ビデオカメラを用いた車輪型移動ロボット用軌道計測システムの 精度向上に関する研究[†]

江村 超*・千田 陽介*・桧山 昌之*
金子 哲憲**・荒川 章***

Trajectory Measurement System for Wheeled Robot Using CCD Camera

Takashi EMURA*, Yosuke SENTA*, Masayuki HIYAMA*,
Tetsunori KANEKO** and Akira ARAKAWA***

In order to analyze the mechanism of dead reckoning of wheeled robot, it is necessary to measure the trajectory of robot. The authors made a measurement system using a CCD camera with electrically powered lens that tracks automatically a small wheeled robot using two servomotors. These servomotors have made possible to measure on large area and with high accuracy using zoom lens. After measuring and simulating the accuracy of this system, it was concluded that the main cause of measurement error is due to cross-coupling errors of tracking system. In order to calibrate measurement error, the authors used table look-up method, and it gave us satisfactory results. This paper describes methods for reducing the measurement errors and experimental results of actual trajectories of small wheeled robot.

Key Words: CCD camera, trajectory sensor, wheeled robot

1. はじめに

移動ロボットの自律化のためには、様々なセンサを用いて外界の環境を認識し危険を回避するとともに自己の位置を測定することが不可欠である。しかし位置の基準点となるランドマークは常に検出されるとは限らず、また高速で移動する場合、画像処理等のセンサのサンプリング速度が不十分となることがある。そこで新たな外環境を検出・認知するまで、移動ロボットは自己の移動距離、旋回角等の内界センサ情報のみを用いてデットレコニング（推測航法）を行う必要がある。そのためデットレコニングの精度向上は重要な研究課題の一つである¹⁾。

デットレコニングの精度向上の研究に際して、移動ロボットの動きを正確に測定し評価を行う必要がある。また測定は、ロボット本来の軌道に影響を与えないため非接触で行う必要がある。このような目的に対して、小森谷・谷は天井にカメラ

を設置しロボットを撮影することによりロボットの軌道を測定する方法を提案した²⁾。しかしこの方法では、測定精度はカメラの視野角が小さいほど高く、また測定範囲は視野角が大きいくほど広いと、両者の両立は不可能であった。そこで江村はビデオカメラをカメラ台に搭載し、サーボモータを用いてカメラの視線を可変にすることにより、測定範囲を視野角によらず拡張することが可能な計測システムを提案した³⁾。

本論では、試作した計測システムの測定精度を評価し、測定誤差の主な原因はシステム自体の角度誤差であることを確認した。さらに、この寸法誤差を考慮した新たなモデルによる補正、誤差マップを用いる補正を用いて測定精度の向上を試みたので合わせて報告する。

2. 軌道計測システムの概要

Figs. 1, 2 に試作した計測システムの外観図と概要図を示す。また、制御システム図を **Fig. 3** に示す。ビデオカメラ (SONY (株) SSC-M370, 有効 38 万画素 1/2 インチ CCD) は天井に設置されたカメラ駆動装置に搭載されており、サーボモータでカメラの揺動角を制御することにより、カメラの視線ベクトルを任意の方向に向けることができる。駆動装置は、カメラがロボットを追跡するときに、信号線や電力線が本体に巻き付くことを防止するため、ピッチ、ロール方向の水平 2 軸の回転となっている。移動ロボットの位置

[†] 第 5 回ロボットセンサシンポジウムで発表 (1996・4)

* 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉

** (株)日立製作所電化機器事業部 日立市東多賀 1-1-1

*** 日工精機 (株) 東京都目黒区青葉台

* Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai

** Hitachi, Ltd., Hitachi

*** Nikkou Ltd., Meguro-ku, Tokyo

(Received June 20, 1996)

(Revised March 12, 1997)

Fig. 1 Overview of measurement system

Fig. 2 Outline of measurement system

を計測するには、ロボットの代表点として設置された高輝度LEDをビデオカメラで撮影し、画像上の輝点の位置とサーボモータに取り付けられているエンコーダ値から得られるカメラの向きを用いて、床面上に存在する代表点の2次元位置を計算する。このとき得られた輝点の位置をメモリに記憶したりディスプレイに表示したりするとともに、カメラの視線をLEDの方向へ向けるようにサーボモータを制御することにより、カメラはロボットを自動追従することができる。さらに、ロボットの位置によらず画像内の輝点が常に一定の大きさでシャープに写るように、ロボットの位置情報より算出したカメラとロボットとの距離を用いて、電動レンズ（(株) Canon, J10×10-II PZFI, 焦点距離 10–100 mm）のフォーカスおよびズームを制御している。

