

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 —

本間 稔規, 高橋 裕之, 橋場 参生

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

— Recognition of Self-Position by Active Visual Measurement of Landmark —

Toshinori HONMA, Hiroyuki TAKAHASHI, Mitsuo HASHIBA

抄 録

自律的に移動するロボットには、移動する環境内における自己の位置や周囲の状況を認識する機能が不可欠である。本自律走行ロボットでは、環境内における蛍光灯やドア、壁と床の境界線を目印（自然ランドマーク）として自己位置計測を行うための視覚モジュールの開発を行った。視覚モジュールは、走行制御系からの位置情報をもとに能動的にランドマークにカメラを向け、ランドマークからの相対位置、角度（姿勢）を求め、自己位置を認識する。この視覚モジュールを自律走行ロボットに搭載し、計測精度について評価を行った。

1. はじめに

自律的に移動するロボットには、移動する環境における自己の位置や周囲の状況を認識する機能が不可欠である。本自律走行ロボットも、屋内の走行環境内にあるランドマークを計測し、ランドマークからの相対位置、角度を求めることにより自己位置を認識する。前報ではランドマークの位置を計測する方法として、直線検出用 Hough 変換を用いる方法を報告した。この方法では、CCD カメラを水平に固定し、走行環境内の壁面の境界線位置を求め、この位置を利用して蛍光灯ランドマークの位置を求めている。近年、Hough 変換を応用した画像処理は、専用ハードウェアを用いて高速化することにより実時間処理が可能となりつつあるが、原理的に長い計算時間と大容量のメモリを必要とする。しかし、現状ではこのような高速ハードウェアの導入は困難なため、ノート型パーソナルコンピュータと画像入力ボードを用いたシステムを開発した。処理の高速化のために、画像全体を対象とせず、処理すべき部分を限定している。しかし、この方法では、環境内でのカメラの位置と姿勢が高精度に求められていることが必要である。すなわち、カメラの推定位置、姿勢の誤差が大きくなると、計測される位置、姿勢の精度が極端に低下する。

そこで、本報告では CCD カメラの位置、姿勢に誤差が含

まれていても、頑健にランドマークの計測を行う方法について検討し、計測実験、評価を行った。

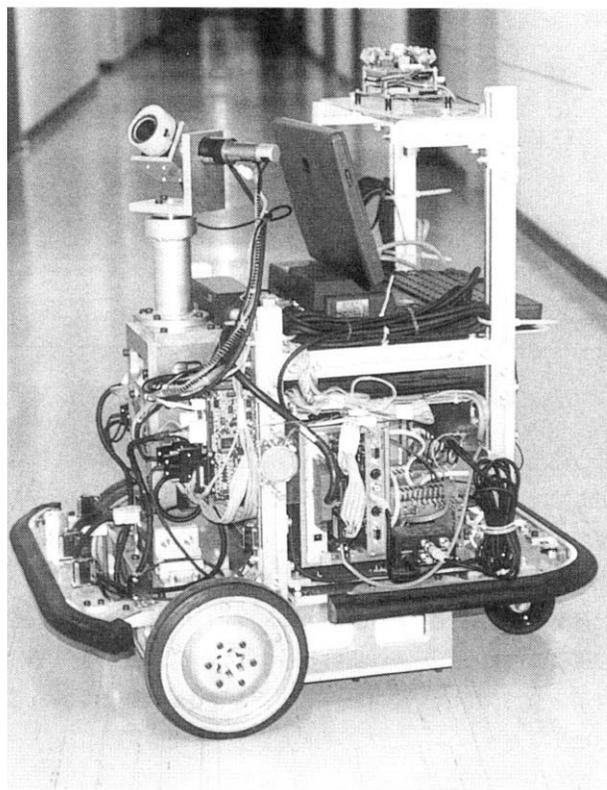


図1 視覚システム搭載型自律走行ロボット

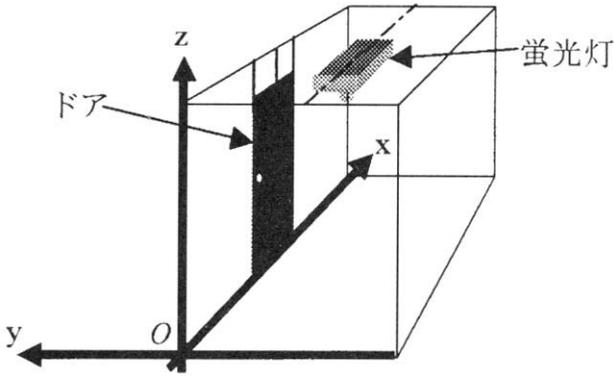


図2 絶対座標系 (廊下)

