

ガイドポストと一台のカメラを用いる移動ロボットナビゲーション

瀧川 康裕*・黒木 秀一*・松尾 克宏**

宮本 俊一郎***・西田 健*

Mobile Robot Navigation Using Guideposts and a Single Camera

Yasuhiro FUCHIKAWA*, Shuichi KUROGI*, Katsuhiko MATSUO**,
Shunichiro MIYAMOTO*** and Takeshi NISHIDA*

A vision-based navigation method for a mobile robot is presented. The present method uses a number of guideposts placed along a navigation path in order for a mobile robot to self-localize and plan a path to go. Precisely, an artificial landmark and a bar-code are put on a face of the guidepost, where the former is used for self-localization and the latter for indicating a command for navigation. For self-localization and scanning a bar-code, a visual measurement system with a single camera is used for taking advantages of simpler and less cost method than stereo-vision system. Although the visual measurement method employed requires a couple of seconds for processing an image, we present a method of path planning for moving smoothly. We have verified that the navigation method works well by means of experiments using actual robot.

Key Words: vision-based navigation system, mobile robot, artificial landmark, vector quantization net, dead-reckoning with smooth path planning

1. はじめに

本論文では、複数のガイドポストと1台のカメラを用いる3次元位置計測システムを使用した自律移動ロボットのナビゲーションシステムについて述べる。

自律移動ロボットが活動するためには自分がどこに位置しているか、移動の妨げとなる障害物が周囲に存在していないかなどさまざまな情報を得る必要がある。特に現在位置を計測することは自律的に移動するロボットにとって最も基本的な機能であり、オドメトリセンサやジャイロスコープなどによるデッドレコニング、レーザや超音波による距離センサ、ビーコンなどのセンサネット、画像計測による方法など数多く提案されている^{1),2)}。画像計測による方法は広い空間の情報を一度に取得でき、さらに色や模様といった視覚情報を取得することができるというほかのセンサにない長所をもつが、画像から必要な情報を取り出すには大きな計算コストを必要とすることが多く、移動ロボットの誘導に適用す

る場合処理の遅れが問題になる。

画像計測による移動ロボットの位置推定はビューベースアプローチとモデルベースアプローチの二つに大別される³⁾。ビューベースアプローチではカメラから取得された画像と蓄積された画像のデータベースを比較することで現在位置を推定する方法で、モデルベースアプローチは画像中の特徴点の位置関係から幾何学的にロボットの位置を推定する方法である。モデルベースアプローチでは廊下の角や天井の電灯などの建物の構造物^{2),4),5)}や人工ランドマーク^{2),6)}が特徴点として利用され、ビューベースアプローチと比べて計算コストや記憶容量を必要としない。また、地図に関連づけられた特徴点や既知形状の人工ランドマークの位置関係から算出されるためビューベースアプローチと比較して推定精度が高い。

本論文で提案する手法はモデルベースアプローチに分類され、特徴点として既知形状の人工ランドマーク（以下、ランドマーク）を使用する。ランドマークは4つの特徴点からなり、4点の画像の写り方によってカメラの3軸周りの回転と位置が求められる。この手法は文献7)の方法を移動ロボットの姿勢計測のために改良した方法である。提案手法では人工ランドマークとバーコードを貼り付けたガイドポストを誘導経路上に複数設置し移動ロボットの誘導を行なう。バーコードはつぎのガイドポストへ向かうための指令を示し、グローバルマップを必要としない誘導システムの構築が可能となる。また、誘導経路の変更はガイドポストの設置位

* 九州工業大学工学部 北九州市戸畑区仙水町 1-1

** ジャトコ(株) 富士市今泉 700-1

*** 鹿児島大学法科大学院 鹿児島市郡元 1-21-30

* Department of Control Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu

** JATCO Ltd.

*** Kagoshima University Law School

(Received December 6, 2004)

(Revised September 16, 2005)

置とバーコードの変更だけで済む。

一般に画像計測は大きな計算コストを要し、画像計測によって姿勢推定を行なう場合その処理時間が移動ロボットを制御する上で無視できないものとなる。たとえば画像処理中もロボットが移動し続ける場合、計測結果はロボットの過去の姿勢を表わすので現在の姿勢をさらに推定することが必要となる。この問題に対処する方法として、画像処理中の移動ロボットの入力を用いて移動ロボットの状態の変化を計算し画像計測の結果と合わせる手法^{8),9)}を導入する。なお、この手法では姿勢の不確実性も推定することができるが、本稿ではこれを行わない。というのは、文献8)ではロボットの行動計画と画像処理の融合に姿勢の不確実性を必要としているためであるが、われわれの手法ではガイドポストの配置位置を工夫することで不確実性を減少させることができ、不確実性の計算を必要としないからである(2参照)。また文献9)の手法は複数のランドマークの認識結果を統合してグローバルマップ上での位置の不確実性を推定するための手法であり、グローバルマップを用いないわれわれの提案手法では用いることができない。

人工ランドマークをカメラで認識し移動ロボットの姿勢推定を行なう方法として本研究以外にも、蛍光灯とスリットからなるガイドポストを用いる方法¹⁰⁾、円形のマーク¹¹⁾や複数のQRコード^{6),12)}を用いる方法などが提案されている。齊らの方法¹⁰⁾はおのずから発光するガイドポストを使用するためマークやバーコードを使用するほかの手法と比べてカメラで認識しやすいが、ガイドポストのコストや設置の容易さの面で劣ると考えらる。また、Chengら¹¹⁾はハフ変換による遮蔽にロバストな人工ランドマーク認識と姿勢推定法を提案しているが、齊らと同様に計測精度の評価などにとどまりその手法を用いたナビゲーションには言及していない。人工ランドマークによるナビゲーション法として竹内⁶⁾らの方法があり、作業情報などを記録したQRコードの利用¹²⁾とその配置方法に関して研究が行なわれている。この方法では一度の姿勢推定に二つ以上の人工ランドマークを観測する必要がありまた、ほぼ直線の経路の誘導実験しか行っていない。一方、われわれの手法では一つ的人工ランドマークの観測で姿勢推定を行なうことができる。また、本稿では画像計測の時間遅れに対処しながら右左折を含む経路を滑らかに移動する手法について検討を行なう。

