

標識認識自律搬送システム「Follow Me」の開発

吉野 恭司 井上 文宏
表 佑太郎

Development of Sign-guided Autonomous Transportation System "Follow Me"

Kyoji Yoshino Fumihiko Inoue
Yutaro Omote

Abstract

For automating the transportation of finishing materials, we developed a sign-guided autonomous transportation system "Follow Me" which uses signs on the floor to navigate a vehicle. This system recognizes the location and content of signs by a sensor and vision system, and moves autonomously. The transportation path can be changed easily by altering the content or location of signs. A sign search algorithm with data obtained by laser radar, and a recognition algorithm with a pattern matching method are presented. These algorithms were examined by experiment and a prototype system was produced. After applying to sites, the results suggested that the system is suitable for heavy work, safety and transportation velocity. This paper describes the sign recognition algorithm, system functions and the results of site experiments, and proves the effectiveness of the system.

概 要

仕上資材水平搬送の自動化を目的として、現場内に設置した標識によって搬送台車を誘導する標識認識自律搬送システム「Follow Me」を開発した。本システムはセンサと画像処理システムを用いて標識の位置と標識内容を認識し現場内を自律移動するものであり、標識の種類や場所を変えることにより容易に搬送経路を変えられる特徴をもつ。認識手法としてレーザーレーダにより標識を探し出しその位置を認識する探索アルゴリズムと、パターンマッチングにより標識内容を特定する認識アルゴリズムを考案した。この手法の性能を実験により確認したのち試作機を製作した。試作機を現場に適用した結果、苦渋作業からの開放と作業員の安全確保が図られ、搬送速度においても人手作業に優ることがわかった。本報では、標識認識のアルゴリズムとシステムの構成、機能、性能および現場における適用結果について述べ、システムの有効性を示した。

1. はじめに

建築現場における資材搬送作業は直接の生産行為ではないが、生産を後方支援するロジスティクスとして重要な役割を果たす。近年、仕上材搬送作業の自動化、効率化が研究され、ハードおよびソフト両面においていくつかのシステムが開発されている。特に高層建物では資材の垂直搬送が工事全体の工程にとってクリティカルになり、昇降機の高速度化や移載の自動化が図られている。¹⁾しかし、現在、仕上作業階における水平搬送は作業環境の煩雑さから台車等の簡易な道具が使われており、自動化の例は少ない。そこで、水平搬送をさらに自動化し、荷取り場所から作業階の資材仮置き場まで一貫した搬送作業の自動化を実現することを目的として、Photo1 に示す自律移動を特徴とする水平搬送システムを開発した。本報では、そのアルゴリズム、構成、機能、性能および現場における適用結果について報告する。

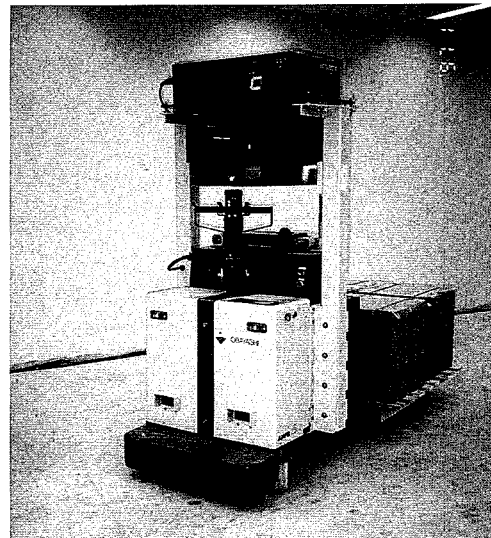


Photo 1 標識認識自律搬送システム
Sign Guided Autonomous Transportation System

仕上作業階における資材搬送にはいくつかの問題がある。仕上工事の進捗につれて組立作業を行う場所が順次移って行き、一定の場所での作業が行いにくい。それとともに資材の供給場所も移り、資材搬送の経路も変わる。そのため定置した搬送設備は工事が進むにつれ盛り替える必要がある。

