

別刷

計測自動制御学会 論文集

昭和 年 第 卷 第 号

---

(P. ~P. )

---

---

安信誠二, 予見 F u z z y 制御方式による  
インタ・クレーン自動運転, 計測自動制御学会  
論文集、22 - 10、1066/1073, 1986



社団法人 計測自動制御学会

# 予見 Fuzzy 制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転†

安 信 誠 二\*

## Automatic Container Crane Operation Based on a Predictive Fuzzy Control

Seiji YASUNOBU\*

A fuzzy set allows objects to have grades of membership from 0 to 1, and it is useful to define the subjective ambiguity of people. A fuzzy logic control is aimed at using this to incorporate human intellectual actions in control programs. A predictive fuzzy control which predicts the result and selects the most adequate control rules based on a skillful human operator's experience, had been proposed and applied to automatic train operation systems of a subway system.

In this paper, the predictive fuzzy control scheme is applied to a container crane operation by which containers are carried between a container ship and a trailer. The crane is still operated by skillful human operators. So an automatic crane operation system is strongly required.

A conventional method had been proposed with a linearized control algorithm and a target velocity pattern of a trolley on the crane. However, it is difficult to control the crane for a practical use.

The newly developed fuzzy controller evaluates performance indices such as; safety, stop gap, residual sway and carrying time. And the control rules are based on a skillful operator's knowledge. The simulation results show the crane is controlled with the same way as the skillful operator does; it saves 30% of cargos handling time compared with the conventional control scheme. And it is confirmed that the fuzzy controller is applied

effectively to an actual container crane operation.

**Key Words:** fuzzy set theory, fuzzy control, container crane, automatic crane operation, predictive control

### 1. はじめに

従来人間が行ってきた制御(運転)に関する知的活動をアルゴリズム化しマイクロコンピュータなどで自動化しようという試みの一つとして、人間の主観的なあいまいさを Fuzzy 集合<sup>1)</sup>によって定量化する Fuzzy 制御方式の応用がある<sup>2)</sup>。この Fuzzy 制御はこれまで、熟練者の状態評価による制御指令決定に基づく方式が、セメント・キルン<sup>3)</sup>、浄水場の薬剤注入制御<sup>4)</sup>などに応用されている<sup>2), 6)</sup>。これに対して筆者らは対象システムの本来の制御目的を評価し、運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する予見 Fuzzy 制御方式を提案し<sup>7), 8)</sup>、列車自動運転への実用化を進めている<sup>9)~11)</sup>。

ここで対象としたコンテナ・クレーンとは、荷役機械設備の中核をなすものでクレーンの軌道上を移動(横行)するトロリーとトロリーから垂らしたロープの上下によって、船舶用コンテナをコンテナ船とトレーラ間で移載する荷役作業を行う。このクレーンによる荷役作業の高能率化を図るためにはできるだけ早く正確に荷物を所定位置まで運搬することが必要であり、運転自動化への要求は強い。しかし、従来の制御方式では実用的な自動化がむずかしく現在でも熟練者の運転に頼っている。このコンテナ・クレーンの運転自動化を阻止しているのは、トロリーの横行制御だけで、コンテナの水平位置と振れの制御を実現せねばならないむずかしさである。

これに対し、これまでのクレーン制御方式は、ロー

† 第 24 回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭 60・7)  
第 4 回知識工学シンポジウムで発表(昭 61・3)

\* (株)日立製作所システム開発研究所 川崎市麻生区王禅寺 1099

\* Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd., Kawasaki

(Received April 21, 1986)

(Revised July 17, 1986)

プ長一定の仮定のもとで、

- (1) 初期および最終位置における振れ角が零の制約のもとで最短時間制御問題として定式化し求める<sup>12),13)</sup>,
- (2) 振れ角と角速度の位相平面上での軌跡の特徴から幾何学的に求める<sup>14)</sup>,
- (3) 加速・減速の時間の対称性に着目して求める<sup>15)</sup>,

などの方法により目標速度パターンを導出し、これにレギュレータ制御などによる追従方式が提案されていた。しかしこれらの方式は、ロープ長一定を前提条件としているため一度コンテナを所定の高さまで巻き上げた後、初めてトロリーの横行を開始する。そのためロープの巻き上げ、巻き下げをしながらトロリーの横行を行う熟練運転員の運転と比較して荷役時間がかかる、鋭角的に変化する目標速度パターンにトロリーを追従させるためにオペレータの乗り心地が悪くなる、などの問題点があり実用化まで至っていない。このほか、荷役時間の短縮を目的として巻き上げ下げと加減速を同時に行う非線形モデルに基づく方式も提案されているが<sup>16),17)</sup>、ロープとトロリーを同時に正確追従させることは、さらにむずかしい問題である。