以下では、まずガイドポストを用いるナビゲーションの概要について述べ、つぎに画像計測によるロボットの姿勢(位置と進行方向)の推定方法、画像計測の時間遅れの補正方法と移動ロボットの誘導方法を説明し、最後に実際の移動ロボットを使用した誘導実験の結果を示す。

2. ガイドポストによるナビゲーションの概要

本手法は、移動ロボットが誘導経路に沿って配置された複数のガイドポストを順次画像計測しながら移動することにより、ロボットナビゲーションを行なうための手法であり、

以下の手順により行なう。

2.1 誘導経路の構成とガイドポストの設置

まず誘導経路の構成とガイドポストの設置を以下のように行なう。

誘導経路の構成： ロボットの誘導経路を直線および進行方向に対して直角に右左折する経路により構成する。ただし直線経路は厳密な直線だけではなく曲率半径が大きい経路を含めてもよいが、逆にUターンなどを含む曲率半径が小さな経路は上述の右左折(曲率半径は約30cm)以外は考えない。これはたとえばガイドポストの設置方向のみで経路誘導を行なうとすると、ロボットの走行速度と画像処理時間の関係により曲率半径が小さな経路誘導を行なうことができなくなることに起因している。この問題はガイドポスト上の指令マーク(本実験ではバーコード)の種類を増やすことにより解決できると考えられるが、本稿では複雑な議論を避けるため実用上有用な進行方向に直角な右左折と直線経路のみを扱う。

ガイドポストの設置： 構成した経路に沿ってガイドポストを設置する。ガイドポストは進路変更を指示するためおよびデッドレコニングにより蓄積された姿勢誤差を修正するために用いる。したがって進路変更を指示する右左折の直前、およびデッドレコニングによる姿勢誤差が大きくなりやすい右左折の直後と長い直線経路の途中(約2~4mおき)にガイドポストを設置する。またロボットはあるガイドポストを画像計測したあと直進または右左折を行ないそのまま直進するので、ロボットが滑らかに移動しながらガイドポストを画像計測できるように、ガイドポストはロボット進路の左斜め前(詳しくは後述の実験を参照)に置く。

2.2 ナビゲーション

ガイドポストの設置後、出発地点のガイドポストを画像計測できる位置にロボットを置き、ロボットを始動させる。するとロボットは直進を開始し、以下の処理を繰り返すことにより構成した経路に沿って移動する。

画像計測と操作履歴の記憶： ロボットはカメラを用いてガイドポストの画像を取得し、取得した画像を処理することによりロボットの現在の姿勢と目標姿勢(直進または右左折した後の姿勢)を算出する。ここでロボットの姿勢は画像取得したガイドポスト座標系でのロボットの位置と進行方向である。この画像処理中、ロボットは移動操作を継続するとともに、その操縦(移動操作)履歴を記憶する。

現在の姿勢の推定： 上記の画像処理により得られる画像取得時のロボットの姿勢と画像処理中の操縦履歴により現在の姿勢を推定する。

局所経路の設計と移動： 現在の推定姿勢から目標姿勢に滑らかに移動する局所経路(最後に画像取得したガイドポストの座標系における経路)を算出し移動する。目標姿勢に到達した後は、そのまま直進する。

以上が本手法によるロボットナビゲーションの概要である。以下、以上の各処理の詳細について説明する。

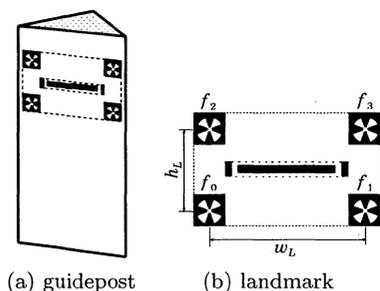


Fig. 1 Example of (a) a guidepost and (b) a landmark. The guidepost involves the landmark with for feature patterns $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$ and a barcode at the center of the landmark for indicating a command for navigation.

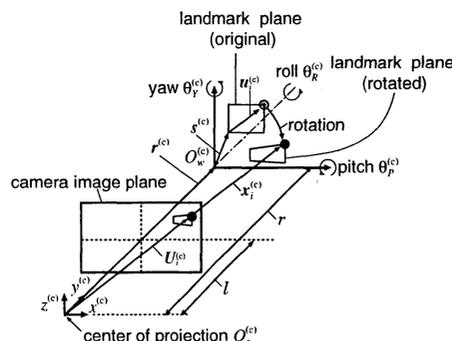


Fig. 2 Perspective view of the feature positions $u_i^{(c)}$, $x_i^{(c)}$ and $U_i^{(c)}$ in the camera coordinate system

3. 画像計測

3.1 ロボットの姿勢計測

ここではガイドポストを用いた姿勢計測の方法を述べる。経路上には Fig. 1(a) に示す形状のガイドポストが複数設置されており、それぞれのガイドポストを $g_j (j = 0, 1, \dots)$ で表わす。画像計測では移動ロボットに最も近い一つのガイドポスト g_j を用いて移動ロボットの姿勢計測と指令の取得を行なう。

ガイドポストの表面には4つの特徴点 $f_i \triangleq f_i(\mathbf{u}) \triangleq f(\mathbf{u} + \mathbf{u}_i) i \in I_f = \{0, 1, 2, 3\}$ をもつランドマークが貼り付けられている (Fig. 1(b))。ランドマークの特徴点は透視変換にロバストで特徴点の中心が正確に求められる形状として図示した四つ葉状のマークを使用する。各特徴点は同一形状であり、左下の特徴点 f_0 を原点とするランドマーク平面上での位置 $\mathbf{u}_i = (u_{ix}, u_{iz})^T$ を、

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0 &= (0, 0)^T, & \mathbf{u}_1 &= (w_L, 0)^T \\ \mathbf{u}_2 &= (0, h_L)^T, & \mathbf{u}_3 &= (w_L, h_L)^T \end{aligned} \quad (1)$$

