

# 移動式起重機過負荷系統之模糊控制器研究

## Study of Fuzzy Logic Controller of Over-load System of Mobile Crane

計畫編號：NSC-88-2213-E-032-026

執行期限：87/0801~88/07/31

計畫主持人：楊智旭 淡江大學機械工程研究所 副教授

工業的發展快速，移動式起重機應用範圍也愈來愈廣泛，但隨著其使用的普及，常傳出移動式起重機所造成的意外災害，所以在操作移動式起重機需非常謹慎小心，過負荷預防裝置是為防止起重機承受之負荷超過額定荷重，發生起重機破壞或翻覆的情形，而預防的方法主要藉由各種感測裝置檢測各自由度物理量，再經由演算器進行計算，判斷及控制。本研究的重點就是利用模糊控制法則，配合自行推導的過負荷傾覆力學模式來解決多自由度耦合問題，針對移動式起重機的過負荷預防裝置做一個最佳化的控制設計，並配合比例閥對起重機油量的調節，當作業發生危險時適當的選擇對三個操作變數( $L$ :伸臂長度,  $\theta$ :伸臂仰角角度,  $\phi$ :旋轉角度)作速度上的調整，避免過負荷意外發生。

This research is to study and improve an over load sensing system of truck cranes by using fuzzy control theorem and over load dynamic equation. This research will be focused on design and improve the desired over load sensing devices under the consideration of security. The most important work of this research will emphasize on the of coupling problems between arm length, raise angle and rotation angle of the truck cranes in order to avoid dangerous situation caused by over-load.

### 1. 計畫緣由與目的

在產業機械中起重機、天車、推高機、挖土機常被使用，也最為常見。由於移動式起重機被列為危險性機械，因此在操作移動式起重機需非常謹慎，所以其安全預警裝置及控制器就更為重要了。因為施工的環境通常比較複雜，而且現場產生的突發事件也無法預知，所以對不可預測的危險情況進行預防措施是保護操作者及周遭工作人員最佳的方式。根據研究調查的結果發現目前國內絕大部份的警報和預防裝置大部分皆依賴國外進口，價格昂貴，故本研究主要以移動式起重機 (Truck crane) 為對象，對過負荷問題提出新的解決的方法。

1.1 在理論方程式部分，推導採用含有傾斜角的動態方程式，並加上起重機兩旁共四個支撐架，使其更切合實際現場情況，提高危險程度 (因子) 的估測，同時將水平傾斜角、四個支撐架的延伸距離作為控制參數 (Control parameters)，建立數學理論模型。

1.2 在控制部分，因為起重機的操作控制變數實際上是

由  $L$ 、 $\theta$ 、 $\phi$  ( $L$ :伸臂長度,  $\theta$ :伸臂仰角角度,  $\phi$ :旋轉角度) 所組成，故熟練的工作人員操作起重機，憑藉其工作經驗，往往會同時改變任意兩個的控制變數 (Multi-degree of freedom problems)，可能是同時操作 ( $L$ 、 $\theta$ )，或者是三個變數同時操作 ( $L$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ )，情況不一定。本研究的目的是將運用模糊控制理論，設計一個控制器，用來解決各種耦合的問題。

### 2. 起重機力矩模式理論的建立

將起重機上視圖依伸臂旋轉軸及支撐點區分為 I ~ IV 區。參圖(1)，其中 I 區為兩前支撐架及旋轉軸連線的區域；II 區為兩左側支撐架及旋轉軸連線的區域；III 區為兩後支撐架及旋轉軸連線的區域；IV 區為兩右側旋轉軸連線的區域。並假設路面的傾斜程度不會太大，如此伸臂在某區域時，車輛只會朝此區傾倒，而不會倒向其他區。例如伸臂在 I 區時，車輛只會發生前傾的狀況。