本論文では先に提案した予見 Fuzzy 制御方式を、コンテナクレーンの運転へ適用し、実用的な自動運転方式を提案し、シミュレーションにより評価した結果について述べる。

## 2. コンテナ・クレーンの運転とモデル化

### 2.1 コンテナ・クレーン運転システムの概要

コンテナ・クレーンの運転は現在でも熟練者に頼っているが、その制御系は(1)トロリーの横行速度操作系(トロリー系)、(2)コンテナの巻き上げ速度操作系(ロープ系)、の二つに分けられる。オペレータは、コンテナの位置、振れなどを見ながら、トロリー系およびロープ系の目標速度指令とブレーキ指令を操作する。このトロリー系およびロープ系の駆動制御は ACR (Automatic Current Regulator: 電機子電流によるトルク制御) 系を内部にもつ AVR (Automatic Voltage Regulator: 速度制御) 系によって、トロリー速度およびロープ巻き上げ速度をフィードバックし、直流モータを制御する方式が一般的である。

このコンテナクレーン運転を自動化の観点からその

制御目的を考えてみると、トロリー系とロープ系の二つを操作し、(1)コンテナが他の構造物に触れることなく安全に、(2)最短時間でトロリーを目標地点へ移動させ、(3)目標地点で停止精度よく、コンテナの振れを止め、さらに、(4)トロリー上に乗務する運転手の乗り心地も重要な評価指標となる (Fig. 1)。

### 2.2 クレーンのダイナミクス・モデル

Fig. 1 に示すコンテナ・クレーンのダイナミクスを Fig. 2 に示すモデルで考える。ここで、このクレーンのモデルに基づき運動エネルギー関数  $T$ 、損失エネルギー関数  $F$ 、位置エネルギー関数  $U$ 、を求めると、

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left[ \left\{ \frac{d}{dt}(x - l \sin \theta) \right\}^2 \right. \\
 &\quad \left. + \left\{ \frac{d}{dt}(l \cos \theta) \right\}^2 \right] \\
 &= \frac{1}{2} (m + M) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 - m l \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta \\
 &\quad + \frac{1}{2} m l^2 - m \dot{x} l \sin \theta \quad (1)
 \end{aligned}$$

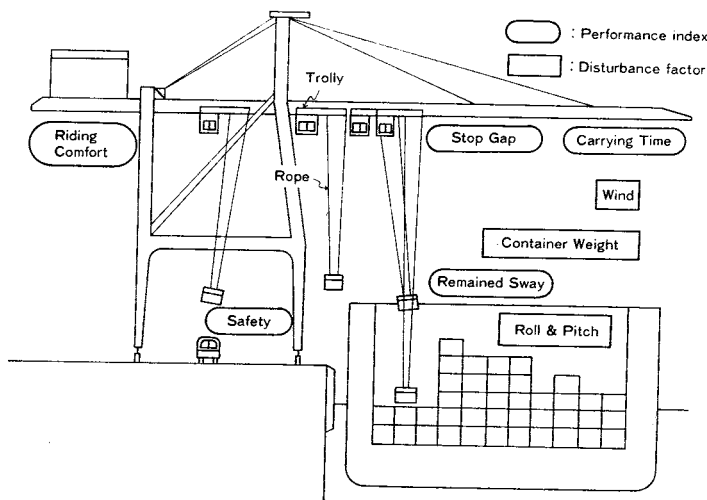


Fig. 1 Container crane operation system

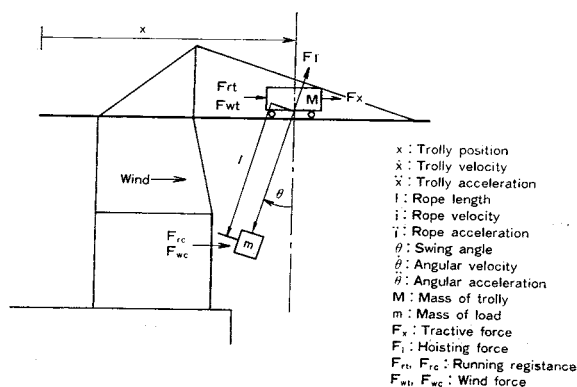


Fig. 2 Crane system model

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} F_{r_i} \dot{x}^2 + \frac{1}{2} F_{r_c} (\dot{x} - l\dot{\theta})^2 \quad (2)$$

$$U = -mgl \cos \theta \quad (3)$$

となる。

ここで、一般化座標  $\mathbf{q} = (x, l, \theta)^T$  ( $T$ : 転置) としてラグランジエの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial q_k} = \mathbf{Q}_k \quad (k=1, 2, 3) \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = (F_x + F_{w_i}, F_l, -F_{w_c} \cdot l)^T \quad (5)$$