と表わす。特徴点間の間隔は計測結果の精度に影響する要因の一つであり、本論文ではガイドポストからカメラまでの距離が 500[mm]~1500[mm] の範囲においてカメラで撮影できる大きさとして幅を $w_L = 200[\text{mm}]$ 、高さを $h_L = 100[\text{mm}]$ とした。

ランドマークをカメラで撮影するときの位置関係は Fig. 2 のように表わされ、ランドマーク平面上の特徴点 \mathbf{u}_i は回転、平行移動および中心射影によりカメラ画像上の座標 $U_i \triangleq (U_{ix}, U_{iz})^T$ に投影される。カメラの焦点距離 l を既知とすると U_i と \mathbf{u}_i の関係式よりガイドポスト g_j の座標系における移動ロボットの推定位置 $\hat{\mathbf{x}}^{(j)}$ と進行方向 $\hat{\theta}^{(j)}$ で表わされる推定姿勢 $\hat{\xi}^{(j)} \triangleq (\hat{\mathbf{x}}^{(j)}, \hat{\theta}^{(j)})^T$ が得られる (詳細は付録 A 参照)。

3.2 特徴点の検索

移動ロボットはランドマークに対してさまざまな姿勢を取り、画像中の特徴点は視点の変化に伴って変化する。また、走行中に特徴点の検索を行なう場合、特徴点検索に必要な計

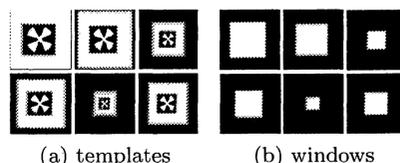


Fig. 3 Template and window patterns generated by a vector quantization net

算時間は短いことが望ましい。そこで、本研究では高速で対象画像の変形にロバストなテンプレートマッチング法として文献 13) の手法を用いる。この手法では特徴点の変形に対応するために複数個のテンプレート画像と任意形状のテンプレート画像領域を表わす窓画像を用いて処理が行なわれる。透視変換によるテンプレート画像と窓画像の変形パターンは一般に無限個存在し、効率的な処理を行なうためにベクトル量子化ニューラルネット¹⁴⁾を用いて代表的な N_t 個のテンプレートパターンと窓画像を生成しマッチングに使用する。ベクトル量子化の手法はさまざまな方法が提案されているが、文献 14) の方法は高次元ベクトルのベクトル量子化をすばやく行なうことができ局所解に陥りにくいという特徴があり、テンプレート画像の生成に使用している。ベクトル量子化によって生成したテンプレート画像と窓画像の例を Fig. 3 に示す。

画像とテンプレートとの相関値 $R(U)$ を求めた後、相関値の高い4点を特徴点座標 $\hat{U}'_i (i = 0, 1, 2, 3)$ とする。この座標は整数値であり、3次元位置計算においてより高精度な結果を得るために実数の特徴点座標 \hat{U}_i を求める。ここでは、特徴点座標 \hat{U}'_i の近傍において相関値 $R(U)$ は二次関数で近似されるとし、特徴点座標とその8近傍において最小二乗近似を行ない、その二次関数が最大値を取る座標を特徴点座標 \hat{U}_i として求める。

3.3 指令の取得

移動ロボットを誘導するための指令はバーコードによって与えられる。本稿の例では2bitのバーコードを使用しているので最大4通りの指令を表わすことができる。ここでは指令として直進、右折および左折の3つを扱うとする。それぞれの走行指令に対応する目標姿勢は移動ロボットに搭載され

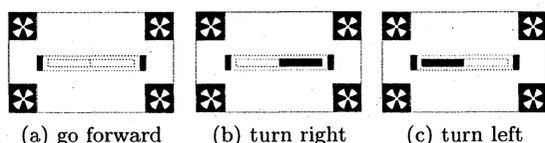


Fig. 4 Landmarks with barcodes indicating (a) go forward, (b) turn right and (c) turn left, used in the experiment below.

ているコンピュータに登録されており、移動ロボットは目標姿勢に至る局所経路を計画し走行する。ここで、目標姿勢とはガイドポスト座標系上での位置 $\mathbf{x}_{dst}^{(k)}$ および進行方向 $\theta_{dst}^{(k)}$ を表わす姿勢 $\xi_{dst}^{(k)} \triangleq (x_{dst}^{(k)}, y_{dst}^{(k)}, \theta_{dst}^{(k)})^T$, ($k = 0, 1, 2, 3$) である。

バーコードは Fig. 4 に示されるようにランドマーク中央に配置されており、両端の黒いマークは明度のしきい値を決定するのに使用され、中央の二つの領域が 2bit の情報を示す。これらの領域はランドマーク平面上で定義されおり、カメラ画像上での領域は姿勢推定で得られるパラメータと (A.3) 式から求めることができる。本稿では簡単化のため単純な 2bit のバーコードを用いているが、上で述べたように画像中のバーコード領域は容易に求めることができ、より多くの情報を取り扱えるほかの方式のもの、たとえば QR コードに変更することも可能である。そうしたとき、直進や右左折以外の走行指令を指示することや複数のロボットが混在する場合にそれぞれのロボットに対して異なる走行指令を与えることができる。

4. 移動ロボットのナビゲーション

4.1 移動ロボットのモデル

本研究で扱う移動ロボットは平面上を移動するものとし、時刻 t での姿勢を $\xi(t) \triangleq (\mathbf{x}(t), \theta(t))^T$ により表わす。ここで、 $\mathbf{x}(t) = (x(t), y(t))^T$ はロボットの位置、 $\theta(t)$ は進行方向を示す。移動ロボットへの入力を 4 個の駆動輪中心位置の並進速度の大きさ $v(t)$ [m/s] とその周りの回転角速度 $w(t)$ [rad/s] とし、これらを $\mathbf{v}(t) = (v(t), w(t))^T$ で表わす。入力 $\mathbf{v}(t)$ によるサンプリング時間 T_c 後の姿勢は

$$\xi(t+1) = \xi(t) + T_c \begin{bmatrix} v(t) \cos(\gamma(t)) \\ v(t) \sin(\gamma(t)) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\gamma(t) \triangleq \theta(t) + \frac{T_c w(t)}{2} \quad (3)$$

