

# ガイドレス無人搬送システムの開発

電子情報科 主任研究員 堀江 貴雄  
電子情報科 科 長 指方 顕

大量生産を行う大規模工場を中心に広く普及している現状の無人搬送システムはレールの敷設など大掛かりなインフラ整備を必要とする。一方、県内では多品種少量生産型の工場が多く、頻繁な生産ラインの変更が必要となるため、これまでの無人搬送システムの導入はコスト面で難しくなる。そこで、本開発では（１）工場内での搬送車両の位置と障害物を検出するレーザー位置センサシステム、（２）搬送時の自動積み下ろし機構、及び（３）全方向移動可能なメカナム走行車両を開発した。さらに、これらを統合して自律移動が可能なガイドレス無人搬送システムを試作し、このシステムの有効性を走行実験によって確認した。

## 1. 緒言

AGVと呼ばれる無人搬送車は生産現場を中心として広く普及している。一般にレール軌道を敷設し、その上を走行させる方式、ガイド用のマグネットを床面に貼りつけ、センサで読み取り追従させる方式等が広く使われてきた。また適用される現場は主に大量生産を行なう大規模工場であり、専用走行レーンの特定の経路を往復する、または周回することが基本であった。一方、県内中小工場や倉庫などの現場は多品種少量生産が多く、頻繁に生産ラインレイアウトが変更される。またスペース上の制約から専用の走行レーンを設置することは困難である。

日本国内においては、2007年から自律ロボットによる屋外走行競技であるつくばチャレンジが毎年開催されている。この競技ではロボットにGPS、レーザーレンジファインダ、カメラ等の各種センサを搭載し、観客を含めた周辺環境に一切手を加えず自律移動させることを目標としており、実際の公園内道路を自律移動するなどの成果を挙げている<sup>[1][2]</sup>。

そこで、本研究ではこれら近年注目されているロボット技術を導入した中小規模工場向けの自律移動システムを開発する。この自律移動システムは搬送車両の位置と障害物を検出するシステムにより、工場内の目標地点まで途中の障害物を回避しながら自律移動する。

平成21年度から平成23年度にかけ、著者らはレーザー式ポジショニングセンサとレーザーレンジファインダを利用した移動システムを開発し、さらに実用化を図るため、県内酒造メーカー出荷倉庫や、事務所内での移動実験、県内外メーカーでのデモンストレーション及びニーズ聞き取り調査を実施してきた<sup>[3]</sup>。

事業化を推進するためさらなる低コスト化と付加機

能の充実を目指した本開発では、平成24年から平成25年にかけて、①レーザー位置センサシステム、②自動積み下ろし機構の2つの技術シーズを開発してきた<sup>[4]</sup>。最終年度の平成26年度には、全方向移動が可能なメカナム走行車両を開発し、かつ①、②の技術を統合してガイドレス無人搬送システムを実現した。

## 2. レーザー位置センサシステム

初年度に試作した首ふり型レーザー位置センサシステムでは、首ふり機構により車両周囲の全方向のリフレクタ検出を可能としたが、首ふり動作時の測定精度の悪化や機構部によるコスト高が問題となる。

そこで、レーザー位置センサシステムの首ふり機構を廃止した固定型のレーザー位置センサシステムを開発した。センサシステムの外観と仕様を図1と表1に示す。また、本センサシステムではセンサ後方90度の死角による情報量低下に起因する認識率の低下を補正する次項のマップ生成アルゴリズムを開発した。



図1 固定型レーザー位置センサシステム

表1 固定型レーザー位置センサシステムの仕様

項目	仕様
寸法	60 mm (L) × 60 mm (W) × 90 mm (H)
センサ検出角度	270 度 (分解能: 0.25 度)
センサ検出距離	30 m (精度: ± 30 mm (0 m ~ 10 m) ± 50 mm (10 m ~ 30 m))
データ更新頻度	40 Hz
位置更新頻度	~ 35 Hz (Corei5 2.5 GHz 使用時)
センサ通信方式	TCP/IP
プログラム言語	C#