より

$$\ddot{x} = \frac{F_l}{M} \sin \theta + \frac{F_x + F_{w_i} - F_{r_i} \dot{x} - F_{r_c} (\dot{x} - l\dot{\theta})}{M} + \frac{F_{r_c} (\dot{x} - l\dot{\theta}) - F_{w_c}}{M} \cos \theta \quad (6)$$

$$\ddot{l} = \dot{x} \sin \theta + l\dot{\theta}^2 + g \cos \theta + \frac{F_l}{m} \quad (7)$$

$$l\ddot{\theta} = \dot{x} \cos \theta - 2l\dot{\theta} - g \sin \theta + \frac{F_{r_c} (\dot{x} - l\dot{\theta}) - F_{w_c}}{m} \quad (8)$$

を得る。また、 $\theta = 0$  とし  $\sin \theta = \theta$ ,  $\sin 2\theta = 2\theta$ ,  $\cos \theta = 1$  とすると (6)~(8) 式は、

$$\ddot{x} = \frac{F_l}{M} \theta + \frac{F_x + F_{w_i} - F_{r_i} \dot{x} - F_{w_c}}{M} \quad (9)$$

$$\ddot{l} = \dot{x} \theta + l \cdot \dot{\theta}^2 + g + \frac{F_l}{m} \quad (10)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{l} \dot{x} - \frac{2}{l} l\dot{\theta} - \frac{g}{l} \theta + \frac{F_{r_c} (\dot{x} - l\dot{\theta}) - F_{w_c}}{m \cdot l} \quad (11)$$

となる。以上のコンテナ・クレーンのダイナミクス・モデルを基本とし制御方式の検討を行う。

### 3. オペレータの運転経験則

Fuzzy 制御をコンテナ・クレーンの制御に適用するにあたり、実際のコンテナ・ヤードにおけるオペレータの操作の見学および話を聞くことによりコンテナ・クレーン運転の実際を調査し、その運転方法を以下のようにまとめた。

#### 3.1 対象クレーンの特性の習熟

熟練オペレータでも、運転席に座った直後からうまい運転ができるわけではない。最初は各操作レバーを動かしてみることにより、そのクレーンの巻き上げ・横行モータの特性とロープ系の振れ特性を習熟し、徐々に高速運転を行っていく。

#### 3.2 運搬方式および経路の設定

オペレータは、現在位置から目標位置まで荷を運搬するに先立ち、途中にある船体や積載コンテナの状況を見て、荷がクリアすべき障害物の高さとその区間(危険地域)を知る。また、運搬距離と運搬物から最

大横行速度などの運搬方式を決定する。

#### 3.3 トロリー系の操作

トロリー系に関しては、その操作手順を大きく、始動、加速制御、定速走行、減速制御、停止、停止位置補正制御、荷下ろし、の七つの領域に分け、初期振れ、風などの外乱や、独立に操作されているロープ長によって、ダイナミックに変化する領域の切り替えのタイミングを以下のように判断し運転を行う。