と求めることができる。

4.2 処理時間を考慮した姿勢推定

ここでは画像計測とロボット制御の流れを整理し、計測の遅れを考慮した姿勢推定の方法について述べる。以下ではあるガイドポストの画像を計測しそれを用いて誘導を行なうこととしガイドポストを区別する添え字を省略する。まず、Fig. 5 に基本的な処理の流れを示す。移動ロボットはサンプリング時間間隔 $T_c = 0.1$ [s] で走行が制御され、並行して

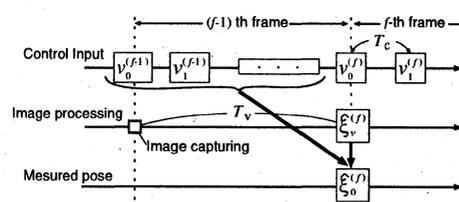


Fig. 5 The time diagram of control and image processing

位置推定のための画像処理も行なわれている。画像計測による位置推定の結果は約 3 秒間隔で得られその間隔を T_v [s] で表わしその間をフレームと呼ぶ。第 f フレーム内での時刻を k ($k = 0, \dots, N^{(f)} - 1$) で表わし、処理全体の時刻を $t_k^{(f)} \triangleq T_c(k + \sum_{m=0}^{f-1} N^{(m)})$ と表記し、時刻 $t_k^{(f)}$ での推定姿勢と入力をそれぞれ $\hat{\xi}_k^{(f)} \triangleq \hat{\xi}(t_k^{(f)})$, $\mathbf{v}_k^{(f)} \triangleq \mathbf{v}(t_k^{(f)})$ と表わす。 f 番目に取り込まれた画像は第 $(f-1)$ フレームで処理が行なわれ、第 f フレームの開始時刻 $t_0^{(f)}$ にその結果が得られる。画像計測で得られる推定姿勢 $\hat{\xi}_v^{(f)}$ は $t_0^{(f-1)}$ での推定姿勢であり、第 $(f-1)$ フレームでの移動ロボットへの入力 $[\mathbf{v}_0^{(f-1)}, \dots, \mathbf{v}_{N^{(f-1)}-1}^{(f-1)}]$ を用いて以下のように推定姿勢 $\hat{\xi}_0^{(f)}$ を求める。

$$\hat{\xi}_0^{(f)} = \hat{\xi}_v^{(f)} + \sum_{i=0}^{N^{(f-1)}-1} T_c \begin{bmatrix} v_k^{(f-1)} \cos(\gamma_k^{(f-1)}) \\ v_k^{(f-1)} \sin(\gamma_k^{(f-1)}) \\ w_k^{(f-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.3 局所経路の設計とデッドレコニング走行

移動ロボットの局所経路を 3 次スプライン関数

$$y = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (5)$$

で表わし、目標姿勢 ξ_{dst} と推定姿勢 $\hat{\xi}_0^{(f)}$ を境界条件とする (5) 式の係数を求める。このとき、局所経路の始点または終点における進行方向が ± 90 [deg] に近いとき $\phi = dy/dx$ が無限大に近づき正しく係数が求められなくなるので、 $\bar{\theta} = (\hat{\theta}_0^{(f)} + \theta_{dst})/2$ で回転した姿勢

$$\hat{\mathbf{x}}_0^{(f)} := \mathbf{R}(-\bar{\theta}) \hat{\mathbf{x}}_0^{(f)} \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_0^{(f)} := \hat{\theta}_0^{(f)} - \bar{\theta} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_{dst} := \mathbf{R}(-\bar{\theta}) \mathbf{x}_{dst} \quad (8)$$

$$\theta_{dst} := \theta_{dst} - \bar{\theta} \quad (9)$$

を用いてスプライン関数の係数を以下のように求める。

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \hat{a}_3 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} 1 & \hat{x}_0^{(f)} & (\hat{x}_0^{(f)})^2 & (\hat{x}_0^{(f)})^3 \\ 0 & 1 & 2\hat{x}_0^{(f)} & 3(\hat{x}_0^{(f)})^2 \\ 1 & \mathbf{x}_{dst} & (\mathbf{x}_{dst})^2 & (\mathbf{x}_{dst})^3 \\ 0 & 1 & 2\mathbf{x}_{dst} & 3(\mathbf{x}_{dst})^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{y}_0^{(f)} \\ \hat{\phi}_0^{(f)} \\ \mathbf{y}_{dst} \\ \phi_{dst} \end{bmatrix} \quad (10)$$

つぎに、得られた局所経路に沿って移動するための入力 $\mathbf{v}_k^{(f)}$ を求める方法を述べる。移動ロボットが 1 サンプリング時間の間に並進速度 $v_k^{(f)}$ で $\mathbf{x}_k^{(f)}$ から $\mathbf{x}_{(k+1)}^{(f)}$ へ移動するとき、移動距離に関して以下の 6 次方程式が成り立つ。

$$(v_k^{(f)})^2 T_c^2 = (x_{(k+1)}^{(f)} - x_k^{(f)})^2 + (\hat{a}_3(x_{(k+1)}^{(f)})^3 + \hat{a}_2(x_{(k+1)}^{(f)})^2 + \hat{a}_1 x_{(k+1)}^{(f)} + \hat{a}_0 - y_k^{(f)})^2 \quad (11)$$

ロボットの並進速度 $v_k^{(f)}$ はあらかじめ与えられており、 $x_k^{(f)}$ から 1 サンプル後に到達可能なつぎの局所経路上の位置 $x_{(k+1)}^{(f)}$ とそこへ移動するための角速度 $w_k^{(f)}$ は (11) 式をニュートン法などを用いて初期姿勢 $\xi_0^{(f)}$ から $k = 1, 2, \dots$ に対して順に計算することで求めることができる。したがって、求めた $w_k^{(f)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) を用いて移動操作を行なうと $\xi_k^{(f)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) を経由するデッドレコニング走行を行なうことになる。

