

自動搬送システムの開発

五十嵐 俊介 木下 優司 谷 卓 八條 貴誉
(技術研究所) (生産技術本部) (生産技術本部) (技術研究所)

Development of Autonomous Transportation Robot System

Shunsuke Igarashi, Yuji Kinoshita, Taku Tani and Hachijo Takayoshi

建設現場や工場、物流施設などに適用できる自動搬送台車(AGV: Automated Guided Vehicle)、自動搬送フォークリフト(AGF: Automated Guided Forklift)、搬送管理システムなどの自律型搬送ロボットシステムを開発した。これはタブレット端末で入力した指示で搬送を行い、LiDARを用いた自己位置推定により、指定されたルートを実自律的に移動することができる。また、カメラセンサによりパレットやカゴ台車を認識し、荷積み、荷降ろしを行うことができる。我々は建設現場でのAGVの運用や物流現場でのAGFのテストを行った。本報では、AGFを用いた搬送ロボットシステムの構築と、その運用、試験結果について報告する。

We have developed an autonomous transportation robot system for construction sites, factories, and distribution facilities, such as an AGV(Automated Guided Vehicle), an AGF(Automated Guided Forklift), and a transportation management system. It can be instructed by a tablet to make a delivery and it can move autonomously along a given route by self-localization using LiDAR. In addition, it can pick up and unload with the camera sensor can recognize the pallet and roll box pallet. We have operated the AGV in construction sites and tested the AGF in a logistics. In this paper, we report on the transportation robot system and the result of operation and testing.

1. はじめに

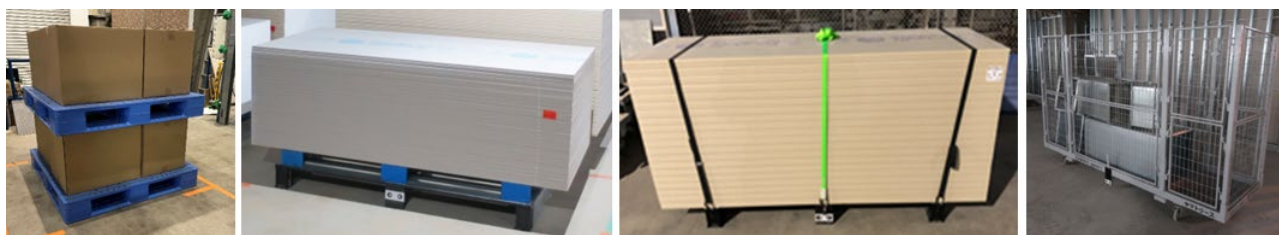
製造工場や建設工事現場、物流倉庫などにおける資材の運搬は台車やフォークリフトなど様々な機器を使用して行われるが、労働人口の減少に伴い自動化や無人化が求められている。

製造工場や物流倉庫での資材の運搬作業については機械化や自動化が進んでいるが、専用の設備を導入していることが多い。多品種小ロットを取り扱う場合など、設備の可変性が要求されるような施設では専用設備を適用できない環境も多くある。建設工事現場では工事中の構造物内で運搬する特性から設備構築が難しく手作業に頼っている。図-1のような、台車などを用いた手運搬では、特に重量物の場合に挟まれや荷崩れなどの危険や身体的な苦渋を伴う作業となる。フォークリフトなどの車両を使用する場合にも、衝突や荷崩れなどの危険が伴い、作業者の注意力、集中力を要する作業である。これらの運搬作業の安全性や生産性の向上、省人化のため資材を自動で搬送するシステムを開発した。

搬送ロボットとしては1950年代に最初のAGV¹⁾が登場したと言われている。その後さまざまな搬送台車²⁾⁵⁾が開発されているが多くの製造ラインなどの設備から荷を受け取ったり、専用のカートやカゴ台車などをけん引したりするものであり、独自の設備に最適化されたものが多い。地面に置かれたパレットの荷積み荷降ろしができるものや、段差や傾斜など工場や倉庫より荒い環境に対応できる自動搬送台車は少なく、大抵は走行速度が制限されているものが多い。また、フォークリフトについても研究⁶⁾が進められているが、決まったルートを移動するものや、資材のズレが許容で



図-1 資材の手運搬



(a) パレット (b) スキッドパレット (c) りん木 (d) カゴ台車

図-2 荷姿

きないため固定枠などにより資材をガイドする必要があったり、資材を積み上げる段積みは高さが予め指定されている必要があったりと自由度の高いシステムはほとんどない。

こういった背景から搬送作業を自動化するためには従来の作業を変えずに自動化するのではなく、専用機器を用いて作業方法から変えるなど設備投資が必要になっていた。

そこで、これまでより汎用的に取り扱え、極力施設や設備の増改築のない搬送システムを開発した。一般的な搬送作業では図-2のような(a)パレットや(b)スキッドパレット、(c)りん木、(d)かご台車などの搬送用機材を使用することが多く、置場やラック、昇降機などもこれらの規格に準じていることが多い。搬送ロボットはAGVタイプの自動搬送台車(Robo-Carrier)とAGFタイプの自動搬送フォークリフト(Robo-Carrier Fork)を開発した。これら搬送ロボットは自己位置検出にLiDAR(Light Detection And Ranging)センサを用い、資材など対象物検出にはカメラセンサを用いて計測する仕組みとなっており、施設に走行用のガイドや資材用の設備などの環境構築が不要なものとした。さらに、建設工事現場においては工事用エレベータを自動化することで、資材を所定の階に自動搬送することを可能とした。我々は自動搬送台車を複数の建設工事現場で運用し、自動搬送フォークリフトは物流施設で試験適用した。本報では搬送システム、搬送ロボットについて説明し、運用と試験を行った結果について報告する。

2. 搬送システム

2.1 システム概要

搬送システムは図-3に示すように統合管理システムと呼称するサーバーと、ユーザーインタフェースのタブレット端末、搬送ロボットとして自動搬送台車、自動搬送フォークリフト、建設工事現場に限り工事用エレベータから構成される。