## 2.1 マップ生成アルゴリズム

使用したレーザーレンジファインダは角度の検出範囲が270度であるため、そのままでは後方の90度範囲のリフレクタを検出できず、360度のデータによる地図を生成できない。そこでSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術<sup>[9][7]</sup>を用いたマップ生成アルゴリズムを開発した。マップ生成アルゴリズムは以下のとおりである。

①最初に、基準となる姿勢(任意座標、任意方角)において、リフレクタのスキャンを行いその配置パターンを基準マップとして登録をおこなう。

②レーザーレンジファインダを搭載した車両を移動・回転させてSLAMによるマップ拡張を実行する。基準マップのリフレクタパターンと今回検出したリフレクタパターンの照合をおこない、座標および方向を認識する。

③基準マップのリフレクタ以外に検出されたリフレクタがあった場合、新規リフレクタ候補として確度情報を+1として仮登録を行う。逆にマップに登録されているにもかかわらず、センサで検出できないリフレクタがあった場合、確度情報を-1とする。

④確度情報が閾値以上となった場合(例: 確度情報10以上)、新たなリフレクタとしてマップに登録を行う。逆に確度情報が閾値以下になった場合、間違っただリフレクタ情報としてマップから除去する。

⑤ ①にもどる。

以上の処理①~⑤を繰り返すことにより、マップ生成と位置計測を同時に行うことが可能となり、360度かつ大規模マップの生成が可能となった。

## 2.2 壁形状計測によるマッチング

強い西日、窓ガラス、金属製の壁材、反射強度の高いポスターなどが原因で、局所的にリフレクタの認識ができない場所では、リフレクタによる認識にかわって、壁形状によるマッチングを行う。リフレクタを判別するには距離と反射強度の情報が必要となるが、壁形状取得では距離データのみでよいことから、比較的安定的な情報を取得することができる。

一方、リフレクタの位置認識が閾値以上の相関がとれた場合には、その時の座標、姿勢および壁形状データを一時保存しておき、壁形状ベースで相対移動座標を計算することで位置認識を継続する。長時間の認識が続いた場合、直線廊下などの単調な特徴を有する環境では誤差が蓄積されるが、短時間であれば十分な追跡が可能となる。

## 2.3 マップ切り替え機能

SLAMによるマップ生成では認識位置の大幅な失敗によって正確なマップ生成が継続できないことがある。その原因は、環境の特徴によって特定の座標ではリフレクタが極端に認識できないことなどが挙げられる。また、長距離のマップ生成では積算誤差によって徐々にマップがゆがむ等の不具合が発生する。

本システムでは、どのような場所においても確実なマップ生成を可能とするために、一定の距離のマップを生成するごとに、マップを分割することによって、これらの不具合を解消することとした。マップ生成後の位置認識時には、使用する初期マップ番号を明示しておき、著しくマップマッチングの相関が取れない場合には、その他のマップを総当たりでマッチングしてもっとも相関の高いマップを用いて位置認識を継続するアルゴリズムとした。

## 2.4 リフレクタ数による検出頻度変化

固定型レーザー式位置センサシステムの特性評価として、参照リフレクタ数と認識頻度の関係を調べた。実験室の壁に設置するリフレクタ数を4個、6個、9個と変化させたマップをそれぞれ作成し、各マップを用いて位置認識を実行させたとき、センサで認識できたリフレクタ数を参照リフレクタ数とし、また位置認識プログラムの更新頻度を認識頻度(Hz)とした。測定評価結果を図2に示す。

本システムでは、参照リフレクタ数をベースに計算アルゴリズムが実装されている。また設定個数以上のリフレクタを検出した場合、前回座標と姿勢を基準と

して、センサ検出範囲を予測し、そのうち近いものから設定個数内のリフレクタを選択し、一時的なローカルマップを生成後、認識計算を実行している。実験結果から、本アルゴリズムがマップに登録されたリフレクタ数に関係なく、位置認識時に検出したリフレクタ数が多くなるにつれて、認識速度が低下し、少なければ高速になることが確認された。この結果から今回のハードウェア構成では更新頻度が3Hz未満にならないよう位置検出に用いるローカルマップリフレクタの最大数を10個とした。

