

トレーラー自動搬送でのトラクターの認知技術と自動運転制御技術

本間 充*
Mitsuru Homma
藤好宏樹*
Hiroki Fujiyoshi
山田浩史*
Hiroshi Yamada

秋山智広*
Tomohiro Akiyama

*先進応用開発センター

Recognition Technology and Autonomous Driving Control Technology for Tractors in Automated Trailer Transportation

要 旨

三菱電機は、労働力不足やコスト上昇といった物流業界の課題に対応するため、物流倉庫内のトレーラー自動搬送でのトラクターの認知技術と自動運転制御技術の開発に取り組んでいる。この技術は、緊急自動ブレーキ機能や複数センサーを活用したセンサーフュージョン技術が搭載されたトラクターによって、自動搬送と施設全体の運用効率及び安全性を高めることができる。さらに、トレーラーの搬送指示に基づいてトレーラー牽引(けんいん)状態と自動運転タスクに応じた経路生成手法を適切に切り替える経路生成管理機能を導入し、トラクターの自動運転制御を高精度かつ効率的に実現している。

1. ま え が き

米国の物流業界では、ドライバー不足とそれに伴う人件費高騰による事業継続リスクといった課題が生じている。特に大型物流倉庫ではドライバーが昼夜問わずトラクターを運転して荷物を積載したトレーラーを搬送していることから、24時間365日、無人かつ安全にトレーラーを搬送するソリューションが求められている。当社はこの課題を解決するため、物流倉庫内のトレーラー自動搬送でのトラクターの認知技術と自動運転制御技術を開発している(図1)。

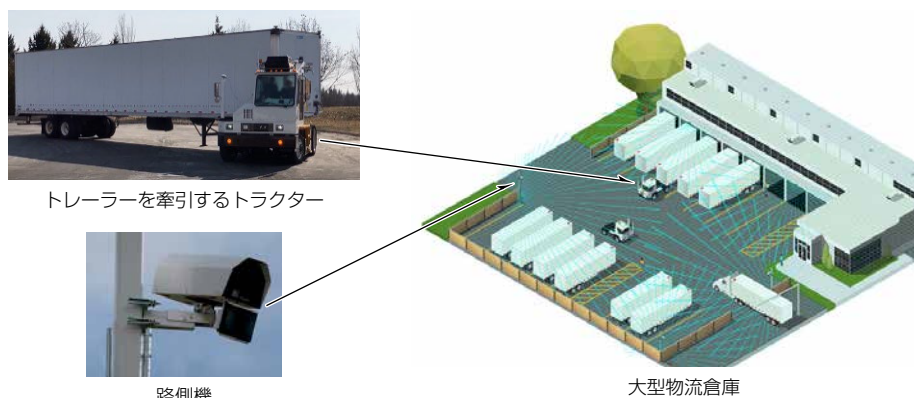


図1-トレーラー自動搬送

路側機は、入門ゲートに配置された複数のカメラと施設内全領域をカバーする複数のLiDAR(Light Detection and Ranging)を用いて、主に障害物検出を行う。障害物検出機能は、施設内の事故リスクの低減を目的としている。この機能は、施設内に搭載している全てのLiDARの情報を用いて、施設内の障害物の位置・速度・サイズ・属性(歩行者・車・トレーラーなど)を検出する。障害物情報はトラクターに送信されて、必要に応じてトラクターを減速又は停止させることができる。

トラクターの認知技術によって、トラクター周辺の状況を監視する多種のセンサーを組み合わせ、物体の位置を天候の変化によらず高精度に検出する。また、トラクターの自動運転制御技術によって、トラクターがトレーラーを牽引しながら走行してトレーラーを指定される位置に搬送する。そのために、トラクターとトレーラーの運動を考慮して前進又は後退を可能にする走行経路を生成し、その走行経路に対してトラクターを高精度に制御する。またトレーラーの移動時間を最小化するために、トレーラーの搬送指示に基づいて、複数ある走行経路生成手法を最適に組み合わせたり、最短距離になる走行経路を計画したりする。さらに、認知した障害物との衝突可能性を判断して自動ブレーキを作動する。

