

利用智慧型控制之X-Y- Θ 三軸線性 超音波馬達運動控制系統

Intelligent Control for X-Y- Θ Motion Control Stage Using Linear Ultrasonic Motors

國立中央大學 電機工程學系
林 法 正 教授

- 一、緒論
- 二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台運動控制系統
- 三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制
- 四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統
- 五、第二型區間模糊類神經網路控制系統
- 六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統
- 七、控制系統性能比較
- 八、結論與未來研究方向

□ 研究動機與目的

- ✓ 精密機械產業為行政院所提的十大重點產業之一，而精密定位技術，對整個精密機械產業更有著相當的重要性。精密定位技術是製造產品、測量物體尺寸、運轉各種機器之機械工程上的重要技術之一。在各種精密機械產業的設備中都常常使用到三軸的X-Y- Θ 平台，因此其精密的X-Y- Θ 定位技術將是本研究的研究重點。



- ✓ 本研究以三個線性超音波馬達、二個線性滑軌和一個轉動平台並搭配三個相對應之線性超音波馬達驅動器所組成的X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台為研究對象。
- ✓ 在X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台控制系統中，由於線性超音波馬達本身的高度非線性及時變特性，並且在實際應用中此三軸系統的參數變化、外來負載干擾、交叉耦合干擾(Cross-Coupled Interference)[5]和摩擦力等種種的不確定因素，使得一些傳統控制，例如：比例-積分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制，並無法有效的達到良好精密的定位控制。

- ✓ 本研究以第一型模糊類神經網路和第二型模糊類神經網路為研究目標，設計了四種不同的智慧型控制理論。第一個控制系統是以第一型模糊類神經網路為主，並結合放射狀基底函數網路(Radial Basis Function Network, RBFN)，所設計出的新型網路架構。第二個控制系統其設計重點是將第一型Sugeno型模糊類神經網路與步階迴歸(Backstepping)控制器結合，並由Laypunov穩定理論證明其系統之穩定性。第三個控制系統則以第二型區間模糊類神經網路為主控制器，控制其X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台。第四個控制系統結合第二型區間模糊類神經網路、適應性控制器和強健控制器，並利用Laypunov穩定理論證明其系統之穩定性。

二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台



運動控制系統

□ 超音波馬達特性

1. 一般傳統電磁馬達在高轉速工作時具較高的效率，但在低轉速時則較低，和傳統電磁馬達相比，超音波馬達在低轉速時能夠表現出較高的轉換效率。
2. 不需要經過齒輪的轉換，便可產生高扭力，所以可以直接驅動。
3. 具有高保持轉矩，並且可以很容易達到精密定位，當電源消失時即固定在原來之位置上。
4. 具有振動模式可選擇，故可以有各種不同之形狀，在設計上極具彈性。
5. 不會產生電磁干擾。
6. 安靜、噪音低。
7. 結構簡單。