このような作業環境に対応するには、柔軟性のあるシステムでなければならない。資材搬送の自動化を計画する場合、定置設備の少ない自律システムが最適であると考えられる。本来、自律とは自己のセンシングによって環境を認識し自己判断によって最適作動することを意味している。自律システムを採用することで常に化する現場環境に対応する自動化システムの構築が可能である。

2. 標識認識による誘導

従来の自動走行台車（AGV）は床面に電磁誘導線を埋め込んだり、磁気テープを貼り付けたりして台車の誘導を行っている。しかし、この方式では経路の変更や誘導線の貼り替えが容易でなく、建築現場には適さない。

そこで、今回、Fig.1 に示すような、容易に設置、盛替えが可能な標識を床面に立て、この標識を認識することで搬送台車を誘導する方式を考案した。

標識認識システムは二つの機能から成り立つ。一つは認識空間から目標とする標識を探索する機能である。この標識を目標として走行進路をとる。もう一つは標識からの情報を受け取ることである。具体的には標識に書かれた動作内容を理解することである。

標識を探索することで本体と標識との位置関係が明確になり自己位置が標定され、標識に向かい標識内容を認識することにより次の経路と動作の選定が行われる。

3. 実験機とアルゴリズム

3.1 実験機の機能と構成

この実験システムは試作機の製作に先立ち、標識の探索、認識機能の確認^{2)~3)}を目的に製作した。実験機の外観をPhoto 2、実験機の構成をFig.2に示す。本システム

はレーザーレーダによる標識探索装置、近赤外線カメラ、イルミネータ、画像処理器から成る標識認識装置と車両制御装置で構成される。車体には電動台車を利用した。標識探索装置においては、レーザーレーダの情報から標識の位置と距離を測定し、標識の探索を行う。標識認識装置は、標識までの距離情報から電動ズームレンズの制御を行うとともに、イルミネータに照らし出された標識の内容を画像処理により認識し次の動作を決定する。車両制御装置においてはステアリング角指令と車速指令により電動台車の走行制御を行う。

3.2 標識の種類と動作

標準の標識をFig.3に示す。標識は画像処理速度と現場での実用を考えて8種類の標準標識を用意した。標準標識には右・左折標識、スピターン右・左折標識、荷下ろし・荷取り標識、停止標識、そして直進迂回標識がある。スピターンは荷下ろしまたは荷取り時、後進方向に変えるための回転で、フォーク車輪を中心とした最小半径の