(T1) 始動領域では、現在の状態で加速制御を開始したとき、残留振れ少なく、早く、安全に最大横行速度まで加速できるならば、加速制御を開始する。

(T2) 加速制御が終了し横行速度に達すれば、定速走行に移行する。

(T3) 定速走行領域では、現在のトロリー速度、ロープ長で減速制御をしたとき、残留振れ少なく、早く、安全に停止目標以降に停止できるならば、減速制御に移行する。

(T4) 減速制御が終了し横行速度が 0 に達すれば、停止領域に移行する。

(T5) 停止領域に入りしばらくして、トロリーがほぼ停止したときに、停止精度が悪ければ停止位置補正制御を開始する。

(T6) 停止領域に入りしばらくして、トロリーがほぼ停止したときに、停止精度がよければ横行を終了し荷下ろし領域に移行する。

さらに、運転の途中にトロリーが予想外の動きをした場合には、運搬を中止しトロリーを停止させる。

また、上記判断により決めた各領域では、以下のようにトロリーの制御を実行する。

(C1) 始動領域では、目標速度を 0 とする。

(C2) 加速制御領域では、この領域に移行時に決めた加速方法を実行する。

(C3) 定速走行領域では、定速走行目標速度を指令する。

(C4) 減速制御領域では、この領域に移行時に決めた減速方法を実行する。

(C5) 停止領域では、目標速度を 0 とする。

(C6) 停止位置補正制御領域では、トロリーを低速で目標位置の方向へ動かす。

(C7) 荷下ろし領域では、目標速度を 0 とする。

#### 3.4 ロープ系の操作

ロープ系に関しては、コンテナの位置によって、その上げ下げを指令する。

(R1) 危険地域より前では、障害物を安全に越えられる高さを目標として巻き上げる。

(R2) コンテナが危険地域にあるとき、この障害

物を安全に越えられる高さを維持できるよう、ロープ目標速度を操作する。

(R 3) 危険地域より後では、目標高さまたは、現在位置と目標位置の間の障害物の高さの高いほうを目標として巻き下げる。

(R 4) コンテナが目標位置上でほぼ静止しているとき、目標高さへ巻き下げる。

#### 4. 予見 Fuzzy 制御によるコンテナ・クレーン自動運転システム

##### 4.1 制御構造の検討

3章にて述べたオペレータの運転で、人間はトロリーの位置を見ながらトロリーの目標速度を加減し、振れ止め加速・減速を行っている。熟練者は、目標速度指令の微妙な加減で、モータの出力トルクを調整していると思われるが、フィードバック制御系では、それを模倣するのは不可能である。そこで、コントローラからモータの出力トルクを指定できるようにし、等価的にそれを模倣することとした。また振れ角については、ロープ系により荷を運搬するコンテナ・クレーンでは 0.003 rad (30 m に対し、9 cm の振れ) 程度の振れ角をロープ系から測定することは困難である。しかし、振れ角零はロープ系にとっては大域漸近安定な点である。そこで、振れ角の制御自体はトロリー・ロープ系の自然な減衰に任せ、コントローラでは振れ角を大体零にもっていく制御を行い、実用的な自動運転を目指すこととした。

##### 4.2 クレーン特性のモデル化

予見 Fuzzy 制御方式では熟練者の経験に基づく対象システムの特長把握を、部分モデルとして組み込み、制御結果の予見、予測、制御指令の決定に用いる<sup>10)</sup>。

###### (1) 固有周期のモデル化

ロープ長を一定 ( $\dot{l}=0$ ) とし、トロリー系を固定 ( $\ddot{x}=0$ ) した場合の固有周期  $T_p$  は、(11)より式

$$T_p \doteq 2\pi\sqrt{l/g} \quad (12)$$

となる。また、同様に、ロープ長を一定 ( $\dot{l}=0$ ) とし、トロリー系の加速力 ( $F_x$ ) を一定とした場合の加速周期  $T_a$  は、(9)~(11)式より、

$$T_a \doteq T_p \cdot \sqrt{M/(M+m)} \quad (13)$$

として求めることができ、減速周期  $T_d$  も同様である。

###### (2) 横行・巻き上げモータのモデル化

ロープ系の巻き上げ下げおよびトロリー系横行の速度は、AVR 系、ACR 系によるモータ制御ループによって、0.1 秒程度の時定数でサーボ制御が行われる。したがって、自動運転装置側からは、目標速度

$V_T$  および加速トルク  $F_T$  を出力すれば、ほぼそのとおりに動作するものとしてモデル化できる。

#### 4.3 評価指標の Fuzzy 集合

経験則を Fuzzy 制御則化するためには、経験則の中に含まれる言葉の意味を定量化する必要がある。そこで、(1)安全性、(2)停止精度、(3)残留振れ、(4)運搬時間、の各評価指標について、経験則の中にある言葉を Fuzzy 集合化する。各 Fuzzy 集合の定義に先立ち、必要となる定数および関数を定義する。

$x$ : トロリー位置 (m),  $v_t = \dot{x}$ : トロリー速度 (m/s),  $H_T$ : トロリーの高さ (m),  $H_S$ : 高度差の安全基準値 (m),  $H_K$ : 危険地域の障害物高さ (m),  $X_S$ : 危険地域前後の安全基準値 (m),  $L_s = H_T - H_K - H_S$ : 運搬経路内のすべての障害物を安全にクリアできるロープ長 (m),  $X_1$ : 運搬経路内の危険地域の開始地点 (m),  $X_2$ : 運搬経路内の危険地域の終了地点 (m),  $X_Z$ : 距離の基準値 (m),  $V_Z$ : 速度の基準値 (m/s).

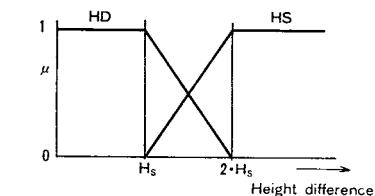
つぎに、評価指標をメンバシップ関数を用いて Fuzzy 集合として定義する場合に便利であり、またマイクロ・コンピュータによるオンライン処理に適する直線傾斜と双曲線による基本関数、**A, B, C** を定義する<sup>9)</sup>。

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 A(x, a, b) &= b/(a+b-x) & : x \leq a \\
 & 1.0 & : a < x
 \end{aligned} \right\} (b > 0) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & 0.0 & : x \leq a+2b \\
 & 1.0 + (a-x)/2b & : a+2b < x \leq a \\
 & 1.0 & : a < x
 \end{aligned} \right\} (b < 0)
 \end{aligned}$$