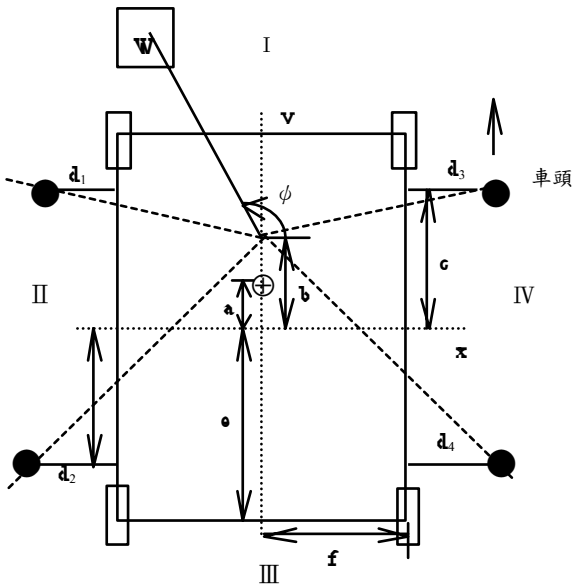


圖 1 起重機之上視圖

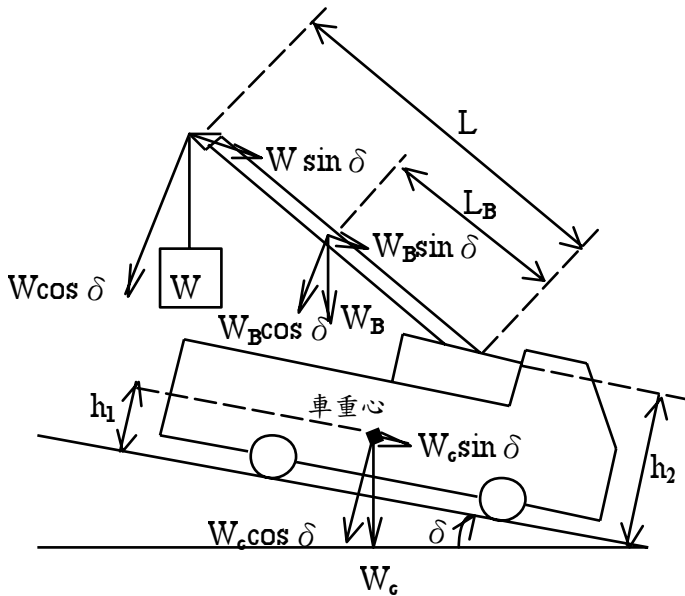


圖 2 斜面上車輛的分力示意圖

圖 1、2 中各參數的說明如下：

- x：車輪連線形成之長方形的長邊對稱軸
- y：車輪連線形成之長方形的寬邊對稱軸
- a：車重心到 x 軸的距離
- b：伸臂旋轉軸到 x 軸的距離
- c：支撐架到 x 軸的距離
- d<sub>1</sub>：左上支撐架伸出之長度
- d<sub>2</sub>：左下支撐架伸出之長度
- d<sub>3</sub>：右上支撐架伸出之長度
- d<sub>4</sub>：右下支撐架伸出之長度
- e：前輪到後輪的距離之半
- f：兩前輪或兩後輪的距離之半
- phi：伸臂旋轉的角度（以車的正右方為零點）
- L：長度感測器測到的伸臂長度值
- h<sub>1</sub>：車重心到地面的距離
- L<sub>B</sub>：伸臂重心到旋轉軸之距離

theta：伸臂的俯仰角

h<sub>2</sub>：伸臂與旋轉軸交點到地面的距離

alpha：X 軸向傾斜度

beta：Y 軸向傾斜度

W<sub>c</sub>cos delta：車重（不含伸臂重量）垂直地面的分力

W<sub>c</sub>sin delta：車重指向 gamma 方向且與地面平行的分力

Wcos delta：吊重垂直地面的分力

Wsin delta：吊重指向 gamma 方向且與地面平行的分力

W<sub>B</sub>cos delta：伸臂總重垂直地面的分力

W<sub>B</sub>sin delta：伸臂總重指向 gamma 方向且與地面平行的分力

四種不同情況的力矩公式計算如下所示：

I：車輛往前傾的狀況

$$\tan^{-1}\left(\frac{c-b}{d_3+f}\right) \leq \phi \leq \pi - \tan^{-1}\left(\frac{c-b}{d_1+f}\right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{穩定力矩 } T_s = W_c(\cos \delta)(c-a) \dots \dots \dots (2)$$

