

# 誘導灯を標的とする自律移動ロボット用自己位置計測法

深 谷 健 一\*

## Self-position Measuring Method for Autonomous Mobile Robot Using Exit Lights

Ken-ichi FUKAYA\*

### あらまし

建物の廊下や壁に設置されている誘導灯を自然標的として利用する自律移動ロボット用自己位置計測法を考案した。ロボットに搭載したカメラを制御することで広い計測可能領域と位置精度を同時に満足させられ、相対位置計測の誤差補正に有効であることがわかった。

### 1. ま え が き

廊下世界を自律移動するロボットの実現に不可欠なキー技術の一つは自己位置の認識であり、表1に示す各種の方式が提案されている<sup>1)~3)</sup>。相対位置計測では、ロボットが移動するにつれ誤差が累積し、次第に経路から外れて行く。このため許容誤差を越えた場合には、ロボット外部との相互作用による絶対位置計測により累積誤差を零にする必要がある。本研究では建物の廊下や部屋の壁に設置されている誘導灯を標的に用い、図1に示すように誘導灯表面の図柄をロボット進行方向に直角に設置したカメラで捕らえて自己位置を計測する方法を提案する。本方式は表1の5番「自然標的の認識」の範疇に入る。この分野では廊下の天井に設置される蛍光灯<sup>4)</sup>やドア、廊下の角りなどを標的に使う方法が研究されているが、誘導灯を標的とした研究は見当たらない。

誘導灯は人の集まる学校、老人福祉施設、病院などでの設置が消防法で義務づけられている

\* 北海学園大学工学部電子情報工学科

\* Department of Electronics and Information Engineering, Hokkai-Gakuen University

表1 自律移動ロボット用自己位置計測法の分類

分類	番号	方式
相対位置計測	1	走行距離計測(オドメトリー)
	2	慣性航法
絶対位置計測	3	能動ビーコン
	4	人為標的の認識
	5	自然標的の認識
	6	モデル一致

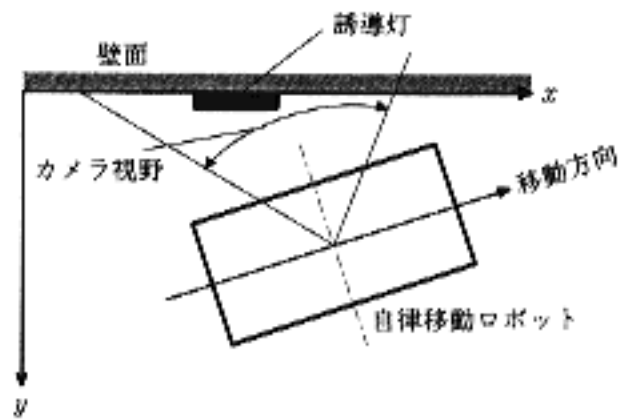


図1 自律移動ロボットの自己位置計測状況

ため、多数使用され、本学工学部でも50個以上が設置されている。また図柄が規格化されているため自然標的として利用できる<sup>9)</sup>。さらに誘導灯は昼夜を問わず点燈させることになっており、明るさも一定なので、特に夜間の廊下や部屋の消灯時でも標的として利用できる利点を有する。なお、自然標的なのでユーザが移動ロボットのために人為的に設置する必要がないことも大きな利点となる。

## 2. 自己位置計測原理

本研究では本学工学部廊下に多数設置されている10W中型廊下誘導灯(公共施設型番ST1-FBF10-101)(図2)を標的として用いるが、他の型式の誘導灯でも同様の計測が可能である。実際の設置状況を図3に示す。誘導灯の図柄のうち、矢印の先端( $P_3$ )、出口の左端



図2 中型廊下誘導灯



図3 廊下における誘導灯の設置状況(工学部2号館6階)

(P<sub>2</sub>) と右端 (P<sub>1</sub>) の3個所の特徴点をCCDカメラで計測して自己位置を求める。図4に示すようにロボットの自己位置 O<sub>R</sub> (x<sub>R</sub>, y<sub>R</sub>) と特徴点 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> を結ぶ直線のロボット移動方向 θ<sub>R</sub> から反時計回りに計測した角度を θ<sub>1</sub>, θ<sub>2</sub>, θ<sub>3</sub> とすると、次式が成立する。