統合管理システムはユーザーによるタブレット

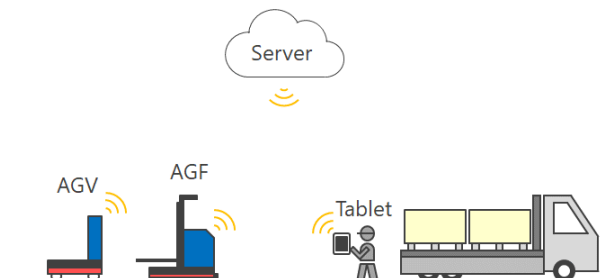


図-3 搬送システム概要

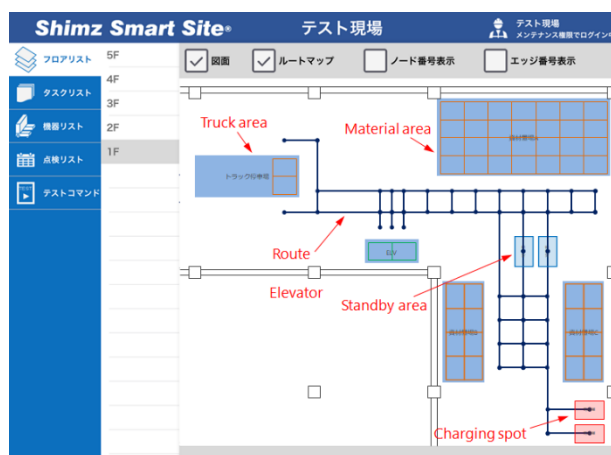


図-4 ルートマップ

端末からの動作指示を受け付け、動作命令を生成し搬送ロボットへ送信する。また、搬送ロボットの動作状態を受信しタブレット端末へステータス情報を送信する。統合管理システムと搬送ロボットやタブレット端末とは公衆回線またはWi-Fiを介して接続される。

2.2 ルートマップ

運搬作業者はタブレット端末にて運搬する作業をタスクとして登録する。タブレット端末上には図-4に示すような現場の図面と、ルートマップと呼ぶ搬送ロボットが走行する経路地図や資材置場、エレベータや車両の待機場所などの情報が表示されている。ここで、ルートマップは現場内で搬送ロボットが走行できる通路と、資材置場や待機場所を直線で結んだもので、経路の頂点や交点をノード、ノードを結んだ直線をエッジと呼ぶ。資材置場はその位置に対し資材の出し入れを行う向きを指



図-5 タスクリスト

定できる。段積みができる場合は、同一の場所で積み上げられる個数の指定ができ、ラックの場合には個数だけでなくそれぞれの置き場の高さを指定できる。さらに、複数の資材置場をまとめてエリアとしてグループ化することができ、資材の行先を置き場毎に指定せず、エリアとしてまとめて指示することができる。このルートマップは、CADの専用アドインソフトにより作図し、プログラムコードを生成することができる。このコードをサーバーに保存することで、タブレット端末に表示させることができる。

2.3 タスク登録と動作指示

資材の運搬指示は資材置場をタップして、資材の種類、行先階、行先のエリアなどを選択しタスクとして登録する。実行時には、図-5のタスク一覧の再生ボタンを押すことで、統合管理システムから搬送ロボットや工事用エレベータに動作指示が送信される。搬送ロボットへの動作指示は、移動、荷積み、荷降ろしなど、工事用エレベータには扉開閉、フロア移動など作業単位で指示が送信される。動作指示の送信順序やタイミングは、統合管理システムが搬送ロボットや工事用エレベータの状態を把握し、適時命令を送信している。

2.4 経路探索

命令が実行されると、目的地に対してルートマップ内の走行経路を探索する。搬送ロボットは前後進以外に横行前後進もでき、方向転換には自転や旋回などの動作が可能である。そして、資材置場に対する車体の向きを合わせる必要もあるため、走行する経路の探索のみならず、エッジを前後進、横行前後進のようにどの方向、方法で走行するか、ノードで自転や旋回、方向の維持など、どの動作を

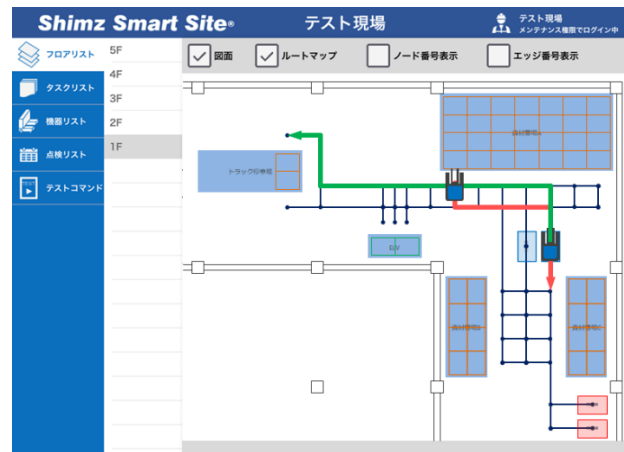


図-6 複数台の経路探索



図-7 自動搬送台車

行うかを含めた経路探索が必要となる。目的地での搬送ロボットの向きが適正となるように、動作を含む経路を総当たりで計算し、その中から移動時間が最短となる経路を選択する。ロボットが同一ルートマップ内に複数台存在する場合にはマルチエージェントの経路計画の理論を基本として、複数台が干渉しないよう各ノードの予想通過時刻を計算し、一方の車両がそのノードを予約する。他方の車両は図-6のように予約されたノードをその時刻に通過しない経路を計算することで、衝突を回避する経路を探索する。ロボットが移動中にも管理システムにて位置を監視することで、車両同士の干渉が予測される場合には必要に応じて経路探索を再実行し経路の変更を行う。

