法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-02

# 不安定ボールのファジィ制御

Hirota, Kaoru / NI, Jingchi / 倪, 景慈 / 廣田, 薫

(出版者 / Publisher)
法政大学工学部
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学工学部研究集報 / 法政大学工学部研究集報
(巻 / Volume)
27
(開始ページ / Start Page)
41
(終了ページ / End Page)
50
(発行年 / Year)
1991-02
(URL)
https://doi.org/10.15002/00003898

# 不安定ボールのファジィ制御

廣田　薫*・倪　景慈**

# Fuzzy Control of Unstable Ball

Kaoru HIROTA*, Jingchi NI**

**Abstract**

A system which simulates a human hand to control an unstable ball is presented. This fuzzy controlled unstable ball system consists of an image processing system, a 5－freedom arm robot and a fuzzy controller. The position and volocity of the unstable ball is predicted by a fuzzy inference method based on a trajectory pattern matching proceduce.

## §1.　緒　言

産業分野で用いられている教示動作の反復が中心の産業用ロボットが急速に進歩しているとともに、マイクロプロセッサを中心とする計算機、各種センサなどにより、周囲の環境や状況を視覚する機能を持ち、人工知能にも関連する知的情報処理機能を搭載している知能ロボットの開発が進んできている。

我々が用いている情報は、きちんと数量化されていないあいまいな情報が多い。このようなあいまいな情報でも我々は、それなりに理解し、判断し、適切に行動することが可能である。人間のこうした処理機能をロボットに動作させることができるかどうかが一つの問題点である。

ロボットのハンドで握った板の上にボールを置いて、ロボットを動かしたときにボールはある方向に移動し始め、板の上から落ちる。これに対して、ボールが落ちないように制御をする視覚機能を持った、5自由垂直多関節型アームロボットを用いファジィ制御による不安定ボールの制御を行った。

30＊30センチの板の上のボールの移動距離及び速度を入力情報とし、ロボットのハンドの動作角度を出力情報として、2入力と1出力のファジィ推論を用いて、ロボットのハンドをうまく動作させボールが板の上から落ちないように制御を行う。

＊工学部電気工学科計測制御専攻

＊＊大学院工学研究科システム工学専攻

## §2.　不安定ボール制御システムの構成

不安定ボール制御の実現のためのシステムの構成を図2.1に示す。このシステムはロボット制御装置、パーソナルコンピュータ、画像処理装置の三つの部分で構成されている。

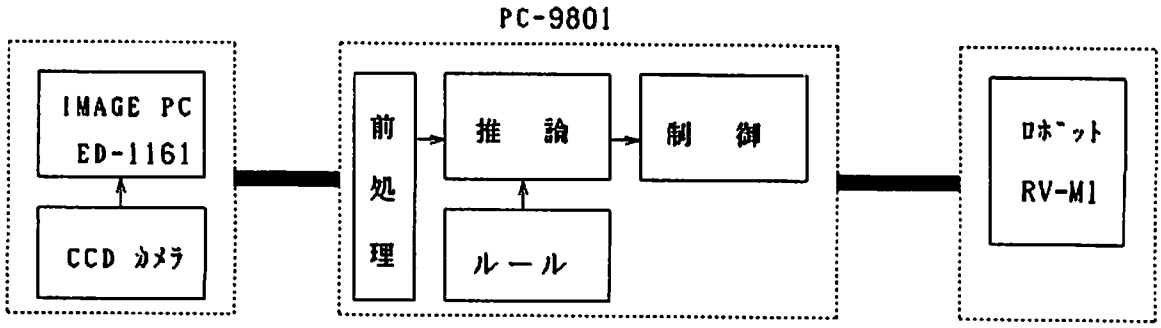


図2.1　ボール制御のシステムの構成

### 2.1　画像処理装置

画像処理装置は以下のような構成になっている。

視覚センサモジュール：edec製 IMAGE PC ED－1161

黒白テレビカメラ：ソニー製　CCDカメラ

レンズ（f＝12.5mm）

CCDカメラにより板の上のボールの状態を観察し、その情報をIMAGE PC ED－1161画像処理装置へ転送して、その情報をデータ化し、コンピュータのメモリの中に保存する。画像処理装置はイメージ PC 50Pコネクタを用いてパーソナルコンピュータへデータを出力する。一画面のデータ量は64k（＝256＊256）バイトである。

