

画像処理を用いたあいまいなロボット

Hirota, Kaoru / Arai, Yoshinori / 荒井, 良徳 / 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)

22

(開始ページ / Start Page)

107

(終了ページ / End Page)

118

(発行年 / Year)

1986-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004042>

画像処理を用いたあいまい知能ロボット

廣 田 薫*・荒 井 良 徳**

Fuzzy Controlled Robot-Arm Catching a Moving Object Using Image Processing Technique

Kaoru HIROTA* and Yoshinori ARAI**

Abstract

A robot-arm system which is able to catch a moving object on a belt-conveyor at a various speed is built. The system works based on fuzzy-inference rules with the aid of image processing techniques. The main idea is based on the concept of probabilistic sets in extended fuzzy expression. Ambiguous instructions in terms of membership and vagueness are generated by the robot itself using imagery data from a CCD-camera. Each of these instructions consists of three fuzzy items. Two are input information, and one output information. One of the input fuzzy information is the speed of the moving object, and another is the distance between the robot-hand and the object. An output fuzzy information shows the distance between the present position of the object and the next position of it. This output information is calculated based on Fuzzy inference method.

The whole system is controlled by only one 16-bits-personal-computer, and works in real time. It also allows a human-like, flexible movement. The advantages of the proposed method are the reduction of processing speed and the availability of low level devices, which have not been realized by other methods.

Key Words: fuzzy control, membership, vagueness, robot arm, image processing

§1. 諸 言

従来ロボットの制御は、あらかじめ決められた軌道の繰り返し動作が基本的であった。しかし、その場の状況に柔軟に対処できる知能的なロボットの出現が望まれるようになってきた。様々な方面からのアプローチが行われているが、その場の状況に柔軟に対応したり、人間との情報交換を円滑に行うために、あいまいさをうまく扱う機能を盛り込む方法が最近になって研究され始めている¹⁻³⁾。

あいまいさを積極的に取り扱う手法の1つに、Zadehの提唱したファジィ集合論³⁾がある。MamdaniとAssilianは、このあいまい論理を意思決定問題として制御に適用し⁴⁾、ファジィ制

* 電気工学科計測制御専攻

** 工学研究科電気工学専攻(計測制御)

御分野を開拓した。最近ではこれに学習を取り入れた研究も行われている⁹⁾。

ファジィ制御は、操作者が運用中に利用している定性的な制御戦略を言語表現した、いわゆる言語制御規則によって推論し、アルゴリズムを決定する点に特徴がある。これを利用して、プラント⁶⁾、列車運転⁷⁾の制御などの実用研究も行われている。また筆者らはロボットアームに適用し、静止物体を掴み取るアルゴリズム及び応用例をすでに開発し、一応の成果を得た⁸⁻¹⁰⁾。

ここでは、ファジィ推論で制御される CCD カメラと 5 自由度垂直多関節型ロボットアームで、ベルトコンベア上の可変速度移動物体を実時間で把握するシステムを構築した結果を報告する。なお、あいまい情報の表現には、ファジィ理論で従来から用いられてきた membership とともに、確率集合論の拡張ファジィ表現ですでに提唱した vagueness 概念¹¹⁾も適用した。

システム全体を制御するあいまい情報には、CCD カメラから画像処理により求める物体速度と、ハンド物体間距離の 2 種類の状態情報、及びそれをもとにあいまい推論によって算出する現物体位置から次時刻移動予想位置への距離という出力情報がある。CCD カメラの画像処理、ロボットアームの制御を含めたシステム全体のあいまい制御は、1 台の汎用 16 ビットパーソナルコンピュータで行っている。通常、この種の画像処理や制御には、多大な処理時間やメモリが必要になるのであるが、必要最小限の画像情報にあいまい推論を併用することにより、比較的低レベルの機器構成で実時間処理を実現することに成功した。

§ 2. あいまいさの取り扱い

ここでは、あいまいさを取り扱う上で、従来から用いられている membership 概念⁸⁾とともに、確率集合論の拡張ファジィ表現で提案した vagueness 概念¹¹⁾を導入している。membership 概念は Zadeh によって提案された compositional rule of inference³⁾に基づいたファジィ推論に適用し、vagueness 概念は推論の結果を実行する際のパラメータに適用した。本節では、以下の議論に必要な推論方式等のあいまいさの取り扱いについて、具体的に簡単に述べる。

