以浮點運算數位訊號處理器為基礎之智慧型控制雙軸運動控制系統

Two-Axis Motion Control System Based on Floating-Point Digital Signal Processor Using Intelligent Control

國立中央大學　電機工程學系
林 法 正 教授

內 容

一、緒 論 (1)

❑ 研究動機與目的

- 永磁線型同步馬達的優點：
  - ✓ 長距離的高速移動及高精密度
  - ✓ 高可靠性和堅硬的結構、高推力
  - ✓ 邊界效應相較線型感應馬達易於控制，適合於高性能伺服的應用場合
- 永磁線型同步馬達的缺點：
  - ✓ 易受漣波力、參數變化、外來負載干擾和摩擦力所影響
  - ✓ 邊界效應及雙軸系統常見的交叉耦合干擾亦使得推力的控制更加困難
- 如何設計補償這些等效作用力的干擾同時達到準確的輪廓軌跡追隨，並且快速且直接地施加在永磁線型同步馬達驅動系統上，通常必需配合複雜的控制設計。

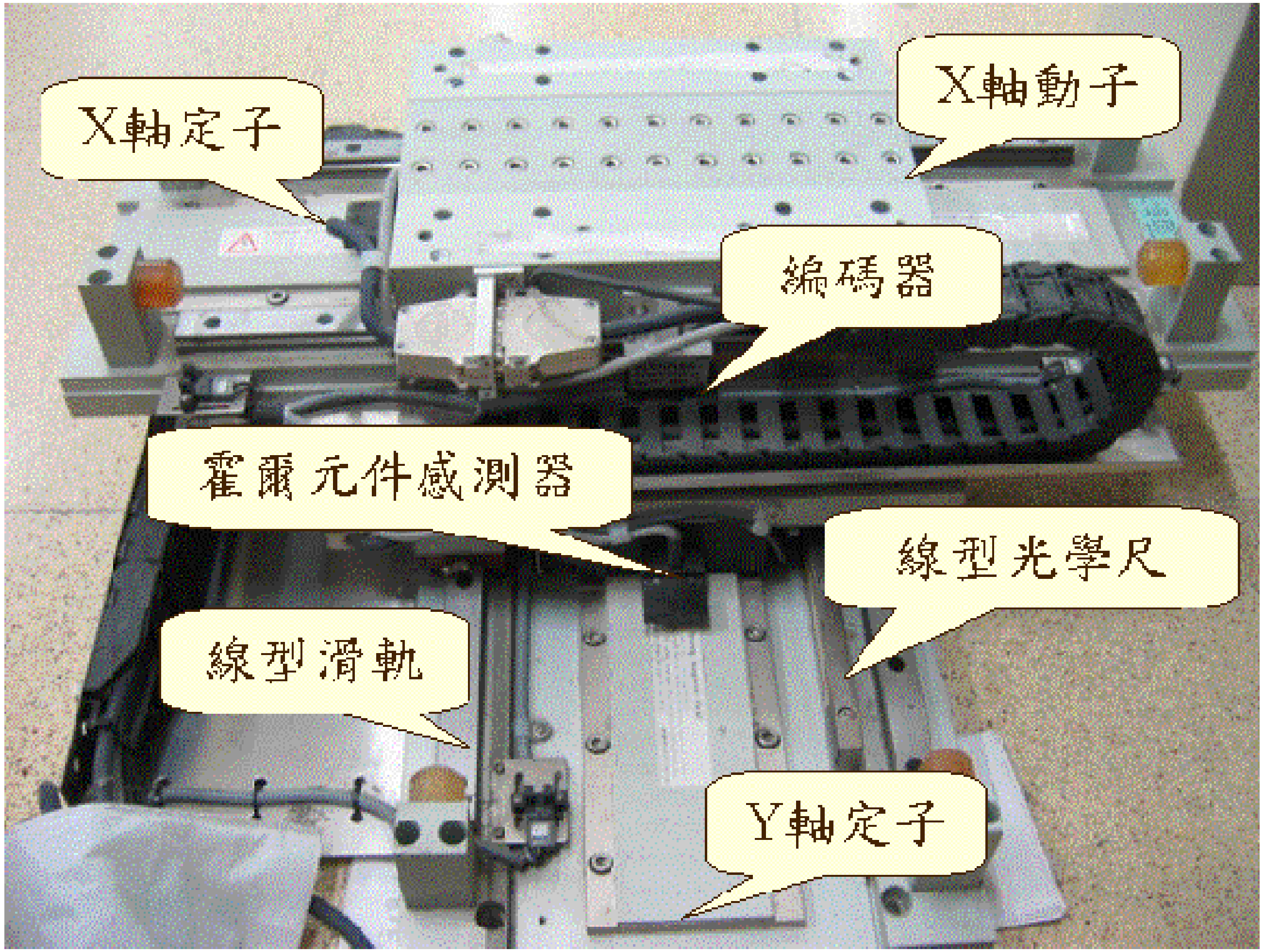
一、緒 論 (2)

❑ 研究動機與目的

- 浮點運算數位訊號處理器(DSP)的特點：
  - ✓ 具常見數位訊號處理器的優點
  - ✓ 精確的浮點運算
  - ✓ 可執行複雜的控制運算
- STC-32單板控制電腦：
  - ✓ 以TMS320C32數位訊號處理器為處理核心
  - ✓ 內建PIO、ADCs、DACs、Encoder Interface
  - ✓ 減少了利用桌上型電腦所完成的數位控制器的體積
- 智慧型控制系統設計：
  - ✓ 模糊類神經網路、放射狀基底函數網路、Sugeno型適應性模糊類神經網路、可變結構控制與非線性控制理論

二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (1)

- X-Y平台雙軸運動控制系統之外觀圖 (圖2.1)



二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (2)

❑ X-Y平台雙軸運動系統

- 由兩台上銀科技公司所生產的鐵心式LMS37單軸永磁線型同步馬達所組成，X軸的定子是直接耦合在Y軸的動子。
- 其一次側為動子(Mover)，是由一短的移動"一次側"線圈，包含螺旋狀之電樞線圈與霍爾元件感測器所組成。
- 一長的固定"二次側"線圈，包含由釹鐵硼所組成的永磁、線型滑軌與線型光學尺所組成。
- 驅動器為一般控制永磁同步馬達之磁場導向電流控制的脈寬調變電壓源三相反流器。
- 其規格為額定電壓220伏特(V)、額定連續電流5.0安培(A)、連續推力475牛頓(N)，永磁極距(Pole Pitch)為3.2公分。

二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (3)

❑ 單軸永磁線型同步馬達之工作原理

- 單軸永磁線型同步馬達的相電壓方程式以矩陣方式表示如下：

$$\mathbf{v}_{abci} = \mathbf{r}_{si}\mathbf{i}_{abci} + p\boldsymbol{\lambda}_{abci} \tag{2.1}$$

- 假設三相平衡Y接，利用 d-q 軸座標轉換後的電壓方程式如下：

$$v_{qi} = r_{si}i_{qi} + p\lambda_{qi} + \omega_i\,\lambda_{di} \tag{2.8}$$

$$v_{di} = r_{si}i_{di} + p\lambda_{di} - \omega_i\lambda_{qi} \tag{2.9}$$

- 利用功率平衡的關係，則 n_{pi} 極對的永磁線型同步馬達的推力方程式：

$$F_{ei} = \frac{3\pi\, n_{pi}}{2\tau_i}\left[i_{qi}\lambda_{mi} + (L_{di} - L_{qi})i_{di}i_{qi}\right] \tag{2.25}$$

- 以磁場導向為基礎加上均勻氣隙的假設，則推力方程式可簡化如下：

$$F_{ei} = \frac{3\pi\, n_{pi}}{2\tau_i}\, i_{qi}^{*}\lambda_{mi} \tag{2.26}$$

二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (4)

- 在履行磁場導向控制後，單軸永磁線型同步馬達驅動系統可表示如下：

$$F_{ei} = K_{fi} i_{qi}^{*} \tag{2.27}$$

$$K_{fi} = 3\pi n_{pi} \lambda_{mi} / (2\tau_i) \tag{2.28}$$

- 馬達動子之動態方程式亦可表示如下：

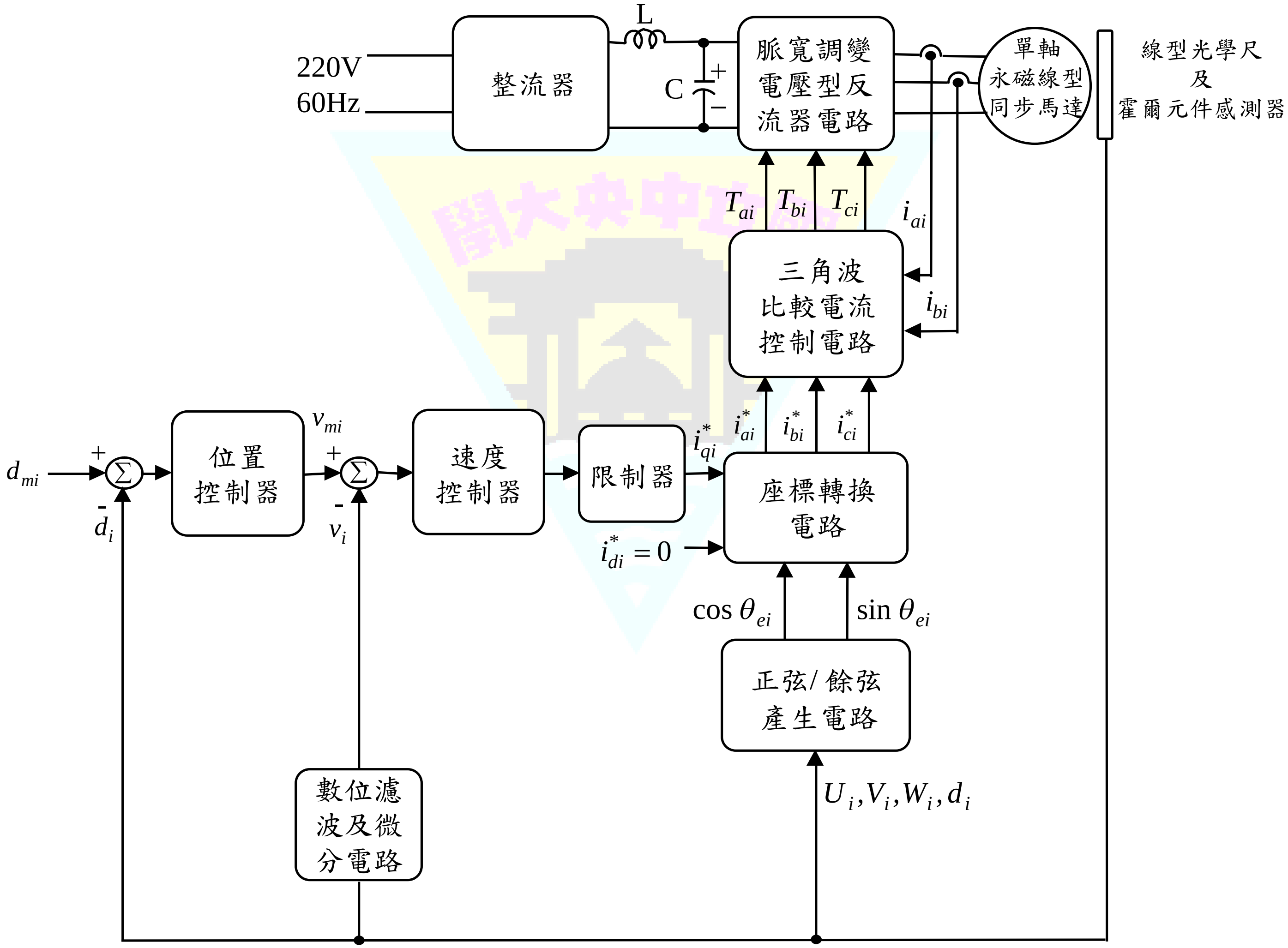
$$F_{ei} = M_i p v_i + D_i v_i + F_{Li} + f_i(v) \tag{2.29}$$

- 考慮庫倫摩擦力、黏滯摩擦力和Stribeck影響，則摩擦力可表示如下：

$$f_i(v) = F_{Ci}\,\mathrm{sgn}(v_i) + (F_{Si} - F_{Ci}) e^{-(v_i / v_{si})^2}\,\mathrm{sgn}(v_i) + K_{vi} v_i \tag{2.30}$$

二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (5)

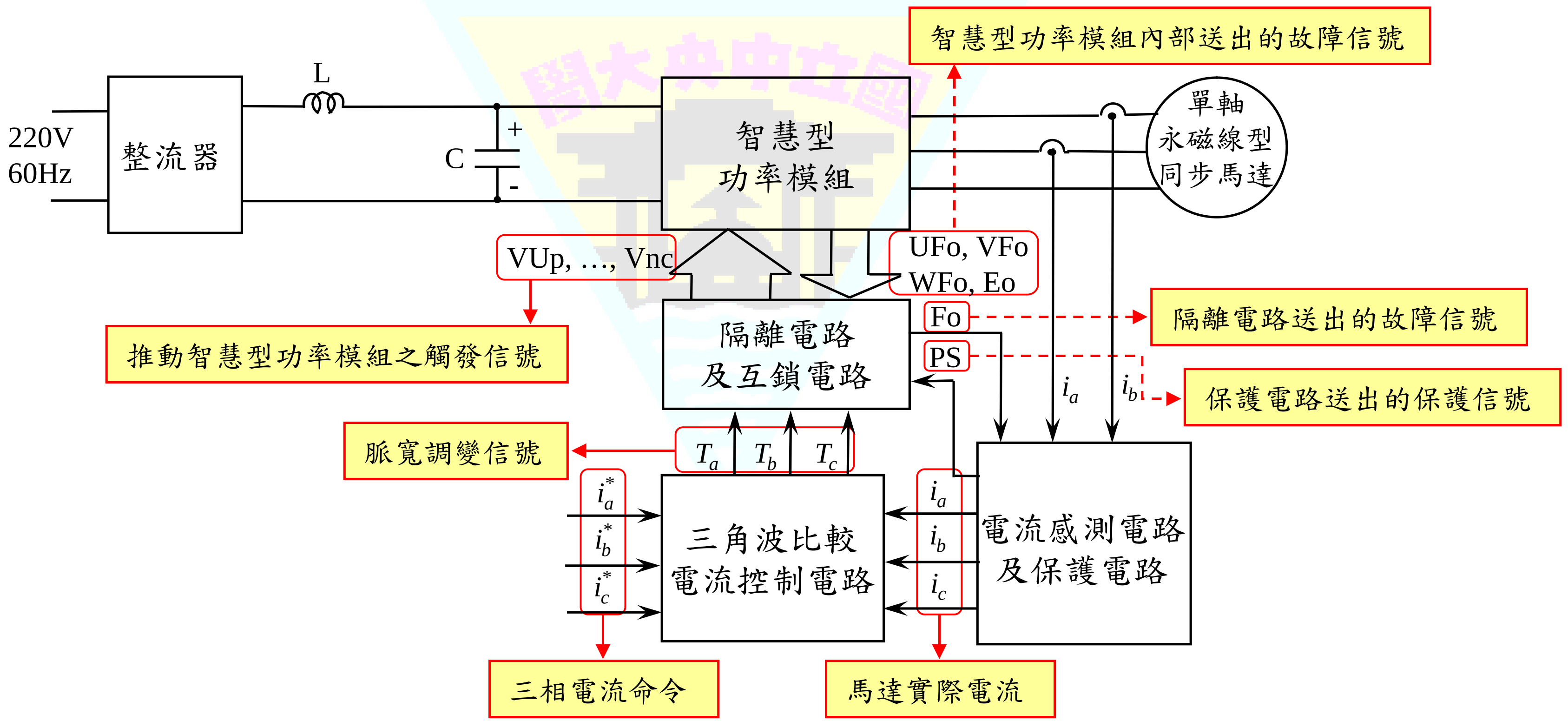
❑ 磁場導向控制之單軸馬達驅動系統之架構圖 (圖2.2)



