

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

PC-based 高架型起重機系統之運動控制研究

The investigation PC-based Motion Control of Overhead Crane System

計畫編號：NSC 90-2626-E-164-001

執行期間：90 年 08 月 01 日至 91 年 07 月 31 日

主持人：修平技術學院電機工程系 楊基鑫 助理教授

摘要

本論文工作是為建立高架型起重機系統(Overhead Crane System)硬體架構與軟體的自行開發能量，並評估整體控制系統軟硬體統實驗裝置製作的可行性，以作為後期計畫”測試各種控制律的適用情形與軟硬體的修改”的依據，及作為尖端控制技術平台之測試使用。在本論文吾人參考美國 FeedBack 公司 3D 天車控制系統的軟硬體產品，並配合國內實際的工程環境，架構一套適合國內工業界運用的高架型起重機系統，在另一方面，並由研究能量的角度切入，設計高精準度與高穩定度的控制律，並分別測試其性能。

I.前言：

高架型起重機系統(Overhead Crane System)已經廣泛應用於各類型工業之大型物體昇降與搬運，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，即為此吾人所要研究討論的主題。

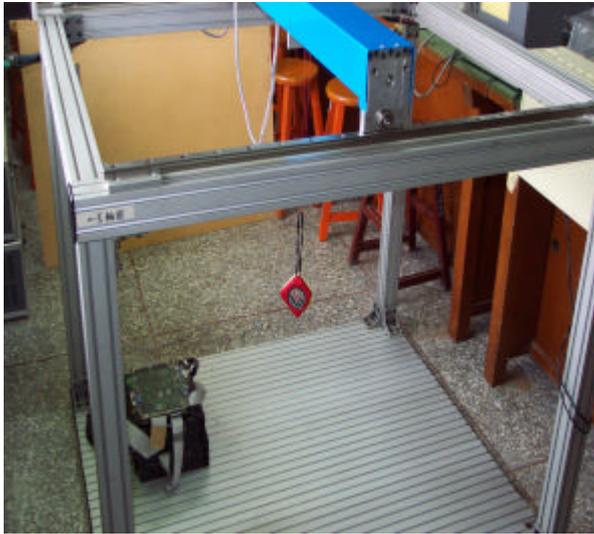
依據實際應用得考量，吾人可以歸納出高架型起重機控制系統的設計包括以下三個部分：(一)硬體的架設 (二)軟體的獨立開發 (三)控制律的研發：運動控制(Motion Control)，即起重機位置速度及加速度之控制、載重物之舉起控制(Load Hoisting)，藉由起重馬達來調整物體高度，以防止與物體運動時發生碰撞、懸吊載重物自旋之抑制(Load Swing Suppression)，抑制物體搬運過程所產生的自旋運動，防止旋吊鋼索因自旋而斷裂。

II.實驗應體的規格規劃：

(1)3D 天車的機構單元：

依據構想書中的概念，實際將硬體架設完成，作為後期計畫以修改目前已有之設備：本論文的天車控制系統，X、Y 軸利用導鏢桿做傳動，並以兩個 AC 馬達為主要的驅動系統，Z 軸則以 DC 馬達為驅動器，另在 X、