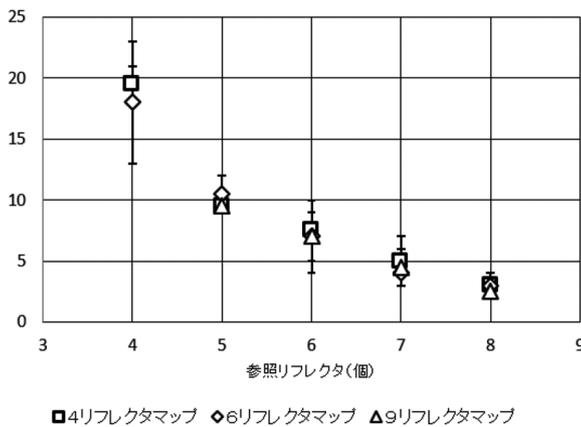


図2 参照リフレクタ数と認識頻度の関係

### 3. 搬送車両の車両走行実験

開発した固定型レーザー式位置センサーシステムを平成25年度までに開発した2軸差動式搬送車両に搭載して走行性能を確認した。実験室から廊下へ出た後、再び同じ実験室に入り、元の位置に戻る経路を設定する。走行経路は①実験室(Map0)、②実験室入口付近(Map1)、③廊下(Map2)の3つのマップを事前に作成し、マップ上に経路座標10点を設定した。

計測回数総走行距離平均認識頻度リフレクタデータのみで推定した車両位置の測定結果を図3に示す。瞬間的に数m以上移動したと推定して明らかに間違っただ箇所がある。この原因としては、瞬間的にガラスや金属からの反射、日の差し込みなどによって存在していないところにリフレクタが誤検出された、またはマップが異なっても、局所的には似ているパターンがあること、またはその両方が原因で、リフレクタ配置パターンが局所的に似ていることに起因したと推察される。

一方、2.2で述べた壁形状による認識と車輪回転速度から検出したオドメトリ座標を併用して車両位置を

補正した結果を図4に示す。最大で2m程度の測定誤差を含んだものがある。これは車両位置の推定アルゴリズムにおいて、リフレクタのみによる位置検出相関値が特に高い確度である場合、オドメトリによる予測位置よりも優先するためである。

本推定アルゴリズムは予測しない動きの時(例えば外部からの力や大規模なスリップなどで、制御に関係なく本体が一度に動いてしまった場合)に正しい認識を行うことを目的としているが、今後検討の余地があると考えられる。