傾覆力矩：

$$\begin{aligned} T_u = & W_c(\sin \delta)(\sin \gamma)h_1 \\ & + W(\cos \delta)[L(\cos \theta)(\sin \phi) \cdot c + b] \\ & + W(\sin \delta)(\sin \gamma)[L(\sin \theta) + h_2] \\ & + W_B(\cos \delta)[L_B(\cos \theta)(\sin \phi) \cdot c + b] \\ & + W_B(\sin \delta)(\sin \gamma)[L_B(\sin \theta) + h_2] \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

II：車輛往左傾的狀況

$$\pi - \tan^{-1}\left(\frac{c-b}{d_1+f}\right) < \phi < \pi + \tan^{-1}\left(\frac{b+c}{d_2+f}\right) \dots \dots \dots (4)$$

$$T_s = W_c(\cos \delta) \sqrt{(d_1+f)^2 + (c-a)^2} \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_1+f}{c-a}\right) \right] \dots \dots (5)$$

$$\begin{aligned} T_u = & W_c \sin \delta \cos \left[ \gamma - \pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) \right] h_1 \\ & + W \cos \delta (L \cos \theta \cos \left[ \phi - \pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) \right] \\ & - \sqrt{(d_1+f)^2 + (c-b)^2} \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_1+f}{c-b}\right) \right]) \\ & + W \sin \delta \cos \left[ \gamma - \pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) \right] (L \sin \theta + h_2) + W_B \cos \delta \\ & (L_B \cos \theta \cos \left[ \phi - \pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) \right] - \sqrt{(d_1+f)^2 + (c-b)^2} \\ & \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_1+f}{c-b}\right) \right]) \\ & + W_B \sin \delta \cos \left[ \gamma - \pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_1-d_2}{2c}\right) \right] (L_B \sin \theta + h_2) \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

III：車輛往後傾的狀況

$$\pi + \tan^{-1}\left(\frac{b+c}{d_2+f}\right) \leq \phi \leq 2\pi - \tan^{-1}\left(\frac{b+c}{d_4+f}\right) \dots\dots\dots(7)$$

$$T_s = W_c(\cos \delta)(c + a) \dots\dots\dots(8)$$

$$T_u = W_c(\sin \delta)(-\sin \gamma)h_1 + W(\cos \delta)[L(\cos \theta)(-\sin \phi) - c - b] + W(\sin \delta)(-\sin \gamma)[L(\sin \theta) + h_2] + W_B(\cos \delta)[L_B(\cos \theta)(-\sin \phi) - c + b] + W_B(\sin \delta)(-\sin \gamma)[L_B(\sin \theta) + h_2] \dots\dots\dots(9)$$

IV：車輛往右傾的狀況

$$2\pi - \tan^{-1}\left(\frac{b+c}{d_4+f}\right) < \phi < 2\pi \quad \text{或} \quad 0 \leq \phi < \tan^{-1}\left(\frac{c-b}{d_3+f}\right) \dots\dots(10)$$

$$T_u = W_c(\cos \delta) \sqrt{(d_3+f)^2 + (c-a)^2} \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_3+f}{c-a}\right) \right] \dots\dots\dots(11)$$

$$T_u = W_c \sin \delta \cos \left[ \gamma - \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) \right] h_1 + W \cos \delta [L \cos \theta \cos \left[ \phi - \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) \right] - \sqrt{(d_3+f)^2 + (c-b)^2} \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_3+f}{c-b}\right) \right]] + W \sin \delta \cos \left[ \gamma - \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) \right] (L \sin \theta + h_2) + W_B \cos \delta [L_B \cos \theta \cos \left[ \phi - \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) \right] - \sqrt{(d_3+f)^2 + (c-b)^2} \sin \left[ \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_3+f}{c-b}\right) \right]] + W_B \sin \delta \cos \left[ \gamma - \tan^{-1}\left(\frac{d_3-d_4}{2c}\right) \right] (L_B \sin \theta + h_2) \dots\dots\dots(12)$$