Y 軸兩軸上各有一個編譯器與解碼器，作為資料的處理之用，而整個系統則以 DSP+FPGA 的面板作為控制律設計的機制，如下圖一所示。



圖一、3D 天車的機構單元

以下將控制單元中，所有的硬體架構說明如下：

長：1m，寬：1m

主驅動馬達：交流馬達 × 2；直流馬達 × 1

位置感測器：編碼器 × 5

量測解析度：4096 pulse/rev

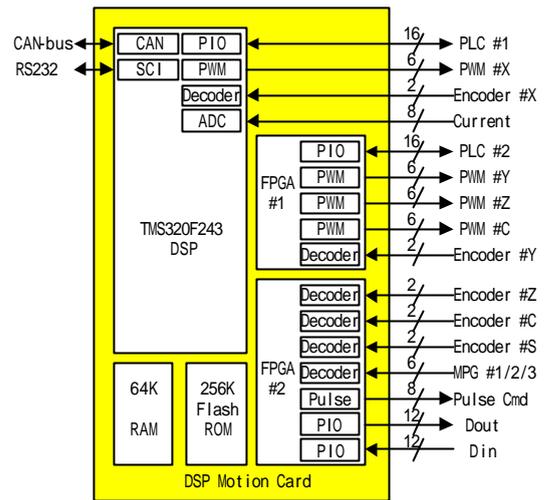
量測準確度：0.0015rad

專用 MIMO 伺服放大器

天車模型加裝 2D 角度量測系統。

(2)控制介面卡：

超高速 DSP 控制晶片由於全數位化執行速度及低價格價位已堪入愛好者青睞，目前由於發展系統學習困難及價格昂貴造成學習障礙，故本系統以 C 語言設計程式或 Matlab Simulink 規劃設計，再加上可使用 VHDL（硬體描述語言）規劃 FPGA（可程式邏輯閘）硬體電路，那可真是如虎添翼銳不可當，如今本論文與廠商共同研發提供全數位化可程式軟硬體控制卡可符合此系統的要求，並可應用於工業界應用，如圖二所示。

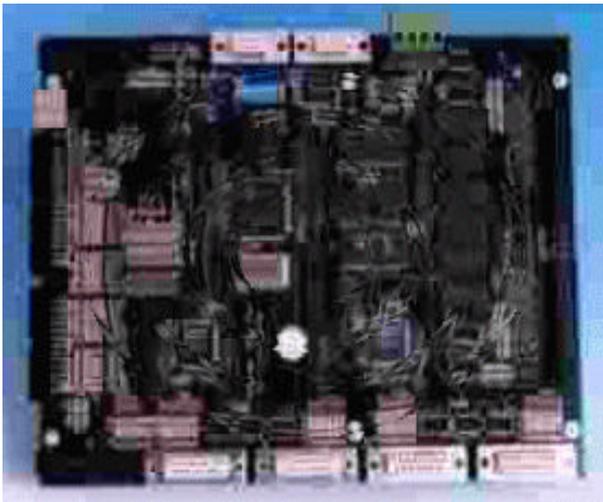


圖二、控制介面卡（DSP+FPGA）

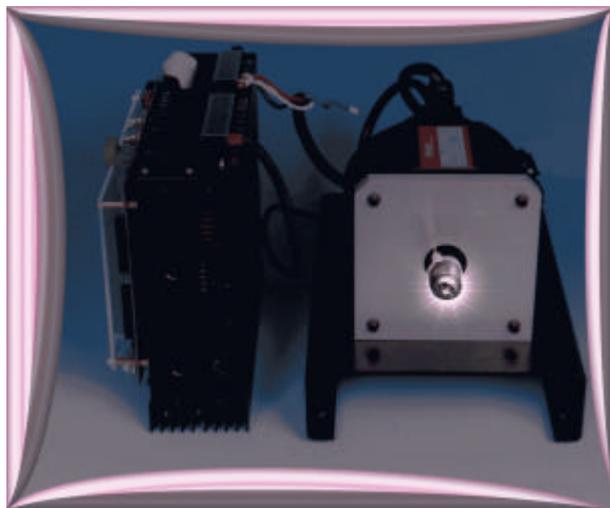
此控制介面卡主要的架構分述如下：

- (1) 24 組 PWM 產生電路：分配給四軸的三相 PWM 驅動器。
- (2) 8 組 ADC 類比輸入：分配給四軸的三相電流回授。
- (3) B 相解碼電路：分配給四軸的位置回授，外加主軸的轉角回授和最多三組的 MPG 輸入。
- (4) 32 點可程式 I/O：分配給兩組 16 點 I/O 的 PLC 介面。
- (5) 12 點數位輸入：光耦合隔離的可程式數位輸入。
- (6) 12 點數位輸出：光耦合隔離的可程式數位輸出。
- (7) RS232 串列介面：負責外部的電腦連線。
- (8) CAN-bus 網路介面：負責多模組間的網路通訊。

在整體規劃上，是由高速的 DSP 元件來執行數位控制軟體，而由 FPGA 來執行硬體控制介面；由於軟體和硬體都是可程式的，應用上非常有彈性。下圖是用 DSP 元件來執行可程式邏輯閘(FPGA)執行的三軸伺服驅動介面卡：



