赤外線追尾サーボを用いた移動ロボットの
高精度軌道制御と環境認識*滝田 好宏^{*1}, 肥田 祐司^{*2}, 下井 信浩^{*3}Navigation and Recognition of the Unknown Space
Using Infrared-Following Servo System
for Moving Robots

Yoshihiro TAKITA, Yuji HIDA and Nobuhiro SHIMOI

This paper presents a new measurement system of location and direction of the mobile robot using an optical servo system which detects three beacons to calculate the initial location and direction, and follows one beacon continually to control the direction of motion. As the luminous source of the beacon, infrared rays are used because they are harmless and safe for human beings. The beacons simultaneously, emit the digital identification signal coded in 16 bits and continuous light. While the robot moves in the unknown space, the size of the space is measured by using a supersonic range sensor and the accurate location of the robot is calculated. Experimental results demonstrate the effectiveness of this method.

Key Words: Moving Robot, Location and Direction, Optical Servo, Beacons, Infrared Rays, Recognition

1. はじめに

位置方向計測システムとしてGPS⁽¹⁾が注目されており, 航空機, 船, 自動車にすでに利用されている. この方式は固定発信局を設置することにより高精度の位置計測を可能にしていたため, 測定の自動化や自動操縦システムへの利用が検討されており, 災害現場の作業のための無線操縦無人化システム⁽²⁾に適用されている. しかし, 室内で走行するロボットに衛星の電波を受信するシステムを採用することは難しい.

掃除ロボットは室内を移動し, 掃除する空間をむらなく走行する必要がある. このような空間をデッドレコニングと超音波センサを用いて壁からの距離を測定しながら走行する方法⁽²⁾⁽³⁾では, 基準となる壁等が使用できない場合や障害物が多く存在する場合にはこの方法だけでは不十分であるため, 新しい位置計測システムの開発⁽⁴⁾⁽⁵⁾が必要である.

計測システムを構成する媒体にレーザ光線を利用する方法が研究⁽⁶⁾されているが, 安全性の観点から人間

と共存するロボットシステムへの使用は避けるべきであろう. そこで, 著者らは人間にとって安全で高精度な位置計測のために赤外線灯台を用いる方法を提案してきた. ここで赤外線灯台には定常光を発生する光源と16ビットの識別コードを発生する光源を用意する. この光源を認識・追尾するサーボ系をロボットに搭載して, 三つの灯台の方向角を測定する⁽⁷⁾ことによって位置と方向を計測することが可能である. また, 移動中の位置の測定は, ロボットの移動中に一つの灯台を光サーボ系⁽⁸⁾で追尾して行えることを示した.

本論文では, 光追尾サーボを用いた赤外線灯台方式の位置計測法をロボットの軌道制御システムへ適用する手法を提案する. まず, 移動空間に配置した複数の灯台に適応するために, 認識した灯台座標系と基本座標系での位置方向計測理論を示す. この方法を三輪式走行ロボットの軌道制御に適用するための基本的な特性を手得するために静止状態での位置方向の計測精度と直進軌道制御のシミュレーションと実験によって示す. その後, ロボットをある大きさの空間で直線巡回走行を行い, 超音波センサを用いて障害物との距離と自己座標を同時に測定しながら走行することによって, おかれた空間の正確な情報を取得することが可能であることを実験結果で確認し, 本方式の有効性を示す.

* 原稿受付 1994年12月19日.

*¹ 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水1-10-20).*² 正員, 防衛大学校理工学研究科.*³ 防衛庁 (〒114 東京都北区十条台1-5-70).

図1 アナログ・デジタル赤外線灯台 (ILADR)

2. 赤外線灯台と認識追尾

2.1 赤外線灯台の構成 本測定法を実現するためには、灯台の方向と灯台の座標を地図から見つけるための識別コードを計測装置が検出できなければならない。本方式では灯台の方向の計測のために定常の赤外線が発生する光源を用い、灯台の識別信号に固有のデジタル信号を発信する光源を用いる。この方法は、灯台の識別に発信周波数を用いる方法よりは、はるかに簡単な装置で実現できる。なお、デジタル識別信号は民生用に普及した赤外線コントローラ IC の通信方式を用いれば、2 の 16 乗個の識別が可能になってくる。本研究ではこの灯台を ILADR (Infrared Lighthouse with Analog and Digital Rays) と命名する。

実験のために構成した ILADR を図1に示す。アナログ赤外線は白熱電球 (150 W) で発生させている。デジタル赤外線は赤外線コントロール用 IC μ PD 6112 D (NEC) の信号を赤外線 LED から発生している。赤外線 LED は移動ロボットの移動範囲をカバーするように、広指向性で高出力の L 1939 (浜松ホトニクス) を使用している。