5. 実験

本論文で提案した手法の有効性を検討するために以下のように姿勢推定精度の測定実験と誘導実験を行なった。

5.1 姿勢計測精度の測定実験

画像計測システムはワイドコンバートレンズを装着した Canon 製ビデオカメラ VC-C4R で撮影を行ない、ビデオキャプチャボードを介して 640×480 [pixel], 8bit グレースケール画像として取り込む。取り込まれた画像は画素の縦横比、光軸中心のずれや歪曲収差による歪みの補正が行われた後に画像計測に使用される。特徴点探索に使用するテンプレート画像として Fig. 3 に示した画像を使用する。これはガイドポストを撮影するときカメラとの距離が 500 [mm] から 1500 [mm] 程度になると想定して VQ により生成したテンプレートである。

本実験におけるカメラとガイドポストの位置関係を Fig. 6 に示す。図中の d はカメラの計測基準点からランドマーク原点までの距離を表わし、 α はガイドポストの回転を表わす。距離の測定精度を調べるため $\alpha = 0$ [deg] で距離を $d = 500, 750, 1000, 1250, 1500$ [mm] と変化させて画像計測を行ない、また角度の測定精度を調べるため $d = 1000$ [mm] で角度を $\alpha = 0, 15, 30, 45$ [deg] と変化させて画像計測を行なった。それぞれ 10 回の姿勢推定を行ない、距離 d と角度 α について誤差の平均値とその標準偏差を算出した。

実験結果を Fig. 7 (a) および (b) に示す。図中の実線は平均誤差を表わし、縦棒は標準偏差を表わす。この図より距離の最大誤差は 16 [mm] 程度、角度の最大誤差も 6 [deg] 程度であり移動ロボットの誘導に十分な測定精度が得られているといえる。

5.2 誘導実験

誘導実験で用いた移動ロボットは Fig. 8 に示す iRobot ATRV-Mini を用いた。この移動ロボットは Pentium III 1GHz プロセッサを搭載したコンピュータが内蔵されており、OS として Red Hat Linux 6.2 がインストールされている。ガイドポストを撮影するカメラは進行方向から左 45 [deg] 方向を向けてロボット上部に搭載されている。ランドマーク検

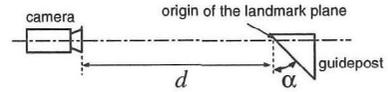


Fig. 6 Relative pose of a camera and a guidepost

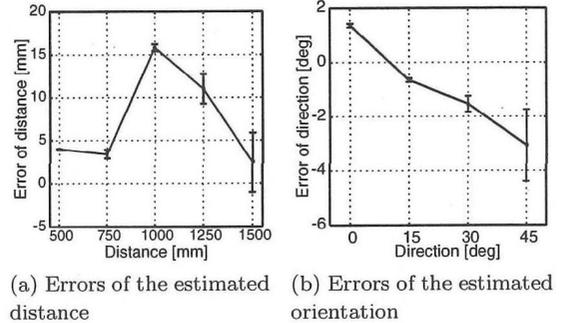


Fig. 7 Errors of pose estimation

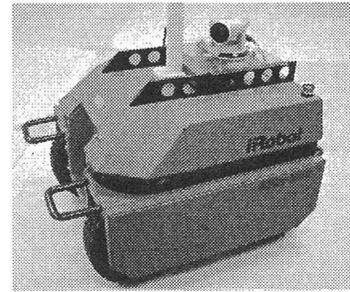


Fig. 8 The mobile robot (ATRV-Mini) and the camera (Cannon VC-C4R)

出に用いる画像計測システムの概要は 5.1 に示したものと同じである。

つぎに実験を行なった誘導経路を Fig. 9 に示す。この経路は 8 個のガイドポスト g_j ($j = 0, \dots, 7$) が配置されており、 g_0 および g_4 は直進、 g_1, g_2 および g_3 は左折、 g_5, g_6 および g_7 は右折の走行指令を表わすバーコードが貼られている。また、直進、右折および左折が示す目標姿勢はそれぞれ $\xi_{dst}^{(0)} = (650, 1000, 90)^T$, $\xi_{dst}^{(1)} = (0, 650, 180)^T$, $\xi_{dst}^{(2)} = (914, 164, 0)^T$ とした。図中の破線は各ガイドポスト g_j での姿勢 $(650, 0, 90)^T$ と目標姿勢 $\xi_{dst}^{(k)}$ を通る経路を (5) 式で求めた目標経路を示し、1 周の経路長は約 15 [m] となっている。

本実験では移動ロボットを一定の速度 $v(t) = 0.07$ [m/s] で誘導経路上を 3 周走行させ、その移動経路をレーザーレンジファインダ (LRF) で測定した。レーザーレンジファインダ (LRF) は Fig. 9 の原点に設置されており、LRF から移動ロボットの上部に垂直に立てた円筒までの位置を測定した。

5.3 誘導実験の結果

移動ロボットが走行した経路を Fig. 10 に示す。図中の 1 点鎖線は目標経路を示し、実線は移動ロボットの走行した経路を示す。今回使用した LRF の水平方向の角度分解能は 0.25 [deg], 距離の精度は ± 0.015 [m] となっている。各図の

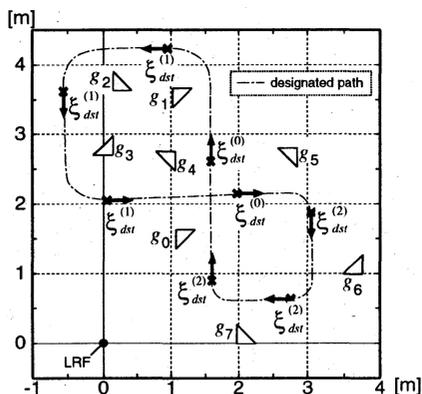


Fig. 9 The test course. $\xi_{dst}^{(k)}$ indicates the target pose

走行経路に沿って振幅が約 0.05[m] 程度の振動が見られるがこれは LRF の計測誤差によるもので、実際には移動ロボットは滑らかに移動していた。

Fig. 10 を見るとガイドポスト g_5 から g_7 の右折経路では 3 周とも目標経路の内側を走行しているのがわかる。これは右折の曲率半径が小さいためタイヤのスリップなどのシステム誤差により目標経路に沿って移動することができなかったためだと考えられる。右折区間における位置の誤差は最大で約 0.15[m] であり、いったん誤差が生じて経路から外れてもつぎの画像計測により誤差を修正することができた。

