技術論文

2 輪独立駆動型移動ロボット車の軌道追従制御 —トルク算出制御とファジィ制御の比較実験—

湯 軍* 渡 辺 桂 吾* 中 村 政 俊*

Trajectory Tracking Controls of a Mobile Robot with Two Independent Drive Wheels —Comparative Experiments Between the Computed Torque Control and the Fuzzy Control—

Jun Tang*, Keigo Watanabe* and Masatoshi Nakamura*

Tracking controls for the speed and azimuth of a mobile robot driven by two independent drive wheels are experimentally attained by using a computed torque control and a fuzzy control. The computed torque controller can be easily derived by using the physical parameters for the mobile robot. However, the computed torque controller for the speed of the mobile robot can have only the P-servo controller. In order to improve the performance of such a controller, we introduce a computed torque controller having the D-servo compensator with respect to the speed error. A fuzzy controller is also applied to the present problem, in which the conclusion consists of a function of mean-values on each membership function in the antecedent. The effectiveness of two control methods is illustrated by some experiments and compared with the conventional PID control method.

Key Words: Mobile Robot, Computed Torque Control, Fuzzy Control, PID Control, Path Tracking Control

1. ま え が き

近年、産業における様々な搬送作業において、自律移動ロボットが多く利用されるようになった。それに伴いより高精度な軌道追従制御への要望が強くなっている[1][2]。筆者らは、2 輪独立駆動型移動ロボットを用いた軌道追従制御を高精度に行う基礎研究を検討し、ファジィ制御器のパラメータを多層ニューラルネットワークで自動的に調整するためのファジィ・ガウシアン・ニューラルネットワーク (FGNN) 制御法を研究し、軌道追従制御問題のシミュレーションによりその有効性を実証した[3][4]。

本論文は、実機の 2 輪独立駆動型移動ロボット車の軌道追従制御に関して、数学モデルに基づく制御系あるいはモデルに依存しないファジィ制御系がどの程度有効であるかを明らかにすることを目的としたものである。軌道追従制御においては、周知の PID 制御方法がよく利用される。しかし、この方法によると移動ロボットにパターンの異なる数種の軌道追従を行わせるには、目標軌道が変わる毎にサーボゲイン調整を行わなくてはならない。このような問題点を解消するため、文献[5]では、すでにサーボゲインの調整を必要としない方法を提案して

いる。その方法は移動ロボット車の角速度と角加速度を状態変数モデルとしたフィードフォワード制御器(逆動力学モデル)を設計し、その補償器としてフィードバックループを追加するのである。これに対して、本論文では移動ロボット車の速度・方位情報を用いた逆動力学モデルに基づくトルク算出(または計算)制御器を設計する。この方法では、理論的には速度のトルク算出制御器のサーボ部は P サーボのみとなるが、実験においてはモデル化誤差などの影響からうまく動作しないことが予想される。そこで、新たに速度の D サーボ補償付きトルク算出制御器を提案する。

モデルに基づく制御では、数学モデルの各パラメータが正確に測定できるかどうか1つの重要なポイントとなる。例えば、実機移動ロボット車の粘性摩擦係数などの物理パラメータを厳密に測ることは容易ではない。そこでさらに、制御対象の厳密な定量化モデルを必要としないファジィ制御器を用いた軌道追従制御を検討する。

以下では、まず 2 輪独立駆動型移動ロボットのモデルについて述べる。次に、提案する D サーボ補償器付きトルク算出制御器とファジィ制御器について述べる。さらに、移動ロボット車のシステム構成を説明する。最後に、各制御器を用いた実験を実施し、制御性能等の立場から比較・検討を行う。

原稿受付 1994 年 6 月 27 日

*佐賀大学理工学部

*Faculty of Science and Technology, Saga University

2. 移動ロボット車の数学モデル

Fig. 1 に示すような移動ロボットの状態変数を $x=[v \ \phi]^T$ とし, 操作量を $u=[u_r \ u_l]^T$, 出力を $y=[v \ \phi]^T$ とするとき, 以下の状態方程式を得る [6].

