

視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発（第2報）

－機能モジュールの開発と自律走行試験－

吉川 毅，本間 稔規，大村 功
鈴木 慎一，高橋 裕之，橋場 参生
澤山 一博，長尾 信一

Development of Autonomous Mobile Robot with Vision System (Part II)

－ Development of Function Modules and Experiments of Autonomous movement －

Takeshi KIKKAWA, Toshinori HONMA, Isao OHMURA
Shinichi SUZUKI, Hiroyuki TAKAHASHI, Mitsuo HASHIBA
Kazuhiro SAWAYAMA, Shinichi NAGAO

抄 録

産業用ロボットの工場内稼働率が高まる一方で、介護ロボットや案内ロボットといった非製造業分野における走行ロボットのニーズが増えてきている。これらのロボットは様々な環境変化に対応出来る自律性が強く求められる。

本研究では、走行ロボット技術の確立と実環境への応用を目的として、建物内のフラットフロア上を自律走行する視覚システム搭載型ロボットの開発を行った。試作したロボットは、移動空間の地図情報を持ち、この地図情報と経路計画、位置認識、経路追従走行、障害物回避などの基本機能を使うことによって、目標地点に移動することが可能であり、走行試験において良好な結果が得られた。

1. はじめに

多関節型ロボットや自動搬送ロボットが生産工場内で活躍する中、非製造業分野におけるロボットのニーズが増えている。その代表的な例として、移動機能を有する福祉介護ロボットや案内ロボットが挙げられる。これらのロボットには、特別な環境整備が不要であり、人間と共存し、自らが考えて移動する機能が求められる。そのためには、

- ・自己位置認識（どこにいるか）
- ・周辺環境認識（周りはどうなっているか）
- ・行動の決定（何をするか）

をロボット自らが行う必要がある。

自己位置認識を行う手法については、デッドレコニング（推測航法）が一般的に用いられている。これは、ロータリエンコーダ等の内界センサを用いて、ロボットの車輪回転角速度を逐次計測して現在位置を推定する手法であるが、誤差が累積していくという欠点を有する。そこで、カメラや超音波センサ等の外界センサによって既知の自然ランドマーク（目

印となる対象）を認識し、現在位置の補正を行う必要がある[1]。

本研究では、建物内の走行を前提とした車輪型自律走行ロボットの開発を行った。本ロボットは駆動輪操舵型のバッテリー駆動方式であり、デッドレコニングと、視覚システムによるランドマーク認識によって自己位置を認識する。また、赤外線センサや超音波センサ等により周辺環境を認識して障害物回避を行う機能と、空間伝搬光を利用した無線通信機能も有する。

前報[2]では、本ロボットの概要と開発状況について述べた。これまでの研究により、視覚システムを主とした複数の外界センサを搭載し、現在位置および環境認識を行いながら自律走行することが可能なロボットを開発したので、本報ではその基本機能と走行試験の結果について述べる。

8.2 . ロボットの概要

本ロボット HIRIX-1 は駆動輪操舵型の 3 輪構造である(図 1)。自律走行を行うために、部屋や廊下等の地図情報を基に自ら走行経路を計画し、カメラ画像と各種センサ情報を利用して自己位置と周囲の環境を認識しながら目的地に移動する。また、走行中に人や障害物に遭遇した時は衝突回避を行う。

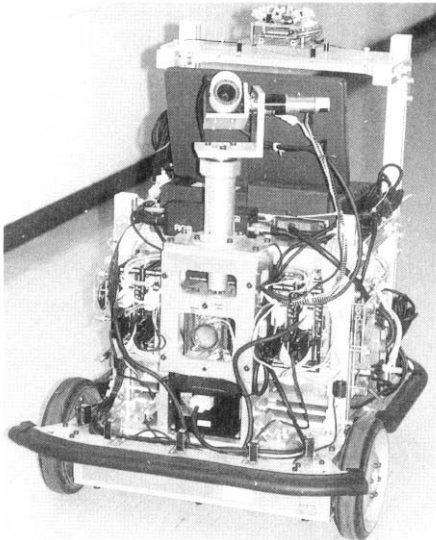


図1 試作した走行ロボット HIRIX-1

表1 走行ロボットの諸元

項目	仕様
寸法 (全長×全幅×全高)	730 X 600 X 805 mm
重量 (バッテリー含む)	74 kg
駆動輪直径	200 mm
駆動輪間距離	507 mm
モータ	DCサーボ 30W 24V * 2 個
減速機	ハーモニックドライブ (i=1/100)
CPU	i486DX4 (100MHz) * 2 台, TMP68301 (16MHz)
通信	RS-232C (9600bps), 光無線通信システム (本研究にて開発)
バッテリー	12V-16Ah/10hr * 2 個
最高速度	1.4 km/h
連続走行時間	2.5 時間