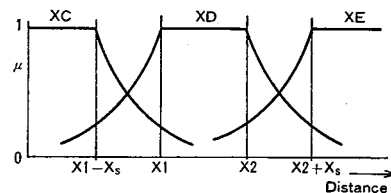
$$B(x, a, b) = A(2a-x, a, b)$$

$$C(x, a_1, b_1, a_2, b_2) = \min(A(x, a_1, b_1), B(x, a_2, b_2))$$

###### (1) 安全性(S)の評価指標の定義 (Fig. 3)



(a) Height difference



(b) Position

Fig. 3 Membership functions of the safety

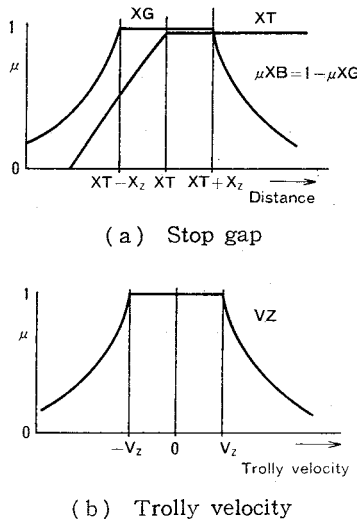


Fig. 4 Membership functions of the stopping accuracy

安全性については、トロリーの現在位置 ( $x$ )、加速周期 ( $T_a$ ) と横行速度 ( $V_m$ ) に基づき予測したコンテナの移動軌跡と積み付けられたコンテナまたは船などの障害物との余裕高さ ( $h_m$ ) から高さの安全性を、また、トロリーの現在位置 ( $x$ ) と運搬経路内の最大高さの障害物の区間 ( $X_1, X_2$ ) から位置に関する安全性を定義する。ただし、巻き上げ (XC), 巻き下げ (XE) 地域は運搬方向により少し異なる。以下で  $\mu$  は、メンバーシップ関数を表す。

(a) 高さが危険 (HD):

$$\mu_{HD}(h_m) = \mathbf{B}(h_m, H_s, -H_s/2)$$

(b) 高さが安全 (HS):

$$\mu_{HS}(h_m) = \mathbf{A}(h_m, 2H_s, -H_s/2)$$

(c) 危険地域 (XD):

$$\mu_{XD}(x) = \mathbf{C}(x, X_1, X_s/2, X_2, X_s/2)$$

(d) 巻き上げ地域 (XC):

$$\mu_{XC}(x) = \mathbf{B}(x, X_1 - X_s, X_s/2)$$

(e) 巻き下げ地域 (XE):

$$\mu_{XE}(x) = \mathbf{A}(x, X_2 + X_s, X_s/2)$$

(2) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (Fig. 4)

停止精度については、停止目標 ( $X_T$ ) に対する現在のトロリー位置 ( $x$ ) および、予測停止位置 ( $X_p = x + V_m \cdot T_a/2$ ) により評価する。

(a) 停止目標以後に停止する (XT):

$$\mu_{XT}(X_p) = \mathbf{A}(X_p, X_T, -X_z)$$

(b) 停止精度が良い (XG):

$$\mu_{XG}(x) = \mathbf{C}(x, X_T + X_z, X_z/2, X_T - X_z, X_z/2)$$

(c) 停止精度が悪い (XB):

$$\mu_{XB}(x) = 1 - \mu_{XG}(x)$$

(d) トロリーがほぼ停止 (VZ):

$$\mu_{VZ}(v_i) = \mathbf{C}(v_i, -V_z, V_z, V_z, V_z)$$

(3) 残留振れ (W) の評価指標の定義

ロープ系は、ロープ長さにより決まる固有周期  $T_a$  および  $T_d$  の間加減速されることにより、残留振れのない加減速ができるはずである。そこで、加減速の終了時刻および終了速度により残留振れを評価し、(a)加速終了 (AE), (b)減速終了 (DE), (c)トロリーが高速 (VM), (d)トロリーが低速 (VL) の各評価指標を定義する。

(4) 運搬時間 (P) の評価指標の定義

運搬開始後の経過時間 ( $t$ ) により、現在の動作領域を評価し、(a)始動領域 (P0), (b)加速領域 (P1), (c)定速領域 (P2), (d)減速領域 (P3), (e)停止領域 (P4), (f)停止位置補正領域 (P5), (g)荷下げ領域 (P6), (h)荷下ろし以前 ( $< P6$ ) の各評価指標を定義する。