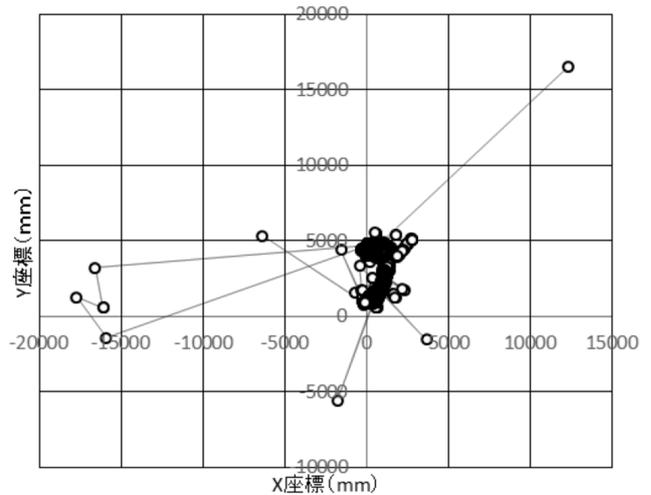


図3 リフレクタ単独による車両位置の測定結果

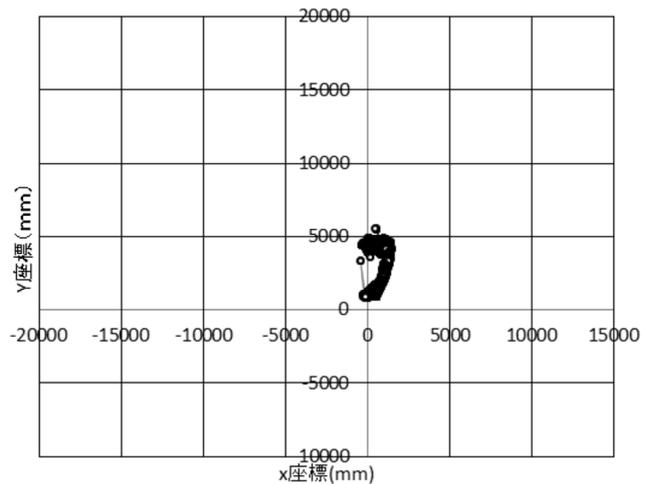


図4 補正処理後の車両位置の測定結果

### 4. 積み下ろし装置

平成24年度に試作した積み下ろし装置をベースに、動作性向上のための改良を実施した。改良した積み下ろし装置はソレノイドコントローラー(図5)、プッシュ

ロッド機構(図6)、荷卸し用ストッパー (図7)、棚用ストッパー (図8)から構成される。

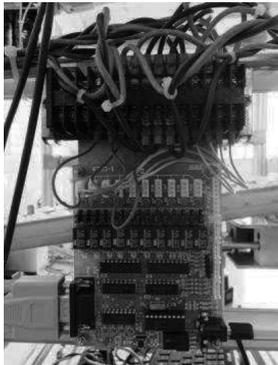


図5 ソレノイド  
コントローラー

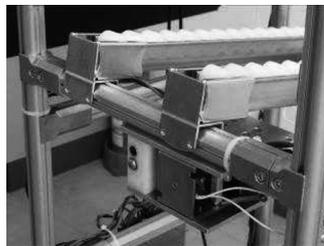


図6 プッシュロッド機構



図7 荷卸し用ストッパー



図8 棚用ストッパー

無人搬送車制御コンピュータからRS232Cを介したSCHコマンドによりソレノイドコントローラーの制御をおこなう。動作実験により最大10個までのソレノイド機構を制御可能としている。また、搬送車に搭載されるプッシュロッド機構と荷卸し用ストッパーにはソレノイドが内蔵されており、0.1秒周期で制御される。棚用ストッパーはソレノイドを内蔵しない受動機構であり、荷物棚に設置される。このストッパーは荷物棚の傾斜コンベアに載せられている荷箱が落ちるのを止める役割を持っている。さらに、プッシュロッド機構は最大75mmロッドを突き出すことができる。このロッド先端で棚用ストッパーのボタンを押すことで、ストッパーを解除して荷箱をひとつ取り出し搬送車に乗せることができる。また、荷物を下ろす場合には、荷卸し用ストッパーを解除することで荷受け棚に荷箱を下ろすことが可能となっている。

## 5. 全方向移動車両

荷物の積み降ろしのため、搬送車両は荷物棚に30mm~50mmまで接近する。平成25年度までの開発で採用していた2軸差動式車両は、低コストである一方、原理上、車体を真横や斜め方向に平行移動させる

ことができないため、荷物棚へ近接させるには、遠方から緩やかに接近させるか、スイッチバック走行で寄せることが必要となる。そこで、狭所での取り回しを考慮して開発した図9の車両では、全方向移動を実現する駆動方法としてメカナムホイール(土佐電子社製、TDAM-0732)を用いた。類似の機構としてオムニホイールがあるが、オムニホイールでは常にホイールの小ローラーが回転し、路面の凹凸乗り越え能力が小ローラーの直径以下に制限される。一方、メカナムホイールは前後進時においては前述の制約がなく、凹凸乗り越えの高い能力を持つ。

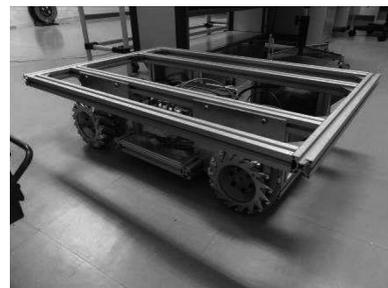


図9 メカナムホイール車両の外観

## 6. ガイドレス無人搬送車両

前述した全方向移動可能なメカナムホイール車両に自動積み下ろし装置と固定型レーザー位置センサシステムを搭載したガイドレス無人搬送車両の外観と仕様を図10と表2に示す。メカナム車両の右前、左後ろには検知距離10m、検出角度270度のレーザーレンジファインダ(北陽電機社製、UST-10LX)をそれぞれ1基搭載し、車両周囲360度の障害物を検知可能としている。また、車両中央に上下2段の傾斜コンベア棚を搭載し、それぞれの段に積み下ろし機構を取り付けて上段、下段独立での積み下ろしを可能としている。さらに、最上部には固定型レーザー位置センサシステム1台を搭載した。