3. 自動搬送ロボット

3.1 自動搬送台車

自動搬送台車は、図-7のようにフォークにより資材を自らの荷台に持ち上げることができる機構

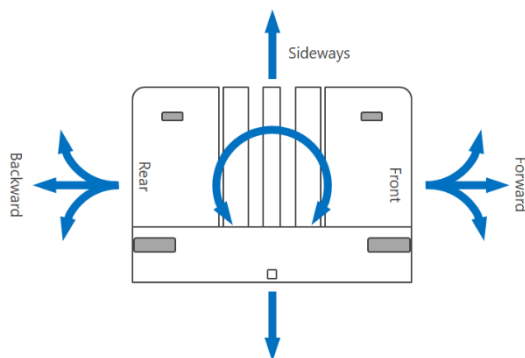


図-8 自動搬送台車の走行方法

が備わっている。平置きされた荷物を運搬することができ、主に建設工事現場での運用を目的としている。機体仕様は積載荷重 1,000kg、車体寸法 W1,400mm×L2,000mm×H1,930mm、車体重量 1,160kg、駆動源はリチウムイオン二次電池である。車輪は、2輪が駆動及び操舵輪、残りの2輪がキャスター輪となっており、駆動操舵輪は独立に制御することが可能である。そのため図-8のように前後進、旋回、横行や自転が可能である。フォーク下部に、シザース式に荷重受けが出る機構となっており、資材の重量を床面で受けることができる。そのためカウンタウェイトが不要となり、通常の積載重量 1t のフォークリフトに比べ軽量化できる。これにより建設工事現場のように、一般構造の床でも使用が可能となっている。一方で、フォーク下部を車輪が転がる必要があるため、通常のパレットではなく底板のないスキッドパレットを使用する必要がある。荷積み動作時には、フォーク根本に接触式センサがあるため、資材にフォークを差し込んだときに奥まで差し込まれていることを検出することができる。

3.2 自動搬送フォークリフト

自動搬送フォークリフトは、図-9のようにリーチ型フォークリフトをベースマシンとし、建設工事現場だけではなく物流施設や製造工場のように、トラックからの荷降ろしや資材の重ね置き、ラックへの積載などが可能なものとした。機体仕様は積載荷重 1,000kg、揚高 3,000mm、車体寸法 W1,290mm×L2,450mm×H2,530mm、車体重量 2,550kg、駆動源は鉛蓄電池である。車輪は後輪1輪が駆動輪、前輪2輪と後輪1輪の3輪全てが操舵輪となっており、それぞれ独立に制御ができる。よって、自動搬送台車と同様に図-10のように前後進や旋回、横行、自転が可能である。また、走行



図-9 自動搬送フォークリフト

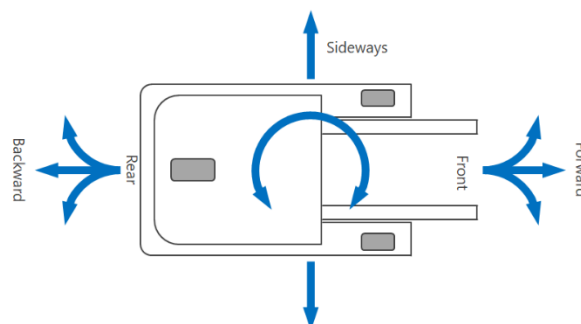


図-10 自動搬送フォークリフトの走行方法

や位置決めの際は並進と回転を同時に制御でき、車体の切り返しが不要となる。建設工事現場では作業空間の制約があるため、切り返しのための空間が十分でない場合があり、方向転換などの旋回半径が小さいことは大きな利点となる。

3.3 機器構成

自動搬送台車及び自動搬送フォークリフトの制御機器構成は図-11のように、制御演算を行う統合制御 PLC(Programable Logic Controller)と、それに基づいて操舵、駆動、リフト動作を行う車両制御 PLCの2重構成となっている。サーバーからの指令を受信するための通信機器と、自己位置を求めするための SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)コントローラと LiDAR センサ、資材の情報を取得するためのカメラコントローラとカメラセンサで構成されている。ここで自動搬送

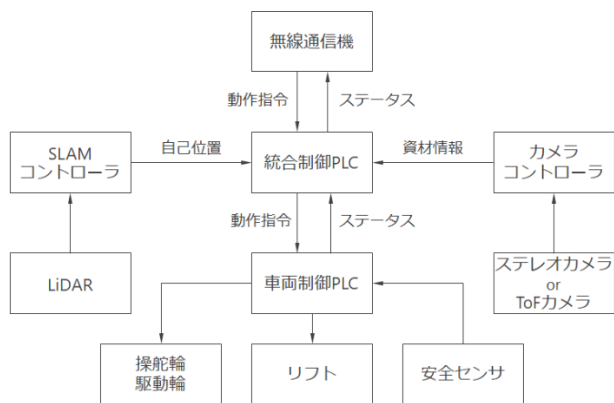


図-11 車両内機器構成

台車についてはステレオカメラ、自動搬送フォークリフトについてはToF(Time of Flight)カメラを使用している。統合制御 PLC と車両制御 PLC はステータス情報を共有している。統合制御 PLC では、サーバーから受信した動作指示に基づき SLAM コントローラからの自己位置やカメラコントローラからの資材座標などの情報から、車輪の舵角、走行速度、リフトの昇降動作などに必要な指示値の演算処理を行う。計算された結果を車両制御 PLC に指示し、車両制御 PLC からモータドライバやリフトに動作指令を送信することで、走行制御や荷積み荷降ろし動作を行っている。車両制御 PLC は安全センサを管理しているため、それら安全装置が作動した場合には車両制御 PLC の判断で緊急停止や一時停止を実行している。一方で、統合制御 PLC では現在の動作状況を車両制御 PLC と共有しているため、現在位置情報などと併せてステータス情報をサーバーに通知している。

