

球状車輪型全方向移動車輻に関する基礎研究

飯田 賢一 速水 能弘

Preliminary Research for Omni-Directional Vehicle with Ball Wheels

Kenichi IIDA and Yoshihiro HAYAMI

In this paper, we investigated an Omni-Directional Vehicle (ODV) with ball wheels. In the narrow place such as the interior of room, the ODV is advanced type of movement as against the standard vehicle. However the ODV need using the special wheel or special arranging wheels. The ODV proposed this research has two ball wheels, and two motors that arranged on the X-Y Axis are made to rotate a ball wheel by point contact. It is difficult to control the ODV, because the transfer characteristic of each motor is nonlinear. We proposed ODV system using fuzzy control. Furthermore we performed experiments with the posture control using trial ODV. The experimental results show the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

産業分野において、物資の運搬や災害時の人命救助、巡回警備といった様々な移動型ロボットが研究開発されている。その中で、室内等の比較的障害物の少なく平坦な環境で使用される移動型ロボットにおいては、多くの場合、制御の容易さ、移動速度等の点から数本の脚を用いて移動する歩行型よりも車輪を用いて移動する車輻型が採用されている。

車輻型は、使用する車輪や車輪の配置方法により、その運動学的な性質がホロノミックなものとは非ホロノミックなものに大別される。前者は真横方向への移動の際に車輪を移動方向へ向ける補助動作を必要とせず、後者はその補助動作を必要とする。そのため、室内等の狭い環境での移動には前者の特性を持った車輻のほうが優位でありこのような特性を持った車輻が研究されている¹⁾⁴⁾。しかし、ホロノミックな移動を可能にするためには、メカナムホイールなどの特殊車輪の使用や特殊な車輪レイアウトが必要となり、その結果、可搬重量の低下などを招いてしまう。

本稿では、車輪に球を用いることでホロノミックな移動が可能であり、比較的可搬重量の低下が防げられる球状車輪型全方向移動車輻 (Omni-Direction Vehicle) を提案し、試作した実機を用いて、基礎実験を行い、その有用性を確認したので以下に報告する。

2. システム概要

2.1 全方向移動車輻

本研究で使用する試作車輻の概観とその寸法を図1、表1に示し、図2に駆動部の機構を示す。

図1に示すように、車輻はホロノミックな移動を可能にするため、車輪に2個の球を使用している。そして、図2に示すように、車輪である球の中心を原点としたX-Y軸方向にそれぞれの駆動用モータを配置している。これにより、球の速度ベクトル v は式1に示すように、X軸上に配置された駆動用モータが与えるX軸方向の速度ベクトル v_x と、Y軸上に配置された駆動用モータが与えるY軸方向の速度ベクトル v_y の合成として求めることが出来る。

$$|v| = \sqrt{|v_x|^2 + |v_y|^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{|v_y|}{|v_x|} \quad (1)$$

これにより、車輪は各駆動軸の速度ベクトルを制御することにより、車輪の速度および回転方向を制御することが可能となる。さらに、この球状車輪を2個有していることから、提案する全方向移動車輻は、平面2自由度の並進運動に加え、その場での旋回動作が可能となり、高度な移動特性を有することになる。

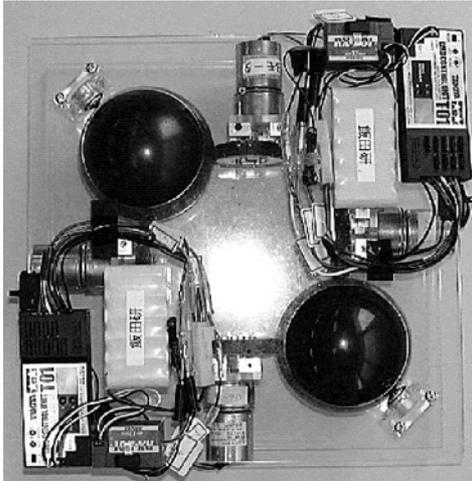


図1 車輻概観

表1 車輻寸法

Length	300 [mm]
Width	300 [mm]
Height	140 [mm]
Diameter of ball	100 [mm]