2.2 光追尾サーボ系の構成 図2に光追尾サーボ系の構成を示す。灯台の方向は回転テーブルに開き角 β で固定された2個のフォトセンサセルによって検出することができる。一つのセルは集光用の凸レンズ、赤外通過フィルタと赤外線フォトトランジスタで構成される。これら二つの赤外線フォトトランジスタの信号の差を取り出し、この信号を基にして DC モータを駆動すれば常に ILADR の方向を維持することがで

図2 赤外線追尾サーボ系の構成

きる。この角度をロータリエンコーダによって検出する。

ILADR のデジタル信号を受信する受光素子は2個のフォトセンサセルの開き角の中心軸の方向に固定する。これにより、追尾している ILADR の識別信号を受信することができる。ここでは受光素子に増幅器とフィルタ回路を内蔵した SBX-1483 (SONY) を使用したが、指向性を20度程度に高めるために筒の中に納めた。また、この信号のデコードに4ビットワンチップマイクロコンピュータ μ PD 7564 C (NEC) を使用している。

3. 位置方位計測法

3.1 三点測量による方法 移動ロボットが任意の場所で位置方向測定を行うためには、最低三つの灯台の方向を測定する必要がある。固定座標系 G における灯台 n 個の座標が既知であるとする、灯台の位置ベクトルは

$$\vec{H}^i = h_x^i \vec{g}_1 + h_y^i \vec{g}_2 \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

光追尾サーボ系によって検出された三つの灯台 H^i , H^{i+1} , H^{i+2} が出現する角度 ϕ_0 , ϕ_1 , ϕ_2 とする。 H^i を原点として、直線 $H^i - H^{i+1}$ を基準とする灯台座標系 N^i を図3のように定義する。 N^i 座標系における灯台 H^i , H^{i+1} , H^{i+2} の座標はそれぞれ $(0, 0)$, $(x_b, 0)$, (x_c, y_c) となる。ここで、

$$x_b = D_1^i \quad (2)$$

$$x_c = D_2^i \cos(\theta_2^i - \theta_1^i), \quad y_c = D_2^i \sin(\theta_2^i - \theta_1^i) \quad (3)$$

ただし、

で求められる。固定座標系 G における位置ベクトル、方向角は式 (12), (13) から求められる。

4. 制御システムの構成

4.1 制御回路の構成 図5にセンサやモータを制御するコントローラとコントローラを制御するホストコンピュータに分ける階層制御を採用した走行ロボットの制御装置を示す。コントローラには、UD カウンタ、PWM 制御回路、インターバルタイマ割込機能、8ビット AD 変換器を内蔵した μ PD 78310(NEC) を採用して、制御基板の省スペース化を図った。ホストコンピュータとコントローラとはバスで接続され、データの入出力は非同期に双方からアクセスが可能な DPRAM(Dual Port RAM) を介して行っている。このようなメモリを用いることにより、CPU 同士のデータの入出力が高速に行え、マルチプロセッサ制御装置のために有効な回路構成となっている。

ホストコンピュータにはワンボードコンピュータまたはパーソナルコンピュータを用いることができるが、ここではプログラムの開発が容易な後者を使用する。

4.2 制御プログラム コントローラ1は操舵系と超音波センサの制御を、コントローラ2はホストコンピュータが設定した回転速度になるように駆動用モータ2, 3の制御を行う。コントローラ3では光センサの方向を一つの ILADR に固定する追尾モードと光センサを回転し ILADR の方向角を検出する検索モード

が切替えられるようになっている。図6に追尾モードのブロック線図を示す。ここで、 E は光センサの出力、 K_p はループゲイン、 K_v は速度フィードバックゲインでどちらもホストコンピュータから与えられる。このプログラムは光センサの回転軸に取付けたロータリエンコーダの信号を処理して角度 ϕ としてホストコンピュータに送っている。これらの制御プログラムはアセンブリ言語で作成され、EPROM に書き込まれている。このプログラムの制御間隔は 0.8 ms であった。

4.3 灯台の検出と認識 図7に光追尾サーボ系が検出した光センサの差信号と灯台識別信号を示す。ここで、ILADR は正三角形に配置し、移動ロボットがほぼ三角形の重心に設置している。センサ出力から ILADR の方向は、電圧が 5 V から 0 V に変化する線が 2.5 V に較差する点であり、方向角 ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 が検出される。また、各 ILADR の識別は検出した ID コードで容易に行える。