図10 ガイドレス無人搬送車両の外観

表2 ガイドレス無人搬送車両の仕様

項目	仕様
寸法	800 mm(L) × 450 mm(W) × 1900 mm(H)
センサ検出範囲	270 度 (分解能 0.25 度)
センサ検出距離	30 m (精度 ± 30 mm (0 m~10 m), ± 50 mm (10 m~30 m))
障害物検知範囲	360 度 (分解能 0.25 度)
障害物検知距離	10 m (精度 ± 40 mm)
荷箱搭載数	2 個
移動方式	メカナムホイール全方向移動
電源	シールド鉛バッテリー 24V
制御 PC	産業用 PC (Corei5 2.5GHz)
プログラム言語	C#

### 7. ガイドレス無人搬送車両の走行試験

ガイドレス無人搬送車両の動作確認をするため、走行試験を実施した。まず、搬送車両はスタート位置から前進し、荷物棚横まで移動する (図 11(1)、11(2))。車両右側へ平行移動を行い、荷物棚に 30 mm まで接近したのち、プッシュロッド機構を動作させて、荷物棚の上下に設置してある棚用ストッパーを解除し荷物を積み込む (図 11(3))。積み込み後、車両左側への平行移動を行い移動経路に復帰後 (図 11(4))、荷受け棚から 500 mm の位置まで移動をおこなう (図 11(5))。荷受け棚まで 30 mm の位置まで車両左側へ平行移動を行い、荷卸し用ストッパーを動作させ、上下段の荷物を下ろす (図 11(6))。荷卸し後、車両右側へ平行移動し、荷受け棚から離脱後、スタート位置へ戻るために 180 度方向転換し (図 11(7))、停車目標位置へ移動した (図 11(8))。

以上の走行試験時の車両座標を固定式レーザー位置センサーシステムで測定した結果を図 12 に示す。車両は事前に設定した 8 箇所を経由ポイントを正確に通過しており、本研究で開発したシステムは荷物搬送を積み込みから荷卸しまで全自動で行う性能を有することを確認できた。