二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (6)

❑ 單軸馬達驅動系統電路

➢ 馬達驅動系統電路方塊圖 (圖2.3)



二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (7)

❑ STC-32單板控制電腦外觀圖 (圖2.5)

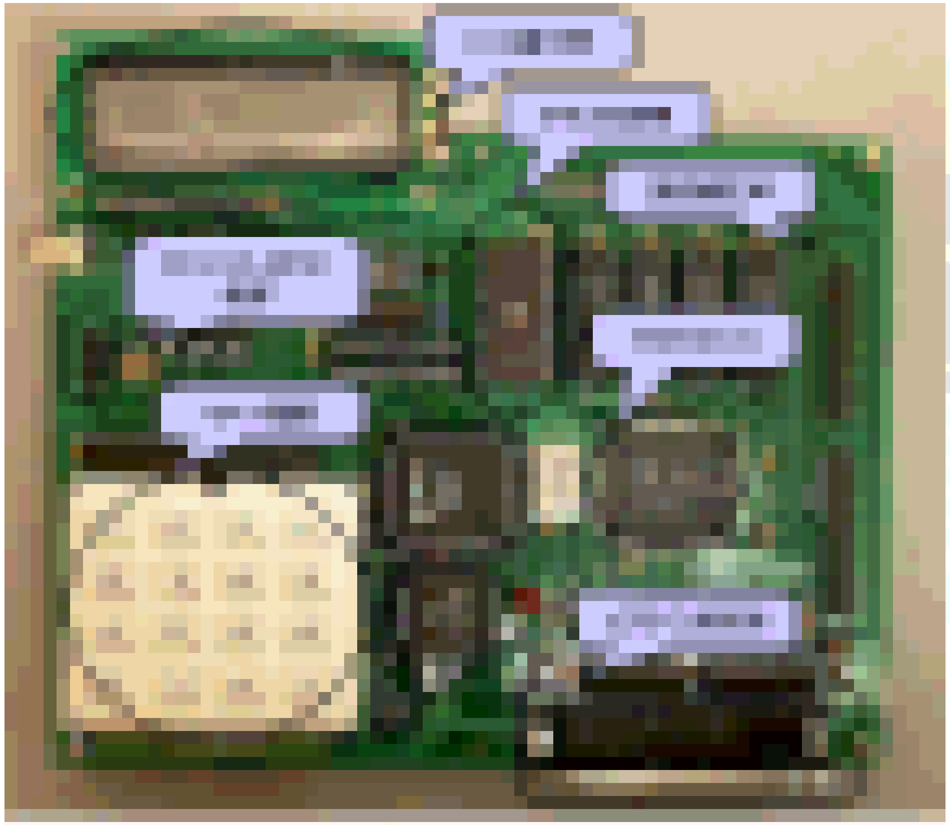


圖2.5

- TI TMS320C32、50MHz浮點32位元DSP CPU
- 2通道ADC、2通道DAC、2通道編碼器輸入
- 24位元數位輸出入埠、可接16x2 LCD顯示器及4x4鍵盤
- 可外加子板擴充系統記憶體及輸出輸入功能
- 可接EPROM或XDS-510-MPSD偵錯器

二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (8)

❑ STC-4AD4DA擴充模組外觀圖 (圖2.7)

- 因為實作需要，需要增加DAC的通道數量，利用預留的一組擴充埠購買一塊專用的擴充模組以符合實作需求。

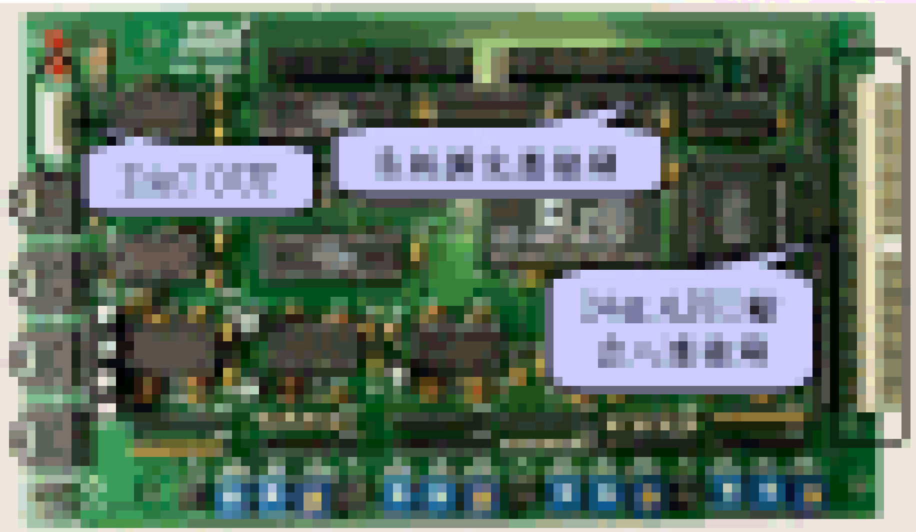
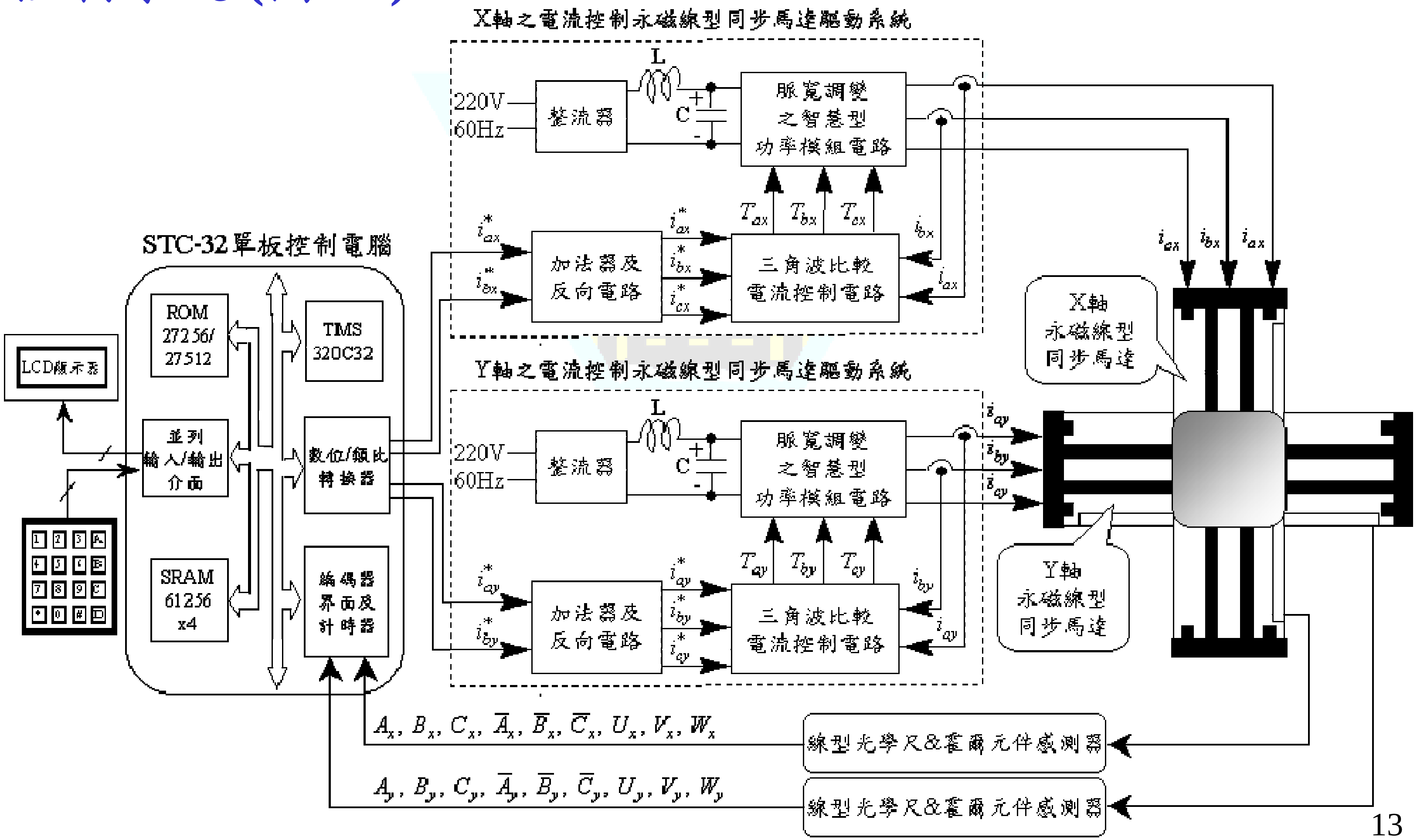


圖2.7

- 四通道ADC、12位元解析度、250KHz取樣頻率、+10V/-10V輸入
- 四通道DAC、12位元解析度、100KHz取樣頻率、+10V/-10V輸入
- 24位元PIO，TTL準位，雙向可程式控制

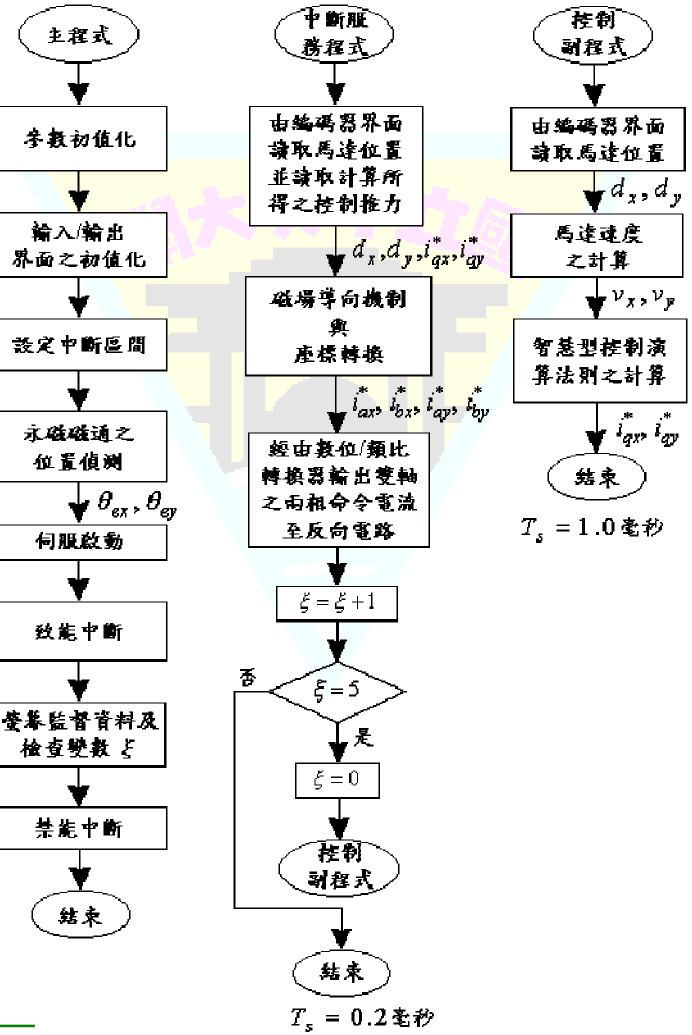
二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (9)

- 以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (圖2.8)



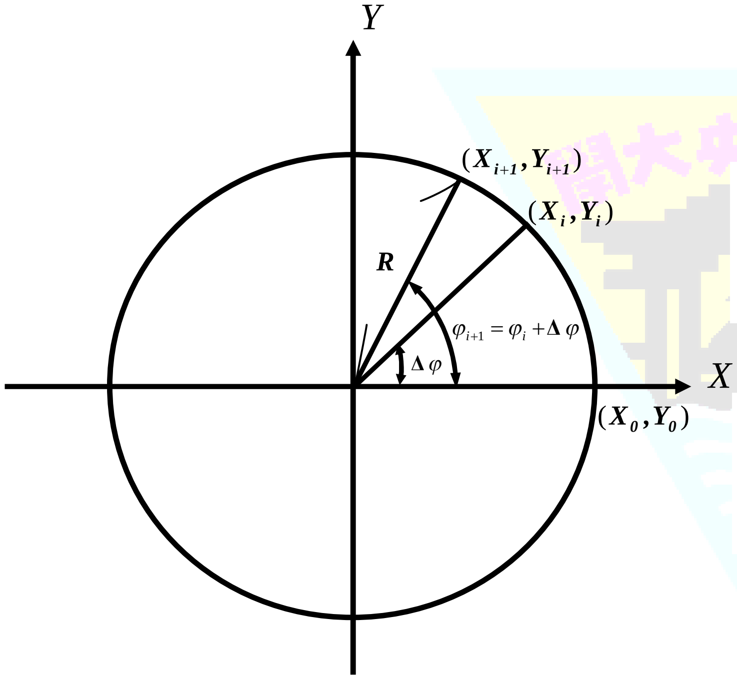
二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (10)

- X-Y平台雙軸運動控制系統之軟體發展流程 (圖2.16)

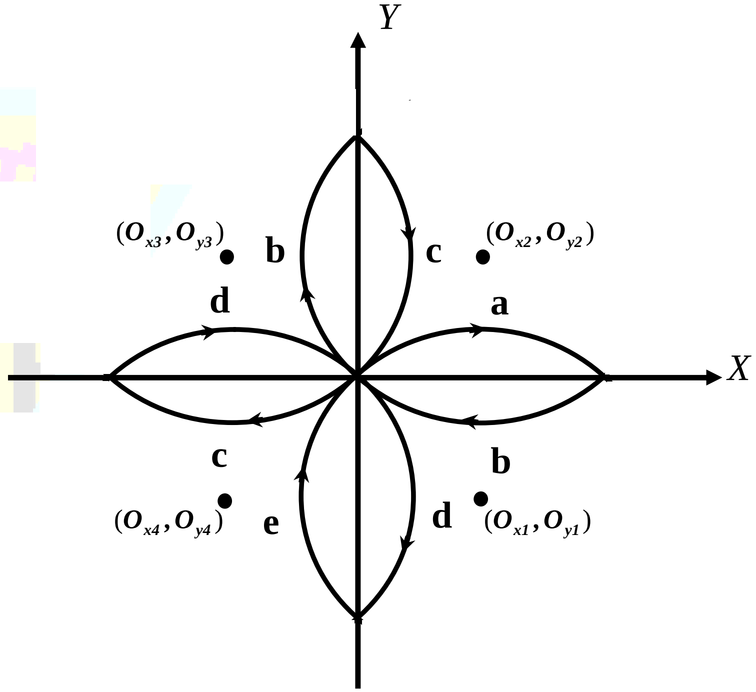


二、以浮點運算DSP為基礎之磁場導向控制X-Y平台雙軸運動控制系統 (11)

❑ 軌跡規劃 (圖2.18)



