技術論文

直交座標型非ホロノミックロボットの製作と制御実験

町田 健一^{*1} 羅 正華^{*2} 船木 陸議^{*2}

Prototyping and Control Experiments of a Cartesian Nonholonomic Robot

Kenichi Machida^{*1}, Zheng-Hua Luo^{*2} and Michitaka Funaki^{*2}

In a previous paper, the present authors proposed to constructing a Cartesian nonholonomic robot using two balls and two actuators. In order to find whether the robot would be physically realizable and whether good control results could be expected, a prototype is constructed and control experiments are conducted. A new sensor which can detect the position and orientation of the robot is also developed, using two mouses used in computers. Both simulations and control experiments are performed, yielding very similar and acceptable control results, showing the correctness of the kinematic model, the efficacy of the control algorithms, and the physical realizability of the proposed nonholonomic robots.

Key Words: Nonholonomic Systems, Cartesian Robots, Chained Form, Stabilization, Experiment

1. はじめに

ホロノミック、非ホロノミックとは力学的拘束を分類する用語であり、非ホロノミックシステムとは積分不可能な拘束を受けるシステムのことをいう。身近なところでは自動車为非ホロノミックな拘束を受けるシステムであり、このために自動車はステアリングとアクセルという二つの入力で位置 (x, y) と姿勢 ϕ という三つの状態を制御できる。しかし、はじめに回転中心を移動させなければ任意な方向に速度を発生することができないため制御は難しく、縦列駐車や車庫入れといった動作にはドライバの巧みな運転技術が要求される。

一方、ホロノミック特性を有するロボットは、平面上の任意の位置・姿勢で移動速度がゼロでない状態から平行移動および回転という独立した平面運動が可能であるため任意の位置・姿勢への制御が簡単である。こうしたホロノミック特性を有する全方向移動ロボットの機構に関しては、三つの球を使ったものの[2][3]や4個のボールと4本のロッドで構成される2組のトラックを使ったものの[4]などが研究されている。いずれもそのホロノミック特性を実現するためにアクチュエータの数は状態量の数と同じかそれ以上用いる必要がある。

文献[1]では、より少ないアクチュエータでより多くの自由度を実現することを目指し、二つの球をそれぞれに取り付けられ

たアクチュエータで独立に駆動することで平面内の位置 (x, y) と姿勢 ϕ の3自由度を制御できる直交座標型非ホロノミックロボットの原理を提案し、フィードバック制御のシミュレーション結果を示したが、このようなロボットは果たして実現できるかどうか、また良好な制御実験結果が得られるかなどの疑問が残された。

本論文では、上記非ホロノミックロボットを製作し、制御実験を行ったので結果を報告する。以下、本ロボットの機構を説明した後、運動学モデルを示す。また、マウスを利用して位置・姿勢センサを開発したので、その原理とセンサの性能評価について述べる。最後にフィードバック制御実験結果を計算機シミュレーション結果と比較しながら検証する。

2. 直交座標型非ホロノミックロボット

2.1 ロボットの製作

文献[1]で設計した直交座標型非ホロノミックロボットを製作した。製作したロボットの外観を Fig.1 に、組み立て図を Fig.2 に示す。Fig.2 に示すようにロボットの左右に一つずつ、合計二つの球を配置する。球の直径は 216 [mm] で材質はエポナイトであり、左右の球の中心間距離 ℓ は 400 [mm] である。モータによって発生される角速度は減速機を通して駆動輪に伝達され、これによって球が駆動される。駆動輪の直径は 60 [mm] である。駆動輪と球との間の摩擦力を大きくするために、駆動輪の表面にはテニスラケットのグリップ用の滑り止めのテープを巻き、さらに駆動輪の反対方向にはウレタンの受動輪と可調整バネを付ける。駆動輪の取り付け角度は $\pi/4$ [rad] とする。また、ロボットの前後には転倒防止のために補助のキャスター