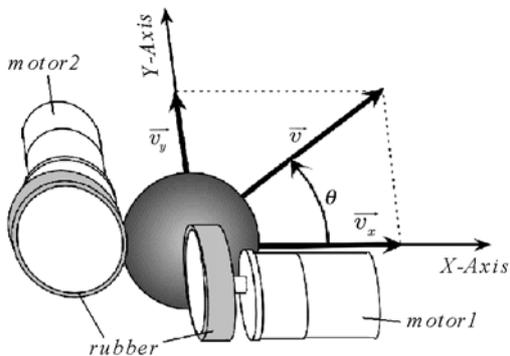


図2 駆動部の機構

なお、球状車輪は駆動軸からの点接触により回転する。モータ1における駆動軸への入力から球状車輪の速度への入出力特性を図3に示す。ここでの入力はPCからDAボードを介して出力された電圧である。図3からわかるように、入出力特性は不感帯と飽和を有する非線形な伝達特性であることがわかる。他の駆動軸の特性もほぼ同様な特性を有していることを確認している。そのため、各駆動軸の制御には、非線形な制御対象にも適用可能なファジィ制御を用いて行う。

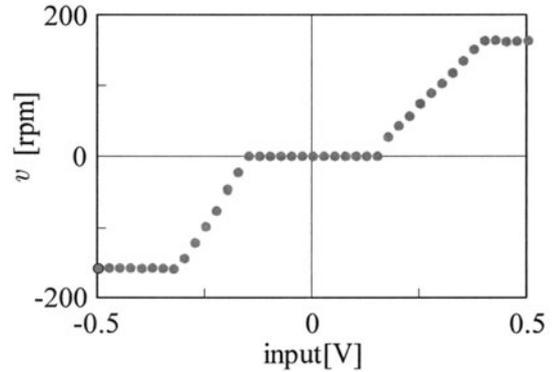


図3 モータ1の入出力特性

2.2 ファジィ制御

ファジィ制御は、1965年にL. A. Zadehによって考えられた、ファジィ理論を用いた制御方法である。ファジィ理論とは、従来の集合論、論理(2値論理)の拡張したものであり、人間の言葉や思考に関連するあいまいさを数的に取り扱うことのできる理論である。つまり、図4に示すように、従来のクリस्प集合では、ある事象に対して当てはまるか否かでしか表現できなかったのに対し、ファジィ理論では、メンバーシップ関数によりファジィ化することで、ある事象に当てはまる度合いをグレード $\mu(x)$ として表現できる。

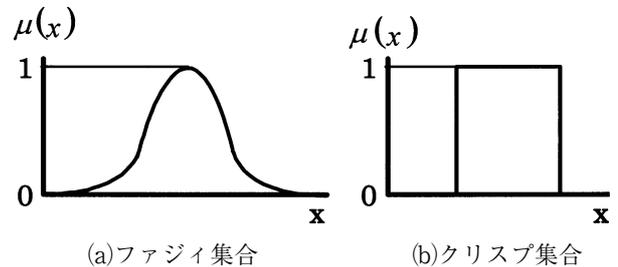


図4 ファジィ集合とクリस्प集合

ファジィ制御の一例として2つの入力信号：A, Bを用いた場合について説明する。

ファジィ制御では以下に示すようなIF~THEN形の言語的制御則(ルール)により、入力信号に対して制御量：Zを求め対象の制御を行う。これらのルールは入力信号の状態毎に作成する。なお、この複数のルールをまとめたルールテーブルを表2に示す。表2は2つの入力信号の状態(ラベル)をNegative Big (NB)~Positive Big (PB)までの5通りとした時の計25個のルールをまとめたものであり、後件部変数 w_{ij} は大きさのみを示すシングルトンの変数である。

$$[IF A = i \text{ and } B = j \text{ THEN } Z = w_{ij} \quad (i, j = NB(=1) \sim PB(=5))]$$

表2 ルールテーブル

B \ A	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}
NS	W_{21}	W_{22}	W_{23}	W_{24}	W_{25}
ZO	W_{31}	W_{32}	W_{33}	W_{34}	W_{35}
PS	W_{41}	W_{42}	W_{43}	W_{44}	W_{45}
PB	W_{51}	W_{52}	W_{53}	W_{54}	W_{55}

次に、図5に示すようなメンバーシップ関数を用いて、入力信号のファジィ化を行い、入力信号のグレード μ_i, μ_j を決定する。なお、図5では一例として三角形を重ね合わせた場合のメンバーシップ関数を示しており、各入力信号に対して2個のラベルが選択される。そのため、2つの入力信号により、4個のルールが選択され、その選択された4つのルールのグレード μ_{ij} を式(1)より求める。

