

## 35. 整地作業におけるブルドーザブレードの自動制御

愛媛大学：\*深川 良一・室 達朗

1. はじめに 整地作業時、ブルドーザブレードの操作は高度の熟練を必要とする。本研究では、こうしたブレード操作をファジィ制御に基づいて自動化し、整地作業における運転操作を容易にし、作業精度並びに作業能率の向上を図ることを目的としている。ここでは、まず車両が1次元的に変位するという最も単純な条件下で実施した室内整地試験の結果について報告する。次に、車両がより実際に近い2次元的な変位をする場合の数値シミュレーション結果について報告する。

### 2. 一次元的な変位場での室内試験

2.1 実験装置 実験装置の概略をFig. 1に示す。実験装置は土槽、台車、牽引装置、ブレード及びブレードを上下させるための装置よりなり、基本的に深川・室・鈴木(1991)で用いたものと同一である。車両の牽引速度は最小0.2(cm/sec)～最大2(cm/sec)である。リニアヘッドの最大上昇及び最大下降速度はそれぞれ17(cm/min)である。

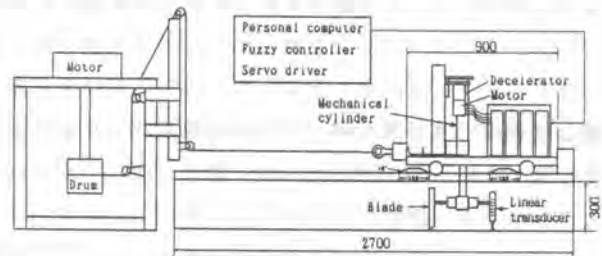


Fig. 1 Testing apparatus

リニアヘッドの先に、ブレードと基準面の高さを計るリニアトランスデューサー及びブレードの高さの変化(制御結果)を計る超音波変位

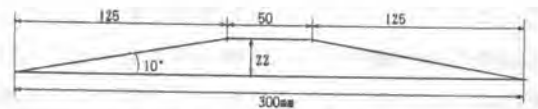


Fig. 2 Dimensions of obstruction

計を取り付け、前者を入力値としてファジィコントローラーに、後者を制御結果としてデジタルデータレコーダに接続した。機械的基準面としてモデル地盤の上に150×7.5×1.5(cm)の滑らかなアルマイト板を水平に置いた。

台車の四車輪の前方にFig. 2に示す同一形状の4つの障害物を設置し、台車の四輪が同時に障害物を登りはじめるようにした。つまり台車自体の水平性は実験中確保されるから、変位は一次元的に発生することになる。

2.2 システム構成 システム構成をFig. 3に示す。ファジィコントローラーは、リニアトランスデューサーから入力された値をもとに制御を行う。パワーユニットは、交流電源を整流平滑し直流電源をサーボドライバに供給する。サーボドライバは、ファジィコントローラーからくるアナログ速度指令電圧によってサーボモーターに供給する電圧を制御する。

### 2.3 実験方法

1)メンバーシップ関数の決定 まず基本的に入力側、出力側メンバーシップ関数は次のような特性を備えていなければならない。i)急速な入力情報の変化に対しては敏感に対応できなければならない、ただしii)敏感過ぎると制御結果が振動することも予想されるので収束性が良好でなければならない。以上の点を考慮して次のようなメンバーシップ関数の設定を行った。

①出力側メンバーシップ関数を一定とし、Fig. 4に示した入力側メンバーシップ関数のL/L<sub>0</sub>を0.05～

0.5の5種類変化させた。 $L/L_0$ が小さいほど入力値に対して敏感な反応を示すことが期待される。

②上の実験の検討により $L/L_0 = 0.1$ 程度であれば良好な制御結果が得られたので、次に入力側メンバーシップ関数の $L/L_0$ を0.1に固定し、出力側メンバーシップ関数の $K/K_0$ をFig. 5に示すように0.05~0.5と変化させた。 $K/K_0$ が小さくなるほどある入力値に対して大きな出力値が得られることが期待できる。