2. 画像による位置認識手法

2-1 単眼 CCD カメラによる位置認識

視覚システムの構成は以下のとおりである。

- CCD カメラ：SONY XC-711RR
- レンズ：Canon JF16 1.4EA-II
- 画像入力ボード：MT-98CL (マイクロテクニカ)
- 計算機：EPSON PC486NOTE AU (486DX4/100MHz)

CCD カメラはロボット上のカメラ台 (水平、垂直 2 自由度) に取り付けられている。レンズはオートアイリスレンズであるため、絞り調整は自動であるが、焦点調整は固定したままである。

次に、走行環境におけるランドマーク計測概念図を示す。

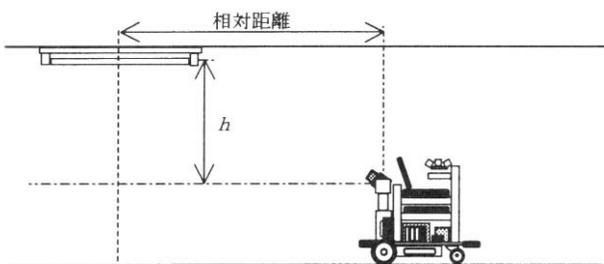


図3 ランドマーク計測概念図

このような走行環境におけるロボットの位置認識は、位置が既知である、目標となるランドマークを認識し、それからの相対位置を求めることによって行う。単眼の CCD カメラで取り込んだ画像から三次元空間でのランドマークの位置を計算するためには、走行環境の幾何学的な配置、および CCD カメラの姿勢などの拘束条件が必要である。この拘束条件を用いて画像を (1)、(2) 式で表される透視変換を行うことによりランドマーク位置を求めることができる。

$$x_{ccd} = -A * \frac{(x_{real} \cos \theta + y_{real} \sin \theta) \sin \phi + (h+FD+LD) \cos \theta}{-(y_{real} \sin \theta + x_{real} \cos \theta) \cos \phi + \{(h+FD+LD) \sin \phi + (FD+LD)\}} \dots (1)$$

$$y_{ccd} = -B * \frac{x_{real} \sin \theta - y_{real} \cos \theta}{-(y_{real} \sin \theta + x_{real} \cos \theta) \cos \phi + \{(h+FD+LD) \sin \phi + (FD+LD)\}} \dots (2)$$

(1)、(2) 式のパラメータの定義は以下のとおりである。

- xccd : CCD 画素面上の x 座標 (m)
- yccd : CCD 画素面上の y 座標 (m)
- xreal : 実空間の x 座標 (m)
- yreal : 実空間の y 座標 (m)
- θ : パン角度 (ロボットとカメラ台間) (deg)
- φ : ティルト角度 (ロボットとカメラ台間) (deg)
- h : カメラ台からランドマークまでの高さ (m)
- FD : カメラレンズ焦点距離 (m)
- LD : カメラ台回転中心から CCD 画素面までの距離 (m)
- A : (MXC * FD) / CCDV
- B : (MYC * FD) / CCDH
- MXC : x 方向画素数
- MYC : y 方向画素数
- CCDV : x 方向画素面の大きさ (m)
- CCDH : y 方向画素面の大きさ (m)

なお、CCD 画素面の x 方向、y 方向を図 4 に、また CCD カメラの座標系を図 5 に示す。角度 θ、φ はカメラ台の角度で、それぞれ xy、yz 座標系の角度 π を基準点としたときの値である。ロボットに取り付けられているカメラ台を用いてランドマークを計測するとき、カメラ台はロボットとともに並進、回転運動をする。そのため、ランドマークとカメラとの座標系の間で変換の必要がある。

