

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「画像処理と 3 次元モデルを組み合わせたガイドレス
ロケーションシステムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 5 月

委託者 中国経済産業局

委託先 財団法人岡山県産業振興財団

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - 1-1-1 研究背景
 - 1-1-2 研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
 - 1-2-1 研究組織（全体）
 - 1-2-2 管理体制
 - 1-2-3 管理員及び研究員
 - 1-2-4 他からの研究協力者（アドバイザー）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 推定精度の向上および処理時間の短縮化手法の開発
 - 2-1-1 画像処理と3次元モデルを組み合わせたロケーションシステムの開発
 - ① テスト用3次元モデルの作成
 - ② 複数台カメラによるロケーションシステムの開発
 - 2-1-2 画像処理と3次元モデルを組み合わせたロケーションシステムの処理時間の短縮
- 2-2 移動ロボットシステムの構築および実証実験
 - 2-2-1 移動ロボットシステムの構築
 - ① 移動ロボットのハードウェア部分の設計・製作
 - ② 走行制御用プログラムの開発
 - 2-2-2 物流倉庫を模擬した環境下での実証実験
 - ① ガイドレス用物流倉庫管理システムの開発
 - ② 物流倉庫を模擬した環境下での実験

第3章 総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究背景

物流倉庫においては、効率化、省人力化のために物品の運搬には無人搬送車が用いられている。これらの無人搬送車のロケーションシステムには、一般的に電磁誘導や磁気誘導が採用されている。これらの方式では無人搬送車の移動経路に沿って誘導線（ガイドライン）を床面に埋設する必要がある。そのため、無人搬送車の移動経路を変更することが難しく、物流倉庫内のレイアウト変更を困難にしている。また、ガイドラインを埋設させることにより、無人搬送車の導入コストを大幅に高めている。そのため、ガイドラインを必要としないロケーションシステム（ガイドレスロケーションシステム）の実用化が求められている。

一方冷凍倉庫では、作業者の健康上の制約から有人フォークリフトによる連続の作業が行えず、非効率的となっている。そのため、無人化による作業効率の向上や労働条件の改善が望まれている。しかしながら、冷凍倉庫では、収納効率を向上させるために、荷物の形状に合わせて倉庫のレイアウト変更を度々行う必要があり、従来の無人フォークリフトはほとんど普及していない。

ガイドラインなどの環境に設置する必要のある設備を用いないロケーションシステムとして、GPSを用いるものが開発されている。GPSは屋外での使用には有効であるが、屋内での使用は電波が遮断されるため不向きである。また、屋内で使用されるロケーションシステムとしては測域センサと地図情報を組み合わせたシステムが開発されている。これらのシステムでは、周囲の壁までの距離を測定し、それを地図情報と比較することで自己位置の推定を行っている。そのため、物流倉庫のように、ラックのような柱状の構造物が多く設置され、周囲に壁が少ない環境においては、自己位置の推定が困難となる。

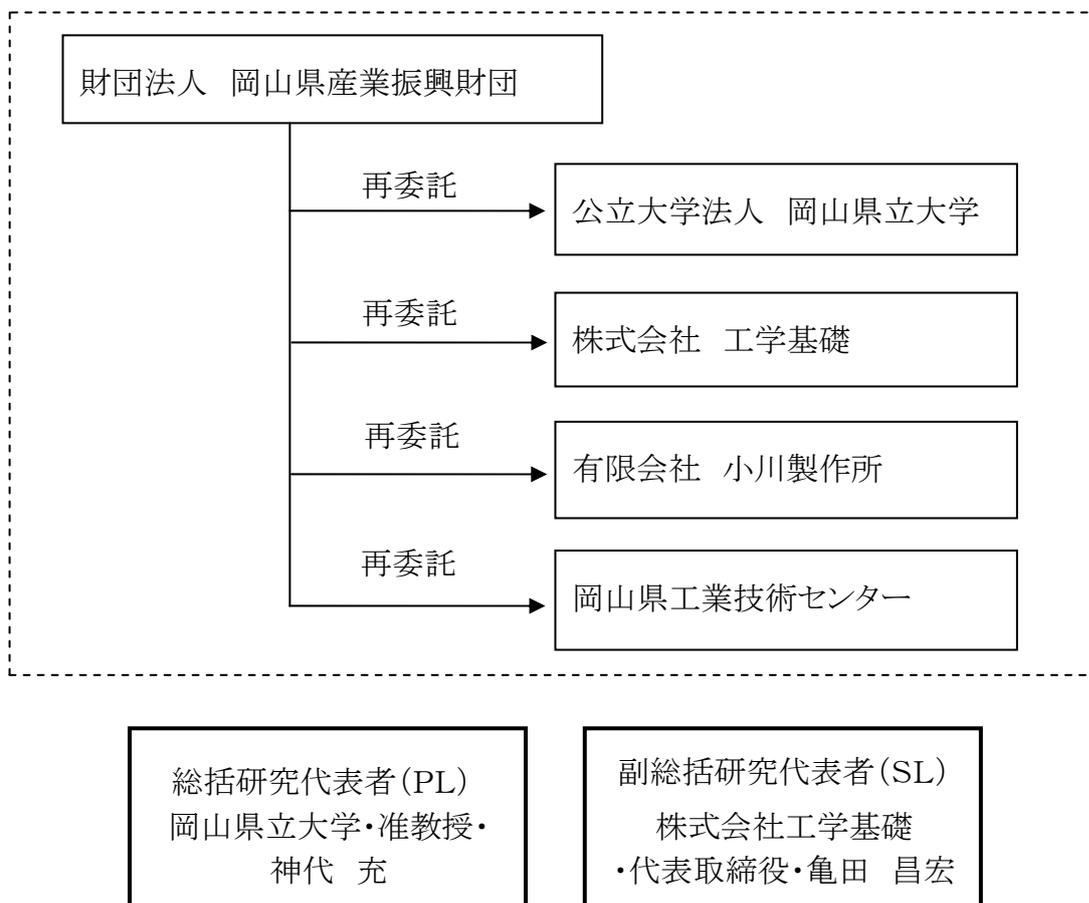
これまで我々は画像処理と3次元モデルを組み合わせたロケーションシステムの開発を行ってきた。この手法はカメラから入力された画像と一致する画像が作成される3次元モデル内での視点位置を推定することでカメラの位置を推定するものである。本システムでは周囲の環境と一致する3次元モデルのみにより自己位置を推定することから移動経路の変更や倉庫内のレイアウト変更に対応できるとともに、倉庫内にガイドライン等の設備を必要とせず、導入コストを大幅に削減できるものと期待される。

1-1-2 研究目的及び目標

そこで本研究では、これまでに先導研究を行ってきた画像処理と3次元モデルを組み合わせた自己位置推定手法を発展させ、推定精度の向上および処理時間の短縮を図る。具体的には、これまでに開発を行ってきた自己位置推定手法では、1台のカメラからの入力画像と3次元モデルとを比較することで自己位置の推定を行っていたため、荷役作業の自動化を行える自己位置推定の精度を得ることが困難であった。そのため、本研究では移動体の異なる方向に設置した4台のカメラと3次元モデルを用いたロケーションシステムを開発する。このシステムでは、4台のカメラからの入力画像と3次元モデルとを同時に比較することで、自己位置推定の推定精度の向上を図るとともに、1台のカメラのみを用いる場合に比べ、1枚の入力画像に対する処理量を削減し、複数の入力画像を同時に並列して処理することで処理時間の短縮化を図る。

