

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 基於慣性伺服與數位影像伺服系統之 PC-Based 高架型起重 機系的之模糊控制(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-164-003-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：修平技術學院電機工程系

計畫主持人：楊基鑫

共同主持人：陳杏圓

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 29 日

# 基於慣性伺服與數位影像伺服系統之 PC-Based 高架型起重機系統的模糊控制(I)

計畫編號：NSC 92-2213-E-164-003

修平技術學院電機工程系

助理教授 楊基鑫

## 中文摘要

本計畫主要探討高架型起重機系統的運動控制問題。本計畫延續國科會「補助技職校院發展應用性先期研究計畫」(計畫編號：NSC90-2626-E-164-001)所設計、開發與架構的機電整合系統—PC-Based 高架型起重機系統，作進一步的控制系統設計研究。本計畫硬體測試之軟體採用 Matlab + Simulink 圖形式的控制系統設計介面與開發環境，使整個系統在作實體測試能更快速且完整的達成。計畫進行方式如下，首先根據高架型起重機系統的模型設計運動回授控制系統，並作模擬測試，然後再作硬體測試與驗證。然後再根據同一個模型結合 Fuzzy 控制律，設計運動模糊控制系統，並作模擬與實體測試，最後比較兩種設計方法的結果，根據實驗結果可知採用模糊控制器的控制系統對高架型起重機系統的運動有較佳的控制性能。

## 英文摘要

A fuzzy logic and classical control laws of a PC-based overhead crane system are investigated in this project. Based on the model of a three-dimensional overhead crane system, a feedback motion control law and a fuzzy logic motion control rule are designed. Hard-ward-in-the-loop implements for the developed feedback and fuzzy motion control laws are testing by the PC-based overhead crane control system, a real-time simulating developed environment, which has been setup by the previous project (NSC90-2626-E-164-001). Experimental results are shown that performance of the fuzzy logic motion control system is better than one of the feedback motion control system.

## 前言

高架型起重機系統(Overhead Crane System)是一種廣泛應用於各類型工業之大型物體昇降與搬運的重要器械，例如港口輪船大型貨櫃之裝卸、鋼鐵工業使用之製造設備、環保工業中廢棄汽車與廢五金打碎分類設備及航空公司大型民航機維修時機體之懸吊...等等，這類大型機械設備元件之製造與維修，都需要藉由高架型起重機系統將重機械之元件體作適當的懸吊及搬運，以利人員進行製造、組裝、維修及裝載等工作。基於安全因素之考量，高架型起重機系統於搬運期間需將大型物體升舉到安全的高度，以避免碰撞到任何物體，且當物體搬運期間需要保持懸吊鋼繩為固定的長度或僅能有微小的變化，以防止懸吊物在搬運期間產生自旋，造成懸吊鋼繩斷裂等意外。另外基於工作效率的考量，也希望物體有較快且較合理搬運的時間，因此如何設計一個高架型起重機的運動控制系統滿足以上的實際需求，即為本計畫所要研究討論的主題。本計畫延續國科會「補助技職校院發展應用性先期研究計畫」(計畫編號：NSC90-2626-E-164-001)所設計、開發與架構的機電整合系統—PC-Based 高架型起重機系統，作進一步的控制系統設計研究。進行的方式是依據高架型起重機系統的模型各設計一種運動回授控制系統與運動模糊控制系統，並作模擬測試，然後再作硬體測試與驗證。

## 研究目的與文獻探討

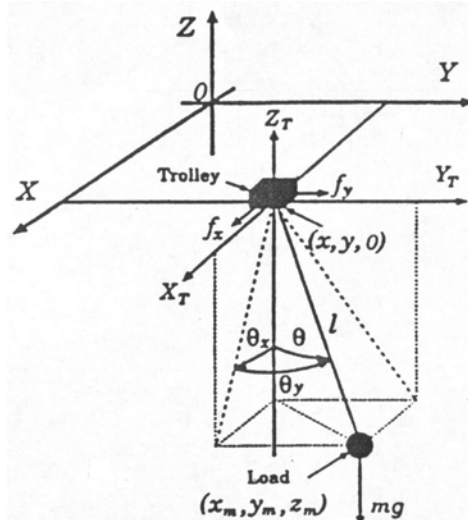
高架型起重機系統的一般構造通常包括兩個互相垂直的運動軸，移動的天車(crane)放置於其中的一個單軸作直線運動，包含天車的運動軸則建置另一個單軸上，可作垂直於原單軸方向的直線運動，而重物則懸吊於天車之下。重物的運動是透過高架型起重機上方天車的移動，再藉由懸吊繩索的帶動來完成，因此重物搬運的過程是在三維空間中運動。在整個系統運動的過程中，最重要的運動特徵就是懸吊的重物會產生自旋運動，此通常是造成意外的主因。一般的解決方式是藉由控制系統適當地控制天車的移動與繩索的長度來抑制此現象。因此依據實際應用的考量，吾人可以歸納出高架型起重機控制系統包括以下三個研究主題：運動控制(Motion Control)，即起重機位置、速度及加速度之控制。載重物之舉起控制(Load Hoisting)，藉由起重馬達來調整物體高度，以防止與物體運動時發生碰撞。懸吊載重物自旋之抑制(Load Swing Suppression)，抑制物體搬運動過程所產生的自旋運動，防止旋吊鋼索因自旋而斷裂。