二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台

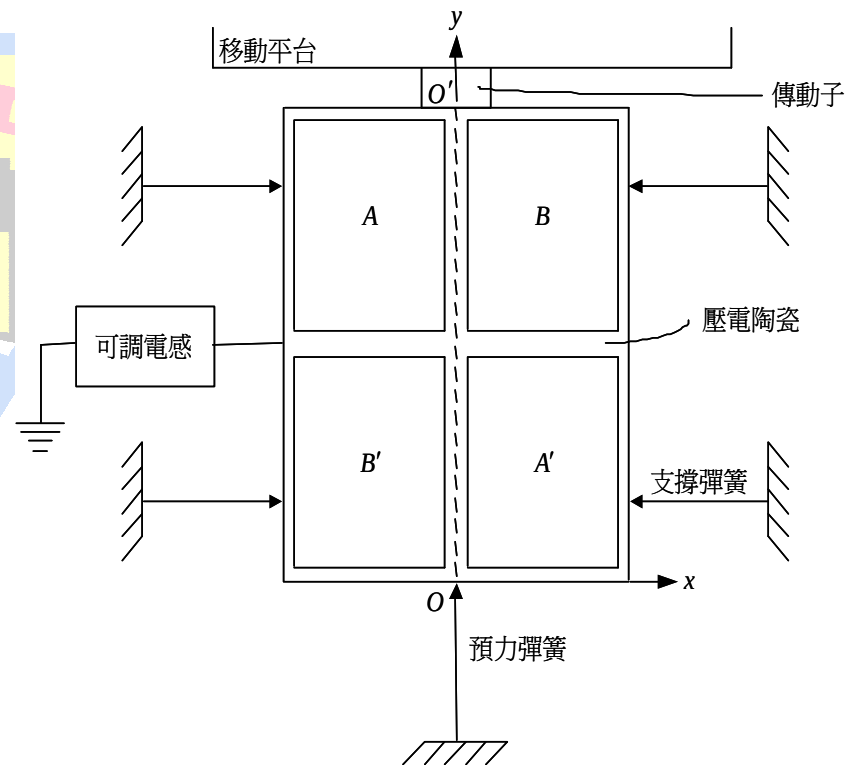


國立中央大學

運動控制系統(續)

□線性超音波馬達工作原理

- ✓ 線性超音波馬達是由四個薄平板架構而成，如圖2.1所示。線性超音波馬達的運動是受限於四個高彈性係數之支撐彈簧，這些彈簧沿著馬達的長邊連接在壓電陶瓷上。相當硬的一個陶瓷傳動子以黏著劑接合在壓電陶瓷短邊的中間，而另一個短邊的中間有一緊壓在壓電陶瓷上之預力彈簧。如此一來，預力彈簧便可提供一壓力在傳動子和平台之間，摩擦力便會產生在平台和傳動子之間的表面，而傳動子即可將力量傳遞至平台並使之移動。



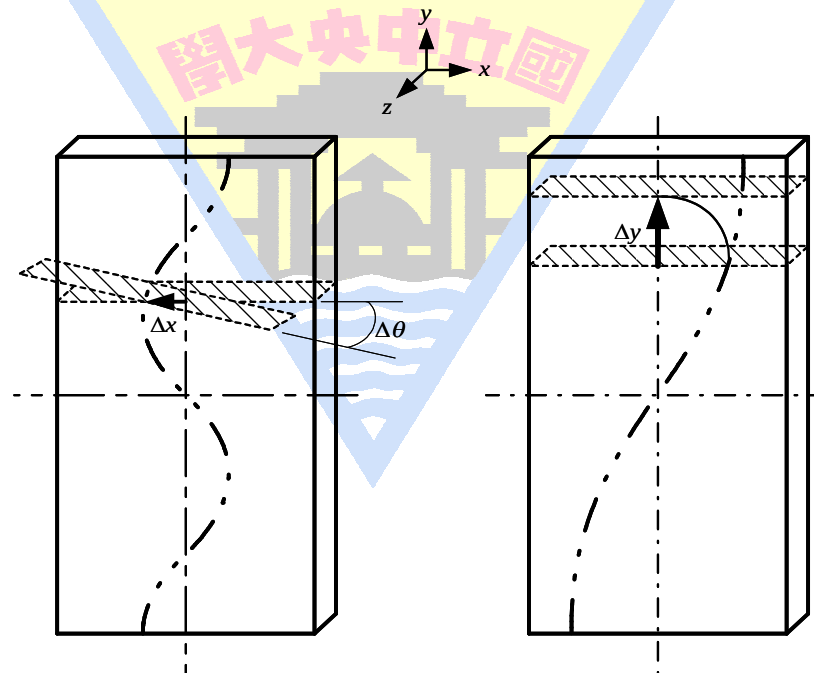
二、X-Y- θ 三軸線性超音波馬達移動平台



運動控制系統(續)

□ 線性超音波馬達之共振模式示意圖

- ✓ 線性超音波馬達的運作乃是基於**雙振動模式**，即彎曲振動與長度振動，如圖2.2所示。利用x方向的彎曲振動和y方向的長度振動可在壓電陶瓷的xy平面引出一橢圓形運動。