1-2 研究体制

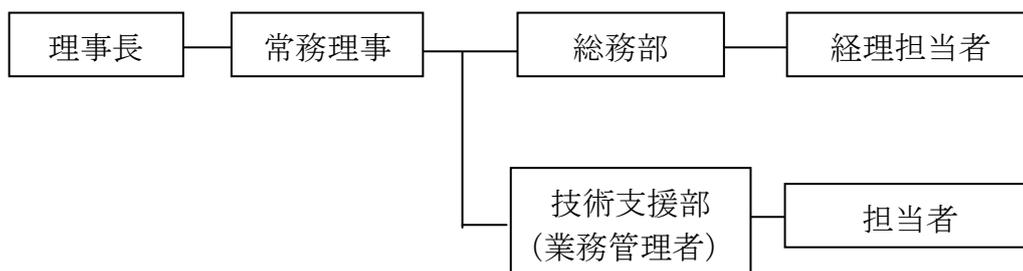
1-2-1 研究組織（全体）



1-2-2 管理体制

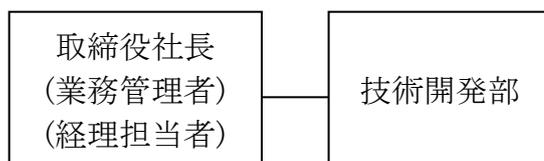
【事業管理者】

財団法人岡山県産業振興財団

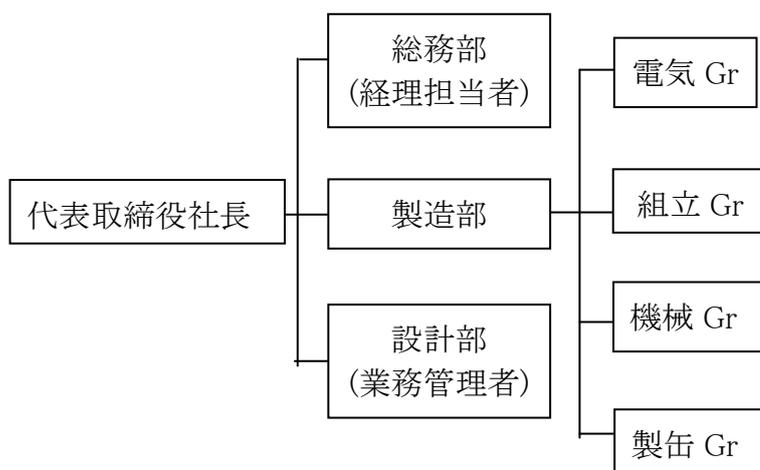


【再委託先】

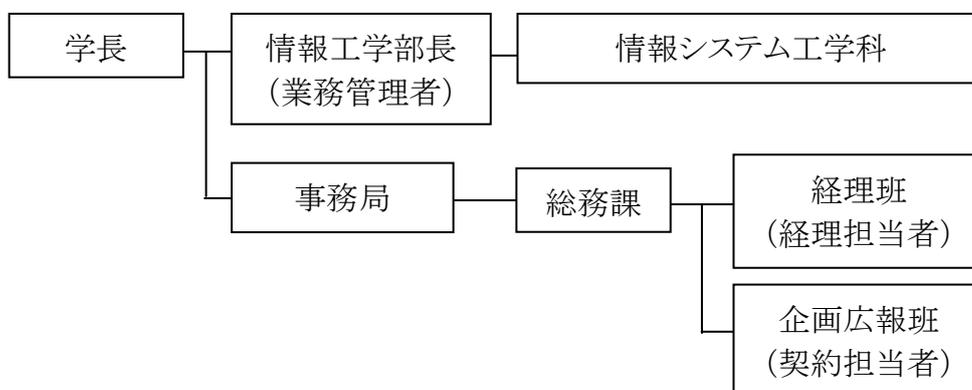
株式会社工学基礎



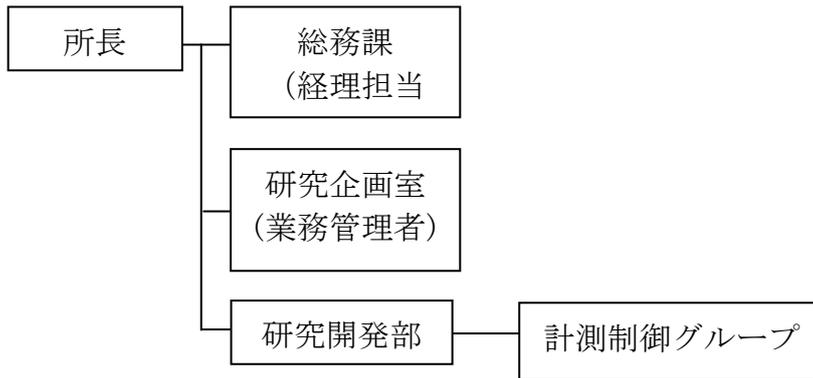
有限会社小川製作所



公立大学法人 岡山県立大学



岡山県工業技術センター



1-2-3 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岡山県産業振興財団

管理員

氏名	所属・役職
三島 佳洋	技術支援部・部長
横田 尚之	技術支援部研究開発支援課・課長
間宮 眞理子	総務部兼技術支援部研究開発支援課・主任
綱澤 知則	技術支援部・主事
宮内 隼	技術支援部・主事
三竿 真紀	技術支援部・主事

【再委託先】 ※研究員のみ

株式会社 工学基礎

氏名	所属・役職
亀田 昌宏	代表取締役
神代 雅美	取締役 (技術開発部 部長)

有限会社 小川製作所

氏名	所属・役職
藤井 守	製造部 部長
田中 豊	製造部 副部長
田中 要	設計部 部長
田井 一雄	製造部 製缶Gr主任
俣部 光明	製造部 組立Gr主任
守屋 榮蔵	製造部 電気Gr主任
西原 日出夫	製造部 製缶Gr
角田 直樹	製造部 製缶Gr
岩城 禎展	製造部 機械Gr
片岡 浩二	製造部 機械Gr
平田 道	製造部 機械Gr

難波 剛史	設計部
毛利 元臣	製造部 組立Gr
伊藤 嘉紀	設計部
高谷 栄二	製造部 組立Gr
近藤 将	製造部 電気Gr
秋友 秀俊	製造部 電気Gr

公立大学法人 岡山県立大学

氏 名	所属・役職
神代 充	情報工学部情報システム工学科・准教授

岡山県工業技術センター

氏 名	所属・役職
辻 善夫	研究開発部計測制御グループ

1 - 2 - 4 他からの研究協力者（アドバイザー）

日本輸送機株式会社

氏 名	所属・役職
長谷 日出樹	技術本部 主任研究員

1 - 3 成果概要

本研究課題では、従来方式には必要のあったガイドライン等の環境に設置する設備を用いることなく、移動体に備えられたカメラからの入力画像と環境の3次元モデルとを比較することで移動体の自己位置を推定するロケーションシステムを開発する。そして、冷凍倉庫や危険物倉庫などの無人の環境下で作業を行う無人搬送車や無人フォークリフトのためのガイドレスロケーションシステムとして実用化を目指す。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

所属：財団法人岡山県産業振興財団 技術支援部 研究開発支援課

氏名：横田 尚之

電話：086-286-9651

FAX：086-286-9676

E-mail：nyokota@optic.or.jp

第2章 本論

2-1 推定精度の向上および処理時間の短縮化手法の開発

2-1-1 画像処理と3次元モデルを組み合わせたロケーションシステムの開発

① 3次元モデルの作成

本研究では、画像処理と3次元モデルを組み合わせた自己位置推定手法における処理時間の短縮や倉庫のレイアウト変更に柔軟に対応することを目的として、移動ロボットが走行する通路とその周辺のみを3次元モデルを物流倉庫管理システム（Warehouse Management System）と連携して構築する手法を開発した。

(1) 物流倉庫管理システムと連携した3次元モデルの構築

物流倉庫管理システムとの連携により倉庫内の3次元モデルを構築する。倉庫内の床、壁面、および配置されるラックなどの3次元オブジェクトをCADソフト（AutoCAD Inventor Professional 2010：AutoDesk社製）を用いて作成する。そして、物流倉庫管理システムに登録されている倉庫内のラックの位置や壁の位置などのレイアウト情報に基づいて、モデル空間内に3次元オブジェクトを配置することで、実際の物流倉庫と一致した3次元モデルが構築される。これにより、物流倉庫管理システムを用いることで、倉庫全体の3次元モデルや任意の通路のみを3次元モデルなど、任意の範囲となる3次元モデルを構築することが可能となる。また、3次元オブジェクトの色は実際のもので同一色とすることで、カラーのカメラ画像と一致するモデル画像が作成されるようにする。3次元モデルの一例を図1に示す。以降、この3次元モデルにより作成された仮想空間をモデル空間とし、このモデル空間内において任意の位置および方向の視点から作成される画像をモデル画像とする。

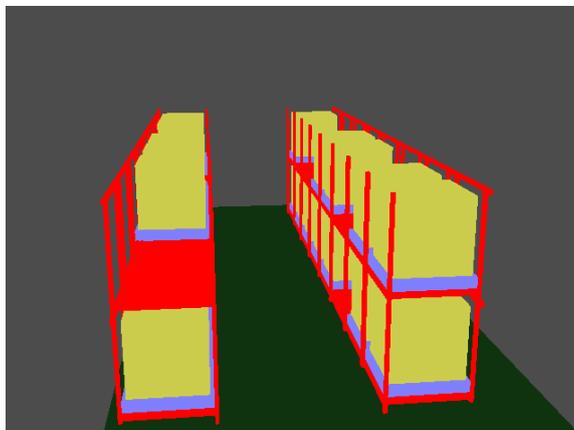


図1 構築された3次元モデル

(2) 自己位置推定のための3次元モデルの構築

自己位置推定のための3次元モデルは物流倉庫管理システムにより構築される。また、図2に示すように3次元モデルの構築は通路ごとに行い、移動ロボットに取り付けられたカメラから走行中に入力される範囲の3次元モデルを通路とその周辺の3次元オブジェクトにより構築する。

これにより、カメラからの入力画像と比較する3次元オブジェクトを軽減することが可能となり、画像処理と3次元モデルを組み合わせた推定手法による自己位置推定に要する時間の短縮が図られる。