システムは、視覚モジュール、光通信モジュール、走行制御モジュールおよびスケジューラから構成されている(図 2)。以下に各モジュールの機能を述べる。また、本ロボットが走行する時の動作フローを図 3 に示す。

○視覚モジュール

画像情報によってロボットの自己位置認識を行う。システムは単焦点レンズを装着した CCD カメラ、画像入力ボード、カメラ台駆動用の 2 台の DC サーボモータおよび本モジュール専用のノート型パーソナルコンピュータ (以下、PC) により構成される。

○光通信モジュール

赤外 LED を使用した光無線通信により、遠隔地点のオペレータとの間で初期動作指令、位置情報、制御情報等の送受信を行う。システムは、2 個の移動局 (ホスト局とロボット局) と複数の固定局で構成される。

○走行制御モジュール

赤外線センサ、超音波センサおよび接触センサ (バンパースイッチ) の外界センサと走行制御部分からなる。左右の駆動輪は DC サーボモータによって駆動され、その走行制御にはサーボコントロールボードを使用している。

○スケジューラ

経路計画および各モジュール間の情報調整を受け持つ。視覚モジュール以外の情報処理のために、専用の PC を使用している。

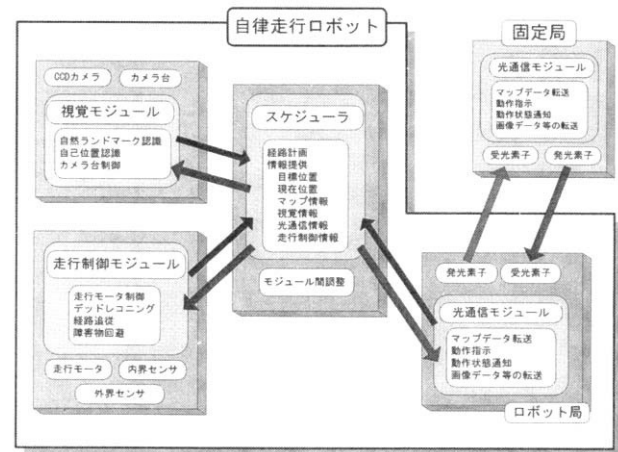


図2 システム構成

3 . 基本機能

開発した走行ロボット HIRIX-1 が持つ基本機能について、その詳細を述べる。

3.1 経路計画

経路計画は、ロボットが現在位置から目標位置に到達するための適切な経路を決定する重要な作業である。本ロボットは、与えられた環境地図情報を基に、自ら走行経路を自動生成する。

前報[2]では、登尾が提案している環境情報を持たないロボットの経路計画アルゴリズム[3] [4] に注目し、周囲に侵入禁止領域を設定した環境モデルに対して、このアルゴリズムの適用を図った。この経路計画手法は、目標地点までの直進走行と障害物に対する面沿い走行を基本としており(図 4)、準最短距離を通る経路を自動生成する。しかし、「廊下」や「部屋」といった環境情報を持たないため、「廊下は壁に沿って走行する」、「部屋に進入する時は、ドアが開いている

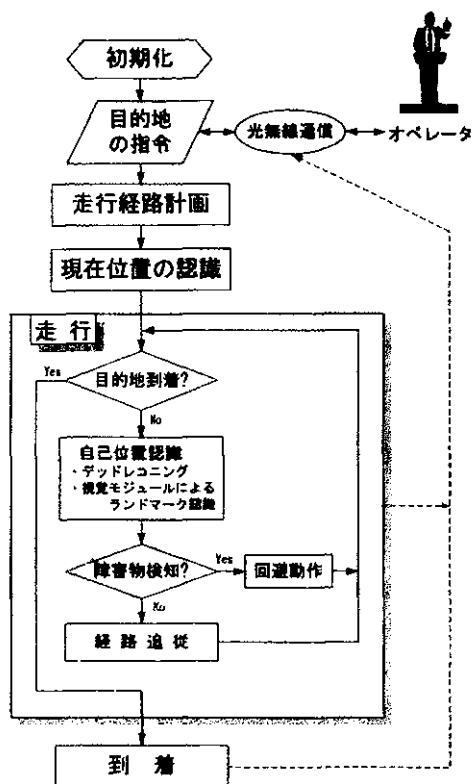


図3 動作フロー

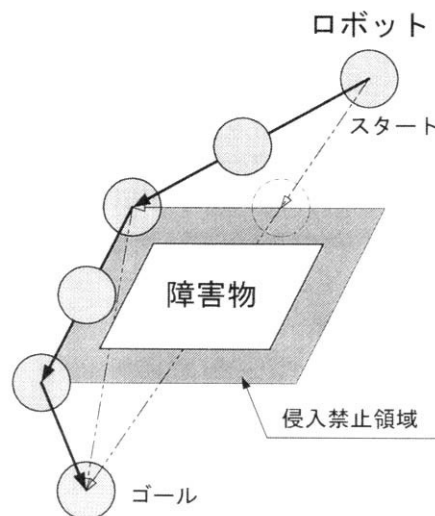


図4 経路計画アルゴリズム

(2) 走行経路の生成

廊下エリア、部屋エリアおよび障害物モデルについて進入禁止領域(図4および図5の破線部分)を設定する。この際、廊下および部屋エリアは走行時の余裕隙間分だけ収縮させ、障害物モデルは逆に膨張させてモデルの再構築を行う。このモデルに対して、前報で提案した準最短経路の自動生成を行う。この時、計画された経路は直線走行と巡回によって構成される。

