

### 3. 追従型搬送台車機構の開発

池田 博康\*, 杉本 旭\*

### 3. Development of Chasing Carriage Vehicle

by Hiroyasu IKEDA\* and Noboru SUGIMOTO\*

**Abstract;** There are still lots of manual handling works in which aged workers are engaged. In these manual working conditions, aged workers often use carriage vehicles, such as hand trucks and hand carts, in order to support their physical strength.

These vehicles tend to be used by operators with less attention, but there are dangers of collisions between operators and vehicles with full loads because of poor visibility and a possibility of failure in operation. Especially, eyesight and physical abilities of aged workers are too weak to avoid collisions. On the other hand, aged workers are often exhausted mentally and physically because they must pay attention to the surroundings while steering and pushing the vehicles with their full strength.

To solve these problems, the authors proposed a powered carriage vehicle system which enables the vehicle to follow an aged worker as a guide automatically. The aims to develop this kind of vehicle are to release the aged worker from their exhaustion. A safety function such as an anti-collision is essential to the chasing carriage vehicle. A chasing control function is required to keep chasing the guide and not to stop unnecessarily.

In this chapter, a structural concept of the system to confirm safety was logically discussed. As the result, the chasing carriage vehicle guided by aged workers must have:

- 1) the safety confirmation method which stops the tracking operation in the event of coming up to the guide,
- 2) the safety function to keep an adequate distance between the guide and the vehicle.

In the distance confirmation method, reflecting type of infrared sensors were used to satisfy the above-mentioned requirement, that is, they can output a guide detecting signal which means the adequate distance, only when they normally work.

In order to achieve the chasing control of the vehicle, moving speed and steering should be controlled in real-time. Here defined six detectable areas by four infrared sensors for the chasing control, and the adequate distance between the guide and the vehicle was judged by these sensors only when the guide existed in any one of the six areas. These sensors were able to measure distance between the guide and the vehicle by use of a special cloth of the guide, and to produce the corresponding signal.

Furthermore, this chasing carriage vehicle can sound an alarm when turning right or left. This alarm system made improvement of operation efficiency because the alarm prompted the guide to walk constantly and smoothly.

Practical experiments proved that the chasing carriage vehicle was composed as the safety confirmation system with infrared sensors.

**Keywords;** Safety, Safety confirmation system, Guide method, Carriage vehicle, Infrared sensor

## 1. 緒 言

自動化できない作業場は、作業空間や通路が狭い場合や、多種類の単品や不定型物を扱う作業環境が多く、手作業や汚れ作業が依然として残っている。機械化が進む反面、このような残された作業に高齢者が従事している問題点がかねてから指摘されている<sup>1)</sup>。特に、棚卸し、整理や清掃等の単純作業には、手車や手押し車といった人力運搬車が高齢者にも多く利用されている。また、300kg程度までの重量物ならば、単独で人力運搬車による搬送が可能<sup>2)</sup>とされ、作業適用範囲は広い。

その融通性や機動性の点から安易に使用されがちな人力運搬車であるが、床の凸凹や傾斜、段差、あるいは障害物の存在等により運搬に支障を来しやすく、また、車上の荷物により前方視界の確保が損なわれやすいという問題点がある。さらに、一般に運搬作業は作業疲労の最大原因と指摘されており<sup>2),3)</sup>、実は高齢者にとってはかなり負担を強いられる作業である。特に、視力の低下や、運搬することのみに気を取られての注意力の散漫化、衝突の危険回避動作や操縦のための身体機能の低下等、高齢者が行う作業としては考慮すべき問題が多い。

そこで、本研究では、高齢者が衝突の危険感や作業負荷を感じることなく、荷を自在に搬送できる支援装置を開発することとした。支援装置の目的は、高齢者を肉体的・精神的作業負担から解放することであり、この狙いは、高齢者が多く従事している2000事業所へのアンケート調査結果<sup>1)</sup>が、重量物対策と視力対策を特に挙げていることにも合致する。

本研究では、高齢者が特別な誘導操作を要することなく、先行して運搬目的地まで歩くだけでそれに追従する移動機構を提案し、追従型搬送台車機構を試作した。また、安全な追従制御を維持するための条件を明らかにし、それを基に先行者と台車との間隔を検知する安全確認手段の特性実験を行った。その結果から、センサ出力を用いたこの台車の速度と操舵制御を検討し、追従動作を検証した。

## 2. 追従制御における安全確認システム

### 2.1 搬送台車による運搬作業の危険回避操作

搬送台車を用いる重量物の運搬作業では、衝突や挟まれ、あるいは衝突後の荷崩れにより、周囲の人間が被害を被る恐れがある。人力による運搬作業の場合、操縦者がこのような危険を察知して事前に回避しなければならない。しかし、Fig. 1(a)に示すように、嵩高の荷のために前方視界が得にくいことが多く、危険認知が遅れがちである。一方、重量荷物による慣性力の影響で人力による安定し

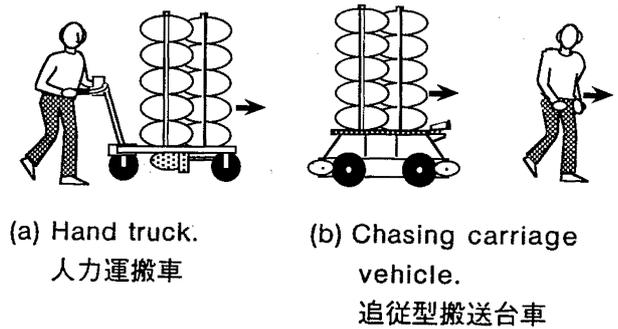


Fig. 1 Carrying works by using vehicles. 台車を利用する運搬作業

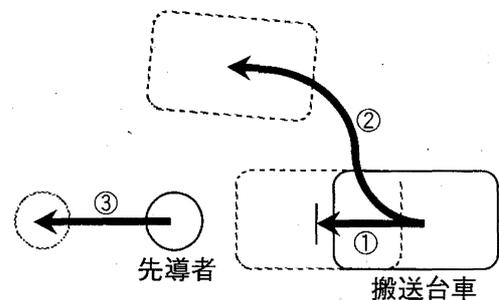


Fig. 2 Patterns of danger avoidance. 危険回避のパターン

た急停止は困難であるため、危急の危険回避操作は避けねばならないという矛盾が生じてくる。また、停止からの動き出しには大きな筋力を要するため、危険回避操作には運搬停止を避けるという目的も含まれている。