圖三、DSP+FPGA 控制卡



圖四、DSP 交流伺服馬達控制

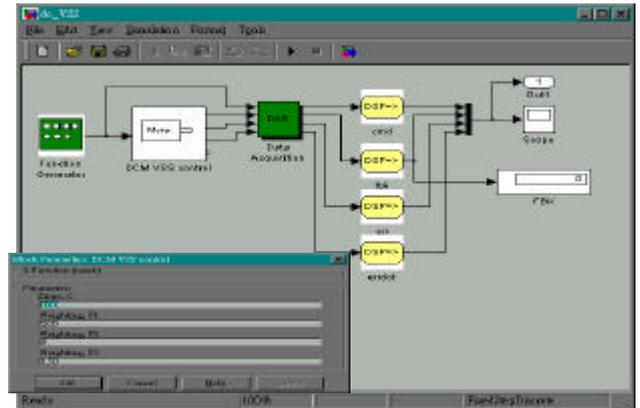
在 FPGA 中，共需 7 組的光電盤解碼器(考慮外加三組手輪的需求)，4 組的六相 PWM 產生器和 24 位元的 PIO。對於 PC 端的界面，可以考慮簡單的 8 位元 ISA 界面。另外由於電流回授需要外加 8 頻道的 ADC 轉換器(每軸需要 2 頻道的 ADC)，還需準備相對的 ADC 元件界面。像這樣的一組電路，大約需要容量 15K 的 FPGA，現在 FPGA 的容量動輒超過 40K，這樣的需求並不難滿足。

(3) 軟體設計：採用 Matlab / Simulink 即時控制軟體

運動控制器將所有控制電路濃縮到單一的控制模組中，價格便宜又安定，可適用於高雜訊的工業環境。對於不同的應用環境，則用可程式的 DSP+FPGA 做界面控制，不但保留彈性擴張的空間，也沒有傳統插卡的結構

性缺陷。

在軟體設計上，仍然承襲著 PC 級控制器方便而通用的優點，所有 PC 級控制器的 Matlab / Simulink 即時控制軟體都可應用。不但如此，由於直接具備無須編寫 C 語言的快速測試控制法則測試能力，可輕易的應用軟體和 C 語言工具，開拓整個系統的加值空間。以下觀察 Matlab / Simulink 軟體可進行即時控制的能力：



圖六、可使用 C 語言設計並產生 Simulink 模組

在此可設計不同的控制法則進行實驗測試。

III. 數學建模：

一般高架型起重機系統(Overhead Crane System)的架構如圖一所示，此處吾人首先針對高架型起重機系統作系統建模

(modeling)，再進一步分析其動態特性。考慮如圖二所示之高架型起重機之座標系統，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， q 角代表載重物之搖擺角(swing angle)。另外 q_x 角代表搖擺角 q 在

$X_T Z_T$ 平面的投影角； q_y 角代表搖擺角 q 在

$Y_T Z_T$ 平面的投影角。如圖二，載重物在固定座標系統 XYZ 的座標可以表示如下：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，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。載重物之運動速率可進步表示為：

$$\begin{aligned}x_m &= x + l \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y \\y_m &= y + l \sin \mathbf{q}_y \\z_m &= -l \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y\end{aligned}\quad (1)$$

其中 l 代表載重繩索的長度。以下將利用

$x, y, l, \mathbf{q}_x, \mathbf{q}_y$ 作為廣義座標 (generalized

coordinate), 推導出天車與載重物之運動方程式。

以下利用 Lagrange 方程式, 來得到天車與載重物之運動方程式, 為使分析較為簡潔, 此處吾人假設載重物為質點 (point mass), 而繩索為剛性。如圖二所示天車與載重物之動能與位能可分別利用下式來表示:

$$\begin{aligned}K &= \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{m}{2} v_m^2 \\P &= mgl(1 - \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y)\end{aligned}\quad (2)$$

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, 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。載重物之運動速率可進步表示為

$$\begin{aligned}v_m^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{l}^2 + l^2 \dot{\mathbf{q}}_x^2 \cos^2 \mathbf{q}_y + l^2 \dot{\mathbf{q}}_y^2 \\&\quad + 2\dot{x}(\dot{l} \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y + l \dot{\mathbf{q}}_x \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y - l \dot{\mathbf{q}}_y \sin \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y) \\&\quad + 2\dot{y}(\dot{l} \sin \mathbf{q}_y + l \dot{\mathbf{q}}_y \cos \mathbf{q}_y)\end{aligned}\quad (3)$$