4.4 走行制御プログラム 直進走行制御のブロック線図を図8に示す。ここで、 G_r は灯台座標におけ

図6 追尾モードの制御方式

図7 光センサ出力と ID コードの検出例

図5 自律移動ロボットの制御系

図8 一灯台を用いた直進走行の制御方式

図9 三輪ロボットの幾何学モデル

る偏角 φ_j^i と座標 $P_j^i(x_j^i, y_j^i)$ から光センサの目標回転角 ϕ_r を式(19)を用いて計算する。 G_p は操舵修正角度のループゲイン, G_r は操舵角の変化によるロボットの旋回特性であり, 出力として前輪の走行距離から X, Y 方向の微小変位 dx, dy とロボットの回転 ϕ を引き起こす。 G_s は光追尾サーボ系の動特性でセンサ回転角 ϕ を出力する。

旋回特性 G_r のモデルの作成はロボットが幾何学的条件の基で運動すると仮定する。図9に N^i 座標系での直進走行制御の関係を示す。ここで, 前輪の操舵角 δ , 微小時間の走行距離 dl , ホイルベース $W=0.25$ m, 点 P の回転半径 R_0 , 回転角 τ , 偏角 φ_j^i , dl 走行後の偏向角 δ_a とするとそれぞれの関係は

$$R_0 = \frac{W}{\tan \delta}, \quad \tau = \frac{dl}{R_0} \quad (20)$$

$$\delta_a = \tan^{-1} \frac{1 - \cos \tau}{\sin \tau} \quad (21)$$

ベクトル $\overline{dl}$ は

$$\overline{dl} = -(dx \cos \varphi_j^i + dy \sin \varphi_j^i) \overline{n_1} + (dy \cos \varphi_j^i - dx \sin \varphi_j^i) \overline{n_2} \quad (22)$$

$$\varphi_{j+1}^i = \varphi_j^i + \tau \quad (23)$$

ただし,

$$dx = dl \sin \delta_a, \quad dy = dl \cos \delta_a$$

また, 操舵系の動特性の解析によって時定数が 100 ms の一次遅れ系, 光追尾サーボ系の動特性 G_s は遅れなしに角度を出力すると仮定して, 制御系のシミュレーションを行った結果を図10に示す。ここで, 座標 (1.0, 0) m, $\varphi_j^i=0$ から 3 m 直進走行する場合について, 走行速度を 0.1, 1.5 m/s において座標と角度誤差を示す。実際の機械では操舵系や駆動系の制御誤差, 機械系の誤差, ガタが存在する。ここでは, ロータリエンコードの最小分解能の初期変位角 φ_j^i に 0.001 rad の誤差があるとしてシミュレーションを行っている。制御しない場合には 3 m 走行して 0.003 m の誤差を生じるが, 適正なゲイン調整によって経路の維持が可能である。しかし, 走行距離が長くなると目標値との誤差が大きくなる。このように三輪式ロボットの場合

(a) 車速 0.1 m/s の場合

(b) 車速 0.15 m/s の場合

図10 直線走行制御のシミュレーション結果

は直進走行には限界がある。これを是正するには機械的な精度とモータの制御精度を高める必要がある。

図7において, 旋回走行の制御は初期値 φ_{j+1}^i , 目標値 φ_{j+2}^i になるように制御系を構成すればよい。

5. 実験

5.1 実験装置 図11に本研究で使用した自律移動ロボットの外観を示す。後部駆動輪の軸上の中心に設置した光追尾サーボ系の光センサの回転部は, ILADR の光源の位置に合うように設定されている。光センサの回転角を測定するロータリエンコードは一回転当たり 2160 パルス発生するように設定されている。ホストコンピュータと走行ロボットはフラットケーブルでバス接続されている。

図 11 赤外線灯台と自律走行ロボット

5・2 位置計測 本ロボットを用いた位置の測定精度を調べるために、ILADRを 4×3.5 mの直角三角形、一辺4 mの正三角形、2 m間隔に直線状に配置した場合について、ロボットを0.5 m間隔に位置決めて10回測定を行い、X方向の真値との標準偏差を図12に示す。ここで、○印はILADRの位置、空白の部分は未測定の部分を示す。また、 4×3.5 mの空間で標準偏差が0.02 m以下の面積はそれぞれ87%, 84%, 74%であった。この結果は光追尾サーボ系が測定する角度 ϕ_0 , ϕ_1 , ϕ_2 に測定分解能 ± 0.1 度の計測誤差を仮定した場合の標準偏差に一致している。

5・3 直進走行制御 初期座標(1.5, 0) mからY軸に沿って3 m直進させて、そのときの壁からの距離を超音波センサで測定して、直進走行制御の効果を比較する。