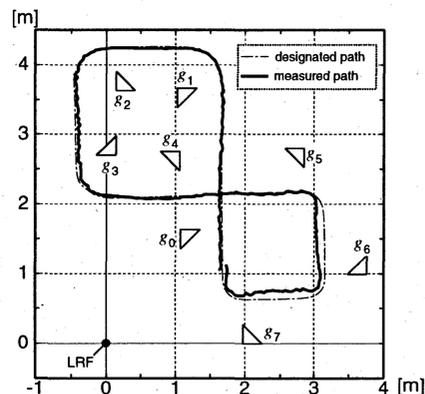
3 周目の結果 (Fig. 10(c)) を見るとガイドポスト g_3 後の左折で移動ロボットの経路が目標経路の外側に約 0.2[m] 外れているのがわかる。今回の実験環境ではガイドポスト g_1 , g_2 がある側 (グラフの上方) には窓がありほかの側より明るかったので g_1 および g_2 の角を曲がる付近では時々カメラの露出調整が正しく働かず画像が不鮮明になることがあった。提案手法で使用している LOG 符号相関は照明の変化にロバストであり、特徴点探索に失敗することはなかったが、特徴点位置に誤差が含まれ姿勢推定に影響を及ぼしたと考えられる。しかし、ここでもつぎのガイドポスト g_4 が示す目標姿勢に達するまでは経路が修正されていることがわかる。

6. 結 論

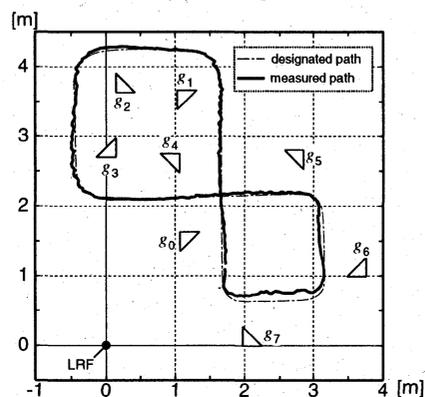
本論文では一台のカメラとガイドポストを用いる 3 次元位置計測システムを使用した自律移動ロボットのナビゲーションシステムを提案した。提案手法では移動ロボットの位置推定と誘導指令の取得に画像計測を用い、処理時間の遅れを修正して誘導を行なう方法を示した。また、提案手法を用いた移動ロボットの誘導実験として直進および右左折を含む経路で実験を行ない、その有効性を確認した。

参 考 文 献

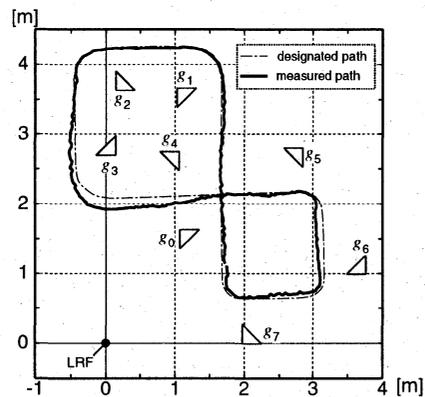
- 1) J. Borenstein, H. R. Everett and L. Feng: Where an I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, University of Michigan (1996)
- 2) Guilherme N. DeSouza and Avinash C. Kak: Vision for



(a) 1st trip



(b) 2nd trip



(c) 3rd trip

Fig. 10 Result of navigation

Mobile Robot Navigation: A Survey, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **24**-2, 237/267 (2002)

- 3) 松本, 稲葉, 井上: ビューベースアプローチに基づく移動ロボットナビゲーション, 日本ロボット学会誌, **20**-5, 506/514 (2002)
- 4) M. Betke and K. Gurvits: Mobile robot localization using landmarks, IEEE Trans. Robotics and Automation, **13**-2, 251/263 (1997)
- 5) 福田, 伊藤, 太田, 新井, 阿部, 田中: 自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム, 日本機械学会誌 (C), **60**-573, 1743/1750 (1994)
- 6) 竹内, 太田, 池田, 相山, 新井: 人工ランドマークを用いた移動ロボットのナビゲーション, 日本機械学会誌 (C), **66**-647, 2239/2246 (2000)
- 7) S. Kurogi, Y. Fuchikawa, T. Ueno, K. Matsuo and T.

Nishida: Visual measurement of 3D positions of elevator buttons from a mobile robot using a competitive neural net for pattern recognition invariant to projective transformations, Proc. of SCI'02, 693/698 (2002)

- 8) A. Kosaka, M. Meng and A. C. Kak: Vision Guided Mobile Robot Navigation Using Retroactive Updating of Position Uncertainty, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, **2**, 1/7 (1993)
- 9) 前山, 大矢, 油田: 移動ロボットのための適応的現在位置推定法—処理時間を要する外界センサデータの利用—, 日本ロボット学会誌, **15-7**, 1075/1081 (1997)
- 10) 齊, 大川: 移動ロボットの誘導のための立体標識, 日本ロボット学会誌, **9-2**, 129/136 (1991)
- 11) Cheng-Chin Lin and R. Lal Tummala: Mobile Robot Navigation Using Artificial Landmarks, Journal of Robotic Systems, **14-2**, 93/106 (1997)
- 12) 太田, 山本, 池田, 相山, 新井: 記憶機能付き画像マークによる作業移動ロボットのための環境整備, 日本機械学会誌 (C), **17-5**, 670/676 (1999)
- 13) 瀧川, 黒木: ラプラシアン・ガウシアン符号とベクトル量子化ネットワークを用いる座標変換にロバストな高速画像照合法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J87-D-II-10**, 1940/1950 (2004)
- 14) 西田, 黒木, 佐伯: 再初期化法を用いた適応ベクトル量子化, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J84-D-II-7**, 1503/1511 (2001)
- 15) J. Rekimoto: Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality, in Proc. of APCHI'98 (1998)
- 16) 羽田, 高瀬, 鮎沢: マークベースト 3 次元ビジョンシステムの開発, 電気学会論文誌 C, **120-5**, 625/633 (2000)