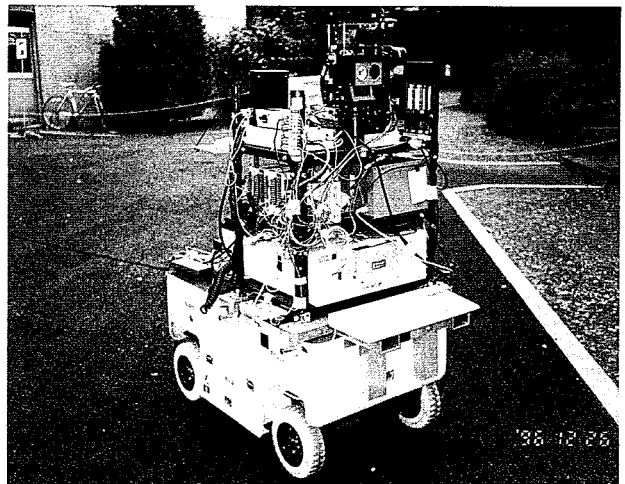


Photo 2 実験機の外観
Outlook of Experiment System

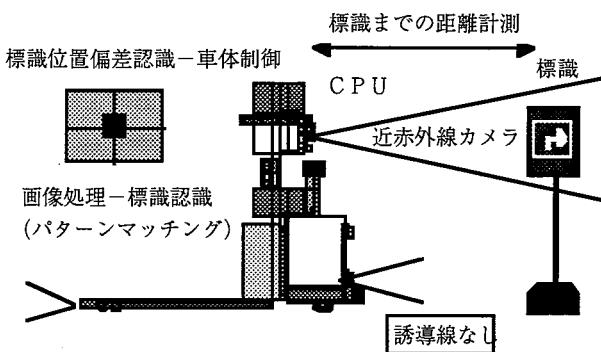


Fig.1 標識認識による誘導
Navigation by Sign Recognition

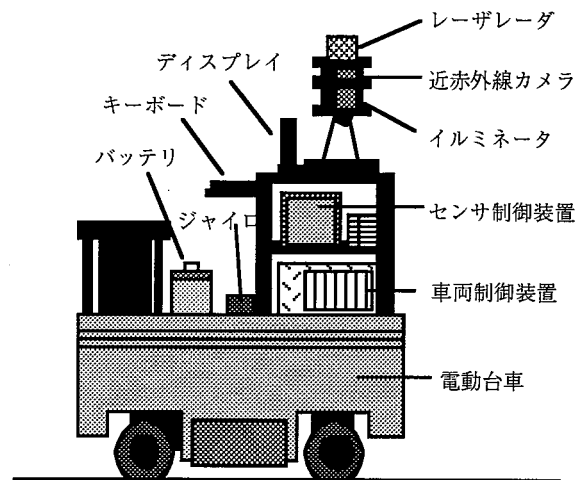


Fig.2 実験機の構成
Composition of Experiment System

回転が可能である。直進迂回は標準認識距離以上の長距離を直進する場合、この標識を迂回して次の標識に向かうことができるように考えた標識である。

標識は大きさ30cm 角の外枠内に所定の記号を配している。この記号にそれぞれ一連の動作を対応させている。標識は強いコントラストを得るために黒色の下地に高反射率を持つ再帰型高反射シートを貼り所定の高さのポールに取付け現場に設置する。

3.3 標識探索アルゴリズムと性能

標識探索には標識の反射率、再帰性および標識幅という特徴量を用いる。標識特定にはレーザレダにより計測された対象物の反射光レベルおよび距離と偏差角から算出されるデータを用いる。

建築現場にある資材の距離に対するレーザ光の反射レベルをFig.4に示す。標識とその他の素材の反射光レベルには差があるため、対象物までの距離に応じてしきい値を設定でき、しきい値よりも高い反射光レベルを示す被測定物のみを選択する。Fig.5に標識探索の概念図を示す。選択されたデータの中からX軸方向に連続した点列を検出する。同時に点列から最小距離座標点を特定し、その点からY軸方向の距離幅以内の点列に注目する。こうして抽出された点列に対し、X座標の最大値と最小値の差を標識幅とし実際の標識幅と比較した結果、標識であるか否かを判断する。なお、計測される標識幅は最小スキャン角が固定のため距離によって変化する。基準値は距離に対してテーブル化している。

標識探索の性能としてFig.6に標識までの距離と算出された標識幅の関係を示す。8m以上では、標識幅25cmをほぼとらえることができる。しかし、6m以内ではレーザの発散特性から標識を大きく判断する傾向がある。そこでこのシステムでは8mを境として換算テーブルを作成することで全範囲の測定を可能としている。

3.4 標識認識アルゴリズムと性能

標識認識装置は電動ズームレンズ、近赤外線カメラ、レンズコントローラ、センサ制御装置、そして標識に近赤外光を投射するイルミネータから構成される。標識探索装

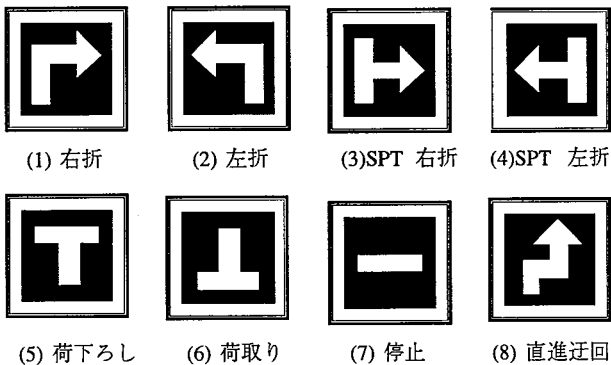


Fig.3 標準の標識
Standard Signs

置から得られた距離情報によりピントを合わせ、視野内に写る標識サイズがあらかじめ登録した標識（テンプレート）のサイズと一致するようにズーム画角を制御する。次にあらかじめ登録した標識と取得画像の間でテン