3.4 自己位置検出

自律走行を実現するため、ロボット上部には車両の自己位置検出に用いる LiDAR が取り付けられている。このセンサは、水平面で周囲 270deg. の範囲の建物形状を計測している。一般的には計測データから自己位置推定用のマップを作成するが、本システムでは建築図面の CAD データを基にして地図データを生成する。建築図面のうち、柱や梁といった構造体と、内装壁や扉などの仕上材が描かれた図面と、工事用エレベータなどの仮設機材が描かれた図面を重ね合わせた図面を使用する。建築物は多少の誤差を持っているため LiDAR によって計測されたデータが図面と完全に一致するわけではない。そのため地図データにある程度の曖昧さを持たせ、環境誤差へ対応している。この図面データを専用のソフトウェアによって地図デー

タへ変換することで、事前のマップ作成や原点合わせなどの作業を省略することができる。また、現場では図面データにはないものが計測されることがある。これらの物体が占める割合が大きい場合には、自己位置推定に誤差が発生するため地図データに計測で得られたデータを上書きする機能を有しており、現場環境に則した地図を生成することができる。これにより車両本体の平面的な位置と方向の情報を得ることで走行制御が可能となる。

3.5 資材位置検出

自己位置推定による走行制御を行うことで、施設内を自律走行することが可能となるが、資材の荷積み荷降ろしを行うときに資材は必ずしも適正な位置にあるとは限らないため、対象物への位置合わせが必要となる。荷崩れや衝突がなく、フォークを正しい位置で差し込むために搬送ロボットにはカメラセンサが搭載されており、このセンサによって資材の位置を検出し、資材に正対することができる。自動搬送台車ではステレオカメラ、自動搬送フォークリフトでは ToF カメラを使用しており、基本的なシステムは異なる。自動搬送台車では車体下部のフォーク格納位置にステレオカメラが搭載されており、パレットに貼られた専用マーカを検出する。マーカーは図-12 のようにパレットの正面中央に貼られている。パレット両端部にマーカーを貼り付ける⁸⁾などの方法もあるが、パレットと近接してもカメラの画角に正確に収まるよう小型のマーカーを中央に配置した。マー



図-12 スキッドパレットマーカー

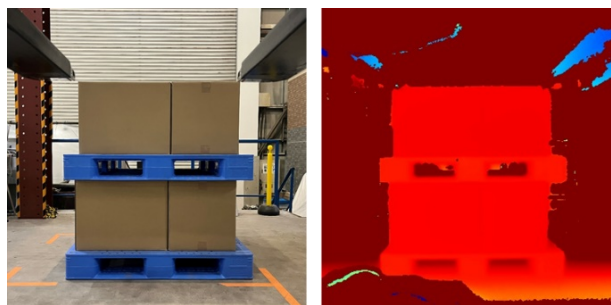


図-13 ToFカメラによる撮影データ

カーをステレオカメラで検出することにより、パレットの平面的な位置を検出することができる。

自動搬送フォークリフトでは、フォークの根本にカメラセンサが搭載されている。ToF カメラを使用しているため、図-13のように撮影対象物の3Dデータを取得することができる。得られたデータから図-14のようにパレットのフォークポケットを検出することができる。その他、かご台車などでは資材下方の空間を検出する。さらに、資材やパレットの平面部における奥行き距離から、鉛直軸回りの回転の情報を得ることができる。このカメラセンサにより、資材に対し中央へ正対する位置決めができる。さらに、積載された資材を認識し荷物の上端部分を検出できるため、資材を複数積み上げる段積み作業や段積みされた資材を最上段から取っていくといった作業が可能となる。

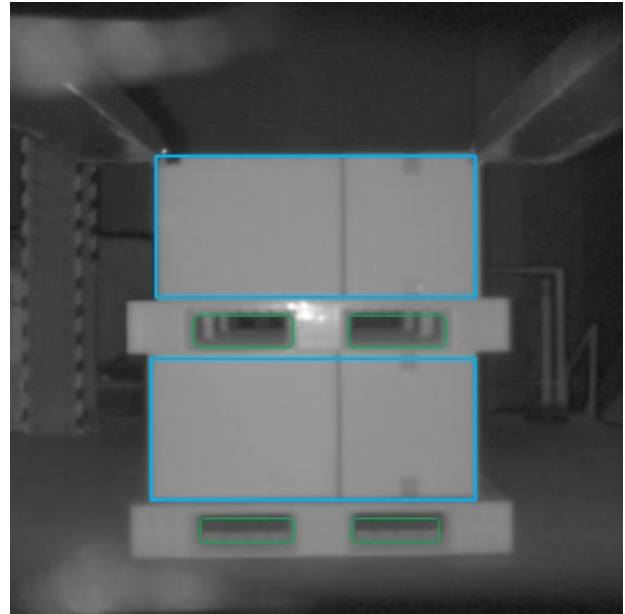


図-14 パレットと資材の検出

3.6 安全装置

安全装置としては、車体の周囲に測域センサが搭載され全周囲の障害物を検出し、減速、停止できる。さらに車輪の周辺には、床面までの距離を計測しているセンサがあり、走行中に段差や障害物があった場合にも減速や停止ができる。このセンサは車輪近傍と遠方を計測しており、段差や障害物では停止するが、スロープなどの傾斜がある場合には停止せず減速して、動作を継続させることが可能となっている。そのほか、フォーク先端のセンサによる障害物検知やフォーク挟まれ防止センサ、非常停止ボタン、接触式バンパセンサなどによる安全装置を有している。