$$\dot{x}=Ax+Bu \quad (1)$$

$$y=Cx \quad (2)$$

ここに,

$$A=\begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix}, \quad B=\begin{bmatrix} b_1 & b_1 \\ 0 & 0 \\ b_2 & -b_2 \end{bmatrix}, \quad C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_1=-2c/(Mr^2+2I_w), \quad a_2=-2cl^2/(I_v r^2+2I_w l^2)$$

$$b_1=kr/(Mr^2+2I_w), \quad b_2=kr l/(I_v r^2+2I_w l^2)$$

である. また, v と ϕ はそれぞれロボットの速度と車両進行方位で, c, M, r および k はそれぞれ粘性摩擦係数, 車重, 車輪回転半径および駆動ゲイン係数, I_w は車輪慣性モーメント, l は左右輪と重心間の距離, I_v は重心回りの慣性モーメントである.

3. 制御器の構成

3.1 D サーボ補償器付きトルク算出制御器

前章で定義した各パラメータが正確に測定でき, 理想的なモデルが作成できるならば, モデルベース制御器として最適サーボ制御器が設計できる. しかし, 最適サーボ器の導出ではその問題をレギュレータ問題に変換し, リッカチ方程式から制御ゲインを決定することから, 制御入力表現にプラント出力情報とモデルの利用状況が明確な形では現れてこない. ここでは, ロボットマニピュレータの軌道制御等によく使用されるトルク算出制御器 (computed torque controller: CTC) [7] を導出する. これはプラント出力の速度, 方位を用いて逆動力モデルによりプラントへの入力トルクを算出するものであり,

$$u_r = \frac{\ddot{\phi}^*}{2b_2} - \frac{a_2 \dot{\phi}}{2b_2} + \frac{\dot{v}^*}{2b_1} - \frac{a_1 v}{2b_1} \quad (3)$$

$$u_l = -\frac{\ddot{\phi}^*}{2b_2} + \frac{a_2 \dot{\phi}}{2b_2} + \frac{\dot{v}^*}{2b_1} - \frac{a_1 v}{2b_1} \quad (4)$$

となる. 但し, 上記で $\ddot{\phi}^*$ は $\ddot{\phi}_d$ に PD 型サーボを追加し, $\dot{v}^*$ は $\dot{v}_d$ に P 型サーボを追加した

$$\ddot{\phi}^* = \ddot{\phi}_d + K_{\phi v} \dot{e}_{\phi} + K_{\phi p} e_{\phi} \quad (5)$$

$$\dot{v}^* = \dot{v}_d + K_{vp} e_v \quad (6)$$

Fig. 1 A mobile robot with two independent drive wheels

で与えられるとする. ここに,

$$e_{\phi} = \phi_d - \phi \quad (7)$$

$$e_v = v_d - v \quad (8)$$

とし, ϕ_d および v_d は方位および速度の目標値である.

ここで注目することは, 移動ロボット車の数学モデルに加速度モデルがないので, 速度に関してはそのトルク算出制御器のサーボ部は P 型サーボのみしか理論的には設計できないことである. この方法によると, モデルパラメータ誤差等が存在する実機実験においては, 良好な制御性能を得ることが困難となることが予想される. そこで, 本稿では, このトルク算出制御器に速度の D サーボ補償器を形式的に追加した

$$u_r = \frac{\ddot{\phi}^*}{2b_2} - \frac{a_2 \dot{\phi}}{2b_2} + \frac{\dot{v}^*}{2b_1} - \frac{a_1 v}{2b_1} + K_{vd}(\dot{v}_d - \dot{v}) \quad (9)$$

$$u_l = -\frac{\ddot{\phi}^*}{2b_2} + \frac{a_2 \dot{\phi}}{2b_2} + \frac{\dot{v}^*}{2b_1} - \frac{a_1 v}{2b_1} + K_{vd}(\dot{v}_d - \dot{v}) \quad (10)$$

を新たに考える. 但し, K_{vd} は速度の微分ゲインである. なお, この制御器を用いた閉ループ系の解析については, 文献 [8] を参照されたい. Fig. 2 には, 移動ロボット車の速度と方位制御に対する D サーボ補償器付きトルク算出制御システムのブロック線図を示す. 但し, 図中 $\hat{R}^{-1}$ は式 (9) (10) のモデルを表す.

