

# RBProceedings 文書クラス サンプル文書

中村 勇太<sup>1</sup>, 吉田 侑樹<sup>1</sup>, 青木 修平<sup>1</sup>, 村上 オト<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Abudori Lab.

## 1 はじめに

つくばチャレンジは 2024 年のロボット大賞に選出された。つくばチャレンジは 18 年間、課題や取り組みを変えながら日本のロボット技術の進歩に大きく貢献してきた。さまざまな研究者に大体的に実験できる環境を提供しつつロボットの技術を成長させてきた。完走しているチームの技術力は非常に高い。初めて参加するチームや個人で参加するチームとは技術的な差が大きい。初参加から完走するまでの道のりは遠い。その要因は以下の点であると感じた。完走しているチームの多くは高価な 3DLiDAR を搭載している。ROS 2 を使用した 3D ナビゲーションのノウハウがウェブ上にあまり公開されていない。つくばチャレンジレポートは昨年のレポートの差分が書かれていることが多い。つくばチャレンジレポートは特定の課題の解法が書かれていることが多い。つくばチャレンジレポートは過去のレポートがオープンになっていないため、引用先が見られない。以上の点から、初学者や新規参入者に対して敷居が高いように感じた。同時に、完走するために必要なことは以下のように感じた。屋外の自律走行には初学者ほど 3DLiDAR があった方がよい。複雑なシステムを運用するには、質の良いハードウェアが必要である。OSS を駆使すればある程度まではロボットを動作させることができる。OSS を利用するだけでは完走には至らない。AbudoriLab. チームでは、本走行では確認走行区間をクリアできなかった。他のロボットが通路を塞いだため新ルートを作れなかった。決められたルートに何も障害物がない状態であれば、もっと走行することができた。決められたルートを走行することだけであれば、自己位置を喪失することなく、障害物も発見し走行することができた。ゼロからつくばチャレンジに参加する人に必要なことがわかるレポートにしたい。AbudoriLab. が用意したロボットやソフトウェア構成を紹介する。

## 2 システム

### 2.1 ハードウェア

自律走行を行う機体に必要な要素は大きく分けると下記 5 点となる。

- センサ
- 走行装置
- 計算機
- バッテリー
- シャーシ

センサは、自己位置推定や障害物を検出する為に必要なとなる。自己位置推定には LiDAR が多く使用されるが、GNSS、カメラといったセンサも使用される。走行装置は、ロボットの移動の為に必要となる。ロボットではモータで車輪を駆動する形式が一般的だが、不整地走行に適したクローラ、段差や階段にも対応できる脚といった機構も使用される。計算機は、センサから取得された情報から走行装置への指令を算出する為に必要となる。大量の計算が必要となる自己位置推定には概ね PC が使用される。多くの IO を要求されるモータ制御のため、マイコンも使用される。バッテリーは、上記の機器を使用する為に必要な電力を供給するために必要となる。移動ロボットは消費電力低下のため、重量効率の高い LiPo バッテリーが多く使用される。シャーシは、その他の機器を接続する為の機構物として必要となる。状況と要求されるタスクにより、適切にシャーシを作成する必要がある。

#### 2.1.1 自律走行ロボット：Penguin

今回、自律走行を実現する基本的な構成を持ちつつ、不整地の走行も可能な機体とすることをコンセプトに、機体を作成した。作成した機体とその搭載した機器を、図 n に記載する。以降の章では、各要素について詳細を記載していく。