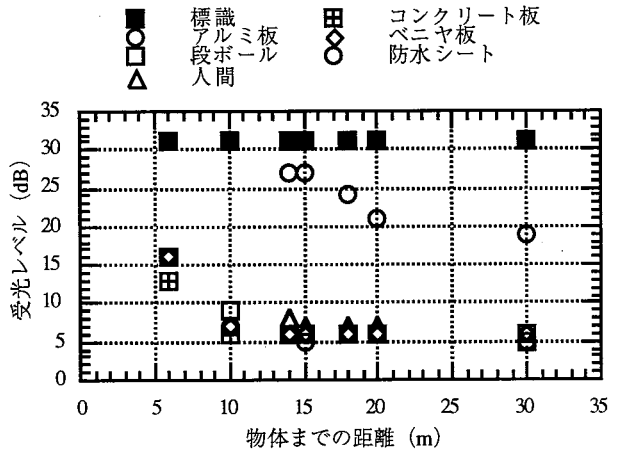


Fig.4 標識の反射率
Reflection Rate

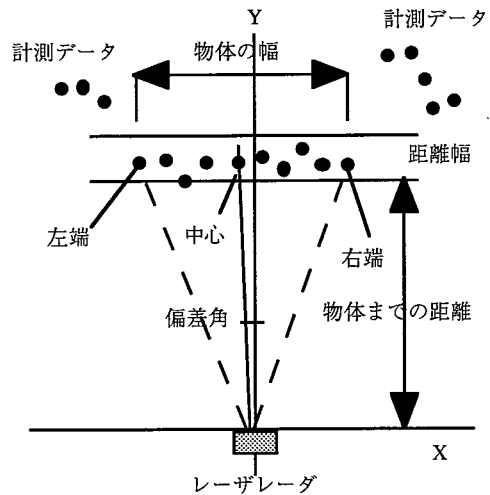


Fig.5 標識探索概念図
Sign Search Algorithm

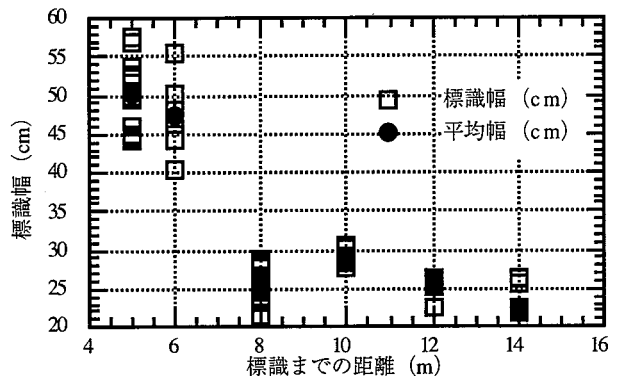


Fig.6 レーザレダによる標識幅計測
Measured Sign Width

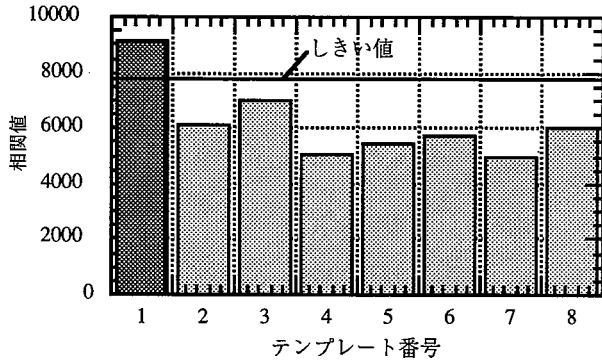


Fig.7 テンプレートマッチングによる認識結果
Sign Recognition Result

プレートマッチングを行う。全てのテンプレートについて相関値を計算し、最も相関値の高いテンプレートを認識結果とする。この標識テンプレートにはあらかじめ所要動作が登録されているため標識を認識後、旋回や回転、荷下ろしといった所定の動作が行われる。この結果、標識に沿った資材搬送が自動で可能となる。