Fig. 1(b)は、本研究で提案する重量物運搬作業の形態であり、台車は先導する人間が常に搬送台車の前方中央に留まるように移動し、なおかつ人間と一定距離を保つように制御される追従動作を行う。先導者は運搬目的地へと前方を見ながら歩行するだけで搬送が完了するよう、簡易な動力搬送台車に運搬自体を任せて、先導者はこの台車の目の役割を担うという作業形態である。この場合、先導者は走行通路の整備、例えば障害物除去などを行うことにより、なるべく台車を停止させない効率のよい運搬作業も期待できる。

追従型搬送台車を利用する運搬作業においては、先導者との衝突回避のため、Fig. 2に示す3つの矢印方向への危険回避のパターンが考えられる。すなわち、

- ① 台車進行速度の減速（停止を含む）
- ② 台車進行方向の変更
- ③ 先導者の前方への回避（より早い歩行）

であるが、これらの危険回避の内、基本的に③は先導者の行為であり、台車は先導者へ接近を知らせることにより、先導者の回避行動を促進させることは可能である。

搬送台車における危険回避操作①、②では、②の進行方向の変更は先導者の追従動作から一時的に外れるため、追従型搬送台車には適用されない。すなわち、初期状態として先導者と搬送台車との間にある距離が確保されているとき、搬送台車が先導者と同速度で移動するように動作すれば、衝突せずに追従動作が実現する。このように、搬送台車の速度を調整して停止を避ける動作制御を追従制御<sup>4)</sup>と呼ぶ。また、ここでは搬送台車は後退動作を行わないものとする。したがって、先導者が進行してくる搬送台車方向へ向かう場合、台車は停止して衝突を回避しようとするが、それでもなお先導者からぶつかるような事故は想定していない。

ところで、事故防止を追従制御によって実現しようとする限り、この制御の失敗によりゆっくり歩いている人間に追突したり、歩行中に急停止した人間に搬送台車が追突したりすることが起こり得る。すなわち、誤差のない正確な追従動作にも限界があり、単に危険回避操作を実行するだけでは確率的に事故が生じると考えざるを得ない。

## 2.2 安全確認手段と安全停止

一方、速度0の状態が台車駆動用エネルギーの遮断で確保されていれば、明らかに衝突事故は生じない。すなわち、最も保守的で確実な危険回避は、遮断状態で搬送システムの運転停止（速度0）を生成することである。

そこで、単に追従操作を行うだけでなく、衝突する恐れがあるときは事前に搬送台車を停止させ、少なくとも事故だけは生じないようにする安全確保の方法を検討する。

ここで、時刻 $t$ における搬送台車と人間との距離 $x$ に対する判断を論理変数 $X(t) \in \{1, 0\}$ で表し、後述する安全距離 $x_s$ より大きいときを論理値1、これより小さいときを0で表すものとする。また、追従操作に基づく搬送台車の動作を論理変数 $M(t) \in \{1, 0\}$ で表すと、

$$\begin{aligned} X(t) = 1: & \text{時刻 } t \text{ に搬送台車と人間が十分離れて} \\ & \text{いる } (x > x_s), \\ = 0: & \text{時刻 } t \text{ に搬送台車と人間が離れて} \\ & \text{いない } (x \leq x_s), \\ M(t) = 1: & \text{時刻 } t \text{ に搬送台車が速度 } v (\neq 0) \text{ で追従} \\ & \text{している,} \\ = 0: & \text{時刻 } t \text{ に搬送台車が停止している} \\ & (v = 0), \end{aligned}$$

となる。衝突は、人間の存在する位置で搬送台車の運転

が実行されることだと言えるから、衝突が生じない条件は、あらゆる時刻 $t$ で次式が成立することから誘導される<sup>5)</sup>。

$$\forall t : \overline{X}(t) \cdot M(t) = 0 \quad (1)$$

ここに、記号 $\cdot$ は論理積を、記号 $\overline{\phantom{x}}$ は論理否定を意味する。

搬送台車は後退動作をしないので、衝突以前に搬送台車の停止を実現するためには、少なくとも停止に要する時間より前に危険の判断（停止の判断）を行わなければならない。実際には、この停止時間は制動距離として確保される。すなわち、前述の安全距離 $x_s$ は、搬送台車の速度 $v$ に対応した制動距離に相当する。

式(1)から、両者が衝突しないための条件の実現には、次の2つの方法が考えられる。すなわち、

方法1:  $\overline{X}(t) = 1$  のとき、 $M(t) = 0$  とする。

方法2:  $X(t) = 1$  のとき、 $M(t) = 1$  とする。

方法1は、危険 $\overline{X}(t)$ を検出して停止する方法であるが、この場合、仮にセンサが故障し、人間との接近を検知できないときには、先の危険回避制御の場合と同様、故障による誤りで衝突が起こる恐れがある。この方法1は、危険検出型としてその利用に明らかに限界があることが既に証明されている<sup>6)</sup>。

これに対し、方法2は、人間と搬送台車との距離を検出し、互いに十分離れているという判断結果に基づいて追従操作( $M(t) = 1$ )を許可するものである。この方法2では、センサや判断機器などが故障したとき、それが衝突の恐れのない場合であっても、搬送台車が駆動用エネルギーの遮断をもって強制的に停止させられる。すなわち、通常的安全状態において式(1)を満たすばかりでなく、故障で機能を失った状態でも、少なくとも式(1)だけは保持される特性を持つ。これは安全確認型と呼ばれ、フェールセーフな特性で実現可能であることを既に報告している<sup>5)</sup>。