高架型起重機系統動態模型非線性程度較高，因此通常將問題作簡化以便於作進一步的討論，文獻上通常假設懸吊物僅在一個固定平面運動，亦即是天車運動限定在一個單軸，也就是二維的高架型起重機模型，這方面的討論已有相當多的成果[2,6,9,11,12,14]。依實際考量，直接根據三維的高架型起重機模型探討運動控制問題是很必然的想法，不過也由於較複雜的動態特性，其困難度也較高，文獻上有關三維度高架型起重機系統的運動控制探討如文獻所示[1,3,4,5,7,8,10,13]。

文獻上對於高架型起重機運動控制問題的探討所採用的方法有很多種，文獻[2,4,7,8,9,12]主要採用一般的回授控制法，最佳化控制與非線性控制法則愛這方面的應用亦有相關的結果[1,10]。由於系統動態複雜，模糊控制法則是一種很適當的方式，文獻[3,4,6,14]即是利用模糊邏輯的輔助來做控制系統的設計。由於系統運作有相當多的不確定性，例如天車的滑動，繩索長度的變化較大等，部分文獻亦將系統強健性考慮在控制器的設計步驟中[5,11,13,14]。

## 研究方法

本計畫所探討之高架型起重機系統(Overhead Crane System)的架構模型如圖一所示，其中XYZ代表固定座標系統， $X_T Y_T Z_T$ 代表天車之移動座標系統， $\theta$ 角代表載重物之搖擺角(swing angle)。另外 $\theta_x$ 角代表搖擺角 $\theta$ 在 $X_T Z_T$ 平面的投影角； $\theta_y$ 角代表搖擺角 $\theta$ 在 $Y_T Z_T$ 平面的投影角。



圖一、高架型起重機系統的架構模型

載重物在固定座標系統  $XYZ$  的座標可以表示如下：

$$\begin{aligned}x_m &= x + l \sin \theta_x \cos \theta_y \\y_m &= y + l \sin \theta_y \\z_m &= -l \cos \theta_x \cos \theta_y\end{aligned}\quad (1)$$

其中  $l$  代表載重繩索的長度。吾人可利用  $x, y, l, \theta_x, \theta_y$  作為廣義座標 (generalized coordinate)，得出天車與載重物之運動方程式。假設載重物為質點 (point mass)，而繩索為剛性，吾人可利用 Lagrange 能量法推求得天車與載重物之運動方程式如下：

$x$  方程式：

$$\begin{aligned}(M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}_x \cos \theta_x \cos \theta_y - ml\ddot{\theta}_y \sin \theta_x \sin \theta_y \\+ m\ddot{l} \sin \theta_x \cos \theta_y + D_x \dot{x} + 2ml\dot{\theta}_x \cos \theta_x \cos \theta_y \\- 2ml\dot{\theta}_y \sin \theta_x \sin \theta_y - ml\dot{\theta}_x^2 \sin \theta_x \cos \theta_y \\- 2ml\dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \cos \theta_x \sin \theta_y - ml\dot{\theta}_y^2 \sin \theta_x \cos \theta_y = f_x\end{aligned}\quad (2)$$

$\theta_x$  方程式：

$$\begin{aligned}ml^2\ddot{\theta}_x \cos^2 \theta_y + ml\ddot{x} \cos \theta_x \cos \theta_y + 2ml \cdot \dot{l} \dot{\theta}_x \cos^2 \theta_y \\- 2ml^2\dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \sin \theta_y \cos \theta_y + mgl \sin \theta_x \cos \theta_y = 0\end{aligned}\quad (3)$$

$y$  方程式：

$$\begin{aligned}(M_y + m)\ddot{y} + ml\ddot{\theta}_y \cos \theta_y + m\ddot{l} \sin \theta_y + D_y \dot{y} \\+ 2ml\dot{\theta}_y \cos \theta_y - ml\dot{\theta}_y^2 \sin \theta_y = f_y\end{aligned}\quad (4)$$

$\theta_y$  方程式：

$$\begin{aligned}ml^2\ddot{\theta}_y + ml\ddot{y} \cos \theta_y - ml\ddot{x} \sin \theta_x \sin \theta_y + 2ml\dot{l} \dot{\theta}_y \\+ ml^2\dot{\theta}_x^2 \cos \theta_y \sin \theta_y + mgl \cos \theta_x \sin \theta_y = 0\end{aligned}\quad (5)$$

$l$  方程式：

$$\begin{aligned}(M_l + m)\ddot{l} + m\ddot{x} \sin \theta_x \cos \theta_y + m\ddot{y} \sin \theta_y + D_l \dot{l} \\- ml\dot{\theta}_x^2 \cos^2 \theta_y - ml\dot{\theta}_y^2 \sin^2 \theta_y - mg \cos \theta_x \cos \theta_y = f_l\end{aligned}\quad (6)$$

