.5 GNSS と MAP の位置推定の切り替え

ナビゲーション構成図の Pose Selector が示す部分で上記 3.2 と 3.3 の各自己位置推定をした値を排他的に選択し、EKF に送る. こうすることで、センサフュージョンをする側のノードでは、現在の状態がGNSS であるか MAP であるかを意識することなく機械的に処理することができる. それぞれの状態は次に向かう Waypoint のデータ構造にフラグとして内包しており、Waypoint ごとにどちらの位置を使用するかを記録することで切り替えを実現している.

3.6 Waypont の設定

Waypoint の設定はロボットの自己位置をそのまま記憶するツールを作成した. GNSS と MAP Localization のどちらの状態であっても、先述の通り、ロボットが認識する自己位置は変わらないため、現在認識している自己位置をそのままキーボード操作をトリガーに csv ファイルに記憶する. 実験走行では、当日の午前にロボットをコントローラでマニュアル操作し、走行させたい経路の 2m おきのWaypoint を記憶させた. 午後に検定を実施し、作成した Waypoint 列の csv ファイルをナビゲーションシステムに読み込ませて自律走行を行った.

3.7 経路計画

ロボットの自己位置から Waypoint までの走行経路の生成は、ROS 2 標準の Navigation2[11] をそのまま利用した。Waypoint までの経路は A*アルゴリズム [12] で算出し、その経路を RegulatedPurePersuit[13] で追従した。

3.8 障害物回避

3.9 その他開発支援ツール

現場でのロボットのデバッグは, さまざまな条件の中で何が起きたかを素早く発見し, 迅速に修正することが大切である.

ロボットの状態確認としては、1次の目標のWaypointのID2フラグ管理で正常でない組み合わせが発生したことの通知3)センサや中間ノードからトピックが来なくなった時の通知,を読み上げツールによってロボットにしゃべらせた。これにより、異常なゴール判定、想定できなかった状態遷移、各種機能の失陥をいち早く知ることができ、対策を本走行当日までに適用することができた。読み上げツールはOpenJTalk[12]を使用し、文字列のトピックを受け取るとそのまま読み上げるアプリケーションを作成し、ロボットに搭載されたディスプレイのスピーカーから音声を再生することで実現した。

4 性能評価

4.1 ハードウェア走行性能

走行ハードウェアとしては、CuboRex 製のクローラユニットである CuGo V3 を使用した. 研究学園前公園の階段の乗降はできないが、必須課題の走行コースで問題になる段差はなかった. 715 の実験走行では、炎天下の中必須課題の走行コースをマニュアル走行で4周したが、ハードウェアでのトラブルはなかった.

4.2 GNSS 位置推定

4.3 2D MAP 位置推定

図Xに示すつくば市庁舎北エリアの区間はAMCLによる自己位置推定を使用している。図Xで示した作成した地図では、1)図Xの位置に商用バンが止まっていた時に著しく位置精度が低下した2)図Xの位置で1度だけ点対象の位置に誤マッチングした、ことがあった。いずれも確率は低かったが、あらゆるシーンで走行可能にするには、3Dにすることやもっと遠くの地形を見ることなどの工夫が必要であると感じた。

4.4 障害物回避

5 本走行の結果

本走行では、確認走行区間を超えた先のパイロン 地帯でパイロンを避けずに停止してしまったため走 行を断念した、パイロンを避けきれなかった原因と しては、以下の原因が考えられる.

経路計画の動作周波数が1Hzであり、パイロンを回避する経路が引かれる前にロボットが走行を続けた.もとより、GNSSのみでどこまで走行できるかを主眼として開発を進めていた時期があり、GNSSとMAP Localizationが同居することを想定していなかった.本番直前にシステムを大幅に肥大化させたことにより、最適化が進まず計算資源不足に陥ってしまったため、さまざまな制御周期を下げる対応をした.これにより、経路計画の動作周波数が1Hzとなってしまい、回避行動をとる前に障害物を認識する前の行動を続けてしまった.また、周囲の障害物を避けるコストマップの範囲も大幅に小さく設定したため、ロボットが障害物を発見するのにより障害物に近づいた状態でないと障害物に気づけない状況になっていた.

ロボットが他のロボットなどの障害物を回避する手段として,積極的に回避することをせずにその場でとどまることを選択してしまった.回避行動を

とっていればとどまることはないが,回避行動をとることができず,この仕様によってデッドロックしてしまった.