3.2 ファジィ制御器

本論文で用いるファジィ制御器 (fuzzy controller: FC) のファジィ推論としては, 前件部をファジィ集合で, 後件部を定数値で表現する簡略化ファジィ推論 [9] を用いる. 但し, 各制御ルールにおける前件部適合度の計算はミニマム演算の代わりに代数積とする. この方法では, n 個の入力変数 ($x_1, \dots, x_n$), p 個の出力変数 ($u_1, \dots, u_p$) の場合, 任意の i 番目の制御ルールは以下のように書く.

$$R_i: \text{If } x_1=A_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } x_n=A_{in} \\ \text{then } u_1=B_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } u_p=B_{ip} \quad (11)$$

ここで, R_i は i 番目の制御ルール, A_{ij} は i 番目の制御ルールにおける j 番目の入力変数に対応する前件部ファジィ集合を表し, B_{ij} は i 番目の制御ルールにおける j 番目の出力変数に対する定数値である. 前件部適合度 h_i はメンバシップ関数の n 個の適合度 $\mu_{A_{i1}}(x_1), \dots, \mu_{A_{in}}(x_n)$ を用いて

$$h_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \mu_{A_{i2}}(x_2) \dots \mu_{A_{in}}(x_n) \quad (12)$$

とする. このとき, j 番目の出力の推論結果は

$$u_j^* = \frac{\sum_{i=1}^r h_i B_{ij}}{\sum_{i=1}^r h_i}, \quad j=1, \dots, p \quad (13)$$

Fig. 2 Block diagram of the CTC system with D servo controller

となる。ここに、 r は総制御ルール数である。ファジィ制御システムのブロック線図を Fig. 3 に示している。

このファジィ制御システムにおいて、入力スケラ G_E, G_C は適応スケリング法[10]で決定する。例えば、 G_E については

$$G_{E, \text{new}} = \begin{cases} \frac{0.9 \times L}{|x_i|} & \text{if } |G_{E, \text{old}} \times x_i| > L \\ G_{E, \text{old}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

となる。この方法はもしスケリングしたファジィ推論への入力データ x_i が台集合 $[-L, +L]$ 以外に落ちたならば、その入力データは再び台集合の 90% の範囲内に再スケリングすることを意味する。ここで、 $L=6$ である。また、 G_u は出力スケラである。

後件部定数値 B_{ij} については、例えば、2 入力 1 出力推論結果の場合のそれを B_i とすれば平均値関数型推論での VSS 制御の安定な切り換え線の傾きとして設計する方法[11]を採用し、

$$B_i = \frac{1}{\beta} (a w_{ci}^1 + w_{ci}^2) \triangleq K \left[\frac{w_{ci}^1}{w_{ci}^2} \right] \quad (15)$$

として、第 i 番目の制御ルールにおける B_i を決定する。ここで、 $K = [a/\beta, 1/\beta]$ とし、 $a > 0$ は切り換え線の安定度を表す係数、 β は入力データについての平均化定数である。また、 w_{ci}^1 と w_{ci}^2 は第 1 入力データおよび第 2 入力データの第 i 番目の制御ルールでの前件部メンバシップ関数の平均値を表す。この方法では、前件部メンバシップ関数としては平均値を持つものでなくてはならないが、各制御ルールに依存しない設計パラメータ α, β を扱える点で、後件部の設計に伴う試行錯誤を従来の方法に比べて大幅に軽減化できる。勿論、ある特定のルールあるいは入力 x_i のあるファジィラベルにおいて設計パラメータ α, β を変更することも可能である。