2.1 membership 情報の利用

ここで用いた推論方式は、Zadeh によって提案された compositional rule of inference³⁾に基づいている。 F と G が各々異なる台集合上のファジィ部分集合であるとして、次のあいまい命題 P を考える。

$$P: \text{IF } F \text{ THEN } G \triangleq F \rightarrow G \quad (2.1)$$

この時あいまい関係 R は命題関数 f を用いて

$$R = f(F, G) \quad (2.2)$$

で与えられる。今、この関係が既知のもとで、前提 F^0 が与えられると結論 G^0 は、

$$G^0 = F^0 \circ R \quad (2.3)$$

で表される。ここで \circ は合成演算と呼ばれるもので、通常 Max Min 演算が用いられている。ま

Table 1 Fuzzy labels of V, L, P

(a) Fuzzy labels of Speed (V)

	low←.....→high														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$V1$	1	1	1	.5	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V2$	0	.2	.4	.8	1	.8	.4	.2	0	0	0	0	0	0	0
$V3$	0	0	0	0	0	.2	.4	.8	1	.8	.4	.2	0	0	0
$V4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.2	.4	.8	1	1	1

(b) Fuzzy labels of Distance between object and robot-hand (L)

	near←.....→far																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$L1$	1	.8	.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L2$.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L3$	0	0	.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L4$	0	0	0	0	.1	.6	1	1	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0
$L5$	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.6	1	1	1	.6	.1	0	0
$L6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.6	1	1	1

(c) Fuzzy labels of (estimated) moving-Distance (P)

	a little away←.....→far away																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$P1$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P2$.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P3$	0	.2	1	.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P4$	0	0	.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P5$	0	0	0	0	.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0	0	0
$P6$	0	0	0	0	0	0	.1	.6	1	.6	.1	0	0	0	0	0	0
$P7$	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.6	1	1	.6	.1	0	0	0
$P8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.6	1	1	1	1

Table 2 Rule map

		near.....far					
		$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	$L5$	$L6$
low ↑ ↓ high	$V1$	$P1$	$P1$	$P1$	$P1$	$P1$	$P1$
	$V2$	$P1$	$P2$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$
	$V3$	$P1$	$P2$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$
	$V4$	$P1$	$P3$	$P5$	$P6$	$P7$	$P8$

(a little away←.....→far away)
($P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8$)

た、ここでは命題関係 f として membership 関数による積 (\otimes) を用い次のように定めた。

$$R = f(F, G) = F \otimes G \tag{2.4}$$

さて、具体的には、前提で与えられる状態情報には、物体速度とハンド物体間距離の2種類があり、それぞれのファジィ集合を V, L とする。それぞれの台集合に対し、Table 1 のように、規格化したあいまいラベルを用意する。また、(出力) 結果情報は、物体の現在位置から次時刻

(予想)位置までの距離であり、このファジィ集合を P とする。 P の台集合に対しても、同様にTable1のように規格化したあいまいラベルを用意する。

状態 (V_i, L_j) に対して予想される P_k をTable2のように定めると、実際の制御規則は次の複合命題で表現される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{IF } V \text{ is } V_1 \text{ AND } L \text{ is } L_1 \text{ THEN } P \text{ is } P_1 \text{ ELSE} \\ \text{IF } V \text{ is } V_2 \text{ AND } L \text{ is } L_2 \text{ THEN } P \text{ is } P_2 \text{ ELSE} \\ \vdots \\ \text{IF } V \text{ is } V_4 \text{ AND } L \text{ is } L_6 \text{ THEN } P \text{ is } P_7 \text{ ELSE} \\ \text{IF } V \text{ is } V_4 \text{ AND } L \text{ is } L_6 \text{ THEN } P \text{ is } P_8 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

この複合命題により、求まるあいまい関係 R は、 $15 \times 17 \times 17$ の3次元配列となり、(2.4)式にしたがってあらかじめ計算して記憶しておく。

ある状態 (V^0, L^0) が与えられると(2.3)式により出力 P^0 が推論される。

2.2 vagueness 情報の利用

確率合論の拡張ファジィ表現¹¹⁾では、従来からの membership を1次モニターと呼び、2次モニターを vagueness として、ともに $[0, 1]$ の数値で表現する。2次モニターの vagueness は、1次モニター (membership) の確実性を示す指標 (度合) であると解釈でき、TYPE 2¹²⁾等とも類似性が見られる。vagueness を加味した推論方法も提案されているが¹³⁾、ここでは、処理速度等の理由により、vagueness 値をいたる所で 0 (clearly) として推論を行った。

vagueness の値は、推論の結果にしたがってロボットハンドが移動する際に反映させることにした。推論された出力結果は、いわば、“どこで物体を取るか”と解釈することができるので、物体に厳密に追従する (微小時間間隔で軌道を修正する) 必要性は特になく、ある程度ハンドが移動した後に、推論を行えばよい。つまり、確実なデータによる場合はデータに従い動作し、そうでないデータによる場合は、動作途中で修正をしてやれば良いわけである。これは、物体の移動が複雑な場合であっても、まずは手を近づけてから追従動作を行うという人間の行動に近いものであろう。