二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台

國立中央大學  運動控制系統(續)

□ 線性超音波馬達動態示意圖

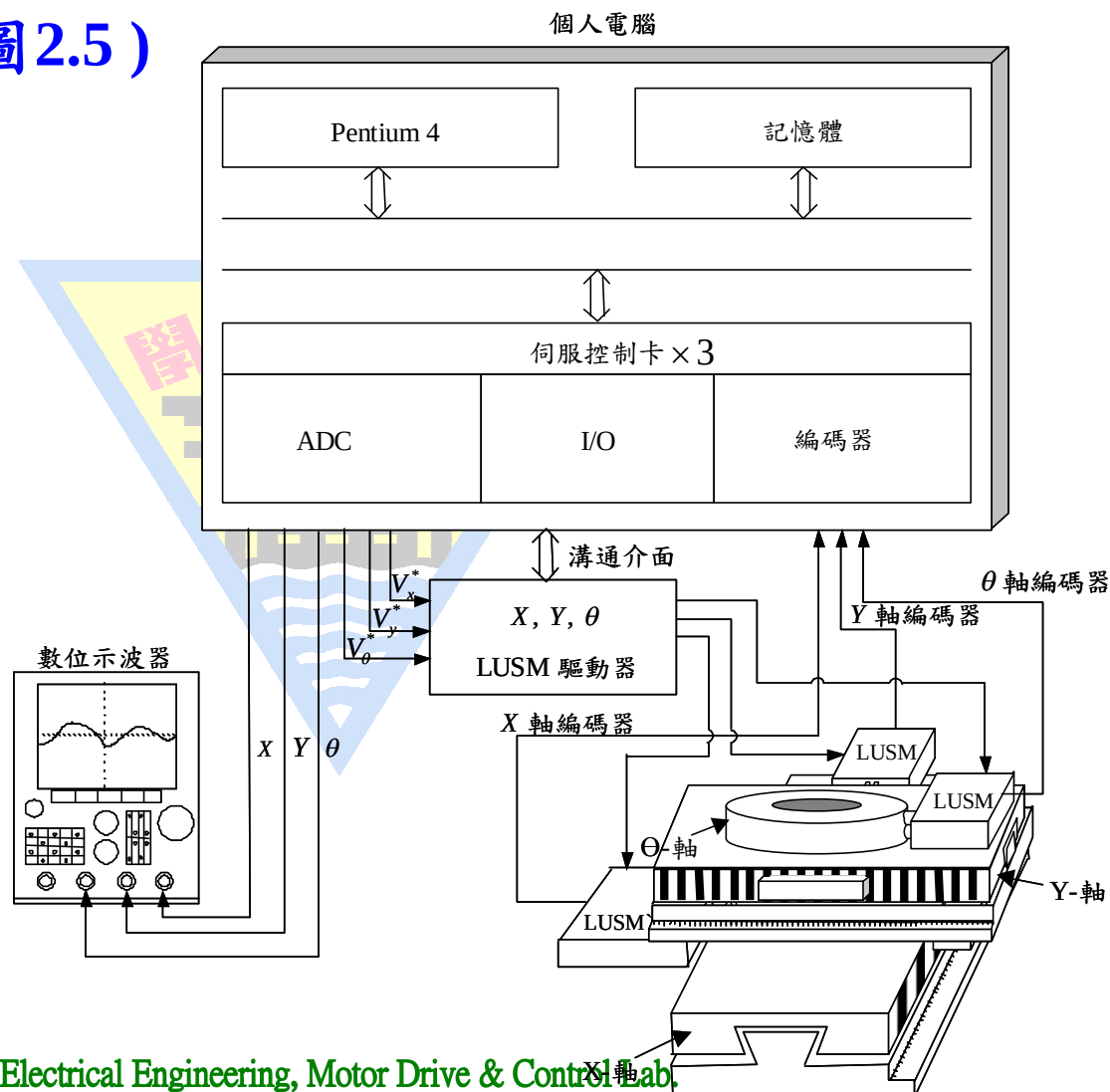


此動畫由NANOMOTION網站擷取

二、X-Y- θ 三軸線性超音波馬達移動平台

國立中央大學 運動控制系統(續)