方法2によって、搬送台車の機能が正常であることを確認しながら台車の動作 $M(t)$ が実行される関係は次式で表される。

$$M(t) = X(t) \cdot I_M^* \cdot G_M^* \cdot M'(t) \quad (2)$$

ここで、 $M'(t) \in \{1, 0\}$ は追従操作の命令を示す論理変数、また、 $I_M^* \in \{1, 0\}$ 及び $G_M^* \in \{1, 0\}$ は、それぞれ距離のセンサ、判断要素の動作状態を示す論理変数で、正常のときを論理値1、故障のときを0で表す。この式(2)の構成をFig. 3に示す。これは、安全確認型のインタ

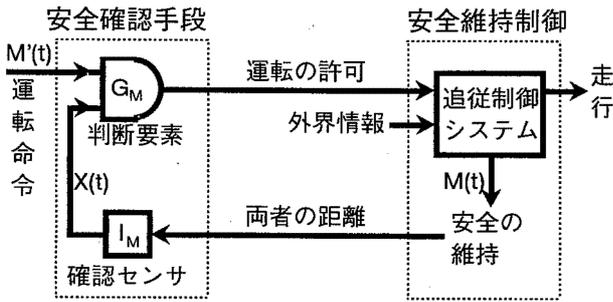


Fig. 3 Interlock of safety confirmation system for the chasing control.  
追従制御のための安全確認型インタロック

ロックと呼ばれ、人間と共存できる機械システムの基本的構成要件である。本研究では、このインタロックを追従型搬送台車に適用した。

なお、以下においては、駆動用エネルギーの遮断によって運転を停止することを安全停止と呼び、制御中の一時停止と区別する。

ここで、時刻  $t$  における駆動用エネルギーの有無（すなわち、安全停止の発動）を論理変数  $M_E(t) \in \{1, 0\}$  で表し、供給状態を論理値 1、遮断状態を 0 とすると、故障時および危険発生時に安全停止するという関係は次式で表される。

$$M_E(t) = X(t) \cdot I_M^* \cdot G_M^* \quad (3)$$

この関係を用いれば、式 (2) は追従操作の許可を  $M_E(t)$  とするインタロックの表現で書き換えられ、次式となる。

$$M(t) = M_E(t) \cdot M'(t) \quad (4)$$

式 (4) は、安全確認の結果としての追従動作の許可が、駆動用エネルギーの投入として実現されていることを示している。

### 2.3 安全確認と安全維持操作

式 (2) による安全確認型インタロックを構成することにより、追従動作  $M(t)$  は常に式 (1) を満たし、衝突の回避が確定的に保証される。しかし、この保証は、安全停止による安全の確保を含んでおり、システムの運転を中断することで実現されるものである。したがって、搬送台車の機能を維持するためには、安全停止を可能なかぎり回避するための操作が望ましい。Fig. 2 の危険回避操作を行うだけでは、いずれ速度制御の誤差が積分され、互いに接近する場合が起こり得る。そのため、衝突の直前までに  $x > 0$  とする操作が別途必要であることは述べ

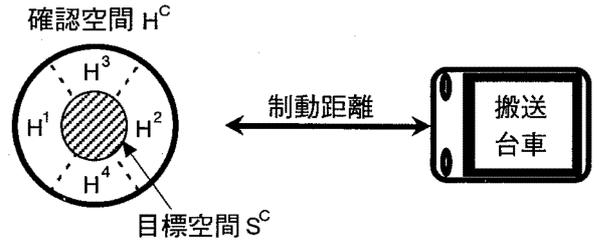


Fig. 4 Configuration of the confirmation area  $H^C$ .  
確認空間  $H^C$  の配置

た。一方、安全確認型インタロックが構成される場合に、両者間の距離が限界  $x_s$  より接近すると ( $X(t) = 0$ ) 駆動用エネルギーが遮断され、安全停止が実行されるだけである。すなわち、Fig. 2 の危険回避パターンは安全停止として処理され、現実には実行されない。

そこで、式 (2) の操作  $M'(t)$  によって、できるかぎり  $X(t) = 1$  を維持することを考える。すなわち、これまで操作  $M'(t)$  で行われていた危険回避制御（すなわち  $x = 0$  に対する回避操作）を、改めて  $X(t) = 0$  を回避するための操作（即ち  $x - x_s = 0$  とならないための回避操作）とする。この操作を、ここでは安全維持操作と呼ぶことにする。

Fig. 2 に示した危険回避のパターンを改めて安全維持操作によって実行されるものとする。先導者周辺に安全停止に必要な制動距離、すなわち制動空間 (H とおく) を設定し、この空間内に進入することが  $X(t) = 0$  を意味するものとする。つまり、安全維持操作では、空間 H への進入を回避することになり、

- 1) 空間 H の手前で減速（一時停止を含む）すること、
  - 2) 進行方向を変更すること、
  - 3) 空間 H を遠方に移動させること、
- を行う。

危険回避操作が失敗すれば、安全停止による安全の保証が得られない。これに対し、許可された駆動用エネルギー  $M_E(t)$  を利用して判断される安全条件を満たすように安全維持操作されるので、仮に失敗した場合でも安全停止による安全が保証される。

以上のように、Fig. 3 に示す安全確認型インタロックは、制御の失敗を許容できる反面、停止によりシステムの稼働率を低下させる恐れを持つ。そのため、安全停止を回避する安全維持操作が不可欠となり、この機能を持つことにより初めて現実的な安全確認システムとして構築される。

### 3. 安全確認システムとしての追従型搬送システム

#### 3.1 確認空間による安全確認

追従型搬送台車では、作業目的である追従操作そのものが安全維持操作である。故に、安全停止を効率よく回避することが、機能向上に直結するという特徴を持つ。

一方、搬送台車の安全確保のためには、Fig. 4に示すように移動体の前方で、明らかに離れた位置（すなわち  $X(t) = 1$ ）に確認空間  $H^C$  を設け、この確認空間に人間がいることをフェールセーフなセンサで検出して運転を許可することになる。

ここで、時刻  $t$  において、確認空間  $H^C$  での人間の存在を論理変数  $H_C(t)$  で表し、

$$\begin{aligned} H_C(t) = 1: & \text{時刻 } t \text{ に、確認空間 } H^C \text{ に人間が存在する,} \\ & = 0: \text{時刻 } t \text{ に、確認空間 } H^C \text{ に人間が存在しない,} \end{aligned}$$