### 2.2　パーソナルコンピュータ

パーソナルコンピュータには日本電気製の16ビットコンピュータPC-9801（クロック周波数5MHz）を用いており、RS-232Cインターフェイスが装備されている。本システムでは、このインターフェースがロボット制御装置と連結している。OSはMS-DOS Ver.3 1を用い、2種類の言語を使用している。画像処理部分ではアセンブラ言語、推論と制御部分はN88BASICを使用した。

コンピュータ上ではロボットのハンドで握った板の上のボールの状態をCCDカメラから取り込み、アセンブラでこの状態情報データからボールの座標を抽出する。認識したボールの座標と計算したボールの移動速度を入力情報としてファジィ推論を行う。この推論結果によりボールの状態を推論、判断してから、ロボット制御装置に出力情報（推論結果）を転送し、ロボットのハン

ド制御を行う。

### 2.3　ロボット制御装置

ロボット制御装置は以下のような構成になっている。

ロボット本体：三菱電機 RV－M1

ドライブユニット：三菱電機 D／V－M1

教示方式：プログラミング言語方式とMDL

制御方式：DCサーボモータによるPTP位置制御方式

このロボットは5自由度の垂直多関節アームロボットでウェスト、ショルダ、エルボが回転できるほか、リストピッチとリストロールは同時に動作することもでかる。従来の三菱電機の5自由度アームロボット（RM－501）と比べた一つの利点でもある。

プログラミング言語方式のコマンドは63種あり、位置、動作制御命令、プログラム制御命令、ハンド制御命令、入出力制御命令、RS－232読み出し命令、その他の命令により構成されている。位置、動作制御命令はロボットの位置と動作に関連したコマンドで、ポジションデータの登録、交換、代入、演算などに関するコマンドや関節、直線補間動作、連続パス動作等のコマンドやスピード設定、原点出し、パレタイズに関するコマンドが用意されている。

プログラム制御命令はプログラムの流れを制御するためのコマンドであり、サブルーチン繰り返しループに関するコマンドやプログラムの条件分岐に関するコマンドがある。

入出力制御命令は汎用のI／Oボードからデータの入出力に関したコマンドで、入出力いずれも、同期または非同期にデータのやり取りがてき、ビット単位またはパラレルデータでの処理が可能である。

板の上のボールの状態をファジィ推論、判断した結果がロボットへ出力され、位置、動作命令を用いてリストピッチとリストロールの制御を行う。

## §3.　不安定ボールの制御

### 3.1　不安定ボールの制御問題の設定

人間は手で握った板の上に置いたボールをおとさないようにうまく制御できる。たとえば、卓球ラケットの上で球を置いて落さないような制御ができる。このような制御を人間はどうやるのか？板の上のボールの状態あるいはボールが板の中心から離れた距離およびボールの移動速度を情報として、目からこの情報を頭の中へ入力する。知識と経験により、推論、判断している。そして、手へ出力しボールが落ちないように制御を行う。

上の述べた不安定ボールの制御を画像処理装置、コンピュータ、ロボット制御装置を用いて三つの処理を合わせて人間と同じように制御を行うことを本研究の目的として設定している。