これらの一連の実験を牽引速度0.2, 0.9, 2.0(cm/sec)で行った。

2)牽引速度の変化 リニアヘッドの最大速度に対し牽引速度の変化が制御結果にどのように影響するかを調べた。本節1)の検討から、最適な入出力値に対するメンバーシップ関数が求められたので、ここではその最適なメンバーシップ関数を用いた。実験時の牽引速度を0.2~2.0(cm/sec)と変化させ実験を行った。リニアヘッドの最大上昇及び最大下降速度と障害物の斜面角度から、リニアヘッドが対応できる限界牽引速度は1.61(cm/sec)であるため、その付近の1.1~1.8(cm/sec)は0.1(cm/sec)きざみで実験を行った。

#### 2.4 実験結果及び考察

1)メンバーシップ関数について Fig. 6 に変位の標準偏差と $L/L_0$ の関係を示した。ここでいう変位とは制御規準面からのブレードの変位であり、0に近いほど望ましい。速度が速くなるにつれて標準偏差は $L/L_0$ の変化に敏感であり、 $L/L_0$ は小さいほうが有利である。つまり、ある入力値に対しやや大きいと判断させるよりも非常に大きいと判断させるほうがすばやく目標に接近できる。次に出力側のメンバーシップ関数における $K/K_0$ の影響について調べた。入力側の $L/L_0$ は0.1に固定している。Fig. 7に標準偏差と $K/K_0$ の関係を示した。 $L/L_0$ に比べ $K/K_0$

はその値の違いには余り関係してないことがわかる。入力された値のうち0近傍のものについては、ファジィ推論の結果に対する通常的非ファジィ化(重心法)によって出力結果が変動するが、0近傍以外の値(例えば Fig. 5の入力部で0.5(V)以上の入力値)では全て最大値(5(V))としてファジィ推論の操作部へ移行するため出力結果に変動が生じないものと考えられる。

2)牽引速度変化について 標準偏差と牽引速度の関係をFig. 8に示した。リニアヘッドの対応する水平方向の限界牽引速度は1.61(cm/sec)であるが、その前後で顕著な傾向の変化は見られなかった。ファジィ制御では入力情報が均された形で出力されるため、このような穏やかな結果になったものと