中央を注意して走行する」等といった、周辺環境に適応した走行を計画することができなかった。

一方、深谷は走行環境を「廊下世界」と「部屋世界」に大別して、環境に適した経路地図の作成手法を提案している[5]。

本報では、この経路地図作成手法を適用して、走行環境に適した経路計画手法の検討を行った。

(1) 環境モデルの登録

走行環境を示す地図情報は、三次元直交座標系を用いたXYZ絶対座標系(グローバル座標系)で表され、環境モデルとしてデータベースに登録される。

その際、走行領域を廊下と部屋の2つの領域に大別して、各々を「廊下エリア」、「部屋エリア」とする。これらのエリアは任意の多角形で定義され、各頂点の座標値(X_{ci}, Y_{ci})および(X_{ri}, Y_{ri})の集合として登録される。

また、ドアは「ドアモデル」として、その中心座標(X_{di}, Y_{di})と属性(どのエリア間に設置してあるか)を登録する。

さらに、机やロッカー等の既知の障害物は「障害物モデル」として任意の多角形で定義し、各頂点の絶対座標(X_{oi}, Y_{oi})の集合として登録する。

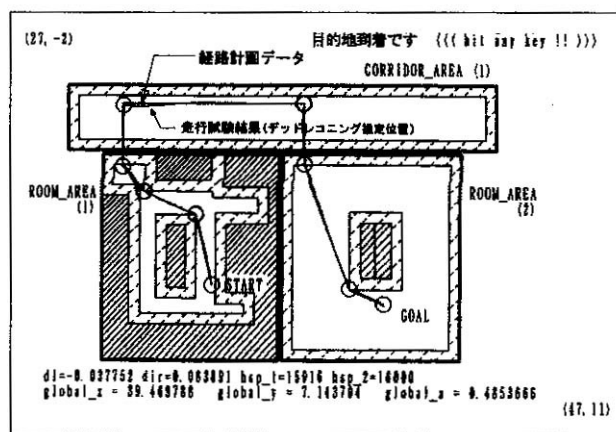


図5 経路計画

今回改良した経路計画手法により、ロボットは以下に示した走行形態をとることが可能になった。

- ・廊下エリアでは壁に沿って走行する
- ・部屋エリアでは準最短経路を走行する
- ・ドアは垂直に、かつ、中央近傍を進入する

図5は、経路計画結果に対して、ロボットがデッドレコニングによる位置推定を行いながら、経路追従走行をした結果を示したものである。

3.2 自己位置認識

ロボットが目的地まで移動するためには、自らの現在位置を認識しながら移動する必要があり、その機能の優劣がロボットの自律走行性能に大きく影響を及ぼす。

本ロボットの自己位置認識機能はデッドレコニングによる位置推定を基本としており、その欠点である累積誤差に対しては、視覚モジュールを用いたランドマーク認識機能によって適時補正する方式をとっている。

3.2.1 デッドレコニングによる位置推定

デッドレコニングは、車輪の回転角速度を積分することによってロボットの現在位置および姿勢 (X, Y, θ) を推定する方法である。この方式の問題は、車輪径の誤差、車輪間隔の誤差、走行時のスリップ等の各種の誤差が累積していくことであるが、推定位置の補正を適時行うことができれば、簡単で有効な方式である。

本ロボットもデッドレコニングによる自己位置推定を行いながら走行することを基本にしている。車輪の回転角速度の計測は、左右の駆動用 DC サーボモータに内蔵されたロータリエンコーダを用いて行っている。図 6 にロボットの運動モデルを示す。

