ホッパのレベル制御におけるファジイ制御の適用

和田 憲 造*, 早 野 延 男*, 岡

均**

Application of Fuzzy Control Method for Level Control of Hopper

by

Kenzo WADA[†], Nobuo HAYANO[†] and Hitoshi OKA^{††}

If a change of state in a process can be grasped visually using an image processing unit and the process can be controlled, it becomes one of the advantages of the system. This is because the image processing unit can then be used as a detecting element when a physical quantity in a process cannot be measured directly. However, generally, vagueness inevitably accompanies the data because the image is visual data. Thus, the control methods that make the best use of the advantage of the image processing were investigated.

First the change of state in a process is detected from the image data. Fuzzy control is performed on the basis of the data to control the level of granules inside the hopper. Using triangular type of the membership functions the effects of the shape of these functions, the magnitude of gains and the fuzzy reasoning methods related to response of the process are examined. Good process responses were obtained by applying the fuzzy control method.

Key Words : Image Processing, Fuzzy Control, Membership Function, Hopper, Level Control, Granular Materials

1. まえがき

前報¹⁾では、画像処理装置を用いてホッパ内の流動状態を調べ、またこれを検出端としてレベル制御システムを構成し、画像処理時間の短縮方法ならびに制御における問題点などについて検討を行った。画像処理装置を検出端とした制御システムの利点としては、物理量が直接測定できなくても視覚的に制御量の変化をとらえることができれば制御可能な点にある。

平成元年 6 月 23 日受付

粉体工学会昭和63年度秋期研究発表会(1988年11月, 東京)にて発表

*山口大学工学部生産機械工学科

(〒755 宇部市常盤台)

TEL 0836-31-5100 内線 329

** (株)島津製作所

† Dept. of Industrial Engineering, Faculty of Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube 755

†† Shimadzu Co.

制御量の変化を視覚的にとらえる場合に二通りの方法が考えられる。一つは確定的(一意的)にとらえる方法であり、他の一つはより人間のとらえ方に近い、すなわち、あるあいまいさを持って制御量の変化をとらえる方法である。このとらえ方の違いにより制御量の抽出方法は相当異なってくると思われる。またその制御方法においても、制御法則が一つの式で表わされる従来からの画一的な制御方式と、人間のオペレータにより近い形の制御形態であるファジイ制御方式とがあり、制御対象の特性に応じて使い分けられている。

ファジイ制御はファジイ理論の応用分野として早くから注目を集めており、1980年以降急速に実用化が進み、地下鉄の運転²⁾、セメントキルンの制御³⁾など多くの実用例が報告されつつある。ファジイ制御の利点は制御対象の特性が完全に把握できなくても言語的にif~then型のアルゴリズムが構築できれば制御が可能な点にある。

画像処理装置を検出端とした制御システムの一の利点は、制御量を視覚的あいまいさをもってとらえ、これをもとに制御を行うことが可能な点であろう。そこで、本報ではその第一歩として、制御量の変化は確定的にとらえ、制御方式としてファジィ制御方式を採用し、通常よく用いられるメンバーシップ関数の基本的なパターンを用いて制御を行い、メンバーシップ関数の形、規格化変数(ゲイン)あるいは推論方法などの応答に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験装置

実験装置は前報¹⁾で用いたのと同様な装置である。その概略図をFig. 1に示す。実験用ホoppaは非対称垂直壁型ホoppaで、ホoppa前面はビデオカメラで内部の状態が見えるようにガラスで作られている。粉粒体はサブホoppaから実験用ホoppaに流入し、ホoppa底部に設けられたスライドバルブから排出される。排出された粉粒体はスクリーコンベアおよびバケットエレベータによりサブホoppaに送られ連続運転が可能となっ

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

ている。粉粒体として平均粒径 317 μ m の砂を使用した。

ビデオカメラによってとらえられた映像は画像処理装置に 1 画面 1/30 秒の速さで取り込まれ、その画像は 16 段階の輝度レベルを有する横 512 $\times$ 縦 480 画素のデータとして画像メモリに記憶される。そして、この取り込まれた画像(原画像)に種々の処理を施すことにより必要なデータの抽出を行う。画像処理のプログラムは処理時間の短縮のためアセンブラ言語により記述されており、制御量の抽出に要する 1 画面の処理時間は約 0.26 秒である。

3. 制御対象

Fig. 2 に本システムのブロック線図を示す。システムはサーボモータ、バルブ、ホoppa、画像処理装置およびコントローラであるパーソナルコンピュータなどから構成されている。図中むだ時間要素は画像処理に要する時間および画像処理装置とコントローラ間のデータ転送に要する時間を表わしており、約 0.41 秒である。また図中 Y , E , R は各々層高、偏差、設定値を表わしている。 U は操作量、 Q はサブホoppaからの流入量である。