其中  $M_x, M_y, M_l$  分別代表天車與傳動馬達等元件在  $x, y, l$  方向之等效質量， $D_x, D_y, D_l$  分別代表  $x, y, l$  方向之阻尼係數，而  $m, v_m$  則分別為載重物之質量與運動速率， $g$  則代表重力加速度。當  $\dot{y} = \ddot{y} = \dot{\theta}_y = \ddot{\theta}_y = 0$  或  $\dot{x} = \ddot{x} = \dot{\theta}_x = \ddot{\theta}_x = 0$  時，以上運動方程式，簡化成單軌道高架型起重機系統之運動方程式。

由於高架型起重機系統運行速度在考量安全的前提之下，通常不會運行的很快，而且載重物的搖擺角太大也可能造成繩索斷裂。基於以上的考量，高架型起重機系統應該在以下所列之工作範圍運作，以便能有安全方面的保證。

$$\begin{aligned}|\ddot{x}| \ll g, |\ddot{y}| \ll g, |\ddot{l}| \ll g, |\dot{l}| \ll l, |l\ddot{\theta}_x| \ll g, |l\ddot{\theta}_y| \ll g \\|\theta_x| \ll 1, |\theta_y| \ll 1, |\dot{\theta}_x| \ll 1, |\dot{\theta}_y| \ll 1 \\ \sin \theta_x \cong \theta_x, \cos \theta_x \cong 1, \sin \theta_y \cong \theta_y, \cos \theta_y \cong 1\end{aligned}$$

因此根據以上的假設，非線性運動方程式(2)至(6)可轉換成線性化之運動方程式。

$x$  方程式：

$$(M_x + m)\ddot{x} + D_x \dot{x} + ml\ddot{\theta}_x = f_x \quad (7)$$

$\theta_x$  方程式：

$$l\ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g\theta_x = 0 \quad (8)$$

$y$  方程式：

$$(M_y + m)\ddot{y} + D_y\dot{y} + ml\ddot{\theta}_y = f_y \quad (9)$$

$\theta_y$  方程式：

$$l\ddot{\theta}_y + \ddot{y} + g\theta_y = 0 \quad (10)$$

$l$  方程式：

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l\dot{l} - mg = f_l \quad (11)$$

上述方程式(7)至(11)中，(7)及(8)式代表縱向(travel)之運動方程式，(9)及(10)式代表橫向(traverse)之運動方程式，(11)式則代表載重物上下(load hoisting)之運動方程式。從上述方程式，吾人可以很容易得知縱向與橫向的動態方程式與載重物上下之運動方程式彼此是互相獨立的，也就是說吾人可以針對個別的動態(縱向、橫向與載重物上下)來設計控制器，而無須考慮動態耦合(dynamic coupling)的問題。

### 甲、高架型起重機系統運動回授控制器設計

以下吾人將利用方程式(7)至(11)來設計三維高架型起重機系統的運動控制器，因為縱向與橫向的動態方程式與載重物上下之運動方程式彼此是互相獨立的，所以可分針對縱向、橫向與載重物上下等三個動態做控制器設計。

(一)速度回授控制器的設計：

考慮  $x$  方程式(7)中，因為驅動力  $f_x$  一般由馬達產生扭矩來提供，因此假設驅動力  $f_x$  與扭矩  $u_t$  成正比： $f_x = K_s u_t$ ，其中  $K_s$  為比例常數。因此方程式(2)及(3)可以進一步化簡成：

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} - mg\theta_x = K_s u_t \quad (12)$$

$$l\ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g\theta_x = 0 \quad (13)$$

吾人進一步設計馬達扭矩  $u_t$  採行以下控制律：

$$u_t = u - \frac{mg\theta_x}{K_s} \quad (14)$$

以便補償方程式(12)中的耦和項  $mg\theta_x$ 。因此馬達扭矩  $u_t$  採行如方程式(14)所示之控制律，三維高架型起重機系統的  $x$  軸運動方程式便可化簡成：

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} = K_s u \quad (15)$$

此處  $u$  為新的控制變數， $\theta_x$  角代表搖擺角  $\theta$  在  $X_T Z_T$  平面的投影角，此系統狀態須被量測得到。一般文獻上所探討的是二維的天車控制系統，也就是說繩索的搖擺角運動限定在一個平面中，因此實驗上可利用角度感測器量測得到。但是在本計畫所討論的三維高架型天車系統繩索的搖擺角  $\theta$  實際上是在三維空間做作搖擺運動，如圖一所示，量測上有實際的困難。為克服此問題，本計畫參考文獻[2,12]所提及之天車系統狀態估測器設計方法，以狀態估測的方式估測搖擺角  $\theta$ 。

根據系統線性化方程式可知縱向與橫向的動態方程式彼此是互相獨立的，因此繩索的搖擺角  $\theta$  在  $X_T Z_T$  平面的投影角  $\theta_x$  角的估測器設計可根據方程式(13)。對方程式(13)取 Laplace 轉換，可以得到載重物搖擺角  $\theta$  在  $X_T Z_T$  平面的投影角  $\theta_x$  與天車  $x$  軸方向位置之間的轉移函數如下：

$$G_l(s) \equiv \frac{\Theta_x(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{ls^2 + g} \quad (16)$$