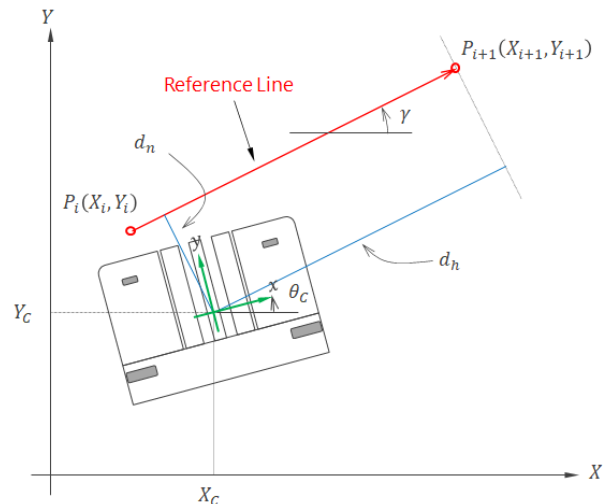


図-15 直線追従制御モデル

3.7 走行制御

搬送ロボットが移動する場合には、統合管理システムから走行経路のノード座標やロボットの向き、ノードでの通過方法が送信される。あるノードの2点 P_i, P_{i+1} で結ばれた直線を走行するとき、この直線に追従するよう制御を行う。図-15に示すようにロボットの自己位置 (X_c, Y_c, θ_c) に対し、目標直線からの離隔距離 d_n は直線の式を用いて

$$d_n = \frac{aX_c + bY_c + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} a = -Y_{i+1} + Y_i \\ b = X_{i+1} - X_i \\ c = X_i Y_{i+1} - X_{i+1} Y_i \end{cases} \quad (2)$$

と表すことができ、車両と目標直線との角度差は $(\gamma - \theta_c)$

$$(3)$$

となる。ここで並進制御入力のゲイン K_{dp} 、旋回制御

入力のゲインを $K_{\theta p}$ として並進制御入力 φ_d 及び旋回の制御入力 φ_θ を

$$\varphi_d = -K_{dp} \tan^{-1} \left(\frac{d_n}{1000} \right) + (\gamma - \theta_c) \quad (4)$$

$$\varphi_\theta = K_{\theta p} (\gamma - \theta_c) \quad (5)$$

と表す。このとき式(4)で \tan^{-1} を採用しているのは制御入力を操舵角の次元で取り扱うため、位置偏差に比例して大きな制御入力とならないよう $\pi/2$ に漸近させるためである。結果としてある一定以上の距離が離れているときにはほぼ最大舵角を入力することになる。

ここで、目標座標となる点 P_{i+1} と目標直線のなす垂線までの距離を d_h とすると

$$d_h = \sqrt{(X_{i+1} - X_c)^2 + (Y_{i+1} - Y_c)^2 - d_n^2} \quad (6)$$

となり、これを走行中逐次計算することで目的地

までの距離に応じて速度を段階的に減速させ、停止や旋回の動作を行う。

自動搬送台車の駆動輪は、車両中心からずれた位置にあるため図-16に示すように車両の中央に配置した2輪の仮想輪を考え、計算を簡略化し対称性を持たせる。計算された制御入力は前後の仮想輪の舵角を φ_f, φ_r とすると、車両の前進時の仮想輪の舵角を

$$\begin{cases} \varphi_f = \varphi_d + \varphi_\theta \\ \varphi_r = \varphi_d - \varphi_\theta \end{cases} \quad (7)$$

とし、後進時の仮想輪の舵角を

$$\begin{cases} \varphi_f = \varphi_d - \varphi_\theta \\ \varphi_r = \varphi_d + \varphi_\theta \end{cases} \quad (8)$$

とする。求められた仮想輪の舵角から実際の車両の駆動輪舵角 $\varphi_{fr}, \varphi_{rr}$ を計算すると

$$\varphi_{fr} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \varphi_f \cos \varphi_r}{2L \cos \varphi_f \cos \varphi_r + W \sin(\varphi_f - \varphi_r)} \right) \quad (9)$$

$$\varphi_{rr} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \cos \varphi_f \sin \varphi_r}{2L \cos \varphi_f \cos \varphi_r + W \sin(\varphi_f - \varphi_r)} \right) \quad (10)$$

となる。このようにして制御することで目標直線に追従することができる。横行時は差動二輪として制御を行うが、同様に制御入力を計算し並進制御入力と旋回制御入力の和から各駆動輪の速度差により直線追従制御を行うが、並進と旋回は従属関係にあるため、走行に比べると収束まで時間がかかることになる。

自動搬送フォークリフトについても同様に、仮想輪を用いてモデル化しており、制御入力の計算については自動搬送台車と同様である。図-17に示すように前進時の仮想輪の操舵角は

$$\begin{cases} \varphi_f = \varphi_d + \tan^{-1} \left(\frac{2L_f}{L} \tan \varphi_\theta \right) \\ \varphi_r = \varphi_d - \tan^{-1} \left(\frac{2L_r}{L} \tan \varphi_\theta \right) \end{cases} \quad (11)$$

とし、後進時の仮想輪の操舵角は

$$\begin{cases} \varphi_f = \varphi_d - \tan^{-1} \left(\frac{2L_f}{L} \tan \varphi_\theta \right) \\ \varphi_r = \varphi_d + \tan^{-1} \left(\frac{2L_r}{L} \tan \varphi_\theta \right) \end{cases} \quad (12)$$

となる。ここで、 \tan^{-1} の項については前輪と後輪の幾何学的な関係による回転中心のずれを補正している。これも同様に実際の車輪の操舵角を $\varphi_{fr}, \varphi_{fl}$ とすると

$$\varphi_{fl} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \varphi_f \cos \varphi_r}{2L \cos \varphi_f \cos \varphi_r - W \sin(\varphi_f - \varphi_r)} \right) \quad (13)$$

$$\varphi_{fr} = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \varphi_f \cos \varphi_r}{2L \cos \varphi_f \cos \varphi_r + W \sin(\varphi_f - \varphi_r)} \right) \quad (14)$$