Fig. 3 Block diagram of fuzzy control system

4. 移動ロボット車の制御システム

4.1 移動ロボット車の制御システム

Fig. 4 に実験用移動ロボット車の外観を示す。このロボット車の大きさは $0.43[\text{m}] \times 0.36[\text{m}]$ 、自重 $24.4[\text{kg}]$ 、最大走行速度 $0.3[\text{m/s}]$ である。操舵方式は差動操舵で、車両の中央左右に独立した駆動輪があり、前後左右に 1 個ずつキャスタ輪がある。車両のトレッド $d=2l$ は $0.33[\text{m}]$ 、駆動輪の直径は約 $0.10[\text{m}]$ である。それらの中央にはドライブ回路、I/O 拡張ボックスが搭載されている。AC[100 V] 電源は後下方に配電盤から入力される。

この移動ロボット車は車載制御器としての NOTE 型パーソナルコンピュータ (CPU i 486 SX, 20[MHz]) で制御される。コンピュータからの操作信号は D/A 変換器によりアナログ量に変換され、さらに PWM 変換器に入力される。一定周波数のパルス電圧信号に変換された操作信号がドライブ回路を介して左右輪の DC サーボモータへ伝達される。また、車輪の前進速度を計測するために左右の駆動輪にロータリーエンコーダを取り付け、エンコーダからのパルスはカウンタで計測され、車載制御器へ送られる。ロボット車のステアリングは、左右駆動輪の速度差により制御される。それらのシステム構成を Fig. 5 に示す。ここで、GO は駆動復元特性で、また GI は検出復元

Fig. 4 Appearance of the mobile robot

Fig. 5 Block diagram of the mobile robot control system

特性である。

4.2 駆動復元特性と検出復元特性

車載制御器で計算された理論上の操作駆動トルク u が、駆動装置 (PWM 変換器, ドライブ回路およびサーボモータ) による物理上の操作電圧信号 V として正確に制御対象に与えられることが必要である。また、ロータリーエンコーダからのパルス観測値が移動ロボット車の各車輪の前進速度として正確に取り込まれる必要がある。

4.2.1 駆動復元特性

駆動復元特性は、制御器の理論出力と駆動装置の物理出力とが一致するようにその理論出力と D/A 変換器への入力信号の関係を表したものである。従って、駆動復元特性は駆動特性の逆関数になるように決める。ここで、ロボット車が静止した状態から電圧を加え、車輪の速度がほぼ一定になったときの角速度の平均値を **Fig. 6** のように 0[V]~5[V] の間で 17 ポイントを測定した。この図から分かるように入力電圧 V_i^* [V] に対して車輪の角速度 $\dot{\theta}_i$ [rad/s] は、ほぼ比例すると考えられる。

駆動トルク u_i [Nm] と角加速度 $\ddot{\theta}_i$ の逆の関係を用い、それを離散時間表示すると、駆動復元特性は

$$V_i^* = G_i \sum_{k=0}^n u_i(k) \quad (16)$$

となる [8]。ただし、 $u_i(k)$ は離散時刻 kT から $(k+1)T$ の間一定値を有するサンプリング幅 T の 0 次ホールドでの制御入力トルクで、定数 G_i [V/Nm] はサンプリング幅 T が 50 [ms] の場合に、車輪の慣性モーメントから、それぞれ $G_l = 34.287$ [V/Nm]、 $G_r = 34.132$ [V/Nm] となった。

4.2.2 検出復元特性

移動ロボット車の車輪前進速度の検出は左右輪のサーボモータに取り付けられたロータリーエンコーダ (400 [pls/rev]) で検出し、カウンタを介して制御器に取り込む。例えば、サンプリング時間 T における左車輪の前進速度 v_l [V/s] は

$$v_l = S \cdot \frac{M_l}{4872} \cdot \frac{1}{T} \quad (17)$$

で表される。ここで、 S は車輪の円周長さ (ころがり長さ) で、

Fig. 6 Relation of input voltage and angular velocity for the mobile robot

M_l はサンプリング時間内におけるパルスの総数である。また、4872 の値は、車輪が 1 回転したとき発生するパルスの個数である。同様に、右車輪の前進速度 v_r もサンプリング時間内でのパルス総数 M_r を用いて計算できる。