依上述的四種不同狀況求穩定力矩及傾覆力矩，定義危險因子 R 及旋轉角危險因子 S(φ) 用來判斷起重機是否處於安全狀態。

### 2.1 危險因子(R)

$$R(W, \theta, L, \phi, \alpha, \beta, d_1, d_2, d_3, d_4) = (T_u / T_s) \times 100\% \dots\dots(13)$$

θ, L, φ 為操作三變數, W, α, β, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>, d<sub>4</sub> 為操作參數由危險因子的定義可知：

- 當 R < 1 時起重機為安全狀態
- R = 1 時起重機處於臨界狀況
- R > 1 時起重機發生傾覆。

假如 T<sub>u</sub> ≤ 0 則 R = 0 起重機為安全狀態

### 2.2 旋轉角危險因子

為了建立水平旋轉角的模糊歸屬函數，則自行定義旋轉角危險因子 S(φ)：

$$S(\phi) = S(\phi, d_1, d_2, d_3, d_4) \dots\dots(14)$$

如果 S(φ) 愈大則由旋轉角所造成的危險愈大，故旋轉角危險因子主要探討在不同支撐架延伸長度時，旋轉角度(φ) 對起重機所造成的危險程度分析。

### 3. 模糊控制器的設計架構及目的

此模糊控制器的架構視為多輸入多輸出(MIMO)型，它是直接將所有變數及參數丟進一個控制系統，直接經由一個模糊控制器作為起重機操作三變數(L、θ、φ)的控制，方塊示意圖(Black Diagram)如圖 2 所示：

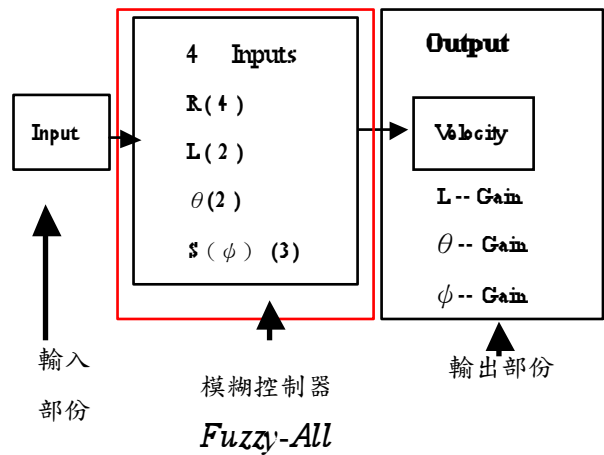


圖 3 整合型模糊控制器(Fuzzy-All)細部架構示意圖

在圖 3 中整合型模糊控制器(Fuzzy-All)中的控制行為是利用輸入變數(R、L、θ、S(φ))與輸出變數(VL-gain, Vθ-gain, Vφ-gain)通過控制法則以其達到下列特性：

#### a. 隨危險度增加而 L、θ、φ 速度漸減

在傳統電磁閥的限制，及過去以開關切斷(Switch On / Off) 電源的作法，往往造成運作中的機構突然停止作動，致使機構的損耗及人員的危險，而 R 值設明確設定，更顯的設計不夠周詳，如 R 設定太小而切斷電源，雖然安全性考量，但卻失去工作的範圍，若 R 值設定太大，而切斷電源，卻又因顧安全性，而此控制方法提供了一個另類的中庸考量，兼顧安全性及工作範圍的裕度。

