

Autoware-in-Forest:

森林環境における丸太運搬フォワーダの自動走行

○浦野 健太 (名古屋大学) 米澤 拓郎 (名古屋大学) 河口 信夫 (名古屋大学)

Forestry labor, such as cutting and transporting woods, is hard and unsafe. Smart machines are expected to reduce workloads and to achieve higher productivity. In this study, we installed sensors such as LiDAR, IMU onto a forestry forwarder and run it in a autonomous way using Autoware. In this paper, we report about sensor installation, software configuration and autonomous run in a forest environment under the research program on development of innovative technology grants from the Project of the Bio-oriented Technology Research Advancement Institution.

1. はじめに

我が国における林業の安全化・効率化は、作業者の減少・高齢化が進む中で喫緊の課題である。林業は労働負担が大きく、労働災害の発生率も高いため、機械や ICT 技術を利用して、負担軽減や作業自体の省人化を行い、作業の効率と安全性を同時に向上するスマート林業を実現する必要がある。

現在の林業における生産作業では、まず重機による作業道の整備を行う。その後、フォワーダで作業道を登り、丸太を積載して荷下ろし地点まで降りる運搬作業を行う。運搬にはフォワーダの運転者が必要であり、仮に効率化のためにフォワーダを複数台利用しようとしても、その分人的コストが増加するのが現状である。

この運搬作業の省人化を目指して、フォワーダの自動走行技術が研究されている。既存的方式では、車両誘導用の電線を埋設するようなインフラの敷設や、各種操作のタイミングを位置と共に記録する教示走行が必要であり、コストや効率の面で課題がある。一方、一般公道を走行する自動車では、自動運転技術が広く研究されており、実際の道路において技術検証が進められている。この技術をフォワーダで利用できれば、作業道における運搬作業において運転者が不要となり、またどこに車両を持っていても自動走行を行えるため、安全性と効率性を同時に改善できる。

そこで、公道向けの自動運転技術を応用したフォワーダの自動走行を考える。自動走行のためには、センサ駆動・自己位置推定・経路計算などのソフトウェアが必要であるが、フォワーダ専用に記述するのは非効率である。そのため本研究では、ロボット開発で広く利用されている ROS (Robot Operating System) を利用し、ソフトウェアを記述する。特に、ROS を用いた自動運転用のオープンソースソフトウェアである Autoware を利用し、フォワーダの駆動に必要な拡張を行って自動走行を実現する。本稿では、森林環境で図 1 のようにフォワーダを走行させるまでの過程をまとめ、途中で発生した問題や発見した課題について記述し、今後の技術の発展に資する知見の報告を行う。

2. 林業の自動化に関する研究

林業においては、丸太の運搬だけでなく、木の育成状況の確認や伐採した丸太の本数の記録などにおいて

も自動化が試みられている。ここでは、林業自動化に関する研究を紹介し、現状をまとめる。

2.1 スマート林業

林業におけるスマート化は、森林の状況の計測や、伐採した樹木の諸元の取得などで行われており、経験や記憶に頼る林業からの変容を図っている。川北ら [1] は、FARO 社のレーザスキャナを用いて、地上から森林環境の計測を行っており、その計測精度を評価している。

加藤ら [2] は、レーザセンシングによるスマート精密林業について、ドローンによるセンシング情報を利用して間伐木へ ICT ハーベスタをナビゲーションし、ハーベスタのセンサで伐採した木の情報を自動的に記録している。瀧ら [3] は、障害物を自律的に回避して飛行できるドローンを用いて、森林内の画像を取得して SfM (Structure from Motion) 技術を使った点群モデルを構築している。

これらのように、スマート林業においては、レーザセンサや画像など、ビジョンベースの技術が多く利用されており、森林内環境を正確に記録するために活用されている。Autoware も自動走行に必要な自己位置の推定に LiDAR (Light Detection And Ranging) を利用しており、GNSS の利用が難しい森林内での高精度な位置推定が期待される。