2. トラクターの認知技術

トラクターには、自動運転時の安全を確保するために緊急自動ブレーキシステムを備える。自トラクターの周囲(距離30m, 周囲360度)に存在する人や他トラクターなどの障害物を検知し、衝突の危険性がある場合には自動でブレーキをかけるシステムである。雨・雪・路面形状などの外部環境に対しても信頼度高く検知するロバスト性、障害物を精度良く検知する冗長性、トレーラー牽引有無など検知対象に対する柔軟性、などの高い要求性能が求められていた。この課題に対応するために、異なる特徴を持つセンサーを搭載する。具体的には、空間分解能と測距精度に優れているLiDARと、人物検知が得意なカメラ、さらに雨天や降雪時などの悪天候時でも検知性能が低下しないミリ波レーダーを用いて自トラクター周囲の障害物を検知する。そして、これら複数センサーの検知結果を融合するセンサーフュージョン技術をソフトウェアに実装することによって要求性能を達成した。

ソフトウェア開発では、現実世界で取得したセンサーデータを用いた検証とシミュレーションによる検証を行った。シミュレーション検証では、トラクター運動と周囲環境、さらにセンサーの結果をバーチャル空間に再現し、センサーフュージョン技術を検証可能な環境を構築した(図2)。網羅的な検証パターンの作成と自動検証機能を実現し、現実世界ではデータ取得が難しい環境や試験条件での検証も可能にすることで、ソフトウェア開発効率と開発速度を大幅に高めた。



図2-トラクターの認知技術のシミュレーション動作例

3. トラクターの自動運転制御技術

トラクターは、自動運転タスクの一例として、複数の駐車枠が存在する駐車場で、駐車枠Aから走行を開始し、駐車枠Bに駐車するトレーラーに接続した後、そのトレーラーを牽引して駐車枠Cへ搬送することが求められる(図3)。これらの自動運転タスクで、トラクターはトラクター単独の運動、又はトラクターと牽引するトレーラーの両者の運動を考慮し

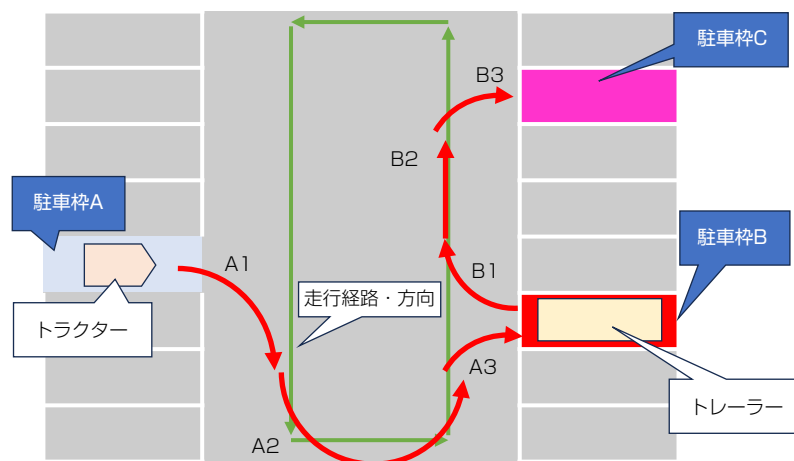


図3-トラクターの自動運転制御技術が実行する自動運転タスクの一例

て制御する。また駐車枠に停車するトレーラーに対してトラクターを連結したり、トレーラーを指定される位置に移動したりするために、トラクターは前進後退しながら高精度に位置制御することが求められる。これまで当社はトレーラーの牽引有無や前進後退に応じた最適な経路生成手法を開発しており、それら複数の経路生成手法を適切に切り替えて管理することで自動運転タスクを実行する。