#### b. 去耦合性

使長度變數(L)、仰俯角變數(θ)和旋轉角

變數 ( $\phi$ ) 具獨立性，在多維度的操作習慣下，使在安全性的考量及不縮小工作範圍情況下，實難以取捨，在過去的控制以各維度給予相同的遞減工作速度，甚至於同時切斷電源 (Switch Off) 在能隨 R (危險因子) 的遞增情況下能將速度漸漸減緩外，也能使變數 L (伸臂長)、 $\theta$  (仰俯角) 和  $\phi$  (旋轉角) 有不同的增減曲線，而非一味的減低速度，若非造成 R 增加的因素，更不予以減低速度。

#### 4. 研究方法與成果(電腦模擬)

##### 4.1 Fuzzy-All 控制器歸屬函數(Member Function)設計示意圖如下所示:

計示意圖如下所示:

**Inputs** 變數如下 : (參圖 4)

**Rate (4)** 表示危險的程度 (危險因子)

Safe 安全區域 (表示所在區域安全)

D1: Danger Level 1 (所在區域稍危險)

D2: Danger Level 2 (所在區域危險)

D3: Danger Level 3 (所在區域非常危險)

**Length (2)** 表示伸臂長短的關係

Short 伸臂長度較短時(表所在長度短)

Long 伸臂長度較長時(表所在長度長)

**Angle (2)** 表示仰角角度大小的關係

Small 表示仰角角度為小的範圍

Big 表示仰角角度為大的範圍

**PhiRate (3)** 表示旋轉角所造成的危險程度關係 (旋轉角危險因子  $S(\phi)$ )

轉角危險因子  $S(\phi)$

Small : 旋轉角度造成的危險程度較小

Mid : 旋轉角度造成的危險程度中等

Big : 旋轉角度造成的危險程度較大

**Outputs** 變數如下 : (參圖 4)

**VLgain** 表示輸出長度速度的增益值

LA: Length Level A (表示輸出長度增益等級為 A)

LB: Length Level B (表示輸出長度增益等級為 B)

LC: Length Level C (表示輸出長度增益等級為 C)

LD: Length Level D (表示輸出長度增益等級為 D)

LE: Length Level E (表示輸出長度增益等級為 E)

**V $\theta$  gain (VTHgain)** 表示輸出仰角速度的增益值

LA: Length Level A (表示輸出仰角增益等級 A)

LB: Length Level B (表示輸出仰角增益等級為 B)

LC: Length Level C (表示輸出仰角增益等級為 C)

LD: Length Level D (表示輸出仰角增益等級為 D)

LE: Length Level E (表示輸出仰角增益等級為 E)