原稿受付 1995年12月17日

^{*1}長岡技術科学大学大学院工学研究科

^{*2}長岡技術科学大学

^{*1}Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology

^{*2}Nagaoka University of Technology

によって、式 (2) の方程式は Chained Form

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = v_1 \\ \dot{\xi}_2 = v_2 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_2 v_1 \end{cases} \quad (5)$$

に変換される。

3. 位置・姿勢センサ

ロボットの位置・姿勢センサは内界センサと外界センサに大別できる。

外界センサによる位置・姿勢計測方法の多くは三角測量に基づいており、超音波を用いる方法 [5] などが研究されている。これは、室内に超音波の発信源を設置し、これに対する室内でのロボットの絶対位置と座標を求めるというものである。超音波はターゲット以外からの反射波の影響を受けたり、気温によって音速が変化するために常に音速の補正が必要であるという問題がある。

一方、車輪式移動ロボットで多く利用されている内界センサは駆動輪の回転角度をロータリエンコーダにより測定し、位置・姿勢を求めている。しかし、駆動輪にはトルクがかかっているため、滑りが生じる場合がある。そこで、キャスターを計測輪として使い、FOG (光ファイバジャイロ) と組み合わせて位置・姿勢を計測する研究がなされている [6]。このセンサを用いて任意の曲線軌道を約 1.7[m] 動かしたときの誤差が X 方向で 2.3[mm]、 Y 方向で 3.5[mm] 程度という報告がなされている。ここで用いられている FOG は高精度ながら、形状が大きく非常に高価であるという欠点がある。

3.1 センサの原理

本研究では全方位への移動でも計測が可能で、しかも安価で入手しやすいパーソナルコンピュータ用のポインティングデバイス PD (トラックボール、マウスなど) を二つ用いて位置・姿勢センサを開発した。

Fig. 4 に示すように PD_1 から中点、中点から PD_2 の距離を L_1, L_2 、慣性座標系 OXY からみた PD_1 の X 座標を x_1 、 Y 座標を y_1 とする。また、 dt [s] での PD_1 の X' 軸方向の移動距離を dx_1 、 Y' 軸方向の移動距離を dy_1 、 PD_2 の Y' 軸方向の移動距離を dy_2 とする。

dt [s] での姿勢の変化量は

$$d\phi = \tan^{-1} \left(\frac{dy_2 - dy_1}{L_1 + L_2} \right) \quad (6)$$

Fig. 4 Coordinate system of the sensor

と表すことができる。これより現在の姿勢 $\phi^{(n)}$ は dt [s] 前の姿勢 $\phi^{(n-1)}$ を用いて

$$\phi^{(n)} = \phi^{(n-1)} + d\phi \quad (7)$$

で求められる。

PD_1 の座標は

$$\begin{cases} x_1^{(n)} = x_1^{(n-1)} + dx_1 \cos \phi^{(n)} - dy_1 \sin \phi^{(n)} \\ y_1^{(n)} = y_1^{(n-1)} + dx_1 \sin \phi^{(n)} + dy_1 \cos \phi^{(n)} \end{cases} \quad (8)$$

であるから、ロボットの位置は

$$\begin{cases} x^{(n)} = x_1^{(n)} + L_1 \cos \phi^{(n)} \\ y^{(n)} = y_1^{(n)} + L_1 \sin \phi^{(n)} \end{cases} \quad (9)$$

で求めることができる。

3.2 性能評価

Fig. 5 に示すようにロボットにセンサを実装し、性能評価を行った。ロボットを前方に約 1[m] 移動させたときの軌跡 (センサ出力値) とロボット停止時における位置 (実測値とセンサ出力値) を Fig. 6 に示す。Table 1 にロボット停止時における位置・姿勢の実測値、センサ出力値および誤差を示す。式 (9) から分かるように、姿勢 $\phi^{(n)}$ の誤差が x 方向および y 方向の