この章では、複数の経路生成手法を選択する必要性、経路生成管理機能の動作を詳細に述べた後、机上での検証結果を述べる。

3.1 経路生成手法切替えの必要性

トレーラーの牽引有無に応じて、前進後退を切り替えながら目標位置に到達する経路生成として、Leuらが提案した手法(improved A-Search Guided Tree:i-AGT)⁽¹⁾が考えられる。しかしi-AGTを単独で用いる場合、常にトレーラーの牽引を考慮した経路生成になるため、目標位置に到達する経路が大回りになる可能性がある。またi-AGTは探索空間内で開始位置から目標位置までの経路をグラフ探索する手法であるため、広範囲で経路生成する場合、探索空間が増大してメモリー消費量と計算量が増加する問題が生じる。これらの理由から、i-AGT単独ではなく、複数の経路生成手法の切替えが必要になった。そこで、Iqbalらが提案するトラクター単体のパーティクルフィルター(Particle Filter)ベースの経路生成をトレーラー牽引状態に拡張した経路生成手法(Particle Filter Motion Planner:PFMP)⁽²⁾及びWangらが提案するヒッチングのための経路生成手法(Bi-Directional A-Search Guided Tree:BIAGT)⁽³⁾を用いた。

さらに前進後退で用いるBIAGT又はi-AGTの計算時間は、PFMPよりも長く、経路生成する走行距離に依存する。そこで経路生成に要する計算時間を最小化するために、計算時間が短いPFMPが経路生成する距離を最大化し、BIAGT又はi-AGTによって経路生成する距離を最小化した。

経路生成手法に応じたトラクターの走行動作を自動運転タスクとして、経路生成手法との対応関係を表1に示した。

表1-自動運転タスクと経路生成手法の対応関係

ID	自動運転タスク	経路生成手法
A1	トラクター単体で駐車枠Aから走行経路に復帰	BIAGT
A2	トラクター単体で駐車枠B手前に走行	PFMP
A3	駐車枠Bのトレーラーに接続	BIAGT
B1	トレーラーとともに駐車枠Bから走行経路に復帰	i-AGT
B2	トレーラーとともに駐車枠C手前に走行	PFMP
B3	駐車枠Cに駐車	i-AGT

3.2 経路生成管理機能

経路生成管理機能は、図4に示すように、自動運転タスク管理部と経路生成手法選択部、経路生成部から構成される。自動運転タスク管理部では、トラクターが実現すべき全自動運転タスクに関する情報、及び自身の位置情報を基に、トラクターが実現すべき自動運転タスクの順序と自動運転タスクごとの完了状態を定義する。それに加えて、現在タスクの完了状況に応じて、経路生成手法選択部へトラクターが取るべきタスクを指示する。経路生成手法選択部では、自動運転タ

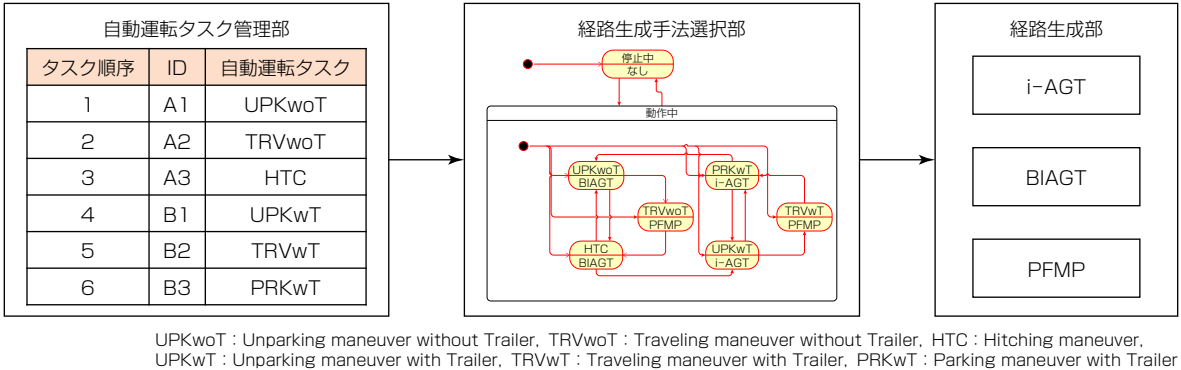


図4-経路生成管理機能全体構成

スクに応じた経路生成手法を選択し、経路生成部は指示された経路生成手法を用いてタスクの完了状態に至るための経路を生成する。併せて、経路生成手法選択部では、トラクターがタスクの完了状態に至ると、自動運転タスク管理部に次のタスクを要求する。そして自動運転タスク管理部では、タスク完了に応じて次のタスクを経路生成手法選択部へ指示する。これらによって、トラクターの自動運転タスクと経路生成手法を適切に管理する。