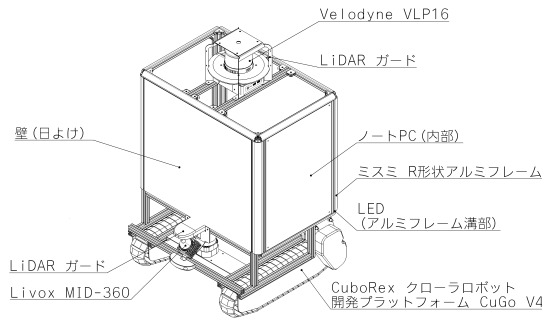


図 1 左の図

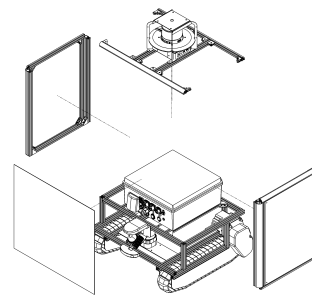


図 2 右の図

### 2.1.2 センサ

自己位置推定を行うための LiDAR センサとして、Velodyne 社の VLP16 を搭載した。自己位置推定用の LiDAR は、遠距離にある環境物 (建物、樹木等) をセンシングすることで、自己位置を推定する。通行人や障害物があつた際にレーザー光を障害し、自己位置推定の精度低下を発生させないために、機体の最上部に搭載した。また、LiDAR は光を使用したセンサであるため、光学窓に傷が発生すると誤検知が発生する。これを防ぐため、金蔵製のガードを作成した。

ロボットの自律走行を障害する障害物を検出する LiDAR センサとして、Livox 社の MID-360 を搭載した。自律走行用の LiDAR は、遠距離をセンシングする必要がないため、機体の下部に設置した。また、今回の機体は後進を行わないため、障害物の検出範囲は前方向のみとした。障害物検出は、後述の通り地面の検出を実施するため、障害物検出範囲の地面も検出できる位置とした。上記をみたす位置として、最終的な搭載位置は図 n のような箇所とした。LiDAR を 35° 前傾させる事で、LiDAR 取付位置から 250mm 先の地面を検出できる形とした。障害物の検出範囲は、機体進行方向から左右 78° となった。障害物検出用の LiDAR も、光学窓への傷を防ぐ為、金属製のガードを上下に設置した。

### 2.1.3 走行装置

走行装置には、CuboRex 社のクローラロボット開発プラットフォーム CuGo V4 を使用した。不整地走行に適したクローラを有するプラットフォームを使用する事で、不整地の走破性向上と開発の高速化を図った。

### 2.1.4 計算機

ロボットの制御を行う PC として、〇〇社の〇〇を搭載した。ノート PC を搭載することにより、ロボットを駆動する電源系列と PC を駆動する計算機の電源分割を実現した。モータの制御には、CuboRex 社製モータドライバを使用した。

### 2.1.5 バッテリー

機体下部に、24V 〇〇 Ah の LiFePO4 バッテリーを搭載した。本機体は不整地走行の可能性を考慮したため、路面により大きな振動が発生する可能性が考えられた。想定を超える振動によるバッテリーへの悪影響を考え、LiPo バッテリーより安全性の高い LiFePO4 バッテリーを採用した。バッテリーは機体下部に設置することで、重心の上昇による安定性の低下を防いだ。バッテリーから供給される電源は、ロボットに搭載した電源分配基板により適切に切替・分配・変圧し、PC を除く各機器に接続した。

### 2.1.6 シャーシ

ロボットのシャーシは図 n の形とした。屋外でのデバッグ作業を想定し、日よけの壁を搭載した。ロボットは図 n のような 5 ユニットで構成し、各部を計 10 本のボルトで分解できる形とした。分解箇所には付当てを設置し、複数回の分割・組立を実施しても再現性のあるシャーシとなる形とした。

構造部材にはミスミ社 R 形状アルミフレームを使用することで、衝突しても対象に危害を加えにくい形状を実現した。突起部・巻き込みが発生しうる箇所には、樹脂製のカバーを搭載した。

ロボットの状態表示のため、アルミフレームの溝部に LED を搭載した。これにより、ロボットが自律走行状態か、操作者による操作を実施している状態かを表示した。

## 2.2 ソフトウェア

ロボットを走行させるためのソフトウェア構成は以下の通りである。

- 地図作成
- 自己位置推定
- 障害物認識
- 経路計画
- 経路追従

自律走行を実現するために、上記のタスクを同時に満たすシステムを構築した。図 n にソフトウェアシステムの概要を示す。このシステムを構築するために多くは OSS である ROS 2 を使用した。このレポートでは、上記のそれぞれのタスクについてどのようなアプローチをしたか述べる。

本システムで自律走行をするためには走行する範囲の地図を作成する。現実の場所とリンクした地図をロボットに持たせることでロボットが目的地と現在地の相対位置把握することができる。このロボットに持たせる地図の精度が後述の自己位置推定の精度に大きな影響を与えるため、効率的で精度の高い地図を作成することが大事である。この地図作成は第 3 章で説明する。