$$\tan(\theta_1 + \theta_R) = -(y_R - y_1) / (x_1 - x_R) \tag{1}$$

$$\tan(\theta_2 + \theta_R) = -(y_R - y_2) / (x_2 - x_R) \tag{2}$$

$$\tan(\theta_3 + \theta_R) = -(y_R - y_3) / (x_3 - x_R) \tag{3}$$

ここで P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> の座標値 (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, i=1, 2, 3) は予め計測しており既知であり、3本の式は3個の未知数 x<sub>R</sub>, y<sub>R</sub>, θ<sub>R</sub> に対応するため解が求まる。X=tanθ<sub>R</sub> とおき、式(1)~(3)を整理すると、次のXに関する4次方程式が得られる。

$$f(X) = (a_1b_4 - b_1a_4)X^4 + (a_2b_4 - b_2a_4)X^3 + (a_3b_4 - b_3a_4 + a_1b_4 - b_1a_4)X^2 + (a_2b_4 - b_2a_4)X + a_3b_4 - b_3a_4 = 0 \tag{4}$$

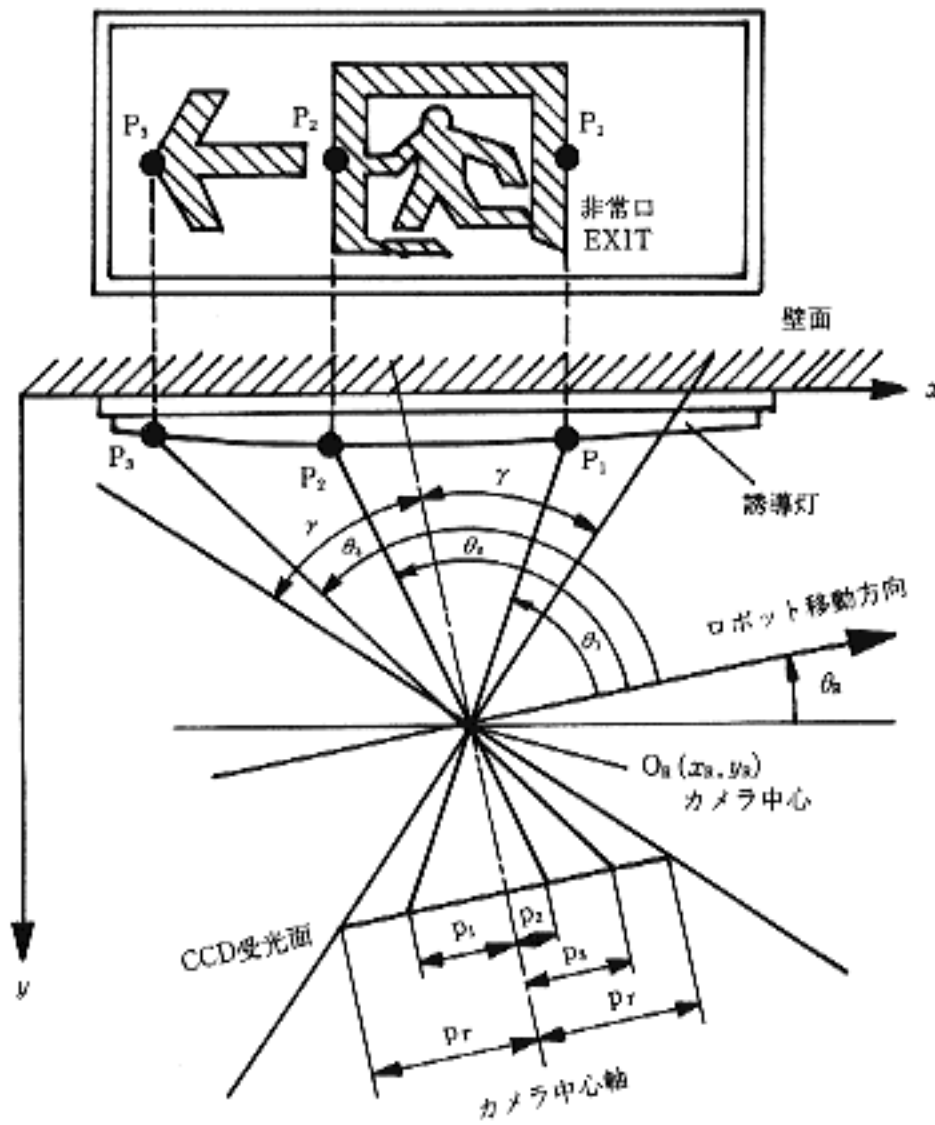


図4 自己位置計測系

ここで

$$\begin{aligned} a_1 &= y_1 \tan \theta_2 - y_2 \tan \theta_1 - (x_1 - x_2) \tan \theta_1 \tan \theta_2 \\ a_2 &= y_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 - y_1 - y_2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 + y_2 + (x_1 - x_2) (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \\ a_3 &= -y_1 \tan \theta_1 + y_2 \tan \theta_2 - (x_1 - x_2) \\ a_4 &= -(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \\ b_1 &= y_1 \tan \theta_3 - y_3 \tan \theta_1 - (x_1 - x_3) \tan \theta_1 \tan \theta_3 \\ b_2 &= y_1 \tan \theta_1 \tan \theta_3 - y_1 - y_3 \tan \theta_1 \tan \theta_3 + y_3 + (x_1 - x_3) (\tan \theta_1 + \tan \theta_3) \\ b_3 &= -y_1 \tan \theta_1 + y_3 \tan \theta_3 - (x_1 - x_3) \\ b_4 &= -(\tan \theta_1 - \tan \theta_3) \end{aligned}$$

であり、 $x_i, y_i, \theta_i (i=1, 2, 3)$  を要素として含むが、 $\theta_i$  を計測すれば定数となり、数値計算で解が得られる。本研究ではニュートン・ラフソン法を使って $X$ を求めた。ロボット移動方向は $\theta_R = \tan^{-1} X$ となり、これを式(1)~(3)に代入するとロボット自己位置座標 $x_R, y_R$ が代数計算で求まる。

3個所の特徴点角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は次の手順で計測できる。

- 1) CCDカメラに写った誘導灯画像の計算機取り込み
- 2) 閾値設定による2値化処理
- 3) メディアンフィルタによる雑音除去処理
- 4) 特徴点の抽出 (図5参照)

縦射影のヒストグラムを作成し、左側から走査すると、最初の開始位置が矢印の先端 $P_3$ 、二つ目の頂点が出口左端 $P_2$ そしてヒストグラム終了位置が出口右端 $P_1$ となる。

- 5) 特徴点角度の算出

図4に示すようにCCDカメラ受光面に投影された特徴点 $P_1, P_2, P_3$ およびカメラ画角 $\gamma$ に対応するカメラ中心軸からの画素数をそれぞれ $p_1, p_2, p_3, p_\gamma$ とすると式(5)が成立し、特徴点角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が算出できる。ここで $\tan \gamma / p_\gamma$ はカメラ、フレームメモリにより決まる係数であり、予め校正しておく。



図5 特徴点の抽出

$$\tan \gamma / p_\gamma = \tan(\theta_1 - 90^\circ) / p_1 = \tan(\theta_2 - 90^\circ) / p_2 = \tan(\theta_3 - 90^\circ) / p_3 \quad (5)$$

### 3. 実験と計測結果

以上の計測法を検証するため図6の構成の実験システムを構築し、最初は固定視野カメラ、つぎに可変視野カメラを用いて実験を行った。固定視野カメラ (FCD-725) は池上通信機の計測用のカラーカメラであるが、可変視野カメラ (EVI-D 30) は最近パソコンを用いるTV会議などに使用されているソニーのカラーカメラである。