とする。確認空間  $H^C$  は  $X(t) = 1$  となる空間に含まれるから、 $H_C(t)$  と  $X(t)$  の関係は次式で示される。

$$X(t) \geq H_C(t) \quad (5)$$

式 (5) で、不等号  $\geq$  は、たとえ人間が十分に離れた空間に存在しても ( $X(t) = 1$ )、それを確認するには、人間が確認空間  $H^C$  に存在し、かつ、検出センサが正常でなければならないことを表す。

よって、実際に行なわれる搬送台車の安全維持操作は、できる限り  $H_C(t) = 1$  を維持するための操作となる。これは、速度制御によって生ずる位置の累積誤差を逐次修正することを意味し、速度制御の信頼性を向上させ、安全停止の頻度を著しく減少させる目的で行う。

#### 3.2 安全維持操作

$H_C(t) = 1$  を継続する安全維持操作では、人間が確認空間  $H^C$  より離れた後に、 $H_C(t) = 1$  を回復することは目的としていない。そこで本研究では、確認空間  $H^C$  をいくつかのブロックに分割し、 $H_C(t) = 0$  の予測空間を定めて、現実には  $H_C(t) = 0$  とならないための操作を行うようにした。

例えば、確認空間  $H^C$  を Fig. 4 に示すように5つの空間に分割し、中央の空間を安全空間  $S^C$ 、 $H^1 \sim H^4$  を安全停止予測空間とする。このとき、中央の安全空間  $S^C$  に人間を留まらせることを目標として、 $H^1$  または  $H^2$  に人間がいるときは対応した加減速操作を、また、 $H^3$  または  $H^4$  に人間がいるときは操舵操作を実行する。前述のよう

に、これは追従操作そのものであり、また、分割をさらに細かくすれば、最終的にはアナログ的なスムーズな追従動作が期待できる。

一方、作業中の先導者は、前方に注意を集中しているため搬送台車との位置関係を把握しにくい。たとえ搬送台車側で衝突が起こらないよう保証されていても、先導者の気まぐれな歩行により、不必要な加減速や蛇行をしては台車上の積み荷にも影響を与えかねない。そこで、例えば、前述の  $H^1 \sim H^4$  に応じた警報を先導者に与えることにより搬送台車の右左折や接近を認識することができれば、人間の側からも安全維持に協力できることになる。すなわち、先導者に負担とならない程度に意識的な歩行を促すことが、追従型搬送台車の運用に有効と考えられる。

ところで、一般の無人搬送車 (AGV) は、追従すべき対象が既設のテープやワイヤであるため、人間との衝突事故の防止対策は明らかに異なる。この場合は、搬送車前方の確認空間内に障害物 (人間) が存在しないことが安全確認であるから、論理変数  $H_C(t)$  の論理が逆になり、特別な構造のセンサが準備されねばならない<sup>7),8)</sup>。

### 4. 反射型光線センサを用いた搬送台車の安全確認

#### 4.1 反射型赤外線センサを用いた人間との距離の検出法

一般に、無人搬送車の対人検出用非接触センサとしては、反射型赤外線センサやレーダ型超音波センサが利用されている<sup>9)</sup>。これらのセンサは人体の検出を主眼としており、正確な距離の測定用としては用いられていない。

一方、近年移動型ロボットの研究分野でも、人体 (対象物) との距離計測が不可欠なため、超音波センサ<sup>10)</sup>、CCD カメラ<sup>11),12)</sup>、レーザーレンジファインダ<sup>13)</sup> や光通信<sup>14)</sup> が検討されている。しかし、これらのセンサは構成が複雑で高価であり、また、振動等の外乱に影響されやすい。

そこで本研究では、安価で振動の影響を受けにくく、無人搬送車用に実績のある拡散反射型赤外線センサを利用して簡易な距離計測を試み、追従型搬送台車の距離確認手段としての評価を行うものとした。

使用した赤外線センサはサンクス製の PX1-DM3 であり、これは無人搬送車等の衝突防止用センサとして利用されているものである。このセンサは、検出範囲の幅や角度を予め設定でき、また、検出距離は感度調整で可変であり、2段階の検知しきい値を設定できるものである。

Fig. 5 は、白色の衣服を着た人間を検知対象とし、センサ側の感度を最高に、検知幅を最大にした場合の人体

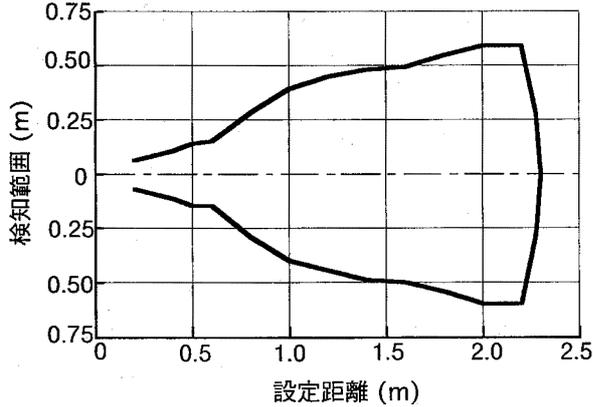


Fig. 5 Detection characteristics of human body wearing white cloths by reflecting infrared sensor.  
反射型赤外線センサによる白色衣類を着た人体の検知特性

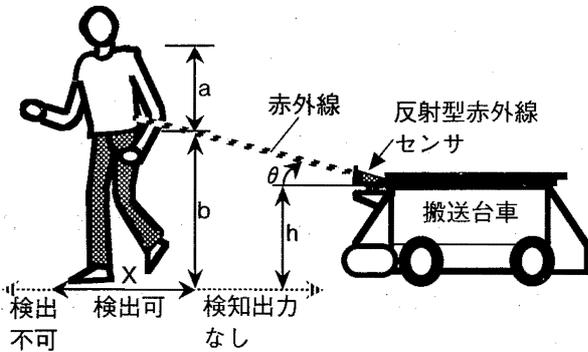


Fig. 6 Distance measurement by using infrared sensor.  
赤外線センサを用いる距離測定

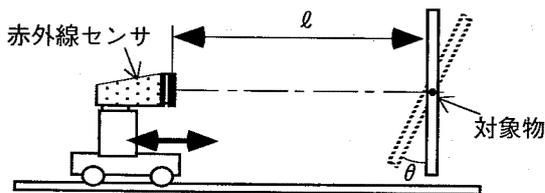


Fig. 7 Experiment method for target detection by infrared sensor.  
赤外線センサによる対象物検知実験法