Fig.7 に右折標識の認識結果を示す。図中のテンプレート番号はFig.3に対応する。撮像した標識に対して8種類のテンプレート全てについて相関値を計算する。その中で設定した基準値よりも高く、かつ最も相関値が高いテンプレートを認識結果とする。本結果よりテンプレート番号1番の右折テンプレートが最も相関値が高く相関値が他より遥かに高いため、似た絵柄にもかかわらず精度良く認識できていることがわかる。

4. 試作機の開発

4.1 機能と構成

Fig.8 に試作機の構成を示す。構成は実験機と同様であるが、試作機では自律化ユニットと搬送台車が明確に分かれている。実験機では電動台車を使ったが試作機では実際の現場で搬送作業が可能な市販のパレットトラック型搬送台車を使った。今回、自律化ユニットとの間で通信ができるように一部改造した。

機能的には自律化ユニットが標識認識機能と動作制御機能を持ち、搬送台車は障害物検知機能を含む走行制御機能を有している。実験機と大きく異なるのは近赤外線カメラ、レーザレダ、イルミネーターを取り付けた部分をジンバルによって回転可能にし、後進方向にも兼用する点である。また、この搬送台車は自律モード故障時の対応として手動ハンドルも備えている。

Table 1 に試作機の仕様を示す。車体外形は中央にバッテリーを搭載しているため2350 mm とやや長い。定格搬送重量は1.4 ton であるが、通常1 ton 前後の荷物を扱うものと想定して自重を含めた全体重量を2 ton に抑えている。これは特別な床補強なしに走行できる限界と考える。フォークストロークについては、通常のパレットが扱える高さである。標識認識距離は反射輝度によって多少かわるが標準では30 m である。

4.2 走行制御

Fig.9 に左折時の速度制御の状況を示す。横軸の時間に対する指令速度と実速度の関係を表している。このグラフから実速度は指令速度に対して±10 %程度の精度で制御され、大きい速度変化では1秒弱の遅れを生じている。これは車体および積載重量による慣性と考えられる。Fig.10 に左折時のステアリング制御の状況を示す。縦軸に指令角度と実際のステアリング角度を表す。ステアリング制御では指令角に対して250 msec 程度の応答の遅れ

Table 1 試作機の仕様
Prototype System Specification

車体外形	L2350 x W1040 x H2050 mm
定格搬送重量	1400kg
車体重量	900kg
フォーク長	1180mm
ストローク	80 ~ 200mm
走行速度	8 ~ 67 m/min (通常 30 m/min)
標識認識距離	30 m (精度± 15cm)