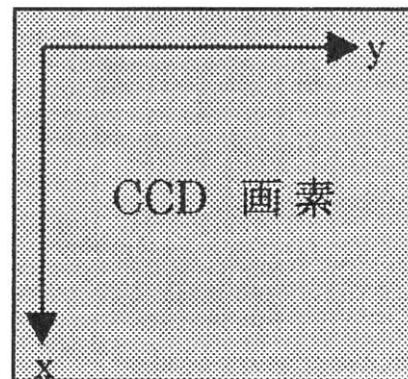


図4 CCD画素面の座標系

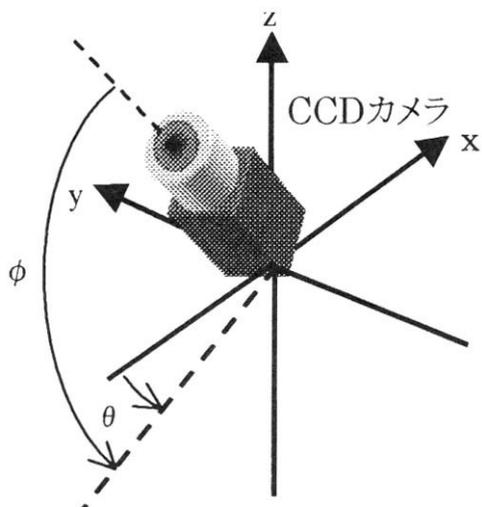


図5 カメラの座標系

2-2 能動的ランドマーク計測

ランドマークをカメラを用いて計測する場合、カメラを固定して計測する場合と、カメラを動かして計測する場合が考えられる。カメラを固定して計測する場合は、複雑な背景を含む画像の中からランドマークのみを抽出することが必要であるため、処理が困難になる。一方、計測すべきランドマークが決定している場合は、そのランドマークのみを画像にとらえるようにカメラの姿勢を制御することにより、ランドマークを含む画像が単純化されるため、背景から抽出することが容易になる[4]。本手法では、処理の簡単化のために、カメラを能動的に動かして計測を行う。

2-3 ランドマーク

自律走行ロボットの走行環境(図6)におけるランドマークとして、次に示すものを使用する。それぞれのランドマークから求められる特徴量と、求められる情報は次のとおりである。

図6 - A) 蛍光灯

- ・ 蛍光管の重心位置 → ロボットの位置
- ・ 蛍光管軸方向の慣性主軸の方向 → ロボットの姿勢

図6 - B) 壁と床の境界線(中木部分)