若假設繩索為剛性，即搖擺運動時繩索皆為繃緊狀態，則繩索的搖擺運動可視為單擺運動，因此上式可根據天車  $x$  軸方向準確的估測出搖擺角  $\theta_x$ 。

對(15)式取 Laplace 轉換，可將  $x$  方向的動態方程式化成如下之轉移函數：

$$G_t(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{K_s}{M_x s + D_x} \quad (17)$$

以下再進一步設計開迴路速度控制器如下式所示：

$$K_{vs}(s) = \frac{K_v}{K_s} \frac{M_x s + D_x}{s} \quad (18)$$

則整體回授系統閉迴路轉移函數可計算如下：

$$G_{vs}(s) \equiv \frac{V(s)}{V_r(s)} = \frac{K_v}{s + K_v} \quad (19)$$

(二)位置回授控制器的設計：

速度回授系統設計後，吾人以下將進一步設計位置回授控制器。此處所採行的手法是先依據系統的要求性能，求出相對應的開迴路位置系統轉移函數，然後再反推求出位置回授控制器。除利用代數方式設計外，為使位置回授控制器設計過程簡化，亦可以使用迴路整形法(loop shaping method)，此處先採行代數設計法。吾人希望位置回授控制器採行比例積分方式，並假設開迴路位置系統為下式所示之轉移函數：

$$G_{xo}(s) = \frac{s + \frac{K_I}{K_p}}{s} \cdot \frac{K_p}{s} \cdot \frac{K_v}{s + K_v} \quad (20)$$

則位置回授控制器  $K_{xs}(s)$  經計算即可得到為比例積分型式的控制器： $K_{xs}(s) = \frac{K_p s + K_I}{s}$ 。整個位置回授控制系統閉迴路轉移函數可進一步得到如下：

$$G_{xs}(s) \equiv \frac{X(s)}{X_r(s)} = \frac{K_v (K_p s + K_I)}{s^3 + K_v s^2 + K_v K_p s + K_v K_I} \quad (21)$$

其中  $X_r, X$  分別代表位置參考輸入與位置伺服系統的位置輸出。

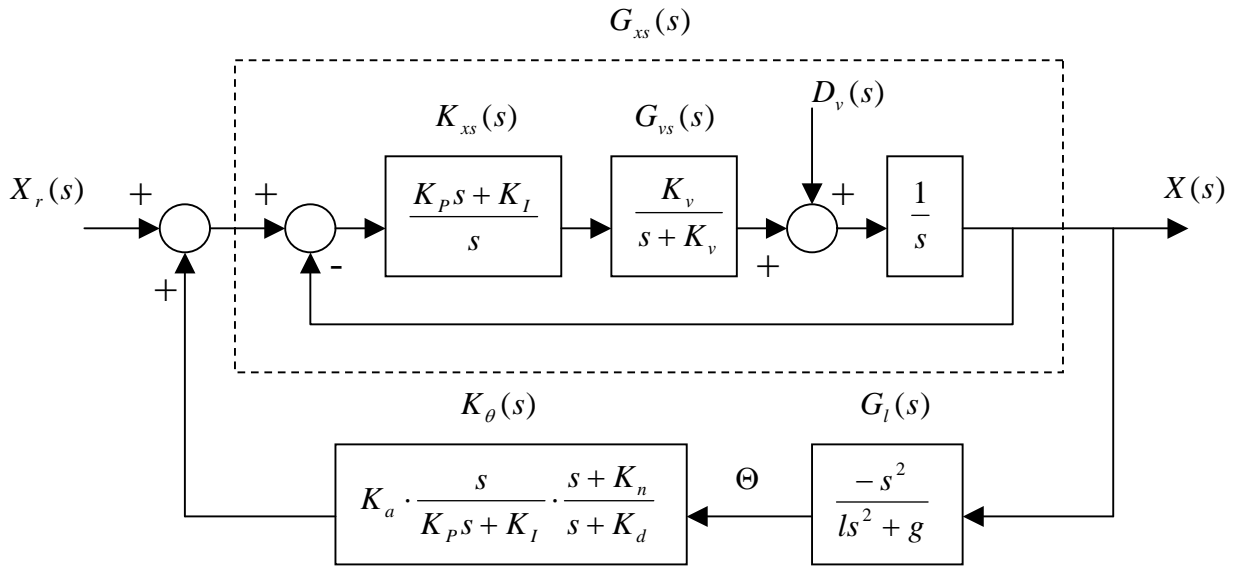
(三)整體系統回授控制器的設計：

完成速度與位置回授控制器的設計後，再進一步將載重物的搖擺效應引入到整體系統的回授控制設計。根據方程式(16)，吾人再設計一個搖擺效應控制器  $K_\theta(s)$ ，以便滿足整體系統之性能：

$$K_\theta(s) = K_a \cdot \frac{s + K_n}{s + K_d} \cdot \frac{s}{K_p s + K_I} \quad (22)$$