ロボットバンドの握っている板および板の上に置いているボールとCCDカメラの組み合わせを

図3.1に示す。

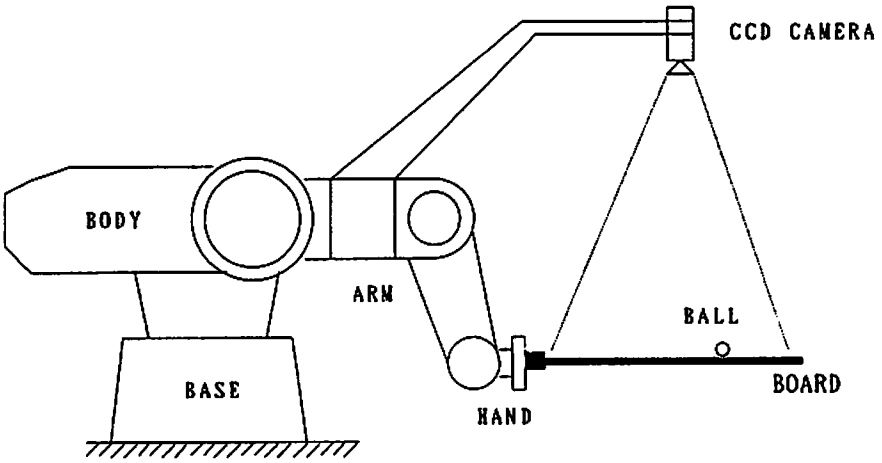


図3.1　ロボット、板とCCDカメラの組み合せ

不安定ボール制御の実現のするために、図3.2のように横＝30センチ、縦＝30センチ、厚さ＝0.4センチの木の板と直径＝2センチの木のボールを用意した。CCDカメラから板までの垂直距離は約25センチに設定している。

## 3.2　制御アルゴリズム

### 3.2.1　画像処理のアルゴリズム

ボール制御のためのボールの状態情報の処理は、アセンブラプログラムで処理している。画像処理のフローチャートを図3.3に示す。

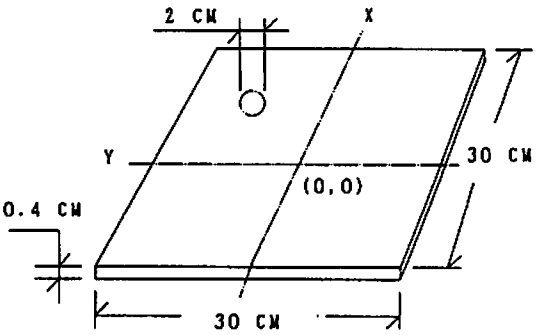


図3.2　板とボールの形とサイズ

画像処理はアセンブラプログラムを用いて実行しており、画像データをコンピュータのメモリへ保存してから、ボールのX、Y座標を抽出するため、次の処理を行う。CCDカメラから取った一画面の画像はX軸は256バイトで、Y軸は256バイトである。板の中心に対するX、Y軸の座標の変換は次のように行う。