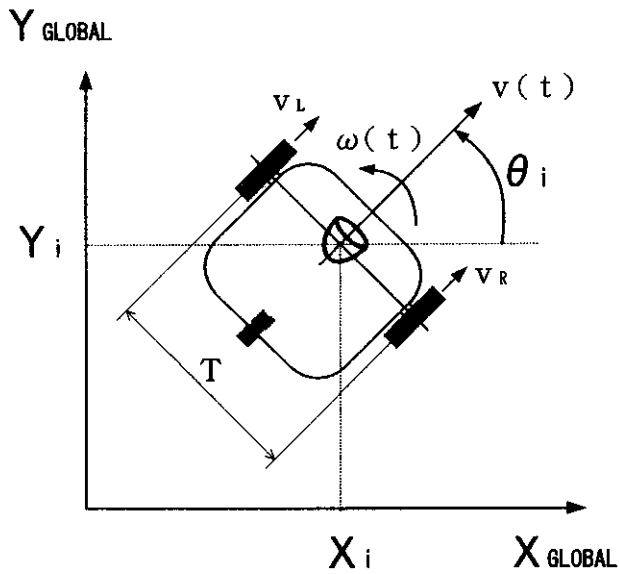


図6 ロボットの運動モデル

図示のように、ロボットの並進速度 v(t) と回転角速度 ω(t) は、以下のような線形変換によって表される。

$$\begin{pmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R_R}{2} & \frac{R_L}{2} \\ \frac{R_R}{T} & -\frac{R_L}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_R(t) \\ \omega_L(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、ω_R(t) および ω_L(t) は左右駆動輪の回転角速度、R_R および R_L は左右車輪半径、T は車輪間隔 (トレッド) である。

また、v=Rω であるから、式(1)は式(2)のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{v_R + v_L}{2} \cos \theta \\ \dot{Y} &= \frac{v_R + v_L}{2} \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega(t) = \frac{v_R - v_L}{T} \end{aligned} \quad (2)$$

各々を積分することにより、ロボットの現在位置と姿勢 (X, Y, θ) が求められる。

なお、実際の走行において、初期位置と姿勢角は光通信モジュールを介してロボットに与える。

3.2.2 視覚モジュールを用いた推定位置情報の補正[6]

本ロボットは、視覚モジュールによってランドマークの認識を行うことで、デッドレコニング推定位置を補正する。ランドマークは天井に設置された蛍光灯、壁と床の境界線およびドアを対象とし、これらの特徴点の座標位置および属性をランドマーク情報として登録しておき、ロボットに提供する。この認識動作は、走行ロボットが大きな操舵や障害物回避動作を行った後に、停止状態で行われる。

前報では、自己位置を認識するために、hough 変換を用いて自然ランドマークの抽出を行う手法について報告した[2]。この手法は、カメラ姿勢は前方固定とし、ランドマークの抽出過程においてデッドレコニングの推定位置情報に大きく依存したものであったため、累積誤差が大きいとランドマークの抽出ができない場合があった。また、hough 変換の直線抽出精度に対して、カメラの姿勢誤差 (Δφ, Δθ)* の影響が大きいことや、hough 変換に要する計算時間が長いことも問題であった。

これらの課題を解決するため、カメラ台を能動的に制御して、選択したランドマークをカメラの視野内に確実に捉える手法を検討し、ロボットに搭載して走行試験を行った。その結果、ランドマークの抽出性能が向上し、ロボットの位置認識精度の改善が図られた。本手法は hough 変換を用いないために画像処理の計算量が軽減されて、高速化も可能になった。以下に、その位置認識手法を示す。

(* … φ：チルト方向角度, θ：パン方向角度)

(1) 蛍光灯を利用した位置認識 (図7)

本手法は、廊下および部屋内において、得られた原画像から蛍光灯の重心位置と慣性主軸の角度を求めることにより、蛍光灯からのロボットの相対位置を取得するものである。

デッドレコニングによる推定位置と実位置の誤差が大きい時には蛍光灯全体が画面内に入らない場合があり、この場合は正確な重心位置の計算ができない。そこで、蛍光灯全体の画像を取り込むためにカメラ台角度の自動調整機能を有している。

取得した原画像に対して、二値化、ラベリング処理等を行い、天井に映る蛍光灯の反射光を除去して、蛍光管が含まれる領域のみを抽出する。次に、抽出部分の慣性主軸を求め、この慣性主軸と蛍光灯抽出領域により蛍光灯の重心位置を求める。

得られた重心位置とカメラ台の角度パラメータにより、ロボットのグローバル座標位置 (X, Y, θ) が求められる。

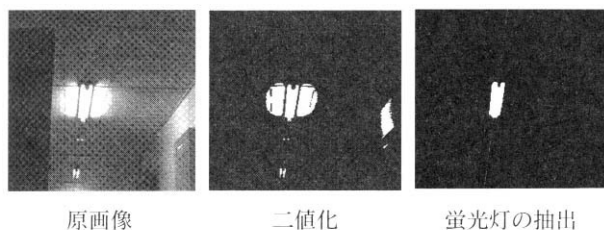


図7 蛍光灯を利用した位置認識

(2) 壁と床およびドアを利用した位置認識 (図8)

本手法は廊下において用いられるが、デッドレコニングの推定位置または前述 (1) により求められた座標位置を用いて壁と床およびドアをランドマークとして認識することにより、これらのランドマークからのロボットの相対位置を求めるものである。

はじめに、カメラを壁と床の境界にある巾木部分に向けて画像を取り込む。得られた原画像について、床と壁との境界線を抽出するために、x および y 方向の方向微分を行ってエッジを抽出し、最小二乗法により直線の方程式を求める。この直線上の点を透視変換によって実座標に変換することにより、壁までの相対距離と壁に対する角度が求められる。