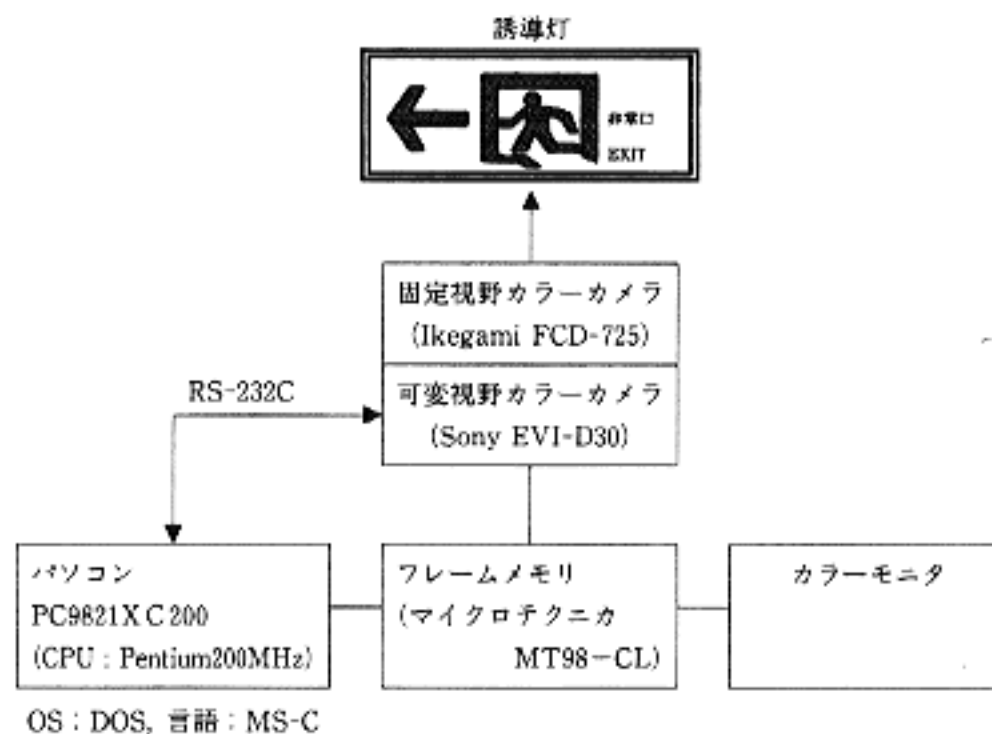


図6 実験システムの構成

#### 3.1 固定視野カメラによる実験と計測結果

3回の計測結果の平均と設定値の比較を表2に示す。最大誤差はカメラからの距離が100 cmで距離6 cm、角度4度であり、距離175 cmで距離11 cm、角度3度と、誘導灯に対するカメラの傾き角が大きく距離が遠くなると誤差が大きい。自己位置補正に使用できる値である。

固定視野カメラを使用した場合には誘導灯までの距離と角度はロボットが自己位置を計測する地点で決まるので、3点の特徴点が視野に入らなかったり精度が低くなる場合が生ずる。図7に示すように、カメラから誘導灯までの距離が増加すると1画素換算の長さが大きくなり、計測誤差による距離精度が低下する。精度向上と計測範囲拡大は両立できず、カメラを用いて光学的に自己位置を計測するLidar (Light direction and ranging) 方式に伴う矛盾である。横、縦移動および拡大機能付きのカメラを用いれば、標的補足過程では視野の拡大と縦横移動制御を行って確実に視野に標的を入れ、次に計測過程では標的を拡大して精度を向上させられる。

表2 固定視野カメラによる実験結果

設定値			測定値の平均		
角度 度	x座標 cm	y座標 cm	角度 度	x座標 cm	y座標 cm
0	80.8	100	-4.2	74.6	97.8
-5	75.3	100	-4.5	75.1	97.8
5	92.8	100	6.1	91.2	97.2
-10	66.4	100	-10.6	65.0	97.5
10	101.6	100	12.3	102.9	96.1
-15	57.2	100	-16.5	56.1	97.0
15	110.8	100	15.3	108.3	98.3
-20	47.6	100	-19.2	50.9	99.8
20	120.4	100	21.1	117.9	97.4
-25	37.4	100	-25.8	39.6	100.6
25	130.6	100	25.0	126.4	100.4

設定値			測定値の平均		
角度 度	x座標 cm	y座標 cm	角度 度	x座標 cm	y座標 cm
0	84.0	175	1.2	88.7	168.6
-5	68.7	175	-4.1	72.3	169.4
5	99.3	175	5.9	100.6	169.7
-10	53.1	175	-7.4	63.2	170.6
10	114.9	175	11.4	116.2	168.9
-15	37.1	175	-15.7	36.3	169.0
15	130.9	175	17.6	132.5	166.6
-20	20.3	175	-21.3	20.6	169.6
20	147.7	175	19.4	143.7	171.9
-25	2.4	175	-27.4	1.0	170.0
25	165.6	175	22.1	154.0	181.4

### 3.2 可変視野カメラによる実験と計測結果

可変視野カメラを使用する時の制御手順を図8に示す。即ち

1) 視野内の誘導灯重心がカメラ視野中心に一致するまで、カメラを横移動させる。この時、視野は最大にして、誘導灯の一部が映るようにする。

2) 画像の面積に応じて誘導灯画像を拡大し、距離によらず一定の大きさとする。

3) 誘導灯の3個所の特徴点を抽出し、自己位置  $O_R(x_R, y_R)$  とカメラ角度を求める。

4) 横移動と画像拡大の補正をする。

カメラの制御にはRS-232Cインタフェースを介し、本カメラに用意されているVISCA (Video Control Architecture) プロトコル (ソニーの社内規格) を用いた。表3に計測結果と設定値の一例を示す。壁からの距離に影響されず、自己位置計測に使用できる値を得ている。