検知特性である。この検知曲線で囲まれた領域が、センサが人間を検知できる領域であり、このセンサの検知最大能力を示していると言える。なお、この検知領域は、検知幅を約 0.25m に絞って設定でき、また、垂直方向に最大 0.25m の幅を持つ<sup>15)</sup>。したがって、このセンサの指向性を高くして複数個用いれば、人体の方向判別等の機能的情報が得られる。

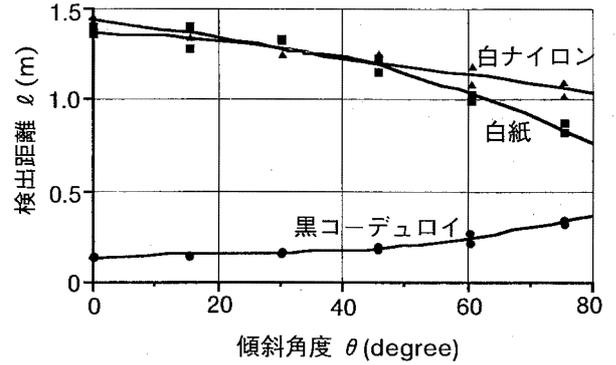


Fig. 8 Comparison of detection characteristics of infrared sensor by targets' surfaces.  
対象物表面の違いによる赤外線センサの検知特性の比較

しかし、単に人体からの反射光により存在を検知するだけでは、 $H_C(t)$  の判断となる距離情報は得ることができない。そこで、Fig. 6 に示すように、先導者に赤外線反射率の高い上着と反射率の著しく低いズボンを着用させ、これを地面に対し一定の角度をもって取り付けられた赤外線センサにより検出することで、人間と搬送台車との距離を判別する手法を試みた。

Fig. 6 において、先導者の身長のうち、上着部分の高さを  $a$ 、ズボン部分の高さを  $b$  とし、地面に対する赤外線センサ取り付け角度を  $\theta$ 、取り付け高さを  $h$  とする。このとき、赤外線センサが  $a$  の部分にのみ反応するようになれば、赤外線センサが人間を検出すべき範囲  $x$  は、搬送台車を原点として次式で表される。

$$\frac{b-h}{\tan \theta} \leq x \leq \frac{a+b-h}{\tan \theta} \quad (6)$$

式 (6) の  $x$  の最大値は、実際にはセンサの検出能力の限界により決まるので、赤外線センサの検出可能な距離を  $l$  とすれば、式 (6) は次式となる。

$$\frac{b-h}{\tan \theta} \leq x \leq l \cdot \cos \theta \quad (7)$$

式 (7) により、検出範囲  $x$  が確認空間  $H^C$  と等しくなるように、各定数を決定すればよい。

本手法は、先導者が確認空間に存在しない場合と、赤外線センサに故障が生じた場合の検知出力が一致するため、本質的にフェールセーフ化が可能なるものである。

#### 4.2 赤外線センサの検出特性の実験と評価

本研究では、一般的な衣服のうち、赤外線反射率の著しく異なる組み合わせとして、白色ナイロン製の上着と黒色コーデュロイ製のズボンを用いて実験した。

実験は、Fig. 7 に示すように、レール上の赤外線センサをレール端に設置した対象物（高さ 0.6m、横幅 0.45m

の平板に衣服の生地を張り付けたもの) に遠方から徐々に近づけ、センサ出力が ON となる距離  $l$  を測定するものである。赤外線センサの対象物検出能力は、対象物の色や材質と並んで、検出の際の傾斜角によって大きく変化することが報告されている<sup>9)</sup>ので、本実験では、センサ中心と同じ高さに対象物の回転軸を設け、Fig. 7 に示す傾斜角度  $\theta$  の影響についても測定した。

白色ナイロン生地と黒色コーデュロイ生地、及び、白色紙に対する検出距離  $l$  と傾斜角度  $\theta$  の関係を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より、黒色コーデュロイに対する検出距離  $l$  が白色ナイロンの場合に比べ、約 10~30% に著しく減少するのが分かる。これは、黒という色による赤外線吸収率の増大と生地表面の粗さ（いわゆる毛羽立ち）による乱反射の効果が顕著に現れた結果といえる。

また、傾斜角度について、白色ナイロンと白色紙の場合では角度  $\theta$  の増大に伴って距離  $l$  が減少する傾向が見られたが、黒色コーデュロイではむしろ距離が増大することが分かった。これは、前述のコーデュロイ生地表面の乱反射の影響によるものと考えられる。

以上の結果より、傾斜角度が小さい場合、検出感度の損失は少なく、また、白ナイロンと黒コーデュロイの検出感度の差が大きくとれることが分かった。これらの結果から、先導者の上着に白色ナイロン、ズボンに黒色コーデュロイを用いることが適切であることが確認された。

### 4.3 搬送台車の確認空間の検証

次に、この赤外線センサを市販の無人搬送車に実装し、その有効性を検証してみた。

使用した搬送車は、トヨタ自動車製無人搬送車 ACB1 であり、本来前面パネルに取り付けられていた衝突防止用センサの代わりに、Photo 1 に示すように拡散反射型赤外線センサを 4 個配置した。そして、各々の検出幅を狭く設定しておき、中央の 2 個のセンサが先導者の直進状態を検出し、両端の 2 個のセンサが右左折方向を検出するものとした。

Fig. 9 は搬送台車の外観を示している。赤外線センサは荷台に干渉しないように離して設置してあり、各々取り付け角  $\theta$  を  $15^\circ$ 、取り付け高さ（中心）を 0.5m と設定し、放射される赤外線が平行となるようにした。