#### 4.4 Fuzzy 制御則

##### 4.4.1 トロリー系制御則

3.3 節で定性的に記述したトロリー系に関するオペレータの経験則 (T1~T6) を Fuzzy 判断則として定式化する。たとえば (T3) の経験則は、この記号に対応した言葉で、「もし、定速走行領域 (P2) で現在時刻 ( $t$ ) から減速周期 ( $T_d$ ) の間トルク  $F_{max}$  で減速したとき、目標位置以後に停止する (XT) ならば、減速領域 ( $t3, t4$ ) と、減速トルク  $F_{md}$  をセットする」と表わし、

“If (P is P2 and ( $t3 = t$  and  $t4 = t + T_d$  and  $F_{md} = F_{max} \rightarrow G$  is XT))

then  $t3 = t$  and  $t4 = t + T_d$  and  $F_{md} = F_{max}$ ”

なる Fuzzy 判断則として記述できる。

また、上記判断則により決めた各領域に従い実際にトロリー系への制御指令を出力する実行部 (C1~C6) に関しても、たとえば (C3) の経験則が、

“If (P is P2) then  $VT = V_m$  and  $FT = F_m$  and  $BT = \text{off}$ ”

なる Fuzzy 実行則として記述できる。

##### 4.4.2 ロープ系制御則

3.4 節で定性的に記述したオペレータのロープ操作に関する経験則 (R1~R4) についても、トロリー系と同様に、たとえば (R1) の経験則が、

“If (S is XC and P is  $< P6$ ) then  $h$  is  $L_i$ ”

なる Fuzzy 判断則として記述できる。

上記判断則では目標ロープ長を制御方策として求める。しかし、クレーンに対しては、ロープ系の目標速度  $V_i$  で指令する必要がある。そこでここでは、つぎのゲイン  $G_i$  の飽和形比例制御を実行則として用いる。

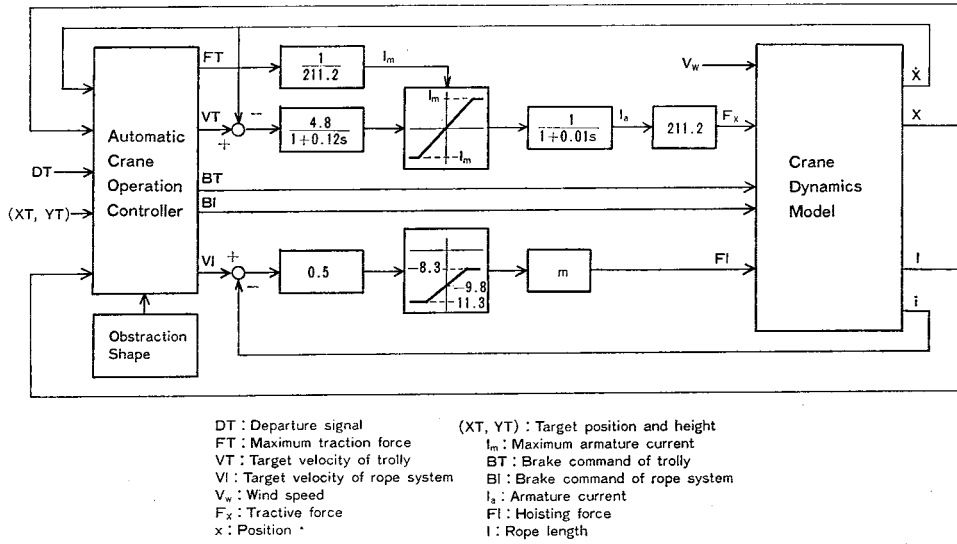


Fig. 5 Block diagram of a computer simulation

Table 1 Simulation condition

Crane height	: 31.5 m
Start point (Hold No. 56)	: (75.3 m, 3.0 m)
Target point (Yade No. 2)	: (34.3 m, 0.0 m)
Maximum height of obstruction	: 11.3 m
Maximum trolley velocity ( $V_m$ )	: 2.5 m/s
Maximum rope velocity ( $V_{lm}$ )	: 0.66 m/s
Trolley mass ( $M$ )	: 15,000 kg
Load mass ( $m$ )	: 53,500 kg

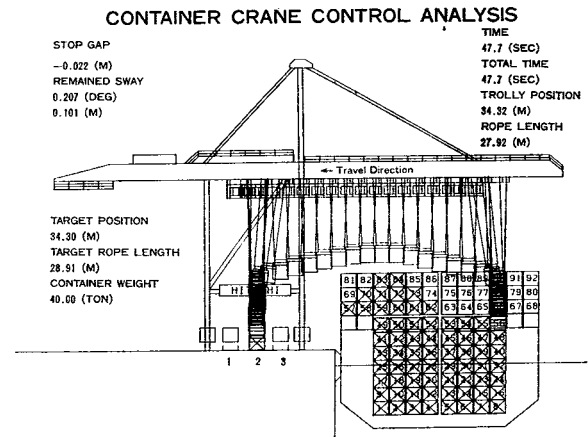
$$V_i = G_i \cdot (h - l) \quad (-V_{lm} \leq V_i \leq V_m) \quad (14)$$