一方、原画像を壁領域と床領域に分割し、それぞれの領域内におけるドア部分を抽出することにより、ドアの蝶番側の位置を求める。この位置をランドマークとして登録しておくことにより、計測結果とカメラ台の角度パラメータから、ロボットのグローバル座標位置 (X, Y, θ) が求められる。

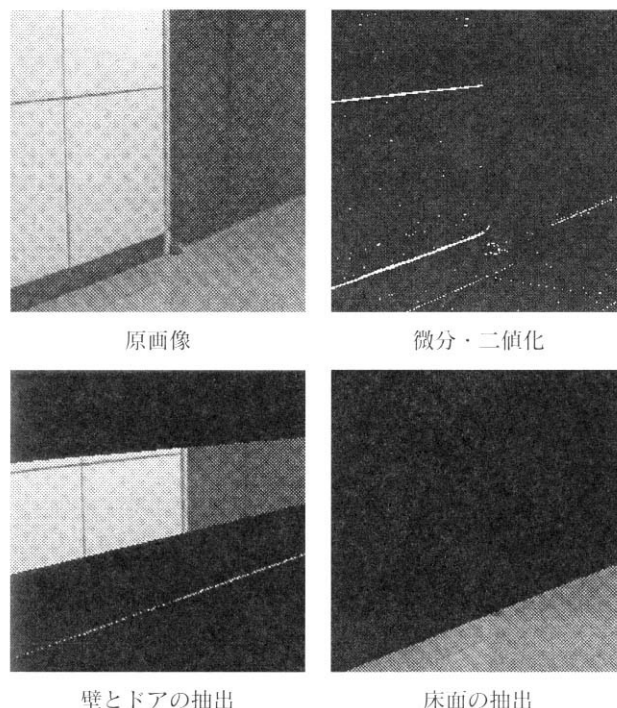


図8 壁と床およびドアを利用した位置認識

(1)および(2)の手法は、ロボットの自己位置の導出において、カメラ台の角度パラメータを用いるが、これらの角度はロボット車体を基準としており、床面の凹凸や傾斜の補正は行っていない。したがって、ロボットの位置認識精度は床面状態によって変化するが、今回の走行試験環境下における位置認識精度は、約4m離れたランドマークに対して、位置誤差は約 ± 0.4 m以内、姿勢誤差は約 ± 5 deg以内である。この時、認識精度は部屋の中で悪化しており、ランドマークとして設定した蛍光灯の画像の捉え方が誤差増大の要因と思われる。

視覚モジュールによって位置認識を行った後、デッドレコニングの推定位置が本手法の位置認識精度を越えている場合は、本手法の認識結果を真の自己位置とする。

3.3 直線経路への追従走行

本ロボットは、経路計画機能により生成された、直線走行とロボット中心における旋回走行の2つの走行パターンを組み合わせて走行する。この時、直進時における経路追従走行のために、比例制御 (P 制御) を用いて駆動輪制御を行っている。ここでは、追従させる直線からの位置ズレ Δd と姿勢角のズレ $\Delta \theta$ を偏差とし、左右駆動輪の回転数を制御量としてフィードバック制御ループを構成している。その直線追従の一例を図9に示す。

定常偏差の解消および応答性の向上のために PID 制御も検討したが、本試験条件下においては、P 制御に対する実用上の優位性が少なかった。よって現在は、計算負荷の軽減のため、P 制御のみを用いた駆動輪制御方式をとっている。

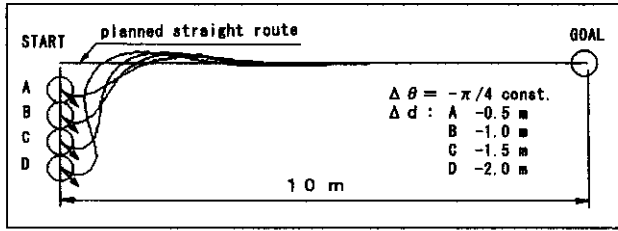


図9 直線への追従走行例

3.4 障害物回避

ロボットが人や未知の障害物に出会った場合、周辺環境を素早く認識して対応することが求められる。この行動規範の概念として、サブサンクションアーキテクチャ (SA) が提唱されており [7] [8] [9]、本ロボットの障害物回避機能は SA の概念を用いている。環境認識用の外界センサとして、7 個の赤外線センサ (IR) と 4 個の超音波センサ (USS)、および前後 2 つのバンパースイッチ (BSW) を実装している。図 10 に各センサの配置を示す。