《付 録》

A. 人工ランドマークによるロボットの姿勢推定

ランドマークをカメラで撮影するときの位置関係は Fig. 2 のように表わされ, ランドマーク平面上の特徴点 \mathbf{u}_i は回転, 平行移動および中心射影によりカメラ画像上の座標 $\mathbf{U}_i \triangleq (U_{ix}, U_{iz})^T$ に投影される. 以上の関係はカメラ座標系 $\mathbf{x} \triangleq (x, y, z)^T$ の x, y, z 方向をそれぞれカメラの右方, 前方, 上方とし, カメラの焦点距離を l , 特徴点の座標 \mathbf{u}_i および \mathbf{U}_i を 3次元に拡張したベクトル $\mathbf{u}_i^{(c)} \triangleq (u_{ix}, 0, u_{iz})^T$, $\mathbf{U}_i^{(c)} \triangleq (U_{ix}, l, U_{iz})^T$ を用いてつぎの式で表わされる.

$$\mathbf{U}_i^{(c)} = k_i \mathbf{x}_i = k_i (\mathbf{A}(\mathbf{u}_i^{(c)} + \mathbf{s}) + \mathbf{r}^{(c)}) \quad (\text{A.1})$$

この式は以下のように導出することができる. まず, 4つの特徴点 \mathbf{u}_i ($i \in I_f$) が投影中心から距離 r だけ離れたカメラ光軸 (y 軸) に直交する平面上にあるとする. その平面とカメラ光軸との交点 $O_w^{(c)}$ からランドマークの原点 $\mathbf{u}_0^{(c)} = (0, 0, 0)^T$ へのベクトルを $\mathbf{s}^{(c)} \triangleq (s_u, 0, s_v)^T$ で表わし, 各特徴点座標 $\mathbf{u}_i^{(c)} + \mathbf{s}^{(c)}$ が $O_w^{(c)}$ を中心に回転行列 $\mathbf{A} \triangleq [a_{ij}]$ ($i, j = \{0, 1, 2\}$) で回転されて実際の位置 $\mathbf{x}_i^{(c)} \triangleq \mathbf{A}(\mathbf{u}_i^{(c)} + \mathbf{s}^{(c)}) + \mathbf{r}^{(c)}$ に移された後さらに拡大率 k_i の中心射影により $\mathbf{U}_i^{(c)}$ に投影されるとして導いている. ここで, $\mathbf{r}^{(c)}$ は射影中心 $O_c^{(c)}$ から $O_w^{(c)}$ へのベクトルであり, 回転行列 \mathbf{A} はヨー角, ピッチ角, ロール角の回転を順に施した回転行列で, $c_R \triangleq \cos \theta_R^{(c)}$, $c_P \triangleq \cos \theta_P^{(c)}$, $c_Y \triangleq \cos \theta_Y^{(c)}$,

$s_R \triangleq \sin \theta_R^{(c)}$, $s_P \triangleq \sin \theta_P^{(c)}$, $s_Y \triangleq \sin \theta_Y^{(c)}$ とおくと,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_R c_Y & s_P s_R - c_P c_R s_Y & c_P s_R + c_R s_P s_Y \\ s_Y & c_P c_Y & -c_Y s_P \\ -c_Y s_R & c_R s_P + c_P s_R s_Y & c_P c_R - s_P s_R s_Y \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

となる. さらに (A.1) 式から k_i を消去すると,

$$\mathbf{U}_i^{(c)} = \frac{l \begin{bmatrix} a_{00} & a_{02} \\ a_{20} & a_{22} \end{bmatrix} (\mathbf{u}_i + \mathbf{s})}{[a_{10}, a_{12}] (\mathbf{u}_i + \mathbf{s}) + r} \quad (\text{A.3})$$

が得られる.

(A.3) 式は人工ランドマークの幅 w_l と高さ h_L , 焦点距離 l , および特徴点座標 \mathbf{u}_i と \mathbf{U}_i が既知である場合 \mathbf{A} , $\mathbf{s}^{(c)}$ および $\mathbf{r}^{(c)}$ について解くことができる. まず, (A.3) 式より,

$$\Phi = \mathbf{M} \Psi \quad (\text{A.4})$$

を導出すると,

$$\Phi \triangleq [lu_{0x}, 0, lu_{1z}, 0, lu_{2x}, 0, lu_{3x}, 0] \quad (\text{A.5})$$

$$\Psi \triangleq [\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_3] \quad (\text{A.6})$$

$$\Psi_i \triangleq \begin{bmatrix} lv_{iz} & U_{ix} u_{ix} & U_{ix} u_{iz} & 0 & 0 & l & U_{ix} & 0 \\ 0 & U_{iz} u_{ix} & U_{iz} u_{iz} & lu_{ix} & lu_{iz} & 0 & U_{iz} & l \end{bmatrix}^T \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (\text{A.7})$$

は既知行列であり,

$$\mathbf{M} \triangleq [M_0, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7] \quad (\text{A.8})$$

$$\triangleq \frac{1}{a_{00}} (-a_{02}, a_{10}, a_{12}, -a_{20}, -a_{22}, -a_x, a_y, -a_z) \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} a_{00} & a_{02} & 0 \\ a_{10} & a_{12} & 1 \\ a_{20} & a_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ r \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{D} \begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ r \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

は未知行列となる. 回転行列 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]$ の正規直交性 $\|\mathbf{a}_i\| = 1$, $\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_j = 0$ ($i \neq j$) を用いると, 座標変換パラメータの推定値が以下のように順に求まる.