具体的には、速度が速く、距離が遠い程、推論された結果の確実さは減ると考え、Table 3 のような vagueness map を用意した。例えば、 (V_3, L_4) という状態ならば、推論された結果の vagueness 値を 0.3 とする。この値をもとに、 $(1-0.3) \times 100\%$ として、ハンドが推論された地点へ向かう 70% の道程で停止して、再度推論を行うことにする。

Table 3 Vagueness map

	L1	L2	L3	L4	L5	L6
V1	0	0	0	0	0	0
V2	0	0	0	.2	.3	.4
V3	0	.2	.2	.3	.4	.5
V4	0	.3	.3	.4	.5	.5

§ 3. 画像処理を用いた状態観測

本システムでは、物体はベルトコンベアにより運ばれるので、その動きは1次元に限定される。また、速度は（ベルトのスリップなど）あまり急激でない程度に変化しても追従できるようにした。必要となる状態情報は、移動物体のおよその速度 (v) とハンドと物体間の距離 (l) の2つである。2つの状態情報の抽出は、ベルトコンベア（作業場）を上側から写し出す1台のCCDカメラから取り込んだ画像を処理して行う。

移動物体の速度 v は、ある時間 Δt 内に動いた距離の変化量 Δd を用いて、次式より求める。

$$v = \Delta d / \Delta t \tag{3.1}$$

変化距離 Δd は、物体の位置を2回観測することにより算出可能であり、変化時間 Δt は計算機内のタイマにより知ることができる。

ロボットハンドと物体間の距離 l は、ハンドの位置と物体の位置から計算される。ロボットハンドの位置は、ロボットを制御する上で既知の値である。

従って2状態を算出するには、物体の位置座標を知れば良いことになる。カメラは、実際には別のロボットに取り付けられ、移動物体の位置により適度に追従して動く。これらの相互位置関係を Fig. 1 に示す。カメラの台座としてのロボットは x 軸上に置き、物体の位置により θ のみを変化させる。実際には θ は3種類を用意し、ベルトコンベアの幅方向両端部と中心を写し出せるように θ を決定した。このように、カメラの位置関係がわかっているので、画面の座標系からは、簡単な座標変換により求めることが可能である。ただし、カメラ（レンズ）の特性（視野角度）も考慮する必要がある。

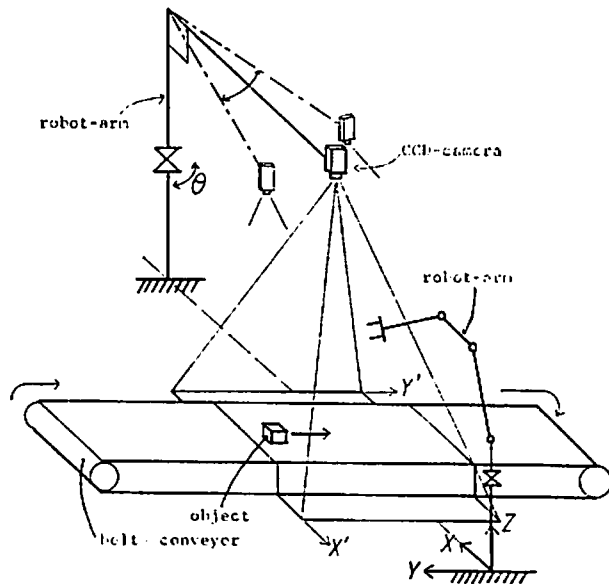


Fig. 1 Overview of the catching-robot system.