- ・ ロボットから壁までの距離 → ロボットの位置
- ・ 壁に対する角度 → ロボットの姿勢

図6 - C) ドア

- ・ ドアの蝶番の位置 → ロボットの位置

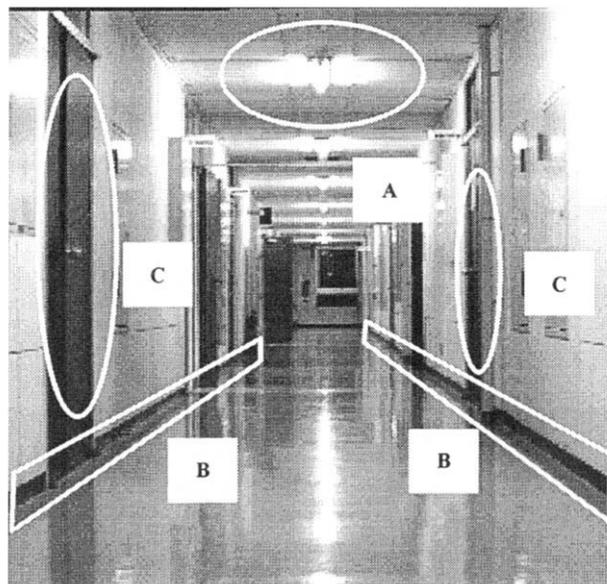


図6 走行環境内のランドマーク

2-4 画像処理方法

2-4-1 蛍光灯

蛍光灯ランドマークを画像処理する流れは、次のようになる。

- 1) デッドレコニングによるロボットの推定位置、姿勢情報を用いて、カメラを蛍光灯の方に向け、画像の中央にとらえる。このとき、デッドレコニングによる推定位置、姿勢には累積誤差が含まれるため、画像中に蛍光灯をとらえきれない場合が生じる。この場合は正確な重心位置、慣性主軸が求められないので、蛍光灯が画像の中央付近になるようにカメラ台を制御し、微調整する。
- 2) こうして最適な位置で蛍光灯をとらえた後、(図7(a))二値化(0画素と1画素の二値)する(図7(b))。二値化を行うとき、蛍光灯とともに、その蛍光灯自身の壁への反射や、外乱光も抽出される。そのため、二値画像で抽出される1画素のかたまりごとにラベルを付けて、ラベルごとに蛍光灯か否かを判断する。
- 3) 蛍光灯領域を、蛍光灯とその周辺の光の反射部分とし、その領域の面積で他の1画素成分と区別して抽出する(図7(c)十字の印のついた1画素成分)。
- 4) 蛍光灯領域から周辺の光の反射部分を取り除き、蛍光管部分のみを抽出する(図7(d))。
- 5) この蛍光管部分について図心と慣性主軸を求める(図7(e))。慣性主軸は二本求められる。この二本の慣性主軸の直線と蛍光管の交点は、各慣性主軸直線に対し、それぞれ二点求まる。これらの交点のうち、蛍光管の軸に沿う慣性主軸上の二点を選び、この二点を逆透視変換により実空間での座標に変換し、この変換した二点を通る直線の傾きを求める。この傾きと蛍光灯の配置から絶対座標系での姿勢が求められる。

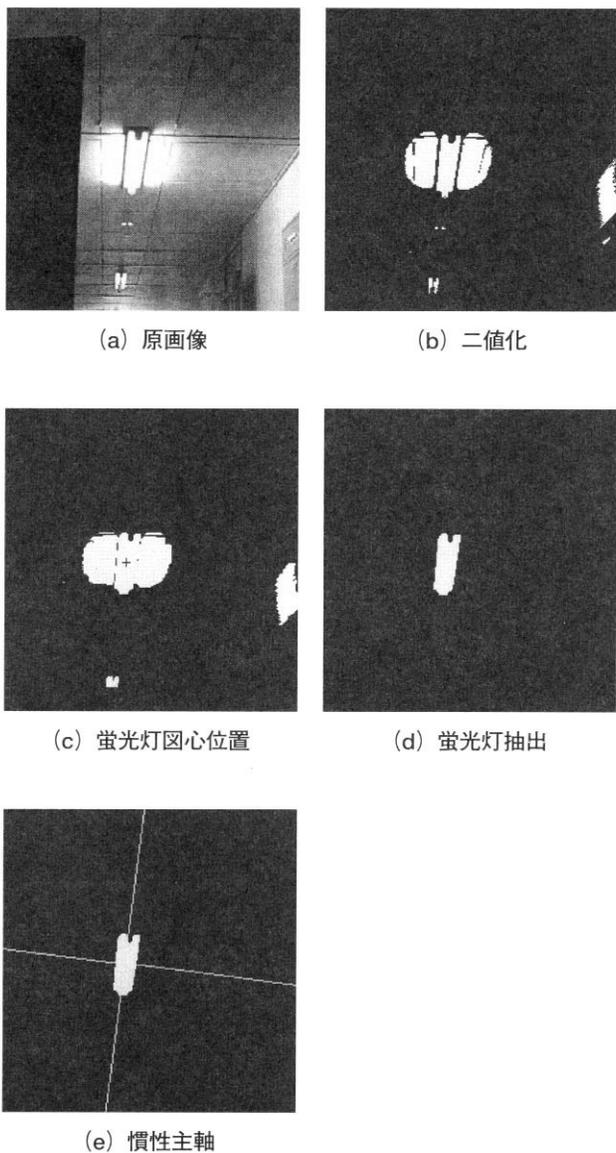


図7 蛍光灯ランドマークの画像処理例

2-4-2 壁と床の境界線（巾木部分）、ドア

壁と床の境界線、およびドアをランドマークとしたときの画像処理の流れは次のようになる。

まず、壁と床の境界線について処理する。

- 1) デッドレコニングによる推定位置、または蛍光灯ランドマーク計測により求めた位置をもとに、壁と床の境界線（以下、巾木）、ドアがとらえられるようにカメラ台の姿勢を制御する。
- 2) この原画像（図8(a)）について、横（y）方向一次微分（図4参照）を行い、二値化する（図8(b)）。当試験場の廊下の場合、巾木は黒色であり、壁と床は明るい色なので、この処理により巾木部分を含む画素濃度値の大きな部分が抽出される。
- 3) この画像上の境界線について最小二乗法によって近似直線を求め（図8(c)）、この直線より実空間での巾木の直線を求める。