上式中  $K_a$  代表控制增益， $K_n, K_d$  則為常數。

經過前述三個設計步驟後，高架型起重機系統單軸方向的回授控制系統如圖二所示。



圖二、高架型起重機系統單軸方向回授控制系統

其中  $D_v(s)$  代表速度干擾信號，當起重機運動時發生滑動現象時，即將此視為速度干擾信號。

根據方程式(7)至(11)，吾人已經說明  $x$  方向與  $y$  方向的動態已經完全的解耦(decoupling)，因此  $y$  方向單軸系統整體控制器的設計可以根據  $x$  方向單軸系統整體控制器的設計步驟來進行，只需要將相關的控制增益及常數做適當的調整以符合性能要求即可。

#### (四)載重物繩索長度伺服控制器的設計

完成兩個單軸回授系統控制器的設計後，最後再針對載重物繩索長度控制器作設計。由方程式(11)，因此假設馬達控制繩索長短之驅動力  $f_l$  與扭矩  $u_{tl}$  成正比， $f_l = K_{sl} u_{tl}$ ，其中  $K_s$  為比例常數。因此(11)式可以進一步化簡成：

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l \dot{l} - mg = K_{sl} u_{tl} \quad (23)$$

如同前述單軸系統速度回授控制器之設計技巧，此處設計馬達扭矩  $u_{tl}$  採行以下控制律：

$$u_{tl} = u_l - \frac{mg}{K_{sl}} \quad (24)$$

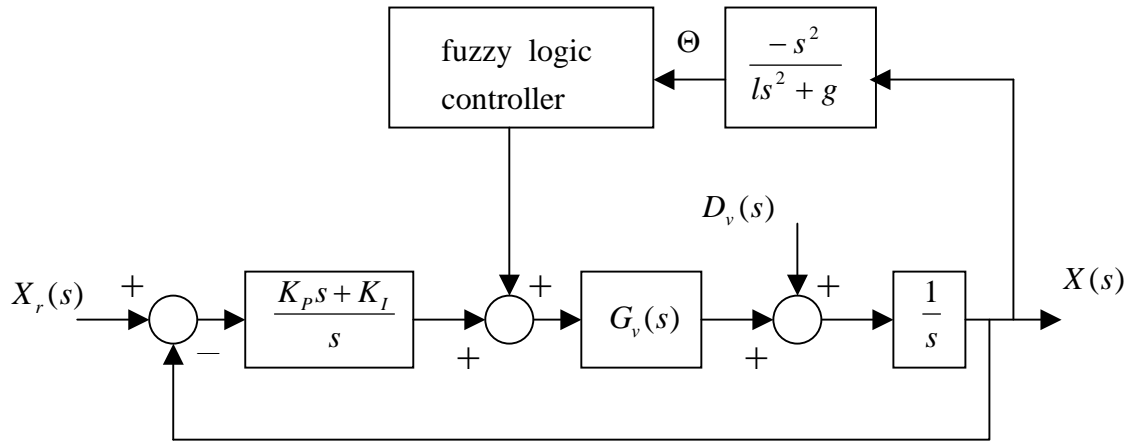
則載重物繩索長度控制系統可以表成： $(M_l + m)\ddot{l} + D_l \dot{l} = K_{sl} u_l$ ，進一步求出載重物繩索長度控制系統之轉移函數：

$$G_t(s) = \frac{L(s)}{U_l(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{sl}}{(M_l + m)s + D_l} \quad (25)$$

至此載重物繩索長度控制系統與前述方程式(15)所示  $x$  方向單軸系統速度回授系統形式相同，因此可以仿照前述速度回授系統的設計步驟來完成載重物繩索長度回授控制系統。

乙、高架型起重機系統運動模糊控制器設計

上述高架型起重機系統運動控制控制器設計步驟中，吾人先完成速度與位置回授控制器的設計後，再進一步將載重物的搖擺效應引入到整體系統的回授控制設計，設計結果如方程式(22)所示。此處引入模糊控制的觀念，重新設計搖擺效應控制器  $K_\theta(s)$ ，則本計畫所進行的高架型起重機運動模糊控制系統方塊圖如下圖三所示。

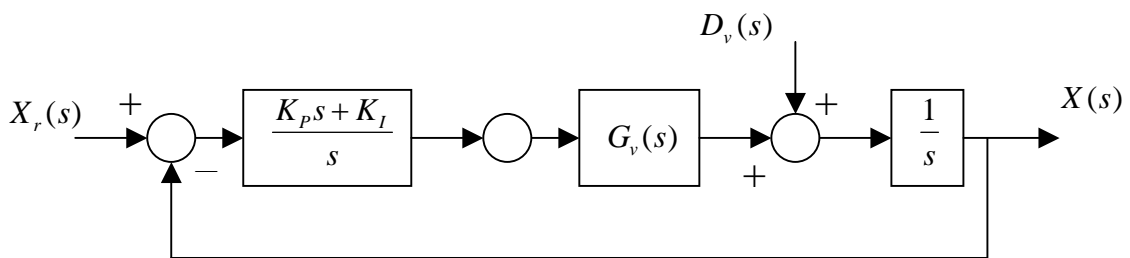


圖三、高架型起重機運動模糊控制系統

其中  $G_v(s)$  為高架型起重機系統  $x$  軸方向的轉移函數  $G_i(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{K_s}{M_x s + D_x}$  再串接比例積分型速度伺服控制器  $K_v(s)$  後的單位回授系統，因此  $G_v(s)$  的轉移函數應為下列型式。

$$G_v(s) = \frac{V(s)}{V_r(s)} = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (26)$$