カメラのレンズの位置 $q = (q_x, q_y, q_z)^T$ は、Fig. 4 より、カメラ駆動装置のロール角、ピッチ角 $(\phi_r, \phi_p)^T$ を用いて

$$q = E_{\phi_r} \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ d \\ 0 \end{pmatrix} + E_{\phi_p} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} \right\} \quad (1)$$

と表すことができる。ただし、 E_{ϕ_p} , E_{ϕ_r} はそれぞれピッチ軸回り、ロール軸回りの回転行列である。 l はレンズ主点と

Fig. 3 Block diagram of the system

Fig. 4 Coordinates of the system

ピッチ軸との距離を表しており、焦点距離を f , CCD 素子とピッチ軸との距離を δ とすると以下の関係が成り立つ。

$$l = f + \delta \quad (2)$$

ビデオ画像内の輝点の座標を $(\alpha, \beta)^T$ とすると q 点から輝点への視線ベクトル $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ は

$$p = E_{\phi_r} E_{\phi_p} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ f \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。これより輝点の座標 $(x, y, h)^T$ は、LED が $z = h$ の平面に存在している条件より、

$$\begin{cases} x = (h - q_z) \frac{p_x}{p_z} + q_x \\ y = (h - q_z) \frac{p_y}{p_z} + q_y \end{cases} \quad (4)$$

と求めることができる。

本測定装置の場合、カメラ駆動装置の回転角は減速機構によって約 13 秒の分解能を得ている。この分解能は床面の位置を、原点直下で 0.15 mm、原点から 2 m はなれた位置において 0.26 mm 以内で測定することを意味する。

Fig. 5 Measurement error without compensation ($k = 2$, Errors are magnified k times)

Fig. 7 Modified figure from Fig. 6 using checked pattern

Fig. 6 Modified measurement error ($k = 3$)

3. 測定精度

3.1 精度の測定実験

床上に 4×3.5 m の方眼紙を敷き、この目盛の値を真値とみなし、測定装置の測定精度を計測した。測定点 $(x, y)^T$ における測定値を $(x + \Delta x, y + \Delta y)^T$ とした場合、発生した誤差を誇張して表示するため k 倍し、 $(x + k\Delta x, y + k\Delta y)^T$ と真値とを結ぶ線分で表した結果を Fig. 5 に示す。測定に際して、視野角は輝点の位置によらず常に 1 画素当たり約 0.1 mm の分解能が得られるように制御した。また、同様の測定は数回行われたが個々の測定点における誤差には良好な再現性が確認された。Fig. 5 より、誤差が原点を中心に反時計方向に回転していることが観測されるが、これは測定装置のロール軸と方眼紙の x 軸が一致しなかったことが原因と考えられる。そこで、Fig. 5 の測定値を原点を中心に時計回りに 0.68° 回転させてみた結果を Fig. 6 に示す。この図の誤差は平均 7.23 mm となった。

3.2 仮想リンクモデルを用いた精度向上

得られた測定値の誤差の傾向を考察するにあたって、読者の理解を助けるために、Fig. 7 に Fig. 6 における隣接する $(x + 3\delta x, y + 3\delta y)^T$ を格子上に結んだものを示す。この図か

Fig. 8 System model with virtual links

ら、モータ回転角や床面の原点など初期値のずれでは発生しない、 x 軸に対し湾曲した誤差が観察される。これは、システムが完全に設計通りに誤差なく製作されていると仮定し、式 (1) ~ (4) に基づき測定値を算出したが実際には組み立てや取り付け寸法誤差が存在したためと考えられる。寸法誤差として、測定は輝点がカメラ画像の中心に位置するのに十分な時間間隔で行われたため Fig. 4 における l の誤差の影響は少ないと思われること、 d に関しても寸法誤差に対する測定値の影響が小さいことなどを考慮すると、この規則性の原因は角度誤差、すなわちシステムのピッチ軸とロール軸およびカメラの視線ベクトルのなす角が垂直から微妙にずれていたことが原因と推測できる。そこで各軸間に Fig. 8 のような仮想リンクを配置することで任意の角度を与えることが可能なモデルを作成し、仮想リンク角の与え方により、誤差の規則性が Fig. 7 と一致する傾向が得られるかシミュレーションにより調べた。

Fig. 9 Simulation result of errors using virtual links ($k=5$)

