建設作業用移動ロボットの自己位置計測法*

梶谷 誠^{*1}, 阿部 靖則^{*2}, 小谷 忠司^{*3}
金森 哉吏^{*1}, 田中 幸悦^{*2}, 田中 祥夫^{*4}Self-Position Measuring Method for Moving Robot Working
at Construction SitesMakoto KAJITANI, Yasunori ABE, Tadashi KOTANI,
Chisato KANAMORI, Kouetsu TANAKA and Yoshio TANAKA

Recently, the demand for moving robots working at construction sites is increasing, and research activities are in progress. Unlike industrial robots working in factories, construction robots must meet more functional requirements because they must handle a variety of complicated jobs at construction sites. The robots must also be able to locate themselves. This requires a technique that enables the robot to measure coordinates indicating its position. This paper describes a new method to enable robots working at large building sites to precisely locate themselves and describes the principle of this system and experimental results.

Key Words: Robot, Moving Robot, Sensor, Optical Measurement, Laser, Positioning, Construction Robot

1. ま え が き

建設作業は単調な肉体労働や危険な仕事が多いため、慢性的な作業員不足が生じており、建設作業用ロボットに対する期待が高まっている。しかし、建設現場の作業環境や作業内容は多様で複雑なため、工場内で働く産業用ロボットに比べて、建設作業用ロボットは高度な機能が必要である。例えば、一般的な建設作業用ロボットに共通な機能として、自由に設定された移動経路をロボット自身が自己位置を認識して移動できることが要求され、種々の試みがなされている⁽¹⁾。

本論文は、大きなビルの建設現場で作業するロボットが自分の位置を正確に知る方法に関するものである。

一般に、車輪形移動ロボットの自己位置計測法は、

- (1) 車輪の回転角を積算する方法
- (2) ジャイロなどを使った慣性航法
- (3) 作業域に既知の基準点を設け、三角測量の原理によって求める方法

の三つの方法に大別される。(1),(2)の方法では、いわゆる内界センサだけの位置計測のため、誤差が累積され、数10~100m四方のフロア内で、数mmの精度を実現することは困難である。(3)の方法も種々提案されている⁽²⁾。例えば、いわゆる燈台方式は最低3箇所の基準点に、灯台(光源、超音波源⁽³⁾、コーナキューブなど)を設置し、ロボットから灯台を見る角度を測定し、自己位置を三角測量の原理により求める方法である。しかし、この方法をビルの建設現場に適用すると、作業フロア内の柱が見通しの障害となり、基準点を多数必要とし、その設置にも精密な作業が要求され、実用上の困難がある。

本論文が提案する方法の基本的原理は、上記の(3)の方法に属するもので、特別な基準を用意する必要がなく、ビル内に立っている柱を基準にロボットの自己位置を計測する方法である。柱は、設計図面でその位置が既知で、一定間隔で立てられている。そこで、レーザレンジセンサ⁽⁴⁾を応用して、ロボットから見た柱と柱の間の角度を計測し、三角測量の原理により自己の位置を決定する計測法を提案する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。試作したシステムの基本的な性能を実験的に調べた結果、±5mm程度の誤差で計測可能であることを報告する。

* 原稿受付 平成6年4月18日。

^{*1} 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

^{*2} 正員, 新菱冷熱工業(株) (〒300-42 つくば市和台41)。

^{*3} 電気通信大学大学院 (現: NTT)。

^{*4} 新菱冷熱工業(株)。

2. 計測方法

2.1 基本原理 一般に、大きなビルでは、図1のように、柱が数m-10数mの間隔で立っている。フロア内のロボットの位置は、四つの柱で囲まれた領域(以後、エリアという)に固有の番地(i, j)を与えると、エリアの番地とそのエリア内の位置座標によって表すことができる。エリアの番地は、ロボットが移動する間に通過した柱の数を数えることなどによって容易に決定できる。そこで、本論文では、エリア内の位置座標を決定する問題を取扱う。