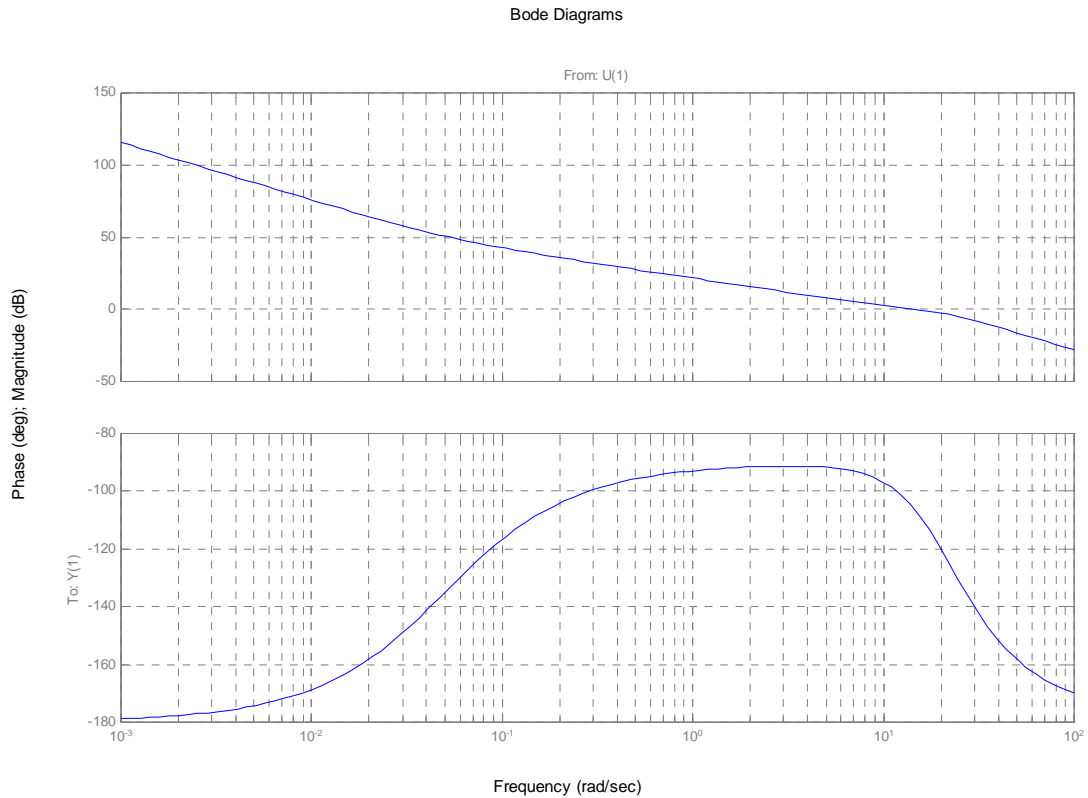
速度回授完成後，再進一步設計位置回授控制器  $K_v(s) = \frac{K_p s + K_I}{s}$ 。為使整體回授系統具有較佳的強韌性(robustness)，此處採用迴路整形法(loop shaping method)設計位置回授控制器。經過速度與位置回授控制後之系統方塊圖如下圖四所示。



圖四、速度與位置回授控制後之系統方塊圖

本計畫所研究的系統經上述法則設計後，經迴路整形補償後之開迴路系統波德圖如下圖五所示：





圖五、經迴路整形補償後之開迴路系統波德圖

由上圖可知低頻時，大小圖斜率為 $-40\text{ dB/dec}$ ，因此可提供閉回系統較佳的信號追蹤(command tracking)能力以及較好的干擾隔絕(disturbance rejection)能力；增益交越頻率附近大小圖斜率為 $-20\text{ dB/dec}$ ，可提供系統較佳的相位邊限；高頻時大小圖斜率為 $-40\text{ dB/dec}$ ，可提供閉路系統的強韌穩定性(robust stability)。

完成單軸的速度與位置回授控制後，本計畫採行模糊控制設計繩索的搖擺運動控制器。模糊控制器之法則表如下所示，其中解模糊化採用重心法(center of gravity method)。

$\theta$	$\dot{\theta}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB					NB			
NM					NM			
NS	NS	NS	NS	NS	NS	PS	PS	PS
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
PS	PS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	
PM					PM			
PB					PB			