Fig. 8 のモデルにおけるカメラのレンズ位置 q と視線ベクトル p はそれぞれ

$$q = E_{\varepsilon_p} E_{\phi_r} E_{\varepsilon_y} \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ d \\ 0 \end{pmatrix} + E_{\phi_p} E_{\varepsilon_r} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} \right\} \quad (5)$$

$$p = E_{\varepsilon_p} E_{\phi_r} E_{\varepsilon_y} E_{\phi_p} E_{\varepsilon_r} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ f \end{pmatrix} \quad (6)$$

となる。ただし、 E_{ε_r} 、 E_{ε_p} 、 E_{ε_y} は各仮想リンクの回転行列、それ以外は、式 (1)、(3) と同様である。

Fig. 5 における各測定点で実測されたリンク角を用いて、仮想リンクを含むモデルに基づいた場合の測定値を算出し、各測定点の真値との比較を行った。平均誤差が最小となる仮想リンク角を数値的に求めたところ、各仮想リンク角が $\varepsilon_p = 0.20^\circ$ 、 $\varepsilon_r = -0.91^\circ$ 、 $\varepsilon_y = 0.21^\circ$ の場合に誤差が平均 4.32 mm と最小になった。この時の測定誤差のシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。ただし、各測定点の真値は方眼紙が原点を中心として反時計回りに 0.69° 回転したものとし、 ϕ_r 、 ϕ_p は $(x, y)^T = (0, d)^T$ と測定されたものを 0° とした。

図において $x, y < 0$ の位置は誤差が比較的大きいことが観察される。この原因として、床のうねりを考えた場合、実際の床面と大きな食い違いが生じる。これより減速機構であるハーモニックドライブの伝達誤差、重力によるアームのたわみが原因と思われる。

3.3 誤差マップを用いた場合の測定誤差

このような未知の原因に対する誤差補正方法として誤差マップによるテーブル参照法がある。しかしテーブル参照法は測定誤差に良好な再現性がある場合しかその効果を発揮できない。そこで本計測装置の測定値の再現性を再確認するため、LED を 30 mm おきに 32 点直列に配列した角パイプを測定場に無造作に設置し、任意の 1 点の位置を複数回測定することにした。Fig. 10 は、LED を周期約 5 s で 3000 往復させ、16 番目の LED の位置を 6000 回測定した時の測定値

Fig. 10 Frequency distribution of measured value

の度数分布である。約 0.5 mm 離れた 2 つのピークが確認される。分析の結果 2 つのピークは偶数回目と奇数回目、すなわち往路と帰路の測定値の違いが主因であり、減速機構のバックラッシュの影響であると考えられる。また度数は少ないものの、ピークよりも 4 mm 前後離れた位置を計測されることがある。これは、本測定装置が 1 階の天井に取り付けられているため 2 階の人の動きに影響されていることが、後の実験で明らかになったことを付記しておく。これより本測定装置は 2 階の人の動きに留意さえすれば、優れた再現性を有しておりテーブル参照法は有効な誤差補正手段であると考えられる。

しかしながら本測定装置の場合、測定している点は等間隔でも、測定された座標値は誤差を含むため不等間隔になってしまう。また、誤差マップの作成において補正データが等間隔な配列になるように測定点を選ぶことは実現性に乏しい。しかしこのような不等間隔な配列の誤差マップは、得られた測定値が誤差マップのどの領域に属するかを検出し補正データを得るためには比較的複雑な処理を要する。コンピュータは測定中、画像処理、2 軸のサーボ制御を行っているため、このようなマッピングのアルゴリズムはできるだけ単純であることが望ましい。そこで、あらかじめ不定間隔で測定されたデータから、一定間隔で配置された誤差マップを作成し、測定中はこれを参照することにした。この場合、誤差マップを配列に組み込むことで、得られた測定値に対し除算命令を加えるだけで補正データのポイントを簡単に知ることができる。また、誤差マップの再配置は測定と別時間で行うため時間がかかってもかまわない。

Fig. 11 において $(x, y)^T$ の位置における測定値 $(\hat{x}, \hat{y})^T$ は、微小区間において誤差が直線的に変化すると仮定しかつ近接する 4 点 $(x_i, y_j)^T$ 、 $(i, j = 1, 2 : x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2)$ の測定値を $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})^T$ とすると、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\hat{y} - \hat{y}_1}{\hat{y}_2 - \hat{y}_1} (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) + \bar{x}_1 \\ \frac{\hat{y} - \hat{y}_1}{\hat{y}_2 - \hat{y}_1} (y_2 - y_1) + y_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