4. ファジィ制御⁴⁾

4.1 メンバーシップ関数

ファジィコントローラは複数個のファジィ規則の集合とファジィ推論部より構成されている。ファジィ推論の方法は今までも多数提案されている⁵⁾が、ここでは制御で最もよく使用されている Mamdani の推論法を使用した。ファジィ変数には連続型と離散型とがあるが、本報では連続型のファジィ変数としてメンバシッ

Fig. 2 Block diagram of the process

Fig.3 Shape of membership functions

ブ関数が

$$A(x) = \frac{1}{a} (-|x-b|+a) \vee 0, \quad a > 0 \quad (1)$$

で表わされる三角型のメンバーシップ関数を用いた。今回使用した3種類のメンバーシップ関数の形をFig. 3 (a)~(c)に示す。(a)はP(Positive), Z(Zero), N(Negative)の3個のファジイ変数をもつもの、(b)は(a)におけるZの範囲を半分に縮小したもの、(c)はNB(Negative Big), N, Z, P, PB(Positive Big)の5個のファジイ変数をもつものである。ファジイ変数の数を減らせばファジイ規則の数は減少し、大ざっぱな制御規則となる。

4.2 制御規則

ファジイ制御規則を考える上で、ファジイ推論の前件部変数として、制御量と設定値との偏差 $e(k)$ および1サンプル時間における e の変化分 $\Delta e(k)$ を次のように定義する。

$$e(k) = R - Y(k) \quad (2)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3)$$

また、本プロセスの場合操作端が積分特性を有しているため、後件部変数として操作量 U を考える。このことより本アルゴリズムは e , Δe を用いて操作量 U を算出するものであり、前報で用いた位置形PDアルゴリズムに対応するものと考えられる。

ホッパのレベル制御において、Fig. 4に示すように層高が上昇している場合を $\Delta e > 0$ 、層高が下降している状態を $\Delta e < 0$ とする。また層高が設定値より上にある状態を $e > 0$ 、下にある状態を $e < 0$ とすると、ホッパのレベル制御においては次のような制御規則が考えられる。

R1; If e is N and Δe is Z then U is P

R2; If e is Z and Δe is N then U is P

Fig.4 Explanation drawing of e and Δe

Table 1 Control rules

		Δe		
		N	Z	P
e	N		P	
	Z	P	Z	N
	P		N	

(a)

		Δe				
		NB	N	Z	P	PB
e	NB			PB	P	Z
	N		PB	P	Z	N
	Z	PB	P	Z	N	NB
	P	P	Z	N	NB	
	PB	P	N	NB		

(b)

R3; If e is Z and Δe is Z then U is Z

R4; If e is Z and Δe is P then U is N

R5; If e is P and Δe is Z then U is N

(4)

上記の制御規則を表にまとめたものをTable 1 (a)に示す。Fig. 3 (c)のメンバーシップ関数の場合はTable 1 (b)で示される制御規則を用いた。

4.3 ファジイ推論

ファジイ規則の合成に基づく推論法として、次式で示されるMamdaniのmax-min合成を用いた。このとき操作量は次式により計算される。

$$U = \bigvee_i \{E_i(e^0) \wedge \Delta E_i(\Delta e^0) \wedge U_i(u)\} \quad (5)$$

ここで e^0 は前件部変数 e の実際に観測された値を表わしており、 $E_i(e^0)$ は i 番目の制御規則において、 $e = e^0$ のときのメンバーシップ値を表わしている。記号“ $\wedge$ ”は小さい方の値をとることを表わしており、“ $\vee$ ”は大きい方の値をとることを意味している。上式(5)において

$$\omega_i = E_i(e^0) \wedge \Delta E_i(\Delta e^0) \quad (6)$$

の演算は制御規則の前件部に関する演算であり、 ω_i は制御状態(e^0 , Δe^0)が各制御規則に対する適合度を示している。規則の適合度 ω_i と後件部変数 U のメンバーシップ関数 $U_i(u)$ のminimumをとり、最終的に“ $\vee$ ”(max)で示された演算によりそれらの推論結果が重ね合わされて次式で示される操作量 U が求まる。

$$U = \bigvee_i [\omega_i \wedge U_i(u)] \quad (7)$$

この操作量 U はメンバーシップ関数で表わされるあいまい量であるので、この非ファジイ化の手続きとして、

Fig.5 Results of fuzzy reasoning

U の重心を求め、これを k 時点における操作量 $u(k)$ として使用する。

前述のメンバーシップ関数を用い、また式(4)で示される制御規則を用いたときの推論結果をFig.5(a)～(c)に示す。Fig.3(a)とTable 1(a)を用いたものを推論1、Fig.3(b)とTable 1(a)を用いたものを推論2、Fig.3(c)とTable 1(b)を用いたものを推論3とし、この推論結果を水平面に e , Δe の軸を取り操作量を縦軸にとって3次的にグラフで表わしたのがFig.5である。実線は正の操作量、破線は負の操作量を示している。