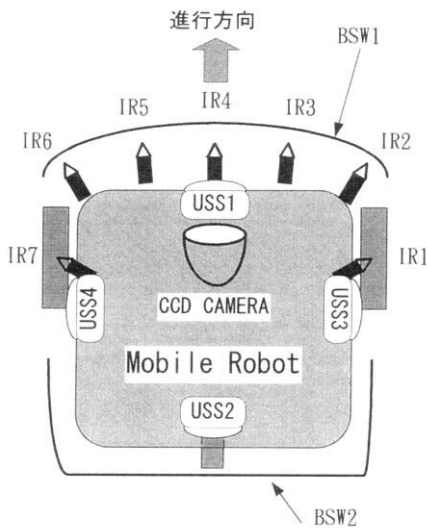


図10 外界センサの実装

通常、ロボットは経路に追従して走行するが、赤外線センサや超音波センサが前方の人や未知の障害物を検知すると、減速および操舵を行って衝突を回避する。また、場合によっては減速停止を行い、障害物が進路を開けてくれるのを待ったり、旋回と前後進を繰り返しながら走行可能な領域を探索する。さらに、万が一、衝突した場合はバンパースイッチにより衝突を検知して、即停上する。一定時間経っても障害物がそこにある場合は、一定距離を後退し、走行可能領域の探索行動を行う。走行可能領域を取得して障害物を回避した後は、ロボットは再度、経路追従機能により経路復帰を行う。

3.5 通信 [10]

ロボットは、空間伝搬光を利用して、オペレータとの情報通信を行う (図 11)。図 12 は、本ロボット用に開発した光通信モジュールであり、接続される形態により移動局と固定局とに分けられる。

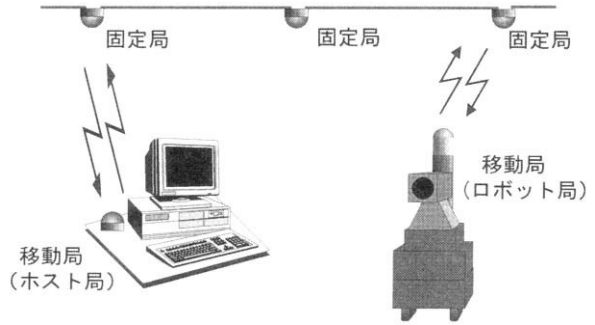


図11 光通信モジュールによる通信

移動局は通信中に移動可能なモジュールであり、ロボットに搭載されたロボット局とオペレータのコンピュータへ接続されたホスト局がある。ホスト局は 1 つに限定されるが、ロボット局は通信エリア内に複数存在することが可能である。また、ホスト局においても、固定局の通信範囲内であれば自由に移動ができる。

一方、固定局は天井などに固定され、互いにシリアル通信ケーブルで接続されたものであり、ロボットの移動範囲をカバーするように一定間隔で複数設置される。固定局は主にロボット局とホスト局の間のデータ転送を行っている。

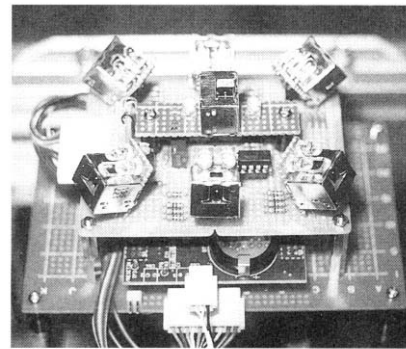


図12 試作した光通信モジュール

これらのモジュールは固有の ID 番号を付与され、この ID 番号により通信データの伝送制御を行っている。モジュールの動作内容を以下に示す。

- 1.5kbps によるデータ過信
- 宛先 ID によるデータの伝送制御 (固定局)
- 通信可能局の識別 (固定局)
- ロボット局の位置検出
- 受信データの誤り検出
- リプライ確認とリトライ処理

- ・受光状態の監視による信号の干渉の防止
- ・複数経路による信号の多重化のキャンセル

固定局は移動局からの信号を常にモニターすることで通信可能な移動局の識別を行い、通信経路の制御を行っている。この識別のために、移動局は位置通知信号を毎秒1回送出している。

また、この信号は受信した固定局により、自局のID番号や受光素子番号などの情報を付加されてホスト局へ転送される。ホスト局では、この情報と固定局の設置情報を照合することで、移動局のおおよその位置を知ることが出来る。

4. 走行試験結果および考察

4.1 試験環境

試作したロボット HIRIX-1 を用いて、デッドレコニングと視覚モジュールによる自己位置認識機能を利用した走行試験を行った。試験場所(図13)は当試験場研究棟3階の廊下および研究室内とし、その走行はエレベータ前ホールから廊下を経由して約60m離れた部屋内までとした。

最初に、光通信モジュールを利用して、オペレータから初期位置と姿勢および移動目的地の位置がロボットに与えられる。ロボットは経路計画を行った後、デッドレコニングによる位置推定と視覚モジュールによる自己位置認識機能、経路追従機能および障害物回避機能を利用して走行することとした。