一画像の64Kバイト数とX、Y軸の関係を次の式（1）に示す。

$$x = (**00^H) \quad y = (00**^H) \tag{1}$$

ボールのX軸、Y軸の中心座標変換を次の式（2）と式（3）に示す。

$$X = x - x' = (**00^H) - (**7F^H) \tag{2}$$

$$Y = y' - y = (7F**^H) - (00**^H) \tag{3}$$

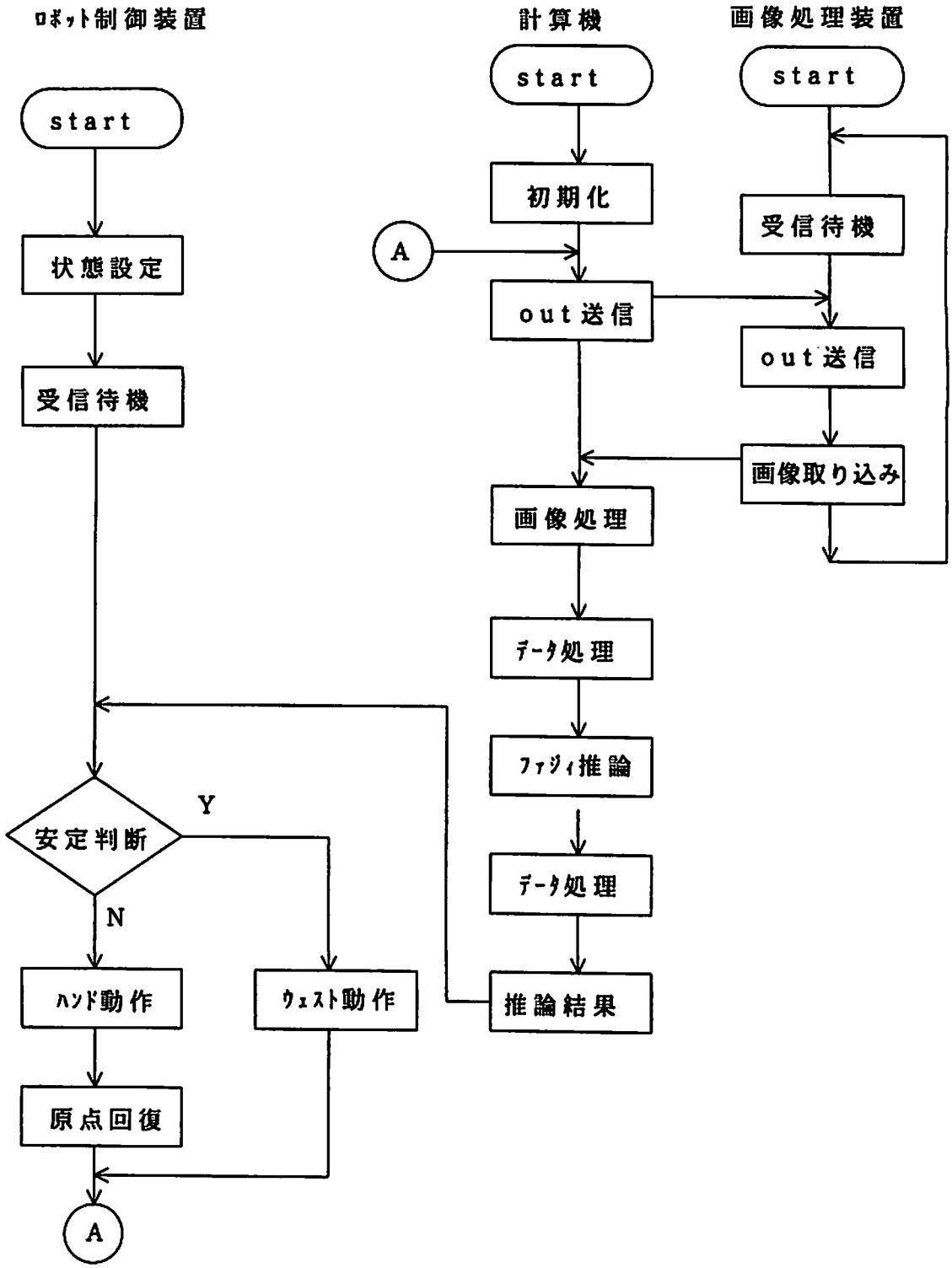


図3.3　不安定ボール制御システムのフローチャート

ここでx、yはメモリ上のボールの画像の座標データ、X、Yは交換後の板の中心（0.0）に関する相対座標である。

### 3.2.2　ファジィ推論とロボット制御のアルゴリズム

ファジィ推論とロボット制御のアルゴリズムを図3.3に示す。 MS-DOS上でN88BASICを用いて実行する。

はじめに、コンピュータ上で予め計算しておいたのファジィ推論による推論結果をデータファイルから配列に読み込んでおく。 次に、CCDカメラからボールの状態情報を取り込んで画像データを抽出し、このデータを入力情報としてファジィ推論を行う。推論結果はロボットへ出力され、ロボットのバンドを制御する。 ボールの位置と移動速度を認識し、ファジィ推論によって判断したロボットの動作制御結果を出す。 ボールが板の中心から半径4センチ以内の範囲にある時、およびボールの移動速度が0の時をボールの安定状態として仮定する。 ロボットの位置制御命令MJと速度制御命令SPを用いてロボットのウェストを動作させる。 ロボットのウェストの動作に伴い、ボールがある方向へ移動し始め、不安定な状態になる。 ボールが安定していない場合、即ちボールが板の中心から半径4センチ以外の範囲にある時とボールの速度がある程度ある時、ボールを不安定の状態と定義している。 ロボットのMJ命令を用いてロボットのリストピッチとリストロールへの制御コマンドを出力し、ボールの制御を行う。 これと同じ操作を繰り返して、ボールを不安定状態から安定状態にする。

## §4.　ファジィ推論と結果

### 4.1　ファジィ推論部

人間は目で目標を観察してボールの状態の情報を頭に入力し、そして、この入力情報を経験によって、どんな制御をすればよいか判断、推論してボールの制御を行う。 これは、物理的に精確な情報に基づきボールの運動方程式を計算するのではなく、あいまいな情報に基づいて判断をしているわけである。 ボールの運動方程式を用いて計算で求めるには、種々の正確な入力情報が必要である（ボールの速度、加速度、ボールの重さ、摩擦力など）。 人間はボールの運動方程式を計算してからその計算結果によって制御を行なっている訳ではなく、人間の行うボールの制御方法を定式化すれば以下のようにルール形式で表現したほうがより直接的である。