4.3 車両速度と方位の計測方法

車両速度は、前述の各車輪前進速度の平均として、

$$v = \frac{(v_r + v_l)}{2} \quad (18)$$

で求める。一方、車両の方位微分は、同様に各車輪前進速度と車両トレッド d との関係から、

$$\dot{\phi} = \frac{v_r - v_l}{d} \quad (19)$$

となる。従って、方位 ϕ は、上式の積分として求める。なお、絶対座標系 (O - XY) における車両重心点 (x, y) は、以上の関係から、

$$\dot{x} = v \cos \phi \quad (20)$$

$$\dot{y} = v \sin \phi \quad (21)$$

で求められる。

5. 実験と結果

ここでは、時不変軌道と時変軌道追従制御について実験を行った。サンプリング時間幅を 50 [ms] とする。実機ロボット車の物理パラメータは次のようである。

$$I_v = 0.5662 [\text{kgm}^2], \quad M = 24.4 [\text{kg}], \quad l = 0.165 [\text{m}],$$

$$I_w = 0.4419 \times 10^{-3} [\text{kgm}^2], \quad k = 40,$$

$$c = 0.0479 [\text{kgm}^2/\text{s}], \quad r = 0.05 [\text{m}]$$

以下では、フィードバック制御に最もよく用いられている PID 制御についてまず実験を行い、提案した制御方法の結果と比較・検討する。

5.1 PID 制御器による実験結果

まず、実験時間を 30 [s] の下で、ロボット車の速度と方位を一定目標値とし、それぞれ 0.15 [m/s]、0.0 [rad] とした時不変直線軌道追従制御を実験した。但し、この制御システムのブロック線図は、Fig. 3 のファジィ制御のものと同様、つまり速度制御用と方位制御用のファジィ制御器を PID 制御器で置き代えたものとなる。ここで入出力スケールはすべて 1 とする。Table 1 のように PID 制御器のサーボゲインを試行錯誤の繰り返しで決定した。但し、 K_{vp} , K_{vi} , K_{vd} は速度制御用のそれぞれ P, I, D サーボゲインとし、 $K_{\phi p}$, $K_{\phi i}$, $K_{\phi d}$ は方位制御用の P, I, D サーボゲインとする。Fig. 7 の結果より、目標速度と方位に対して微少な振動を繰り返し、ほぼ正確に追従していることがわかる。

次に、実験時間 40 [s] の間で、ロボット車の方位が左右方向に急変する山形軌道追従制御を行った。その目標値として、以下のような軌道考えた。

$$v_d = 0.15 \quad [\text{m/s}]$$

$$\phi_d(t) = \begin{cases} 0.0 & (0 \leq t < 10) \\ 0.262 & (10 \leq t < 20) \\ 0.0 & (20 \leq t < 30) \\ -0.262 & (30 \leq t < 40) \end{cases} \quad [\text{rad}] \quad (22)$$

この場合のフィードバックゲインも Table 1 に示す。Fig. 8, 9 から分かるように、軌道変化が大きく生じる部分で速度と方位

Fig. 7 Velocity and azimuth control results using the PID controller for the straight line

Fig. 8 Velocity and azimuth control results using the PID controller for the hill-wise line

Fig. 9 x - y trajectory using the PID controller for the hill-wise line

のオーバーシュートおよびアンダシュートが見られる。この結果、 X - Y 軌道の累積誤差が発生し、絶対最大誤差が約 $0.5[\text{m}]$ である。この原因は、ロボット車の方角が大きく変化する場合、PID 制御の固定ゲインでは変化に対応できないことによると思われる。