搬送台車の確認空間の検証は、中央の 2 個の赤外線センサが先導者を検知する空間を生成できるか否かを調べればよい。そこで、身長 1.78m、肩幅 0.5m の男性を先導者として設定し、前述の白色ナイロン上着と黒色コーデュロイズボンを着用した状態で実験を行った。ここで、Fig. 6 における各部の寸法は、ズボン部の長さ  $b$  が地上より 0.78m、上着部の長さ  $a$  が 0.81m、また、上着部の最大

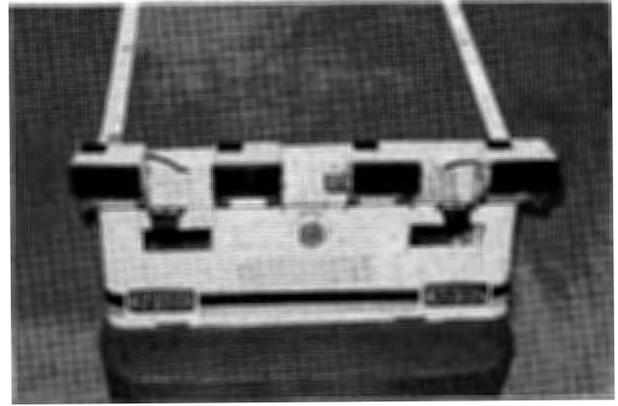


Photo 1 Setup of four infrared sensors.  
4つの赤外線センサの配置状況

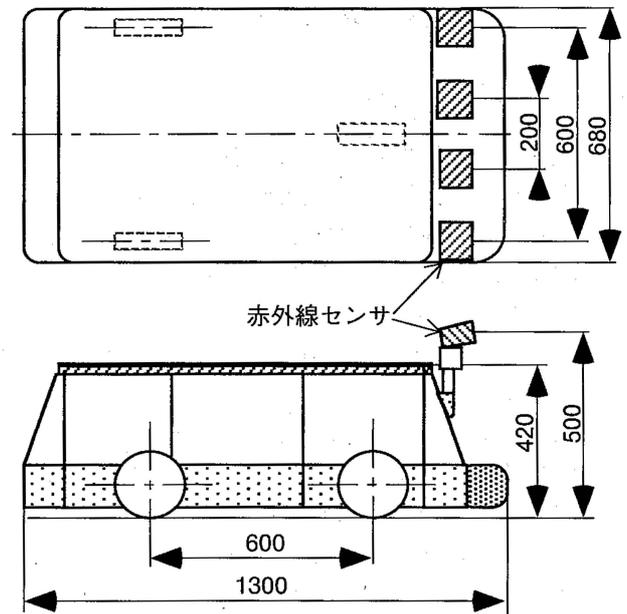


Fig. 9 Outlines of chasing carriage vehicle with four infrared sensors.  
4個の赤外線センサを搭載した追従型搬送台車の概要

幅が 0.79m である。なお、頭部は何も被らず、ズボン部と同様に毛髪による黒色の反射光を期待した。実際の測定は、搬送台車を固定して、上述の先導者が、前方を向いたまま搬送台車前方を隈無く歩きながら、赤外線センサの出力を監視することにした。

その結果、中央の 2 個の赤外線センサが白色上着により先導者を検出した範囲は、センサの検知感度が Fig. 8 と同じ場合、先導者の背が搬送台車前方 1.05~1.25m、中心から  $\pm 0.34m$  の空間であった。また、黒色ズボンを検出した範囲は前方 0~0.18m となり、これらの数値は Fig. 8 の検知特性とほぼ同じであった。実際には、若干感度が低めであるが、これは人体の曲面の影響や、背が垂直に対向していないためと思われる。

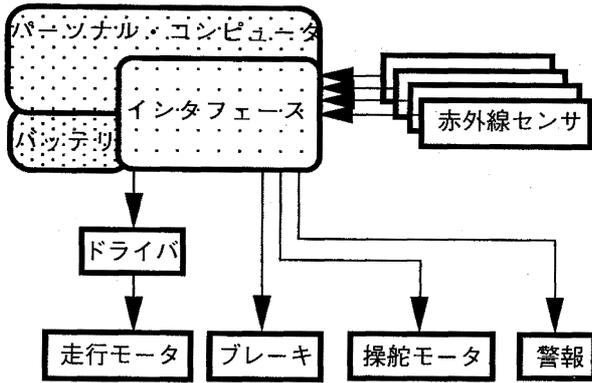


Fig. 10 Schematic diagram of the chasing control system.  
追従制御システムの概略

### 5. 搬送台車の走行・操舵制御

#### 5.1 追従制御システムの構成

追従制御の実験には、前述の4個の赤外線センサを取り付けた無人搬送台車 (Fig. 9) を利用した。この搬送台車は、積載荷重 150kg, 走行速度最高 60m/min の仕様を持つ3輪動力台車であり、24V バッテリーにより駆動されるものである。走行駆動系は、走行用と操舵用に DC サーボモータを搭載し、負作動型電磁ブレーキを備えている。

今回は、この走行駆動系のみを利用して、追従制御を行うための制御システムを新たに組み込んだ。その概略の構成を Fig. 10 に示す。4個の赤外線センサの検知出力は、インタフェースボードを介してコンピュータ (NECPC-9801NS/L) に取り込まれ、追従のための処理が行われる。コンピュータは、走行モータの速度指令、電磁ブレーキの ON/OFF, 操舵モータの正逆転と警報をこのボードを介して出力し、自律的に搬送台車が駆動されるものである。また、速度調節を行うため、走行モータには PWM 制御方式の速度ドライバも搭載した。なお、これらの全ては、台車内蔵のバッテリーから電力が供給される。

実際の追従制御は、先導者への追従性を向上させるため、速度制御と操舵制御の2つの機能を実現している。すなわち、先導者の歩行速度とその方向に忠実に従わせる機能である。そのため、Fig. 11 に示すように搬送台車の走行状態を定義して、6つの空間からの位置情報を抽出するものとした。それに応じて、4個の赤外線センサには各々検知しきい値を2つ設定し、Fig. 11 の高速範囲と低速範囲を区別できるようにした。なお、前述したように、中央の2個の赤外線センサは直進方向のみを検知する。