となる。後輪の操舵角は仮想輪で求めたものを使用する。自動搬送フォークリフトについては3輪全て

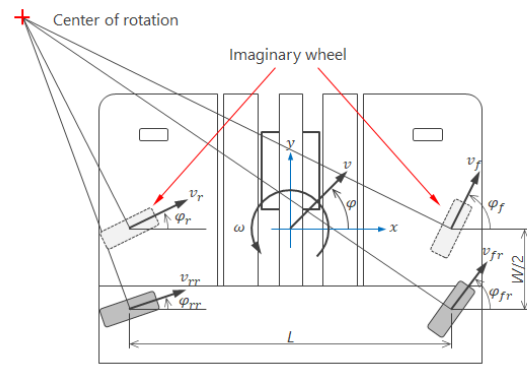


図-16 自動搬送台車の舵角計算モデル

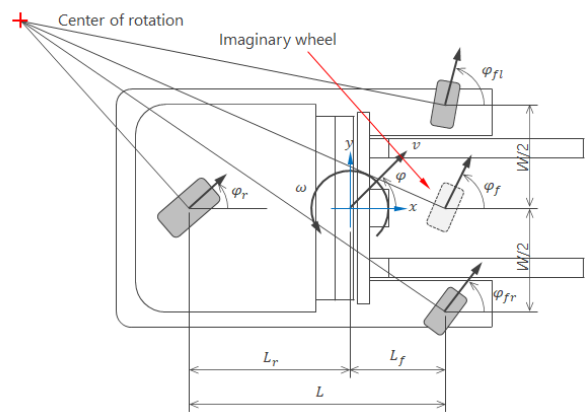


図-17 自動搬送フォークリフトの舵角計算

が操舵可能であるため、横行時も並進と旋回を独立に制御することができる。

ノードの通過方法については、図-18に示すように(a)姿勢を維持する場合、(b)自転する場合、(c)旋回する場合の3種類あり、姿勢を維持する場合はノードで停止後ホイールを転舵し、例えば走行前進から横行などのように進行方向を変化させる。自転の場合は、ノードで停止後所定の角度までその場で回転する。旋回の場合は、2直線を円弧で接続しその円弧に追従して通過する。これら3つの通過方法の中では、旋回が最も短時間で通過でき、自転が最も時間を要する。

3.8 資材位置決め制御

LiDARによる自己位置推定の精度は、概ね±50mm程度、±1deg.程度の誤差があるため、移動時にはある程度の誤差を許容しながら走行することになる。一方で、荷積み荷降ろしといった運搬対象に位置決めを行う場合には、資材のズレに対し精度が要求されるためカメラセンサを使用する。図-19に示すようにカメラセンサからは、対象となるパレットなどのターゲット座標として $P_V(X_V, Y_V, \theta_V)$ が得られる。これにより目標物の中

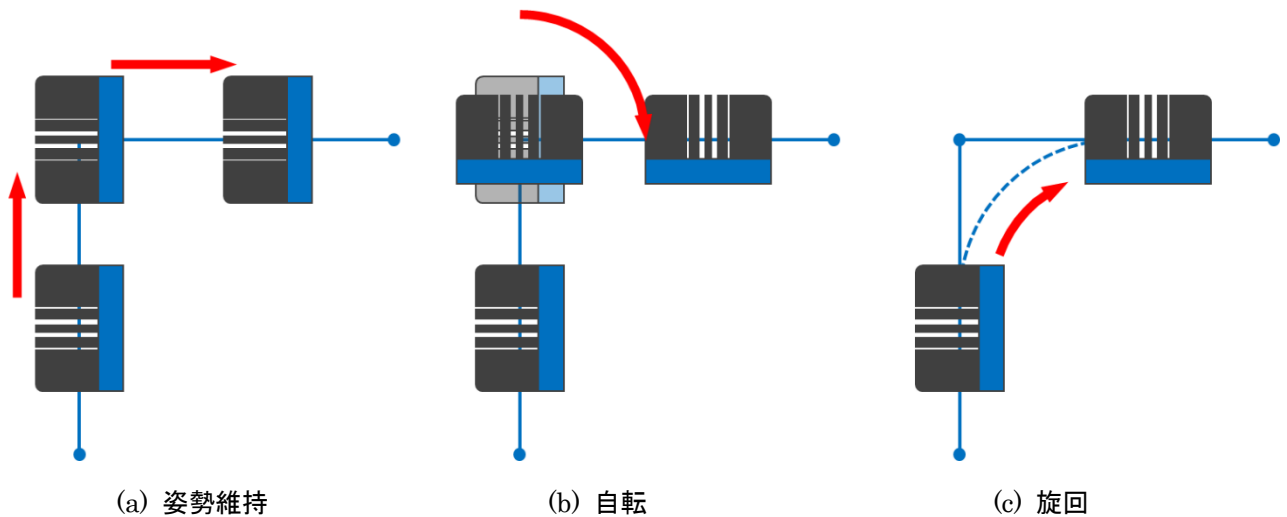


図-18 ノード通過方法

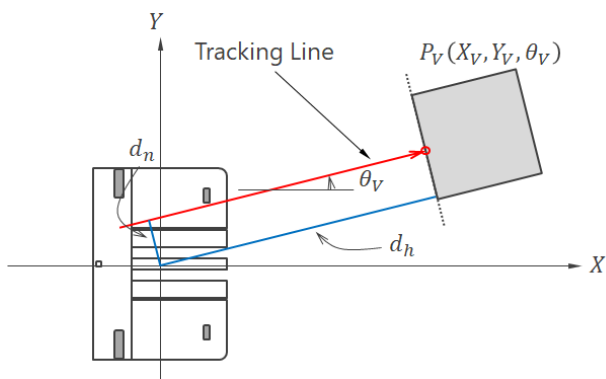


図-19 カメラセンサによる位置決め制御

心面からの垂線が求められるため、この直線に追従するように制御を行うことで、対象物の中心に正対することができる。

自動搬送台車の場合、フォークをリーチアウトさせ、横行で前進する。フォーク根本にあるセンサが資材に接触したことを検出して前進を止め、フォークをリフトアップ、リーチイン、リフトダウンさせることで資材を車体に積載する。この動作で資材の取り込みができ、逆の動作を行うことで荷降ろしができる。

自動搬送フォークリフトの場合には、図-20のように資材置き場前まで移動後、資材が段積みされている場合を想定してリフトを上昇させ、カメラセンサにて資材の最上端を探索する。最上端が検出できたら、リフトをフォークポケットの高さに合わせ、パレットの位置、回転を検出しながら資材正面に位置合わせし、荷取り動作を行う。荷取り動作はリーチアウトしながら前進し、フォーク根本のセンサが資材と接触したことを検出して停止、リフトアップしてフォーク上面のセンサが、資材と接触したことを検出しリフト停止、その後リーチイン、後進することで荷取りが完了する。