而 Lagrangian L 及 Rayleigh 能量耗散函數 F 分別定義如下:

$$L = K - P = \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{m}{2} v_m^2 + mgl(\cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y - 1)\quad (4)$$

$$F = \frac{1}{2}(D_x \dot{x}^2 + D_y \dot{y}^2 + D_l \dot{l}^2)\quad (5)$$

上式中 D_x, D_y, D_l 分別代表 x, y, l 方向之阻尼係數。利用 Lagrange 方程式, 吾人可分別推導出 $x, y, l, \mathbf{q}_x, \mathbf{q}_y$ 等五個廣義座標的運動方程

式 (equation of motion)。

x 方程式:

$$\begin{aligned}(M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\mathbf{q}}_x \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y - ml\ddot{\mathbf{q}}_y \sin \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y \\+ m\ddot{l} \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y + D_x \dot{x} + 2ml\dot{\mathbf{q}}_x \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y \\- 2ml\dot{\mathbf{q}}_y \sin \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y - ml\dot{\mathbf{q}}_x^2 \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y \\- 2ml\dot{\mathbf{q}}_x \dot{\mathbf{q}}_y \cos \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y - ml\dot{\mathbf{q}}_y^2 \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y = f_x\end{aligned}\quad (6)$$

\mathbf{q}_x 方程式:

$$\begin{aligned}ml^2\ddot{\mathbf{q}}_x \cos^2 \mathbf{q}_y + ml\ddot{x} \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y + 2ml \cdot \dot{l} \dot{\mathbf{q}}_x \cos^2 \mathbf{q}_y \\- 2ml^2\dot{\mathbf{q}}_x \dot{\mathbf{q}}_y \sin \mathbf{q}_y \cos \mathbf{q}_y + mgl \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y = 0\end{aligned}\quad (7)$$

y 方程式:

$$\begin{aligned}(M_y + m)\ddot{y} + ml\ddot{\mathbf{q}}_y \cos \mathbf{q}_y + m\ddot{l} \sin \mathbf{q}_y + D_y \dot{y} \\+ 2ml\dot{\mathbf{q}}_x \cos \mathbf{q}_y - ml\dot{\mathbf{q}}_y^2 \sin \mathbf{q}_y = f_y\end{aligned}\quad (8)$$

\mathbf{q}_y 方程式:

$$\begin{aligned}ml^2\ddot{\mathbf{q}}_y + ml\ddot{y} \cos \mathbf{q}_y - ml\ddot{x} \sin \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y + 2ml\dot{l} \dot{\mathbf{q}}_y \\+ ml^2\dot{\mathbf{q}}_x^2 \cos \mathbf{q}_y \sin \mathbf{q}_y + mgl \cos \mathbf{q}_x \sin \mathbf{q}_y = 0\end{aligned}\quad (9)$$

l 方程式:

$$\begin{aligned}(M_l + m)\ddot{l} + m\ddot{x} \sin \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y + m\ddot{y} \sin \mathbf{q}_y + D_l \dot{l} \\- ml\dot{\mathbf{q}}_x^2 \cos^2 \mathbf{q}_y - ml\dot{\mathbf{q}}_y^2 - mg \cos \mathbf{q}_x \cos \mathbf{q}_y = f_l\end{aligned}\quad (10)$$

以上運動方程式, 當 $\dot{y} = \ddot{y} = \mathbf{q}_y = \dot{\mathbf{q}}_y = \ddot{\mathbf{q}}_y = 0$

或 $\dot{x} = \ddot{x} = \mathbf{q}_x = \dot{\mathbf{q}}_x = \ddot{\mathbf{q}}_x = 0$ 時, 可簡化成單軌道天車之運動方程式。

方程式(6)至(10)為非線性之動態方程式, 由於天車系統運行速度在考量安全的前提下, 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, 方程式(6)至(10)應該在以下所列之工作範圍運作,

$$|\dot{x}| \ll g, |\dot{y}| \ll g, |\dot{l}| \ll g, |\dot{\mathbf{q}}_x| \ll 1, |\dot{\mathbf{q}}_y| \ll g, |\dot{\mathbf{q}}_x| \ll g, |\dot{\mathbf{q}}_y| \ll g$$

$$|\mathbf{q}_x| \ll 1, |\mathbf{q}_y| \ll 1, |\dot{\mathbf{q}}_x| \ll 1, |\dot{\mathbf{q}}_y| \ll 1$$

$$\sin \mathbf{q}_x \cong \mathbf{q}_x, \cos \mathbf{q}_x \cong 1, \sin \mathbf{q}_y \cong \mathbf{q}_y, \cos \mathbf{q}_y \cong 1$$