□ PC-based 之X-Y- θ 三軸線性超音波馬達移動平台運動控制系統 (圖2.5)



二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台

 國立中央大學 **運動控制系統(續)**

□ X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台實體圖 (圖2.6)

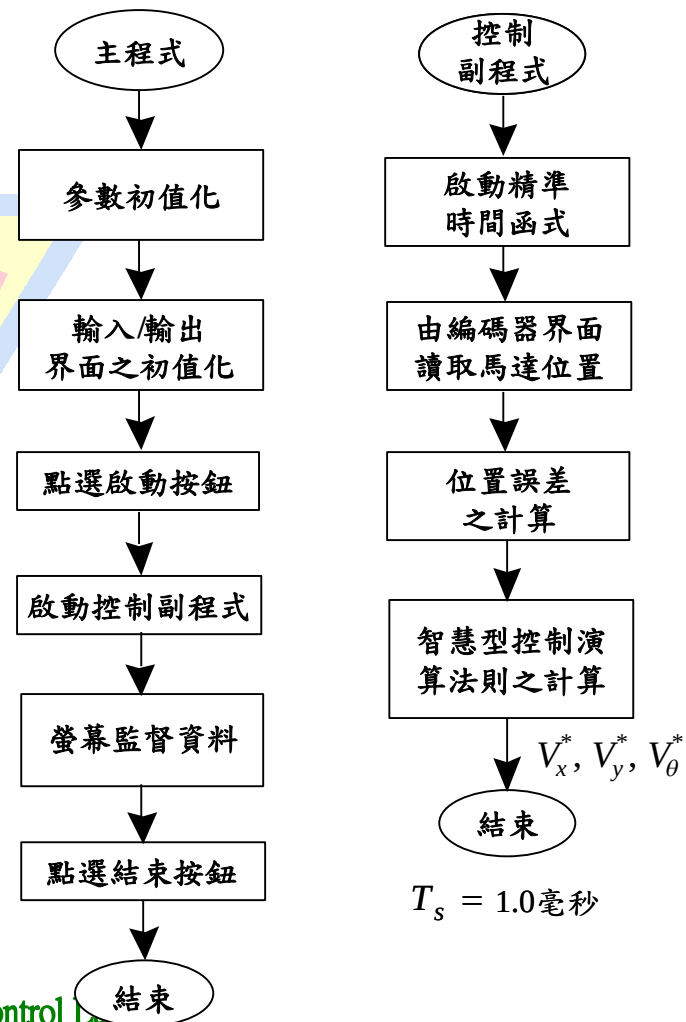


二、X-Y- θ 三軸線性超音波馬達移動平台

運動控制系统(續)

□ X-Y- θ 三軸線性超音波馬達移動平台運動控制系统之軟體發展流程 (圖2.13)

- ✓ 本研究所設計之即時控制與各智慧型控制系统皆是利用“Visual Basic 6.0”語言在微軟的 Windows 系統上實現之。



二、X-Y-Θ 三軸線性超音波馬達移動平台



運動控制系统(續)

□ 軌跡規劃

- ✓ 傳統直線或圓弧插值的下列二個缺點：
 - 需要以微小的直線段或圓弧段來逼近複雜的曲線，有不可避免之曲線輪廓近似誤差。
 - 小線段追隨時，每個單節均作加減速運動，造成追隨過程間接停頓的現象，而大量的加減速運動將使得追隨之平滑度受影響。
- ✓ NURBS 曲線是由權重對於控制點作一加權的動作，因此對於曲線、曲面能提供更具彈性的設計，且節點向量亦可自由調整。

$$C(p) = \frac{\sum_{i=0}^n Z_{i,k}(p) \psi_i V_i}{\sum_{i=0}^n Z_{i,k}(p) W_i} = \sum_{i=0}^n R_{i,k}(p) V_i \quad (2.20)$$