2.2 林業における自動走行

林業における自動走行では、主に木材の運搬を行う車両の自動化が試みられている。毛綱ら [4] は、運材車に光ファイバジャイロ、ロータリエンコーダ、磁気方位センサの内界センサを取り付け、路面に埋めた磁石を用いて誤差を補正する方式で、事前設定の走行経路に従って自動走行を行わせた。この方式では、実験環境において自動走行を実現できているが、磁石を路面に埋める必要があり、その間隔にも制約があるため、実環境での利用が難しい。

また毛綱らは遠隔操作と併用した自動走行についても研究を行っており [5]、教示走行での入力を RTK GNSS ので検出した位置とともに記録し、その内容を再生することで自動走行を行っている。この場合、教示走行を行うための走行が必要で、また木によって測位誤差が発生すると走行が難しくなる。

さらに毛綱らは電磁誘導や QR コード看板を利用し

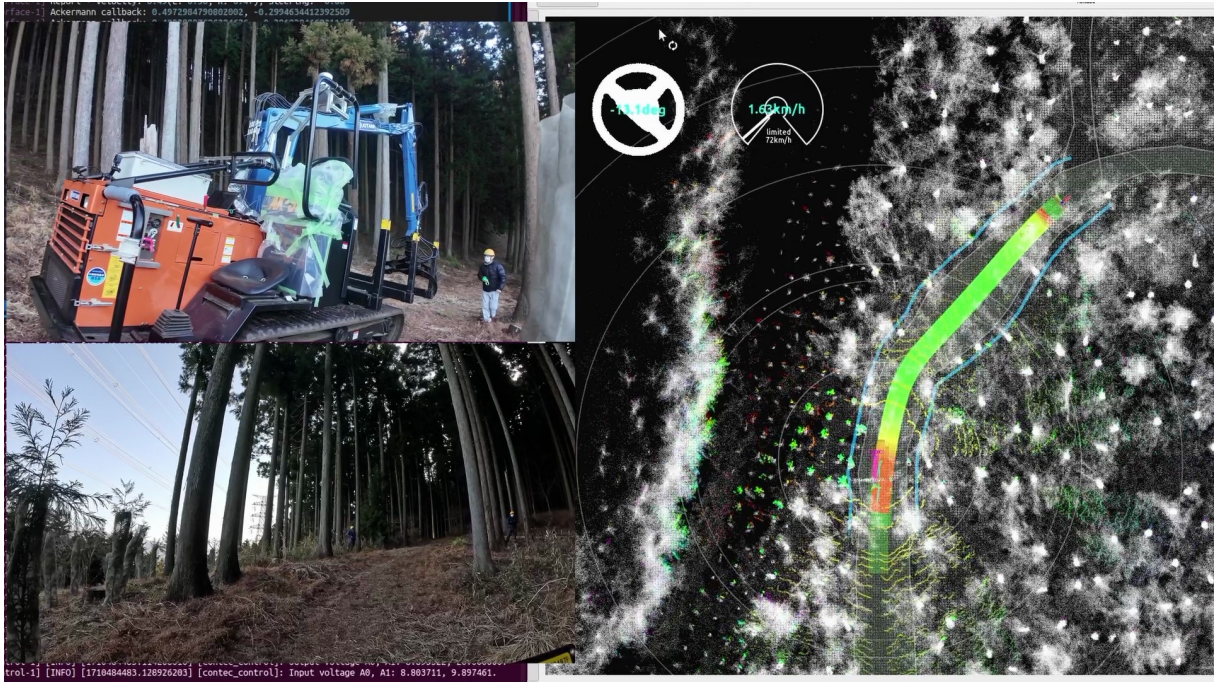


図1 森林環境でフォワーダが自動走行する様子 (左上: 無人のフォワーダ, 左下: フォワーダの視界, 右: Autoware 画面)

た自動走行についても報告しており [6], 上記の RTK GNSS 方式より高精度に位置を取得しつつ走行を行っている。しかし, 埋設した電磁誘導用の電線が破損して走行が停止する事象が発生しており, インフラの敷設・管理コストがかかる方法となっている。