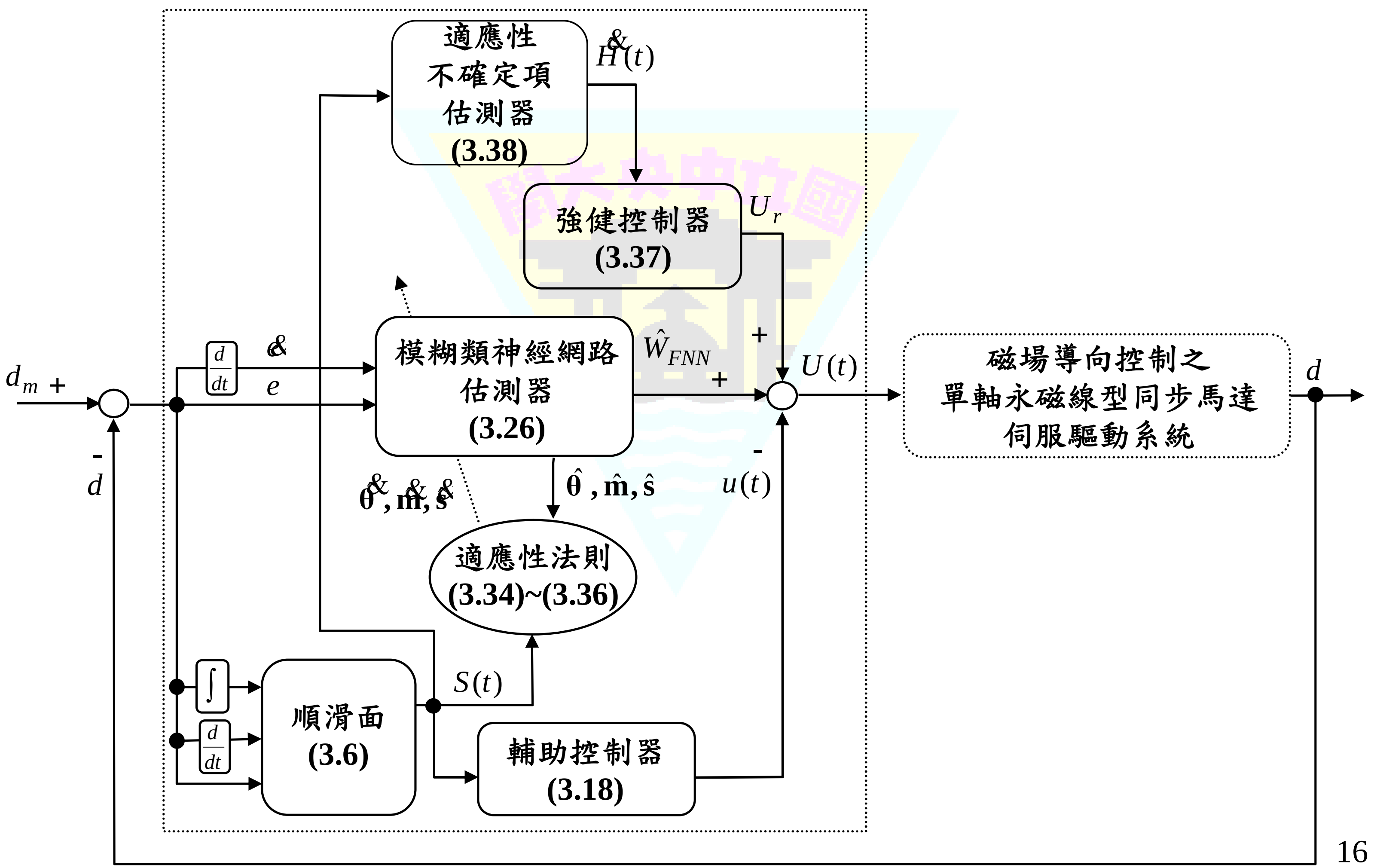
(a) 圓形軌跡



(b) 四瓣葉形軌跡

三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (1)

❑ 控制系統架構圖 (圖3.1)



三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (2)

❑ 演算法

$\boxed{F_{ei} = K_{fi} i_{qi}^{*}}$ $\boxed{F_{ei} = M_i p v_i + D_i v_i + F_{Li} + f_i(v)}$

- 根據(2.27)式與(2.29)式，每一組磁場導向控制之永磁線型同步馬達伺服驅動系統可改寫如下：

$$\ddot{d}(t) = -\frac{D}{M}\dot{d}(t) + \frac{K_f}{M} i_q^{*}(t) - \frac{1}{M}\left(F_L + f(v)\right)$$

$$\triangleq A_p \dot{d}(t) + B_p U(t) + C_p\left(F_L + f(v)\right) \tag{3.1}$$

- 考慮系統的參數發生變動或是外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力加入系統，則控制系統的動態方程式可改寫如下：

$$\ddot{d}(t) = \left(A_n + \Delta A\right)\dot{d}(t) + \left(B_n + \Delta B\right)U(t) + \left(C_n + \Delta C\right)\left(F_L + f(v)\right)$$

$$= A_n \dot{d}(t) + B_n U(t) + L(t) \tag{3.3}$$

- $L(t)$ 稱為總集不確定項，定義如下：

$$L(t) = \Delta A \dot{d}(t) + \Delta B U(t) + \left(C_n + \Delta C\right)\left(F_L + f(v)\right) \tag{3.4}$$

三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (3)

- 為達到控制目的，定義追隨誤差 $e(t)=d_m(t)-d(t)$ 且定義順滑面如下：

$$S(t)=\left(\frac{d}{dt}+\lambda\right)^2\int_0^t e(\tau)d\tau \qquad (3.6)$$

- 當 $\dot{S}(t)\big|_{U(t)=U_{eq}(t)}=0$ 時，可推導出理想等效控制力如下所示：

$$U_{eq}(t)=B_n^{-1}[\ddot{d}_m(t)-A_n\dot{d}(t)-L(t)+2\lambda\dot{e}(t)+\lambda^2 e(t)] \qquad (3.10)$$

- 當系統的參數受到干擾或是未知的情形下，(3.10)式並不能確保系統的性能同時控制系統的穩定性可會受到破壞。

- 為了確保包含不確定項在內的系統穩定性，將利用計算轉矩控制的技巧設計強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統。

❑ 計算轉矩控制設計

- 理想等效控制法則可改寫如下：

$$-B_n^{-1}\dot{S}(t) = B_n^{-1}A_nS(t) - U_{eq}(t) + W \tag{3.12}$$

$$W = B_n^{-1}\left\{-A_n\left[\dot{d}_m(t) + 2\lambda e(t) + \lambda^2\int_0^t e(\tau)d\tau\right] - L(t) + \ddot{d}(t)\right\} \tag{3.13}$$

- 利用計算轉矩控制法則來近似理想等效控制法則，假設其設計如下：

$$U_{eq}(t) = W - u(t) \tag{3.14}$$

$u(t)$ 為輔助控制器，設計成PID控制器，如下所示：

$$u(t) = -[K_S\dot{e}(t) + K_P e(t) + K_I\int_0^t e(\tau)d\tau] \tag{3.16}$$

- 若 $K_P = K_S \times 2\lambda$ ； $K_I = K_S \times \lambda^2$

$$u(t) = -K_S[\dot{e}(t) + 2\lambda e(t) + \lambda^2\int_0^t e(\tau)d\tau] = -K_S S(t) \tag{3.18}$$

- 閉迴路系統可改寫如下：

$$-B_n^{-1}\dot{S}(t)=B_n^{-1}A_nS(t)-K_SS(t)=(B_n^{-1}A_n-K_S)S(t) \tag{3.19}$$

- 定義Lyapunov函數如下：

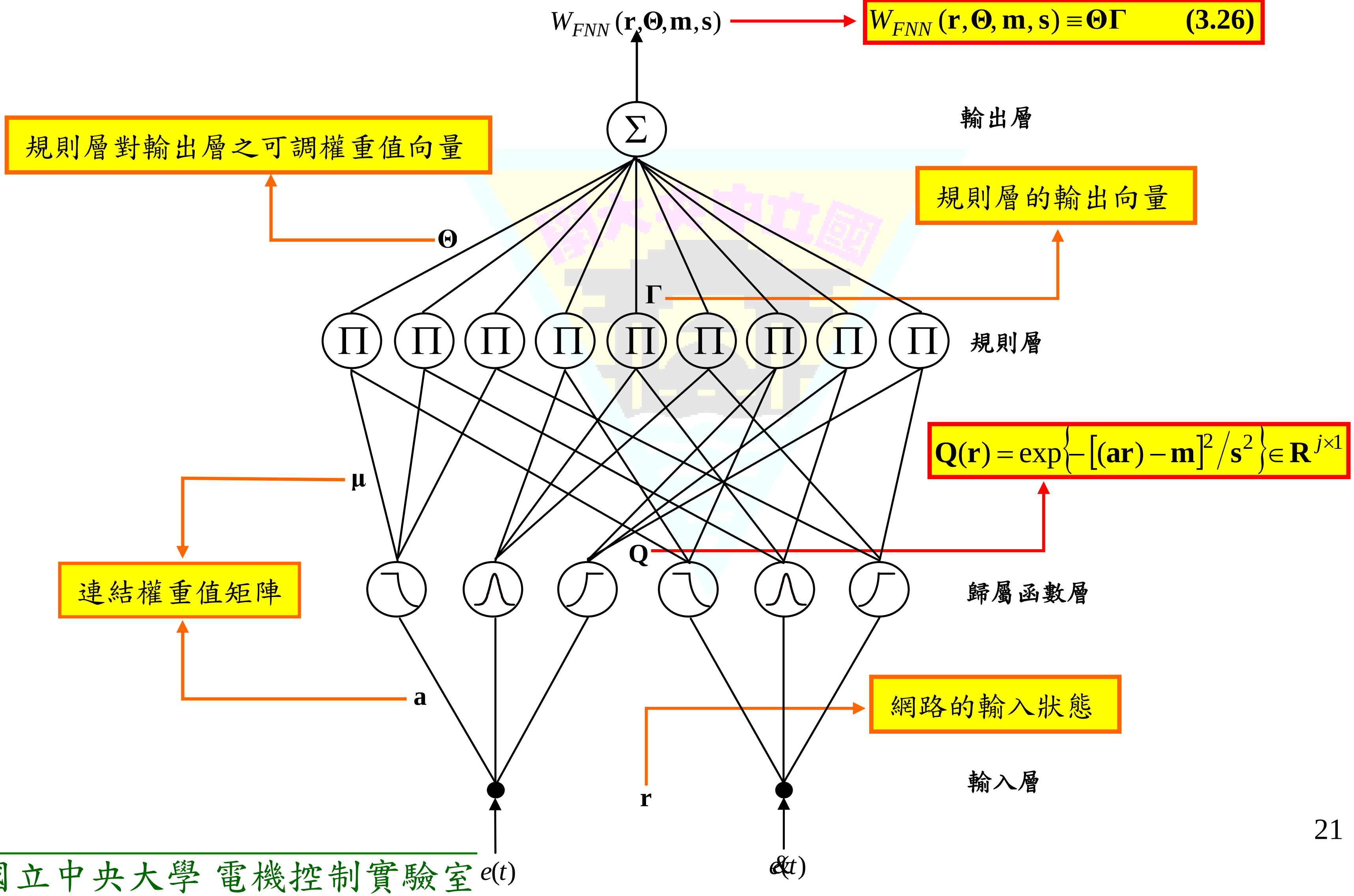
$$V_1\left(S(t)\right)=-\frac{1}{2}S(t)B_n^{-1}S(t) \tag{3.20}$$

- 利用Lyapunov穩定理論和巴巴拉輔助定理(Barbalet's Lemma)可驗證計算轉矩控制的設計是穩定的。
- 從(3.13)式可知非線性函數包含了系統的參數變化、外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力等不確定項的影響。系統的參數變化很難估測，同時實際系統的外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力的正確值也難以得知，故(3.14)式所示之控制法則亦無法實現在實際應用中。

$$\boxed{W=B_n^{-1}\left\{-A_n\left[\dot{d}_m(t)+2\lambda e(t)+\lambda^2\int_0^t e(\tau)d\tau\right]-L(t)+\dot{d}(t)\right\}}$$

$$\boxed{U_{eq}(t)=W-u(t)}$$

❑ 四層之模糊類神經網路 (圖3.2)



三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (7)

❑ 強健性模糊類神經網路設計

- 設計一計算轉矩控制器如下式來近似非線性函數：

$$U(t) = \hat{W} - u(t) \tag{3.24}$$

- 智慧型控制器是用來學習非線性函數W且定義如下：

$$\hat{W} = \hat{W}_{FNN} + U_r \tag{3.25}$$

$\hat{W}_{FNN}$ 為模糊類神經網路控制器的輸出；U_r 為強健控制器。

- 根據普遍的近似特性可知，存在一個最佳模糊類神經網路控制器以學習非線性函數，如下所示：

$$W = W^*_{FNN}(\mathbf{r}, \mathbf{\Theta}^*, \mathbf{m}^*, \mathbf{s}^*) + \varepsilon = \mathbf{\Theta}^* \mathbf{\Gamma}^* + \varepsilon \tag{3.27}$$

ε 為最小重建誤差

- 將(3.25)式重新改寫為下式：

$$\hat{W} = \hat{W}_{FNN}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{\Theta}}, \hat{\mathbf{m}}, \hat{\mathbf{s}}) + U_r = \hat{\mathbf{\Theta}} \hat{\mathbf{\Gamma}} + U_r \tag{3.28}$$

三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (8)

- 利用(3.27)式減去(3.28)式，利用泰勒展開的技巧將歸屬函數轉換成部分線性的形式，可得近似誤差如下：

$$\tilde{W} = \tilde{\mathbf{\Theta}}\hat{\mathbf{\Gamma}} + \hat{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{m}}\tilde{\mathbf{m}} + \hat{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{s}}\tilde{\mathbf{s}} - U_r + H \tag{3.32}$$

$H = \tilde{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{m}}\tilde{\mathbf{m}} + \tilde{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{s}}\tilde{\mathbf{s}} + \mathbf{\Theta}^{*}\boldsymbol{\mu}\mathbf{O}_{\mathbf{n}\nu} + \varepsilon$ 為不確定項

- 系統的動態方程式可改寫如下：

$$-B_n^{-1}\dot{S}(t) = B_n^{-1}A_n S(t) + u(t) + (\tilde{\mathbf{\Theta}}\hat{\mathbf{\Gamma}} + \hat{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{m}}\tilde{\mathbf{m}} + \hat{\mathbf{\Theta}}\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{s}}\tilde{\mathbf{s}} - U_r + H) \tag{3.33}$$

- 定義Lyapunov函數如下：

$$\begin{aligned} V_2\left(S(t), \tilde{H}(t), \tilde{\mathbf{\Theta}}, \tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\mathbf{s}}\right) &= -\frac{1}{2}S(t)B_n^{-1}S(t) + \frac{1}{2\alpha_1}\left(\tilde{\mathbf{\Theta}}\tilde{\mathbf{\Theta}}^T\right) + \frac{1}{2\alpha_2}\tilde{\mathbf{m}}^T\tilde{\mathbf{m}} \\ &\quad + \frac{1}{2\alpha_3}\tilde{\mathbf{s}}^T\tilde{\mathbf{s}} + \frac{1}{2\alpha_4}\tilde{H}^2(t) \end{aligned} \tag{3.39}$$

三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (9)

- 若模糊類神經網路的適應性法則如(3.34)式至(3.36)式，且強健性控制器的設計如(3.37)式，其適應性估測法則如(3.38)式，則可保證所設計的強健性模糊類神經模糊網路滑動模態控制系統的穩定性。

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}} = \alpha_1 S(t)\hat{\boldsymbol{\Gamma}}^T \tag{3.34}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{m}}} = \alpha_2 \left(S(t)\hat{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{m}}\right)^T \tag{3.35}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{s}}} = \alpha_3 \left(S(t)\hat{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{\Gamma}_{\mathbf{s}}\right)^T \tag{3.36}$$

$$U_r = \hat{H}(t) \tag{3.37}$$

$$\dot{\hat{H}}(t) = \alpha_4 S(t) \tag{3.38}$$

三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (10)