画面の座標系からは、簡単な座標変換により求めることが可能である。ただし、カメラ（レンズ）の特性（視野角度）も考慮する必要がある。

次に画像処理により、撮り込んだ画像から物体であることを判別する方法を述べる。用いた画像処理装置は、256×256画素を各々 6 bits (64階調) で表現する能力を持つ。64階調 (0~63) のうち、黒レベルが0、白レベルが63の値をとる。またここでは、ベルトコンベアは黒っぽく、反対に物体は白っぽいものとして、その区別は適当な一定値（しきい値）以下、以上により決定した。画像上の座標系は下に x' 軸正、右に y' 軸正とし、原点は左上とする (Fig. 1 参照)。この画面上で、物体は y' 軸正方向に移動する。

まず、画像データの原点より x' 方向に3画素おきに ($y'=0$ のライン上を3画素毎に)、適当に定めたしきい値以上の画素が存在するか否かを見ていく。もし無ければ、 $y'=2$ のライン上を同じく x' 方向に探査していく。このラインにも存在しなければ $y'=5$ のライン……として、一般に $y'=3n-1$ のライン上を $x'=3m-1$ 毎に探索していく。しきい値以上の値を持つ画素は物体である可能性もあるが、背景（ベルトコンベアより外側）もしくは雑音である可能性も十分考えられる。物体は十分大きいので3画素毎に調べても十分である。もし、ある位置でしきい値以上の値をもつ画素が見つかったならば、その座標をいったん記憶しておく。ベルトコンベアが画面上のどこに写るかは決まっているので、背景であるか否かも判断できる。背景でないならば、そのまわりもしきい値以上であるかを細く見ていく。見つかった画面上の座標を (a, b) とすると、まず、 $y'=b$ ライン上にしきい値以上の画素がいくつあるかを調べる。その画素数がかもし8画素以上であれば物体があるという可能性が強く、それを示す変数 (e) をカウント ($e=e+1$) し、7画素以下であれば雑音であった可能性が強く、それを示す変数 (z) をカウント ($z=z+1$) する。次のライン ($y'=b+1$) 上についても各画素について調べ、同様に e, z をカウントしていく。このようにして、何ラインかを調べていくうちに、 e が7以上、つまり物体の1部を含んでいると思われるラインが7本以上あった場合、この付近に物体があったと判断し、その代表点を (a, b) とする。しかし、もしも e が7以上にならないうちに z が5以上になった場合、つまり雑音を含んだラインが5本以上となった場合、この付近は物体でなく雑音の多い地域であったと判断し、 z が5となったラインの次のラインから、再度3画素毎の探索を行う。

物体は y' 軸正方向に移動をしていくので、前回の探索で物体が (a, b) 付近に存在していることがわかっていれば、次の探索は (a, b) 付近から行えばよく、実際には $y'=b-2, x'=0$ から探索を開始することにした。

このように、ある程度の雑音があっても、物体が十分な大きさを持つことを利用して、処理を簡略化し、処理速度の向上をはかった。

§4. ロボット制御方法

画像処理を利用した移動物体を掴み取るあいまい制御ロボットのアルゴリズムは次のような6ブロックに分解される。

- (1) 観測部 (observation block)
- (2) 量子化部 (quantization block)
- (3) 推論部 (inference block)
- (4) 解釈部 (interpretation block)
- (5) (ロボット) 制御部 ((robot) control block)
- (6) 把握部 (catching block)

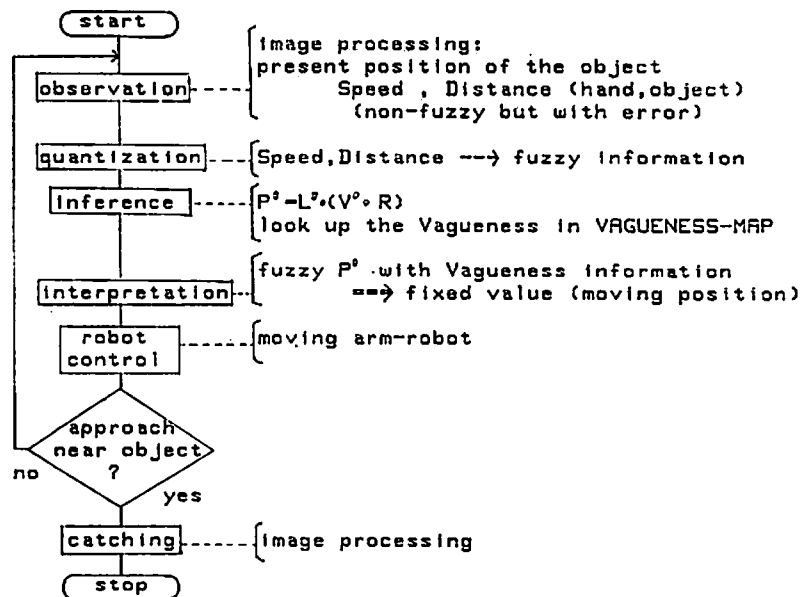


Fig. 2 A flow chart of robot-arm system catching a moving object.