図10のシミュレーションと比較する実験結果を図13に示す。ここではロボットの走行速度を0.108 m/sにして操舵ゲイン G_p を1, 4, 8に設定したときの走行軌跡を示す。このように、 $G_p=4$ の場合に良好な直進性を示す。なお、図10のシミュレーション結果とゲインの値と精度が大きく異なっているが、モデル化されていない機械系のガタ、工作精度、タイヤの接地特性を考慮すれば制御効果に対応付けられる。

図14に直進制御を行った場合と操舵角を固定して走行した場合の走行軌跡と光センサの回転角の目標値 ϕ_r と検出された角度 ϕ との誤差($\phi_r - \phi$)を示す。非制御時には走行するに従って変位と回転角の誤差が大きくなっている。これは、走行ロボットの直進性の悪さを示すものである。一方、制御を行った場合にはほぼ直線で走行することが可能で、本制御方式が走行ロボットの直進性を改善している。

(a) 直角三角形配置

(b) 正三角形配置

(c) 直線配置

図 12 位置計測の標準偏差

5・4 直進旋回走行 図15に直進と旋回とを組合せた走行の結果を示す。走行ロボットに直進1 m, 半径0.2 mの旋回, 直進0.5 m, 半径0.2 mの旋回を繰り返す走行をデッドレコニングのみで行った場合と灯台基準による直進走行, 旋回制御を行った場合の走行軌跡を示す。この軌跡は光追尾センサ軸に取付けたLEDの座標を天井に取付けたCCDカメラで取込んだ画像データから得られたもので、0.38 sごとに記録されている。このように、デッドレコニングによる方法では

図 13 直進走行における G_p の効果

図 14 直進走行における制御効果の比較

図 15 デッドレコニングと本制御方式の比較

誤差が累積して、最終的に X 方向で 0.123 m, Y 方向で 0.03 m の誤差を生じているが、制御を加えた場合には Y 方向に 0.013 m の誤差になっている。

壁と障害物に囲まれた空間を図 15 と同じ走行を行い、ロボットの超音波センサで距離を測定し、ロボット自身の座標を考慮して障害物の測定点を図 16 に示す。ここで、旋回中の超音波センサは反射角によって測定が不安定であったので表示していない。図 16(b) には設置した壁と障害物の配置を示す。このように、ロボット自身の座標が測定できることによって、距離センサの性能には依存するが環境認識が可能である。

(a) 超音波センサによる距離計測

(b) 壁と障害物の配置

図 16 高精度位置計測を用いた環境認識

6. おわりに

本論文で提案した赤外線灯台方式を実現するために、光追尾サーボ装置を開発し三輪走行ロボットに組み込み、走行実験を行い次の知見を得た。

(1) 赤外線追尾サーボ装置は軌道上に配置した複数の ILADER の認識・追尾が可能で、静止状態で最低三つの ILADER を認識すれば、位置方位の計測が、1つの ILADER を追尾すれば走行中の位置計測が高精度で行える。

(2) 静止状態で三つの灯台を検出して位置を測定する場合、ILADER は直角三角形の配置にすると 4×3.5 m の空間で標準偏差 0.02 m 以下の面積が 87% であった。

(3) 直進走行制御を用いることによって、取付誤差、ガタ等を含む機構的でも高精度の軌道制御が可能である。ただし、制御ゲインは不確定要素が多いため、実験を行って試行錯誤的に決めなければならな

い。

(4) 走行空間の認識のためには、ロボット自身の高精度の位置計測と信頼性の高い外界センサが必要である。ここでは、超音波センサを用いた距離の計測と自己座標から走行空間の認識が可能であることを示した。

文 献

- (1) 東口, 計測と制御, **30**-1(1991), 5-14.
- (2) 滝田・背戸・肥田, 日本ロボット学会誌, **10**-3(1992), 411.
- (3) Furuhashi, H., Minami, S., ほか4名, *Proceedings of 1st MOVIC*, (1992), 499.
- (4) 斉丙・大川, 日本ロボット学会誌, **9**-2(1991), 129.
- (5) 新井・中野, 計測自動制御学会論文集, **18**-10(1982), 1013.
- (6) 越智, 日本ロボット学会誌, **5**-5(1987), 339.
- (7) Takita, Y., Hida, Y. and Seto, K., *Proceedings of 1st MOVIC*, (1992), 547.
- (8) 滝田・肥田・背戸, 日本ロボット学会誌, **10**-3(1992), 361.
- (9) 建設の機械化, 特集・雲仙普賢岳における無人化施工を終えて, No. 534 (1994)8, 3.