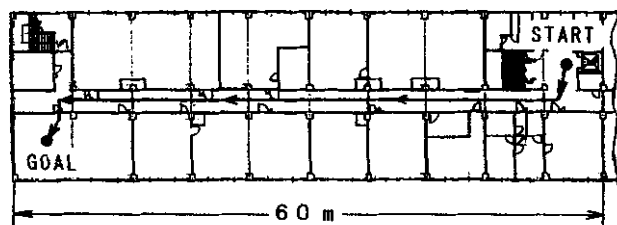


図13 試験環境

4.2 試験結果

試験結果を図14に示す。ロボットの実位置は視覚モジュールによる位置認識動作を行った各地点で実測して、位置認識精度の評価を行った。図中の軌跡は、計画経路とデッドレコニングの推定位置を示している。以下に結果を述べる。

- 1) ロボットは計画された走行経路に追に対して良好な追従走行を示した。
- 2) 視覚モジュールによる自己位置の補正(図中の○印地点)は、旋回走行後、または障害物回避を行った後の経路復帰時に行うこととしたが、試験においても適切に動作している状態が確認された。
- 3) 障害物回避機能によって、ロボットが人や開け放されたドア(図には描かれていない)を回避しながら走行してい

る様子がわかる(図中の*印地点)。特に部屋へ進入する場合は、ドアの幅が狭いにもかかわらず、経路追従機能と障害物回避機能が適切に動作選択されて、部屋へ進入することができた。

- 4) 目的地には、視覚モジュールの位置認識精度(±0.4m)の範囲内で到着することができた。

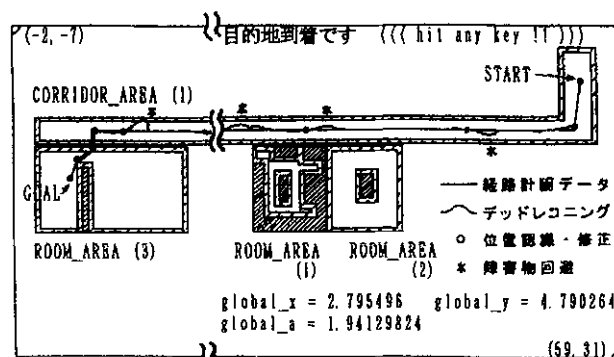


図14 走行試験結果

4.3 考察

走行試験結果から、自律走行性能の向上のための新たな課題が確認された。以下にその課題を示し、一部については取り組み状況を述べる。

1) 位置認識精度の向上

視覚モジュールによる位置認識精度が部屋の中において悪化する。その原因として、ランドマークに設定した蛍光灯の形状と見え方(姿勢)が考えられる。一般的に部屋の内部は廊下よりも障害物が多く存在し、走行可能領域が狭いので、位置認識精度の向上が必要である。

2) 位置認識動作の実時間処理

視覚モジュールによる位置認識は、ロボットの停止状態で行われ、30~90秒程度の計測時間を要する(i486DX4/100MHz相当)。実用化のためには、ハード、ソフト面共に処理時間の短縮化が必須であり、走行中に位置修正が行えることが望ましい。

3) 視覚モジュールによる周辺環境認識

本ロボットでは、視覚モジュールは自己位置補正用のみに使用されているが、カメラから得られる様々な画像情報を利用した走行ナビゲーション機能も非常に有効であり、様々な研究成果が報告されている[11][12][13]。本研究においても、画像情報を用いて実時間で環境を認識し、走行制御へ応用するための検討を行っている[14][15][16]。これは、直線抽出、二次微分、射影、差分などの基本的な画像処理を組み合わせることで短時間で環境を推定し、ロボットの走行ナビゲーションを行うものである。現在は当試験場の走行環境下において、若干の制約条件はあるが、画像処理機能だけでロボットを走行

させることが可能になっている。その画像処理例を図15に示す。今後、この周辺環境認識機能と位置認識機能を並行して動作させる予定である。

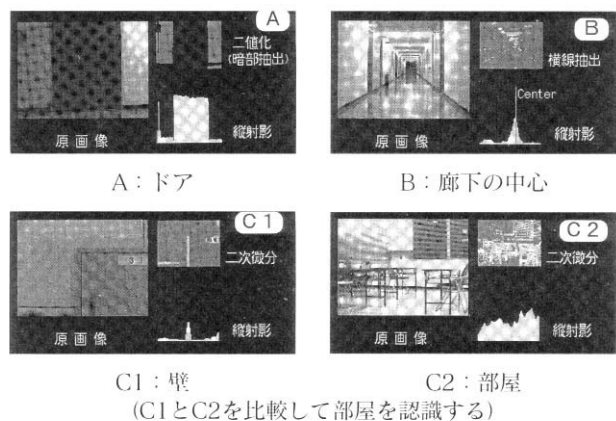


図15 周辺環境認識に用いた画像処理例

4) 誤差推定法を用いた自己位置補正動作

自己位置の補正動作は現在、旋回後と障害物回避動作中および経路復帰後に限定して行っている。一方、デッドレコニングの累積誤差を推定して、適時、補正を行う方法が提案されている[1][17][18]。これらの方法により、本ロボットの補正動作の適正化を図る必要がある。

