

# 四脚ロボット Laikago を用いた大学キャンパスにおける自律走行

千葉工業大学 fuRo アウトドア部

入江清 鈴木太郎 原祥堯 吉田智章 友納正裕 西村健志 大和秀彰 清水正晴

## 1. はじめに

筆者ら千葉工業大学 fuRo アウトドア部(以下、本チームと表記)は、大学キャンパス内の自律走行を目標として自律走行システムの開発を行った。開発したロボットシステム(図 1)は市販の四脚ロボット Laikago を足回りに用い、3D Lidar を用いた 3 次元 6 自由度の自己位置推定を行いつつ、事前に計画した経路を自律走行するものである。千葉工業大学 津田沼キャンパス内に設定した約 1.5km の経路で実験を行い、自律走行に成功した。

## 2. システム概要

ここでは開発したシステムの概略を述べる。より詳細な説明は文献 [1] も参照されたい。

### 2.1 Laikago

車体として Unitree 社の Laikago を使用した。Laikago は全長 55cm、全幅 35cm、高さ 60cm であり、重量は約 25kg、最大可搬重量は約 9kg である。最大 0.8m/s で歩行することができ、連続動作時間は約 2 時間である。Laikago には組み込みコンピュータが内蔵されており、歩行制御はその内部で行われる。またロボット上部に搭載した小型 PC (CPU: Intel Core-i5) にはユーザープログラムを自由に配置して実行することが可能である。組み込みコンピュータと小型 PC の間はイーサネットで接続され、コマンド形式でやり取りを行う。

### 2.2 センサと取付台

外界センサとして Velodyne VLP-16 を追加で搭載した。このため、ロボット上部に PC と VLP-16 を搭載するための台と転倒時の衝撃を軽減するための Lidar ガードを自作した。

#### 2.2.1 走行戦略

ロボットは事前に作成した地図と経路を与えられ、それに従って走行する。走行経路上に障害物が検出された場合は、減速・停止し、障害物が一定時間以内に取り除かれない場合には回避経路を計画して走行を再開する。

### 2.3 ソフトウェアアーキテクチャ

システム構成図を図 2 に示す。ソフトウェアの構成は本チームの 2017 年版 [2] を土台にした。上位 PC は Linux (Ubuntu 18.04) で動作し、ナビゲーションに必要なソフトウェアモジュールは機能ごとに独立したプロセスで動作する。プロセス間は共有メモリベースのミドルウェア fuRom [3] で通信する。モジュールの死活制御および監視には Supervisor を用いた。

### 2.4 地図構築

地図構築には、事前に Lidar を搭載したロボットをリモコン走行させ、収集したセンサデータを用いてオ



図 1: 開発したロボットシステムの外観

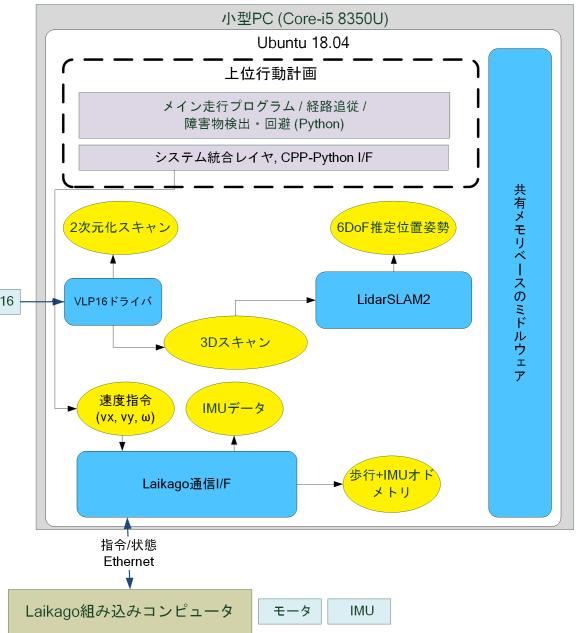


図 2: システム構成図

フライング SLAM を行う。SLAM の手法としては、文献 [4] に述べた Lidar による逐次移動量推定とループ閉じ込みを用い、さらに地図の傾きや反りを補正するため、IMU 観測による重力方向を追加拘束としてポーズグラフに与えるよう拡張した。ポーズグラフの最適化は文献 [5] に示したものを利用した。

### 2.5 自己位置推定

自律走行時の自己位置推定は 3D Lidar 一周分の観測を入力とし、ICP によるスキャンマッチングによって 6 自由度の位置姿勢を逐次的に推定する。この際オドメトリは使用していない。