以便能有安全方面的保證。因此根據以上的假設，吾人可以得出線性化(Linearized)之運動方程式。

x 方程式：

$$(M_x + m)\ddot{x} + D_x \dot{x} + ml\ddot{\mathbf{q}}_x = f_x \quad (11)$$

\mathbf{q}_x 方程式：

$$l\ddot{\mathbf{q}}_x + \ddot{x} + g\mathbf{q}_x = 0 \quad (12)$$

y 方程式：

$$(M_y + m)\ddot{y} + D_y \dot{y} + ml\ddot{\mathbf{q}}_y = f_y \quad (13)$$

\mathbf{q}_y 方程式：

$$l\ddot{\mathbf{q}}_y + \ddot{y} + g\mathbf{q}_y = 0 \quad (14)$$

l 方程式：

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l \dot{l} - mg = f_l \quad (15)$$

上述方程式(11)至(15)中，(11)及(12)式代表縱向(travel)之運動方程式，(13)及(14)式代表橫向(traverse)之運動方程式，(15)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，而無須考慮動態偶合(dynamic coupling)的問題。

IV. 結果與討論：

在此吾人在先期的工作中，除架設硬體的結構外，在軟體方面與廠商共同開發程式的設計，並將其控制律的設計燒錄製 DSP+FPGA 的晶片上，以作為整個系統的控制核心，而所有的指令均可在 PC 上進行下達的動作，並可於 PC 上清楚的觀察出其響

應是否達到整個系統所需的精密定位的性能、與整個天車的系統是否能於最短的時間內達成精密定位的規格。在此先期的工作中，吾人先採用回授的控制律設計，測試整個系統是否能作為後期工作的技術平台。

以下吾人將利用方程式(11)至(15)來設計三維高架型天車系統的運動控制器，如前段所敘述，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。

速度回授控制器的設計：

方程式(11)中，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，

$$f_x = K_s u_t \quad (16)$$

其中 K_s 為比例常數。由(16)式，方程式(11)及(12)可以進一步化簡成：

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} - mg\mathbf{q}_x = K_s u_t \quad (17)$$

$$l\ddot{\mathbf{q}}_x + \ddot{x} + g\mathbf{q}_x = 0 \quad (18)$$

方程式(17)及(18)仍包括耦和項 $mg\mathbf{q}_x$ ，為使此部份能被分離出來，此處設計馬達扭矩 u_t 採行以下控制律：

$$u_t = u - \frac{mg\mathbf{q}_x}{K_s} \quad (19)$$

其中 u 為新的控制變數， \mathbf{q}_x 角代表搖擺角 \mathbf{q} 在 $X_T Z_T$ 平面的投影角，此項可利用感測器量測得到。根據(19)式，吾人可進一步將(17)式化成

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} = K_s u \quad (20)$$

對(20)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：

$$G_t(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{K_s}{M_x s + D_x} \quad (21)$$