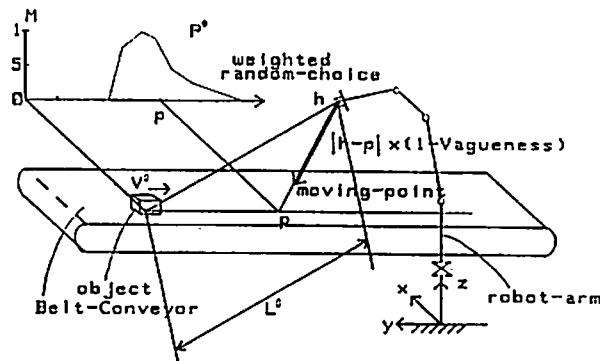


Fig. 3 An outline of robot control strategy.

(1)のブロックでは §3 で述べた画像処理を用いて状態情報を抽出し、次の(2)~(5)においては §2 で述べたようにあいまいさを充分利用して、ハンドが物体のすぐ近くに誘導されるようにこの順に動作を繰り返す。物体付近まで誘導されたら、ブロック(6)で実時間のフィードバックをかけ、実際に物体を掴み取るわけである。Fig. 2 には、このシステム全体のフローチャートを、Fig. 3 には原理概略図を示した。

以下では、これらの各ブロックのアルゴリズムを簡単に説明する。

4.1 観測部 (observation block)

ここでは移動物体を観測し、必要な情報の抽出を行う。

必要な状態情報は、移動物体の速度及びハンドと物体間の距離であり、抽出方法は §3 に述べたとおり、カメラから撮り込んだ画像を処理して求める。

この観測部で抽出された2つのデータは、測定値として確定した値のまま、以下のブロックに引き渡される。

4.2 量子化部 (quantization block)

ここでは、(1)観測部で抽出された確定値情報(測定値)をもとに、誤差等を考慮してあいまい情報へと拡張する。

物体の速度は、連続的にゆっくりと常に変化をしているようなモデルを考えている。また、ハンドと物体間の距離も、物体が移動しているので常に変化している。このことから、測定誤差を無視したとしても、入力画像からの情報にあいまいさが含まれることになる。ここでは実時間のフィードバックをかけるわけではないので、およそ現時点におけるおよその状態を知ればよい。

あいまい情報としての物体速度 V^0 (Fig. 3 参照) について、まず測定値を § 2 で述べた規格化した台集合 $\{0, 1, \dots, 14\}$ の要素へ写像する。この写像では、あらかじめスケーリングファクタを与えておく。ここで、物体速度の測定値を求める時((3.1)式)に必要であった2回の観測の時間間隔 Δt が小さいものであれば、この時観測された速度 v の信頼性はあやしいものとなる。また、たとえ Δt が十分大きくとられていたとしても、急激に速度が変わることは無いので、以前の速度のデータ情報もある程度現在の速度に反映させた方が良いと思われる。そこで、時間間隔 Δt が短い場合は、今回写像された要素の membership 値を0.8にし、他の要素の値は前回のその値の9割とした。また時間間隔が十分にとられている場合は、今回写像された要素の membership 値は1.0にし、他の要素の値は前回の値の6割とした。

あいまい情報としてのハンドと物体間の距離 L^0 (Fig. 3 参照) についても、まず測定値を § 2 で述べた規格化した台集合 $\{0, 1, \dots, 16\}$ の要素へ写像する。これも、スケーリングファクタをあらかじめ与えておいて行う。

ここでハンド-物体間の距離の意味を考察してみよう。(1)観測部で求めた測定値は、確定値であった。しかし今必要なのは、ハンドと物体の距離概念である。例えば同じ距離であっても、物体の進行方向にハンドがあるのなら、進行方向逆側にある場合よりも近いと考えるべきである。そこで、物体の進行方向先にハンドがある場合、写像した要素の membership 値を0.6に、1つ小さい(より近い)要素の membership 値を1.0に、さらにそれより1つ小さい要素の値を0.4にした。ハンドが物体付近にある場合は、写像された要素の membership 値を1.0に、1つ小さい要素と、1つ大きい(より遠い)要素の値を0.5にした。ハンドが物体より手前(進行方向逆側)にある場合は、写像された要素の値を0.2に、それより1つ大きい要素の値を1.0に、さらに1つ大きい値を0.5にした。

通常ファジィ制御においては、非ファジィ数として簡単化をする場合が多いが、ここでは、このようにして推論に用いられる情報にあいまいさの概念を十分に反映させている。

4.3 推論部 (inference block)