児玉ら [7] は, LiDAR と IMU, ホイールエンコーダを搭載した小型無人車両およびフォワーダでスキャンマッチングによる位置推定を行い, その推定精度を評価している。評価では, 平坦な路での走行について 0.5m を下回る誤差で推定を行っており, 実現性があると述べられている。この方法は Autoware が採用する自己位置推定とほぼ同等であり, 森林環境での Autoware の利用も同様に可能であると考えられる。

3. フォワーダ車両の改造とセンサの設置

3.1 フォワーダ車両の改造

本研究では, 森林環境を走行するフォワーダとして魚谷鉄工株式会社 of AK-33 を利用する。AK-33 は全長 4.8 メートル, 全幅 2.0 メートル, 全高 2.6 メートルの大きさで, グラップルローダを有しているため, 単体で丸太の積載作業を行える。このフォワーダは運転席のスティック型コントローラを倒して前進後進を, もしくは捻って左右の曲がり方を制御するため, 一般的な四輪車のアクセル・ブレーキ・ステアリングによるものとは操作方法が異なる。

フォワーダを電氣的に制御するには, 左右のクローラにそれぞれ指示を行えばよい。そこで, Rexroth 社の電磁弁 3DREP6C-2X/16EG24N9K4/M およびアンプ VT11118 を設置した。また, コンピュータから指示を行うために, CONTEC 社製の USB 接続アナログ入出力ユニット AIO-121602LN-USB も設置した。上記の改造により, コンピュータからアナログ入出力ユニッ

トに左右クローラ用の電圧を指示することでフォワーダを制御できるようになった。

一方, フォワーダの実際の駆動状況を確認する, つまりオドメトリを取得するために, x-io Technologies 社製の Wi-Fi 対応 IMU (Inertial Measurement Unit; 慣性計測装置) である NGIMU をクローラの左右の駆動輪にそれぞれ取り付けした。IMU の軸を駆動輪の中心と一致させ, 駆動輪の回転状況を取得し, 駆動輪の径を掛けて左右の移動速度として扱えるようにした。

また, センサを設置するために, 車両頂上および左右の前方に, センサ用のフレームを追加した。

3.2 搭載するコンピュータとセンサの選定

フォワーダ上で Autoware を実行するコンピュータとして, Vecow 社の ECX-2400A PEG を選択した。本コンピュータは産業用 PC の一種で, 第 10 世代 Intel Core CPU に加え 64GB のメインメモリを搭載しており高性能で, また多数の Ethernet ポートを備え, 直接 LiDAR や GNSS などのセンサを接続できる。本コンピュータに, Autoware で必要な GPU として nVIDIA 社の RTX A2000 (12GB モデル) を搭載し, また IMU を CAN (Controller Area Network) で接続するために PEAK-System 社の PCAN-miniPCIe カードも取り付け, 防水ボックスに入れてフォワーダのボンネットに設置した。

Autoware による自動走行では, 車両の位置推定と周辺環境の認識を 3 次元点群を用いて行うため, LiDAR が必須である。本研究では, 位置推定や周辺認識に求められる情報の違いや, 車体によるオクルージョンを考慮して, 複数の LiDAR を用いた。センサを設置したフォワーダの様子を図 2 に示す。