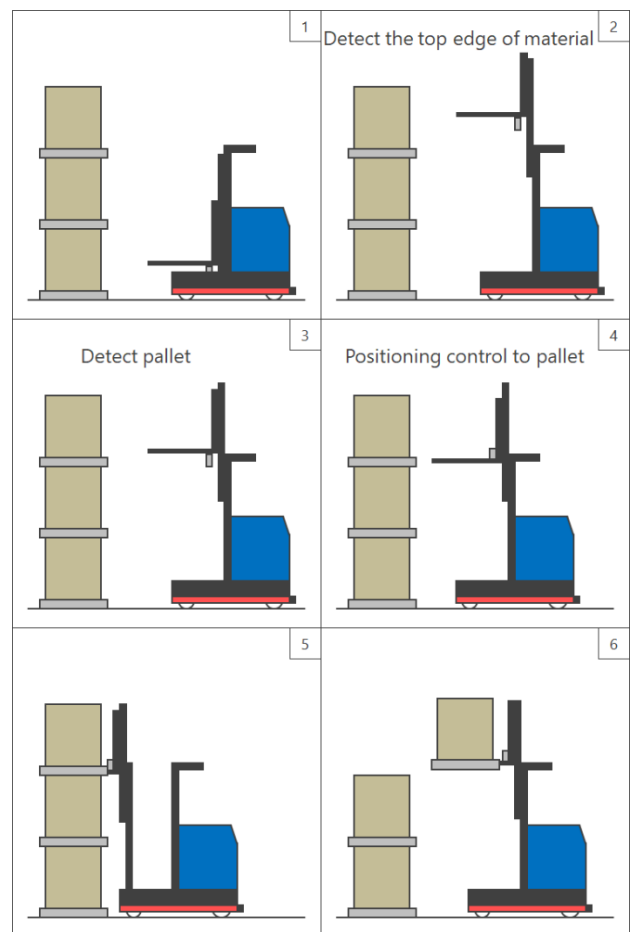


図-20 荷積み制御

荷降ろし動作の場合は図-21のように、置場の最下段のパレットを検出しパレットの位置、回転を検出し、フォークリフトを資材正面に位置合わせする。その後、資材の上端を検索し、一定量上げ越した位置で荷降ろし動作を行う。置場に資材がない場合にはそのまま荷降ろし動作を行う。荷降ろし動作は、リーチアウトしながら資材位置まで所定距離前進し停止、リフトダウンしてフォーク

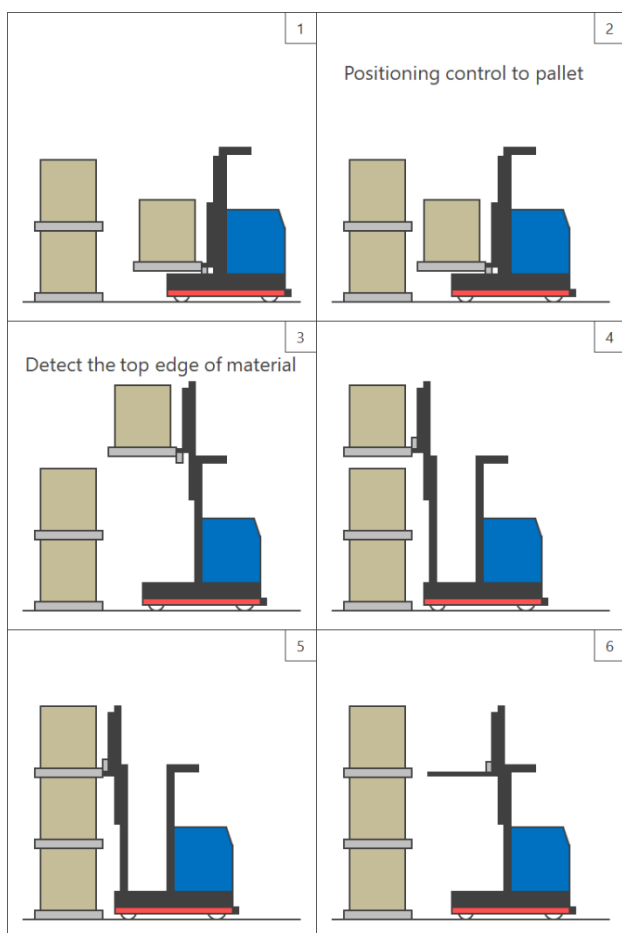


図-21 荷降し制御

上面のセンサが資材からの離れを検出し、リフト停止、リーチイン、後進することで荷降ろしが完了する。これらの動作により資材の平置きや段積みなどを実行することができる。

資材ラックの場合には、統合管理システムから資材置場の高さの情報を受信するため予め所定の高さにリフトを上昇させてから荷積みや荷降ろしを行う。

3.9 トラック荷降ろし制御

これら資材置場として定義されたものは位置が定まっているが、トラックに積載された資材の場合は荷台上で任意に置かれているため、位置を特定できない。そのため、トラック後方からトラック荷台に沿って荷物を探索し、発見した荷物を順次取り出すという手順で実施する。統合管理システム上のルートマップには図-22のようにトラック後方に当たる位置にトラック資材置場を定義し、そこを荷物の探索開始位置とする。作業管理者は、タブレット端末でトラック資材置場に対し資材の種類や行先、トラックに積まれた資材の数量を入力する。実際の動作ではトラック資材置場に移動