**V $\phi$  gain (VPHgain)** 表示輸出旋轉角速度的增益值

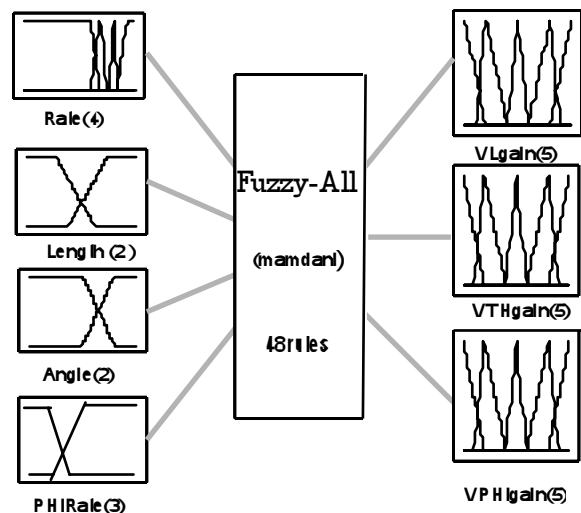
PHA: Rotation Angle Level A

PHB: Rotation Angle Level B

PHC: Rotation Angle Level C

PHD: Rotation Angle Level D

PHE: Rotation Angle Level E



System fuzzy: 4Inputs, 3outputs, 48rules

圖 4 模糊控制器 (Fuzzy-All) 輸出入歸屬函數示意圖

##### 4.2 模擬結果 :

下圖 5 ~ 9 對整體系統作綜合的模擬，輸入訊號以模擬實際情況，參數設定有荷重 ( $W$ )、傾斜角 ( $\alpha$ ,  $\beta$ )、支撐架 ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ )，變數有長度 ( $L$ )、仰角 ( $\theta$ )、水平旋轉角 ( $\phi$ )，長度範圍 [0 104] cm，仰角為 [0 51] degree，水平旋轉角為 [0 360] degree，而各項參數設定荷重 ( $W=300kgw$ )，傾斜角 ( $\alpha=\beta=0$  degree)，左右支撐架 ( $d_1=10, d_2=10, d_3=10, d_4=10$  cm)

## 5. 結論與討論

本研究只限於在電腦上的模擬，而由圖 5 ~ 9 可看出模糊控制器 (Fuzzy-All) 可達到預期的輸出結果，不但可以解決伸臂長度、仰角、旋轉角的耦合問題，並且可以隨著危險程度的增加，而使輸出速度減慢。並且在輸出增益部分，長度、仰角角度、旋轉角角度比例值，最大值介於 0.95~0.85 左右，而最小輸出值則在 0.1~0.2 左右，雖然，仍未達理想的輸出範圍 [0 1] 之間，但基於安全理由，保留合適的區間是項合理且可接受的設計。故由此結果可知，未來如果配合 Turbo C 語言的撰寫，並燒錄於單晶片中，在結合周邊硬體的設備 (AD/DA 卡及比例閥)，則有朝一日可將整個控制系統模組化並應用於工業界。

### 參考文獻

- [1] 模糊控制系統於移動式起重機過負荷預防裝置之應用，洪聲仰，民國 87 年 7 月。
- [2] 移動式起重機過負荷感測裝置之設計改進研究 (Design and improvement of over-loading sensing devices of truck cranes)，塗劍峰 編著，淡江機械所，民國 87 年 7 月。
- [3] Fuzzy 手法進階，向殿政男 著，中國生產力中心，技術引進服務組 編譯，楊英魁博士 校閱，民國 82 年 8 月。
- [4] Fuzzy 控制理論與實作應用，孫宗瀛 楊英魁 編著，全華科技公司，民國 82 年 7 月。
- [5] Fuzzy 理論與應用實務，中國生產力中心，技術引進服務組 編譯，楊英魁博士 校閱，全華科技

公司，民國 84 年 7 月。

- [6] Cveticanin, L., "Dynamic Behavior of the Lifting Crane Mechanism," Mechanism and Machine Theory, 1995, pp. 141-151.
- [7] Fukagawa, R. and Muro, T., "Analysis of Overtuning Conditions of Truck Cranes Considering Possible Ground Failure," Memories of the Faculty of Engineering, Ehime University, Vol. 14, 1995, pp. 175-182.

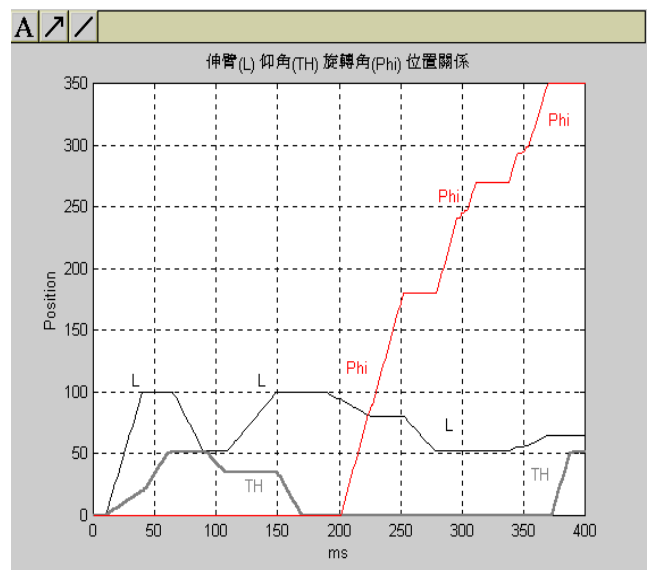


圖 5 模擬起重機操作人員操作三變數 ( $L$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ )

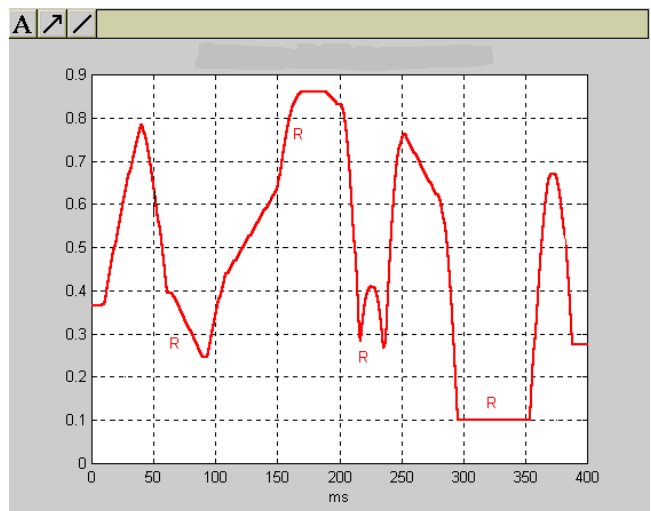


圖 6 危險程度隨時間變化關係圖

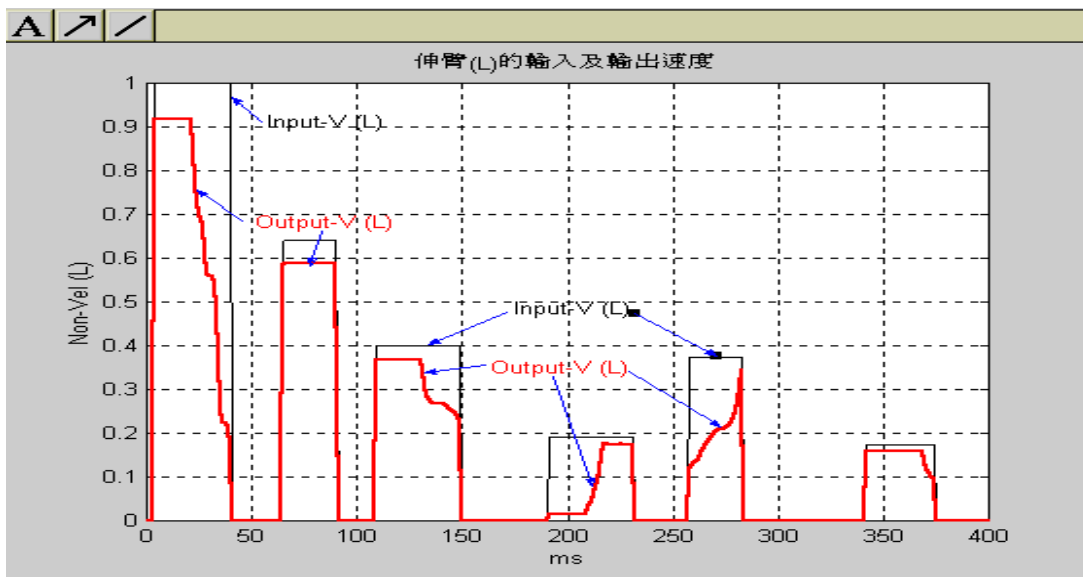


圖 7 Fuzzy-All 對伸臂(L)的速度控制結果