この実空間での直線の傾きを求めることにより、絶対座標系でのカメラの姿勢がわかる。この直線を利用して、原画像を壁領域と床領域に分割することができる。

次にドアを抽出する。

- 4) 原画像より壁領域のある高さ部分を抽出する（図8(c)）。抽出した部分についてx（縦）方向に射影をとり、明るい部分（壁）と暗い部分（ドア）の二つの領域に分割する。この射影の結果と、既に抽出されている巾木の直線により、ドア領域の位置が求められる。ランドマークとしてのドアの位置は蝶番の側の縦線部分である。ドアの開閉状態により、蝶番の位置が手前側の縦線（図9(c)）、あるいは奥側の縦線（図9(a)または(b)）と入れ替わる。
- 5) このドアの開閉状態を判断するために、床領域に存在するドアを調べる（図8(d)）。以上よりドアの蝶番の位置が求められることができる。

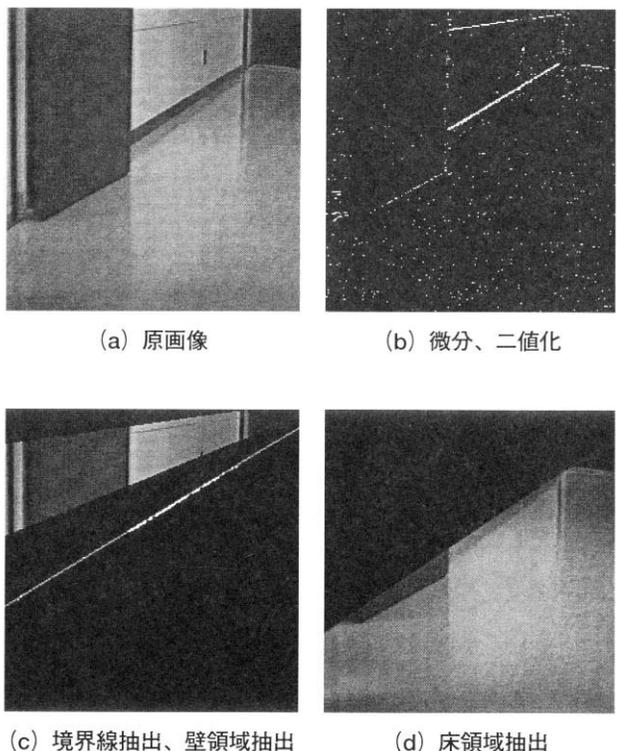


図8 壁と床の境界線およびドアの画像処理例

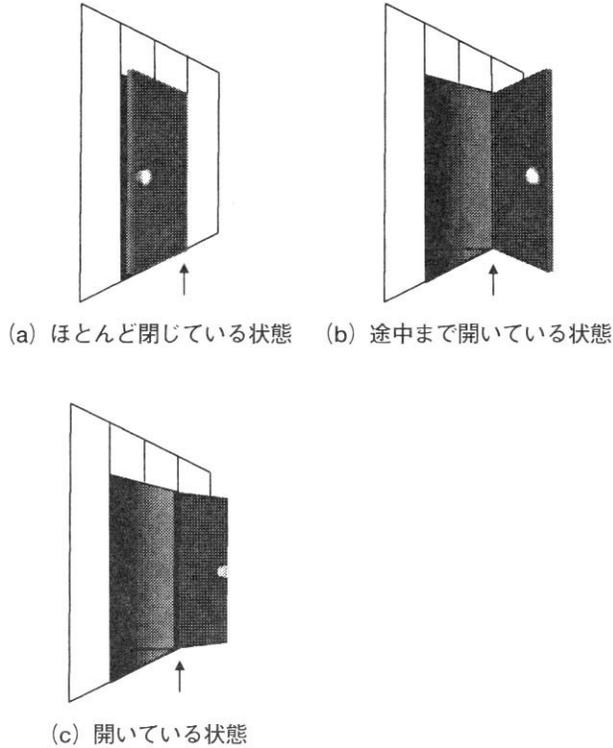


図9 ドアの開閉状態と蝶番の位置

3. 計測試験

3-1 蛍光灯をランドマークとした場合