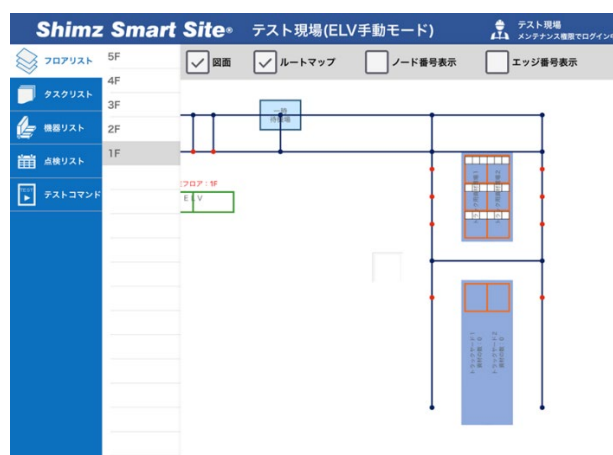


図-22 トラック荷降ろし時のルートマップ



図-23 トラック荷降ろし状況

したフォークリフトが荷台上の資材を探索し、資材があれば荷取り動作を行い、資材がなければ横移動して資材を探索する。図-23のように資材を発見したら停車し、荷取り動作を行う。これを入力された資材の数量の回数だけ繰り返すことで、トラックからの荷物の取り出しが完了する。

4. 試験及び運用

4.1 自動搬送台車の運用

建設工事現場にて10件の現場に適用し、運搬した資材数量は4,000パレットを超えている。建設工事現場では主に夜間搬送を実施している。これは作業者がいない環境の方が安全性も高く、搬送エリアも広く取れたり、エレベータを占有したりでき効率が良いためである。そのため、少ない人員で非生産時間を有効活用することができる。

搬送効率については、例えば1階のフロアに置かれた資材を工専用エレベータによって上階に搬送する作業を想定する。自動搬送台車で搬送する場合、搬送ロボットのパレータ1名、1階と上階

に自動搬送台車を各1台、計2台配置し、工専用エレベータが自動化されている状態としたとき、1時間当たり8パレット搬送することができる。作業者が人力で搬送する場合、フォークリフトのオペレータ1名、エレベータの操作者1名、1階と上階で各2名ずつ運搬作業者を配置して、計6名が必要となる。搬送効率は1時間当たり20パレット前後となる。つまり自動搬送台車では人力の運搬作業の2.5倍の時間がかかることになる。ただし、1時間1人員あたりの搬送数は、自動搬送台車では4パレット、人力での搬送では3.3パレットであるため省人化ができる。

4.2 自動搬送フォークリフトの試験

自動搬送フォークリフトは、試験場内及び物流施設にて段積みされた資材やラックに収納された資材の移動、トラックに積載された資材の荷降ろしなどを試験した。トラックからの荷降ろし試験では、トラックに積載された16個の荷物を左右から取り出し、置場に2~3段で積み上げるという試験を行った。自動搬送フォークリフトでは1台で45分かかり、作業者が運転した場合、熟練度にもよるが20分程度かかった。作業時間は人が操作するフォークリフトの場合の概ね2倍の時間を要することになる。物流施設では、数十m程度の移動を行いながら所定の搬送を行った。荷積み荷降ろし動作はロボットの方が時間はかかるが、走行に関しては時間に大きな差がでにくい。そのため走行距離が長いときは人とロボットの差はさらに縮まることになる。

5. おわりに

現場で搬送作業を自動化するための搬送システムを構築し、管理システム、操作端末、搬送ロボット全てが連携し、資材の搬送を自動化することができた。建設工事現場のように十分な設備や環境が整っていない環境でも、搬送システムが適用できることを示し、そのために必要な技術、仕組みを明らかにした。搬送ロボット単体では人の作業よりも遅いが、複数台を少ない人員で運行することにより生産効率が高くなることも示した。搬送ロボットは走行できるルートを予め決めて走行しており、荷物の積み降しの際、荷物正面にて探索や位置合わせなどをそれぞれ計測、検知しているのに対し、人は周囲の状況に合わせて走行経路を自由に選択している点や、予め資材の状況を確認し、高

さや位置を合わせ、判断することで作業速度に違いが出ている。また、安全性の懸念から自動搬送ロボットは走行速度に制限をかけている場合もある。これらは今後改善の余地が十分にあるが、現在の技術では人と同じ作業時間を実現するのは難しい課題であると言え、複数台を少人数で運行することが現在の解決手段である。

自動化によって、本来の生産時間を有効利用することができ、安全性や生産性の向上、人員不足などの問題解決に役立つが、搬送作業を行う仕事から搬送ロボットを取り扱う仕事に変化することで、求められる人材も変化するため、人材育成や教育、システムのユーザビリティも重要になっていくと思われる。運用面でも自動搬送システムを前提とした作業工程の組み方や施設のレイアウトの作りこみなども必要になると考えられ、技術、運用の両面での課題解決や改善が必要である。

<参考文献>

- 1) Worker Shortages in Manufacturing Make AGVs More Beneficial Than Ever, <https://www.fredagv.com/news/worker-shortages-in-manufacturing-make-agvs-more-beneficial-than-ever/>, 2022.
- 2) Jianqi Zhang, Xu Yang, Wei Wang, Jinchao Guan, Ling Ding, Vincent C.S. Lee, "Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering", *Automation in Construction* Vol.146, pp1-24, 2022.
- 3) 村田機械株式会社, <https://logistics.muratec.net/jp/products/premex/>, 2023.
- 4) オムロン株式会社, <https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/mobile/>, 2023.
- 5) 株式会社ダイフク, <https://www.daifuku.com/jp/solution/intralogistics/product/s/vehicle/>, 2023
- 6) 松尾力,野々垣保紀,三田達也,岸田博一,服部晋悟,奥村俊介, "自動運転フォークリフトの開発", 豊田自動織機技報, No.70, pp90-95, 2019.
- 7) Yuki Miyashita, Tomoki Yamauchi, Toshiharu Sugawara, "Distributed Planning with Asynchronous Execution with Local Navigation for Multi-agent Pickup and Delivery Problem", *AAMAS 2023*, pp914-922, 2023.
- 8) Michael Seelinger, John-David Yoder, "Automatic visual guidance of a forklift engaging a pallet", *Robotics and Autonomous Systems* Vol.54, pp1026-1038, 2006.