❑ 性能量測

- 為了比較各控制器的性能，定義三個值來測量各個控制器的控制性能，分別為：

➢ 追隨誤差之最大值 ：

$$T_M = \max_k \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2}, \text{ where } T_i(k) = d_{mi}(k) - d_i(k), i = x, y \qquad (3.44)$$

➢ 追隨誤差之平均值 ：

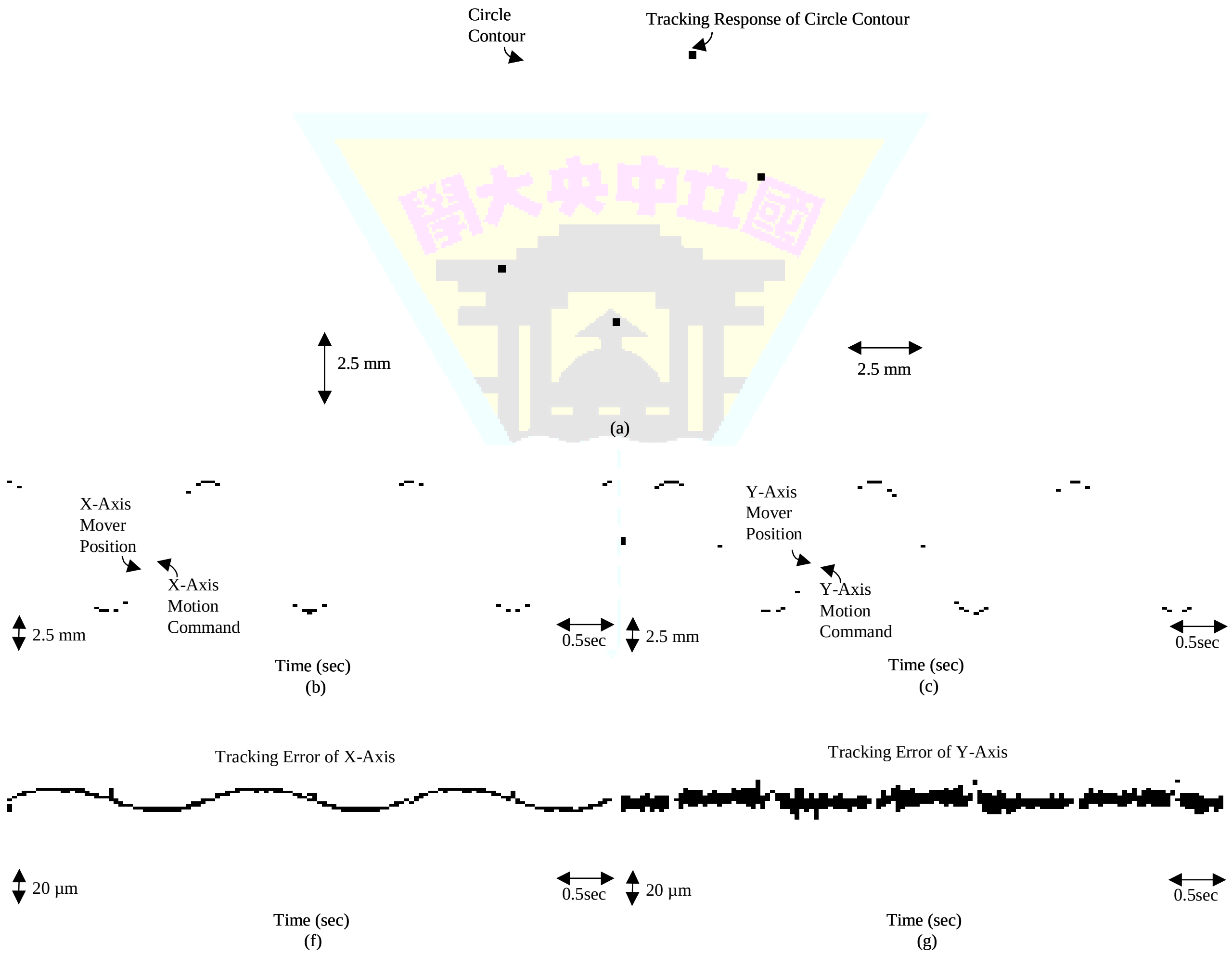
$$m = \sum_{k=1}^{n} T(k)/n, \text{ where } T(k) = \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2} \qquad (3.45)$$

➢ 追隨誤差之標準差 ：

$$T_S = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (T(k) - m)^2 / n} \qquad (3.46)$$

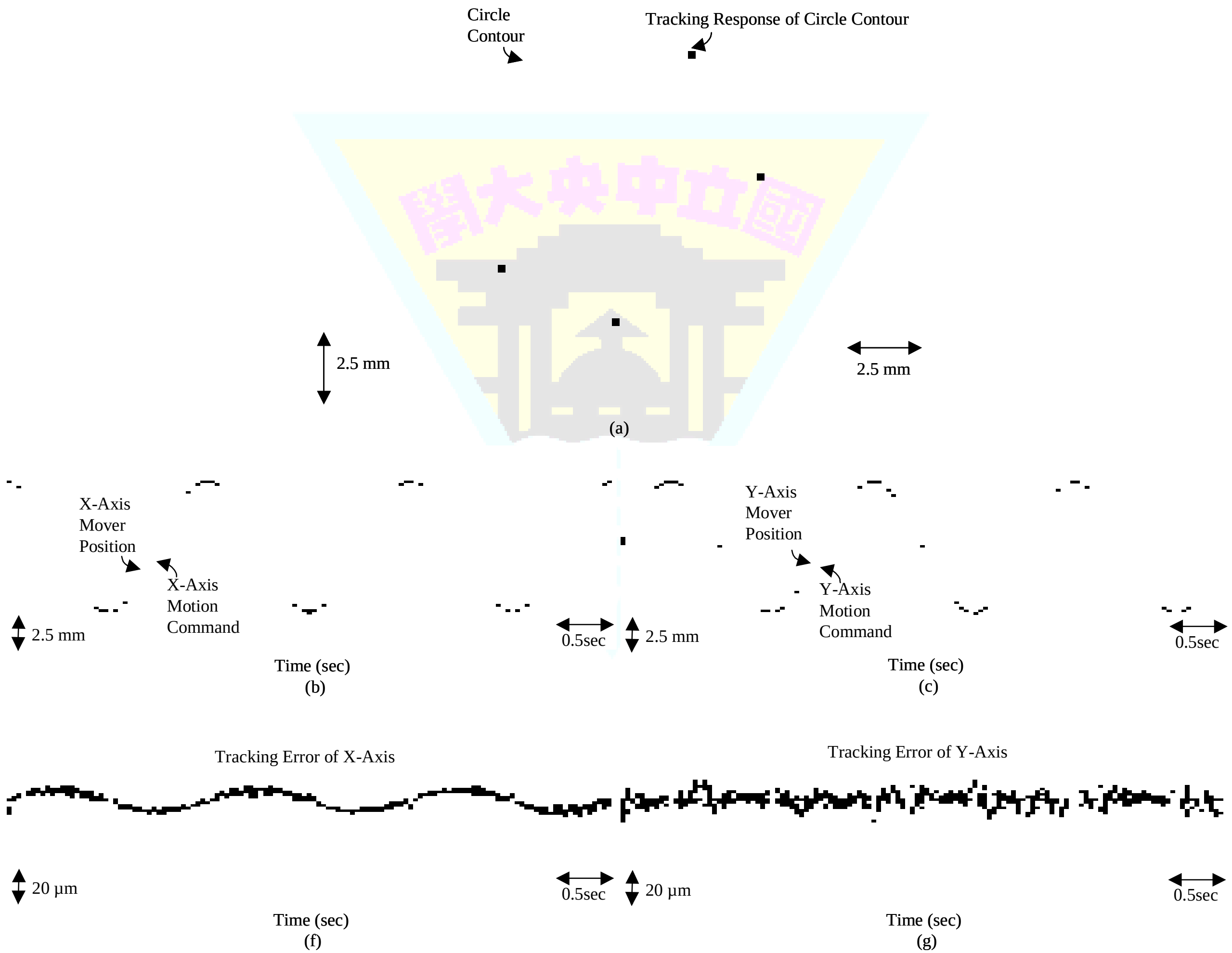
三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (11)

- 圓形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖3.7)

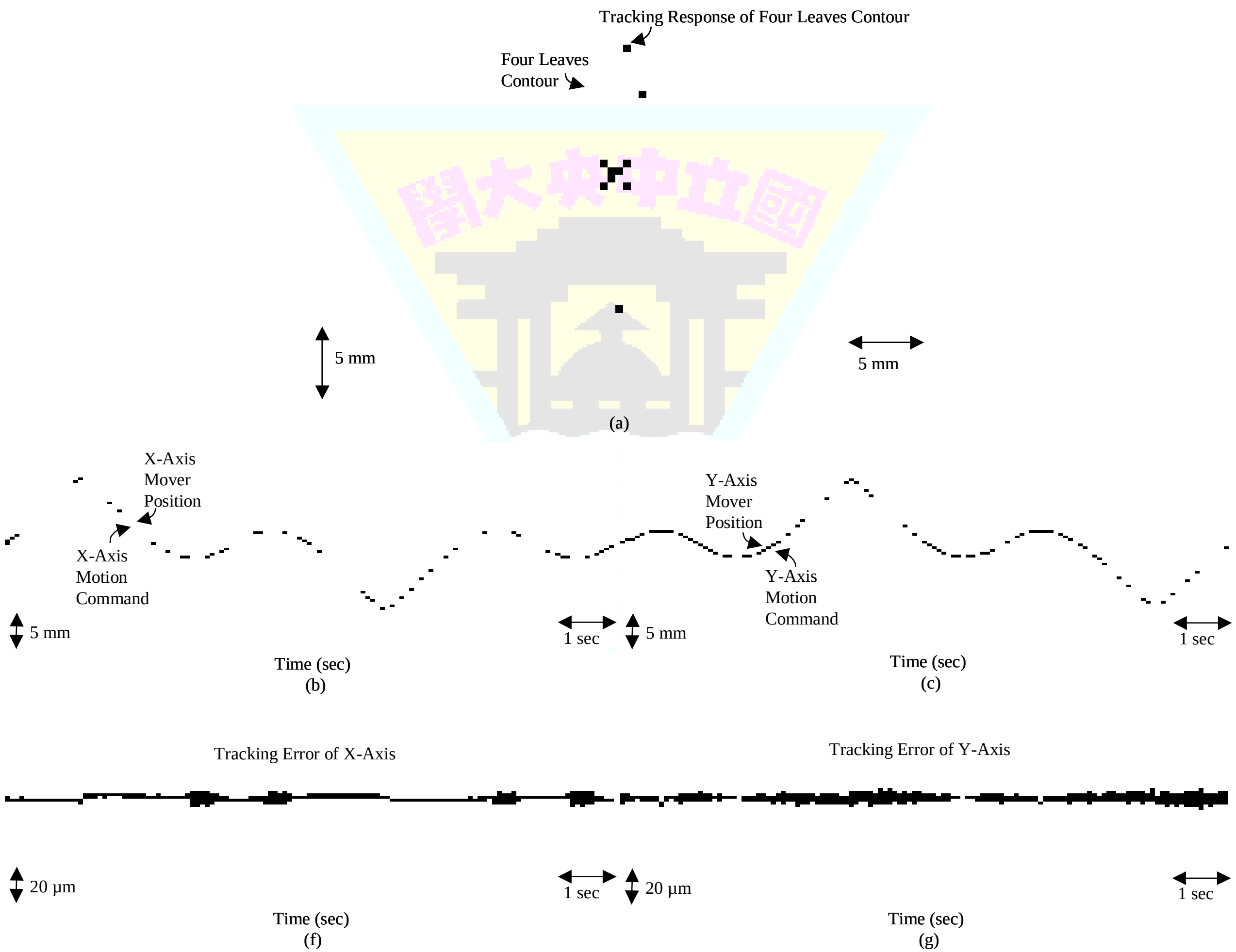


三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (12)

❑ 圓形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖3.8)

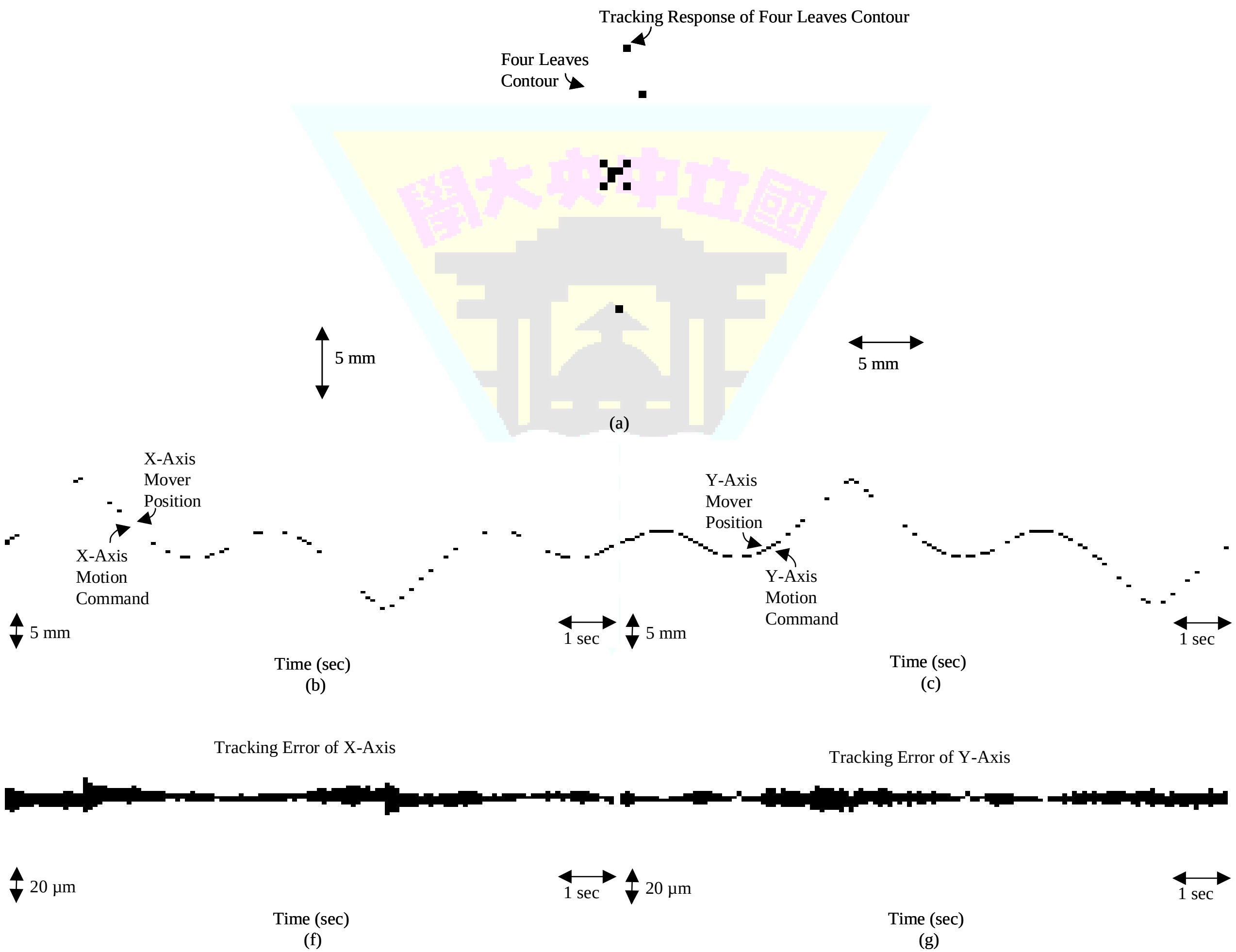


四瓣葉形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖3.9)