Fig. 5 Illustration of the robot with the sensor

Fig. 6 Error evaluation of the sensor system

Table 1 Error evaluation of the sensor system

measurement			sensor			error		
x [m]	y [m]	ϕ [rad]	x [m]	y [m]	ϕ [rad]	x [m]	y [m]	ϕ [rad]
-0.051	1.050	0.097	0.019	1.005	0.001	0.070	0.045	0.096
-0.063	1.019	0.002	-0.009	1.005	0.006	0.054	0.014	0.004
-0.022	1.021	0.002	0.014	1.006	-0.015	0.036	0.015	0.017

誤差の原因となる。また、PD 内部で使用されている球と床面あるいはロータリエンコーダ検出部での滑べりの発生、センサの取り付け位置の誤差、演算の丸め誤差などが本センサの誤差の要因となる。さらに、ゴミ、ホコリなどが付着し、移動距離が延びるにつれ精度が悪化することが考えられる。

4. ロボットの制御

本章では、前章で開発した位置・姿勢センサを用いて、ロボットの位置決めフィードバック制御について考える。運動学モデルの妥当性と制御則の有効性および限界を検証するために、計算機シミュレーションと制御実験結果を比較しながら説明する。

4.1 原点への安定化制御

Chained Form 式 (5) が原点に収束するように制御入力 v_1, v_2 を決めれば、式 (3) の逆変換によってもととのシステム式 (2) の入力が決まり、座標 (x, y, ϕ) は $q^* = (0, -\ell/2, 0)^T$ に収束する。 $q = (x, y, \phi)^T$ の代わりに $q + q^*$ とすれば、 q は原点に収束する。

文献 [1] で提案した制御則は、まず Chained Form の状態を有限時間内で多様体

$$M = \{\xi | \xi_2 = 0, \xi_3 = 0, \xi_1 = \text{任意}\}$$

に到達させ、それから状態 ξ_1 を原点に収束させる。制御入力は次のように与える。

$$\begin{cases} v_1 = c : \text{Const.}, \xi \notin M \\ v_2 = -\frac{V_{2\max}}{c} \text{sign}(\xi_3 + c\xi_2/|\dot{\xi}_2|/(2V_{2\max})) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_1 = -k\text{sign}(\xi_1) - \alpha\xi_1, \xi \in M \\ v_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

以下、この制御則を制御則 1 とする。明らかに、制御入力 v_2 のスイッチング周波数が無限大であれば、状態は最終的に M に入り、 $\xi_2 = \xi_3 = 0$ となる。しかし、デジタル計算機で制御入力を実現するとき、スイッチング周波数はサンプリング周波数 (有限) となるので、多様体 M の付近で制御入力のチャタリングが生じやすい。これを克服するために、実験およびシミュレーションでは小さい正実数 ϵ を選んで、 M を

$$M = \{\xi | |\xi_2| \leq \epsilon, |\xi_3| \leq \epsilon, \xi_1 = \text{任意}\}$$

と置き換えた。サンプリング周波数が高ければ、 ϵ は小さく取れる。

文献 [7] で Sordalen は Chained Form に対して解析的でない周期時変状態フィードバック制御則を構成し、閉ループ系の指数安定性を証明している。以下、この制御則を制御則 2 とし本ロボットの制御に適用する。

Fig. 7 Control system

4.2 任意の位置・姿勢への安定化制御

変数 $q_e = T(q_r)(q - q_r)$ を定義し、 q を q_e で置き換え、制御則を適用すれば、任意の目標値 $q_r = (x_r, y_r, \phi_r)^T$ へ安定化することができる。ここで、変換行列 $T(q_r)$ は

$$T(q_r) = \begin{bmatrix} \cos \phi_r & \sin \phi_r & 0 \\ -\sin \phi_r & \cos \phi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