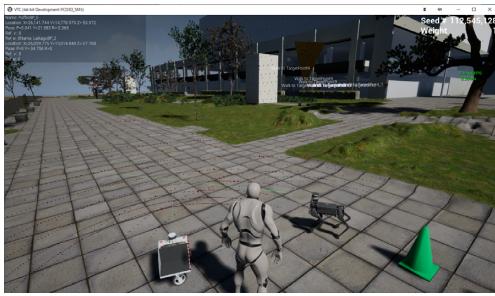


図 3: VTC シミュレータのスクリーンショット。Lidar を搭載する車輪型ロボットと四脚ロボットが動作している。赤い点群は Lidar の反射点を可視化したもの。

## 2.6 事前地図なし走行

つくば市役所内部を模擬し、経路中に事前地図を作成しない区間を設定した。この区間に走行する戦略としては、自己位置推定と Lidar オドメトリを並列に動作させ、自己位置推定のスコアが低下した場合は Lidar オドメトリに切り替えて移動量を推定することとした。地図なし区間を通過し、再び地図とのマッチングが可能になると自動的に自己位置推定に復帰する。

## 2.7 走行制御

歩行制御はメーカーが実装して Laikago に組み込み済みのものを使用する。上位 PC からはジョイスティックの操作量(前後方向速度、左右方向速度、旋回角速度)をそれぞれ  $[-1, 1]$  の範囲で与えて動作させる。この操作量は物理的な速度と直接対応しないため、一般的な制御を適用して思い通り動かすことは容易ではない。

そのため、歩行制御をブラックボックスとして扱い、強化学習による経路追従制御を実装して使用した。実機を直接用いて強化学習の訓練を行うことは故障やバッテリー駆動時間での問題があるため、事前にリモコン走行で収集したデータを用いてオフラインで訓練を行った。

## 2.8 段差や斜面への対処

Laikago はキャンパス内の小さな段差や斜面で転倒することがある。特に歩幅が大きい場合に転倒しやすいため、こういった危険箇所を通過する際には歩行速度を下げるのこととした。これは地図の各経路に最大速度情報を人手で付加することで行った。深度センサなどを用いてオンラインで路面状況を認識して速度を設定することも考えたが、本質的な対処ではないため実装は見送った。

## 2.9 シミュレータ

移動ロボットシミュレータ VTC [6] に Laikago モデルを実装した(図 3)。車輪型ロボットとの差異としては、全方向移動や歩行の揺れがシミュレートされるが、歩行に関する動力学シミュレーションは行わず、転倒もしない。このシミュレータは主に障害物回避や経路追従制御のデバッグに用いられ、開発の効率化に有用であった。

## 2.10 モニタリング環境など

ロボット本体には画面や入力装置を搭載しないため、プログラムの起動・停止などはノート PC から無線経由で行う。オペレータはノート PC を弁当売り様の台



図 4: ロボットの無線モニタリング装置

(図 4) を用いて操作する<sup>1</sup>。この台の裏側に無線 LAN アクセスポイント Buffalo WAPN1266R を取り付けてロボット搭載 PC と通信する。このアクセスポイントは屋外で使用可能な 5GHz 帯をサポートし、DFS による中断を回避するための自動チャネル切り替え機能を備える。ただし、この機能が屋外使用上、どの程度有用であるのかは未検証である。

## 3. 実験

2020 年 12 月 7 日および 9 日に千葉工業大学 津田沼キャンパスにて自律走行実験を行った。使用した地図と走行経路を図 5 に示す。経路は大学キャンパス内を異なる経路で二巡するものである。走行経路のうち、6 号館内部ではセンサデータを収集しておらず、地図無しで走行することになる。また途中に 1 箇所の坂と 3 カ所のスロープを含む。

2 日間にわたる実験の結果を表 1 にまとめる。ロボットの故障などいくつかのトラブルがあったものの、最終的には設定した経路全体の自律走行に成功した。

この日の実験に至るまでの経過を表 2 にまとめる。COVID-19 の広がりによる開発中断があったものの、キャンパス内自律走行という目標に対しては、(このロボットの踏破能力の範囲で) 概ね目標を達成することができたと考えている。

## 4. 脚型でのチャレンジを振り返って

### 4.1 Laikago の不便さ

本チームはこれまで車輪型ロボットでつくばチャレンジに参加してきた。脚型ロボット Laikago はそれに比べると、開発や実験はかなり手間がかかるという印象である。開発の中で感じたデメリットには