三、強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統 (14)

- 四瓣葉形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖3.10)



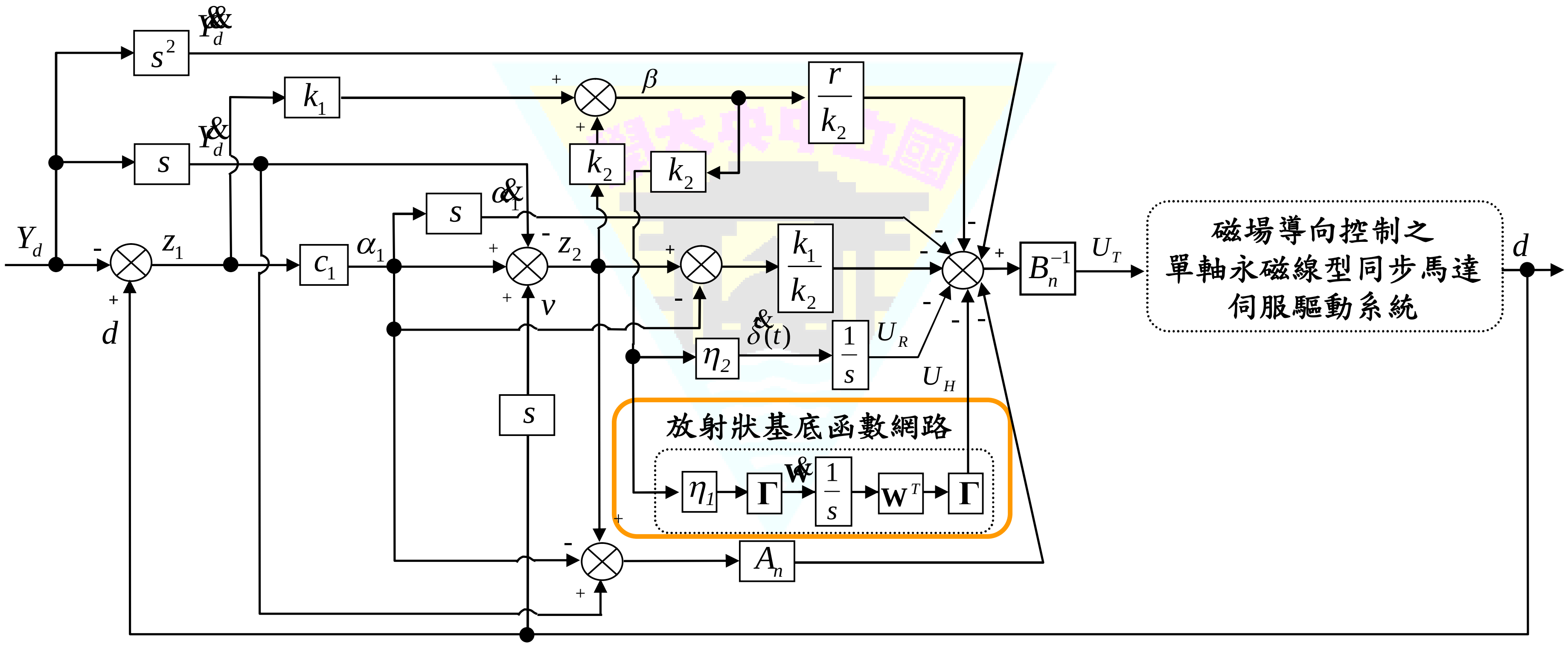
❑ 實作性能量測表 (表3.5)

表 3.5：強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統之實作性能量測表

追隨誤差 \ μm \ 軌跡 & 狀況	圓形 狀況一	四辦葉形 狀況一	圓形 狀況二	四辦葉形 狀況二
最大值	17.2148	28.3535	23.3007	33.4330
平均值	6.8997	3.5212	14.3890	10.0130
標準差值	2.7953	2.5082	7.3447	5.9004

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (1)

❑ 控制系統架構圖 (圖4.1)



四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (2)

❑ 演算法

$F_{ei} = K_{fi} i_{qi}^{*}$

$F_{ei} = M_i p v_i + D_i v_i + F_{Li} + f_i(v)$

- 根據(2.27)式與(2.29)式，考慮有參數變化、外來干擾包含交叉耦合干擾和摩擦力的影響下，馬達伺服驅動系統動態方程式可表示如下：

$$\dot{X}_U = X_P \tag{4.2}$$

$$\dot{X}_P = (A_n + \Delta A) X_p + (B_n + \Delta B) U_T + C_p [F_L + f(v)] \tag{4.3}$$

$$Y = X_U \tag{4.4}$$

- 將(4.3)式改寫成下列所示：

$$\dot{X}_P = A_n X_P + B_n U_T + H \tag{4.5}$$

$H \equiv \Delta A X_P + \Delta B U_T + C_p [F_L + f(v)]$ 為總集不確定項

- 總集不確定量可以藉由放射狀基底函數網路不確定量估測器來估測。
- 因為在實際數位訊號處理的取樣時間與總集不確定量變化相較之下夠短，因此假設在估測過程中總集不確定量是常數。

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (3)

步驟一：

- 定義追隨誤差為：

$$z_1 = Y - Y_d \tag{4.6}$$

其微分為：

$$\dot{z}_1 = X_P - \dot{Y}_d \tag{4.7}$$

- 定義穩定函數為：

$$\alpha_1 = c_1 z_1 \tag{4.8}$$

- 第一個Lyapunov函數的選擇為：

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \tag{4.9}$$

- 定義 $z_2 = X_P - \dot{Y}_d + \alpha_1$，對 V_1 取微分

$$\dot{V}_1 = z_1(X_p - \dot{Y}_d) = z_1(z_2 - \alpha_1) = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 \tag{4.10}$$

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (4)

❑ 步驟二：

- 對 z_2 微分，且展開如下

$$\dot{z}_2 = \dot{X}_p - \ddot{Y}_d + \dot{\alpha}_1 = A_n X_p + B_n U_T + H - \ddot{Y}_d + \dot{\alpha}_1 \tag{4.11}$$

- 假設總集不確定量為有界，也就是 $|H| \le \rho$ 。
- 定義Lyapunov函數為

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\beta^2 \tag{4.12}$$

$\beta = k_1 z_1 + k_2 z_2$ 定義為順滑面

- 步階迴歸滑動模態控制法則可設計如下：

$$U_T = B_n^{-1}[-\frac{k_1}{k_2}(z_2 - \alpha_1) - A_n(z_2 + \dot{Y}_d - \alpha_1) - U_H + \ddot{Y}_d - \dot{\alpha}_1 - \frac{r}{k_2}\beta] \tag{4.15}$$

- 克服總集不確定項影響的強健控制器定義如下：

$$U_H = \rho\,\mathrm{sgn}(\beta) \tag{4.16}$$

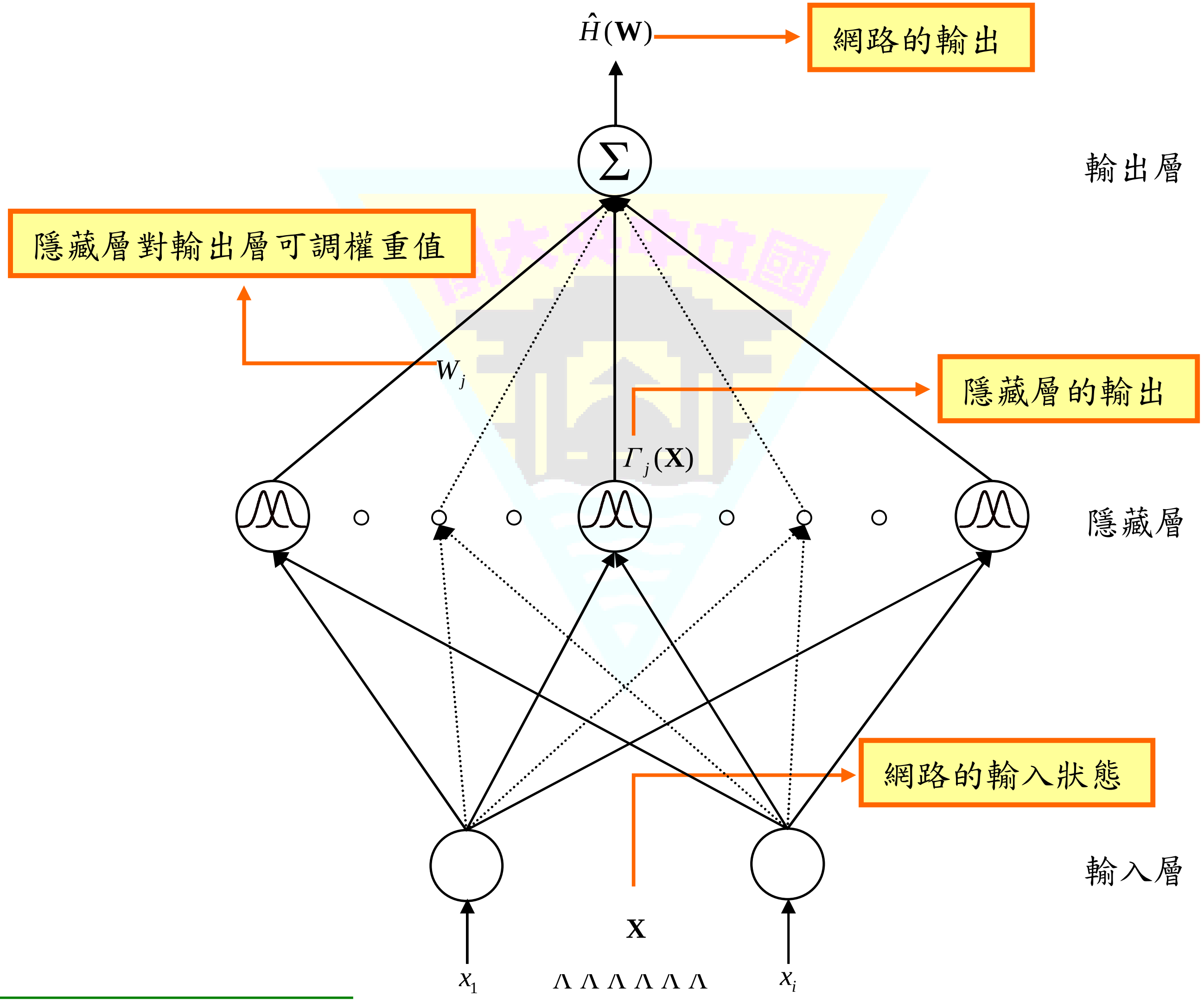
四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (5)

- 步驟三： $U_H = \rho\,\mathrm{sgn}(\beta)$

  - 在實際的應用上，總集不確定量H為未知，而邊界值是相當難計算的，且(4.16)式所設計之強健控制器會造成控制力的切跳現象。
  - 利用隱藏層具有 N 個接納範疇單位的放射狀基底函數網路，設計不確定項估測器來調節總集不確定量的值，且利用加權總和來計算網路的輸出。
  - 選擇高斯函數作為隱藏層的接納範疇函數。

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (6)

❑ 放射狀基底函數網路結構圖 (圖4.2)



四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (7)

- 網路輸出的形式可表示如下：

$$\hat{H}_k = \sum_{j=1}^{N} W_{kj}\Gamma_j, \quad k=1 \tag{4.25}$$

$$\Gamma_j(\mathbf{X}) = \exp[-(\mathbf{X}-\mathbf{M}_j)^T \mathbf{\Sigma}_j (\mathbf{X}-\mathbf{M}_j)], \ j=1,2,\mathrm{K}, N \tag{4.26}$$

- 選擇位置追隨誤差及其微分做為網路的輸入，而網路的輸出為總集不確定項的估測值 $\hat{H}$ 。放射狀基底函數網路的輸出可以重寫如下：

$$\hat{H}(\mathbf{W}) = \mathbf{W}^T \mathbf{\Gamma} \tag{4.27}$$

- 定義最小重建誤差如下所示：

$$\delta = H - \hat{H}(\mathbf{W}^*) \tag{4.28}$$

- 選取Lyapunov函數為

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\eta_1}(\mathbf{W}^* - \mathbf{W})^T(\mathbf{W}^* - \mathbf{W}) + \frac{1}{2\eta_2}(\delta - \hat{\delta})^2 \tag{4.29}$$

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (8)

- 智慧型步階迴歸滑動模態控制法則如下：

$$U_T = B_n^{-1}[-\frac{k_1}{k_2}(z_2 - c_1 z_1) - A_n(z_2 + \dot{Y}_d - \alpha_1) + \ddot{Y}_d - \dot{\alpha}_1 - \frac{r}{k_2}\beta]$$