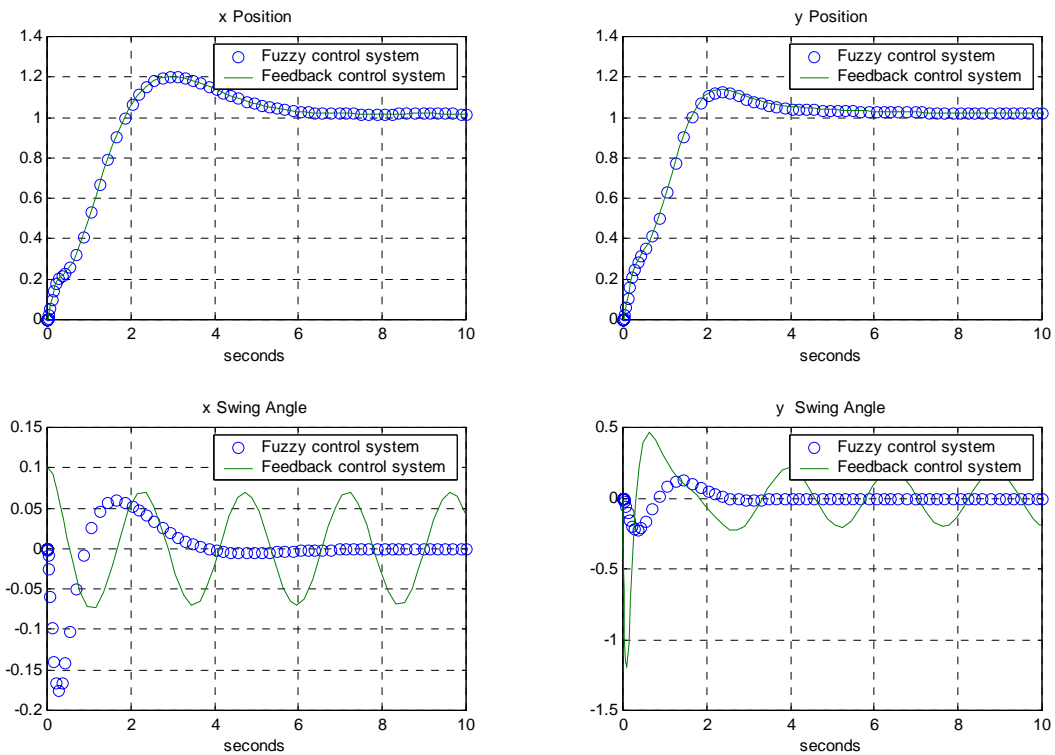
## 結果與討論

本計畫所討論之高架型起重機系統重要參數如下所示：

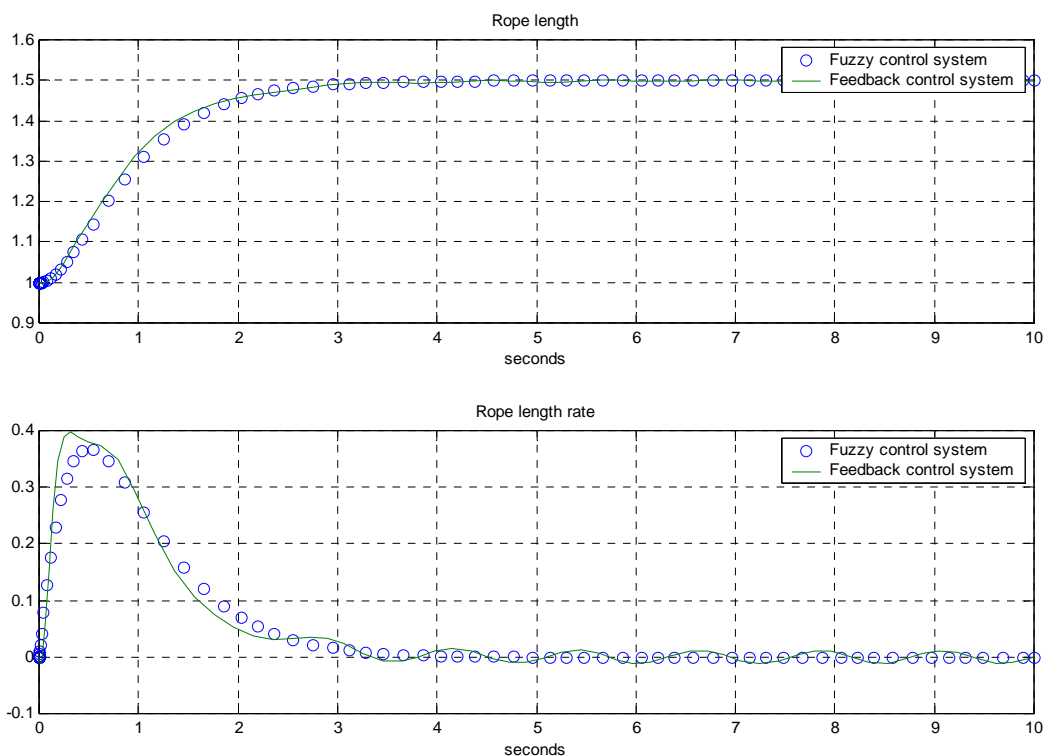
X 軸控制系統參數		Y 軸控制系統參數	
$M_x$	1440 kg	$M_y$	110 kg
$D_x$	480 kg/s	$D_y$	40 kg/s
$K_s$	480N/V	$K_s$	20N/V
$D_l$	20 kg/s		

其他相關參數值			
$l$	1m	$K_I$	0.08
$K_v$	24.0	$K_n$	1.5
$K_d$	0.6	$K_a$	3.55
$M_l$	0.1 kg		