Waypoint を疎に打ちすぎていた.確認走行区間では、周囲のロボット以外の障害物は明確に知ることができており、Waypoint を 1.5m おきに密に設置し走行経路を明確に定義することで安定した走行を実現していた.しかし、パイロン区間は日によってパイロンの設置位置が変わるため、Waypoint の密度を10m以上の疎な設定していた.これによりパイロンから積極的に離れる経路にはならず、繰り返しパイロンに向かって走行する挙動をしてしまった.

当日の GNSS の値が最大 0.5m ほどずれていた. GNSS の値は以前より比較的高精度に位置推定をすることができるようになったが,衛星の位置によっては誤差が大きい時間帯が存在する.ロボットが停止してしまった区間は理想的なオープンスカイな環境ではあったが,もとから設定した Waypoint の位置より 0.5m 程度北にずれた位置を走行していた.パイロン地帯でも比較的設置されにくい点字ブロックに沿って走行をする経路を設定したが,そこから北にずれた経路を走行していたため積極的にパイロンが多い経路を走行し、パイロンを避けきれないケースが発生した.

パイロンを避けられなかった直接的な原因は以上の4点が挙げられるが、確認走行区間の先の対応をしたのが実験走行の最終日の午後のみで試行回数が圧倒的に少なかった。この先のほとんどの区間がオープンスカイな理想的な環境であり、運用次第では2DLidar+GNSS+ホイールオドメトリのみという非常にシンプルな構成でもっと距離を伸ばせたと考える。この先の区間でしか現れない問題を収集できなかった点が今回の課題である。

6 結言

本年度のつくばチャレンジの取り組みとして,つくばの市街地で走行できるロボットハードウェアを作成し,GNSSとMAP Localizationの位置推定を任意のタイミングで切り替えることができるナビゲーションシステムを作成し検討した.

走行実験では、確認走行区間の走行を実験走行最終日の検定と本走行を連続で達成した.しかし、その先の走行区間の調整や設定まで至れなかったため、パイロン区間で停止した.シンプルな構成で自律走行するシステムを実現したが、計算能力の限界

表 1	表の例
1X I	1と シン カリ

日本語	Japanese	ほげほげ	ふげふげ
英語	English	hogehoge	fugefuge

や動的物体の障害物回避などに課題が残る. そのため,多くの現場で走行できるシステムにするためには最適化や計算資源の見直し,より広い範囲を認識することができるセンサ追加など,必要に応じて資源を増設できるシステムになるように開発を続けたい.

文献

7 はじめに

RBProceedings 文書クラスは W3C により策定されている『日本語組版の要件』[?] に準拠することを目指す jlreq クラスをベースにしている。ただし、本文書クラスでは紙面スペースの都合上、多くの余白値をかなり詰めるように設定しており、例えば行間は外国人参政権のようにルビを振れる最小限の余白に設定してある。

論文では、単純なテキストのみならず、しばしば 数式

$$P(B \mid A) = \frac{P(A \mid B)P(B)}{P(A)} \tag{1}$$

や箇条書き

- 第1の項目
- 第2の項目

といった構造も用いられるが、これらもよく知られた文書クラス(例えば jsarticle 等)と同様のシンタックスで利用できる.

8 図表の挿入

図表についても通常の $ext{LMEX}$ と同じ方法を用いることができる.

8.1 図について

図の挿入は、通常 graphicx パッケージによって行う(図 6). クラスオプションにワークフロー(dvipdfmx 等)を指定していれば、各パッケージを読み込む際に何度も同じオプションを指定する必要はない.

8.2 表について

表の挿入は、\begin{table}...\end{table} 環境を使う(表 1).

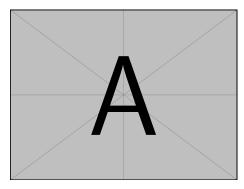


図6 図の例

9 参考文献

参考文献の参照例.

- 論文誌の参照例 [?]
- 本の参照例 [?]
- ・国際会議の参照例 [?]
- ・技術報告の参照例 [?]
- Web ページの参照例 [?]

10 Writing in English

This paragraph shows an English sample. There is no problem with writing your manuscript in English. If you write in LaTeX, please use the distributed document class with the english option:

\documentclass[
platex,dvipdfmx,english]{rbproceedings}