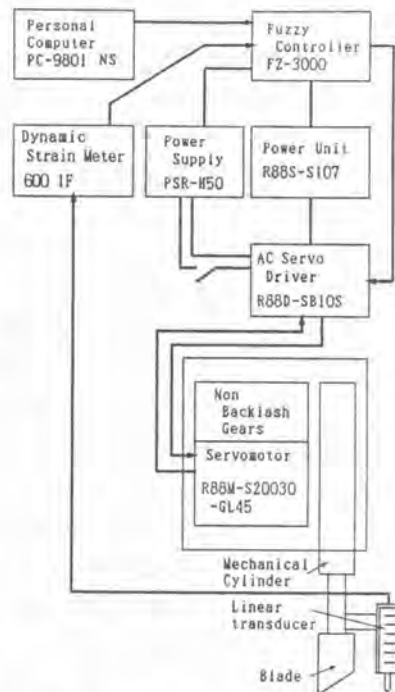


Fig. 3 Fuzzy control system

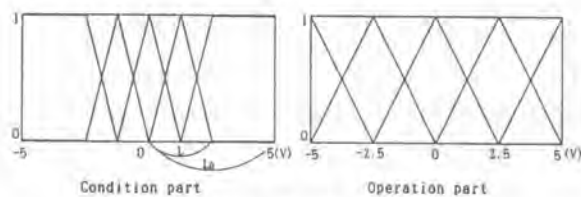


Fig. 4 Decision of  $L/L_0$  in condition part of membership function

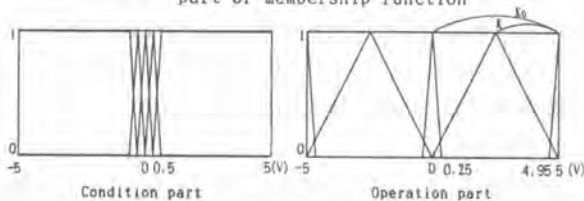


Fig. 5 Decision of  $K/K_0$  in condition part of membership function

判断される。いずれにしろ制御結果は、地盤の凹凸条件、制御機器の性能に依存するから、これらを総合的に判断して制御システムが構築されなければならない。

### 3. 二次元的な変位場での数値シミュレーション

#### 3.1 車両モデル

実際のブルドーザはFig. 9に示すように路面に障害物があると、前後に傾斜し、一般にこのようなケースではブレードの制御はより困難になる。そこで、Fig. 10に示すようにブレードの動きを単純化し、入力情報として、1)車両の基準位置からの鉛直方向変位、2)車両の傾斜角を、出力情報としてFig. 9のリフトシリンダによるブレードの鉛直方向変位を取るようにファジィ制御数値シミュレーションを実施した。入力情報のうち、1)はレーザ変位計を用いれば十分測定可能であるし、2)は勿論傾斜計などを利用することができる。このシミュレーションは、ただし、実際の整地作業をシミュレートしたものではない。ブルドーザがある時点で上記の1)、2)の情報を与えられた場合、次にファジィ推論に従えばいかなる制御結果が期待できるかを計算したものである。計算の前提は、地盤からの抵抗がなく、制御はごく短時間に終了するというものである。実際の整地作業をシミュレートしようと思えば、1)制御命令に対する地盤の応答、2)リフトシリンダの吐出速度、3)制御系における時間遅れ等の問題を考慮しなければならない。現時点では特に1)について予想することは、地盤条件によっては非常に困難である。

#### 3.2 制御条件

今回の計算例は典型的な2入力1出力のファジィ制御である。制御条件としては、入力部では鉛直方向変位、傾斜角双方についてファジィラベル数を5とした。つまり、基準位置より上側にある場合および登り勾配の場合をそれぞれ鉛直方向変位、傾斜角の正の側とすると、正の側で大きい(LP)、

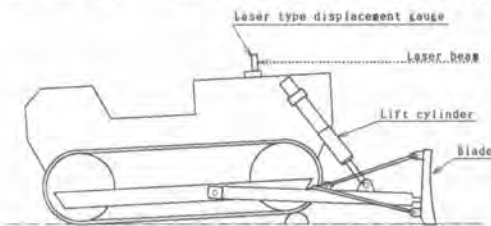


Fig. 9 Outline of bulldozer

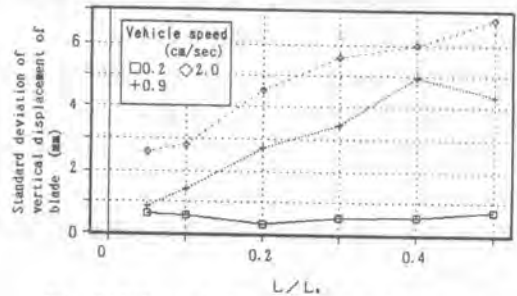


Fig. 6 Effect of  $L/L_0$  on standard deviation of vertical displacement of blade

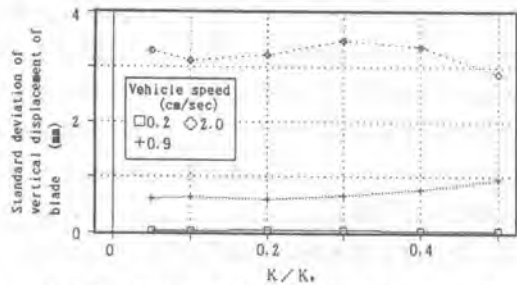


Fig. 7 Effect of  $K/K_0$  on standard deviation of vertical displacement of blade

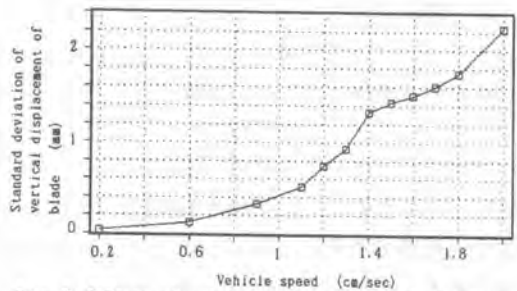


Fig. 8 Effect of vehicle speed on standard deviation of vertical displacement of blade