$$- B_n^{-1}[U_H - U_R] \qquad (4.31)$$

- 強健控制器重新設計成：

$$U_H = \hat{H}(\mathbf{W}) \qquad (4.32)$$

- 補償控制器則設計成：

$$U_R = \hat{\delta} \qquad (4.33)$$

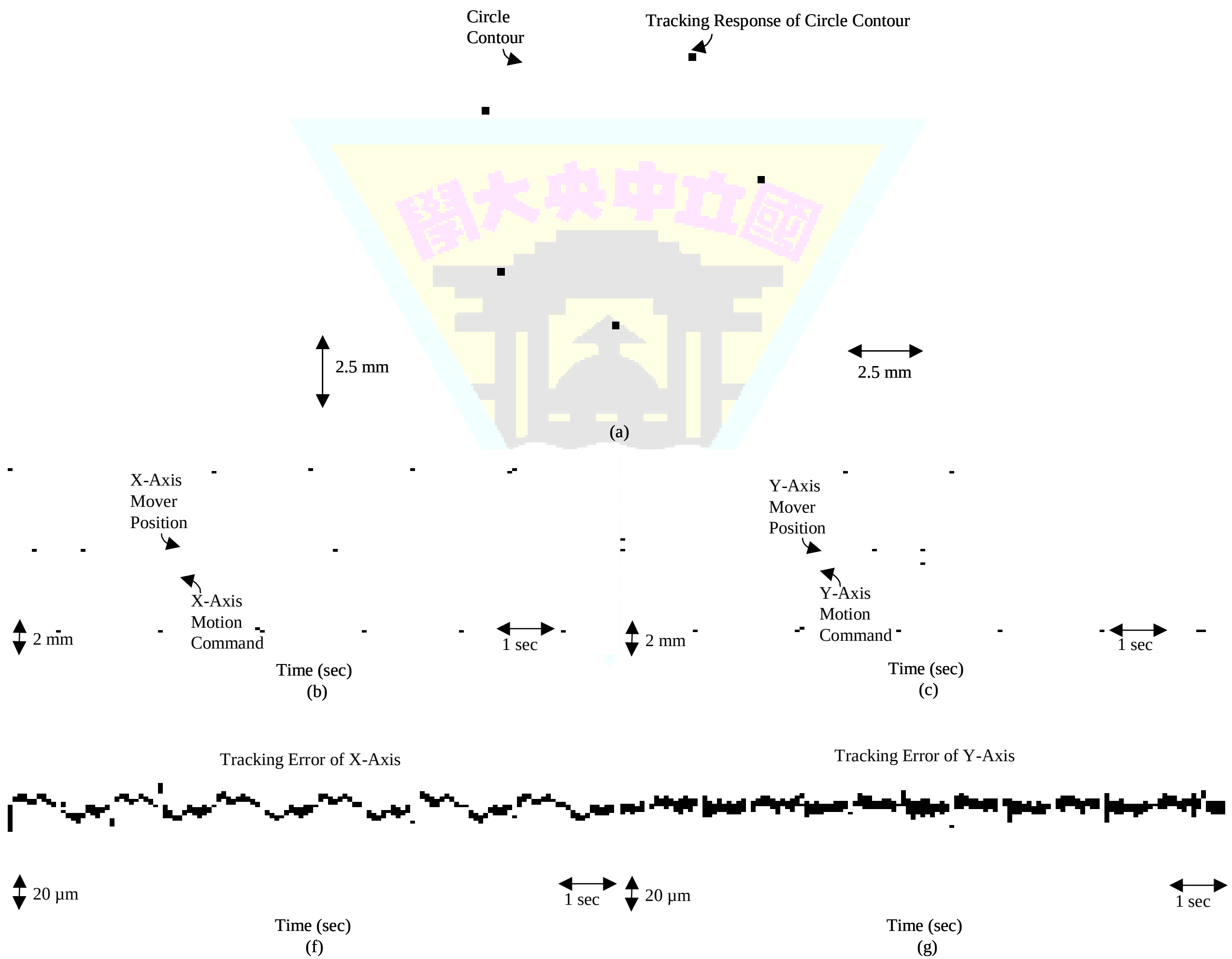
- 適應性法則選取如下：

$$\dot{\mathbf{W}} = \eta_1 k_2 \beta\, \mathbf{\Gamma} \qquad (4.35)$$

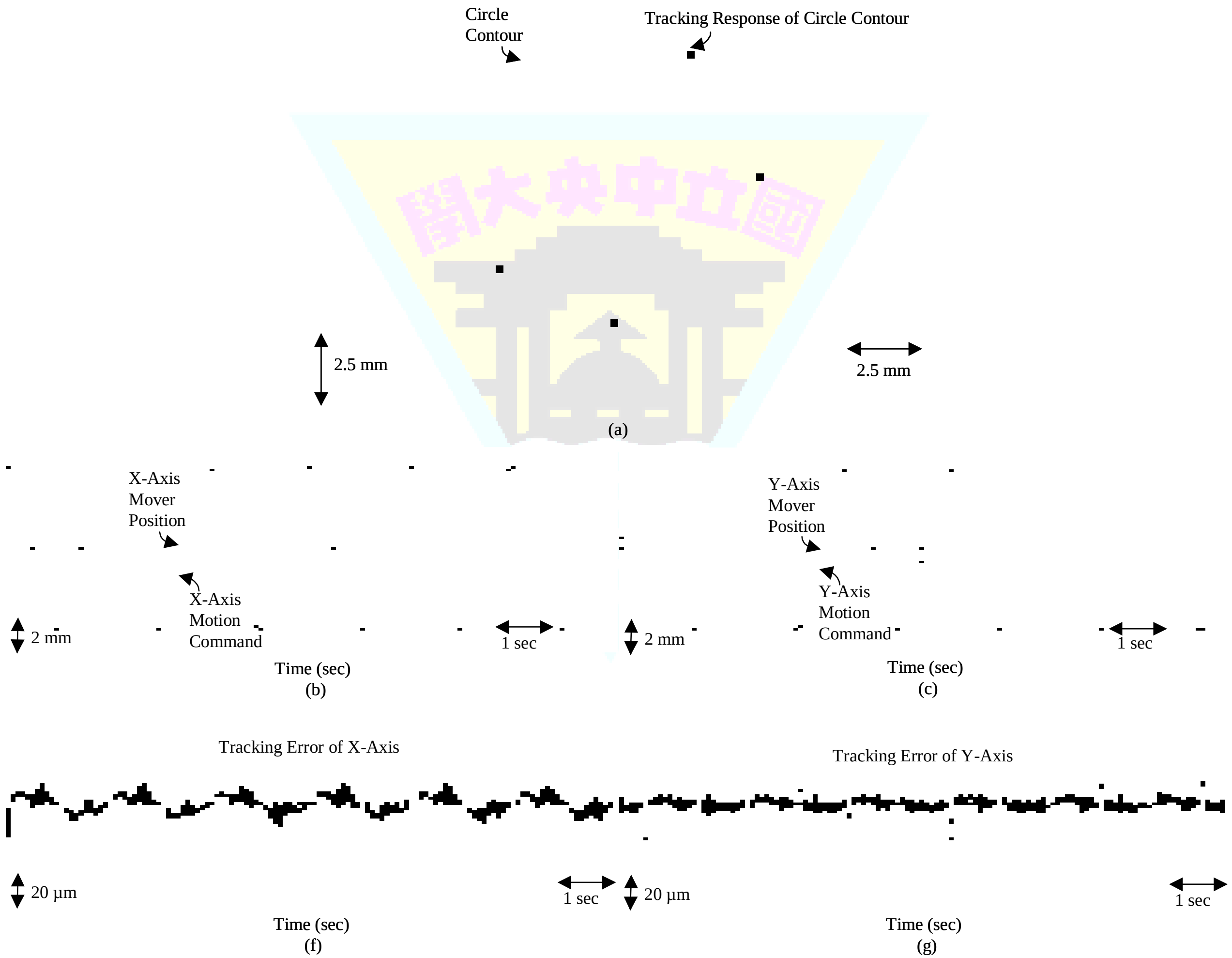
$$\dot{\delta} = \eta_2 k_2 \beta \qquad (4.36)$$

四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (9)

- 圓形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖4.7)

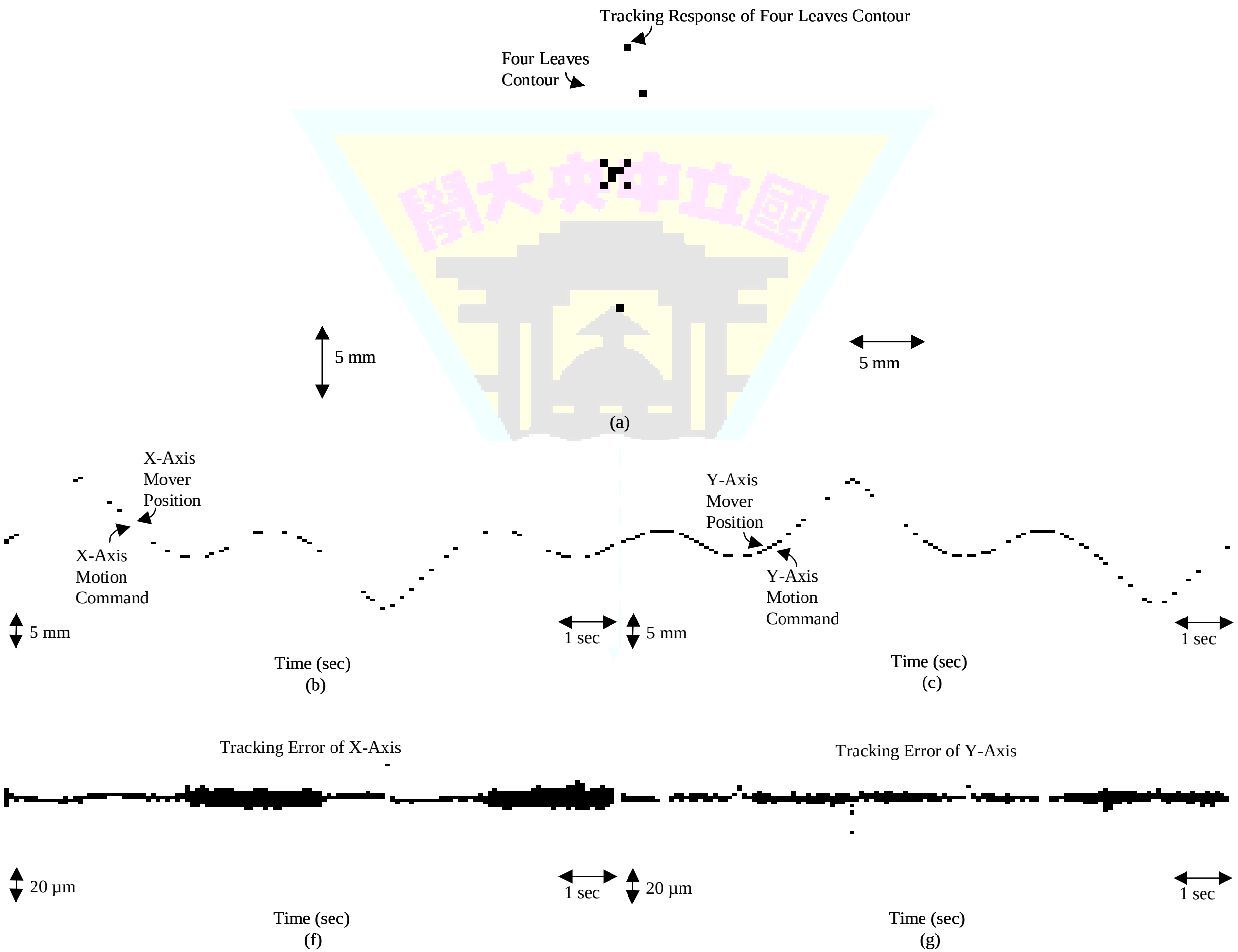


圓形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖4.8)

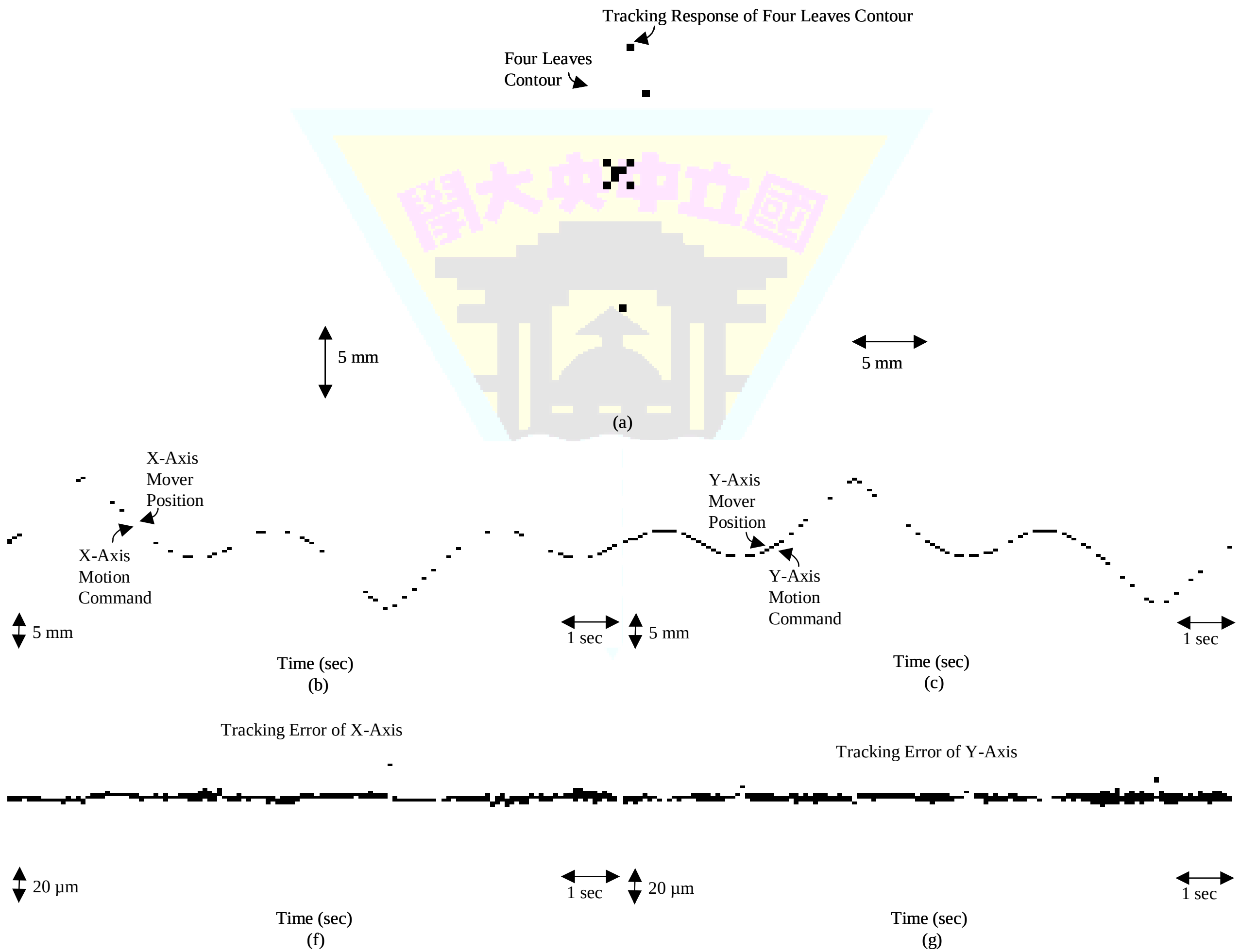


四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (11)

- 四瓣葉形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖4.9)



❑ 四瓣葉形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖4.10)



四、利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統 (13)

❑ 實作性能量測表 (表4.4)

表 4.4：智慧型步階迴歸滑動模態控制系統之實作性能量測表

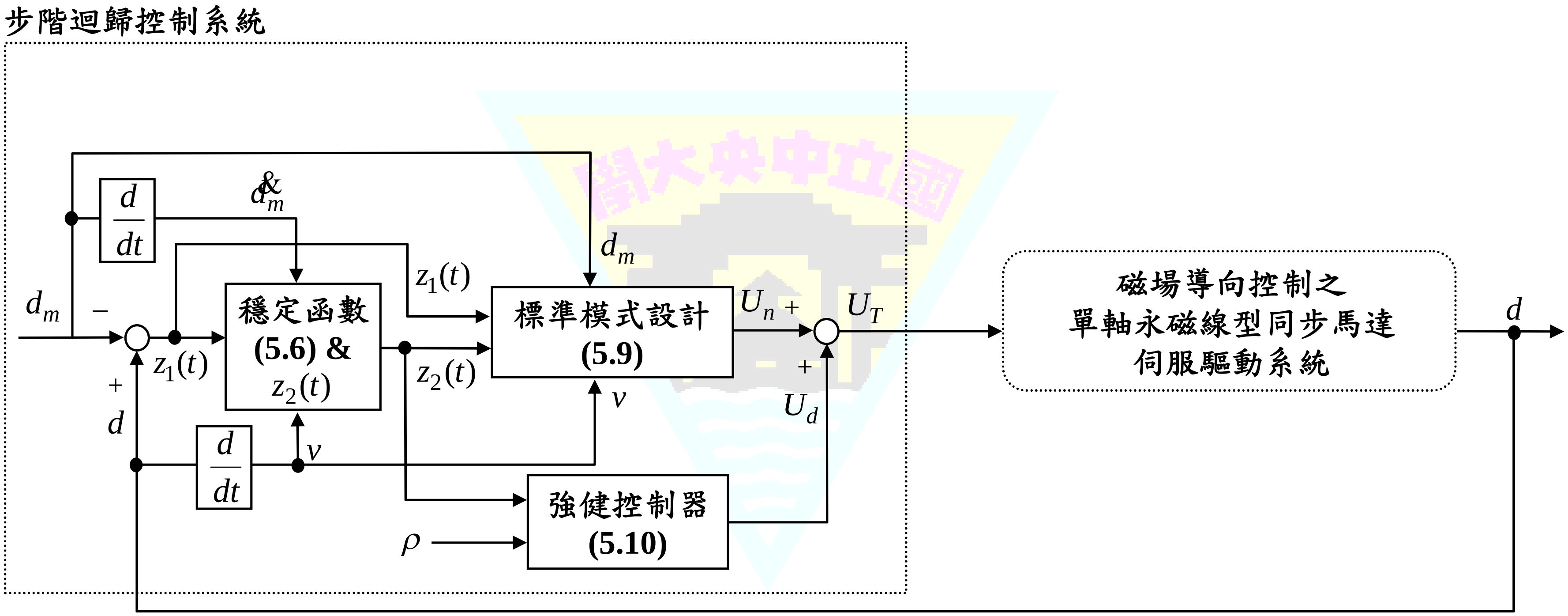
追隨誤差 \ μm \ 軌跡 & 狀況	圓形 狀況一	四瓣葉形 狀況一	圓形 狀況二	四瓣葉形 狀況二
最大值	25.4183	29.4430	29.2761	36.5005
平均值	6.5715	3.4386	6.5897	2.9953
標準差值	4.1196	3.4411	4.5985	3.2559