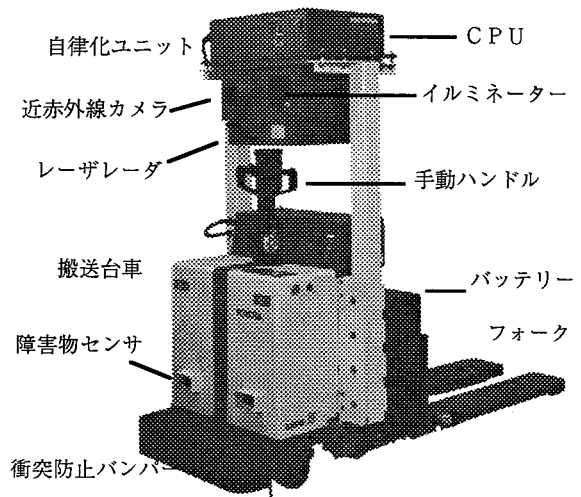


Fig.8 試作機の構成
Composition of Prototype System

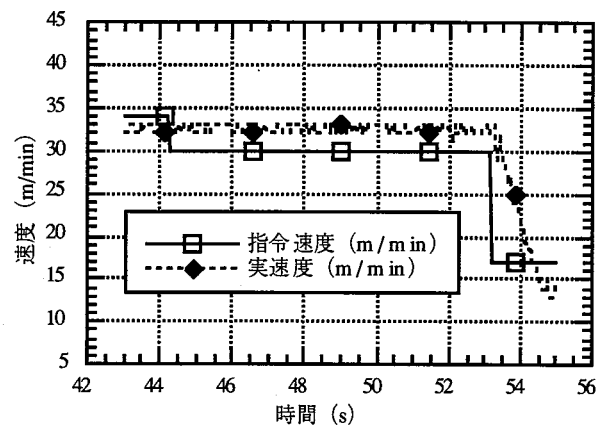


Fig.9 左折時の速度制御
Velocity Control on Left Turn

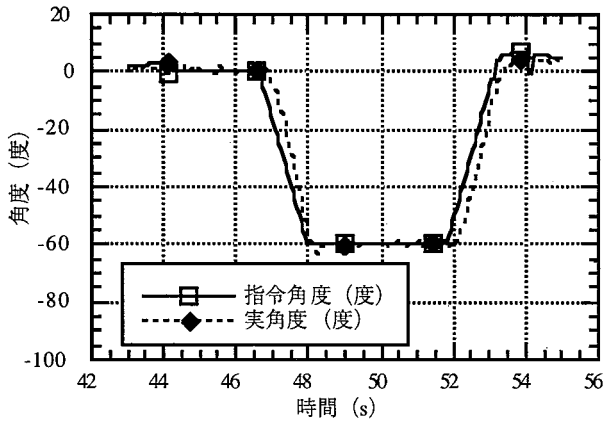


Fig.10 左折時のステアリング制御
Steering Control on Left Turn

が見られるが、おおむね一致している。

これらの結果からステアリング制御についてはよい応答性を持っているが、速度制御では作動開始位置や停止位置精度に影響を与えられと考えられる。実際、1 ton 載荷時の位置精度は± 10 cm 以内という結果が得られた。この精度は一部の作業を除けば建築現場における搬送作業にとって充分であると判断される。

5. システムの運用

5.1 運用の概要

Fig.11 にシステムの運用概念図を示す。運用手順としては(1) エレベータ前の荷取り(2) 自律走行(3) スピントーン右折(4) 荷下ろし(5) 帰路走行(6) ホームポジション待機となっている。もちろん(6) でスピントーンをすれば作業を自動で続けることができる。

5.2 システムの現場適用

試作機の性能を確認するために3件の現場で搬送作業に適用した。ここでは以下の2件について報告する。

5.2.1 札幌の地下鉄駅工事における適用 Photo 3 にコンコース階建築工事の資材搬送に適用した現場の写真を示す。この現場は幅17m長さ210mと細長い平面をしており、床の段差のほとんどないフラットな現場である。しかし、地上からの材料取込み開口が限られ、搬送距離が150m以上になることもある。重量物の人力による搬送は困難であり、搬送の自動化が要求された。そこで、この現場での課題として長距離搬送の自動化をあげた。荷取り作業は作業員が手動でおこなうこととし、直線部の自律搬送のみを行った。本システムの標識認識距離は30m前後であるため150mを直進させるには直進搬送を繋ぐ必要がある。そこで目標とする標識に近づいた場合その標識を迂回してまた直進する動作シーケンスを実施した。これにより30mごとに直進迂回の標識を数箇所設ければ所定の距離を直進できる。この現場では壁タイルや床テラゾータイルなどの重量仕上材搬送に有効であった。標識認識では外光による外乱が少ない条件もあったが、さ