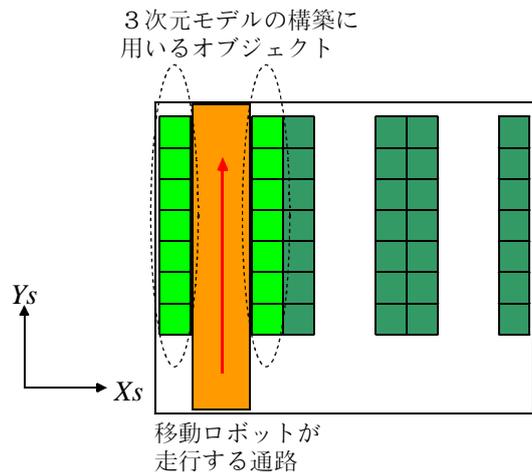


図2 3次元モデルの構築

② 複数台カメラによるロケーションシステムの開発

本研究では、移動体に搭載された複数台のカメラからの入力画像（カメラ画像）とモデル空間により作成されるモデル画像とを比較し、カメラ画像と一致するモデル画像が作成されるモデル空間内での視点を推定することで、移動体の自己位置を推定する自己位置推定手法を提案した。さらに、その自己位置推定手法を適用したロケーションシステムを開発した。開発したロケーションシステムでは、前後左右方向に取り付けられた4台のカメラからの入力画像をモデル画像と同時に比較することで、移動ロボットの自己位置を推定するものである。

(1) カメラ画像とモデル画像の比較

カメラ画像とモデル画像との比較手順を図3に示す。カメラ画像から通路の路面や壁を除去し、自己位置を推定する際に特徴となる通路の両側にあるラックのみの画像を作成する。この通路の路面や壁の除去方法としては、カメラ画像のすべての画素に対してHSV変換を行い、その色相、彩度および明度と3次元モデルでのラックのそれとの差が閾値以上となる画素の輝度値を0とすることで行う。そして、ラック以外の部分を除去した画像に対して二値化処理を行い、特徴量のみ画像（特徴画像）を作成する。

また、モデル画像に対しても、カメラ画像に対して行った処理と同一の処理を行い、特徴画像を作成する。そして、カメラ画像とモデル画像それぞれから作成された特徴画像を差分することで、カメラ画像とモデル画像の一致度を算出する。また、一致度には差分後に輝度値が0となる画素の全画面に対する割合を採用する。

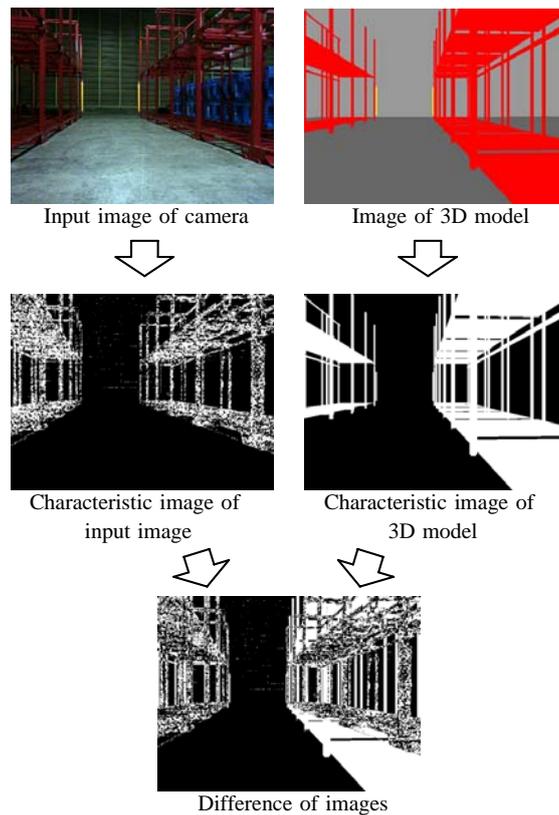


図3 カメラ画像とモデル画像との比較

(2) 4台のカメラによる自己位置推定

移動ロボットシステムの自己位置は前後左右の4方向に取り付けてある4台のカメラからのカメラ画像とモデル画像とを比較することで推定する。画像処理を用いて位置の推定を行う場合、カメラ軸方向の推定精度が低下する傾向にある。また、移動ロボットが通路に沿って走行する場合、移動ロボットの前後方向のカメラは通路方向に向いており、左右方向のカメラはラックの方向に向いている。そこで、移動ロボットの方向と通路に対して垂直となる位置の推定には主に前後方向にあるカメラを用い、通路方向の位置推定には、主に左右方向のカメラを用いて行うものとする。

(2.1) 前後方向のカメラによる自己位置推定

(I) 基準線による自己位置推定

モデル画像とカメラ画像との比較を行い、カメラ画像と一致するモデル画像を求めることで、その画像が作成されたモデル空間内の視点の位置および方向から移動体の自己位置が推定される。しかしながら、カメラ画像とモデル画像を単純に比較した場合には、十分な精度を得るためには多数のモデル画像をカメラ画像と比較する必要があり、推定には多大な時間を要する。そこで、本研究では、比較時間を短縮するために、画像内に基準線を定義し、カメラ画像の基準線とモデル画像のそれとが一致するように比較を行う。このように、カメラ画像とモデル画像の基準線を一致させることで、モデル空間内での移動体の姿勢が拘束され、比較するモデル画像の数を大幅に削減することが可能となる。

(II) 基準線の推定

基準線は移動体の両側にあるラックと正面の壁との境界線（左右の2箇所）とする。カメラ画像での基準線の一例を図4に示す。図に示すように画像内での座標系を $(IX-IY)$ とし、基

準線は IY 軸と平行とする。基準線の推定は以下の手順で行う。

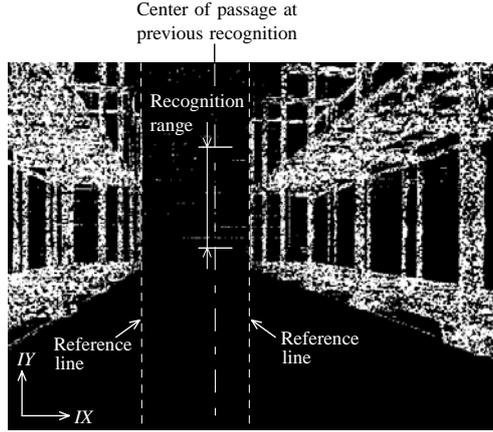


図4 基準線の推定

まず、カメラ画像内で左右にラックが存在する高さの範囲（認識範囲）を予め定めておく。前方カメラからのカメラ画像において、その認識範囲内で前回の推定において求められたカメラ画像内での通路の中心位置から、 IX 軸方向に左右へ探索を行い、最初にラックと識別される左側と右側の位置を求める。そして、左側と右側それぞれに対して、求められた位置をソートし、上位1/4と下位1/4を除く、中央の1/2についてその平均値を求め、基準線的位置とする。また、この推定された左右の基準線の中心を通路の中心位置として求め、次回の推定に用いる。

同様に、後方カメラからのカメラ画像においても、左右の基準線的位置および通路の中心位置を推定する。

(Ⅲ) 基準線による拘束

カメラ画像の基準線にモデル画像の基準線を一致させることで移動体の位置および方向を拘束する。本研究では、通路の路面は平面であるとし、その場合の基準線と移動体との関係を図5に示す。また、カメラ画像とモデル画像それぞれの基準線的位置を一致させた場合の関係式を(1), (2)式に示す。ただし、 (RX_M, RY_M) , θ_M はそれぞれモデル空間内での移動体の位置および方向であり、 W_{pa} , W_{pb} はカメラ画像内での画像中心から基準線までの距離とする。また、 (X_p, Y_p) , (X_q, Y_q) はモデル空間内での基準線的位置、 F はカメラの焦点距離とし、これらの値は既知とする。そして、 W_{pa} と W_{pb} をカメラ画像から求め、これらから移動体の方向 θ_M に対する基準線への方向 α , β を推定する。しかしながら、移動体の方向 θ_M が未知であるため、これらから移動体の位置 (RX_M, RY_M) は求められない。しかしながら、移動体の方向 θ_M が決定されると移動体の位置 (RX_M, RY_M) が一意に求められる。そこで、これらの関係式を用いて、カメラ画像とモデル画像の基準線同士が一致するように移動体の姿勢を拘束し、移動体の方向 θ_M を変化させつつ、カメラ画像とモデル画像との比較を行う。

$$\begin{cases} RX_M - X_p = (Y_p - RY_M) \tan(\alpha + \theta_M) \\ X_q - RX_M = (Y_q - RY_M) \tan(\beta - \theta_M) \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{W_{pa}}{F} \right], \quad \beta = \tan^{-1} \left[\frac{W_{pb}}{F} \right] \quad (2)$$

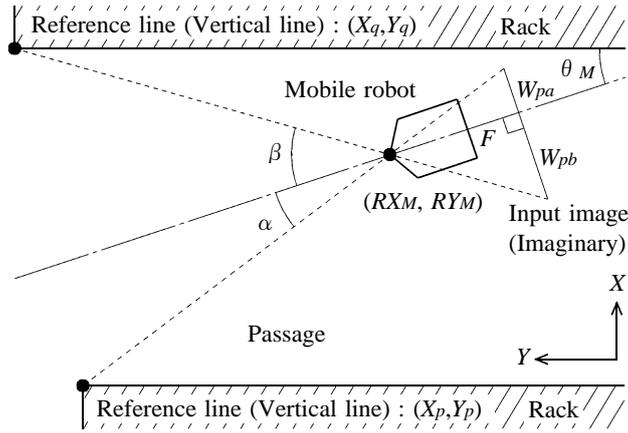


図5 基準線と移動ロボットの姿勢との関係

(IV) 基準線による自己位置推定

基準線による姿勢の拘束により，移動体の方向 θ_M を決定することで，移動体の位置 (RX_M, RY_M) が一意に決定される．そこで，モデル空間内での移動体の方向を変化させつつモデル画像とカメラ画像を比較し，最も一致する移動体の方向 θ_M を決定する．