図2のように、 XY 座標内の移動体の位置を R 、三つの基準点を P_1, P_2, P_3 、移動体の原点から各基準点を見る角度をそれぞれ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ としたとき、これらの幾何学的関係から、次式によって R の位置座標(X, Y)を求めることができる。

$$X = -AB/(B^2 + C^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = -AC/(B^2 + C^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A &= (X_1 X_3 + Y_1 Y_3)(\tan \theta_{21} + \tan \theta_{32}) \\ &\quad + (X_3 Y_1 - X_1 Y_3)(1 - \tan \theta_{21} \tan \theta_{32}) \\ B &= (Y_1 - Y_3) \tan \theta_{21} \tan \theta_{32} \\ &\quad - X_3 \tan \theta_{21} - X_1 \tan \theta_{32} \\ C &= (X_3 - X_1) \tan \theta_{21} \tan \theta_{32} \\ &\quad - Y_3 \tan \theta_{21} - Y_1 \tan \theta_{32} \\ \theta_{21} &= \theta_2 - \theta_1, \quad \theta_{32} = \theta_3 - \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

とする。さらに、移動体の向き θ_R は、

$$\theta_R = -\theta_1 + \tan^{-1} \{(Y_1 - Y)/(X_1 - X)\} \quad \dots\dots (4)$$

となる。

2.2 柱のエッジを基準とする方法 図3のように、柱の中心を基準に UV 座標を定める。ロボットに搭載された自己位置計測システムは、ロボットの周りの柱を見つけ、柱の角(以後、エッジという)を検出し、

図1 大形ビルフロアの例

原点から柱のエッジまでの角度(以後、エッジ角度という)を計測する。柱1~柱3のエッジ P_1, P_2, P_3 のエッジ角度を $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ とし、二つの柱のエッジ間の角度(以後、エッジ間角度という)を θ_{21}, θ_{32} とする。このとき、ロボットの座標 $R(U, V)$ は、式(1), (2)に対して、次のような変数の変換を行えば求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} U &= X + U_2, \quad V = Y + V_2 \\ X_1 &= U_1 - U_2, \quad Y_1 = V_1 - V_2 \\ X_3 &= U_3 - U_2, \quad Y_3 = V_3 - V_2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

図3に示すように、ロボットは通常4本の柱それぞれ2点のエッジを検出可能である。したがって、柱の右側エッジの3点は $P_1 P_2 P_3, P_2 P_3 P_4, P_3 P_4 P_1, P_4 P_1 P_2$ の4組の組合せ、左側エッジについても同じく、 $P_1' P_2' P_3' \sim P_4' P_1' P_2'$ の4組が存在し、合計8組のエッジの組合せについて $R(U, V)$ を求めることができる。そこで、8組の(U, V)の平均値を最終的なロボットの位置とする。

以上から、本方法は次のような実用的な利点がある。

図2 基本原理

図3 柱を基準とする方法

- (1) 建物の柱を基準点とするので、特別な基準点の設置が不要である。
- (2) システムの適用範囲は4本の柱で囲まれた範囲(エリア)に限定できる。
- (3) 柱の間隔はビルの大きさにあまり依存しないので、作業範囲が広がっても計測精度に影響がない。
- (4) 4本の柱から得られる8組の基準点による平均値を用いることにより、計測精度が向上する。

3. 試作システムの概要

3・1 システムの構成 建設現場のエリア内では、床から一定の高さの測定平面内には柱以外のものは存在しないものとする。試作した計測システムの構成を図4に示す。システムは、柱のエッジ検出のためのレーザレンジセンサ、エッジ角度を計測する角度測定部およびデータ処理用のボードコンピュータから構成される。本システムの目標仕様は、大形ビル内での墨だし作業への適用を想定して次のように設定した。

- 柱の間隔：最大 10 m
- 自己位置計測誤差：±5 mm 以内
- レーザレンジセンサの測定範囲：15 m 以内
- 1回の計測時間：5分以内
- 計測条件：静止時に計測

3・2 レーザレンジセンサ レーザレンジセンサは、レーザ光を発射し、物体からの反射光を検出して、物体までの距離を計測する距離計である。ここで、ロボットの周囲をレーザレンジセンサで走査して、レーザが反射した物体までの距離を反射距離ということにする。さて、ロボットから見た柱と柱の後ろの背景(壁

など)との境目、すなわち柱のエッジ部分では反射距離が急激に変化する。このことを利用して、反射距離の変化から柱のエッジを検出する。このように、レーザレンジセンサの測定値は距離の変化の検出に使われ、ロボットの位置算出には使われないため、反射距離測定には高い測定精度は要求されない利点がある。