$$\widehat{\mathbf{M}} := \Phi \Psi^{-1} \quad (\text{A.11})$$

$$\widehat{a}_{00} := \left(1 + \widehat{M}_1^2 + \widehat{M}_3^2 \right)^{-1/2} \quad (\text{A.12})$$

$$\widehat{a}_{10} := \widehat{M}_1 \widehat{a}_{00} \quad (\text{A.13})$$

$$\widehat{a}_{20} := -\widehat{M}_3 \widehat{a}_{00} \quad (\text{A.14})$$

$$\widehat{a}_{02} := -\widehat{M}_0 \widehat{a}_{00} \quad (\text{A.15})$$

$$\widehat{a}_{12} := \widehat{M}_2 \widehat{a}_{00} \quad (\text{A.16})$$

$$\widehat{a}_{22} := -\widehat{M}_4 \widehat{a}_{00} \quad (\text{A.17})$$

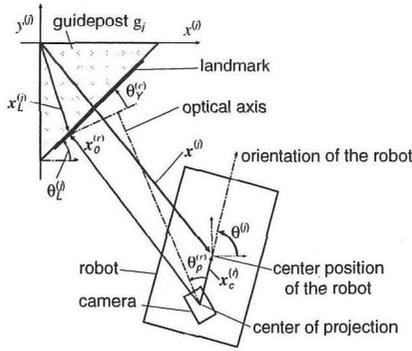


Fig. A.1 Overhead view of the robot, the camera, the guidepost and the landmark.

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \end{bmatrix} := - \begin{bmatrix} \hat{a}_{00} & \hat{a}_{20} \\ \hat{a}_{02} & \hat{a}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{a}_{10} \\ \hat{a}_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

$$\hat{a}_{11} := (1 + \hat{b}_0^2 + \hat{b}_1^2)^{-1/2} \quad (\text{A.19})$$

$$\hat{a}_{01} := \hat{b}_0 \hat{a}_{11} \quad (\text{A.20})$$

$$\hat{a}_{21} := \hat{b}_1 \hat{a}_{11} \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_u \\ \hat{s}_v \\ \hat{r} \end{bmatrix} := \hat{a}_{00} \hat{D}^{-1} \begin{bmatrix} -\hat{M}_5 \\ \hat{M}_6 \\ -\hat{M}_7 \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$$\hat{\theta}_Y^{(c)} := \sin^{-1}(\hat{a}_{10}) \quad (\text{A.23})$$

$$\hat{\theta}_P^{(c)} := -\sin^{-1}(\hat{a}_{12} / \cos \hat{\theta}_Y^{(c)}) \quad (\text{A.24})$$

$$\hat{\theta}_R^{(c)} := -\sin^{-1}(\hat{a}_{20} / \cos \hat{\theta}_Y^{(c)}) \quad (\text{A.25})$$

ここで、 $:=$ は右辺で計算した値を左辺に代入することを表わし、 (\hat{b}_0, \hat{b}_1) は $(a_{01}/a_{11}, a_{21}/a_{11})$ の推定値を表わす。以上で得られた推定パラメータを用いてカメラ座標系におけるランドマーク原点の推定位置 $\hat{x}_0^{(c)}$ は

$$\hat{x}_i^{(c)} := \hat{A}(\mathbf{u}_i^{(c)} + \hat{\mathbf{s}}^{(c)}) + \hat{\mathbf{r}}^{(c)} \quad (\text{A.26})$$

より $i=0$ として求めることができる。

移動ロボットに搭載されているカメラの向きを進行方向からのパン角 $\theta_p^{(r)}$ とロボットの移動平面からのチルト角 $\theta_t^{(r)}$ で表わし、カメラ座標系の xy 平面を移動平面上に投影した座標系でのロボットの位置を $\mathbf{x}_c^{(r)}$ とする。また、ランドマークの原点 $\hat{x}_0^{(c)}$ をこの2次元座標系に投影した座標は

$$\hat{x}_0^{(r)} := \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_t^{(r)}) & -\sin(\theta_t^{(r)}) \end{bmatrix} \hat{x}_0^{(c)} \quad (\text{A.27})$$

で計算される。さらに、ガイドポスト g_j の座標系でのランドマーク原点の位置 $\mathbf{x}_L^{(j)}$ とランドマーク平面の向き $\theta_L^{(j)}$ はあらかじめ計測されており既知であるとする、以上の関係はFig. A.1のように表わされ、移動ロボットの推定位置

$\hat{\mathbf{x}}^{(j)}$ と進行方向 $\hat{\theta}^{(j)}$ は

$$\hat{\mathbf{x}}^{(j)} := \mathbf{x}_L^{(j)} + \mathbf{R}(\theta_L^{(j)} - \hat{\theta}_Y^{(c)})(\mathbf{x}_c^{(r)} - \hat{\mathbf{x}}_0^{(r)}) \quad (\text{A.28})$$

$$\hat{\theta}^{(j)} := \theta_L^{(j)} - \theta_p^{(r)} - \hat{\theta}_Y^{(c)} + \frac{\pi}{2} \quad (\text{A.29})$$

と求めることができる。ここで、 $\mathbf{R}(\theta)$ は回転行列を示す。

[著者紹介]

瀧川 康裕 (学生会員)



平成13年九州工業大学・工学部・機械知能工学科卒、平成15年同大学院博士前期課程修了。現在同大学院博士後期課程に在学中。主にニューラルネットによるパターン認識の研究に従事。電子情報通信学会、日本神経回路学会の会員。

黒木 秀一 (正会員)



昭和55年九州工業大学・工学部・電気学科卒。昭和60年東京工業大学大学院博士課程修了。同年より九州工業大学・制御・助手を経て平成3年・同大・助教授。工博。主にニューラルネットの研究に従事。電子情報通信学会、日本神経回路学会などの会員。

松尾 克宏



平成14年九州工業大学工学部機械知能工学科卒業、平成16年同大学院博士前期課程修了。同年ジャトコ(株)入社、現在に至る。

宮本 俊一郎



平成16年九州工業大学工学部機械知能工学科卒業。同年鹿児島大学大学院司法政策研究科法曹実務専攻入学、現在に至る。

西田 健 (正会員)



平成10年九州工業大学・工学部・設計生産工学科卒。平成14年同大学院博士後期課程修了。同年九州工業大学・機械知能工学科助手。主にニューラルネットによるパターン認識に関する研究に従事。博士(工学)。日本神経回路学会、電子情報通信学会などの会員。