IF ボールの状態＝A　THEN 制御＝B

上で述べたように、画像処理装置、ロボット、コンピュータによって構成されたシステムにファジィ制御を導入して、不安定ボールの制御を行うことができるようにする。

ボールの板の中心からの距離X、Yおよびボールの移動速度$V_X$、$V_Y$を入力情報とし、そしてX方向に対するロボットのリストピッチの動作角度$\theta x$およびY方向に対するロボットのリストロール動作角度$\theta y$を出力情報として、ファジィ推論を行う。 そのメンバーシップ関数を図4.1に、ルールを図4.2に示す。

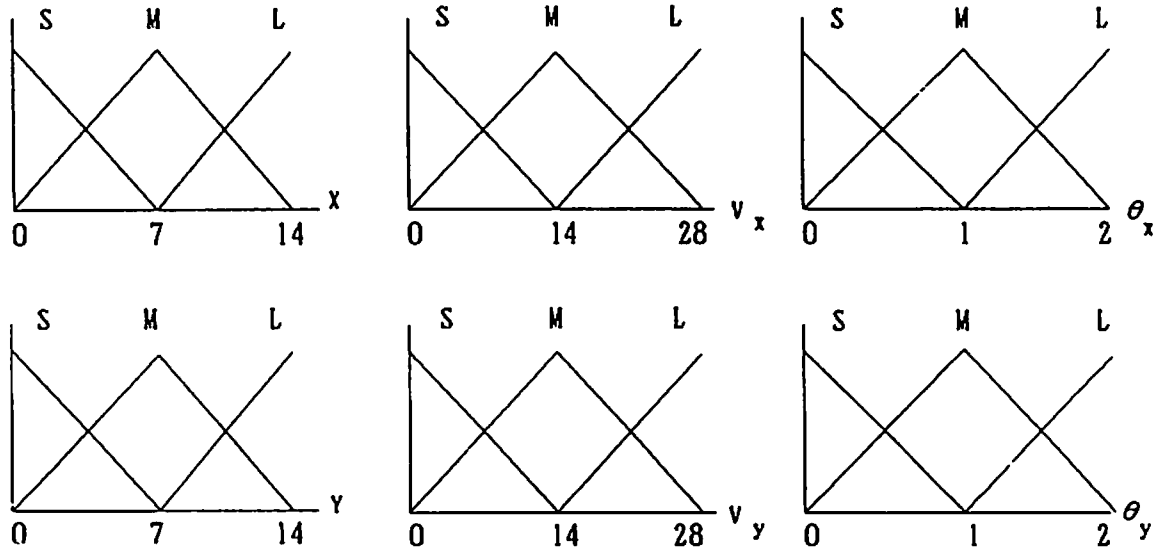


図4.1　ファジィ推論のメンバーシップ関数

IF　X = S　AND　Vx = S　THEN　θx = S
IF　X = S　AND　Vx = M　THEN　θx = S
IF　X = S　AND　Vx = L　THEN　θx = M
IF　X = M　AND　Vx = S　THEN　θx = S
IF　X = M　AND　Vx = M　THEN　θx = M
IF　X = M　AND　Vx = L　THEN　θx = L
IF　X = L　AND　Vx = S　THEN　θx = M
IF　X = L　AND　Vx = M　THEN　θx = L
IF　X = L　AND　Vx = L　THEN　θx = L

IF　X = S　AND　Vx = S　THEN　θx = S
IF　X = S　AND　Vx = M　THEN　θx = S
IF　X = S　AND　Vx = L　THEN　θx = M
IF　X = M　AND　Vx = S　THEN　θx = S
IF　X = M　AND　Vx = M　THEN　θx = M
IF　X = M　AND　Vx = L　THEN　θx = L
IF　X = L　AND　Vx = S　THEN　θx = M
IF　X = L　AND　Vx = M　THEN　θx = L
IF　X = L　AND　Vx = L　THEN　θx = L