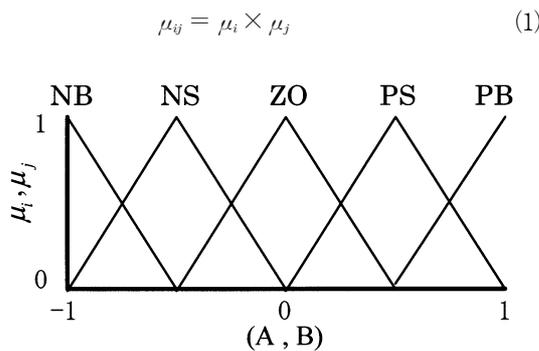


図5 メンバーシップ関数

最後に、選択された4つのルールのグレード μ_{ij} から式(2)に示した簡略推論法よりファジィ推論を行い、非ファジィ化された制御量 Z を導く。

$$Z = \frac{\sum \mu_{ij} \times W_{ij}}{\sum \mu_{ij}} \quad (i, j = 1 \sim 5) \quad (2)$$

このように、ファジィ制御では、IF~THEN形のルールを用いて任意の対象の制御を行うため、制御対象のモデル化などを行う必要がなく、非線形な制御対象に適用可能であるといった利点がある。しかしながら、ファジィ制御では制御結果の良否はメンバーシップ関数、制御ルール、正規化ゲインの設定に依存し、制御ルールなどは実システムまたはシミュレータにより試行錯誤的に決定され、最終的には熟練者によるチューニングが不可欠であることを付け加えておく。

2.3 実測システム

図6に本研究で使用される実測システムの概略を示す。移動車輻には市販のラジコン用受信機を搭載しており、PCからラジコン用送信機を介して、制御信号を無線で伝え、移動車輻を無線操作することを可能としている。また、車輻の位置情報は、フィールド上空に設置したCCDカメラにより撮り込んだ画像を専用の画像処理装置であるビデオトラッカーG280(以下VT-G280)を用いて獲得する。VT-G280は、CCDカメラからの画像を任意の閾値により2値化し、任意対象物体の図心の算出を自動的に行い、RS-232Cにより算出した位置情報をPCへ転送することで同時に最大2個の任意対象物体の位置を計測することが可能である。また、VT-G280は任意対象物体を自動的に追跡するため、移動車輻の位置、速度、姿勢のリアルタイム計測が可能となっている。

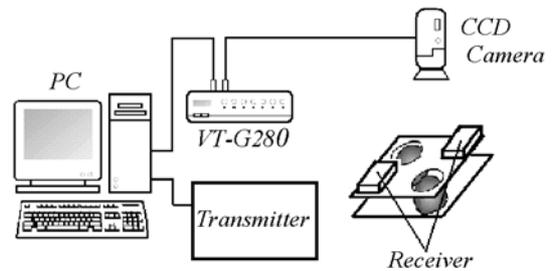


図6 実験システム

3. 実測結果

3.1 Fuzzy Controller

移動車輻制御の一例として、移動車輻の姿勢についてファジィ制御を用いて実測を行った。図7に制御システムを示す。図7において、 $\theta_r(n)$ は規範角、 $\theta(n)$ は車輻の姿勢角を示す。ファジィコントローラにおいては2.2節での方法を用いる。ファジィコントローラへの入力信号には、次式より求めた姿勢誤差 $e(n)$ と姿勢誤差の変化分 $\Delta e(n)$ を用いる。

$$\begin{aligned} e(n) &= \theta_r(n) - \theta(n) \\ \Delta e(n) &= e(n) - e(n-1) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)で求めた姿勢誤差 $e(n)$ と姿勢誤差の変化分 $\Delta e(n)$ を、図8に示すようなラベル数5で三角形のメンバーシップ関数に入力し、それぞれの入力に対するラベルとグレード μ_i, μ_j を求める。さらに、経験的に試行錯誤でモータ毎に決定した表3に示す5×5のルールテーブルを用いて、それぞれの入力に対するラベルから後件部変数 W_{ij} を参照する。これより、式(2)を用いて、各モータの制御信号 $e_{pk}(k=1 \sim 4)$ を推論し、各モータへ入力する。