レーザレンジセンサは、図5のようにレーザ光軸と受光用レンズをオフセットさせて設置すると視差が生じ、反射光の受光位置が対象物までの距離によって変化することを原理とする。図5からわかるように、反射距離と CCD センサの受光位置の関係は線形ではなく、その関係はあらかじめ実験によって測定しておく。光源にはコリメータ付き半導体レーザ(波長 670 nm, 出力 10 mW)を使用し、レーザビームのビーム径は最長測定距離 15 m の位置で最小(約 2.5 mm)になるように調整されている。反射光は受光レンズ(焦点距離 135 mm)、光学バンドパスフィルタ(主波長 670 nm, 主波長透過率 85.5%)を通して、リニア CCD センサ(1024 素子)上に結像する。受光レンズのピントは、最長測定距離 15 m に合せた。上述のように、レーザビーム径の焦点や受光レンズのピントを最長測定距離 15 m に合せたのは、本システムでは原理的に反射距離が遠いほど検出感度が低くなるので、ビーム径やピントずれによるさらなる感度低下を防ぐためである。

3・3 角度測定部 レーザレンジセンサは、サーボモータによって 360°回転され、ロータリエンコーダによって角度を計測する。ロータリエンコーダの分解能は 14.4 秒(1 回転 90 000 パルス)、誤差は ±5 秒である。この角度を、15 m 先の直線変位に換算すると、それぞれ約 1.1 mm, ±0.38 mm となる。また、回転軸のふれは ±1 μm 以下である。以上より、本システムの計測精度を ±5 mm とすることが可能である。

3・4 計測の手順 本システムにおける計測手順と動作は以下のようである。

- (1) ロボットは内界センサによる計測をたより

図4 試作した自己位置計測システム

図5 レーザレンジセンサの原理

に、与えられた目標位置へ向かう。

(2) 目標位置から周囲の柱を見たときの4本の柱の存在領域(存在する方向の範囲)を、ロボットの走行誤差を考慮して推定する。

(3) ロボットは目標位置に到達後、レーザレンジセンサを回転させるが、前項で推定した柱の存在領域以外は高速で回転させ、データ収集をスキップする。

(4) 柱の存在領域では、一定のサンプリング間隔ごとにロータリエンコーダのパルスカウント数とCCDセンサの出力データをコンピュータへ読込む。

上記によるデータ収集が終了後、コンピュータは以下の処理を実行する。

(5) レーザレンジセンサで計測した反射距離データを基に4本の柱を見つけ、エッジ間角度を求める。

(6) 測定した8組のエッジ間角度と柱のエッジ座標の設計値を、式(1)～(5)に代入して得られる8個の値を平均して、ロボットの位置(U, V)と向き θ_R とする。

4. 柱のエッジ検出アルゴリズム

3・4節に示したように、ロボットの周囲の反射距離データ $D(\theta_i)$ が得られると、以下のアルゴリズムによって柱のエッジを検出する。

(a) 柱の存在範囲の限定 すでに3・4節のステップ(3)で、柱が存在すると推定される方向のみを計測しているが、さらに反射距離についても柱の存在領域を推定し、範囲外のデータは除外候補として印を付し、 $D^{ex}(\theta_i)$ とする。

(b) エッジ強度の算出 3・2節で述べたように、柱のエッジ部分では、反射距離が大きく変化する。そこで、 $D(\theta_i)$ の変化の度合いを調べるため、1次微分形オペレータを適用した微分値(エッジ強度とよぶ) $E(\theta_i)$ を得る。次に、設定したしきい値 E^s より大きい $E(\theta_i)$ を検索し、 $E^s(\theta_i)$ とする。しきい値 E^s は、想定する柱や壁からの反射距離の変化と反射距離測定のばらつきを考慮して決定する。さらに、 $E^s(\theta_i)$ に対応する $D(\theta_i)$ を $D^s(\theta_i)$ とする。

(c) 柱の候補の抽出 $D(\theta_i)$ のデータ列を順に検索し、 D^s を見つけ、その角度を順に θ_i とする。 θ_i と θ_{i+1} の間の角度について

$$\Delta\theta_{\min} < \theta_{i+1} - \theta_i < \Delta\theta_{\max} \quad \cdots \cdots (6)$$

を満たすとき、 θ_i と θ_{i+1} の間のデータを $D^{obj}(\theta_i)$ とする。ここで、 $\Delta\theta_{\min}$ 、 $\Delta\theta_{\max}$ はエリア内で柱を見たとき、柱から最も遠い場合の柱の両エッジ間の角度(最小値)と最も近い場合の角度(最大値)とする。ただし、(a)において評価した $D^{ex}(\theta_i)$ を多く含むデータは候