結局、4個の赤外線センサから6種の検知信号が得ら

れ、コンピュータは各々の信号入力に対して、Fig. 11 の範囲の定義に基づき予め設定された出力を行う。例えば、センサ入力範囲「1」に対応していれば、コンピュータは走行モータドライバへ高速指令を、電磁ブレーキは励磁するよう解放指令を、操舵モータへは中立指令を、警報は OFF を出力する。また、範囲「5」の場合は、走行モータドライバへ低速指令を、電磁ブレーキは励磁するよう解放指令を、操舵モータへは正転 (右回転) 指令を出力し、同時に警報を鳴らす。後者の場合には、操舵モータは一定時間正転駆動後は中立に戻すようにしてある。警報は前方を向いている先導者に搬送台車の右左折を知らせるためのものであり、先導者に進路変更を喚起する。

なお、赤外線センサの検知入力がいずれもないときは、先導者と搬送台車が離れすぎたか近すぎた場合、左右に外れた場合、あるいはセンサ故障とみなして、搬送台車はモータ電源を遮断して停止する。再起動には電磁ブレーキを解放する手順が必要となる。再起動が容易な一時停止モードを設けなかったのは、台車制動時に近づきすぎて、赤外線センサが黒色ズボンを検出して、誤って起動がかかることを避けるためである。

#### 5.2 追従制御の実験結果

Fig. 11 において確認空間が拡大されたため、各々の赤外線センサの感度を上げ、さらに、検知しきい値を以下の通りに設定した。

- 高速上限 : 1.8~1.9m
- 高速・低速境界 : 1.35~1.45m
- 低速下限 : 約 1.2m

また、走行モータのドライバは高速 (約 27m/min) と低速 (約 16m/min) の2段階に予め速度設定しておき、コンピュータ指令により切り替えるようにした。

実際に追従動作を行った状況を Photo 2 に示す。これは、先導者がほぼ一定速度で蛇行しながら歩行する後を搬送台車が追従している様子を、2秒毎に記録したものである。なお、搬送台車の荷台上のコンピュータは調

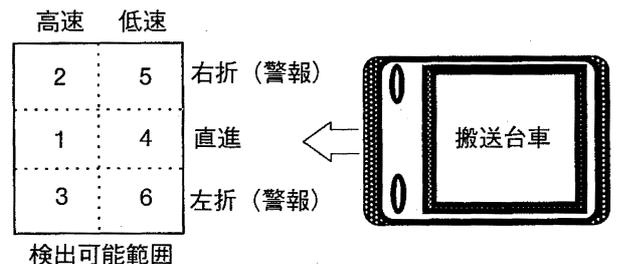


Fig. 11 Definition of detectable areas for chasing control.  
追従制御のための検知可能空間の定義

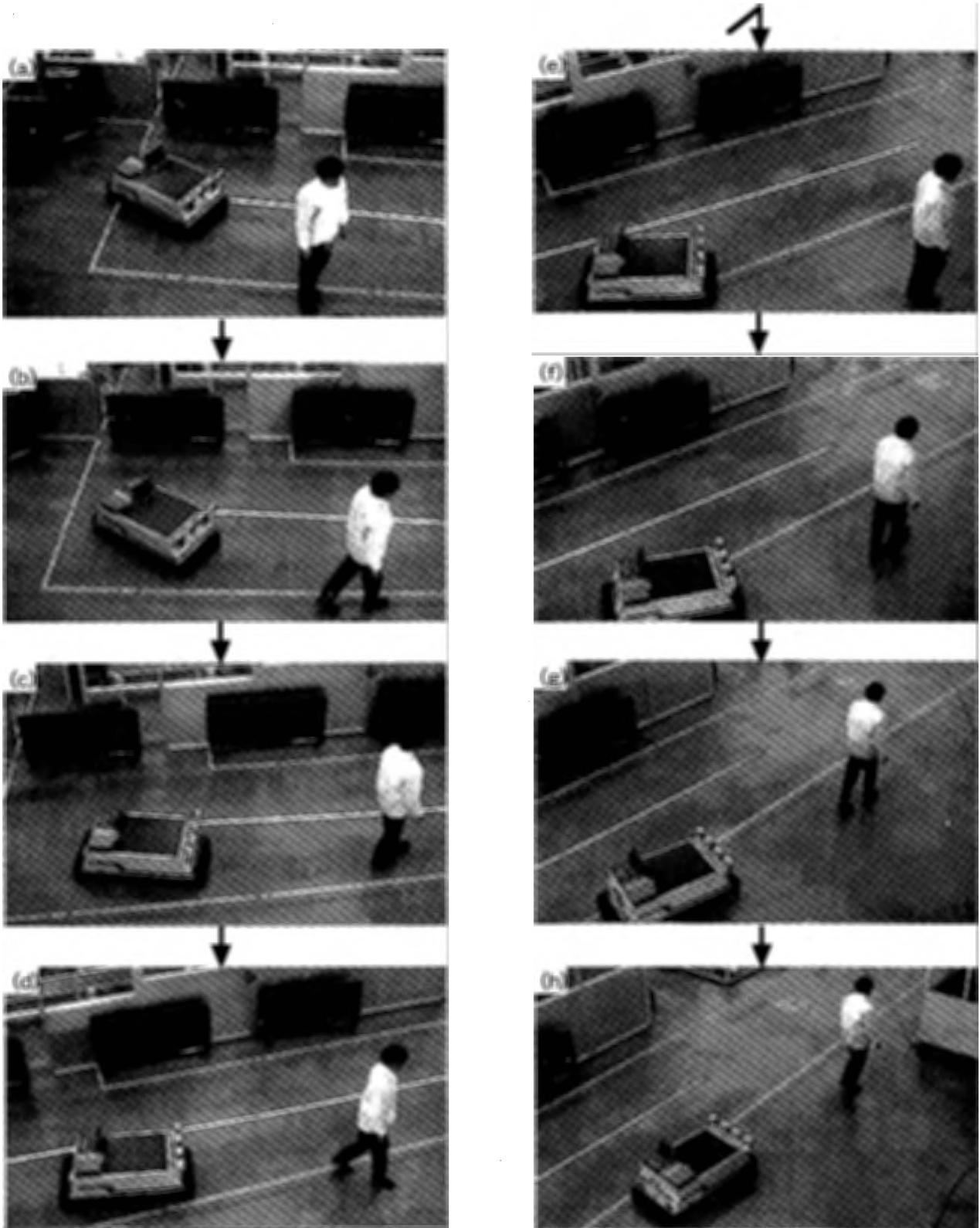


Photo 2 Chasing sequence of carriage vehicle.  
搬送台車の追従状況



Photo 3 Chasing carriage vehicle guided by an aged worker.