まず, 位置推定に使う LiDAR として, Hesai 社の Pandar 40P を選んだ。Pandar 40P は 40 チャンネルの走

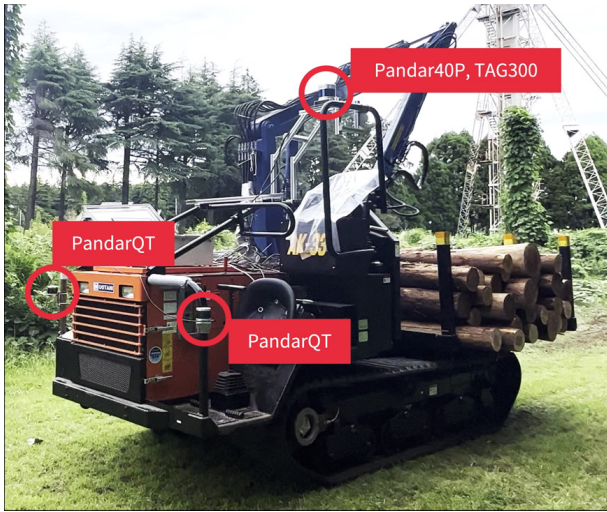


図2 フォワーダのセンサ搭載位置

査部を持ち、上下方向に40度の視野を有し、200メートルをスキャンできる。位置推定のキーになる物体が木および地面形状のみである森林環境においては、広域をスキャンできることが重要であると考え、スキャン距離に優れる本センサを車体の頂上に設置した。

次に、周辺認識に使うLiDARとして、Hesai社のPandar QTを選んだ。Pandar QTは64チャンネルの走査部を有し、上下方向に104.2度の広い視野を有する一方で、距離については20メートルとなっている。フォワーダ車両の大きさを考え、上下方向の視野が広く、近接する障害物の検出に向く本センサを、Pandar 40Pの検知範囲の外を埋めるように、車両前方の左右に設置した。

また、他に必要となるセンサとして、IMUがある。IMUの利用により、LiDARとIMUのデータを統合した位置推定を実施できる。多摩川精機のTAG300を利用し、位置推定用のPandar 40Pの直下に設置した。

その他、AutowareはRGBカメラやGNSSなどにも対応するが、必須ではないため今回は省いた。

4. 自動走行用ソフトウェア環境の構築

Autoware.universeを実行するためのソフトウェア環境を構築した。環境構築時に対応していたROSバージョンに合わせて、Ubuntu 22.04をコンピュータに導入しROS2 Humble環境を構築した。次に、各種センサをそれぞれ以下のように接続・設定した。

4.1 コンピュータとセンサとの接続

LiDARとIMUを利用するために設定を行った。3台のLiDARはどれもEthernetで接続するため、それぞれ異なるIPアドレスを設定し、コンピュータ側アドレスのみにデータを送信する(ユニキャスト)ようにして、コンピュータのEthernetポートに接続した。また、時刻同期のために、PTP(Precision Time Protocol)を用いてコンピュータと時刻情報をやりとりするようにした。コンピュータ上では、LiDARを接続した3つのEthernetポートをソフトウェア設定でブリッジインタフェースに設定し、単一のIPアドレスを設定した。

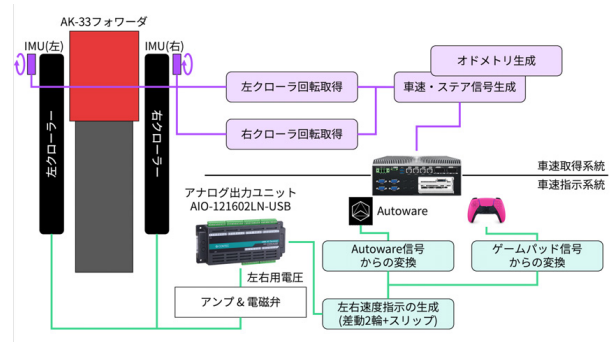


図3 車両インタフェースの接続図

さらに、PTP用のソフトウェアとしてptpdを導入し、Ubuntuの起動時に自動的にコンピュータをマスタとしてLiDARとの時刻同期を始めるようにした。

IMUはCANでデータを送受信するように設定し、電源およびデータ用に自作したハーネスを経由してコンピュータ上のCANインタフェースに接続した。

4.2 センサ用ドライバの導入とセンサ構成の記述

Autoware.universeが標準では持たないか、設定を変更する必要があるセンサ用ドライバをROS環境に導入した。LiDARの駆動には、TierIV社がGitHubで公開しているhesai_pandarパッケージを導入した。IMUの駆動のためには、MapIV社がGitHubで公開しているtamagawa_imu_driverパッケージを導入した。