本計畫所述及兩種控制律設計方式：高架型起重機系統運動回授控制器與運動模糊控制器，經由國科會「補助技職校院發展應用性先期研究計畫」(計畫編號：NSC90-2626-E-164-001)所設計、開發與架構的機電整合系統—PC-Based 高架型起重機系統，作硬體測試實驗，其實驗結果如圖六及圖七所示。根據圖六結果，兩種控制器對天車位置運動控制均有較佳的性能，但是採用模糊控制器的控制系統對繩索的搖擺運動的控制性能則優於採用運動回授控制器的控制系統。另外圖七結果顯示，兩種控制系統對於繩索長度伸縮的控制皆有良好的性能。



圖六



圖七

### 參考文獻

- [1] Al-garni, A.Z., Moustafa, K.A.F, Javeed Nizami, S.S.A.K., (1995), "Optimal Control of Overhead Cranes," Control Eng. Practice, vol.3, no.9, 1995, pp.1277-1284.
- [2] Altafini, C.; Frezza, R., (2000), "Observing the Load Dynamic of an Overhead Crane with Minimal Sensor Equipment," Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Volume: 2 , 2000 , Page(s): 1876 -1881 vol.2.
- [3] Benhidjeb, A. and Gissing, G.L, (1995), "Fuzzy Control of an Overhead Crane Performance Comparison with Classic Control," Control Eng. Practice, vol.3, no.12, 1995, pp.1687-1696.
- [4] Cho, S.K. and Lee, H.H., (2000), "An Anti-Swing Control of a 3-Dimensional Overhead Crane," Proceedings of the American control Conference, Chicago, Illinois, Jun. 2000, pp.1037-1041.
- [5] Gao, J. and Chen, D., (1997), "Learning and  $H-\infty$  Control of an Overhead Crane for Obstacle Avoidance and Disturbance Rejection," Proceedings of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision and Control, San Diego, California, USA, Dec. 1997, pp.275-280.
- [6] Gutierrez, M.; Solo, R., (1998), "Fuzzy Control of a Scale Prototype Overhead Crane," Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on Volume: 4 , 1998 , Page(s): 4266 -4268 vol.4.
- [7] Lee, H.H., (1998), "Modeling and Control of a Three-Dimensional Overhead Crane," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.120, Dec. 1998, pp.471-476.
- [8] Moustafa, K.A.F, and Abou-El-Tazid, T.G. (1996), "Load Sway Control of Overhead Cranes with Load Hoisting via Stability Analysis," JSME International Journal, Series C, vol.39, no.1, pp.34-40.
- [9] Moustafa, K.A.F., (1994), "Feedback Control Of Overhead Cranes Swing With Variable Rope Length," American Control Conference, 1994 Volume: 1 , Page(s): 691 -695.

- [10] Moustafa, K.A.F, (1988), "Nonlinear Modeling and Control of Overhead Crane Load Sway," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.110, Dec. 1988, pp.266-271.
- [11] Nowacki, Z.; Owczarż, D.; Wozniak, P., (1996), "On the Robustness of Fuzzy Control of an Overhead Crane," Industrial Electronics, 1996. ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on Volume: 1 , 1996 , Page(s): 433 -437 vol.1.
- [12] Ridout, A.J., (1989), "Variably Damped Swing Control of the Overhead Crane," Industrial Electronics Society, 1989. IECON '89, 15th Annual Conference of IEEE , 1989 , Page(s): 263 -269 vol.2.
- [13] Sakawa, Y. and Sano, H., (1997), "Nonlinear Model and Linear Robust Control of Overhead Traveling Cranes," Nonlinear Analysis, Theory, Models, and Application, vol.30, no.4, 1997, pp.2197-2207.
- [14] Yi, J., Yubazaki, N., and Hirota, K., (2003), "Anti-swing and Positioning Control of Overhead Traveling Crane," Information Science, vol.155, 2003, pp.19-42.

### 計畫成果自評

本計畫配合前一年國科會計畫(計畫編號：NSC90-2626-E-164-001)的成果，完成了兩個階段的工作。第一階段建置了一組 PC-Based 高架型起重機系統，並以 Matlab + Simulink 圖形式的控制系統設計介面作為開發環境，使整個系統在作實體測試時能更快速且完整的達成；第二階段完成了兩種高架型起重機系統運動控制律的設計，包括採用一般古典控制回授方式的運動回授控制系統及採用模糊法則設計的運動模糊控制系統。除了採用電腦作系統模擬測試外，更進一步地利用已建立之系統硬體與相關控制介面，作實體測試與驗證。根據實驗結果可知採用模糊控制器的控制系統對高架型起重機系統的運動有較佳的控制性能。

計畫完成至此，吾人規劃未來可繼續進行的方向可包括兩部分。第一部分為研究發展新式的控制法則，例如強健性控制或類神經網路控制...等，並作實體測試與驗證。第二部分為建置 PC-Based 高架型起重機系統所研發相關的電控系統之經驗，可作為產學合作與學術界的技術能成功轉移至業界的基礎。