認識手順としては，まず，前回に認識された移動体の方向 θ_L を中心として任意の角度 ϕ を探索範囲とする．この探索範囲 ϕ を8等分に分割し，(3)式で表される ϕ_i ($i=1,2,\dots,9$) からなる集合 S_ϕ を決定する．この ϕ_i をモデル空間内での移動体の方向とし，(1)式からモデル空間内での移動体の位置 $(RX_{\phi_i}, RY_{\phi_i})$ を求める．そして，この求められたモデル空間内での移動体の位置および方向からのモデル画像を作成し，カメラ画像と比較することで一致度 CV_i を求める．求められた一致度の一例を図6に示す．図6では，横軸を移動体の方向とし，縦軸をモデル画像とカメラ画像との一致度としている．そして，この求められた一致度 CV_i を図6に示すように3次曲線により近似を行い，近似曲線を求める．この求めた近似曲線が移動体の方向を変化させた場合の一致度の変化であると仮定する．

$$S_\phi = \left\{ \phi_i \ (i=1,2,\dots,9) \ \middle| \ \theta_L - \frac{\psi}{2}, \theta_L - \frac{3\psi}{8}, \theta_L - \frac{\psi}{4}, \theta_L - \frac{\psi}{8}, \theta_L, \theta_L + \frac{\psi}{8}, \theta_L + \frac{\psi}{4}, \theta_L + \frac{3\psi}{8}, \theta_L + \frac{\psi}{2} \right\} \quad (3)$$

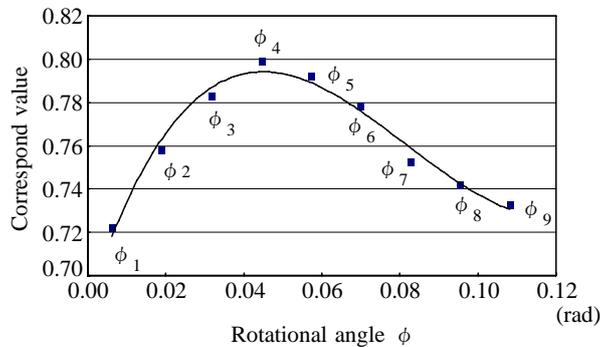


図6 前方のカメラにより求められた3次曲線

(V) 前後方向のカメラによる自己位置推定

同様に後方のカメラにおいても基準線により姿勢の拘束を行い、一致度を近似することで3次曲線を求める。そして、前方のカメラにより求めた3次曲線と後方のカメラにより求めた3次曲線から移動体の方向 θ_M を求める。さらに、求められた方向 θ_M と基準線による姿勢拘束を用いて(1)式から移動体の位置(RX_M, RY_M)を求める。

(2. 2) 左右方向のカメラによる自己位置推定

前回に推定されたロボットの自己位置に車輪のエンコーダから移動量を付加した位置を(RX_p, RY_p)、方向を θ_p とし、左右方向のカメラによる自己位置推定はその位置と方向に基づいて行う。通路方向と平行に任意の変化量 Δ を定義し、前後方向のカメラにおける(3)式と同様に移動ロボットの位置(RX_p, RY_p)を中心として、変化量 Δ を8等分に分割するような9つの要素 δ_i ($i=1,2,\dots,9$)からなる集合 S_δ を定義する。そして、移動ロボットの位置を δ_i 、方向を θ_p として左右のカメラから入力されるカメラ画像と同一のモデル画像を3次元モデルを用いて作成する。この作成されたモデル画像と右側、および左側のカメラ画像とを比較し、その一致度が最も高くなる位置を移動ロボットの位置(RX_q, RY_q)とする。

(2. 3) 4台のカメラによる自己位置推定

前後方向のカメラから推定された位置(RX_M, RY_M)と方向 θ_M 、および左右方向のカメラから推定された位置(RX_q, RY_q)から移動ロボットの位置(RX_I, RY_I)と方向 θ_I を求める。

移動ロボットの位置 (RX_I, RY_I) は(4)式より求め、方向 θ_I は(5)式より求める。

$$\begin{cases} RX_I = \frac{RX_M + RX_q}{2} \\ RY_I = \frac{RY_M + RY_q}{2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_I = \theta_M \quad (5)$$

2-1-2 画像処理と3次元モデルを組み合わせたロケーションシステムの処理時間の短縮

本研究では3次元モデルと画像処理を組み合わせた自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて、移動ロボットを目標軌道に追従するようにリアルタイムに制御している。そのため、目標軌道を正確に追従させるためには、3次元モデルの作成やカメラ画像とモデル画像との比較を高速化し、自己位置推定に要する時間を短縮する必要がある。

そこで、本研究では自己位置推定手法に用いる入力画像におけるノイズ除去などを必要最低限とすることで、自己位置推定における処理量の削減を行い、自己位置推定に要する時間の短縮を図った。さらに、モデル画像の作成、画像のHSV変換、およびモデル画像とカメラ画像との比較などの処理をGPU (Graphics Processing Unit) により行うことで、処理時間の短縮を図っている。このGPUはコンピュータのビデオボード上に搭載されているレンダリングや画像処理を専門とする補助演算装置であり、CPUに比べこれらの処理を高速に行うことが可能である。そのため、本研究では自己位置推定手法におけるGPUにより処理可能なもの全てをGPUにより処理することで、処理時間の短縮を図った。

また、ビデオボードにはGPUとビデオメモリが搭載されており、GPUによる画像処理等の演算はコンピュータのCPU (Central Processing Unit) による処理とは別に並行して行われ

る。一方、CPUは移動ロボットのコントローラとの通信や制御量の演算などを行っており、CPUの負荷を軽減することで、全体的な処理時間の短縮が行える。そのため、GPUにより算出されたカメラ画像とモデル画像との比較画像を一括してメインメモリに転送することで、コンピュータのメインメモリとビデオメモリとのデータ転送の回数を減らすことで、CPUの負荷を軽減している。

2-2 移動ロボットシステムの構築および実証実験

2-2-1 移動ロボットシステムの構築

① 移動ロボットのハードウェア部分の設計・製作

開発した3次元モデルと画像処理を組み合わせた自己位置推定手法を適用した移動ロボットシステムを構築した。構築した移動ロボットシステムでは4輪操舵、4輪駆動を採用することで、多彩な走行を実現している。また、物流倉庫管理システムとの連携を図ることで、3次元モデルの構築や移動ロボットシステムに走行のための指示を与えることを可能にしている。

構築した移動ロボットシステムを図7に示し、図8に移動ロボットシステムの外形を示す。移動ロボットシステムの上部には4台のカメラを取り付けており、その高さを調整することができる。また、移動ロボットシステムの駆動系には4輪駆動・4輪操舵を採用することで、その場回転や斜方向走行などの走行が可能である。また、表2に示されているように移動ロボットシステムの外形は車長700mm、車幅500mm、車高871mm(最大1,000mm)となっている。