5) 走行制御系の高機能化

直線と旋回による走行パターンに対して、よりスムーズな走行を行うためには、ロボットのダイナミクスを考慮した曲線走行をさせる必要がある。また、障害物回避機能についても、外界センサの適正配置および視覚モジュールによる画像情報の利用を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、視覚情報を用いた自律走行ロボットの開発を行った。試作したロボットは、建物内の廊下および部屋内のフラットフロア上を走行環境として、走行経路を自動生成した後、視覚モジュールおよび外界センサを利用して目的地まで自律走行することができる。「自律走行」という基本機能を活かして、案内ロボットや書類配送ロボットとしての応用が可能である。

今後の検討課題として、以下の項目が挙げられる。

- 1) 視覚モジュールを利用した自己位置認識手法の精度向上と処理時間の高速化
- 2) 視覚モジュールを利用した周辺環境認識手法の検討、および自己位置認識機能との並行動作の実現
- 3) より自律性が高く、効率的な走行制御手法の検討
- 4) 自律性を高めるための学習機能の付加
- 5) 地図情報入力 of 簡素化

今後は本研究成果を基にして、これらの課題に取り組むと共に、福祉現場や3K職場で求められる機能に絞り込んで、自律走行ロボットの実用化を検討していく予定である。

なお、本研究は東北・北海道ブロック広域共同研究（平成6年～8年度）にて行われたものである。

謝辞

本研究を推進するにあたり、ご指導頂きました東北工業技術研究所の鷲見新一室長、北海道工業技術研究所の池上真志樹主任研究官に謝意を表します。

参考文献

- [1]小森谷 清：環境の特徴点を用いる移動ロボットのナビゲーション技術に関する研究．機械技術研究所報告 第161号 Mar.1993
- [2]吉川 毅ほか7名：視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発．北海道立工業試験場報告 No.295 1996
- [3]H.Noborio：A Path-Planning Algorithm for Generation of an Intuitively Reasonable Path in an Unknown 2D Workspace．1990 Japan-USA FA Symposium, pp.477-480 (1990)
- [4]H.Noborio：Several Path-Planning Algorithms of a Mobile Robot for an Unknown Workspace and their Evaluation.IEEE Int.Work.Intel.Motion Control, Vol.1, pp.289-294 (1990)
- [5]深谷健一：自律走行ロボット用地図作成に関する検討．北海学園大学工学部研究報告, 第21号, pp.121-134 (1994)
- [6]本間稔規, 高橋裕之, 橋場参生：視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発 (第3報), 能動的ランドマーク計測による自己位置認識法．北海道立工業試験場報告 No.296 1997
- [7]R.A.Brooks：A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol.RA-2, No.1, pp.14-23, March (1986)
- [8]T.Gomi et al.:The Development of an Intelligent Wheelchair.Intelligent Vehicle Symposium (IV'96), Tokyo, Japan, September (1996)
- [9]T.Gomi：The TAO Project: Intelligent wheelchairs for the handicapped. AAI Fall Symposium, Boston, MA, November (1996)
- [10]大村 功, 澤山一博：視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発 (第5報), 走行ロボット搭載のための光情報通信システム．北海道立工業試験場報告 No.296 1997
- [11]西川和弘, 森 英雄：簡潔な経路情報を基にした移動

- ロボットの誘導法. 日本ロボット学会誌, Vol.12
No.8, pp.1183-1191 (1994)
- [12]大野孝之, 大矢晃久, 油田信一: 画像列の教示による
自律移動ロボットのナビゲーション. 第1回ロボティクス
シンポジウム予稿集, pp.111-116 (1996)
- [13]松本吉央, 稲葉雅幸, 井上博允: 視野画像列を利用し
た経路表現に基づくナビゲーション. 日本ロボット学会誌,
Vol.15 No.2, pp.236-242 (1997)
- [14]橋場参生ほか3名: 画像情報による屋内移動ロボットの
ナビゲーション方法の提案. 第15回日本ロボット学会
学術講演会予稿集, pp.229-230 (1997)
- [15]橋場参生ほか3名: 単眼視による移動ロボットのため
の3次元地図作成方法. 第15回日本ロボット学会学術講
演会予稿集, pp.203-204 (1997)
- [16]橋場参生, 本間稔規, 吉川 毅: 視覚システム搭載型
自律走行ロボットの開発(第4報), 画像情報による周辺
環境認識と走行制御への応用. 北海道立工業試験場報告
No.296 1997
- [17]油田信一, 上野暁彦: 移動ロボットの位置推定サブシ
ステム. 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp.49-54
(1993)
- [18]前山祥一, 大矢晃久, 油田信一: 複数のランドマーク
情報の並列処理を有効利用する移動ロボットの位置推定
法. 第5回ロボットシンポジウム予稿集, pp.81-86
(1995)