5.2 トルク算出制御器による実験結果

ここでは、3.1 節で述べた式 (3) (4) のトルク算出制御器を用いたロボット車の直線軌道追従制御実験を行った。フィードバックゲインは試行錯誤で次のような値を実験的に決定した。

直線軌道追従の実験結果を Fig.10 に示す。この図から分かるように、方位 ϕ の追従性はある程度確保することができたが、速度 v はかなり振幅の大きい振動を繰り返し良好な追従結果を得ることはできなかった。この原因は、理想的には速度 v のトルク算出制御器のサーボ部は P サーボのみとなるが、実際にはモデル化誤差などの影響からこのサーボのみではうまく動作しないためと思われる。

Fig. 11 には 5.1 節の PID 制御で速度のみ PI 制御で同じ直線軌道追従制御を行った実験結果を示している。但し、フィー

Table 1 PID control gains

Trajectory	K_{vp}	K_{vi}	K_{vd}
straight line	0.05	0.001	0.05
hill	0.05	0.001	0.05

Trajectory	$K_{\phi p}$	$K_{\phi i}$	$K_{\phi d}$
straight line	0.04	0.005	0.07
hill	0.04	0.005	0.07

Table 2 Servo control gains of the computed torque controller

Trajectory	K_{vp}	$K_{\phi p}$	$K_{\phi d}$
straight line	1.3	5	15

Fig. 10 Velocity and azimuth control results using the CTC for the straight line

ドバックゲインは Table 1 に示す PID 制御のゲイン K_{vd} を 0 にしたものとする。結果を見て分かるように、上述のトルク算出制御の結果とほぼ同様のものが得られている。つまり、上記のトルク算出制御が良好な結果を示さないのは、速度の D サーボがないためであると推察される。

5.3 D サーボ補償器付きトルク算出制御実験結果

ここでは、式(9)(10)の D サーボ補償器付きトルク算出制御器による直線と山形軌道追従制御の実験結果を示す。この場合、各フィードバックゲインは試行錯誤で Table 3 のような値を実験的に見出した。

Fig. 12 は直線軌道追従制御の実験結果である。Fig. 10 とこ

Table 3 Computed torque control gains with D servo

Trajectory	K_{op}	K_{vd}	$K_{\phi p}$	$K_{\phi d}$
straight line	10	0.06	5	15
hill	10	0.06	5	15

Fig. 11 Velocity and azimuth control results using the PI controller for the straight line

Fig. 12 Velocity and azimuth control results using the CTC with D servo for the straight line

の図の比較から D サーボ補償器を付けないトルク算出制御器に比べて速度制御がはるかに改善されていることが理解できる。

Fig. 13 は山形軌道追従制御の速度と方位の応答であり、目標方位 ϕ_d を変える度に生じる速度の振動の振幅の大きさは、Fig. 7 の PID 制御の場合と比較してみると、かなり小さく抑えられていることが分かる。Fig. 14 に示すように X-Y 軌道制御の結果は目標軌道から幾分ずれるものの、このときの絶対最大誤差は約 0.12[m] であり、PID 制御と比較して、かなり軌道追従性能が改善されていることが分かる。なお、Table 3 の山形軌道制御のゲインの値は直線軌道の場合のものと同じであることを注意しておく。事実、トルク算出制御は逆動力モデルを用いることから、PID 制御に比べ制御ゲインは調整しやすく、一度ある軌道に対して各サーボゲインが調整されると、ほとんどそれらのゲインを変更することなく、他の軌道に対しても良好な追従結果を得ることができる。

5.4 ファジィ制御器による実験結果

前節までで示した実験結果から、PID 制御法ではサーボゲ

Fig. 13 Velocity and azimuth control results using the CTC with D servo for the hill-wise line