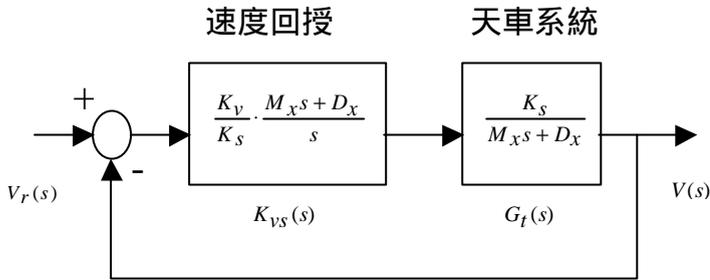
注意此處控制變數 u 仍尚未決定。

$V(s) = s \cdot X(s)$ 代表 x 方向的速度。為決定控制變數 u ，吾人假設開迴路速度控制器如下式所示：

$$K_{vs}(s) = \frac{K_v}{K_s} \frac{M_x s + D_x}{s} \quad (22)$$

整體回授系統方塊圖，如下圖七所示。閉迴路轉移函數可經由方塊圖代數計算得到如下：

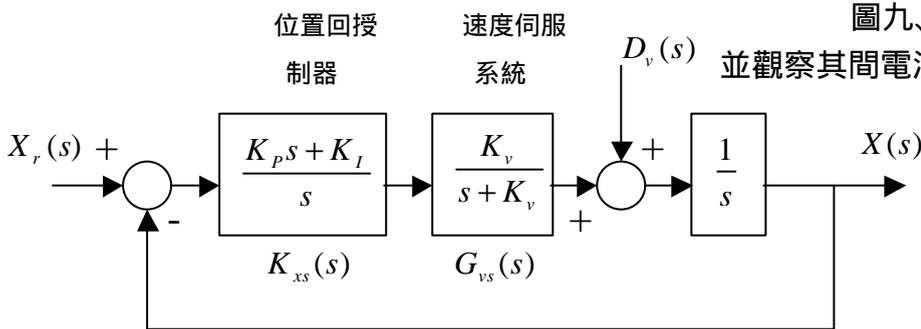
$$G_{vs}(s) \equiv \frac{V(s)}{V_r(s)} = \frac{K_v}{s + K_v} \quad (23)$$



圖七、速度回授系統方塊圖

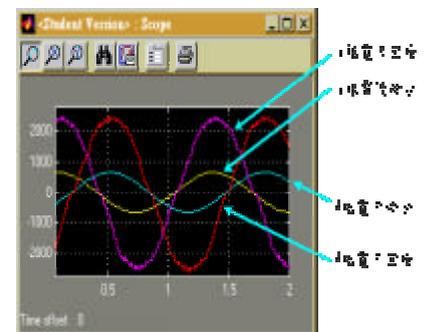
位置回授控制器的設計：

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，位置回授系統方塊圖如圖八所示。



圖九、位置回授的控制

並觀察其間電流的響應情形：



吾人假設開迴路位置系統為下式所示之轉移函數：

$$G_{xo}(s) = \frac{s + \frac{K_I}{K_p}}{s} \cdot \frac{K_p}{s} \cdot \frac{K_v}{s + K_v} \quad (24)$$

則位置回授控制器 $K_{xs}(s)$ 可經由以下計算得到 $K_{xs}(s) = \frac{s G_{xo}(s)}{G_{vs}(s)}$ ：

$$K_{xs}(s) = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (25)$$

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：

$$G_{xs}(s) \equiv \frac{X(s)}{X_r(s)} = \frac{K_v (K_p s + K_I)}{s^3 + K_v s^2 + K_v K_p s + K_v K_I} \quad (26)$$

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。以下吾人下一方波的指令，觀察此系統是否能在最短的時間中符合指令所下達的位置：

系統回授控制器的設計：

上述所討論之速度與位置回授控制器的設計，只考慮到 x 方向的動態，尚未考慮載重物的運動時的搖擺效應。以下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。吾人對方程式(18)取 Laplace 轉換，可以得到載重物搖擺角 \mathbf{q} 在 $X_T Z_T$ 平面的投影角 \mathbf{q}_x 與位置之間的轉移函數如下：

$$G_l(s) \equiv \frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{ls^2 + g} \quad (27)$$

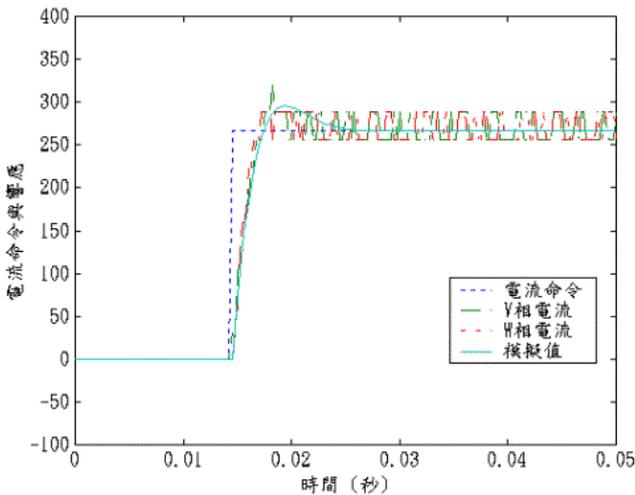
另外吾人再設計一個搖擺效應控制器

$K_q(s)$ ，以便滿足整體系統之性能：

$$K_q(s) = K_a \cdot \frac{s + K_n}{s + K_d} \cdot \frac{s}{K_p s + K_I} \quad (28)$$

上式中 K_a 代表控制增益， K_n, K_d 則為常數。

吾人至此已經完成 x 方向單軸系統整體控制器的設計。前述由方程式(11)至(15)，吾人已經說明 x 方向與 y 方向的動態已經完全的被解耦(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。以下觀察整體系統控制的響應圖：