ここでは、(2)量子化部で求めた2つのあいまい情報 (V^0, L^0) をもとにして、(2.3)式により制御出力 P^0 の推論を行い、さらに vagueness 値の決定も行う。

既に§ 2で述べたように、24個の命題（制御規則）により、関係 R を求めておき、(2.3)式により、制御出力 P^0 （Fig. 3参照）の推論を行う。制御出力 P^0 は勿論あいまい変数として出力されるわけであり、どのあたりにハンドを持っていったら良いかという情報としてとられる。

推論された P^0 の確実さを考慮するための要因としてvaguenessの概念を導入することについては、すでに2.2節で述べた。このvagueness値の決定は、2状態(V^0, L^0)により、あらかじめ与えておいたvagueness mapから直接求めることも前述の通りである。

ここでは、(2)量子化部で求めた V^0, L^0 を、あいまいラベル($V_1 \sim V_4, L_1 \sim L_6$)におきかえ、Table 3に示したvagueness mapにより直接求めた。

4.4 解釈部 (interpretation block)

ここでは、(3)推論部で推論されたあいまい出力 P^0 とvagueness値をもとにして、確定数 p への解釈変換を行う。

確定数への解釈変換では、まず P^0 を実際の距離に解釈変換してから座標値に変換する。次にvaguenessを考慮して、実際にハンドを移動させる座標を計算する（Fig. 3参照）。

あいまい出力 P^0 から確定数 p への解釈変換としては、一定のしきい値以上になる範囲からmembership値による重み付けの後、ランダムに選ぶ方法を用いた。また、重心を採用する方法（center of gravity）も可能なようにプログラムしてある。座標値への変換には、物体の移動方向が1次元であることを利用して行う。

必ずしも求められた座標へハンドを移動するのではなく、その途中で止めて再度推論を行う場合もあり、どの時点でハンドを止めるかを決定づける要因として、vagueness値を用いた。具体的には、(3)推論部で求められたvagueness値を1から引いた割合まで動作することにした。つまり、vagueness値が0.3であれば、指定値の70%の行程まで移動させ、vagueness値が0であれば、指定された座標までハンドを移動させてやる。

4.5 (ロボット)制御部 ((robot) control block)

ここでは、(4)解釈部で求めた座標までハンドを移動させる。

4.6 把握部 (catching block)

ここでは、推論する必要がない程度にハンドが物体まで近づいた場合、実際に物体を把握する動作を実行する。

(1)~(5)のブロックにおいて、ハンドが物体付近に誘導されたら、現在の物体位置の少し先にハンドを移動させてやる。つまり、この位置で物体が流れてくるのを待つわけである。実時間で物体の座標を求め、ハンドの真下に来た時点でハンドを降ろして、物体を掴み取る。

§ 5. 運用実験とその結果

画像処理で得られるあいまい速度、距離情報をもとにして、可変速度のベルトコンベア上で運

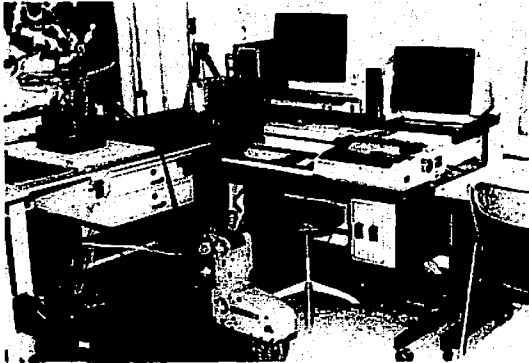


Photo 1 Overview of the catching-robot system.

ばれてくる移動物体を掴み取るロボット制御システムを構築し、運用実験を行った。システム全体を Fig. 1, Photo. 1 に示す。システム構成は、5自由度の垂直多関節型ロボットアーム三菱製 RM 501 (ムーブマスター II) 2台、ITV カメラとして SONY 製 CCD カメラ (XC-37) 1台、256×256画素で各画素が64階調 (6 bits) の分解能を持つ画像処理装置 edec (社) 製 ED-1161 (IMAGE