推論1(Fig.5(a))は原点($e=0$, $\Delta e=0$)近傍において e , Δe に対する操作量の変化が小さい。推論2(Fig.5(b))は推論1に比べて、原点近傍における操作量の変化の度合いが大きくなっている。推論3(Fig.5(c))は制御規則を増やしたことにより e , Δe の変化に対して操作量が全体的になめらかに変化しており、良好な制御が期待される。これらの図からメンバーシップ関数の形および制御規則により推論結果にかなりの違いが生じることがわかる。

5. 実験およびシミュレーション

5.1 シミュレーション

ファジィ推論においてファジィ変数およびファジィ集合の台集合は規格化して用いられることが多く、ここでは $-1 \sim 1$ に規格化した。したがってファジィ制御においてはその規格化変数(ゲイン)の設定も重要な問題となる。まず、推論法の違いおよび各ゲインの制御性能に及ぼす影響を調べるために、レベル制御のシミュレーション実験を行なった。 e に対するゲインを K_E 、 Δe に対するゲインを K_{DE} とし、これらをパラメータとしてシミュレーションを行った。実機においてはバルブは飽和特性を有しており、またコントローラ(パーソナルコンピュータ)からの操作量も制限を受けているが、まず最初は各推論方法の違いをみるためにシステムは完全に線形であるとみなしてシミュレーションを行った。操作量の算出にあたっては、前もって

各推論結果を表の形でコンピュータ内に記憶しておき(e , Δe を $-1 \sim +1$ の間で0.2キザミで変化させて操作量 $u(k)$ の値を計算した)各 e , Δe の値に応じてその表をもとに操作量 $u(k)$ を算出した。また、中間の値に対しては直線補間により算出した。

Fig.6 Response of the process for the step reference input (simulation)

Fig. 6に各推論方法によるシミュレーション結果を示す。ゲインはすべて同じ値を用いた($K_E = 0.003$, $K_{DE} = 0.015$)。推論1を用いたときの応答(**Fig. 6 (a)**)は推論2の場合(**Fig. 6 (b)**)に比べて非常にゆっくりとしたものとなっている。推論1の場合の操作量のパターンは**Fig. 5 (a)**のようになり、 e , Δe が小さくなるにつれて操作量は急激に小さくなっており、このため応答は鈍くなっているものと思われる。推論2の方は推論1に比べてファジ変数 Z の幅を狭くしたことにより、原点付近においても e , Δe の値に比例して操作量が出力されていることから、応答はかなり良くなっている。推論2によるものと推論3によるものと比較すると、操作量において推論2によるものが若干応答性が悪いが、応答波形においてはあまり差がでなかった。これは**Fig. 5 (b), (c)**を見てわかるように原点近傍において e , Δe に対する操作量の出方が似ているためと思われる。

次にゲイン K_E , K_{DE} の値を変化させたときの応答波形の違いを**Fig. 7**, **Fig. 8**に示す。**Fig. 7**は推論2を用い、 $K_{DE} = 0.015$ として K_E を変化させた場合、**Fig. 8**は $K_E = 0.003$ として K_{DE} を変化させた場合である。 K_E を大きくすると応答は速くなるが振動的となる。 K_{DE} を変化させた場合は、 K_{DE} の値は大きいとシステムは安定化の方向に向かうが、大きくし過ぎると操作量は振動し、不安定な応答波形となる。また K_{DE} の値が小

Fig. 7 Effect of gain K_E on the response

Fig. 8 Effect of gain K on the response

Fig. 9 Response of the process for the step reference input and step disturbance input (experiment)

さいと応答は速応性の良いものとなる。これらの傾向はPD制御の場合における各ゲインの働きとまったく同じである。

5.2 実験

前述したように推論2と推論3では応答波形にはほとんど差がでなかったことから、実験では推論法として計算の簡単な推論2を用いた。**Fig. 9**に初期層高642mm、設定層高を700mmとしたときの実験による応答波形を示す。流入量298g, $K_E = 0.01$, $K_{DE} = 0.05$, サンプル周期は $T = 1.2$ 秒とした。また外乱として図中矢印の時点で流入量を298gから192gに突変させた。応答波形はシミュレーションによる波形とほぼ同様の傾向を示し、外乱にもよく追従していることがわかる。整定後の応答波形が若干変動しているが、これは定常状態においても粉面はサブホップからの砂の流入によりかなり変動しており、このため整定後においても若干変動が残っている。