- バッテリー駆動時間が短い
- 手押し移動ができないため運搬に人手が必要
- 上げ下ろしの際、脚部に指などを挟まれないよう気を使う
- 車道と歩道の間の斜めブロックでしばしば転倒する
- 転倒すると一旦電源を切って起動シーケンスをやり直す必要が有るために実験が中断される
- 転倒防止のため周辺環境に気を使う必要がある

<sup>1</sup>写真中の PC 台は神永拓氏(現: 産総研)が製作されたものである。類似した製品として Connect-A-Desk などが市販されている。余談だが筆者らはこのスタイルを、ゲーム「ザ・タイピング・オブ・ザ・デッド」のキャラクターに似ていることから、ゾンビキットと呼んでいる。

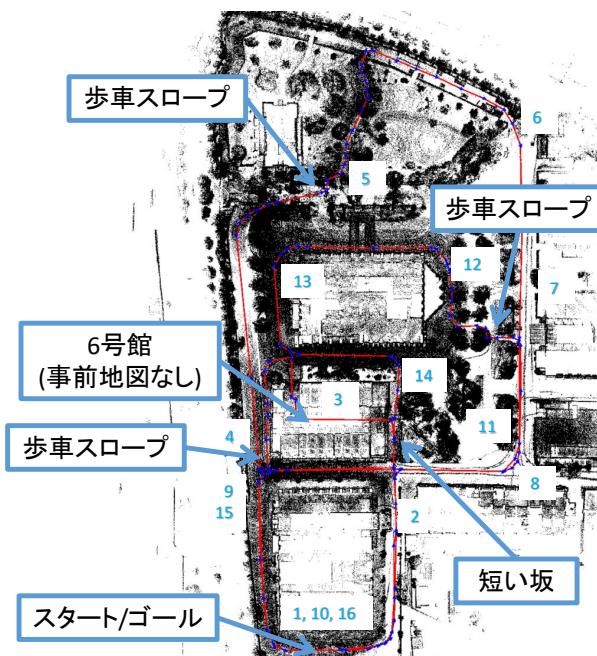
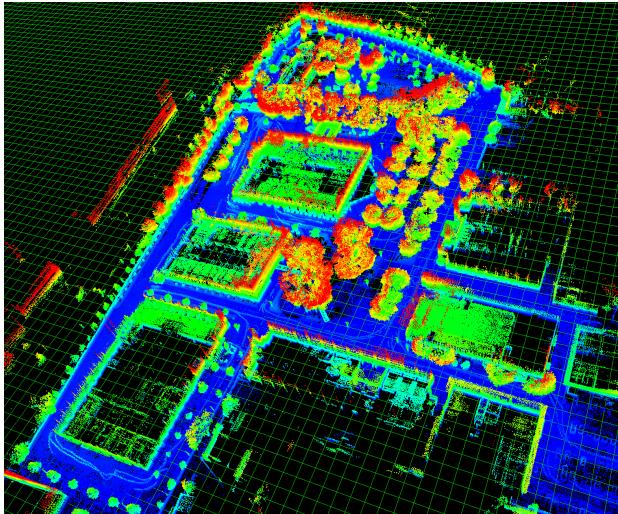


図 5: 自律走行実験に使用した地図(上:三次元点群地図、下:経路)。三次元地図は2020年8月6日に車輪型移動ロボットPuffin[7]を用いて収集したデータを用いて構築した。

- ノートPCが載らないためソフトウェアのデバッグがやりにくい
- (今回の使用方法では)段差乗り越えなどの三次元的移動ができないため、脚の利点がほとんど無い

などがある。ただし、同じ脚型ロボットでもBoston Dynamics社のSpotは段差認識・踏破機能が備わっているようであり、また異なる印象を持つ可能性がある。

良い点としては、開発者目線では動いた時の楽しさはひときわ大きい。手がかかる子ほど可愛いというか、失敗も憎めない面があり、転倒時には大いに笑わされた。また、周囲の注目度合いも車輪型ロボットと比べて高いと感じた。

表 1: 自律走行実験の結果

実験日	結果
12/7 1回目	5付近のスロープで転倒したため <b>中断</b>
2回目	★スロープでの歩行速度設定を下げた 7付近でアクチュエータ故障のため <b>中断</b>
12/9 1回目	★予備機体に交換 歩行にふらつきが見られ、自己位置推定の誤差と障害物判定の不具合のため 6号館前でスタックし <b>中断</b>
2回目	★ふらつき抑制のため速度を下げた スタート直後、経路上を走行する自動車と鉢合わせたため <b>中断</b>
3回目	モニタリング用ノートPCのバッテリーケアのため5付近で <b>中断</b>
4回目	★ノートPCを交換 コース全体を自律で <b>完走</b> (10-16のコースを走行するのは初挑戦・初成功)