らに標識認識率を高めるために現場においてパターンマッチングテンプレートを作成した。

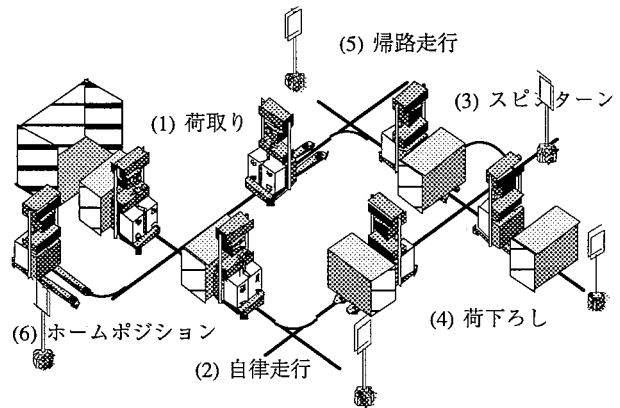


Fig.11 システム運用概念図
System Outline

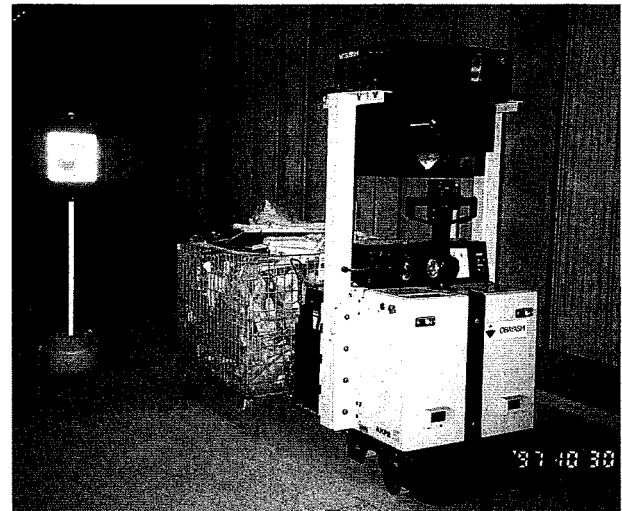


Photo 3 地下鉄建築工事搬送
Transportation at Subway Site



Photo 4 OAフロアの搬送
OA Floor Transportation

5.2.2 都内の事務所建築の現場への適用 この現場は延床面積33万m²の大規模現場である。事務所スペースの床仕上がほとんどOA床材になっており、仕上工事最終工程に大量の資材を効率よく搬送する必要があった。OA床材搬入の特徴としてすべての資材がパレット化されていることがあり、本システムによる自動搬送に適している条件である。Photo 4 に現場写真を示す。

Fig.12 に現場での自律搬送経路を示す。本システムではセンサの計測結果、制御コマンドの指令状況等のログデータを記録することができる。ここでは駆動輪に設置された速度計とステアリングの角度計および車体に取り付けられたジャイロ角度計からのデータに基づき搬送車の走行経路を求めた。

この経路では30mの搬送距離を荷取りを含めて搬送時間165sかかり、回送時間が110sかかった。ただし、本システムではOA床を2パレット一緒に搬送した。通常では高速モードで運用するため、換算した平均速度は0.66m/sとなる。

Fig.13 に同現場における人手によるOA床搬送時間測定結果を示す。限られた搬送回数ではあるが、搬送距離は平均46m、搬送時間平均は107s、回送時49sであった。搬送には電動ハンドパレットを使用しており、リフトの待ち時間を除いて連続の作業であった。そこで平均速度は0.59m/sとなった。

これら二つの結果から搬送速度に関して自律システムは人手作業と同等以上の能力を有する。実際には作業員による長時間作業は疲労などの点で効率がおちることを考慮すると、本システムによる効果は十分に期待できる。