また、これらのセンサドライバをAutowareと同時に起動するために、sample_sensor_kit_launchパッケージを元に、自作のセンサ群用パッケージを記述した。

4.3 Autoware.universe用の車体構成の記述

Autoware.universeでは、使う車両の車体の大きさやセンサ設置位置などを記述する必要がある。sample_vehicle_launchパッケージを元に、以下の構成の記述や3Dモデルの作成・配置などを行った。ただし、車体各所寸法については元々が四輪車用の設定であり、クローラで接地するフォワーダには適さないため、ホイールベースの記述についてはクローラ接地面の長さにした。同様に前後オーバーハングについても、フォワーダの車両に合わせて翻案した値を記述した。

- 車体各所寸法を示すvehicle_info.param.yaml
- 車体形状を模した3Dモデルファイル
- 車体構成(センサ設置位置)を含むURDF(Universal Robot Description Format)

4.4 車両インタフェース・リモート制御ソフトウェアの記述

自動走行のために、Autoware.universeと車体を繋ぐソフトウェア(車両インタフェース)を記述した。車両インタフェースは、図3に示す構成とした。ROSのノードから車両に対し指示を出すシステムでは、Autowareからの指示を受けるノードと、ゲームパッドからの指示を受けるノードを記述し、それぞれがTwist形式で車両への命令を行うものとした。

Autowareからの指示を受けるノードでは、Autowareが出力する命令(ackermann_control_command)

を Twist 形式に変換するようにした。ゲームパッドからの指示を受けるノードでは、ゲームパッドへのボタン・スティック入力を Joy 形式で取得し、Twist 形式で出力するようにした。また、Autoware の運用モードを変更するサービス呼び出しをボタンに割り当て、停止状態・リモート状態・自律状態をゲームパッドで変更できるようにした。車体に実際に指示を行うノードでは、Twist 形式のメッセージを受け取り、差動二輪モデルを用いて左右クローラ速度を計算し、車体を実際に駆動するための電圧を指示するようにした。

一方、車両からの情報を伝えるノードでは、クローラの駆動輪に取り付けた NGIMU からのデータを受信し、それを車両の駆動情報に変換して出力する。NGIMU から得た角速度の、車軸に対応する値を元に左右それぞれのクローラ速度を計算し、差動二輪モデルで車両自体の並進速度・回転速度に変換する。その並進速度・回転速度を Autoware 向けの VelocityReport 型、SteeringReport 型のメッセージとして出力することで、Autoware に車両の駆動情報を伝達する。

また、Autoware の状態 (自律駆動、リモート制御、停止など) を制御するために、ゲームパッドから Autoware の状態を変更するためのノードも記述した。

5. 自動走行の実験と結果

自動走行の準備を整えたフォワーダを、群馬県つくば市の森林総合研究所および群馬県富岡市で自動走行させる実験を行った。まず、各環境では事前に点群地図を作成し、車線 (走行可能エリア) や停止位置などの情報を記述した lanelet2 の地図を構築した。森林総合研究所の実験では、LiDAR を用いて位置推定できること、フォワーダを電氣的に駆動できること、車両が動いても継続的に位置を追跡できることを確認し、十分に広い短い直線経路において自動走行できることを確認した。また、この際に確認した問題として、地図作成から実際の走行までに時間が経過して草が生えたために、それらが障害物として認識される問題が発生したため、LiDAR の点群から障害物を認識する機能の検出範囲を調整した。

次に、群馬県富岡市の森林環境で、実際に利用する作業道においてフォワーダの自動走行実験を行った。作業道は図 1 に示したように、林内に整備された未舗装路となっている。この作業道は上り勾配で、大きく右に湾曲した形状を持っている。この実験でも森林総合研究所の場合と同様に、まず位置推定を実施できること・手動で車両を動かした際に継続的に位置を追跡できることを確認した。その後、手動で作業道の途中に目的地を設定し、Autoware に経路計算を行わせて、自動走行を実施した。この際も、森林総合研究所での実験と同様に、草および低木が障害物に誤認されてフォワーダが停止した。そこで、草刈りを行い再び実施したところ、フォワーダは正常に走行し、約 40m の距離を自動走行した。