と考えられる。ただし $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ はそれぞれ次のようになる。

Fig. 11 Conversion of error table using interpolation

Fig. 12 Measurement error in table look-up method ($k = 10$)

$$\bar{x}_i = \frac{\hat{x} - \hat{x}_{1i}}{\hat{x}_{2i} - \hat{x}_{1i}} (\hat{x}_2 - \hat{x}_1) + \hat{x}_1 \quad (8)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\hat{y} - \hat{y}_{1i}}{\hat{y}_{2i} - \hat{y}_{1i}} (\hat{y}_2 - \hat{y}_1) + \hat{y}_1 \quad (9)$$

このような考えに基づき誤差マップを作成し、その精度を測定した結果を Fig. 12 に示す。この時の平均誤差は 2.7 mm である。なお誤差テーブルの間の数値は直線補間を行って得た。テーブル作成時に 1 度、測定時に 1 度と補間を 2 度行うため、測定値の信頼性が下がる可能性があるが、各誤差がそれほど大きくないため影響が少ないと考えた。図よりテーブルマッピング法による補正は効果のある手法であるといえる。

4. 移動ロボットの測定

本測定装置を用いて筆者らが有している自律移動車のデッドレコニングの精度を測定した。実験に用いた移動車はホイールベース 370 mm、トレッド 320 mm の前輪操舵、後輪駆動の 4 輪車である。また、代表点となる高輝度 LED は後輪軸中央上 410 mm に設置した。この輝点位置は、まず輝点を捕らえた時の測定装置の回転角から前節のテーブル参照法を用いてカメラ画像中心に写る床面の位置を求め、 $z = h$ 時における逆運動学を解くことで理想的な回転角を得、この回転角とカメラ画像内における輝点の位置を用いて $z = h - 410$ 時における順運動学を解くことで算出した。ここで h は床面

Fig. 13 Trajectory of the vehicle at 0.4 m/s

Fig. 14 Trajectory of the vehicle at 0.8 m/s

と測定装置の原点の距離で 2333.8 mm に固定した。

本測定装置は、カメラ画像内の LED の位置よりサーボモータの目標値を得ているため、ロボットが画像処理時間内にカメラの視野から外れてしまうような高速で移動する軌跡を測定することはできない。これは測定可能な移動車の速度の上限が電動レンズの視野角、すなわち測定精度に依存することを意味する。そこで今回は以下に示すような学習制御を用いることで高速な移動車の軌道を高精度に測定した。

まず、移動車を追従可能とするため視野角を大きく取り、時刻 kT における移動車の位置 $\mathbf{x}_{fo}[kT]$ を学習する。ここで T はシステムのサンプリングタイムである。続いてもう一度、移動車に同じ軌道を与え、同時刻における測定値、 $\mathbf{x}_{so}[kT]$ を用いて、次の時刻 $(k+1)T$ におけるシステムの目標値 $\mathbf{x}_{si}[(k+1)T]$ を

$$\mathbf{x}_{si}[(k+1)T] = \mathbf{x}_{fo}[(k+1)T] + \mathbf{x}_{fo}[kT] - \mathbf{x}_{so}[kT] \quad (10)$$

と与える。これにより高速な移動車を視野角の大きさによらず追従することが可能であるとともに、前回との誤差を加味することで多少の初期値のずれに対応することができる。

Figs. 13, 14 に目標速度を 0.4 m/s, 0.8 m/s とした場合の測定された移動車の軌跡を示す。移動車に与えた目標軌道は操舵角の連続性を保つため、クロソイド曲線と円弧を繋ぎ

合わせた曲線を用いた。Fig. 13 において、本測定装置は 4 象限全てを含んだ約 3m 四方における移動車の軌跡を測定していることが確認される。また、目標速度が 0.8m/s と比較的高速である Fig. 14 の実験では、壁への激突を避けるため目標軌道の y 方向の幅を 0.4m/s の時の約半分に制限している。Fig. 14 は速い移動速度でも軌道測定が可能であることを示している。しかし、測定値が微妙に振動していることが確認される。この原因として測定値自身の誤差、実際の移動車の動き、移動車のロール方向の振動などが考えられる。本測定装置のサンプリング間隔が 100 msec であるため、移動車の動きは 8cm 毎にしか測定できず本測定装置だけでは原因の追求が不可能である。しかしながら、デッドレコニングの研究を行うに際して、このような高速で実験を行うことはないため現段階においては問題ないと思われる。