図7 移動ロボットシステム

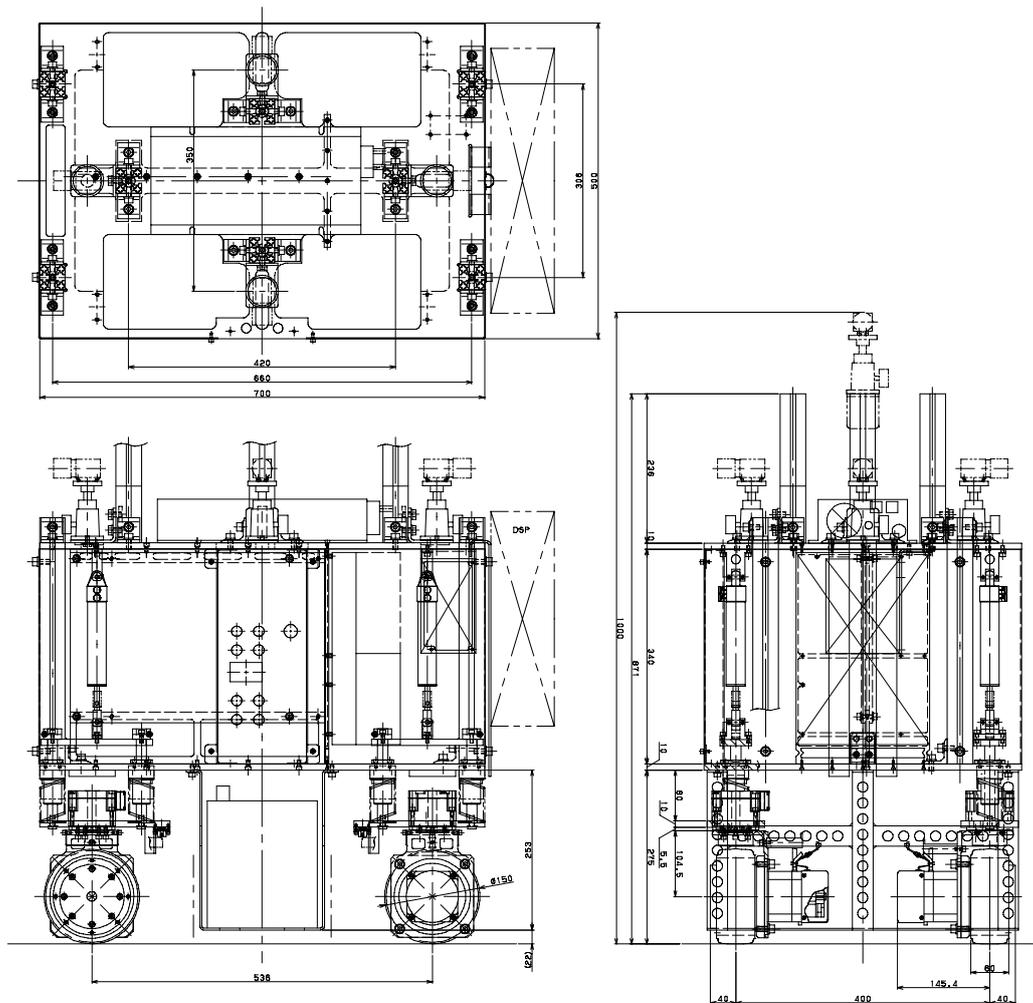


図8 移動ロボットシステムの外形

(1) 移動ロボットシステムの構成

移動ロボットシステムはプログラマブル・ロジック・コントローラ（P L C）, 画像処理用コンピュータ, およびバッテリーなどから構成されている. 図9に移動ロボットシステムの構成を示す. 移動ロボットは4輪操舵, 4輪駆動を採用しているため, それぞれの車輪を駆動と操舵するためのモータ（計8個）が取り付けられている. これらのモータはP L Cに接続されている. また, 画像処理用コンピュータはCPU（Core2Quad Q9550s : Intel社製）, メモリ（4GByte）, ビデオボード（GD260-896ERX3B : ELSA社製）により構成されており, そのコンピュータには4台のカメラがIEEE-1394を介して接続されている. さらに, その4台のカメラはP L Cと接続することで, 車輪や操舵角のエンコーダ値の読み込みと同期して画像を入力することを可能にしている. 画像処理用コンピュータはCC-Linkを介してP L Cに接続されており, 車輪や操舵角のエンコーダ値やモータへの制御量を通信している. そして, 画像処理用コンピュータにより推定された自己位置に基づいて4つの車輪の操舵角と回転速度を求め, P L Cにより制御される.

移動ロボットシステムには, バッテリーが搭載されており, このバッテリーからP L Cや画像処理用コンピュータの電源, およびモータを駆動させる電源を供給している. そのため, この移動ロボットシステムは自律した走行が可能である.

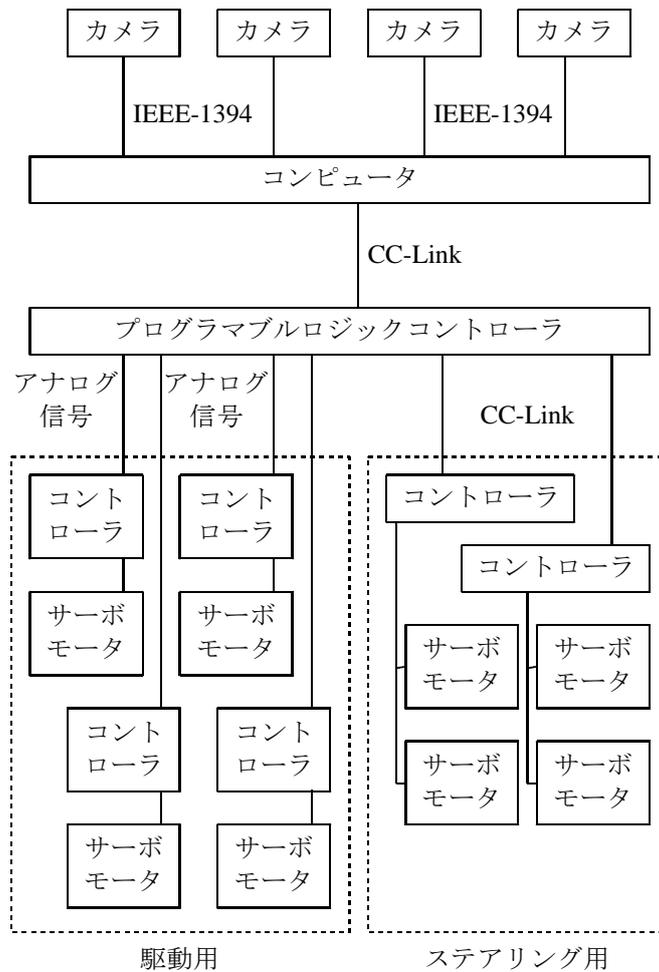


図9 移動ロボットシステムの構成

(2) カメラの取り付け位置

移動ロボットには4台のカメラ（IMC-15FT：imi tech社製）が備えられている。4台のカメラは図10に示すように移動ロボットの前後左右の4方向に取り付けている。このように4方向に取り付けることで、開発した3次元モデルと画像処理を組み合わせたロケーションシステムの適用を可能にしている。また、移動ロボットは4輪操舵、4輪駆動を採用しているため、開発したロケーションシステムにより推定された自己位置に基づいて前後左右の4方向全てに向かって走行することが可能である。

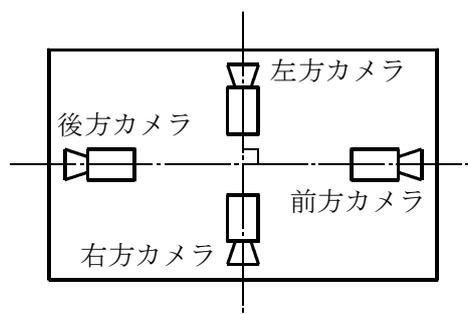


図10 4台のカメラの取り付け位置

② 走行制御用プログラムの開発

開発した移動ロボットは4輪操舵、4輪駆動となっていることから、移動ロボットの平面的な位置とその方向を同時に調整することが可能であり、それを実現するためには操舵用モータと駆動用モータの計8個を同時に制御する必要がある。そこで、現在の移動ロボットの位置と方向から目標となる位置と方向になるような操舵角や車輪の回転速度を算出するプログラムの開発を行った。

移動ロボットの現在の位置および方向と目標点の位置および方向から場合分けを行い、車輪の操舵角と回転速度を推定する。場合分けは、(A) 平行移動、(B) 回転移動、および(C) 旋回移動の3種類とする。

移動ロボットの位置および方向と4つの車輪の位置関係を図1 1に示す。移動ロボットの現在位置と方向を $P_n(RX_n, RY_n)$ 、 θ_n とし、目標位置と方向を $P_p(RX_p, RY_p)$ 、 θ_p とする。そして、移動ロボットの車体が現在の位置と方向にある場合の各車輪の位置を $WN_{fr}(WNX_{fr}, WNY_{fr})$ 、 $WN_{fl}(WNX_{fl}, WNY_{fl})$ 、 $WN_{rr}(WNX_{rr}, WNY_{rr})$ 、 $WN_{rl}(WNX_{rl}, WNY_{rl})$ とし、移動ロボットの車体が目標の位置と方向にある場合の各車輪の位置を $WP_{fr}(WPX_{fr}, WPY_{fr})$ 、 $WP_{fl}(WPX_{fl}, WPY_{fl})$ 、 $WP_{rr}(WPX_{rr}, WPY_{rr})$ 、 $WP_{rl}(WPX_{rl}, WPY_{rl})$ とする。この現在位置から目標位置へ移動するための各車輪の操舵角を $WD(WD_{fr}, WD_{fl}, WD_{rr}, WD_{rl})$ とし、車輪の回転数を $RD(RD_{fr}, RD_{fl}, RD_{rr}, RD_{rl})$ とする。車輪の操舵角 WD は図1 2に示すようにロボットの方角に対して反時計回りを正にとり、その値域は $-\pi$ から π とする。また、現在位置から目標位置に到達するまでの移動時間を t とし、車輪の直径を WR とする。