3.3 検証

この手法を用いることで、機能要件を実現することを確認するために、閉ループシミュレーション環境での検証結果を示す。トラクターが自動運転タスクごとに経路生成手法を適切に切り替えて動作する様子を示すため、図5(b)ではトラクター位置に対して、図5(a)では時系列に対して、自動運転タスクごとに色分けした。検証の結果、スタートポジションからエンドポジションまでUPKwoT, TRVwoT, HTC, UPKwT, TRVwT, PRKwTの順にタスクを実現した。図4の自動運転タスク管理部のタスク順序と一致するとともに、途中停止やヒッチポジションを通り過ぎることもなかった。

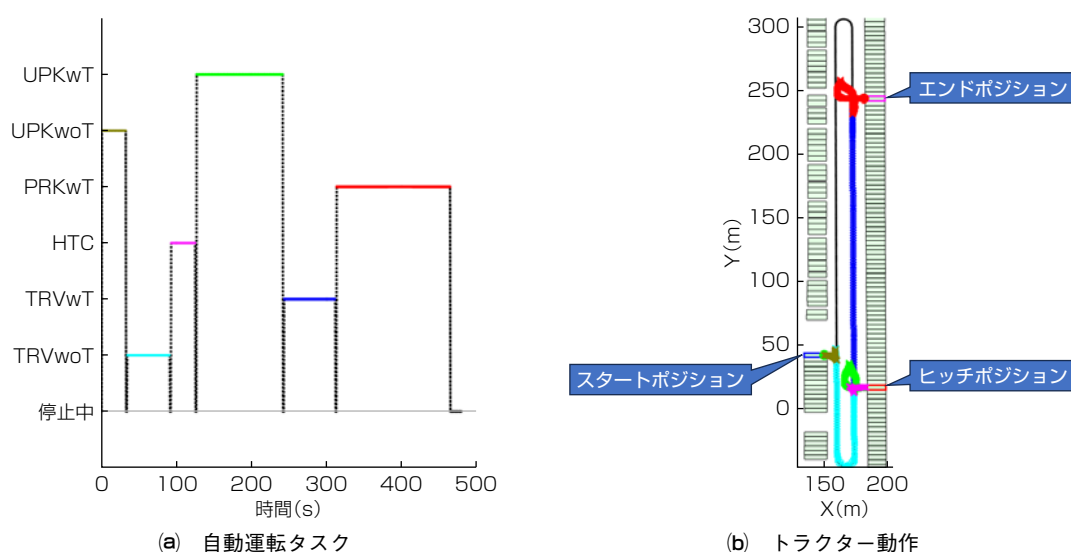


図5-自動運転タスクの遷移とトラクター動作の結果

4. む す び

物流倉庫内のトレーラー自動搬送での、路側機の各種機能とトラクター側のセンサーフュージョン技術による認知、トラクターの経路生成手法について述べた。トラクターにセンサーを効率的に配置し、センサーフュージョン技術を活用したシミュレーションによってソフトウェア開発効率と開発速度を大幅に高めて、自動運転タスクに応じて複数の経路生成手法を適切に切り替えて管理する手法を開発した。このトレーラー自動搬送を社会実装することで、社会課題である労働力不足の解消に今後も取り組んでいく。

参考文献

- (1) Leu, J., et al. : Improved A-Search Guided Tree for Autonomous Trailer Planning, 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7190~7196 (2022)
- (2) Iqbal, H., et al. : Motion Planning of Articulated Vehicles with Active Trailer Steering by Particle Filtering, 2023 IEEE Conference on Control Technology and Applications, 478~483 (2023)
- (3) Wang, Z., et al. : Motion Planning and Model Predictive Control for Automated Tractor-Trailer Hitching Maneuver, 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications, 676~682 (2022)