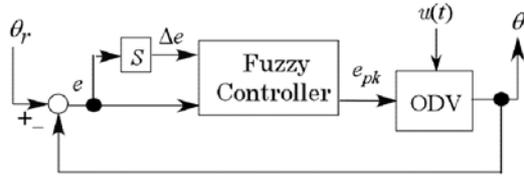


図7 制御システム

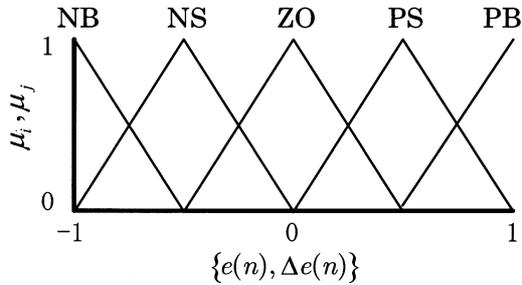


図8 メンバシップ関数

表3 ルールテーブル

(a) motor 1

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0	0	0.23	0.38
NS	0	0	0	0.2	0.35
ZO	0	0	0	0.17	0.32
PS	0	0	0	0.14	0.29
PB	0	0	0	0.11	0.26

(b) motor 2

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0.5	0.45	0.4	-0.25	-0.3
NS	0.45	0.4	0.35	-0.3	-0.35
ZO	0.4	0.35	0	-0.35	-0.4
PS	0.35	0.3	-0.35	-0.4	-0.45
PB	0.3	0.25	-0.4	-0.45	-0.5

(c) motor 3

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0.38	0.23	0	0	0
NS	0.35	0.2	0	0	0
ZO	0.32	0.17	0	0	0
PS	0.29	0.14	0	0	0
PB	0.26	0.11	0	0	0

(d) motor 4

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	-0.5	-0.45	-0.4	0.25	0.3
NS	-0.45	-0.4	-0.35	0.3	0.35
ZO	-0.4	-0.35	0	0.35	0.4
PS	-0.35	-0.3	0.35	0.4	0.45
PB	-0.3	-0.25	0.4	0.45	0.5

実験方法は図9に示すように、車輛の初期姿勢 $\theta(0) = -45[\text{deg}]$ の状態から、motor1, motor3に正弦波状の信号 $u(t)$ を与えることで車輛が前進する間、ファジィコントローラによる姿勢修正を行った。この時、実験時間は8[sec]、規範角 θ_r は0[deg]に設定している。

実測結果を図10に示す。図10からわかるように車輛の姿勢がファジィコントローラにより修正されていることが分かる。しかしながら、移動車輛の姿勢は規範姿勢に一致しておらず、制御信号も振動的となり、十分な制御結果は得られていないことが分かる。また、ここでは紙面の関係上割愛するが、他のルールテーブルを用いた結果においても十分な制御結果は得られなかったことを確認している。この実測結果では、2.2節で述べたように、制御の良否がオペレータの経験的、感覚的なものからくるIF~THEN形のルールの作成に依存している結果となっている。

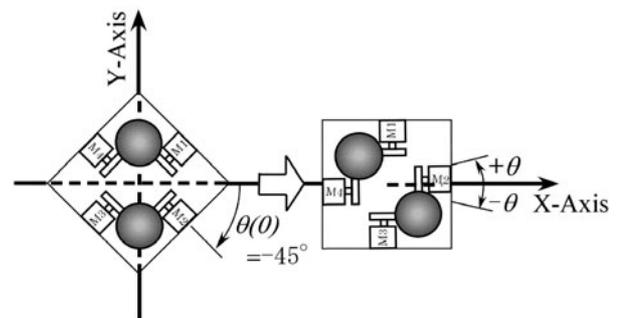
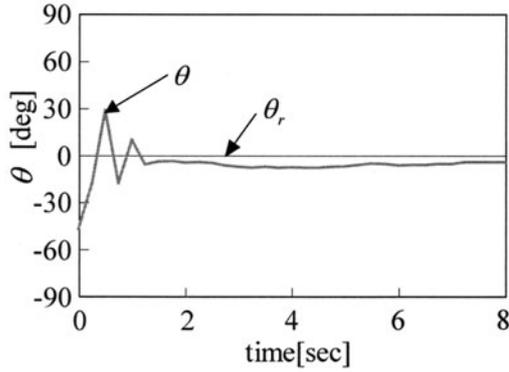