PC) (画像データ用メモリ 128kB RAM を内蔵) およびカメラの画像を表示する画像モニター、そしてロボットおよび画像装置に接続され、ロボットの制御および各種処理を行う 16 bits のパーソナルコンピュータ NEC 製 PC-9800 (cpu は 8086 & 8087, 5MHz clock, 384 kB RAM 内蔵) および周辺機器 (キーボード, モニター, 8 inch フロッピーディスク装置) から成る。また物体は、ロボットのグリップで掴める程度のおよそ5×5×5cm 以内の白っぽいもので、可変速度産業用ミニベルトコンベア (三和コンベア製) により移動される。ロボットアームのうち1台はカメラの台座として用い、物体の位置によりカメラを移動させてやる。

step	1 →	2 →	3 →	4 →
hand posi.	(160, 0, 498)	(323, 143, 197)	(419, 189, 160)	(422, 122, 160)
object posi.	(363, 315, 100)	(469, 212, 100)	(472, 165, 100)	(473, 106, 100)
next posi.	(464, 204, 100)	(469, 189, 100)	(472, 122, 100)	(473, 75, 100)
vagueness	0.3	0	0	0

→	5 →	6 →	7 →
(423, 75, 160)	(434, 33, 160)	(423, -52, 160)	(464, -52, 110)
(484, 56, 100)	(473, -3, 100)	(478, -45, 100)	(464, -52, 100)
(484, 33, 100)	(473, -52, 100)		[catching]
0	0		

posi. = (x, y, z) mm

- hand posi.: present position of hand
- object posi.: present position of object based on image data from CCD-camera
- next posi.: estimated next position of object based on P^0
(calculated by fuzzy inference using L^0 and V^0)

Table 4 An example of experimental results

実際のプログラムは、N88-日本語 BASIC (86) (MS-DOS 版) およびアセンブラ言語で作成した (BASIC 部分はおよそ700ステップ, アセンブラ部分はおよそ 2kB (データも含む))。プログラムの流れは BASIC により記し、画像処理ルーチンやファジィ推論部でアセンブラを用いた。通常ファジィ制御では推論の際に単純化を行い高速化をはかるが、ここではあいまいさを十分により忠実に扱うものとして単純化は行わず、代わりにアセンブラ言語により高速化をはかっ

た。

以上のような構成のもとでの運用実験結果を報告する。ベルトコンベアは、秒速最大 5 cm 程度以下の可変速度で流れ、物体を運ぶ。ロボットは CCD カメラを用いて必要な情報を取得し、推論計算を行い、この物体を掴み取る。

運用実験の一例の数値データを Tab. 4 に、その各々に対するロボットの状態を Photo. 2 に示す。この例においては、第 6 ステップ終了時にロボットのハンドが物体に十分接近し、第 7 ステップで物体がハンドの真下に来るまでリアルタイムで物体の位置を観測しながら待ち、最終的に物体を掴み取った。この例での全所要時間は、約 10 秒程度であった。第 1 ステップでは vagueness が 0.3 であり、予測した地点（表中での next posi.）へ向かう 70% の所まで移動し、他のステップでは予測した地点までハンドを移動している。ただし、追従時のハンドの移動先は、カメラが十分物体をとらえるように（アームによって物体が隠れないように）、予測した地点より手前（ x 軸負方向に 50 mm）に、またベルトコンベアより上方（ z 軸正方向 60 mm）に位置するように誘導した。ハンドが十分掴める位置まで物体に接近したと判断するのは、物体の進行方向先（ y 軸負方向）にハンドが位置し、物体移動速度に依存して決める。この例の場合 4~24 mm の範囲で、第 6 ステップ終了時で 7 mm ($=(-45)-(-52)$ mm) 先にハンドがあったので、十分掴めると判断したわけである。

物体の移動速度が約 5 cm/秒以上になったりすると掴み取るころまでは追従できぬこともあるが、それ以内であれば場合に応じて 3 から 10 ステップ程度でほぼ確実に物体を把握することが可能であった。