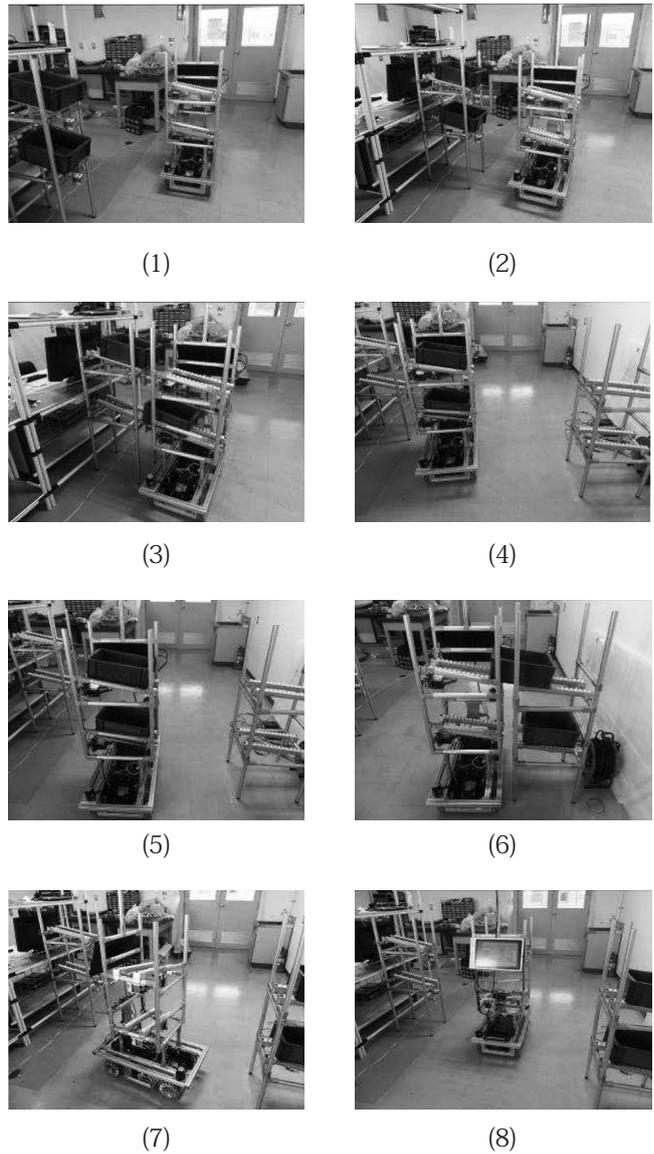


図 11 ガイドレス無人搬送車両の走行試験の様子

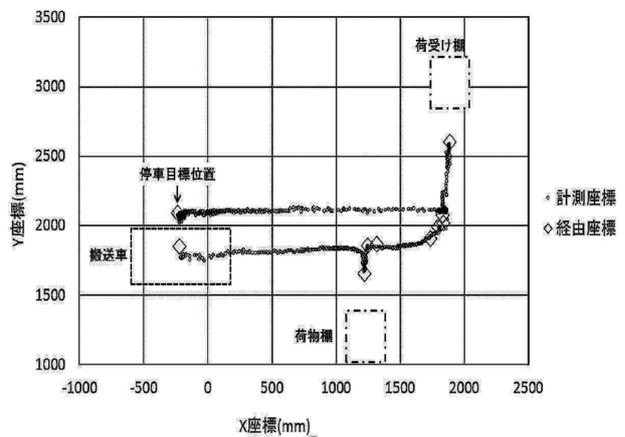


図 12 ガイドレス無人搬送車両の走行経路

## 8. 結 言

本研究では（１）工場内での搬送車両の位置と障害物を検出するレーザー位置センサシステム、（２）搬送時の自動積み下ろし機構、及び（３）全方向移動可能なメカナム走行車両を開発した。また、これらを統合して積み込みから荷卸しまでを全自動で行うガイドレス無人搬送システムを実現した。

ここで開発した要素技術の応用分野として、工場の生産システムと協調した高機能搬送システム、医療分野でのリネン搬送ロボットやホテルでの荷物搬送ロボットなどのサービスロボットシステム、さらには屋外搬送や除草作業をする農業ロボットなどが考えられる。

## 参考文献

- [1] 「つくばチャレンジ」オーガナイズセッションレポート～実環境のチャレンジから見てきたもの  
<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2008/01/17/859.html>.
- [2] 坪内孝司, Yoichi MORALES, Alexander CARBALLO, 原祥堯, 油谷篤志, 城吉宏泰, 廣澤敦, 鈴木祐輔, Mehrez KRISTOU, 山口智也, 澤田有希子, 森川直樹, “つくばチャレンジ 2008 における筑波大学知能ロボット研究室「屋外組」の取組み“, 第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 1I4-6, 2008.
- [3] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “光学式位置センサを用いた小型無人搬送車の開発”, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 4G3-3, 2012.
- [4] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “ガイドレス無人搬送システムの開発”, 平成24年度長崎県工業技術センター研究報告書 No42, pp.16-18, 2013.
- [5] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “ガイドレス無人搬送システムの開発”, 平成25年度長崎県工業技術センター研究報告書 No43, pp. 22-25, 2014.
- [6] 横山和成, 石井雅樹, “測域センサを用いた移動ロボットの環境地図構築及び歪み補正に関する検討”, 計測自動制御学会東北支部第274回研究集会, 資料番号 274-8, <http://www.topic.ad.jp/sice/papers/274/274-8.pdf>, 2012.
- [7] 原祥堯, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一 “測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットのための環境マップ構築”, ロボティクスシンポジウム予稿集 No12, pp. 480-485, 2007.