次に、ロボットの現在位置を推定する。LiDAR などのセンサ情報から自分自身が地図上のどの位置にいるのかを推定する。現在位置が分かれば、目的までの向かう経路を計算することができる。正確な位置情報を維持し続けるために 3D の地図から回転式 3DLiDAR のセンサ値とオドメトリ情報を使用して自己位置推定を行う方法を第 4 章で説明する。

自己位置推定ができて、実際には障害物があったどり着かないことがほとんどである。向かいたい場所までの経路上に障害物がどのようにあるのか反映させる。ロボット直近の広範囲で高密度な点群を取得できる 3DLiDAR を使用して、2DLiDAR では見逃しがちな細長い物体を検知し、坂道などの検知したくない物体を除外することができた。この障害物検知手法は第 5 章で説明する。

ロボットの現在位置と障害物を知ることができると、目的地までの障害物を避けた経路を計算することができる。実際の自律走行では、スタート地点から本走行のゴール地点まで 1 度に経路を計算しない。数メートルおきに小さなゴール地点を作成し、そこに到達することを繰り返す。経路を計算した後

には、ロボットがこの経路を正確にトレースするようにアクチュエータの出力を制御する。しかし、線路の上を電車が走行するように、計算した経路を忠実に走行すれば良いとは言えない。ロボットハードの都合で急停止や急旋回が物理的に実現できなかったり、とっさに現れた障害物を回避する必要があるためである。障害物を回避しながら、必要十分に経路をなぞる制御を経路追従という。第 6 章では、経路計画と経路追従を行うナビゲーションについて説明する。

最後に、本走行の結果と今後の展開について述べる。

## 3 地図作成

現代の多くの自律走行ロボットは、行動範囲分の環境地図を必要とする。ロボットが環境地図を持つことにより、既知の環境内で自由に行動することを目指す。

物流倉庫やオフィスビルなどの環境では 2D の地図を使用しても十分に効果を発揮する。しかし、つくばチャレンジのようなひらけた場所であったり、交通の往来があったりする屋外環境であると 2D 地図の使い方によっては、性能が不十分になることがある。このつくばチャレンジ 2024 では、回転式 3DLiDAR を利用し 3D 地図を作成した。3D 地図は複雑な環境や、本走行のように人だかりでロボット周辺に障害物がたくさんあってもロボストに自己位置推定を続けることができた。回転式 3DLiDAR は非常に高価であるが、つくばチャレンジでは、無料貸与があるため、参加者は利用できるチャンスがある。つくばチャレンジ 2024 では、株式会社アルゴさまより無料で貸与いただいた。ここにお礼のことば（謝辞行きかどうかは要検討）

### 3.1 GLIM

地図作成には、回転式 3DLiDAR で、GLIM??を用いて作成した。GLIM はさまざまな 3DLiDAR に対応した SLAM 手法である。IMU やオドメトリを入力することで LiDAR の値とタイトカップリングで位置推定するため、より正確な SLAM を行うことができる。3DLiDAR の回転式やソリッドステート式だけでなく、深度付きカメラにも対応する。IMU やオドメトリの有無も選ぶことができるため、利用の敷居はとても低い。

作成したつくばチャレンジの走行範囲全域の地図

は図 n の通りである。つくばチャレンジの現場でロボットのセンサを起動し、スタート地点からゴールまで走行した時のセンサデータを入力し作成した。

### 3.2 パラメータチューニング

GLIM のチューニングとしては以下の点を変更した。

- k\_correspondences
- voxel\_resolution

k\_correspondences は一つのサブマップを構築する際に利用する点群のスキンの数である。回転式 LiDAR の 16 ラインのものだと点群が疎であるため、この数を上げないとマッチングに必要な点群数に至らないことがある。32 ラインの LiDAR はデフォルトから変更なし、16 ラインの LiDAR は数を 30 程度に設定するとうまく地図が構築されることを確認した。

voxel\_resolution は 3 次元空間の点群を配置する解像度である。つくばチャレンジ 2024 のようなキロメートルオーダーでは、デフォルトの 0.1m 四方だと、GPU メモリ 8GB が飽和した。今回は 0.25m 四方に設定したら、研究学園駅前公園を含むすべての範囲で地図を作成することができた。