Fig. 14 x - y trajectory using the CTC with D servo for the hill-wise line

Table 4 Control rules for 5 labels
($\alpha=1.0, \beta=2.0$)

e_i	$\dot{e}_i$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-6	-4.5	-3	-1.5	0
NS	-4.5	-3	-1.5	0	1.5
ZO	-3	-1.5	0	1.5	3
PS	-1.5	0	1.5	3	4.5
PB	0	1.5	3	4.5	6

Fig. 15 Velocity and azimuth control results using the FC for the straight line ($\alpha=1.0, \beta=2.0$)**Table 5** Control rules for 5 labels
($\alpha=1.5, \beta=2.0$)

e_i	$\dot{e}_i$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-7.5	-6	-4.5	-3	-1.5
NS	-5.25	-3.75	-2.25	0.75	0.75
ZO	-3	-1.5	0	1.5	3
PS	-0.75	0.75	2.25	3.75	5.25
PB	1.5	3	4.5	6	7.5

Fig. 17 Velocity and azimuth control results using the FC for the hill-wise line **Fig. 16** Velocity and azimuth control results using the FC for the straight line ($\alpha=1.5, \beta=2.0$)

インの調整方法により、またモデルに基づくトルク算出制御法では、移動ロボット車の物理パラメータ測定誤差に伴うモデリング誤差が存在し、軌道追従偏差が生じていることに気づく。そこで、数学モデルに依存しないファジィ制御器を用いた軌道追従実験を行った。Table 4 のような5ラベルの三角形型メンバーシップ関数に対して25制御ルールを式(15)によって設計した。但し、 $\alpha=1, \beta=2$ とした。速度偏差とその微分の入力スケラは式(14)の適応法を用いて、 G_{E1}, G_{C1} の初期値を 10^4 に

設定した。

直線軌道の走行実験では、もし速度と方位の入力スケラが共に式(14)のような適応法によって決定されれば、速度 v の制御をほぼ達成したが、方位 ϕ に関しては、ロボット車が蛇行するばかりであった。この現象は、ロボット車は静止状態から目標方位 $0[\text{rad}]$ に走行させることから、前件部に入力する方位の誤差とその微分が非常に小さいにもかかわらず、式(14)によって計算すると、 $G_{E, \text{new}}$ の値が大きくなり、ファジィ制御ルールのNBまたはPBの附近の制御ルールを過渡的に利用することに起因すると思われる。これらの問題を解消するため、方位の入力スケラ G_{E2}, G_{C2} を20に固定し、出力スケラは共に $1/200$ で実験を行った。Fig. 15には、このときの制御結果を示してある。また、より速い制御応答を得るために、式(15)で $\alpha=1.5, \beta=2$ として後件部を設計したときの制御ルール(Table 5)を用いた結果をFig. 16に示す。但し、出力スケラは共に $1/220$ とした。この図より速度応答の立ち上がりは予想通り以前よりかなり速いが、その分オーバーシュートが現れていることに注意を要する。以下の実験では、Table 4の標準ルールをすべて用いたことを付記しておく。

山形軌道追従制御実験の結果をFig. 17, 18に示す。このとき、方位の入力スケラは最初の $10[\text{s}]$ 間は固定値 5.2 を設定し、その後適応入力スケラ法を利用した。なお、速度と方位の出力スケラは $1/150$ に固定した。これらの図から分かるように、軌道変化が大きく生じる部分で若干の方位のオーバーシュ

Fig. 18 x - y trajectory using the FC for the hill-wise line

ートとアンドシュートが見られるものの、実山形軌道は理想に近い応答が得られている。特に、Fig. 9 と Fig. 18 の比較から、本手法によると PID 制御による実軌道偏差が改善できていることが分かる。

6. あとがき

本論文では、移動ロボット車の軌道追従制御問題に関して、トルク算出制御器およびファジィ制御器の 2 つの制御器を適用して、周知の PID 制御器との比較走行実験を行った。実験結果においては、概してファジィ制御器がトルク算出制御器より軌道追従性能は良好であったが、トルク算出制御器に D サーボ補償器を付けたものも、ファジィ制御器に近い軌道追従性能を発揮することが確認できた。目標軌道の形についてみれば、直線軌道追従制御においては、PID 制御器、D サーボ補償器付きトルク算出制御器およびファジィ制御器のどれを用いても