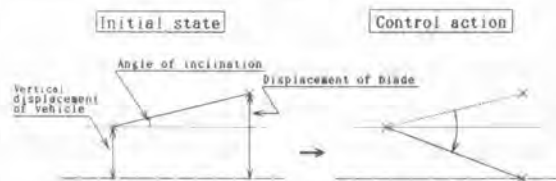


Fig. 10 Modeling of blade movement

正の側で小さい(MP), ゼロに近い(ZR)、負の側で小さい(MN), 負の側で大きい(LN)である。操作部においては、ファジィラベル数を3、5、7としてそれらの影響を調べた。例えばファジィラベル数が7つの場合、大きく上げる(UUU)から大きく下げる(DDD)まで7通り設定している。これらに対応するメンバーシップ関数の設定は、通常良く用いられる等間隔の2等辺三角形のものとした。

さらにファジィ推論規則をFig. 11に示すように設定した。

### 3.3 シミュレーション結果

シミュレーション結果をFig. 12に示す。路面条件の変化を同図に示すようなサイン曲線で表現している。水平方向長さ24m、基準面から最大で±50cmの高さを有しており、幾何学的に車両の鉛直方向変位(水平軸=0の点が基準)及び傾斜角を決定している。操作部におけるファジィラベル数を増やすことによって制御結果がかなり改善されることがわかる。ただし、ファジィラベル数が7つの場合でも定量的には若干改善の余地がありそうである。例えばファジィラベル数を9つに増やしてさらにきめ細かい制御を実施させたり、また人力側のファジィラベル数を増やすことも効果がある。路面の初期勾配が小さい場合は、相対的に細かい制御条件を設定できることになり、例えばFig. 13に示すようにさらに良好な結果を得ることができる。

実際のファジィ制御においては、今回の2入力に加えて油圧シリンダの予想ストローク長と実際に達成されたストローク長との差を入力情報として採用することにより実効のある制御結果が期待できる。なぜなら、このストローク長差が地盤の掘削・整地抵抗の大きさを表現していると考えられるからである。また、実際の三次元的な変位に対しては、車両の両側面において独立に今回のような二次元的な制御を実施することにより対応できる。

4. まとめ 整地問題におけるファジィ制御条件の影響を室内試験および数値シミュレーションにより明らかにした。今後、さらに、制御結果に及ぼす制御条件、地盤条件の影響を明確にしていく所存である。実験及びシミュレーションを手伝って頂いた本学修士課程学生・鈴木貴雄氏、元学生(現三井造船(株))・門川宏文氏、学部生・保積浩二氏に謝意を表す。

5. 参考文献 1) 深川・室・鈴木(1991): 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp. 202-205.

		Angle of inclination				
		LP	MP	ZR	MN	LN
Vertical displacement of vehicle	LP	DDD	DDD	DDD	DDD	DD
	MP	DDD	DDD	DD	D	ZR
	ZR	DD	D	ZR	U	UU
	MN	ZR	U	UU	UUU	UUU
	LN	UU	UUU	UUU	UUU	UUU

Fig. 11 Rules in fuzzy reasoning

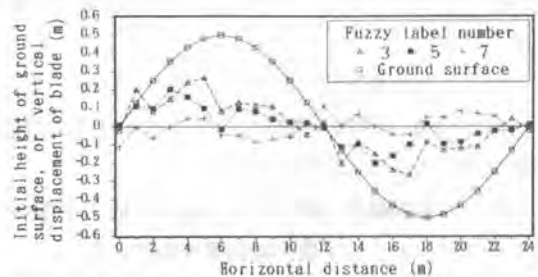


Fig. 12 Effect of fuzzy control conditions on simulation results

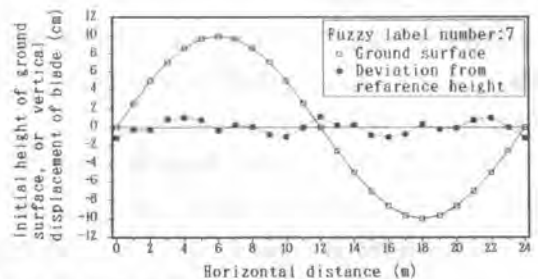


Fig. 13 Effect of degree of unevenness on simulation results