最後に GLIM のオフラインツールで追加でループクローズを設定する。SLAM を実施した後、オフラインツールで再度開くと、各サブマップ同士の位置関係をグラフィカルに確認することができる。このツールで、スタート地点、往路と復路が重なるパイロン地帯、横断歩道の待機場所で再度ループクローズをかけることで、より正確な地図に修正された。

これらの作業を通じて、つくばチャレンジ全域で自己位置推定ができる地図ができた。3D 地図は <https://google-drive> で公開しているので、来年同じ構成で使いたい方は使うと良い。

## 4 自己位置推定

前章で作成した 3D 地図に対して、ロボットの自己位置を推定をする。3D 地図で自己位置推定することで、つくばチャレンジ 2024 のコース全域でほとんど破綻することなく位置を推定することができた。

自己位置推定手法には、OSS の Lidar\_Localization\_ROS2??を利用した。

### 4.1 Lidar\_Localization\_ROS2

Lidar\_Localization\_ROS2 は ROS 2 で動作する自己位置推定アルゴリズムである。3DLiDAR の他に IMU やオドメトリのセンサ値を利用してよりロバストに推定することができる。前章で作成した 3D 地図を pcd ファイルに変換して読み込み、コンフィグで有効にしているセンサを起動すれば、自己位置推定を実施してくれる。

### 4.2 パラメータチューニング

Lidar\_Localization\_ROS2 のチューニングとしては以下の点を変更した。

- k\_correspondences
- voxel\_resolution

安定したインターネット環境で書く。

AAA の点では、あああパラメータが効く BBB の点では、いいいパラメータが効く CCC の点では、うううパラメータが効く XXX という点に注意してパラメータチューニングするとよい。以下の点で自己位置が破綻することがある。あああいいいうううオドメトリをオンにすることでふっとびを抑えることができた。IMU はチューニング不足で破綻してしまった。結果的に XXX に注意すると良い。

## 5 障害物認識

自己位置とゴール座標が分かればロボットが進むべき経路を計算できる。ただし、これだけでは現実にある衝突してはいけない障害物を考慮していない。LiDAR などのセンサを使って障害物を認識し、それを地図に反映させることで障害物を考慮した経路を計算することができる。

多くのロボットでは、2DLiDAR を障害物に使用している。2DLiDAR を使用すると、ロボットに設置した高さの平面でしか障害物を認識することができない。それによって、背の低い障害物が認識できなかったり、パイロンなどのように地面に向かって太くなる形状のものは本来より小さな障害物として認識したりすることがある。また、坂道のようにロボットが傾いている時は、地面を障害物として認識することがある。2DLiDAR は工夫しないと、認識したい障害物を見逃したり、地面のような障害物でないものも障害物として認識することがある。

Abudori Lab. チームでは、3DLiDAR を使うことで、

小さな障害物を認識し、坂道などの地面はアルゴリズムで除外することで、上記の問題を回避した。このアルゴリズムは OSS で PointCloudToLaserScan として公開している。

## 5.1 PointCloudToLaserScan

このパッケージは、3DLiDAR でロボット直近の 3 次元点群を取得し、障害物のみを抜き出し 2DLiDAR の Scan として出力する。

簡単な手順としては以下の通りだ。

- 点群をダウンサンプリングする
- LiDAR 点群の傾きを設置角度分回転し水平にする
- 法線を各点ごとに計算する
- 法線ベクトルから垂直に近いもののみを抜き出す
- 垂直に近い点群を Scan に変換する

法線ベクトルに注目することで、坂道や乗り越えられる小さな段差は障害物と認識しない判断ができた。壁や大きな段差は、法線ベクトルが水平方向に向くため障害物として認識することができた。

障害物と坂道を判断する計算を単純にするために、法線の Z 方向で閾値で区切った。つくばチャレンジでは、斜度 25 度に傾いた時の Z 方向の高さを閾値に、それよりも Z の値が小さいものを障害物が映った点群と判断した。この閾値処理のみで、細い鉄パイプやパイロンの根本、パイロンにかかった棒も障害物として判定できた。苦手な物体として、背のひくい水平な障害物は検出することが難しい。身近にあるものとしては、平台車や高さが 20cm 程度のダンボールなどが挙げられる。幸い、つくばチャレンジの環境にはなかったため、障害物認識で苦戦することはなかった。