6. おわりに

本報では標識を認識することで建築の作業空間内を自律走行する搬送台車の機能、構成および現場への適用事例について述べた。本システムの特徴は標識を利用した柔軟性の高い、人との協調型のシステムである。その精度は比較的緩やかな搬送という作業に合ったシステムと言える。従来、作業を自動化する場合、数多くのセンサや制御装置を集めた機器が人間に代わって作業するシステムが多かった。しかし、これからは人手作業を効率よく補助し、現場環境で柔軟に人間と協調して作業するシステムが重要であると考えている。

今後、数多くの現場に適用して、装置の改良・改善を行うとともに、本システムの開発理念である柔軟性のある効率的な搬送システムを構築して行く。

謝辞

本研究開発において早稲田大学理工学研究センター橋詰匠教授および三菱電機(株)鎌倉製作所大野明氏に協力を頂いたため、ここに感謝の意を表す。

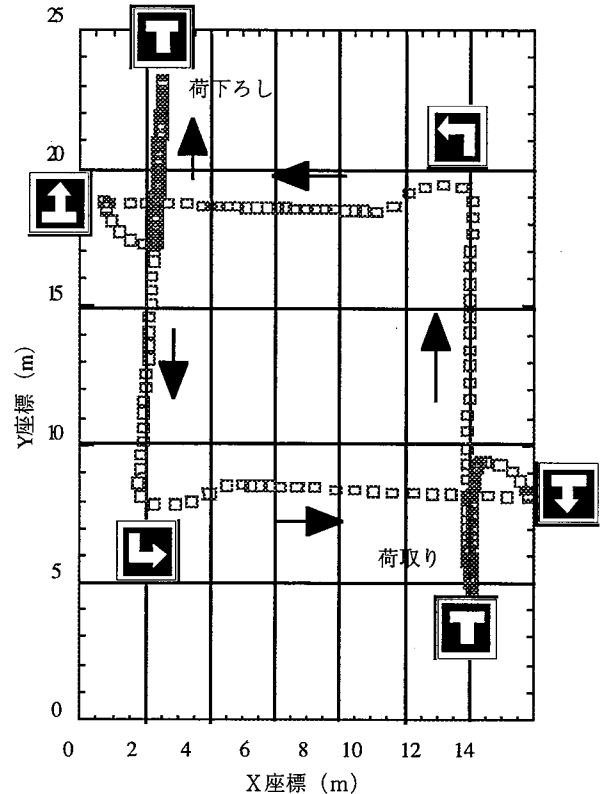


Fig.12 自律搬送経路
Autonomous Transportation Path

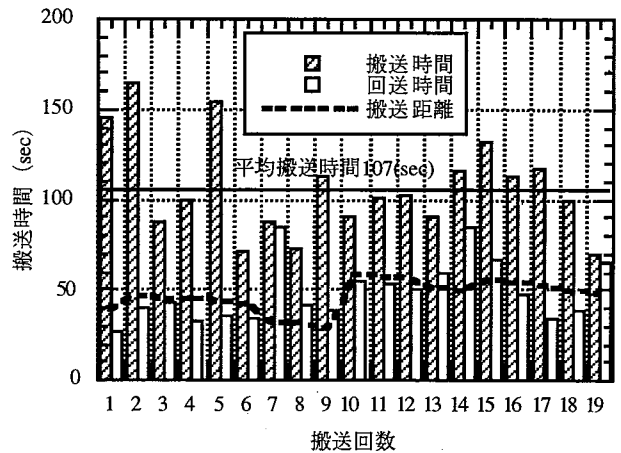


Fig.13 人手によるOA床搬送
OA Floor Transportation by Labour

参考文献

- 1) 浜田他：超高層建物における仕上資材自動搬送システムの開発，大林組技術研究所報，No.52，pp 113 ~ 120，(1996)
- 2) 吉野他：標識認識自律搬送システムの開発 その1~3，日本建築学会大会学術講演会梗概集，材料施工，pp 1007 ~ 1012，(1997)
- 3) 井上他：屋外環境下で用いる自律移動システムに関する研究 (第3報~第5報)，計測自動制御学会自動制御連合講演会前刷，pp 309 ~ 314，(1997)