### 5. 計算機シミュレーション

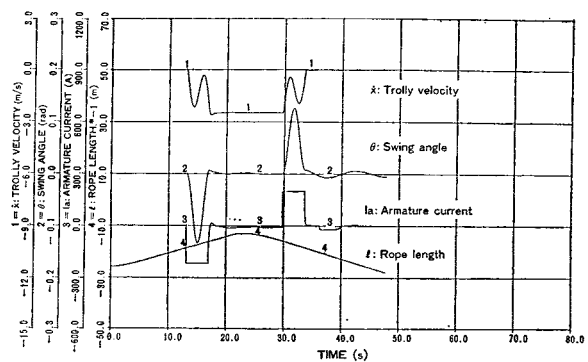
開発した予見 Fuzzy 制御コンテナ・クレーン自動運転の特性を、従来提案されているロープ長を一定とした最適運転パターンにトロリーを追従させる方式（以下、従来制御方式と呼ぶ）と、計算機シミュレーションにより比較した（Fig. 5）。なお、美多<sup>13)</sup>らは、レギュレータを用いて追従制御を行っているが、ここでは、実際のクレーンに用いられている、AVR+ACR系による速度制御によりシミュレーションを行った。また、シミュレーション条件は、実際のコンテナ・クレーンの定数（Table 1）を用いた。

#### 5.1 シミュレーション条件と結果

コンテナ・クレーンの運転において、制御性能と実用性を評価するうえで重要な指標となるのは、運搬時間、停止精度と目標位置上での残留振れである。ここでは、実際の荷役作業を考え、クレーン船上のコンテナを、ヤードまで運搬する場合を想定した。提案した Fuzzy 制御による運転状況を Fig. 6 に、従来制御方式による運転状況を Fig. 7 に示す。また、この二つのシミュレーションの運搬時間、停止精度、残留振



(a) Locus of the container



(b) State values

Fig. 6 A result by the fuzzy control

れを Table 2 にまとめて示す。

#### 5.2 シミュレーション結果の検討

従来制御方式では、停止精度は 4.9 cm であるが目標速度パターンへの追従遅れなどにより残留振れは 22.6 cm と大きくなっている。一方、Fuzzy 制御による結果では、加速・減速時のロープ長の変化によるク

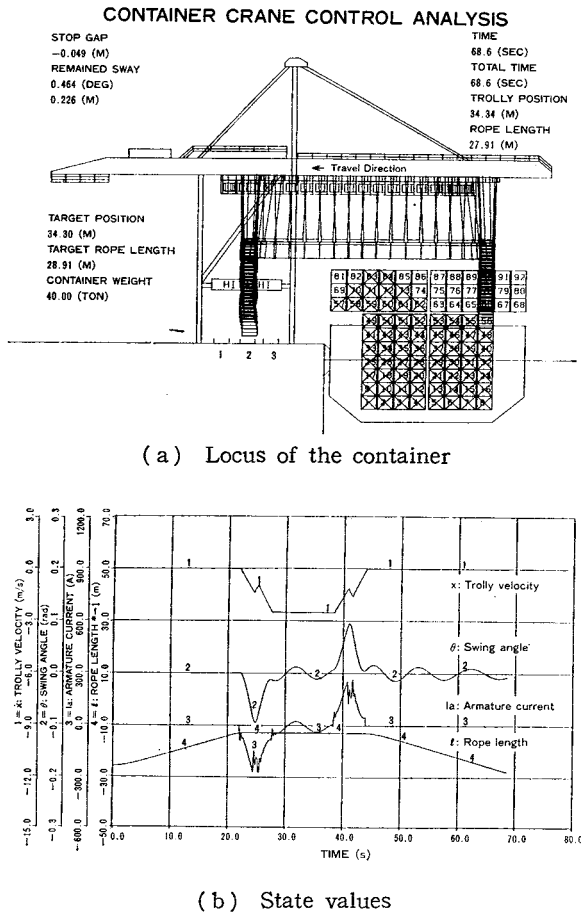


Fig. 7 A result by the conventional control

Table 2 Summary of simulations

	Handling time	Stop gap	Remained sway
Fuzzy control	47.7 s	2.2 cm	10.1 cm
Conventional control	68.6 s	4.9 cm	22.6 cm