補から削除する。

(d) 4本の柱の抽出 上記までの処理で抽出された柱の候補の中から任意の四つを選び、それらがもつ8個のエッジ角度を $\phi_m(n)$ とする。ここで、 n は1～8、 m は四つの柱候補の組合せの番号である。一方、ロボットが目標位置から4本の柱を見たときの8個のエッジ角度 $\phi_0(n)$ を求め、 ϕ_m の ϕ_0 に対する偏差を次のように計算する。

$$e_m^2 = \sum_{n=1}^8 \{ \phi_m(n) - \phi_0(n) \}^2 \quad \cdots \cdots (7)$$

上記の計算をすべての m について行い、 e_m^2 が最小となる m に対応する組合せを目的の柱の組と同定する。

5. 実験結果

実験は、表面に白色塗料を塗ったアクリル板で作った模擬柱(一辺600mm)について行った。

5・1 レーザレンジセンサの性能 CCDセンサの出力は、素子が受ける光強度の時間積分値である。反射距離が長くなると、受光強度が減少するので、受光時間を長くする必要がある。一方、受光時間が長いと、レーザレンジセンサの回転速度を遅くせねばならず、測定時間が長くなる。図6は反射距離10mの場合の受光時間による出力の変化を示している。このような実験から、15mまで測定するためには、10ms以上の受光時間が必要であることがわかった。もし、レーザレンジセンサが1周360°についてCCD出力をサンプリングしようとする、少なくとも15分の時間を要する。そこで、3・4節の手順(3)のようにスキップ領域を設けることにより、サンプリング領域を4分の1以下に減らし、計測時間を4分程度に短縮できたため、当初の目標仕様を達成することができた。

図6 受光時間によるCCDセンサ出力の変化

図7は、反射距離の違いによる CCD センサ出力波形の例である。図7からもわかるように、反射光は CCD センサ上に広がりをもって結像する。このような出力波形から反射光の受光位置 (CCD 素子のアドレス) を決定するために、図8に示す次のような処理を行う。

(1) CCD 出力波形の半値幅 (ピーク値の 50% の出力値を示す幅) を示す CCD 素子のアドレス A_1 と A_2 を求める。

(2) $A_0 = (A_1 + A_2) / 2$ によって求められる半値幅中心のアドレス A_0 を反射光の受光位置とする。

(3) あらかじめ実験的に求めておいた反射距離と受光位置との関係式から反射距離を求める。

この効果を確認するため、(a) 単純に出力波形のピークの位置を受光位置とする場合と (b) 上記半値幅中心を受光位置とする場合について、測定値のばらつきを比較した。図9に、反射距離を変えるごとに 200 回計測し、その測定距離のばらつきの標準偏差を示した。

図7 反射距離と CCD センサ出力の関係

図8 反射光の CCD センサ受光位置の決定法

半値幅中心法によれば、標準偏差は 0.3 m 以下になり、柱と背景の距離が 1 m 以上あれば柱と背景を分離し、柱のエッジを検出できることがわかる。

図10は、本システムを実験室のほぼ中央に置き、周囲の反射距離を計測した例である。周囲の壁や窓、実験室の中央左側にある 2 本の柱、壁に埋込まれた柱など、センサから 15 m までの範囲の物体の存在や位置を明確に検出できることが確認できた。

5.2 柱のエッジ検出 図11は、実験室内の一辺 8 m の正方形の 4 箇所の角に模擬柱を設置し、そのほぼ中央に本システムを置いて、実験した結果である。図11(a)は、反射距離データをそのままプロットしたものである。図11(b)は、4章で述べたエッジ検出アルゴリズムを適用して柱のエッジを抽出した結果で、a~h の点がエッジ部である。4本の柱とそのエッジを正しく検出できていることがわかる。