である [7]。

4.3 制御実験

Fig. 7 に本ロボットの制御システム構成を示す。制御システムはコントローラとなる V25 CPU ボード、デジタル信号を電圧に変換する 8 [bit] D/A コンバータ、電力を増幅しモータを駆動するモータドライバ、位置・姿勢センサからなる。

本論文ではシミュレーションおよび実験で次のようなパラメータを設定する。

制御則 1: $c = 0.045, V_{2\max} = 0.004, \alpha = 0.1, k = 0$

$M_\epsilon = \{\xi | |\xi_2| \leq 0.05, |\xi_3| \leq 0.05, \xi_1 = \text{任意}\}$

制御則 2: $\lambda = 0.5, K = 0.3, \kappa = 0.5, T = 8\pi$

なお、サンプリング周期は制御則 1 では 0.1 [s]、制御則 2 では 0.15 [s] とした。

目標値を $q_r = (0.3, 0, 0)^T$ すなわち、 X 軸方向に 0.3 [m] の移動を行わせるとして、制御則 1 を適用してシミュレーションと制御実験を行った。このときのロボットの軌跡をそれぞれ Fig. 8 と Fig. 9 に示す。Fig. 8, Fig. 9 から分かるようにロボットは始め前進して行き、あるところで運動の方向の切り返しを行って目標に近づいていく動作が見られる。本ロボットは自動車と同様に真横に移動することができない。したがって、自動車の「車庫入れ」で見られるようなこのような動作は妥当であると思われる。

次に、 Y 軸方向に 0.3 [m] の移動を考え、目標値を $q_r = (0, 0.3, 0)^T$ としたときの制御則 1 によるシミュレーションと制御実験の結果をそれぞれ、Fig. 10 と Fig. 11 に示す。目標が

Fig. 8 Simulation result using Control law 1 with $q_r = (0.3, 0, 0)^T$

Fig. 11 Experimental result using Control law 1 with $q_r = (0, 0.3, 0)^T$

Fig. 9 Experimental result using Control law 1 with $q_r = (0.3, 0, 0)^T$

Fig. 12 Simulation result using Control law 1 with $q_r = (0, 0, \pi/4)^T$

Fig. 10 Simulation result using Control law 1 with $q_r = (0, 0.3, 0)^T$

Fig. 13 Experimental result using Control law 1 with $q_r = (0, 0, \pi/4)^T$

Y 軸上で、しかも姿勢が初期値と同じ場合は左右の入力を等しくすることで本ロボットは目標値に到達することができる。しかし、Fig. 10, Fig. 11 で見られるように本制御則ではロボットは多様体に収束してから姿勢の修正を行い、目標値に到達している。

また、ロボットの姿勢変更制御を行うために、目標値を $q_r = (0, 0, \pi/4)^T$ とした。制御則 1 を適用してシミュレーションと制御実験を行った結果を Fig. 12, Fig. 13 に、制御則 2 を適用して制御実験を行った結果を Fig. 14 に示す。本ロボットはその場旋回（回転半径が 0）ができないため、姿勢変更のみを行おうとする場合は、いったん、初期位置から遠ざかり、姿

勢変更を行わなければならない。

こうした動作を行う場合、制御則 1 では、はじめに後退していき、ある点で前進運動に切替を行う。また、多様体に収束した時点で入力切替を行い、目標の位置・姿勢に安定化させている。

なお、制御で用いたサンプリング周波数は比較的低いので、先に述べたように $\epsilon = 0.05$ と取り、多様体を $M_\epsilon = \{\xi \mid |\xi_2| \leq 0.05, |\xi_3| \leq 0.05, \xi_1 = \text{任意}\}$ と設定した。そのため、位置決めで定常誤差が見られたと思われる。