良い追従性が得られた。特に方位の急激な変化を伴う山形目標軌道に対しては、ファジィ制御器の適用が最も妥当であることを検証した。

参 考 文 献

- [1] L. Nelson: "Continuous Steering-Function Control of Robot Carts," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 36, no. 3, pp. 330-337, 1989.
- [2] 岩月, 小平, 大内: "ニューラルネットを用いた移動ロボット車の適応型速度制御", システム制御情報学会誌, vol. 5, no. 4, pp. 131-138, 1992.
- [3] 湯, 渡辺, 中村: "ファジィ・ガウシアン・ニューラルネットワーク制御器とその移動ロボット車の制御への応用", 日本機械学会論文集 C 編, vol. 59, no. 564, pp. 26-33, 1993.
- [4] 湯, 渡辺, 中村: "絶対座標系に基づく移動ロボット車のファジィ軌道追従制御", 日本機械学会論文集 C 編, vol. 60, no. 573, pp. 1713-1720, 1994.
- [5] 飯田, 油田: "独立二動輪操舵型移動車の走行制御", 第 8 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no. 3, pp. 959-962, 1990.
- [6] 斉藤, 津村: "移動ロボット群における衝突回避—非線形計画法に基づく局所的解法", システム制御情報学会論文集, vol. 3, no. 8, pp. 252-260, 1990.
- [7] J. J. Craiy (三浦, 下山訳): ロボティクス, pp. 275-302, 共立出版, 1991.
- [8] 湯, 渡辺, 中村, 原, 凌, 濱田: "2 輪独立駆動型移動ロボット車の軌道追従制御実験", 佐賀大学理工学部集報, vol. 23, no. 1, pp. 19-30, 1994.
- [9] 水本: "ファジィ制御向きのファジィ推論法", 計測と制御, vol. 28, no. 11, pp. 959-963, 1989.
- [10] K. Watanabe and S. G. Tzafestas: "Fuzzy Logic Controller as a Compensator in the Problem of Tracking Control of Manipulators," Procs. IFToMM-jc, September 24-26, Nagoya, vol. 1, pp. 98-103, 1992.
- [11] K. Watanabe, K. Hara and S. G. Tzafestas: "Fuzzy Controller Design using the Mean-Value-based Functional Reasoning," Procs. IJCNN '93 Nagoya, October 25-29, Nagoya, vol. 3, pp. 2983-2986, 1993.

湯 軍 (Jun Tang)

1959 年 3 月 23 日生。1983 年中国北方交通大学電気工学科卒業。1992 年 3 月佐賀大学大学院修士課程生産機械工学専攻修了。1995 年 3 月同大学院博士後期課程修了。同年佐賀大学理工学部生産機械工学科助手、現在に至る。ロボット工学、メカトロニクス、ファジィ/ニューラルネットワーク制御等の研究に従事。

博士 (工学)。計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

中村政俊 (Masatoshi Nakamura)

1943 年 8 月 20 日生。73 年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手、佐賀大学講師、同助教授、88 年同大学教授となり現在に至る。工学博士。システム制御の理論と応用 (メカニカルシステム、医用システム、電力システム、熱流量システム) の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、電気学会、日本 ME 学会、日本脳波・筋電図学会、IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

渡辺桂吾 (Keigo Watanabe)

1952 年 4 月 23 日生。1976 年徳島大学工学部機械工学科卒業。1978 年同大学院修士課程修了。1980 年 1 月九州大学助手、1985 年 4 月静岡大学工業短期大学部助教授、1990 年 4 月佐賀大学理工学部生産機械工学科助教授、1993 年 4 月同教授。この間、1987 年 3 月～9 月、アテネ工科大学研究員。制御理論、ロボット制御等の研究に従事。工学博士。日本機械学会、IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)