重物繩索長度伺服控制器的設計：

在完成兩個單軸回授系統控制器的設計後，最後將針對載重物繩索長度控制器作設計。由方程式(15)，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(15)式可以進一步化簡成：

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l \dot{l} - mg = K_{sl} u_{tl} \quad (29)$$

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：

$$u_{tl} = u_l - \frac{mg}{K_{sl}} \quad (30)$$

其中 u_l 為新的控制變數，經由(30)式，載重物

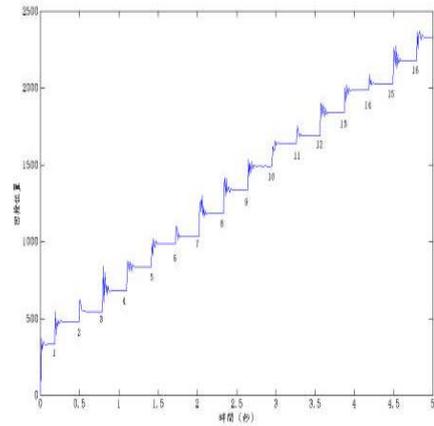
繩索長度控制系統可以表成

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l \dot{l} = K_{sl} u_l \quad (31)$$

對(31)式取 Laplace 轉換，可將載重物繩索長度動態方程式化成如下之轉移函數：

$$G_l(s) = \frac{L(s)}{U_l(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{sl}}{(M_l + m)s + D_l} \quad (32)$$

至此載重物繩索長度控制系統與(21)式所示 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。以下觀察其角度旋轉的響應圖：



圖十三、向量控制角度量測增益實測圖形

V. 結論：

此次專案計畫則與廠商建教合作，首先確定硬體規格，先以 PC Based 控制卡為基礎，其中 CPU 採用速度最快、功能超強全數位化 DSP 控制晶片，為了讓各種界面電路彈性化、軟體化，採用 FPGA（可程式邏輯閘）晶片，並可使用 VHDL（硬體描述語言）規劃、設計硬體電路，加上使用 RS232 作為通信界面與個人電腦連線功能外、控制卡與控制卡之間使用 CAN Bus 做連線，如此硬體結構變成相當彈性化、模組化及系統化。

VI. 參考資料：

- [1] Aschemann, H., Sawodny, O., Lahres, S., and Hofer, E.P. (2000), "Disturbance Estimation and Compensation for Trajectory Control of an Overhead Crane,"

- Proceedings of the American control Conference, Chicago, Illinois, Jun. 2000, pp.1027-1031.
- [2] 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.
- [3] d' Andrea, B., and Boustany, F. (1991), "Adaptive Control of a class of Mechanical systems using Linearization and Lyapunov Methods. A Comparative Study on the Overhead Crane Example," Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control, Brighton, England, Dec. 1991, pp.120-125.
- [4] Gao, J. and Chen, D., (1997), "Learning and $H-\infty$ Control of an Overhead Crane for Obstacle Avoidance and Disturbance Rejection," Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control, San Diego, California, USA, Dec. 1997, pp.275-280.
- [5] Greenwood, D.T., Principles of Dynamics, Prentice Hall, 1988.
- [6] 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.
- [7] Luca, D.A., and Sicilano, B., (1991), "Closed-Form Dynamic Model of Planar Multilink Lightweight Robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.21, no.4, Jul.-Aug. 1991, pp.826-839.
- [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, (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.
- [10] Sakawa, Y., and Nakazumi, A. (1985), "Modeling and Control of a Rotary Crane," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, Mar. 1985, pp.201-207.
- [11] Sakawa, Y., Shindo, Y., and Hashimoto, Y. (1981), "Optimal Control of a Rotary Crane," Journal of Optimization Theory Application, vol.35, 1981, pp.535-557.
- [12] Starr, G.P., (1985), "Swing-Free Transport of Suspended Objects with a Path-Controlled Robot Manipulator," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, Mar. 1985, pp.97-100.
- [13] Yu, J., Lewis, F.L. and Huang, T., (1995), "Nonlinear Feedback Control of a Gantry Crane," Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, June 1995, pp.4310-4315.
- [14] 卓傑企業有限公司網頁：教學實驗設備型錄廣告資料。
(<http://www.chochieh.com.tw>)
- [15] 俊原科技股份有限公司技術報告