5. おわりに

移動ロボットの軌道を計測するために、ビデオカメラを用いた位置計測システムを開発した。このシステムは、カメラの視野角を小さく取することで測定精度を得、かつカメラの視線を可変とすることで測定範囲を大きく取れる特徴を持つ。

本システムを用いて 4×3.5 m の範囲における計測精度を測定した結果、測定誤差の平均は 7.23 mm となった。この誤差の原因は主にシステムの角度誤差であり、寸法誤差を考慮に入れた場合 4.32 mm に低減されることをシミュレーションにより確認した。また、実時間でテーブルマッピング法により補正しながら計測する実験を行った。計算機の処理を考慮に入れ、測定に用いる誤差マップはあらかじめ計測された位置データをもとに等間隔な配列となるように補間した誤差マップを参照することとした。この場合の精度は平均 2.70 mm と優秀な結果を得た。さらに本システムを用いて 4 象限にわたる移動ロボットの走行軌道の測定に成功した。

今後は、本論では扱わなかった動的な精度や応答性について検証を行う必要がある。また、現段階ではテーブルマッピング法を用いて移動車の軌道を計測している。これは測定装置が移動しない場合、高精度に位置を計測することが可能であるが、より高範囲の動きや異なる床質におけるデッドレコニングの評価などのため測定装置を移動する際には複雑なテーブル作成作業が伴う。寸法誤差を考慮に入れたモデルによる幾何的な位置測定法を用いた場合この問題は回避できるが、より高精度な測定のためには減速機構の伝達誤差やアームのたわみ等を考慮に入れたモデルの構築が必要となる。さらに、本測定装置による測定は床面との位置関係が既知である必要があるが将来の測定範囲の拡大に備え、床面の数点の座標を与えることにより床面と測定装置の位置関係を算出するためのアルゴリズムを構築中である。

最後に、本計測システムの設計および試作において東北大学工学部、鈴木正俊技官、平成 5 年度卒業生、柴田紀正氏の協力を得たこと、移動ロボットの設計・試作において平成 4 年卒業生、古屋剛氏の協力を得たことを記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 油田信一：自律移動車のロボットにおける知能化技術 (2) ナビゲーションシステムとガイダンス, 日本ロボット学会誌, 5-5, 403/406 (1987)
- 2) 小森谷, 谷：位相環境を用いる移動ロボット制御実験システムの構成とその利用, 日本ロボット学会誌, 9-3, 314/322 (1991)
- 3) 荒川, 江村, 金子：ビデオカメラを用いた自律移動車の軌道計測システム, 計測自動制御学会東北支部第 145 回研究集会資料, No. 145-2 (1994)
- 4) T. Emura, A. Arakawa and T. Kaneko: Wide-Range Trajectory Measurement Using CCD Camera for Small Mobile Robots, 1995 IEEE Int Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 655/660 (1995)
- 5) 喜多伸之：能動的なカメラ制御とアクティブ・ビジョン, 第 4 回ロボットセンサシンポジウム講演論文集, 131/138 (1994)

[著者紹介]

江村 超 (正会員)

1969 年, 東北大学精密工学科博士課程修了。同年横浜国立大学機械工学科講師。71 年東北大学精密工学科講師。85 年同教授。メカトロニクス技術を用いた計測・制御システムの研究に従事。日本機械学会, 精密工学会, 日本ロボット学会, IEEE, 設備管理学会などの会員。(工学博士)

千田 陽介 (正会員)

1994 年, 東北大学精密工学科修士課程修了。同年東北大学機械電子工学科助手, 現在に至る。動歩行を行う 4 脚ロボットの研究, 工作機械の安価なコントローラの開発に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会の会員。

桧山 昌之 (学生会員)

1995 年, 東北大学精密工学科修士課程修了。同年同大学博士過程入学。Bezier 曲線を用いた自律移動車の軌道生成に関する研究に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会の会員。

金子 哲憲

1995 年, 東北大学精密工学科修士課程修了。同年(株)日立製作所勤務。在学中は自律移動車の計測システムの開発・研究に従事。

荒川 章 (正会員)

1980 年, 東北大学精密工学科修士課程修了。同年(株)日産自動車勤務。86 年東北大学精密工学科助手, 94 年同大学機械電子工学科講師, 助教授を経て, 95 年(株)日工精機に勤務。現在に至る。日本機械学会, 精密工学会, 日本ロボット学会の会員(工学博士)