(A) 平行移動、(B) 回転移動、および(C) 旋回移動の場合における操舵角と車輪回転速度を以下のように推定する。

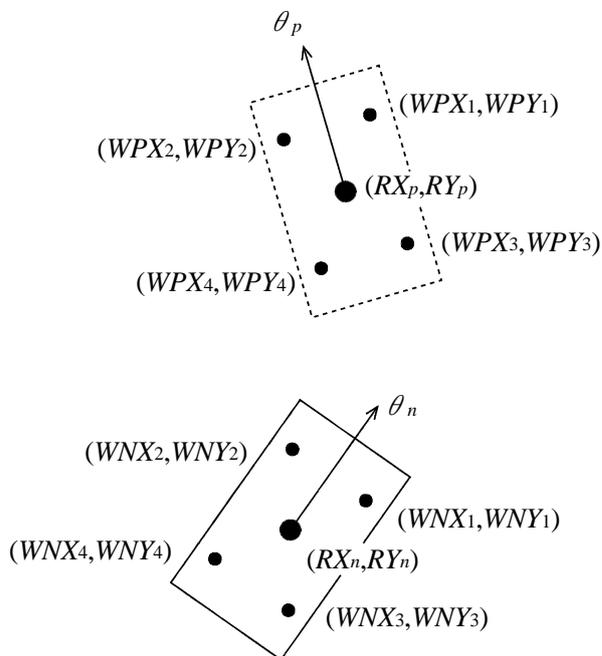


図1 1 移動ロボットの位置と方向

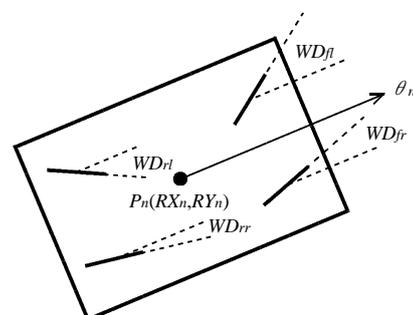


図1 2 移動ロボットの操舵角

(A) 平行移動

移動ロボットの現在の位置と目標の位置は異なるが、現在の方向と目標の方向が一致する場合は平行移動とする。そのため、現在の車輪の位置から目標点での車輪の位置までを直線軌道で移動するように車輪の操舵角と回転速度を推定する。

(I)操舵角の推定

平行移動では、現在の車体位置から目標点での車体位置までを直線軌道により移動する。そのため、4つの車輪の移動は車体の移動と一致する。そこで、車輪の操舵角は現在の車体位置から目標点での車体位置の方向と一致するように推定する。4つの車輪の操舵角は(6)～(9)式により求められる。

$RX_p - RX_n \geq RY_p - RY_n$ かつ $(RX_p - RX_n) < RY_p - RY_n$ のとき

$$WD_{fr}=WD_{fl}=WD_{rr}=WD_{rl}=\tan^{-1}\frac{RY_p-RY_n}{RX_p-RX_n}-\theta_n \quad (6)$$

$RX_p - RX_n < RY_p - RY_n$ かつ $(RX_p - RX_n) \leq RY_p - RY_n$ のとき

$$WD_{fr}=WD_{fl}=WD_{rr}=WD_{rl}=\left[\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\frac{RX_p-RX_n}{RY_p-RY_n}\right]-\theta_n \quad (7)$$

$RX_p - RX_n \leq RY_p - RY_n$ かつ $(RX_p - RX_n) > RY_p - RY_n$ のとき

$$WD_{fr}=WD_{fl}=WD_{rr}=WD_{rl}=\left[\pi-\tan^{-1}\frac{RX_p-RX_n}{RY_p-RY_n}\right]-\theta_n \quad (8)$$

$RX_p - RX_n > RY_p - RY_n$ かつ $(RX_p - RX_n) \geq RY_p - RY_n$ のとき

$$WD_{fr}=WD_{fl}=WD_{rr}=WD_{rl}=\left[\frac{3\pi}{2}-\tan^{-1}\frac{RX_p-RX_n}{RY_p-RY_n}\right]-\theta_n \quad (9)$$

(II)車輪の回転速度の推定

それぞれの車輪の移動は現在の車体位置から目標点での車体位置までの直線移動と一致する。そのため、現在の車体位置から目標点での車体位置までの距離から車輪の回転速度を(10)式により求める。

$$RD_{fr}=RD_{fl}=RD_{rr}=RD_{rl}=\frac{\sqrt{(RX_p-RX_n)^2+(RY_p-RY_n)^2}}{WR \cdot t} \quad (10)$$

(B) 回転移動

移動ロボットの現在の方向と目標の方向は異なるが、現在の位置と目標の位置が一致する場合は回転移動とする。回転移動では移動ロボットの現在の位置を中心点として、回転するように動作させる。そのため、移動ロボットの現在の位置を中心点として回転するように4輪の操舵角と回転速度を推定する。

(I)操舵角の推定

回転移動の中心点は移動ロボットの車体位置であり，それぞれの車輪において移動ロボットの車体位置から車輪位置の方向に対して，垂直となる方向が車輪の操舵角となる．そのため，4つの車輪の操舵角は車輪の取り付け位置のみから求められる．そこで，4つの車輪の取り付け位置を図13に示す．各車輪はロボットの中心位置から $L1(L1fr, L1fl, L1rr, L1rl)$ と $L2(L2fr, L2fl, L2rr, L2rl)$ の距離となる位置に取り付けてあるものとし，右前輪の操舵角は(11)式により求められる．

$$WD_{fr} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{L1_{fr}}{L2_{fr}} \quad (11)$$

同様にして，左前輪 fl ，右後輪 rr ，左後輪 rl の操舵角を算出する．

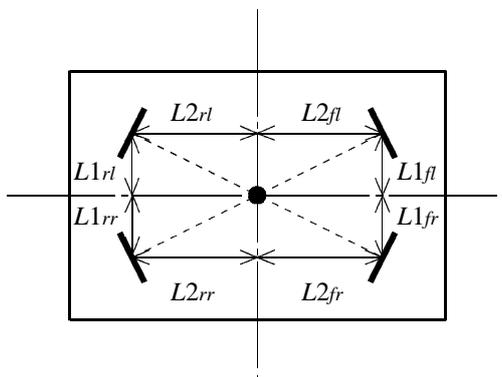


図13 車輪の取り付け位置

(II)車輪の回転速度の推定

それぞれの車輪の回転速度は現在の車輪の位置から目標点での車輪の位置までの円弧上の移動距離から推定する．回転移動の回転角は，移動ロボットの現在の車体の方向から目標点での車体の方向までの差分と一致する．そのため，現在の車輪の位置から移動ロボットの車体位置までの距離と回転移動の回転角から右前輪の回転速度を(12)式により求める．

$$RD_{fr} = (\theta_p - \theta_n) \frac{\sqrt{(WNX_{fr} - RX_n)^2 + (WNY_{fr} - RY_n)^2}}{WR \cdot t} \quad (12)$$

同様にして，左前輪 fl ，右後輪 rr ，左後輪 rl の操舵角を算出する．

(C) 旋回移動

移動ロボットの現在の位置と方向がともに，目標点での位置と方向と異なる場合には旋回移動とする．旋回移動では，現在の位置と方向から目標点での位置と方向になるように仮想的な点を中心とした旋回により移動させる．そのため，現在の位置と方向および目標点での位置と方向から，旋回移動の中心点を推定する．

(I)旋回の中心点の推定

旋回の中心点の推定は，4輪の車輪それぞれにおいて，現在の車輪の位置および目標点での車輪の位置までの距離が一致する同一点を旋回の中心点とする．

車輪 fr と車輪 rr から旋回移動の中心点 $C_r(CX_r, CY_r)$ を(13)式の方程式より求める．

$$\begin{cases} 2(WNX_{fr}-WPX_{fr})CX_r+2(WNY_{fr}-WPY_{fr})CY_r=WNX_{fr}^2-WPX_{fr}^2+WNY_{fr}^2-WPY_{fr}^2 \\ 2(WNX_{rr}-WPX_{rr})CX_r+2(WNY_{rr}-WPY_{rr})CY_r=WNX_{rr}^2-WPX_{rr}^2+WNY_{rr}^2-WPY_{rr}^2 \end{cases} \quad (13)$$

同様に、車輪 fl と車輪 rl から旋回移動の中心点 $Cl(CX_l,CY_l)$ を求める。そして、求められた中心点 $Cr(CX_r,CY_r)$ 、 $Cl(CX_l,CY_l)$ は一致するが、コンピュータの演算における丸め誤差の影響を考慮して、これらの中点を旋回を中心点 (CX,CY) として求める。

(II)操舵角の推定

中心点を中心に旋回するために、それぞれの車輪において中心点から現在の車輪位置の方向に対して、垂直となる方向を車輪の操舵角とする。右前輪 fr の操舵角は(14)～(17)式により求められる。

$WNX_{fr}-CX \geq WNY_{fr}-CY$ かつ $-(WNX_{fr}-CX) < WNY_{fr}-CY$ のとき

$$WD_{fr} = \tan^{-1} \frac{WNY_{fr}-CY}{WNX_{fr}-CX} + \frac{\pi}{2} - \theta_n \quad (14)$$

$WNX_{fr}-CX < WNY_{fr}-CY$ かつ $-(WNX_{fr}-CX) \leq WNY_{fr}-CY$ のとき

$$WD_{fr} = -\tan^{-1} \frac{WXY_{fr}-CX}{WNY_{fr}-CY} + \pi - \theta_n \quad (15)$$