6. おわりに

本稿では、林業作業の安全化・省人化を目的として、四輪車向けの自動運転ソフトウェアである Autoware を応用して、丸太を運搬するフォワーダ車両をゴール地

点の指定のみで自動走行させるまでの過程について記した。四輪車と構造や制御の仕組みが大きく異なるフォワーダ車両に対して、電氣的に制御するためのハードウェア的な改造やソフトウェアの記述を行い、実際の森林環境で Autoware で自動走行を行い、自動運転技術を林業分野および山中でも使用できる可能性を示した。Autoware はセンサ構成や設置位置を柔軟に調整できるため、他の作業機械でもセンサ設置を実施すれば自動走行が可能になり、また点群地図さえ準備すれば教示走行無しに自動走行を行えるため、様々な環境への応用も期待できる。

一方で、Autoware は大規模で、林道走行では必要とされない機能があったり、変更が必要になるパッケージがあったりするため、利用する機能についての調整が必要である。また、手動走行で作業道を移動する場合は、行きは後進・帰りは前進のように、方向転換を行わず走行することが多いため、それを実現する機能が必要である。加えて、実験では踏破しても問題ないはずの草を障害物として認識することがあったため、実験時はじゅうぶんな草刈りを行ったが、踏破してよい障害物を見分ける機能の開発が必要である。今後は、上記の改善を施すとともに、位置推定精度や走行速度・制御の安定性について評価し、実用的に利用できるよう初期位置の自動付与・簡便なゴール地点の指定方法などを検討し、長距離の走行など実用に向けた改善を施していく予定である。

謝辞 本研究は生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」および科研費若手研究 24K20868 の支援を受けています。また、車両および実験場の利用につきまして森林総合研究所、MapIV 社に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 川北憲利, 長島啓子, 田中和博. 地上型レーザー scanner を用いた森林計測の精度検証. 森林計画学会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 47-56, 2018.
- [2] 加藤正人, トウソウキョウ, 竹中悠輝, 張桂安, 堀澤正彦, 大野勝正, 伊藤隆明. レーザセンシングによるスマート精密林業. 精密工学会誌, Vol. 85, No. 3, pp. 232-235, 2019.
- [3] 瀧誠志郎, 青木三六, 小路丸未来, 稲田純次. Ai 搭載ドローンによる森林内空撮と三次元モデルの構築. 森林利用学会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 151-160, 2021.
- [4] 毛綱昌弘, 山口浩和. 永久磁石とジャイロの組み合わせによる自律走行運材車の開発. 森林利用学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 197-204, 2000.
- [5] 毛綱昌弘, 山口浩和, 伊藤崇之, 鈴木秀典, 千坂修, 高崎綾信, 草野兼光, 北原成郎. 遠隔操作機能と自動走行機能によるフォワーダの操作支援技術の開発. 森林総合研究所研究報告, Vol. 15, No. 4, pp. 91-102, 2017.
- [6] 毛綱昌弘, 山口浩和, 鈴木秀典, 山口智, 宗岡寛子, 佐々木達也, 有水賢吾, 飯澤宇雄, 大東史典, 阿部慶一, 小長井信宏, 辻浩志. 電磁誘導式自動走行フォワーダによる集材作業の無人化に関する研究. 森林総合研究所研究報告, Vol. 20, No. 1, pp. 19-28, 2020.
- [7] 児玉泰伸, 増本雅之, 神崎僚太, 田村創, 留森賢一, 松井敦史. LiDAR SLAM 技術による ICT フォワーダと小型 UGV の森林作業道自動走行の実現. 森林利用学会誌, Vol. 37, No. 4, pp. 193-200, 2012.