表 3.5：強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統之實作性能量測表

追隨誤差 \ μm \ 軌跡 & 狀況	圓形 狀況一	四瓣葉形 狀況一	圓形 狀況二	四瓣葉形 狀況二
最大值	17.2148	28.3535	23.3007	33.4330
平均值	6.8997	3.5212	14.3890	10.0130
標準差值	2.7953	2.5082	7.3447	5.9004

五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (1)

❑ 步階迴歸控制系統架構圖 (圖5.1)



五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (2)

❑ 步階迴歸控制系統

- 當系統的參數發生變動或是外來干擾、交叉耦合干擾和摩擦力加入系統，馬達動態方程式可表示如下：

$$\ddot{d}(t) = (A_n + \Delta A)\dot{d}(t) + (B_n + \Delta B)U_T + (C_n + \Delta C)[F_L + f(v)]$$

$$= A_n \dot{d}(t) + B_n (U_T + H) \qquad (5.2)$$

$H \equiv B_n^{-1}\left\{\Delta A \cdot \dot{d}(t) + \Delta B \cdot U_T + (C_n + \Delta C)[F_L + f(v)]\right\}$ 為總集不確定項

- 定義追隨誤差 $z_1(t) = d(t) - d_m(t)$

- 定義穩定函數 $\alpha_1(t) = -k_1 z_1(t) + \dot{d}_m(t)$ (5.6)

- 定義輔助誤差 $z_2(t) = v(t) - \alpha_1(t)$

- 對 $z_2(t)$ 微分，可得

$$\dot{z}_2(t) = A_n \dot{d}(t) + B_n (U_T + H) + k_1 \dot{z}_1(t) - \ddot{d}_m(t) \qquad (5.7)$$

五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (3)

- 假設總集不確定項邊界值為 ρ，則步階迴歸控制法則可設計如下：

$$U_T = U_n + U_d \tag{5.8}$$

$$U_n = B_n^{-1}[\ddot{x}_m(t) - A_n \dot{x}(t) - k_1 \dot{z}_1(t) - k_2 z_2(t) - z_1(t)] \tag{5.9}$$

$$U_d = -\rho \operatorname{sgn}(z_2(t)) \tag{5.10}$$

U_d 為強健控制器

- 定義Lyapunov函數

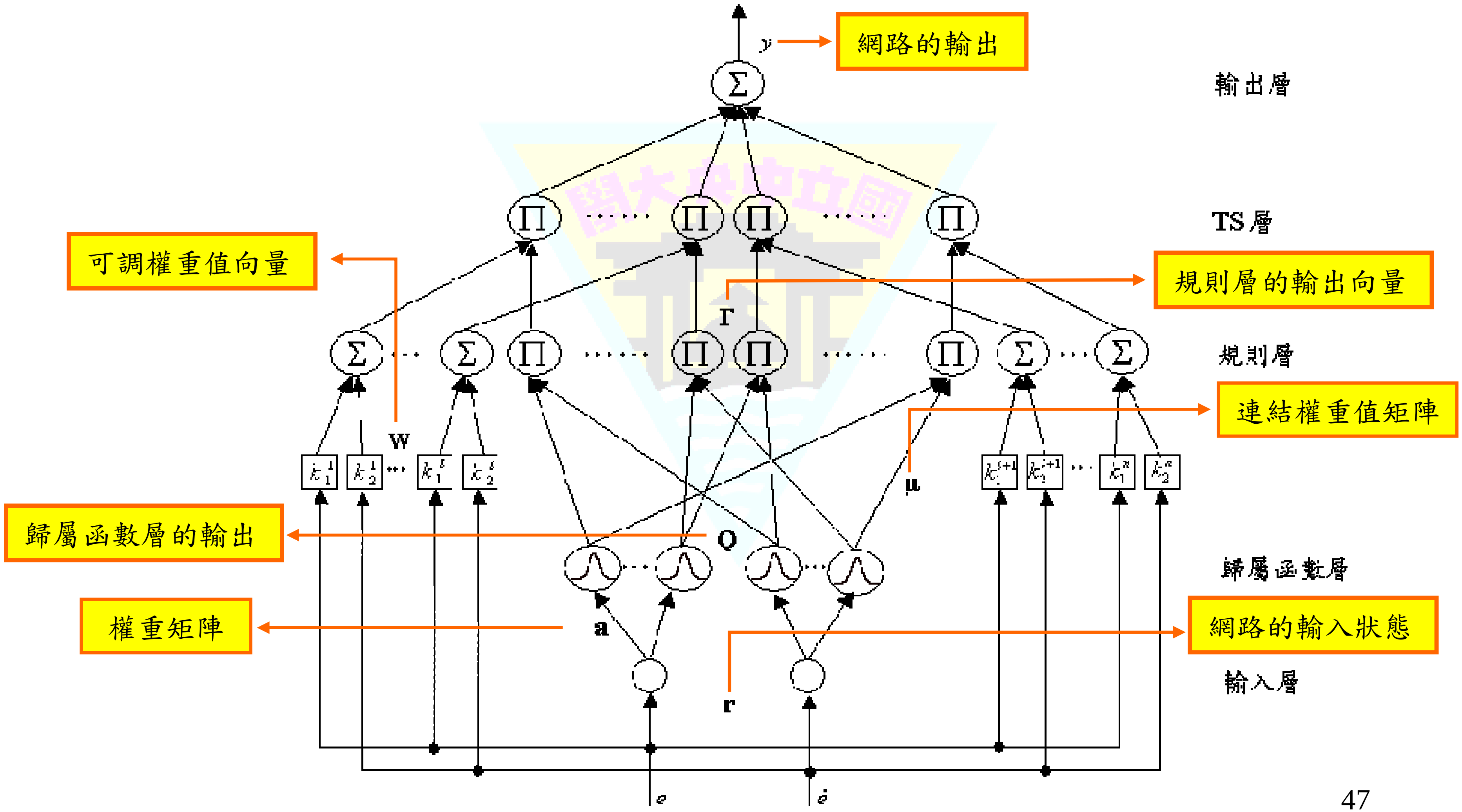
$$V_a(z_1(t), z_2(t)) = \frac{1}{2} z_1^2(t) + \frac{1}{2} z_2^2(t) \tag{5.11}$$

- 在實際應用上，總集不確定量為未知，因此上邊界是相當難計算的，且(5.10)式所設計之強健控制器會造成控制力的切跳現象。

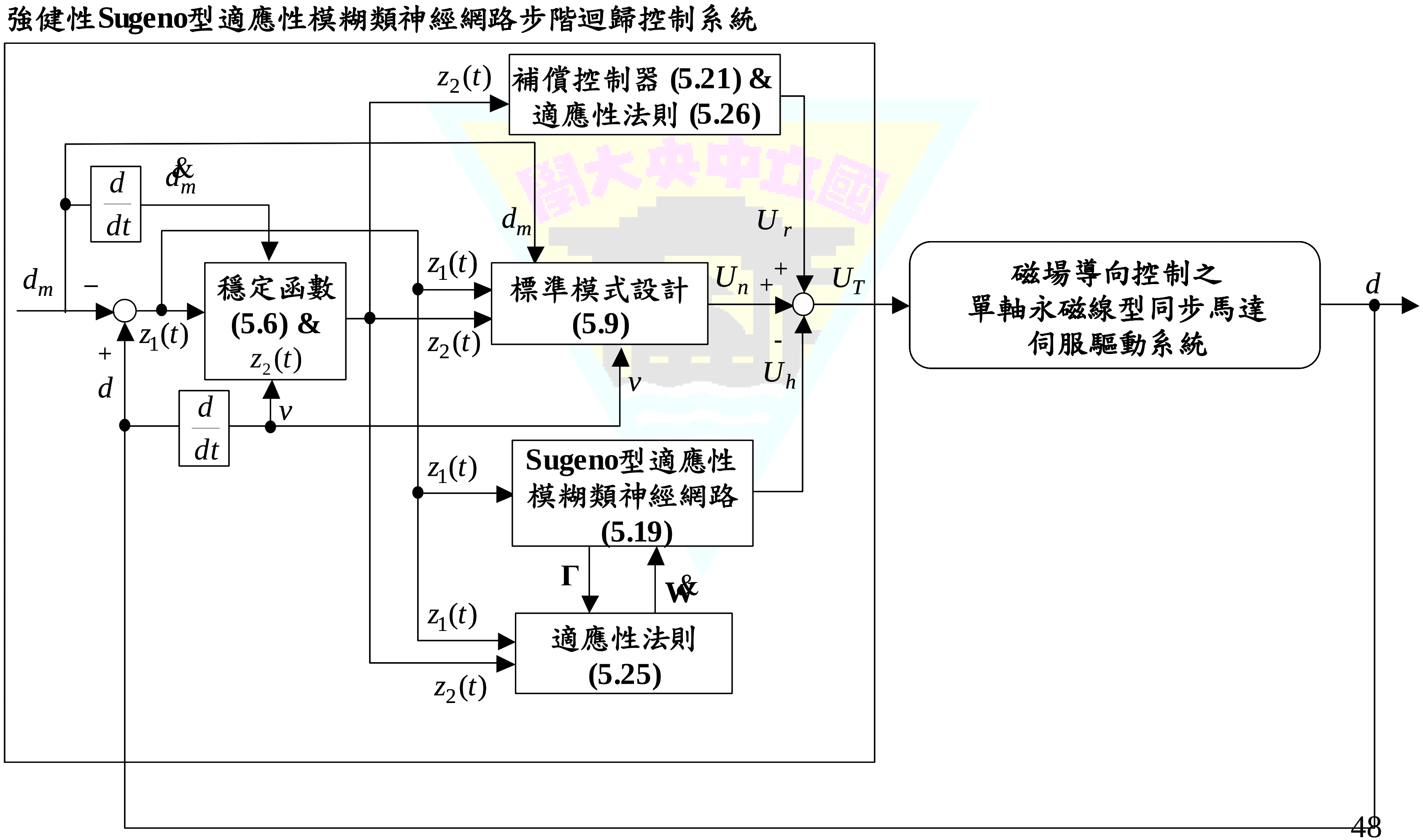
- 為了確保控制系統的穩定度不會遭受存在的不確定性的影響，提出強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統來解決此問題。

五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (4)

- 五層之Sugeno型適應性模糊類神經網路 (圖5.2)



❑強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (圖5.3)



五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (6)

- 網路的輸出型式可表示如下：

$$y = \hat{H}(z_1(t) | \mathbf{W}) \equiv \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{W} \mathbf{r} \tag{5.17}$$

- 定義最小重建誤差 δ 如下所示：

$$\delta = H - H^*(z_1(t) | \mathbf{W}^*) \tag{5.18}$$

- 強健控制器可重新設計如下：

$$U_h = \hat{H}(z_1(t) | \mathbf{W}) = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{W} \mathbf{r} \tag{5.19}$$

- 控制法則可表示如下：

$$U_T = U_n - U_h + U_r \tag{5.20}$$

$$U_r = -\hat{\delta}(t) \tag{5.21}$$

U_r 為補償控制器

五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (7)

- 定義Lyapunov函數如下：

$$V_b(z_1(t), z_2(t), \tilde{\mathbf{W}}, \tilde{\delta}(t)) = \frac{1}{2} z_1^2(t) + \frac{1}{2} z_2^2(t) + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\delta}^2(t) \qquad (5.23)$$

- 適應性法則設計如下：

$$\dot{\mathbf{W}}^T = \eta_1 B_n \mathbf{r} \mathbf{\Gamma} z_2(t) \qquad (5.25)$$

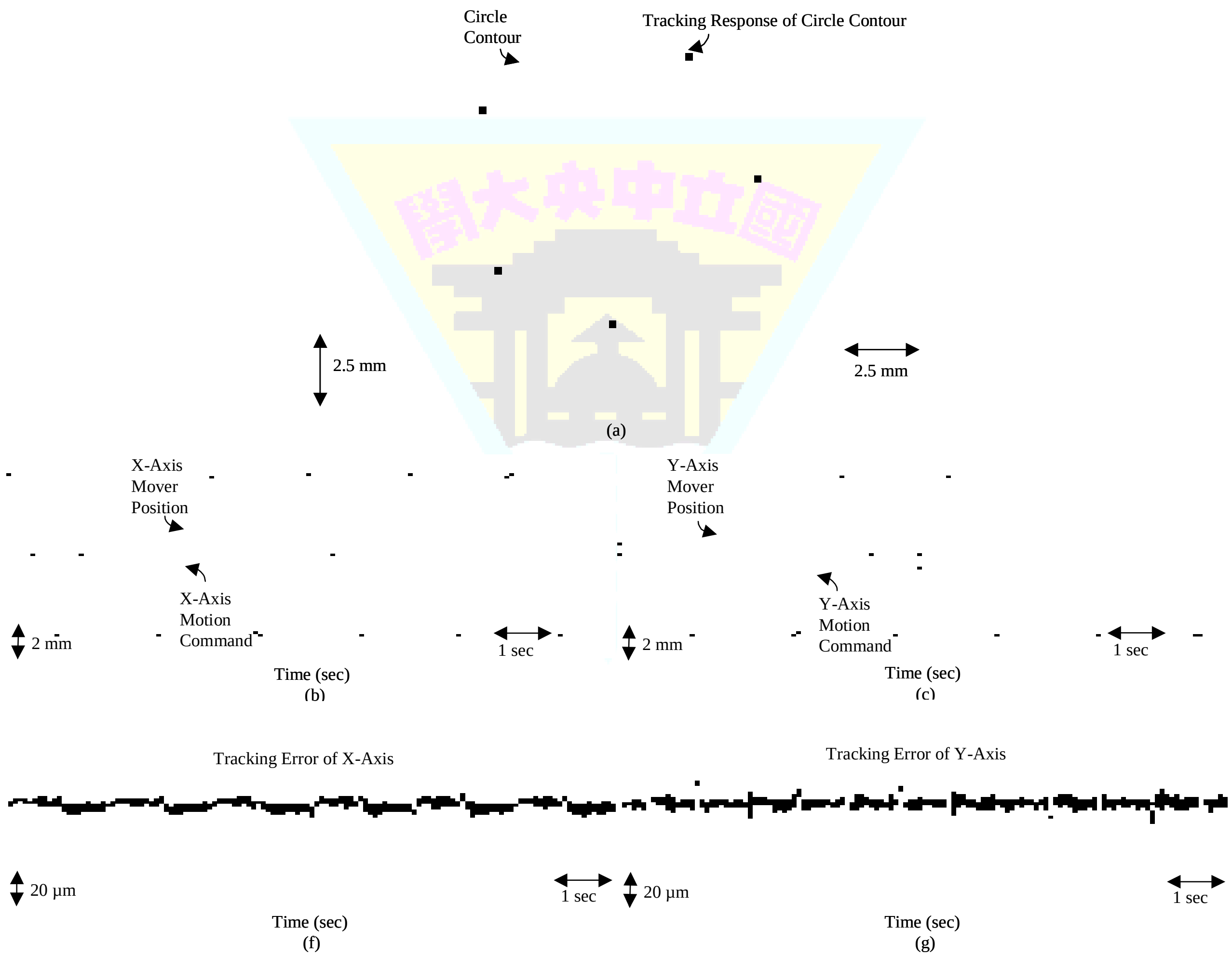
$$\dot{\delta}(t) = \eta_2 B_n z_2(t) \qquad (5.26)$$