5.3 計測精度 本システムの計測精度を検討するため、図12に示すように、エリア内の 13 箇所で計測実験を行った。比較する真の座標は、建設作業現場

図9 反射距離測定の際のばらつき—CCD センサの受光位置決定法による比較—

図10 本システムによる反射距離計測例

(a) 模擬柱の認識

(b) エッジの検出

図 11 模擬柱の認識とエッジ検出の例

で広く使われている角度測定装置(トランシット)を用いて次の方法で求めた。

(1) 図 12 中に示す基準点 1, 2 の位置にトランシットを設置し、本システムの測定点と X , Y 座標軸とのなす角 ϕ_1 , ϕ_2 を測定する。

(2) この ϕ_1 , ϕ_2 と、基準点の座標を用いて測定点の真の位置座標を求める。

使用したトランシットの最小読取り値は $10''$ 、精度は $\pm 5''$ である。ただし、 ϕ_1 , ϕ_2 から求まる測定点の位置座標の精度は、トランシットの測角精度から計算すると ± 0.7 mm 程度である。13 点での測定結果を表 1 に示す。各点で 10~20 回の測定を行い、そのばらつきの標準偏差とトランシットで測定した真値からのかたより誤差を示す。13 点中、4, 9, 12, 13 番の 4 点を除くと、ばらつきの標準偏差 0.25 mm 程度、かたよりは ± 5 mm 程度で、初期の目標を達成している。上記 4 点、特に 12, 13 番の誤差が大きいのは、柱の面に対しレーザー光が浅く入射したとき、反射光の光量が小

表 1 自己位置計測実験結果

No.	Correct Position		Measured Position				Error		Times
	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	
1	3984.7	4001.0	3987.9	4001.1	0.129	0.090	3.3	0.1	21
2	3990.9	4995.1	3993.6	4994.5	0.044	0.093	2.7	-0.6	13
3	3987.8	6002.4	3991.2	6002.4	0.064	0.095	3.4	0.0	13
4	3977.6	6993.8	3985.9	6992.2	3.733	1.562	8.2	-1.6	14
5	3975.4	8001.9	3975.6	8006.4	0.199	0.135	0.2	4.5	16
6	4974.4	5008.4	4977.5	5008.7	0.092	0.119	3.1	0.3	15
7	4976.3	6007.8	4978.7	6008.0	0.112	0.093	2.4	0.2	13
8	4983.9	7002.1	4988.2	7002.3	0.120	0.114	4.3	0.2	14
9	4978.4	8006.6	4975.1	8013.6	0.426	0.217	-3.2	7.1	16
10	5979.1	6005.6	5983.5	6006.0	0.120	0.164	4.4	0.3	13
11	5974.9	6997.9	5979.2	6998.2	0.265	0.204	4.2	0.3	14
12	5988.9	8015.9	5961.9	8005.3	3.351	11.279	-27.0	-10.6	14
13	6519.7	6523.3	6494.1	6480.5	2.161	0.563	-25.5	-42.7	11

図 12 自己位置計測実験

さくなる等の影響があるものと思われるが、今後の課題として検討中である。

6. む す び

大きな建物の建設現場で作業する建設作業用ロボットの自己位置計測法について述べた。特別な基準を必要とせず、すでに立っている柱を基準にロボットの位置を計測する方法を提案し、試作したシステムによる実験の結果、本システムの有用性を確認した。

基礎実験により得られたおもな結果をまとめると以下になる。

(1) レーザレンジセンサの CCD センサの受光位置決定に、CCD 出力波形の半値幅中心を用いる方法は有効である。

(2) 試作したシステムは、距離 15 m 以内の柱や壁を明確に認識できる。

(3) 柱のエッジ検出アルゴリズムは有効である。

(4) 8 m 間隔の柱に囲まれたエリア内で、自己位置計測の精度は、ばらつきの標準偏差 0.25 mm、かた

より $\pm 5\text{ mm}$ 程度が可能である。ただし、条件が悪い場合については誤差が大きく、さらに検討の必要がある。

さらに、実用化に向けて、上記問題点の改善、実際の現場での実験等による検討を行っている。

文 献

- (1) 汐川, 建設用移動ロボットの走行・位置決め制御, 日本ロボット学会誌, 8-2(1990), 208.
- (2) 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, (1990), 367, コロナ社.
- (3) 新井・中野, 移動車搭載形位置方向計測装置の開発と性能評価, 計測自動制御学会論文集, 18-10(1982), 1013.
- (4) 高増・加藤・大園, 移動ロボット用環境センサの開発, 日本ロボット学会誌, 5-4(1987), 199.
- (5) 後藤・野崎・梶谷・益田・阿部, 建設作業用移動ロボットのための自己位置計測システム, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '90 講演論文集, B(1990-6), 349.
- (6) 小谷・梶谷・金森・阿部・田中・田中, 建築作業用移動ロボットの開発—位置計測アルゴリズムの改良と自律移動実験—, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '93 講演論文集, B(1993-6), 1044.