§ 6. 結 言

ロボットが、カメラで写し出した画像データを処理し、必要な全情報を求め、ベルトコンベア

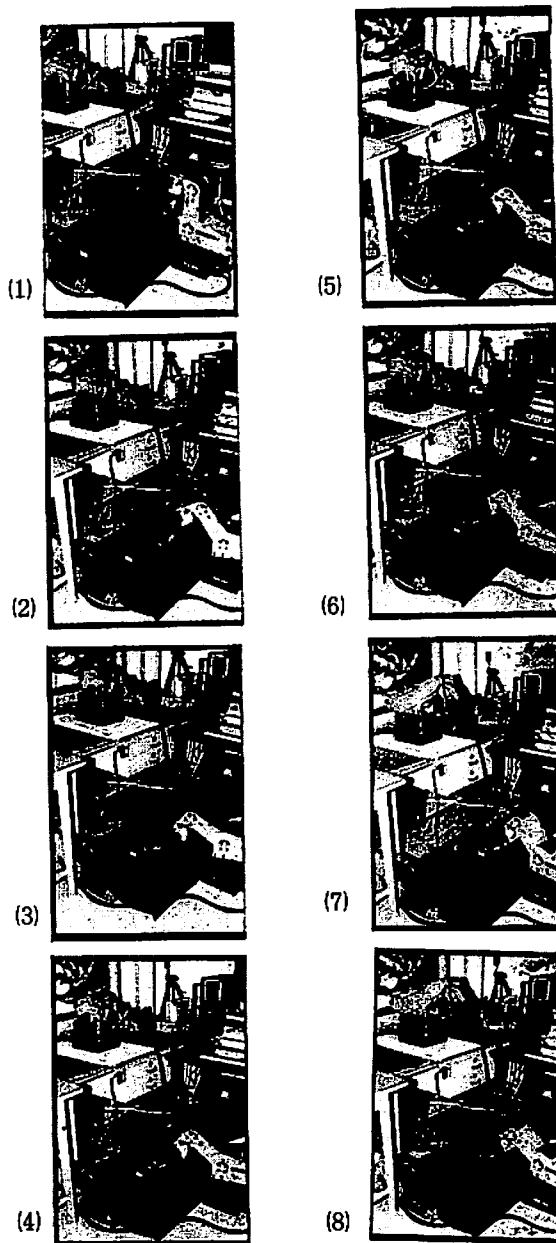


Photo 2 An example of robot movements.

上の可変速度移動物体を ファジィ制御を併用する事により、把握するシステムを構築した。また、あいまい情報の表現には、従来からの membership とともに、vagueness 概念をも導入した。

ファジィ制御を導入することによって、必要となる情報はあいまいでよく、通常は処理時間やメモリが問題となる画像処理においても、比較的低レベルの機器構成で実時間処理が可能になった。またアルゴリズムも人間指向型の理解しやすいものになった。さらに、vagueness 概念の導入により、何回かの段階（アプローチ）は必要であるが、柔軟な人間指向型の動作のファジィ制御が実現できた。

今回のシステムでは、物体の移動速度は最大でも毎秒5 cm程度に限られるが、ロボットや画像処理装置等は、その動作範囲は狭くまた特別なハードも備わっていない比較的低レベルの一般向けの装置であり、シミュレーションの速度としては十分満足のいく結果であった。本制御方式をそのまま用いた実用化開発も現在進めており、さらに工場ラインでの組み立て作業を想定し、柔軟なパターンマッチングを可能にするような方向への研究も展開中である。

参 考 文 献

- 1) M. Sugeno and M. Nishida: Fuzzy Control of Model Car, *Fuzzy Sets and Systems*, 16-2, pp.103-113 (1985).
- 2) 寺野・増井: Fuzzy ロボットに関する研究, 第3回知識工学シンポジウム資料, pp.137-142 (1985).
- 3) L.A. Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Process, *IEEE Trans. SMC-3*, pp. 28-44 (1973).
- 4) E.H. Mamdani and S. Assilian: A Case Study on the Application of Fuzzy Set Theory to Automatic Control, *Proc. IFAC Symp. on Stochastic Control* (1974).
- 5) 山崎・菅野: 自動学習ファジーコントローラ. 計測自動制御学会論文集, 20-8, pp.720-726 (1984).
- 6) Larsen: Industrial Application of Fuzzy Logic Control, *Man-Machine Studies*, 12, pp.3-10 (1980).
- 7) 安信・宮本・井原: 予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転. システムと制御, 28-10, pp.605-613 (1984).
- 8) K. Hirota, Y. Arai and W. Pedrycz: Robot Control Based on Membership and Vagueness, Approximate Reasoning in Expert Systems, M.M. Gupta et al eds., North Holland, pp. 621-635 (1985).
- 9) 廣田・荒井・池津: 画像からのあいまい情報を用いたロボット制御. 法政大学工学部研究集報, 21, pp. 55-76 (1985).
- 10) 廣田: あいまい制御知能ロボット, マグロウヒルブック (1985).
- 11) K. Hirota: Extended Fuzzy Expression of Probabilistic Sets, *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, M.M. Gupta et al eds., North Holland, pp. 201-214 (1979).
- 12) M. Mizumoto and K. Tanaka: Some Properties of Fuzzy Sets of Type 2, *Information and Control* 8, pp. 253-283 (1982).
- 13) E. Czogala: Probabilistic Sets in Decision Making and Control, Verlag TÜV Rheinland (1984).