当試験場3階の廊下において蛍光灯ランドマークの計測試験を行った。計測するランドマークの位置はロボットの位置よりy方向に4.85m、x方向に0mである。(ここではロボットの座標系(図10)で表す。)ロボットの姿勢角度は床面の目地を基準とし、この目地からロボットの左右両輪までの距離を測り、等しくなるように配置した(図10)。計測は定位置で5回行った。実測値との位置計測誤差を図11に、角度計測誤差を図12に示す。これより、位置の計測誤差はy方向については約±0.02m、x方向については約±0.01mであった。また、姿勢角度の計測誤差は約±1deg以内であった。

カメラ台を水平に固定して計測した場合は、カメラより約10m以上離れた蛍光灯ランドマークについて計測可能である。この場合の計測精度はy方向で約1m、x方向で約0.02mであった[2]。しかし、カメラを蛍光灯ランドマークに向けて計測した場合は、y方向で約0.02m、x方向で約0.01mとなり、大幅に計測精度が向上した。

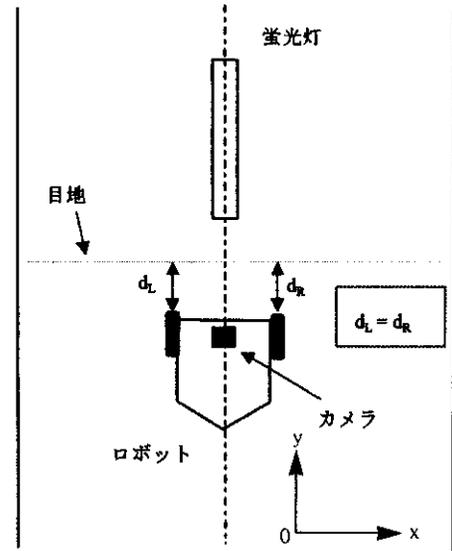


図10 蛍光灯ランドマークとロボットの位置

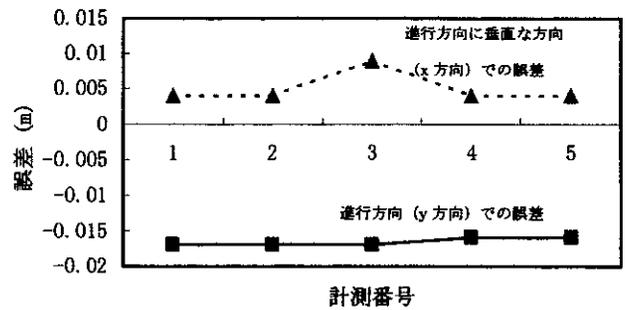


図11 位置計測誤差(蛍光灯)

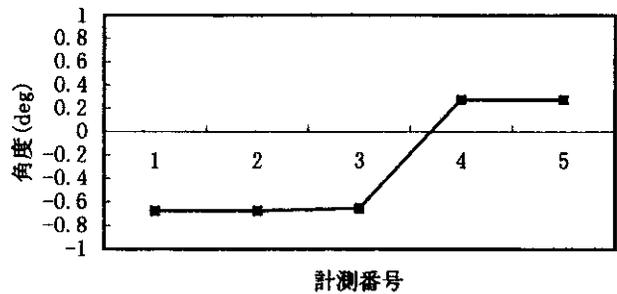


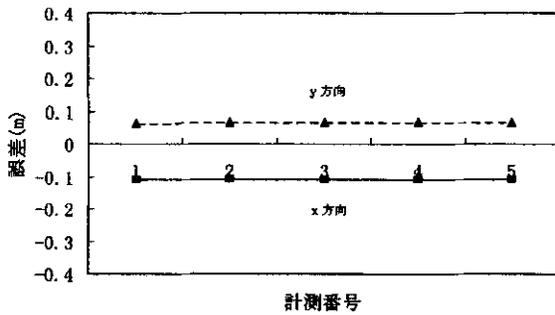
図12 角度計測誤差(蛍光灯)