図4.2　ファジィ推論のルール

入力情報X、Y、Vx、Vyと出力情報θx、θyの関係は次のようになる。

サンプリングされた時刻Tiにおけるボールの位置座標Xi、Yiは次の式（4）を満たす。

$$Ri^2 = Xi^2 + Yi^2 \tag{4}$$

同じくTiにおけるRiとボールの速度Viについて以下が成立する。

$$V_i = (R_i - R_{i-1}) / \Delta Ti \tag{5}$$

$$V_{xi} = (R_i\cos\alpha - R_{i-1}\cos\alpha_{i-1}) / \Delta T_i \tag{6}$$

$$V_{yi} = (R_i\sin\alpha - R_{i-1}\sin\alpha_{i-1}) / \Delta T_i \tag{7}$$

取扱やすいようにΔTiを単位1になるものと仮定すれば、式（6）と（7）は次のようになる。

$$V_{xi} = X_i - X_{i-1} \tag{8}$$

$$V_{yi} = Y_i - Y_{i-1} \tag{9}$$

また、ロボットの出力値θiと入力値Ri、Viの関係を次に示す。

運動方程式 F = ma から（摩擦力省略）

$$ma = mg\sin\theta i \tag{10}$$

$$\sin\theta i = a/g \tag{11}$$

同様に $R = at^2/2$ から

$$a = 2R/t^2 \tag{12}$$

式（12）を式（11）に代入して次の式を得る。

$$\sin\theta_i = 2R_i/g\ (\Delta Ti)^2 \tag{13}$$

また力学方程式 v = at を式（11）に代入し次の式を得る。

$$\sin\theta_i = V_i/g\Delta T_i \tag{14}$$

以上の式（13）と（14）から、入力情報RとVが出力情報θにどんな影響を与えるかがわかる。

### 4.2　ファジィ推論結果の調整

以上のようにして作成したルールに基づきファジィ推論を行った。その推論の結果をそのまま用いてボールの制御を行った結果、当初はボールが落ちる場合も時々あった。その原因を検討し、以下の調整を行った。

この制御は実時間制御であるが、システム各部分の処理時間を図4.3に示す。ここで、入力情報から出力信号までの間に時間遅延（0.15〜0.20sec）があることがわかる。この遅延時間の間にボールの位置は変化している。この変化分ΔRを考慮しなければならないので、次の修正を行った。

※ Rが安定値範囲内（X、Y < 4cm）及び速度Vが安定値範囲内（Vx、Vy < 8cm/単位秒）にある時は修正せずファジィ推論によって制御を行う。

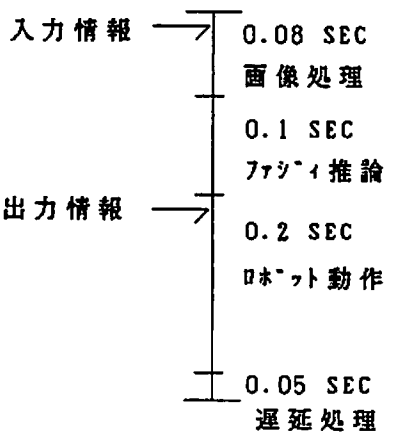


図4.3　各部の処理時間

※ Rが安定値範囲以外（X、Y > 4cm）及び速度Vが安定値範囲以外（Vx、Vy > 8cm／単位秒）の時、推論結果を$\theta' = \theta + 2\beta$に調整して制御を行う。

※　入力情報RとVの一方のみが安定値範囲内の時、推論結果を$\theta' = \theta + \beta$に調整して制御を行う。

実験によって、$\beta$は0.2とした。

遅延時間に関しての推論結果を調整することにより、運用結果が大幅に向上した。実験の結果を表1に示す。

Table 1 遅延時間を考慮した調整の結果

| | 調整前 | 調整後 |
|---|---|---|
| 安定までの制御回数 | 8 | 5 |
| ウェストの動作回数 | 3 | 10 |

以上による不安定ボールのファジィ制御の様子の一例をPhoto（1）－（3）に示す。

## §5.　結　言

不安定ボールのファジィ制御システムを実現した。本システムでは、木の板と木のボールを用いている。今後、金属板と金属球、あるいはガラス板とガラス球など、様々な材料を用いる事も検討し、ルールやメンバーシップ関数への影響を考慮する予定である。さらに、板の形状を平面から曲面に変更し、より不安定な状況への対応も検討したい。