出力した点群を OSS の PointCloudToLaserScan パッケージに入力し、2DLiDAR の scan トピックに変換した。この Scan トピックを Navigation2 に入力することで、広く使われる 2DLiDAR のサンプルをそのまま動かすことができた。

## 6 ナビゲーション

### 6.1 経路計画

ROS2 では、経路計画パッケージとして Navigation2 がある。環境地図と自己位置を入力すれば、指定し

たゴール座標までの経路を出力してくれる。計算アルゴリズムの手法が複数用意されている。各手法が Plugin として実装されており、コンフィグファイルで Plugin 名を変更するだけで反映される。つくばチャレンジ 2024 では、3DMap を利用して自己位置推定を行なった。Navigation2 には Map を入力せず、3 DMap からの自己位置推定の X,Y,Yaw の値をそのまま利用するだけで 2 D に転写した。Navigation2 には作成した ObstacleToScan から 2DLiDAR を模擬した scan トピックを入力した。これで 2 DMap はないが、ロボット周辺の障害物マップは作成される。これで、ロボットから 2 ~ 10 m 程度の距離にゴールを指定することで短距離の経路を計算してくれる。この短距離で達成できるゴールを数メートルおきに、完走のゴールまで配置しつづける。近くのゴールが達成できれば、次のゴールを設定する処理を自動化した。これが PenguinNav。penguinnav はお願いします。SmacPlanner。経路計画方法は SmacPlanner を利用した。SmacPlanner は Navigation2 の Plugin に実装されているため、Config ファイルで SmacPlanner を選択するだけで利用できる。SmacPlanner はロボットの形状を考慮した衝突判定をしてくれる。したがって、自ロボットの投影面積であるポリゴンを指定するだけで、無茶な経路は選ばれなくなる。また、最小回転半径も指定できるため、なめらかな円弧で走行経路を利用できる。これにより、障害物ギリギリまで近づいて急に避ける行動を抑えることができた。

### 6.2 経路追従

前節の SmacPlanner で計算された経路をロボットがどのように再現するか計算するアルゴリズムを経路追従アルゴリズムという Navigation2 では、さまざまな経路追従アルゴリズムを利用できるつくばチャレンジ 2024 では、DWB をつけた DWB はロボットが再現可能な速度や加速度の範囲の中で一番良い速度を選択する最高速度と最低速度と加速度を設定できるクローラの制御の場合、抵抗が非常に大きく初動に大きなエネルギーを必要とする最低速度を速く設定し、すぐに停止できるように減速加速度を大きくするように設定した。

## 7 本走行

以上の構成で 3 DLiDAR を利用した自律走行システムを構築したつくばチャレンジ 2024 の本走行

では、市庁舎裏の細い通路でロボットを回避し、元の経路に再計画できずにリタイアした。それまでの走行は、自己位置を見失うこともなく、障害物を未検出になることなく動作した。障害物からは距離を1m程度離れるように設定していたため、狭路では、非常に慎重にゆっくりゆっくり進んだが、走行経路はブレることはなかった。このロボットは設定したルートに忠実になぞる機能しか搭載していなかった他ロボットが決められた道を長時間塞いでしまった時、迂回する機能は搭載されていなかったため、復帰できず終了した本年は決められた座標の通りに走行する機能までは3 DLiDARを使って実現することができた

## 8 結論

つくばチャレンジ 2024 では、3 DLiDAR を利用したナビゲーションシステムを構築することができた。3 DLiDAR のナビゲーションシステムは文献が少なく構築することに苦労したが、最低限の機能を揃えることはできたつくばチャレンジの多くのロボットは3 DLiDAR を利用しているが、何から手をつければ良いかわからない人はいるはずであるこのレポートでは、ハードウェアから自律ナビゲーションシステムの各機能のおおよその仕組みを述べた来年初参加を考えている人の参考になれば幸いである環境構築の方法や実際の詳細の使用方法などは引き続きブログで解説していく予定である。次年度では、決められたルートを走行する上での意思決定機能を追加で実装する完走するためには、不測の事態でも、認知判断行動することが必須である完走にむけてナビゲーションシステムをブラッシュアップしていく予定である。

[1]

## 参考文献

- [1] W3C 日本語組版タスクフォース. 日本語組版の要件 (日本語版), (2020-11 閲覧). <https://www.w3.org/TR/jlreq/>.