3-2 ドア、壁と床の境界線をランドマークとした場合

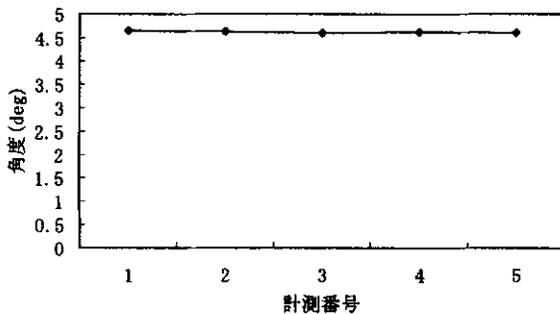
蛍光灯ランドマークの場合と同様な条件でドア、巾木ランドマークの計測試験を行った。ランドマークは、ロボットの右前方(x軸正方向)に3.22m(蝶番の位置)のドアと、その近傍の中木とし、これらを計測した。ドアの状態として、図9の(a)と(c)の場合についての計測を行った。計測は定位置で5回行った。実測値との位置計測誤差、角度計測誤差をそれぞれ図13、図14(ドアが閉じている状態のとき)、図15、図16(ドアが開いているとき)に示す。これらより、ドアが閉じている状態での位置計測誤差はロボットの進行方向(y方向)に約0.07m、壁方向に約0.1mとなり、ドアが

開いている状態では y 方向に約 0.34m、x 方向に約 0.11m となった。また、角度計測誤差については、ドアが閉じているとき、開いているとき、ともに約 4.5deg 程度となった。

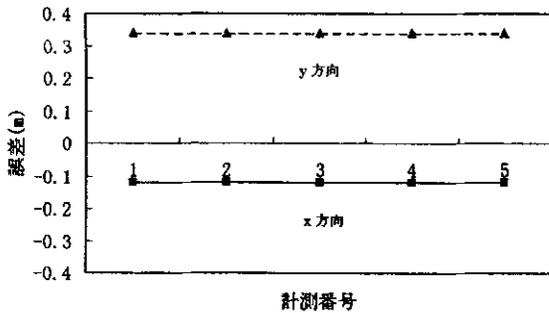
このランドマークの計測の誤差は位置、角度ともに大きいですが、複数回の計測に対しては安定した値となっている。よって、この誤差の原因としては、カメラ台のキャリブレーションや、床面の凹凸、またカメラ座標系、ロボット座標系、グローバル座標系間の座標変換での不具合などが考えられる。また、ドアが閉じているときよりも開いているときの方が誤差が大きくなっている。この原因はドアで唯一の固定点として蝶番の位置をランドマーク位置としているが、実際にはドアの回転軸まわりのドア板部分を計測しているため、ドアの厚さなどの影響で誤差が生じると考えられる。



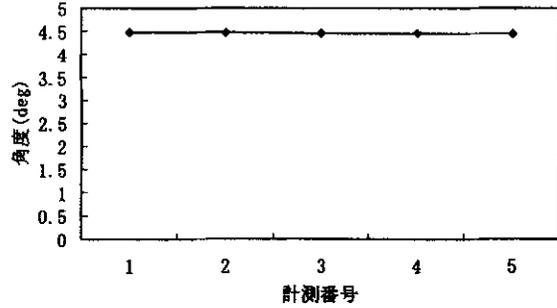
(ドアが閉じている状態)
図13 位置計測誤差 (ドア)



(ドアが閉じている状態)
図14 角度計測誤差 (壁と床の境界線)



(ドアが開いている状態)
図15 位置計測誤差 (ドア)



(ドアが開いている状態)
図16 角度計測誤差 (壁と床の境界線)