- 穩定度分析：

→ Lyapunov 穩定理論 & Barbalat’s Lemma

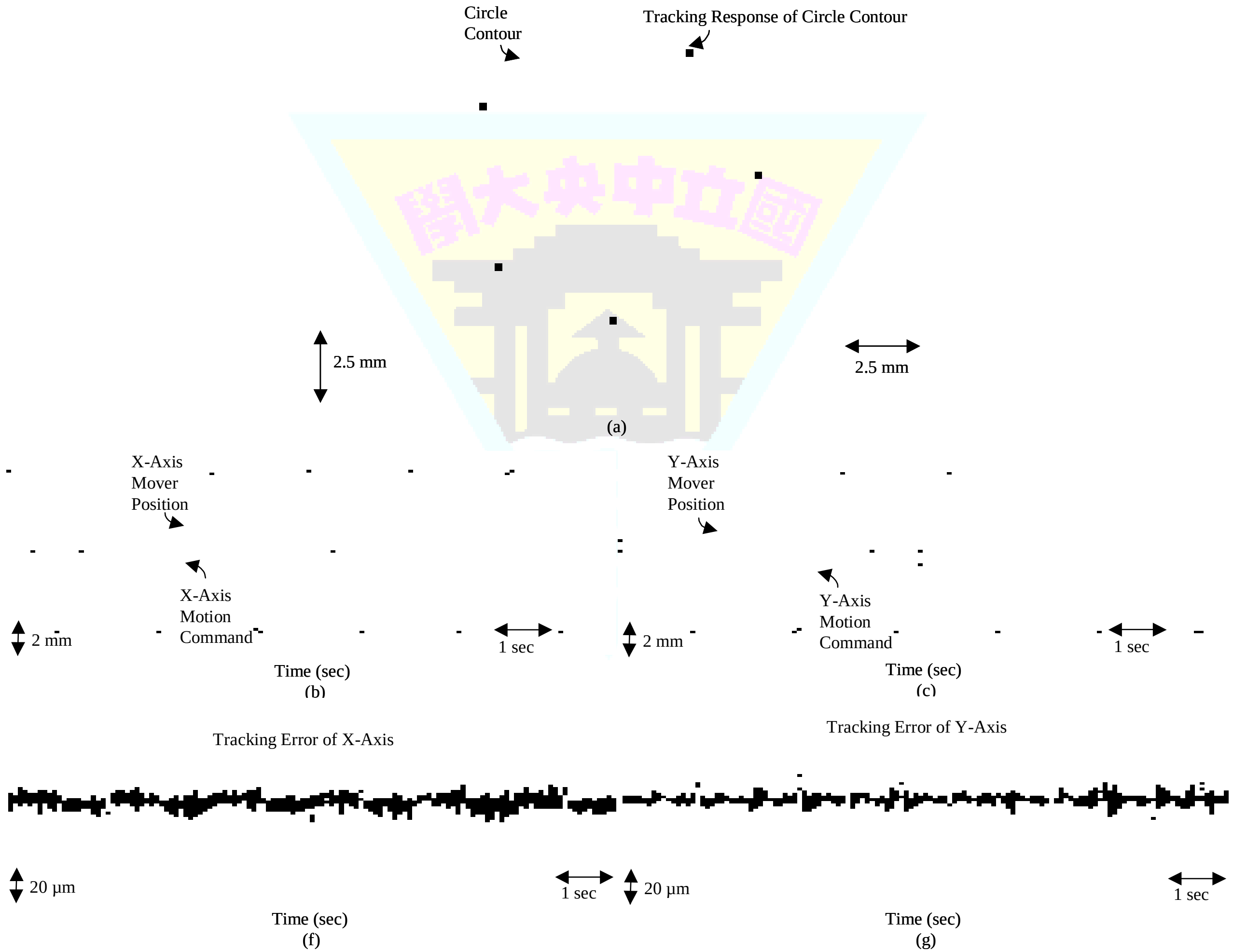
五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (8)

- 圓形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖5.8)

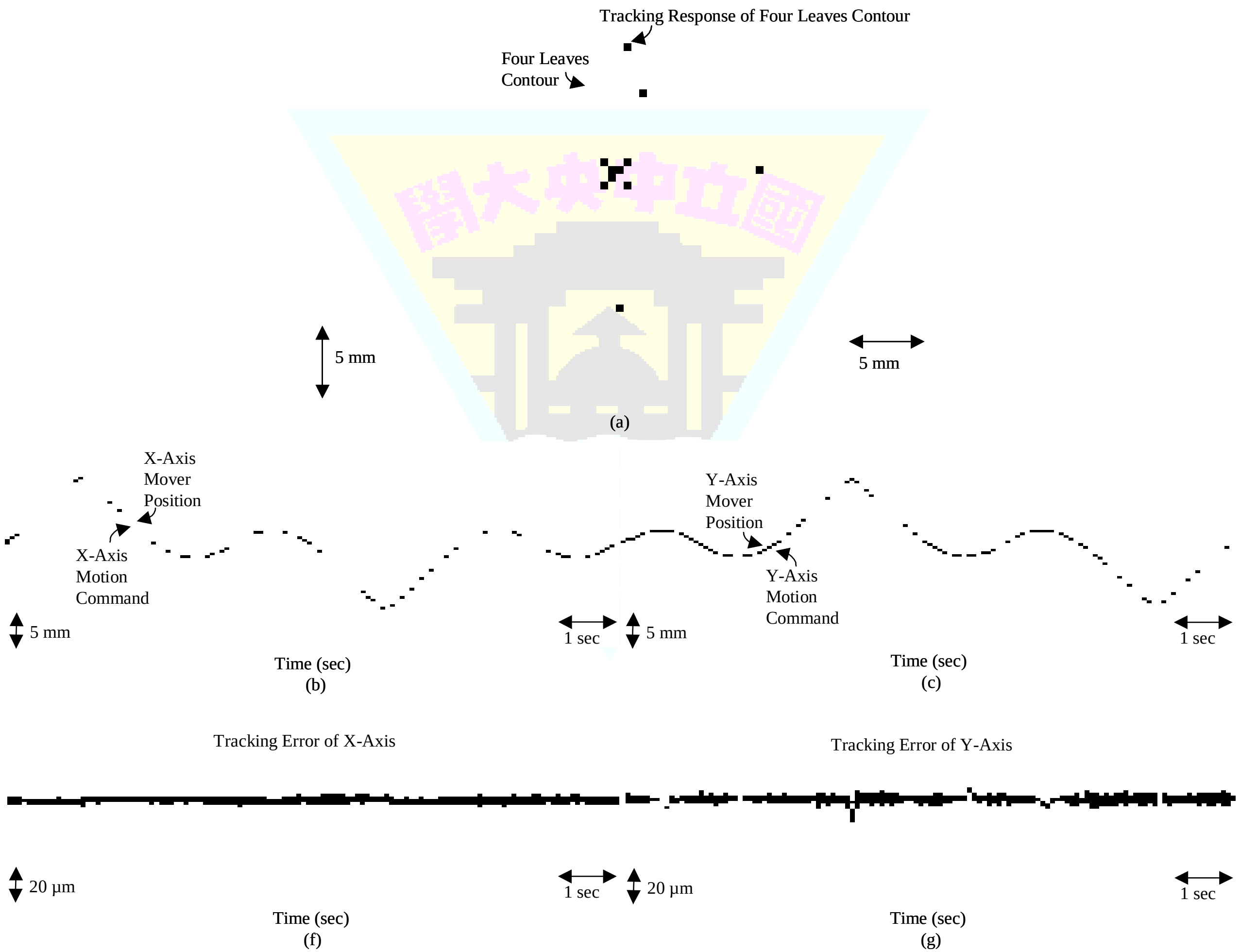


五、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (9)

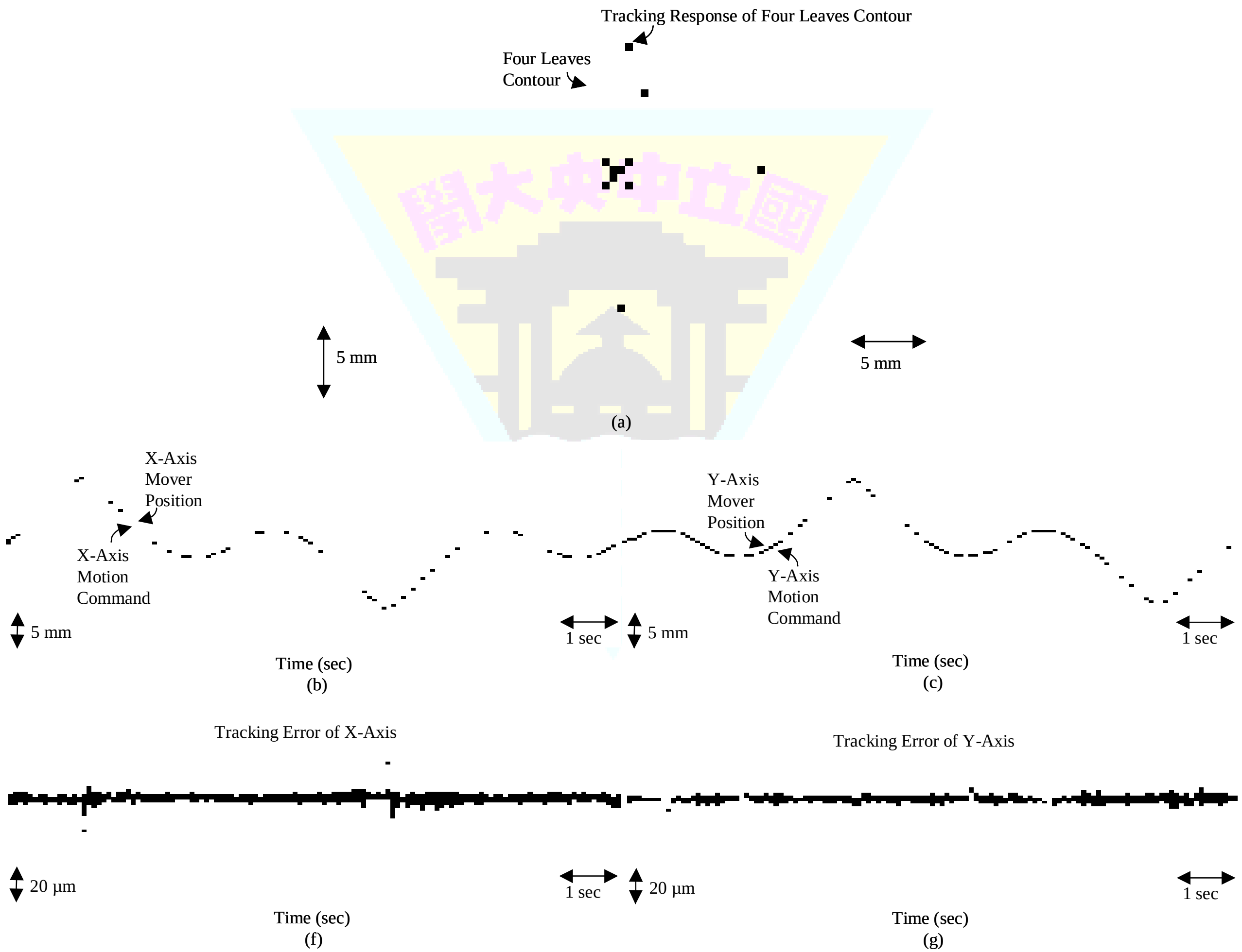
❑ 圓形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖5.9)



四瓣葉形軌跡在狀況一(標準狀況)之實作結果 (圖5.10)



- 四瓣葉形軌跡在狀況二(參數變化狀況)之實作結果 (圖5.11)



❑ 實作性能量測表 (表5.4)

表 5.4：強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統之實作性能量測表

追隨誤差 \ 軌跡 & 狀況 (μm)	圓形 狀況一	四瓣葉形 狀況一	圓形 狀況二	四瓣葉形 狀況二
最大值	22.4190	28.2954	24.0864	31.3871
平均值	4.4981	3.1854	5.9194	4.3085
標準差值	4.1746	3.2735	5.2148	3.8409

表 4.4：智慧型步階迴歸滑動模態控制系統之實作性能量測表

追隨誤差 \ 軌跡 & 狀況 (μm)	圓形 狀況一	四瓣葉形 狀況一	圓形 狀況二	四瓣葉形 狀況二
最大值	25.4183	29.4430	29.2761	36.5005
平均值	6.5715	3.4386	6.5897	2.9953
標準差值	4.1196	3.4411	4.5985	3.2559

表 3.5：強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統之實作性能量測表

追隨誤差 \ 軌跡 & 狀況 (μm)	圓形 狀況一	四瓣葉形 狀況一	圓形 狀況二	四瓣葉形 狀況二
最大值	17.2148	28.3535	23.3007	33.4330
平均值	6.8997	3.5212	14.3890	10.0130
標準差值	2.7953	2.5082	7.3447	5.9004

六、結論與未來研究方向 (1)

結論

- 以數位訊號處理器TMS320C32為核心的STC-32單板控制電腦、電流控制脈寬調變驅動電路、隔離電路與智慧型功率模組，來完成磁場導向控制之X-Y平台雙軸運動控制系統，並且設計與發展具有強健特性之智慧型控制器。
- 提出三種不同的智慧型控制架構分別控制X-Y平台雙軸運動控制系統之X軸與Y軸的永磁線型同步馬達伺服驅動系統，以實現強健與精密控制的目的。

強健性模糊類神經網路滑動模態控制系統

- 利用計算轉矩控制的技巧實現滑動模態控制之理想等效控制力。
- 利用模糊類神經網路來克服包含參數變化、外力干擾、交叉耦合的干擾和摩擦力等因素在內的總集不確定項的影響，同時加強控制的強健性。

六、結論與未來研究方向 (2)

利用放射狀基底函數網路之智慧型步階迴歸滑動模態控制系統

- 結合步階迴歸控制和滑動模態控制改善系統的強健性。
- 放射狀基底函數網路用來估測總集不確定量的大小，以改善運動追跡的性能同時確保系統的強健性。

強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統

- 利用Sugeno型適應性模糊類神經網路所設計之強健控制器來克服總集不確定項所造成的追跡誤差。
- 設計補償控制器來消除網路估測所產生的最小重建誤差同時確保系統的強健性。
- 各智慧型控制系統之適應性法則均利用Lyapunov穩定理論加以驗證，以確保所設計的控制系統滿足漸進穩定的條件且具有強健性。

六、結論與未來研究方向 (3)

❑ 未來研究方向

- 針對摩擦力的影響做適當的分析及處理，以改善X-Y平台雙軸運動控制系統的控制性能。
- 針對交叉耦合干擾設計常見的交叉耦合控制器或是其他的補償器來克制交叉耦合干擾的影響。
- 結合其他強健控制、非線性控制、適應性控制和智慧型控制的理論，配合浮點運算數位訊號處理器具有強大且快速的運算功能，發展更完善的混合智慧型控制架構。
- 加入摩擦力補償器和交叉耦合控制器，或是其他的干擾控制器來克服摩擦力及交叉耦合干擾的影響以提高控制的精度，進一步推廣至多軸運動控制系統。

Thank You for Your Attention!