応答波形は前報のPD制御の場合と同様の傾向を示しているが、ファジ制御の場合は e , Δe の各領域ごとに操作量を変化させることができることから応答の改善も容易である。また、粉粒体プロセスは、その特性が周囲の環境条件に左右されやすい要素をたぶん含んでいるプロセスであることからファジ制御の適した分野といえる。

6. まとめ

今回、画像処理装置を検出端とした粉粒体プロセスに対してファジ制御を行い、メンバーシップ関数や推論法が応答波形に及ぼす影響について検討を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

1) 本制御対象のように操作端が積分特性を有するプロセスに対しては、推論の前件部として e , Δe 、後件部に操作量 U を用いることにより良好な制御結果を得ることができる。

2) 応答波形はメンバーシップ関数の形に大きく影

響を受ける。また制御規則を各領域ごとに設定可能なためPD制御に比べて応答の改善が容易である。

3) 各ゲインについては K_E を大きくすると応答は早

くなり、 K_{DE} を大きくするとある値までは振動を抑えるが、それ以上大きくすると操作量は振動し、応答波形は不安定なものとなる。

Nomenclatures

$E_i(e^\circ)$: value of membership function E_i at $e = e^\circ$	[-]	T : time constant	[s]
$\Delta E_i(\Delta e^\circ)$: value of membership function ΔE_i at $\Delta e = \Delta e^\circ$	[-]	$u(k)$: manipulated variable at sampling instant k	[V]
$e(k)$: error at sampling instant k	[mm]	$U_i(u)$: membership function of u in the i th implication	[-]
$\Delta e(k)$: change in error	[mm/s]	w_i : weight of the i th implication	[-]
K_E : gain for $e(k)$	[-]	$Y(k)$: bed height at sampling instant k	[mm]
K_{DE} : gain for $\Delta e(k)$	[-]	NB, N, Z, P, PB : fuzzy variables	[-]
R : reference value	[mm]		

References

- 1) Wada, K., N. Hayano and H. Oka : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **25**, 507 (1988)
- 2) Yasunobu, S. and S. Miyamoto : *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, **104**, 867 (1984)
- 3) Holmblad L. P., et al. : *Fuzzy Information and Decision Processes*, 389 (1982)
- 4) Sugeno, M. : "Fajii Seigyo", Nikkan Kogyo Sinbunsha (1988)
- 5) Mizumoto, M. : *Systems and Control*, **28**, 436 (1984)

新しい言葉

古い言葉

ハウスドルフ次元

一般に直線や線分は1次元、正方形や長方形は2次元、立方体や直方体は3次元と言われていた。ところが1890年に数学者のペアノが、正方形内のすべての点を洩れなく通る Peano 曲線と呼ばれる連続曲線を考え、このPeano 曲線の次元は1(線分)なのか、それとも2(正方形)なのかが当時の数学界の問題となった。ハウスドルフとベシコビッチは1937年に、対象の図形を構成する単位図形の個数と単位長さの逆数のD乗との間に比例関係が成り立てば、その指数Dがその図形の次元であると新たに次元を定義した。そこでこの定義による次元

をハウスドルフ次元あるいはハウスドルフ・ベシコビッチ次元と呼ぶ。この定義によれば Peano 曲線のハウスドルフ次元は2となる。この定義に基づき、それまで何次元かが問題となっていた Cantor の3進集合、Koch曲線(粉体工学会誌25巻1号p. 10図1参照)やSierpinski の gasket などの複雑な幾何学的図形の次元が定められ、それぞれ0.6666..., 1.261859..., 1.584962...と整数ではなく、実数の値をとることが分かった。

1970年代に入ってマンデルブローが、幾何学的図形に対するハウスドルフ次元の定義を、雲、山、樹木、川、海岸線、稲妻などの自然界に見られる複雑な形に拡張して使用し、これをフラクタル次元あるいは相以次元と名づけた。したがって厳密には幾何学的図形に対してはハウスドルフ次元、自然界の形に対してはフラクタル次元と呼ばねばならないが、定義や意味は基本的に同じであり、現在ではフラクタル次元のほうが一般的に広く用いられている。

(姫路工業大学 鈴木 道隆)