レーンダイナミクスの非線形性より、残留振れが多少生じているが、運搬終了時には、停止誤差は 2.2 cm、残留振れ 10.1 cm となっている。また運搬時間については、従来制御方式では一定の長さにロープを仮定しているため、障害物を完全にクリアできる高さ 13 m までロープを巻き上げた後、加速、定速走行、減速を行い、目標位置に停止後コンテナを下ろしている。これに対し Fuzzy 制御では、巻き上げながら加速し、巻き下げながら減速した運転を行うため、この例では 20.9 秒 (30.5%) 運搬時間を短縮でき、大幅に高効率な荷役を実現している。

ここで提案している自動運転方式では、トロリー上にオペレータが乗務し、最終的なコンテナの上下、つかみ解放の操作を行うことを想定しているためオペレータの乗り心地も重要な評価指標となる。従来制御方式では、鋭角的なトロリー速度変化とモータ電流の激

しい変化から、非常に乗り心地が悪いと推定される。これに対して Fuzzy 制御方式では、トロリー速度が S 字カーブを描いており、また、モータ電流も滑らかに変化しているため、乗り心地良い動きとなっている。

なお本論文では、船上の 1 個のコンテナを運搬するシミュレーション結果について示し、従来制御方式と比較検討したが、Fuzzy 制御方式では、Fig. 6(b)に示すように、減速領域への移行時にはコンテナの振れはほぼ停止しており、別の位置からコンテナを運搬する場合でもほぼ同様の停止精度、残留振れのシミュレーション結果が得られる。また、本方式をマイクロコンピュータに組み込み実験を行い、実システムにおいても今回シミュレーションで示したのと同様に安定した制御を行えることを確認しているが、これについては機会を改め報告する。

## 6. おわりに

先に提案し、列車自動運転への実用化を進めている予見 Fuzzy 制御方式を、従来の制御方式では実用化が困難であったコンテナ・クレーンの運転へ適用し計算機シミュレーションを行った。その結果、本方式の採用により非熟練者でも行き先を指定し、出発ボタンを押し、停止後コンテナを下ろすだけで熟練者の運転を模擬した高効率な荷役作業が行え実用化方式として有効であることを確認した。

終りに、本研究の機会を与えてくださった(株)日立製作所システム開発研究所川崎淳所長、コンテナ・クレーン運転への Fuzzy 制御適用をご示唆いただいた同研究所井原廣一副所長、ならびに、ご討論いただいた同第 1 部春名公一部長、宮本捷二主任研究員 (現在、(株)日立製作所研究開発部)、松本邦顕主任研究員、同笠戸工場流通産業プラント設計部鍋島康夫部長をはじめとする関係者の方々に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) L. A. Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-3-1**, 28/44 (1973)
- 2) 菅野: あいまい集合と論理の制御への応用, 計測と制御, **18-2**, 150/160 (1979)
- 3) E. A. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, **121-12**, 1585/1588 (1974)
- 4) L. P. Holmblad and J. J. Ostergaard: Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, Fuzzy Information and Decision Processes (M. M. Gupta and E. Sanchez eds.), 389/399, North-Holland Company (1982)
- 5) 柳下, 伊藤, 菅野: ファジィ理論の浄水場薬品注入制御



- への応用, システムと制御, 28-10, 597/604 (1984)
- 6) 前田, 村上: Fuzzy Logic コントロールによる自動車の速度制御, 計測自動制御学会論文集, 21-9, 984/989 (1985)
  - 7) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 理論による列車自動運転制御, 第 20 回 SICE 学術講演会予稿集, 467/468 (1981)
  - 8) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 制御による列車位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, 19-11, 873/880 (1983)
  - 9) 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, 605/613 (1984)
  - 10) 安信, 宮本: 人間の制御戦略に基づく汎用予見 Fuzzy 制御コントローラの提案, 第 3 回知識工学シンポジウム資料, 127/132 (1985)
  - 11) S. Yasunobu and S. Miyamoto: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control, Industrial Applications of Fuzzy Control (M. Sugeno ed.), 1/18, North-Holland (1985)
  - 12) 北森: クレーンの最適運転法, 第 3 回 SICE 学術講演会予稿集, 347/348 (1964)
  - 13) 美多, 金井: トロリーの最大速度に注目したクレーンの最適運転法, 計測自動制御学会論文集, 15-6, 833/838 (1979)
  - 14) 児新: ヤード用天井クレーンの振れ止め制御システム, 第 22 回 SICE 学術講演会予稿集, 533/534 (1983)
  - 15) 森下: 走行クレーン運転自動化のための振れ止め制御—時間軸逆転フィードバック制御方式—, 計測自動制御学会論文集, 14-6, 739/744 (1978)
  - 16) 進藤, 孫, 坂和: コンテナクレーンの振れ止め制御, 計測自動制御学会論文集, 19-5, 430/432 (1983)
  - 17) Y. Sakawa and Y. Shindo: Optimal Control of Container Crane, Automatica, 18-3, 257/266 (1982)