#### 高齢者に追従する搬送台車

整用である。Photo 2 の (a)～(h) を解析すると、搬送台車が進行方向を微妙に変えながら、ほぼ一定の距離を保って追従していることが分かる。

また、先導者が故意に歩行速度を変化させた場合には、搬送台車は低速・高速を切り替えて追従しようとするが、バッテリー駆動のモータのため急加速は難しい反面、電磁ブレーキのため滑らかな減速が難しい。それゆえ、ぎくしゃくとした走行になりがちであった。その点では、本報の提案は極めて簡易な制御システムであるから、先導者側が台車を停止させないようにうまく誘導する歩き方が望まれる。

このように先導者が台車の搬送に協力すべきところはあるものの、追従型搬送台車は従来の精神的、肉体的負担のある運搬作業から作業者を解放することが可能となる。特に、Photo 3 に示すように、高齢者でも追従型搬送台車を利用して容易に運搬作業をこなすことができる。

今後、赤外線センサからの検知情報をさらに増やして、Fig. 11 の検知可能範囲を細分化できれば、よりきめ細かな追従動作や一時停止が実現できると予想される。安全な停止が確保されているという前提で、赤外線センサの高信頼化等により、さらに高度な安全維持制御が導入できるであろう。

## 6. 結 言

本研究では、高齢者が重量物を自在に運搬できる支援装置として、高齢者に追従する搬送台車機構を提案した。これは、重量物運搬作業で従来強いられていた肉体的作業疲労からだけでなく、視力や身体敏捷性といった身体機能の加齢による衰えからも高齢者を解放する。

この追従動作の実現のため、本研究では、先行する高齢者と搬送台車との安全間隔を検知する赤外線センサの

機能を論じ、特性を評価した。さらに、このセンサ出力信号を利用した搬送台車の追従制御システムを開発し、安全間隔が維持できない場合は走行停止を保証する追従走行を達成した。

本開発研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 搬送台車の追従走行の安全条件は、先導者と搬送台車間に設定される安全間隔の維持による。それが維持されない場合には走行停止させる安全確認手段が必要となる。
- 2) 間隔検知のための安全確認手段は、間隔検知信号を正常時のみ出力し、間隔が遠すぎ、あるいは近すぎる場合と故障時には出力しない反射型非接触距離センサが適用できる。
- 3) 台車の走行速度と操舵を制御して、先導者への追従性を向上させるため、安全間隔を6個の空間で定義した。そして、特定の服を着た先導者の背を複数の反射型赤外線センサで検知することにより、速度・操舵制御のための位置情報を得て、追従の信頼性を高めることができた。
- 4) 台車の右左折時に警報を鳴らすことにより、追従走行を維持するような歩行を先行する高齢者に促し、稼働率の向上が期待できる。

今回開発した追従型搬送台車機構は、先導者と第三者あるいは明るい色の壁との区別が困難であるなど、実用化のためには解決すべき点が残されているが、高齢者に負担をかけない作業支援システムとして有効と考えられる。今後、高齢者を作業から疎外させずに安全制御を適用できるこのようなシステムの実現が期待される。

## 参 考 文 献

- 1) 平成6年度産業機械産業における先端技術の導入に関する調査研究報告書、日本機械工業連合会、pp.8-39 (1995).
- 2) 遠藤、運搬管理、共立出版、pp.313-315 (1972).
- 3) 荷役研究所編、運搬ハンドブック、信行社、pp.30-36 (1965).
- 4) 杉本・池田他、安全の予測階層システムのロボットへの適用、第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.1109-1112 (1992).
- 5) 杉本・蓬原・向殿、安全作業システムの原理とその論理的構造、電気学会論文集 D, 107-9, pp.1092-1098 (1987).
- 6) 杉本・糸川他、安全確認形安全の基本構造、日本機械学会論文集 C, 54-505, pp.2284-2292 (1988).
- 7) 蓬原・向殿、超音波パルスレーダによるフェールセーフな障害物検出、電気学会論文集 D, 110-3, pp.218-226 (1990).
- 8) 糸川・杉本他、高齢者向け ME 機器の開発・改善に関する特別研究、産業安全研究所特別研究報告、RIIS-SRR-90,

- pp.27-33 (1990).
- 9) 糸川・杉本他, 機械の安全化のための計測技術に関する特別研究, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-SRR-86-1, pp.41-47 (1986).
  - 10) 接触型バックホウ (ヘルメットセンサ対応) の開発, 平成2年度建技評第91201号 (1990).
  - 11) V. Graefe, An Approach to Obstacle Recognition for Autonomous Mobile Robots, Proceeding of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.151-158 (1990).
  - 12) 藤原, 画像情報を利用した無人車の自動追尾の一方法, ロボティクス・メカトロニクス講演会'90 講演論文集 A, 900-30, pp.41-44 (1990).
  - 13) 小森谷・谷, テッドレコニングとランドマーク認識によるロボットの移動制御, 日本ロボット学会第8回学術講演会予稿集, pp.953-954 (1987).
  - 14) 鈴木・山田他, 自走式小型ロボット位置計測制御システムの研究, 精密工学会誌, 60-9, pp.1365-1369 (1994).
  - 15) SUNX センサカタログ, p.388 (1987).
  - 16) 斉藤・杉本, 追従型搬送台車の安全確認システム, 第4回交通・物流部門大会講演論文集, No.95-36, pp.440-443 (1995).
  - 17) 研究用無人搬送車 (ACB1) 完成図書, トヨタ自動車 (1993).

(平成8年3月15日受理)