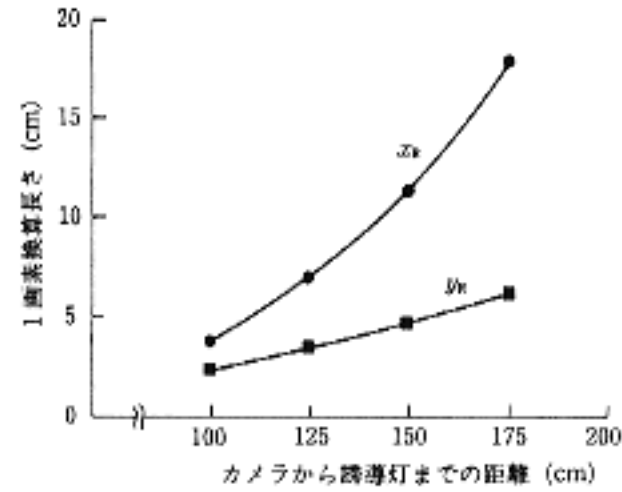


図7 カメラ距離と1画素換算長さとの関係

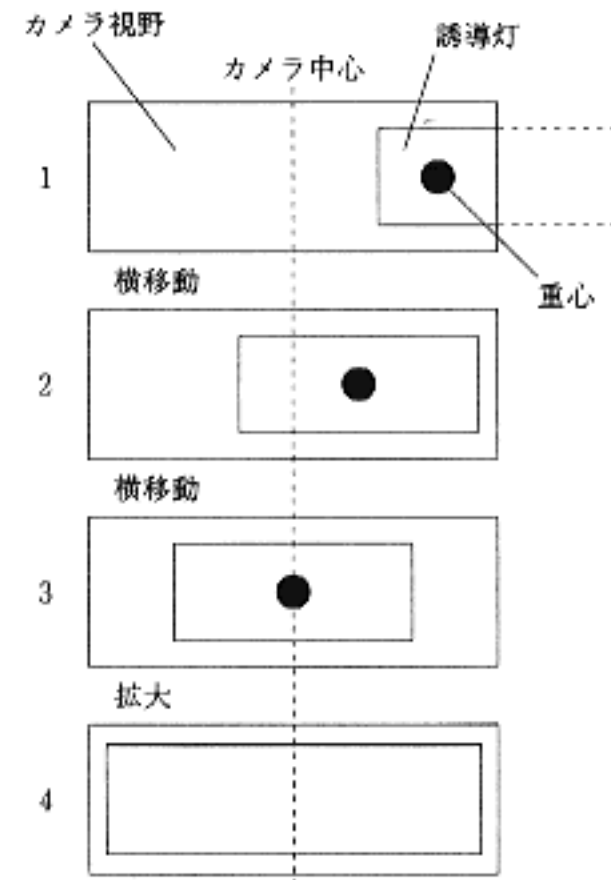


図8 カメラ制御手順

図9に両方のカメラによる計測可能領域を示すが、可変視野カメラでは固定視野カメラに比べ約4倍程度に領域が拡大しており、相対位置計測の誤差が大きく、予測した位置から標的が離れていても絶対位置を計測でき、カメラ視野の制御可能なカメラを用いることの有効性が確認できる。表4-1の固定カメラによる計測誤差ではカメラから誘導灯までの距離（壁からの距離）が遠くなると誘導灯画像が小さくなり誤差が増加している。一方、可変視野カメラでは誘導灯標的を拡大して一定の大きさの画像を得ており、計測精度は表4-2に示すように壁からの距離の影響を受けない。しかし、廊下壁に平行な変位xとカメラ角度の誤差が小さいのに比べ、壁に垂直な変位yの誤差が大きい。これは使用カメラが計測用ではなく、拡大倍率が非線形となっているための影響と見られ、倍率に応じたカメラ校正を行うことで改良可能と考えられる。数回の横移動で誘導灯重心とカメラ中心を一致させ、さらにその後に拡大をおこなうカメラ制御に現状では約12~20秒の時間を要している。