4. 考察

カメラによりランドマークを計測するときの誤差については、次のようなものが考えられる。

- 1) 処理する画像の分解能による誤差
- 2) カメラ台のキャリブレーションによる誤差
- 3) 床面の凹凸による誤差
- 4) 蛍光灯の見え方による誤差

天井の蛍光灯ランドマークまでの距離と、処理画像の1画素が実空間で表す長さとの関係を図17に示す。この図より光軸方向 (y 方向) での1画素が表す長さは光軸方向に垂直な方向 (x 方向) での1画素が表す長さよりも長いことがわかる。また、ランドマークの位置が遠くなるに従い、1画素で表される長さが長くなる。

図18にカメラ台のパン方向角度が0degの場合の、ティルト方向角度と蛍光灯ランドマークまでの距離の計算値との関係を示す。この図より、ランドマークまでの距離が約4mの場合、ティルト角度が約0.1deg異なると、ランドマークまでの距離は約0.025mずれることがわかる。図17より約4mでは1画素の分解能は光軸方向で約0.02mであるから、カメラ台の角度に0.1deg以上の誤差があると1画素分だけ真値からずれることになる。このティルト方向の角度の精度については、カメラ台のキャリブレーションが重要となる。また、カメラ台はロボットに搭載されていて床面の凹凸に影響されるため、この誤差が生じる可能性がある。

この誤差を補正する方法として、計測精度0.1deg以下の傾斜センサを用いることが考えられる。

また、蛍光灯の姿勢角度を求める場合は、画像中の蛍光灯の慣性主軸を計算することにより求めているが、画像中での蛍光灯の形状が非対称形になるにしたがい、慣性主軸が、蛍光管の軸からずれてくる。蛍光灯からロボットの姿勢角度を求めるときの誤差を低減させるためには、慣性主軸を用いない方法を検討する必要がある。

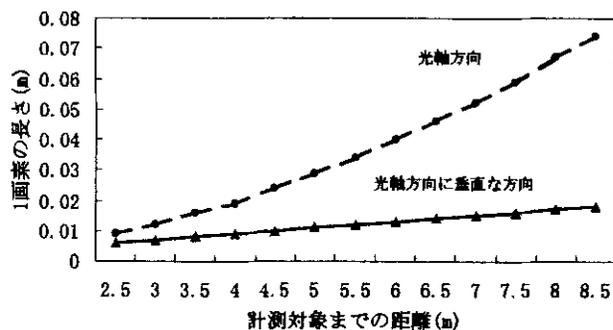


図17 画像中の1画素があらわす長さと計測対象までの距離の関係

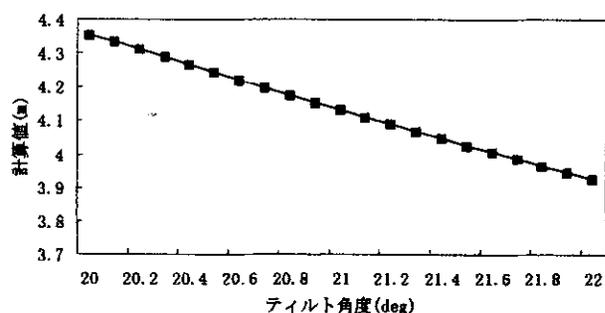


図18 カメラ台ティルト方向角度とランドマークまでの距離の計算値の関係

5. おわりに

CCDカメラを用いた視覚システムでランドマークを能動的に計測することによって、自律走行ロボットの自己位置を認識する手法を開発した。この方法により、カメラを水平に固定してランドマークを計測する場合に比べ、計測精度が向上した。計測に要する時間は、カメラ台の微調整を数回行うため、一回の計測について約1分程度である。実時間で作業を行うことを目標と考えると、計測の高速化についてさらに検討する必要がある。計測の誤差についてはカメラ台のキャリブレーション、床面の凹凸、蛍光灯ランドマークの見え方による影響が考えられる。これらの誤差要因の改善について検討を行い、さらに認識制度を向上させることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 和田, 松山: Hough変換に基づく図形検出法の新展開, 情報処理 Vol.36, No.3 Mar.1995
- [2] 吉川 他: 視覚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] 興水, 村上: Hough変換の諸課題と新しいパターン計測—実用とその展望編—, 計測と制御 第36巻, 第5号, 1997
- [4] 久野: アクティブビジョン—歴史と展望—, 人工知能学会誌 Vol.10, No.4, 1995