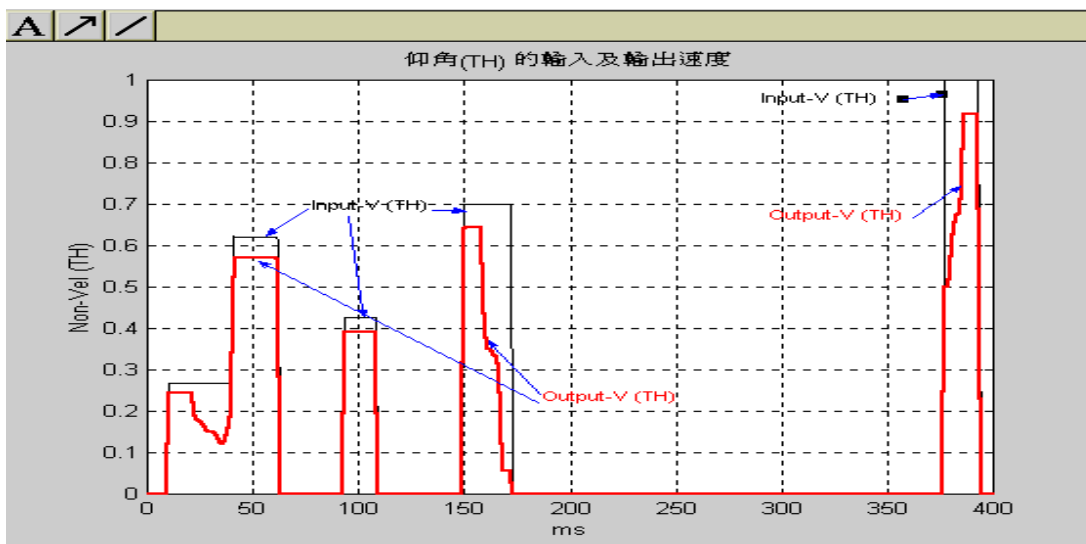


圖 8 Fuzzy-All 對仰角( $\theta$ )的速度控制結果

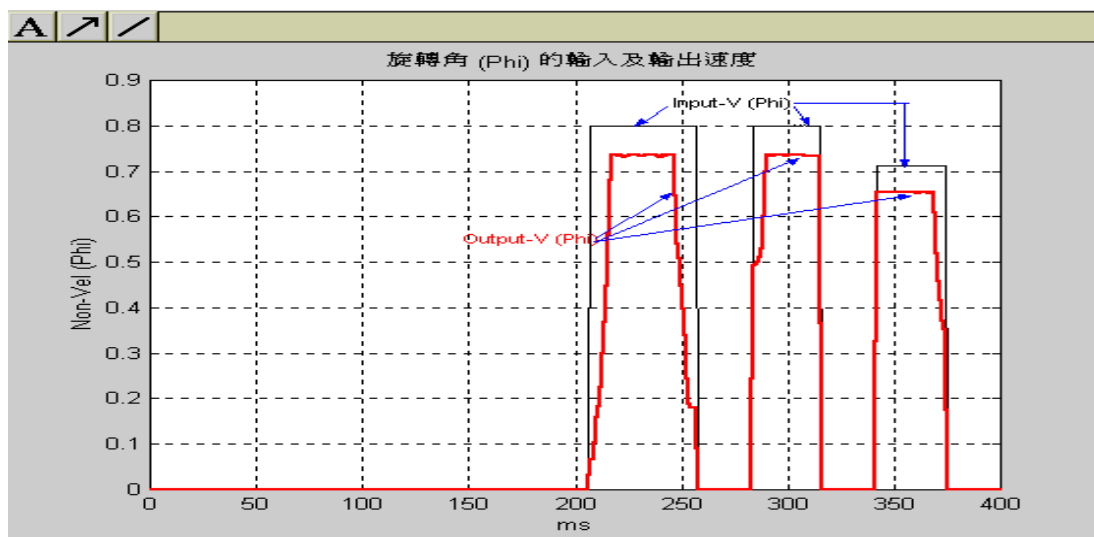


圖 9 Fuzzy-All 對旋轉角( $\phi$ )的速度控制結果