制御則 2 では原点を出発点とし楕円状の軌跡を描き、再び原点に戻りながら姿勢の変更を行っている。制御則 1 に比べて滑

Fig. 14 Experimental result using Control law 2 with $q_r = (0, 0, \pi/4)^T$

らかな軌跡を描いていることが分かる。

制御則 1 について、シミュレーションと実験で類似した軌跡が得られていることが分かる。これは、ロボットの運動学モデルが正確に得られていることを示唆している。実験での軌跡の誤差は、理想モデルで駆動輪—球が点接触しているところを駆動輪からみた系全体の慣性に打ち勝つ駆動力を球に与えるため面接触にしたことによるモデル誤差、ロボットの加工および組み立て精度、入力（モータの速度）の誤差、床面の凹凸の影響、駆動輪—球の滑べりの発生、センサの誤差などが原因しているものと思われる。

特に面接触にしたことによるモデル誤差は、積載重量が大きくなるほど顕著に現れることが予想される。点接触で大きな駆動力を伝えることが可能な機構の設計を今後の課題としたい。

5. 結 論

二つの球と二つのアクチュエータを使った非ホロノミック移動ロボットを製作した。また、マウスを二つ用いた位置・姿勢センサを開発した。精度に問題はあるがコストが安く、全方位への計測が可能であるというメリットがある。

本ロボットに対し、制御則を適用し、シミュレーションによ

てロボットの移動の軌跡の確認をした。その結果、任意の目標値に安定化できることが確認された。

開発したセンサの情報を用いてロボットの制御実験を行った。制御則 1, 制御則 2 とともに本ロボットを任意の位置・姿勢へ安定化できることが確認できた。しかし、収束を判定する多様体によって誤差が残ることが分かった。目標へのより高精度な安定化には

- D/A コンバータの分解能を高める
- 多様体をより 0 に近づける
- 高速な CPU を使い、サンプリング周波数を上げる

などの方法が考えられる。

謝 辞

実験装置を製作していただいた（株）ダブル技研の和田博社長、御器谷科学技術財団、機械工業振興財団に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 羅, 船木: “直交座標型非ホロノミックロボットの設計と制御”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.1038-1043, 1995.
- [2] 松本直樹, 竹田滋, 飯田慎二, 伊東正篤: “三つの球を使った全方位移動機構の運動と制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.60, no.576, pp.226-273, 1994.
- [3] 飯田慎二, 竹田滋, 松本直樹, 伊東正篤: “球を使った全方位移動機構およびその制御”, 第 3 回ロボットシンポジウム予稿集, pp.79-83, 1993.
- [4] 西川晃平, マークウエスト, 浅田春比古: “ホロノミック特性を有する全方向移動ロボットと移動ロボットの高精度誘導方式の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.2, pp.249-256, 1995.
- [5] 新井健生, 中野栄二: “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, vol.18, no.10, pp.1013-1020, 1982.
- [6] 阿部国寛, 三枝靖典, ラモス フタベア, 高島俊: “自律移動ロボットのキャスターを用いた位置・方位センシングシステム”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '95 予稿集, pp.434-437, 1996.
- [7] O.J. Sordalen: “Feedback control of nonholonomic mobile robots,” Ph.D. Thesis, The norwegian Institute of Tech., 1993.

町田健一 (Kenichi Machida)

1971 年 6 月 3 日生。1996 年長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月よりダイダイン株式会社に勤務。非ホロノミックロボットの研究に興味を持つ。(日本ロボット学会正会員)

船木陸議 (Michitaka Funaki)

1967 年 9 月 12 日生。1993 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程前期修了。同年日本電気株式会社入社。1994 年長岡技術科学大学助手 (機械系) となり現在に至る。宇宙ロボット、非ホロノミックシステムの研究に興味を持つ。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

羅 正華 (Zheng-Hua Luo)

1962 年 2 月 14 日生。1990 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年より同大学基礎工学部制御工学科 (現システム工学科) 助手。1994 年より長岡技術科学大学助教授 (機械系) となり現在に至る。分布定数系の理論とその応用、ロボット、線型力学系、および非ホロノミックシステムの研究に興味を持つ。工学博士。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)