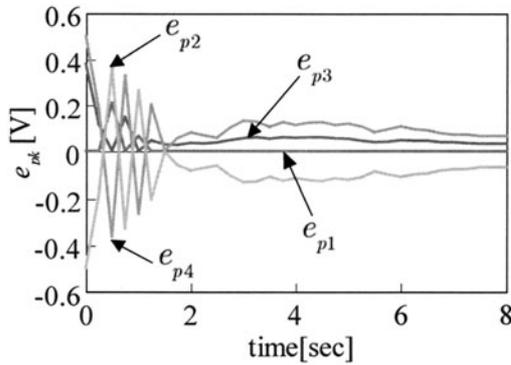
図9 実験方法

3.2 Self Tuning Fuzzy Controller⁵⁾

3.1節の実測結果から、ルールテーブル作成には多大な労力を有し、かつ、十分な制御性能が得られなかったことが確認されたため、ここでは、ルールテーブルを自動的にチューニングする自己調整ファジィコントローラ(Self Tuning Fuzzy Controller)を用いた制御システムを提案する。提案する制御システムを図11に示す。図11において、 $\theta_r(n)$ は規範角、 $\theta(n)$ は車輛の姿勢角を示し、Self-Tuning部は、姿勢誤差 $e(n)$ より表4に示すモータ毎のルールテーブルを作成するための自己調整部を



(a) 姿勢角 θ



(b) 制御信号 e_{pk}

図10 実測結果

示している。ファジィコントローラの入力として式(3)より得られる姿勢誤差 $e(n)$ とその変化分 $\Delta e(n)$ を用いる。ファジィコントローラでは2.2節の方法を用いる。そのため、メンバーシップ関数は3.1節と同様に図8に示したものを、ルールテーブルはSelf-Tuning部で調整されたものを用いる。これにより、モータ毎の制御信号 e_{pk} ($k=1\sim 4$) を求める。

Self-Tuning部は、姿勢誤差 $e(n)$ を零収束させるために式(4)に示すような、調整則を用いて、ルールテーブルの調整を行う、自己調整部である。

$$W_{ij}^k(n) = \gamma \times \mu_{ij}^k \times e(n) + W_{ij}^k(n-1) \quad (4)$$

ここで、 $W_{ij}^k(n)$ は初期値を零とするシングルトンの変

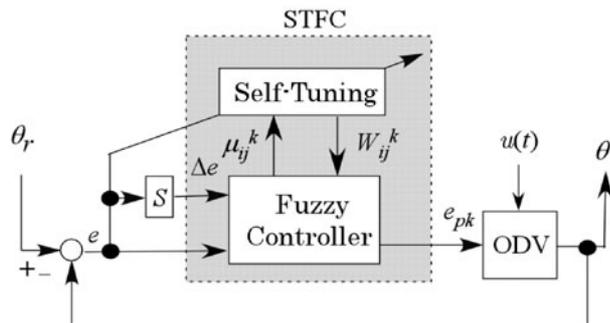


図11 制御システム

数、 γ は学習ゲイン ($=0\sim 1.0$)、 $\mu_{ij}^k(n)$ はグレードを示す。

実験方法は、図9に示したような車輻の初期姿勢 $\theta(0) = -45[\text{deg}]$ の状態から motor1, motor3 に正弦波状の信号 $u(t)$ を与え、車輻が前進している間に、姿勢の修正とルールテーブルの調整を行う。この動作を繰り返し行い、最適なルールテーブルの作成を行った。この時、実験時間は8[sec]、規範角 θ_r は0[deg]、学習ゲインを $\gamma = 0.001$ 、繰り返し回数20回に設定している。

実験結果として、最終的に作成された各モータのルールテーブルを表4に示し、チューニング初期と後期の姿勢角 θ の時間推移と各モータの制御信号 e_{pk} を図12, 13に示す。図から分かるように、チューニング初期段階では、後件部変数 W_{ij}^k が初期値零であることからODVの姿勢は規範姿勢に一致していない。しかしながら、後件部変数のチューニングを重ねるごとにルールテーブルの調整が行われるために、チューニング後期段階では、規範角 θ_r へオーバーシュートなく、ほぼ追従していることがわかる。さらに制御信号も非振動的であることがわかる。

さらに、チューニング過程における後件部変数 W_{ij}^k の一部の推移を図14に示す。図よりチューニングが進むにつれて、後件部変数が一定値に収束していき、最適なルールテーブルが構築されていくことがわかる。

表4 ルールテーブル

(a) motor 1, motor4

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0	0	0	0
NS	-0.0026	-0.0026	-0.0005	0.00025	0
ZO	-0.2254	-0.1681	-0.0378	0.01575	0
PS	-0.0175	-0.0144	-0.0029	0.00036	0
PB	-0.0021	-0.0082	-0.0013	6E-06	0