$WNX_{fr}-CX \leq WNY_{fr}-CY$ かつ $-(WNX_{fr}-CX) > WNY_{fr}-CY$ のとき

$$WD_{fr} = \tan^{-1} \frac{WNY_{fr}-CY}{WNX_{fr}-CX} + \frac{3\pi}{2} - \theta_n \quad (16)$$

$WNX_{fr}-CX > WNY_{fr}-CY$ かつ $-(WNX_{fr}-CX) \geq WNY_{fr}-CY$ のとき

$$WD_{fr} = -\tan^{-1} \frac{WXY_{fr}-CX}{WNY_{fr}-CY} - \theta_n \quad (17)$$

同様にして、左前輪 fl 、右後輪 rr 、左後輪 rl の操舵角を算出する。

(III)車輪の回転速度の推定

それぞれの車輪の回転速度は現在の車輪の位置から目標点での車輪の位置までの円弧上の移動距離から推定する。現在の車輪の位置から目標点での車輪の位置までの回転角は、移動ロボットの現在の車体の方向から目標点での車体の方向までの差分と一致する。そのため、現在の車輪の位置から旋回を中心点までの距離と旋回の回転角から車輪の回転速度を(18)式により求める。

$$RD_{fr} = (\theta_p - \theta_n) \frac{\sqrt{(WNX_{fr}-CX)^2 + (WNY_{fr}-CY)^2}}{WR \cdot t} \quad (18)$$

同様にして、左前輪 fl 、右後輪 rr 、左後輪 rl の操舵角を算出する。

2-2-2 物流倉庫を模擬した環境下での実証実験

① ガイドレス用物流倉庫管理システムの開発

本研究では、移動ロボットの現在位置から目標位置までの移動経路をロケーション情報に基づいて決定する物流倉庫管理システムの開発を行った。さらに、開発した物流倉庫管理システムでは、無線LANを介して決定された移動経路に沿って走行するように移動ロボットへ指示を与えられるようにした。

(1) 移動経路の決定

物流倉庫管理システムにより移動ロボットの現在位置と方向から目標位置までの移動経路を決定する。物流倉庫の平面に対して倉庫座標系(X_w - Y_w)を定義し、それを管理する物流倉庫管理システム(WMS)のレイアウト情報においても(X_w - Y_w)座標系と一致するようにWMS座標系(X_s - Y_s)を定義する。そして、図14に示すように、物流倉庫管理システムに登録されたオブジェクトのレイアウト情報から、まず各オブジェクトに X_s 軸または Y_s 軸方向にのみ隣接されたオブジェクトの検索を行う。隣接したオブジェクトがある場合には、そのオブジェクトを同一のグループとして扱うことで、オブジェクトのブロックが作成される。隣接するオブジェクトが無い場合には、一つのオブジェクトを一つのブロックとする。

次にブロックの一辺から垂直方向に一番近いブロックを検索し、その間を通路幅とする通路として設定する。このとき、通路の長さは、ブロックとブロックにはさまれた空間に対し、通路幅方向と垂直な方向にあるブロックまでの距離とする。これを各ブロックについて行うことで通路情報を構築する。通路幅が移動ロボットよりも狭い通路に対しては走行を行うことができないため通路情報から除外する。この通路に対して他の通路と交差したエリアを検索し、交差点として設定する。これにより、通路及び交差点からなる地図情報が作成される。そして、この地図情報を基に現在位置から目標位置までの距離が最小となる経路を移動ロボットの移動経路として決定する。

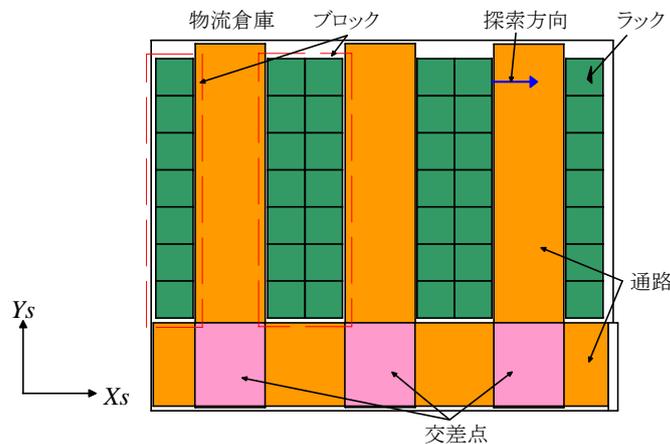


図14 移動経路の決定

(2) 移動ロボットへの走行指示

移動ロボットと物流倉庫管理システムは無線LANにより接続されており、物流倉庫管理システムから移動ロボットへの走行指示は無線を介して送受信される。走行指示としては、目標位置、およびその位置までの軌跡と走行速度である。移動ロボットは指示された速度により、指示された軌跡を追従するように自律して走行を行う。また、走行開始の指示や停止などの指示をリアルタイムに移動ロボットへ指示することが可能であり、走行中の移動ロボットを停止させ、新たな目標軌道を示すことが可能である。

② 物流倉庫を模擬した環境下での実験

提案する自己位置推定手法の有効性を確認するために、実際の物流倉庫内の通路を模擬した実験用コースと開発した移動ロボットシステムを用いて評価実験を行った。評価実験では、まず、移動ロボットを定点に設置し、提案する自己位置推定手法の精度を計測した。次に、自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて移動ロボットを目標軌道に追従させ、その走行軌跡を計測した。最後に、移動ロボットを目標軌道に追従するよう走行させ、目標位置での停止精度を計測した。

(1) 実験環境

物流倉庫内の通路を模擬した実験用コースの概略を図15に、その風景を図16に示す。通路幅は2,000mmとし、その両側にあるラックには実際の倉庫で使用されているラック（日本輸送機社製ネステナー：5NTS1302）を用いることで、実験用コースを可能な限り実際の倉庫に模擬させた。そして、このコースと同一の3次元モデルを物流倉庫管理システムと連携して構築し、提案する自己位置推定手法に用いた。

実験用コースには通路の中心を X_w 軸とし、その垂直方向を Y_w 軸とする倉庫座標系を定義した。ただし、倉庫座標系の原点を通路の入り口（中央）とした。



図15 実験用コースの概略



図16 実験用コースの風景

(2) 実験結果

(2.1) 定点での自己位置推定実験

開発した自己位置推定手法の精度を計測するために、実験用コース内の21カ所に移動ロボットを定置し、自己位置推定を行い、その推定精度（誤差）を計測した。図17に移動ロボットを定置した21カ所の位置を示す。21カ所の位置は Y_w 軸方向において通路の中央と左右に500mmずらした位置であり、 X_w 軸方向において2,000mmの位置から1,000mmずつずらした位置とした。自己位置推定実験では21カ所それぞれの位置において20回の自己位置推定を行い、その誤差を計測した。

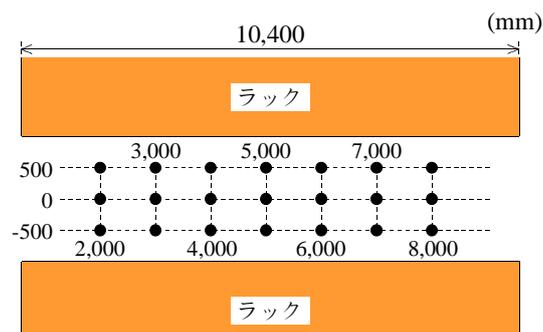


図17 実験用コース内の計測点

推定精度を計測した結果、移動ロボットを定置した21カ所すべてにおいて、自己位置推定手法の最大誤差が15mm以下となった。このことから、自己位置推定手法の推定精度は通路の位置に影響を受けることなく、十分な推定精度が得られていることが示された。

(2.2) 目標軌道への追従実験

目標軌道への追従実験では、通路の中心を走行する軌道、通路の中心に対して偏った位置を走行する軌道、および通路に対して斜方向に走行する軌道を目標軌道とした。通路の中心に対して偏った位置を走行する軌道では、通路の中心に対して-500mmと500mmの距離をずらした2つの軌道とした。また、通路に対して斜方向に走行する軌道では、通路の中心に対して-500mmの位置から500mmの位置へ移動する軌道と通路の中心に対して500mmの位置から-500mmの位置へ移動する軌道の2つとした。走行距離は通路方向に対して5,000mmとした。また、通路に対して斜方向の目標軌道では、移動ロボットの車体は通路に平行とし、斜方向の走行によって目標軌道に追従させた。実験では5つの目標軌道に対して、それぞれ5回の試行を行い、計測した。

図18～図20に移動ロボットの軌跡を示す。図18は目標軌道を通路の中心とした場合、図19は目標軌道を通路の中心に対して500mm偏った位置とした場合、図20は目標軌道を通路に対して斜方向(-500mmから500mm)とした場合の結果である。図18、図19より、目標軌道が通路の中心や偏った位置に拘わらず、移動ロボットが通路に対して平行に走行する場合には、目標軌道を追従していることが分かる。また、目標軌道を通路の中心に対して-500mm偏った位置とした場合においても目標軌道を追従することが可能であった。これらのことから、開発した自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて移動ロボットを制御することで、移動ロボットを目標軌道に追従して走行させられることが示された。さらに、図20より、移動ロボットが斜方向に走行する場合においても目標軌道を追従していることが分かる。また、目標軌道を通路に対して斜方向(500mmから-500mm)とした場合においても目標軌道を追従することが可能であった。このことから、4輪操舵、4輪駆動を活かした走行により目標軌道を追従していることが示された。