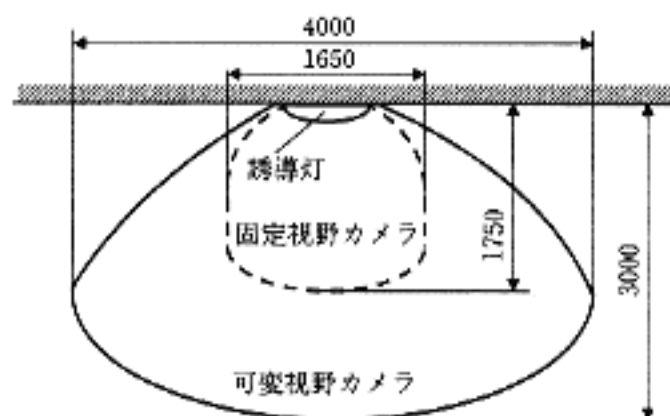


図9 固定・可変視野カメラの計測可能領域

表3 可変視野カメラによる実験結果

設定値			測定値の平均		
角度	x座標	y座標	角度	x座標	y座標
度	cm	cm	度	cm	cm
0	24	100	1.3	26.2	114.6
0	44	100	-0.2	43.8	108.4
0	64	100	-1.3	63.6	102.2
0	84	100	1.2	84.0	108.3
0	104	100	1.1	104.0	104.2
0	124	100	4.0	123.9	102.0
0	144	100	4.3	142.5	100.3

設定値			測定値の平均		
角度	x座標	y座標	角度	x座標	y座標
度	cm	cm	度	cm	cm
0	24	175	-1.5	23.0	179.1
0	44	175	0.3	47.4	170.5
0	64	175	1.8	66.5	173.0
0	84	175	1.7	85.5	172.0
0	104	175	0.9	105.9	169.6
0	124	175	5.4	129.0	177.7
0	144	175	2.8	145.8	176.6

表4-1 固定視野カメラによる計測誤差

壁からの距離	平均誤差		
	y座標 (cm)	x座標 (cm)	カメラ角度 (deg)
100	2.4	2.0	1.2
125	3.5	3.5	1.4
150	2.1	4.1	1.1
175	4.0	4.8	1.7

表4-2 可変視野カメラによる計測誤差

壁からの距離	平均誤差		
	y座標 (cm)	x座標 (cm)	カメラ角度 (deg)
100	0.6	5.7	1.9
125	0.9	7.9	1.6
150	2.9	5.0	1.3
175	2.4	3.3	2.1
200	2.1	5.7	1.5

#### 4. あとがき

可変視野カメラを使用することで、Lidar方式の計測可能領域と計測精度の矛盾が解消でき、誘導灯を自然標的として利用できることが確かめられた。しかし、今後実用に供するには以下のような問題の解決が要求される。

##### ・普遍的な問題

- 1) 周囲環境の変化による取り込み画像の階調変動への対策
- 2) 複数種類の誘導灯の抽出特徴点に対応した個別の画像処理
- 3) 自律移動ロボットでの実証試験の実施

##### ・可変視野カメラの問題

- 1) 精度向上には拡大倍率毎の校正が必要
- 2) カメラ制御所要時間の短縮

本研究は本学電子情報工学科の1996年度卒研究生、中村英也、鳴海忍、1997年度卒研究生、坂本泰英、羽田芳憲、1998年度卒研究生、高橋克成、村澤芳人の諸君の協力を得て実施し、深谷が取りまとめたものである。

#### 参 考 文 献

- 1) H.R.Everett: Sensors for Mobile Robots, Theory and Application, A K Peters, 1995.
- 2) J. Borenstein, H.R.Everett and L.Feng: NAVIGATING MOBILE ROBOTS, Systems and Techniques, A K Peters, 1996.
- 3) 坪内孝司他: 特集=自律移動体の位置決め技術, 精密工学会誌, Vol.65, No.778, pp.1385-1424, 1999.
- 4) 本間, 高橋, 橋場: 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, pp.123-129, 1997.
- 5) 「誘導灯及び誘導標識の基準(消防庁告示13号)」昭和49年6月1日より施行, 「消防法施行規則第28条の3」昭和50年1月1日より施行.
- 6) 深谷, 野村, 松田, 青山, 鈴木: 自律走行ロボット用自己位置計測法, 北海学園大学工学部研究報告, 第23号, pp.183-192, 1996.
- 7) 深谷, 関口, 山口: 簡易標的を用いた自律移動ロボット用自己位置計測法, 北海学園大学工学部研究報告, 第24号, pp.171-176, 1997.
- 8) 五十嵐, 深谷: 天井設置簡易標的を用いた自律移動ロボット用自己位置計測法, 北海学園大学工学部研究報告, 第25号, pp.1301-1307, 1998.

#### 謝辞

本研究は道立工業試験場からの委託研究の一環として実施されたことを記し、関係者に感謝の意を表す。また、北海学園大学ハイテクリサーチセンター研究費の支援を受けて行われたことを付記する。