表 2: 開発のタイムライン

日付	進捗状況
2019/11/13	Laikago購入、リモコン操縦で動かし、3回転倒
2019/12/03	シャットダウン時に脚のリンクが折れる
2019/12/19	Lidar台・VLP-16を搭載(西村版)
2019/12/25	2D自己位置推定により屋内自律移動に成功
2020/01/31	移動量とIMUによる簡易オドメトリを実装 キャンパス内リモコン操縦にてデータ収集 - COVID-19の拡大により中断 -
2020/08/06	車輪型(Puffin)でキャンパス内地図用データ収集
2020/08/31	3D自己位置推定に基づく自律走行を実装
2020/09/04	屋外約400mの自律走行に成功
2020/09/18	PC台・Lidarガードを搭載(鈴木版)
2020/10/20	VTCに四脚ロボットモデルを追加
2020/11/24	強化学習ベースの経路追従を実装
2020/11/27	屋外での事前地図なし区間を含む自律走行に成功
2020/12/02	障害物回避を実装
2020/12/04	坂道で転倒することを発見 屋外約900mの自律走行に成功
2020/12/07	6号館建物内の事前地図なし走行に成功 実験中に脚が折れる故障
2020/12/09	予備機体に交換し1.5kmの自律走行に成功

#### 4.2 安全の確保

Laikagoには無線スイッチによる非常停止が提供されているが、作動させるためには1秒間のボタン長押しが必要であり、またロボットが脱力するため転倒することになる。上位ソフトウェアの不具合で意図しない方向にロボットが走るのを止めるには、紐などで引っ張って止める方が安全であると感じた。

現行の遵守事項にある「人の手や足などを巻き込む恐れのない構造であること」を脚型ロボットで完全に満たすためには、脚全体をスカートなどで覆う方法が考えられるが、これは脚の自由度を減じる懼れがある。今後、脚ロボットを用いるつくばチャレンジ参加者の増加も想定されるため、脚型の特徴・利点も考慮した安全対策を議論していきたい。



図 6: 千葉工業大学 津田沼キャンパスにおける自律走行実験の様子

## 5. おわりに

本チームでは、大学キャンパス内のナビゲーションを目標とし、四脚ロボット Laikago を用いた自律走行システムを開発した。結果として、キャンパス内に設定した事前地図なし領域を含む約 1.5km の経路の自律走行に成功した。

今年のつくばチャレンジは、つくば市への運搬・出張が無く、実験の日程が好きなように決めることができるという点では効率的ではあった。しかし、一般的な歩行者や横断歩道、開けた環境は大学キャンパス内で再現することは難しく、つくばチャレンジ本来の目的である実環境での実証ができたとまでは言えない。改めて、多くのチームが同じ場で同じ課題に取り組むという、これまでのつくばチャレンジの利点を再認識させられた。

本年度の難しい局面で運営にご尽力いただいた、つくばチャレンジ実行委員および事務局の方々に感謝申し上げる。来年度以降、つくばの地で皆様と再会できる日が来ることを祈念する。

## 参考文献

- [1] 入江清, 鈴木太郎, 原祥堯, 吉田智章, 友納正裕, 西村健志, 大和秀彰, 清水正晴. 脚型ロボットによるつくばチャレンジ実験.

ジ 2020 への取り組み. 第 21 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2020) 2A3-13, 2020.

- [2] 原祥堯, 入江清, 吉田智章, 西村健志, 大和秀彰, 友納正裕. fuRo 内製技術の統合による自律移動ロボットの開発と実証実験. つくばチャレンジ 2017 参加レポート, 2018.
- [3] 入江清. ROS との相互運用性に配慮した共有メモリによる低遅延プロセス間通信フレームワーク. 第 35 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017) 2B2-01, 2017.
- [4] M. Tomono. Loop detection for 3D LiDAR SLAM using segment-group matching. *Advanced Robotics*, Vol. 34, No. 23, pp. 1530–1544, 2020.
- [5] 入江清, 友納正裕. 姿勢表現に回転ベクトルを用いた三次元グラフベース SLAM. 第 18 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2017) 3E3-06, 2017.
- [6] 吉田智章, 入江清, 原祥堯, 西村健志. Unreal engine4 を利用したつくばチャレンジシミュレータ. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2019) 1P1-S09, 2019.
- [7] 原祥堯, 西村健志, 入江清, 吉田智章, 大和秀彰, 友納正裕. 屋外 3 次元地形を走行する自律移動ロボットの開発. 第 19 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2018) 1E3-10, 2018.