これらのことから、開発した自己位置推定手法は走行中においても自己位置を推定することが可能であり、移動体ロボットを目標軌道へ追従させられることが示された。

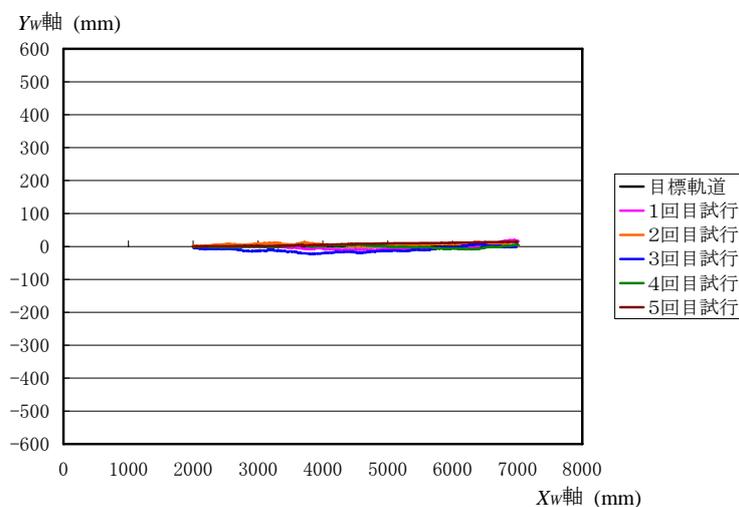


図18 通路中心の軌道

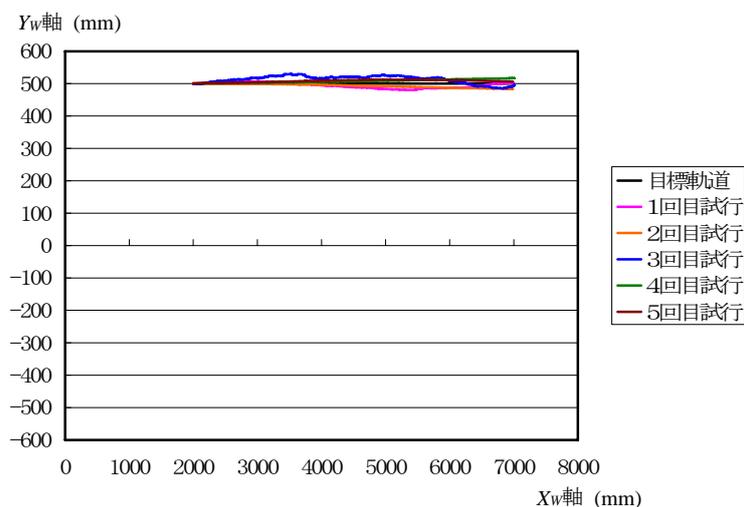


図 1 9 通路の中心に対して偏った軌道(-500mm)

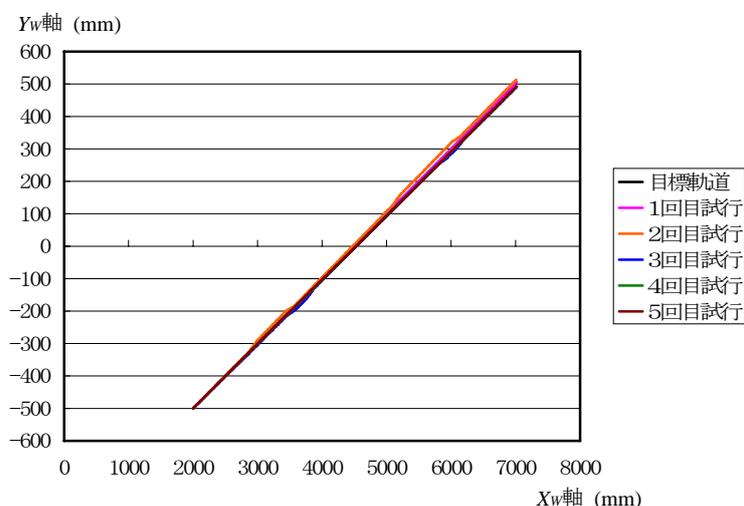


図 2 0 通路に対して斜方向の軌道 (-500mmから500mm)

(2. 3) 認識時間の計測実験

移動ロボットを目標軌道に追従させて走行させている際の1回の自己位置推定に要する処理時間を計測した。計測した結果、1回の自己位置推定に要する処理時間の平均値は232ms(標準偏差±7)となり、最大でも248msであった。このことから、1回の自己位置推定に要する処理時間は250ms以下となることが示された。

(2. 4) 停止精度計測実験

無人フォークリフトにおいて、自動での荷役作業を実現するためには目標位置への停止精度が極めて重要となる。そこで、自己位置推定手法の推定精度を計測する際に用いた図17に示す実験用コース内の21カ所への停止精度を測定した。移動ロボットは自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて4,000mm走行し、目標位置で停止させた。その結果、すべての停止位置において誤差が±20mm以下となった。このことから、開発した自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて移動ロボットを停止させた場合、その停止精度は荷役作業を十分に実現できる精度を満たしていることが示された。

これらの結果から、開発した自己位置推定手法を適用した移動ロボットシステムはガイドラインなどの環境に設置する設備を用いることなく、目標軌道を追従して走行することが可能であり、その位置決め精度は±20mm以下となることが示された。

第3章 総括

本研究課題では、従来方式には必要のあったガイドライン等の環境に設置する設備を用いることなく、移動体に備えられたカメラからの入力画像と環境の3次元モデルとを比較することで移動体の自己位置を推定するロケーションシステムの開発を行った。開発したロケーションシステムでは移動体に取り付けられた4台のカメラからの入力画像と3次元モデルとを同時に比較することで、自己位置の推定を行っている。さらに、開発したロケーションシステムを適用した移動ロボットシステムを構築している。構築した移動ロボットシステムは画像処理用コンピュータやバッテリーを搭載しており、自律して走行することが可能である。また、移動ロボットシステムの外形は車長700mm、車幅500mm、車高871mm(最大1,000mm)であり、小型なものとした。この移動ロボットシステムには4輪駆動、4輪操舵を採用しており、斜方向の走行やその場回転などの多彩な走行を実現している。

構築した移動ロボットシステムを用いて実際の物流倉庫を模擬した環境で実験を行った。実験では、まず、実験用コース内に移動ロボットを定置し、自己位置推定手法の推定精度(誤差)を計測した。その結果、通路の位置に拘わらず推定精度が一定であり、その誤差は $\pm 15\text{mm}$ 以下であった。これにより、開発した自己位置推定手法が十分な推定精度を実現していることが示された。

次に、推定された自己位置に基づいて、移動ロボットを目標軌道に追従するように走行させた。その結果、目標軌道が通路の中心や偏った位置に拘わらず、移動ロボットは目標軌道を追従するように走行することが可能であった。さらに、斜方向に走行する目標軌道に対しても移動ロボットは目標軌道を追従して走行することが可能であり、4輪操舵、4輪駆動の特徴を活かした走行を実現した。このことから、開発した自己位置推定手法により推定された自己位置に基づいて移動ロボットを制御することで、移動ロボットを目標軌道に追従して走行させられることが示された。また、走行中に1回の自己位置推定に要する処理時間を計測した結果、処理時間の平均値が232msであり、最大でも248msであった。このことから、250ms以下での自己位置推定を実現していることが示された。

そして、移動ロボットの停止精度を計測するために、実験用コース内の目標点まで走行し、停止する実験を行った。その結果、停止精度の誤差が $\pm 20\text{mm}$ 以下となり、荷役作業を実現できる精度を満たしていることが示された。これらのことから、開発したロケーションシステムにより移動ロボットを誤差 $\pm 20\text{mm}$ 以下の精度により制御することが可能であった。

以上の結果より、表3に本研究課題の数値目標とその合否を示す。この表より全ての数値目標を達成していることから、本研究課題は成功したものといえる。

表3 数値目標の合否

数値目標	本研究課題	合否
誤差 $\pm 20\text{mm}$ 以下	$\pm 20\text{mm}$ 以下	○
処理時間時間250ms以下	250ms以下	○
移動ロボットの大きさ 1000mm×1000mm×1000mm	700mm×500mm×1000mm	○

今後は、冷凍倉庫や危険物を取り扱う物流倉庫で稼働するフォークリフトや搬送車のロケーションシステムとして実用化を図ることで、それらの劣悪な環境から作業者を開放することに貢献したい。また、開発したロケーションシステムを人間と共存する環境下に適用可能とすることで、有人フォークリフトの無人化やフォークリフトの走行支援や荷役作業支援を行う運転支援装置の実用化を図っていきたい。