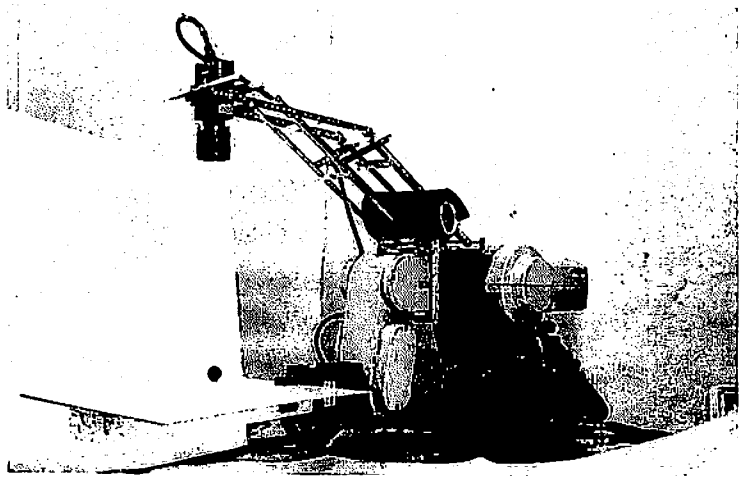

Photo (1)

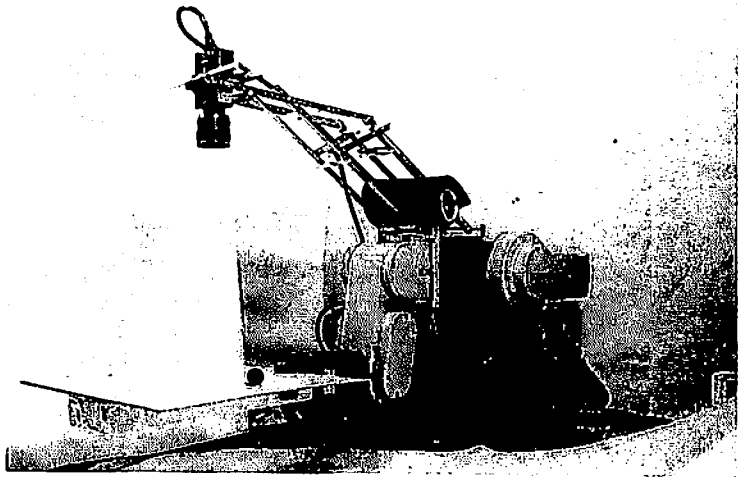

Photo (2)

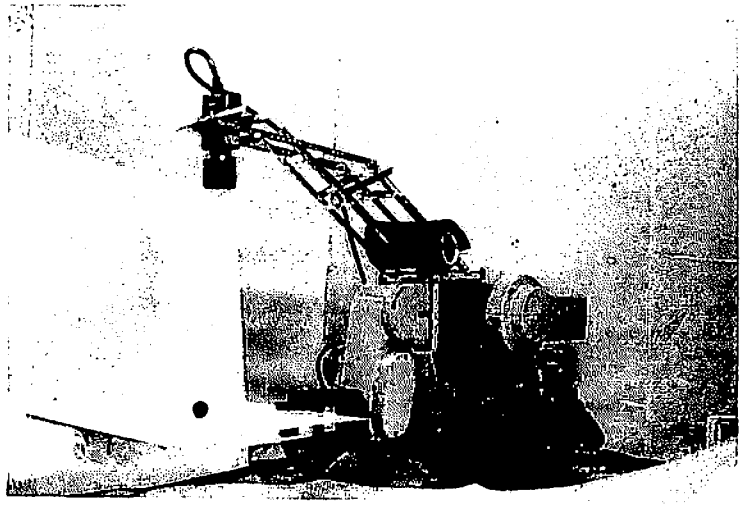

Photo (3)

## 参考文献

(1) 廣田、渡辺、：水平多関節アームロボットを用いたファジィ制御による2次元移動物体の把握
第5回ファジィシステムシンポジウム講演会文集、pp.65／70. 1989.6.2