(b) motor 2, motor 3

$\Delta e \cdot e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	0	0	0	0	0
NS	0.00263	0.00261	0.00053	-0.0003	0
ZO	0.22541	0.16812	0.03775	-0.0157	0
PS	0.01752	0.01438	0.00289	-0.0004	0
PB	0.0021	0.00823	0.00129	-6E-06	0

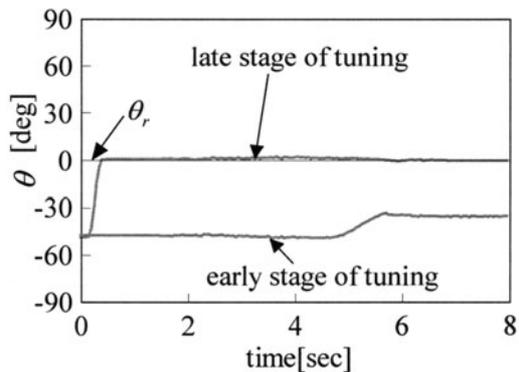
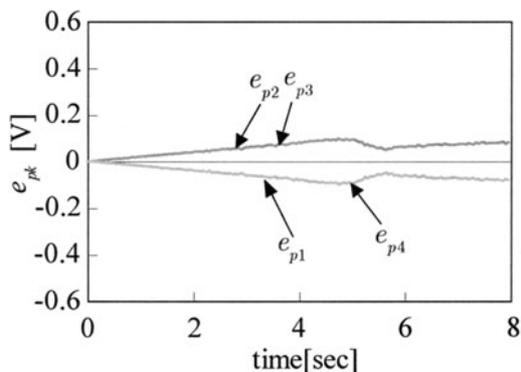
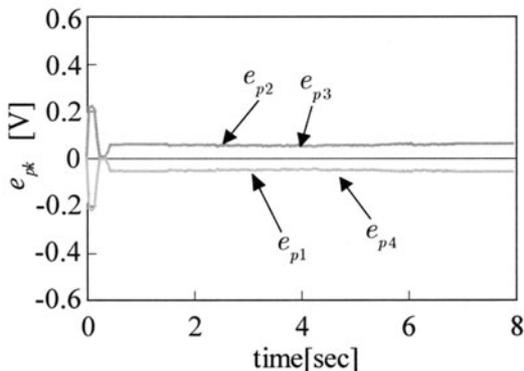


図12 姿勢角 θ の推移



(a) チューニング初期段階



(b) チューニング後期段階

図13 制御信号 e_{pk}

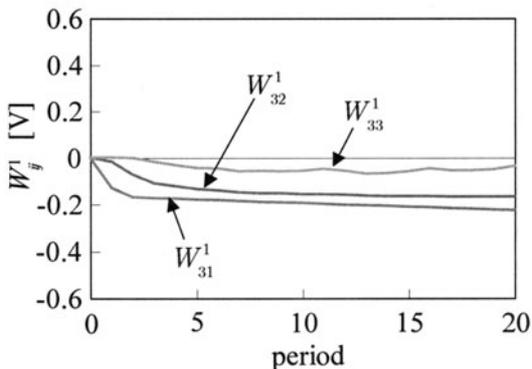


図14 後件部変数 W_{ij}^1

4. おわりに

本稿では、球状車輪を用いた全方向移動車輻を提案し、試作した実機に対して、ファジィコントローラを用いて車輻の姿勢制御を行った。その結果、自己調整型ファジィ制御を用いることにより車輻の姿勢制御が実現できることを確認した。今後は、車輻の速度および位置制御を行い、高度な移動特性を獲得するアルゴリズムを検討する予定である。

参考文献

- 1) M.WEST, H. ASADA, 「Design and Control of Ball Wheel Omnidirectional Vehicles」, Proc.IEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1931-938, 1995
- 2) 和田他, 「ホロノミック全方向移動ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8, pp.1139-1146, 1997
- 3) 森他, 「新しい全方向移動台車ODV9の機構とその走行モードについて」, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.619, pp.203-210, 1998
- 4) 湯他, 「単一球形車輪機構による全方向移動ロボット車の開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98講演論文集, 1CI2-1(1), 1998
- 5) 鎌野他, 「自己調整ファジィコントローラを用いた高速二軸位置同期システム」, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.1, pp.47-56, 1996