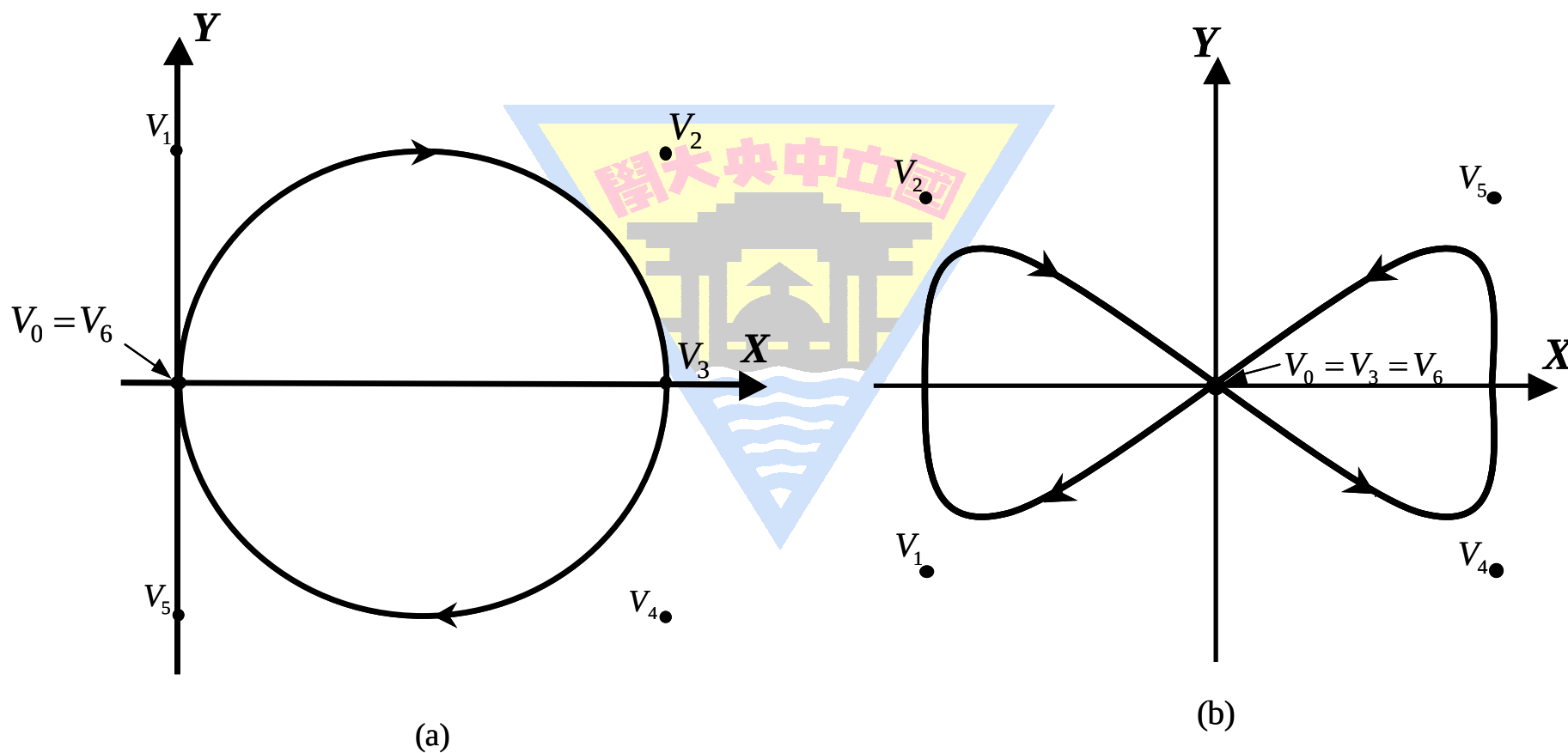
二、X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台



國立中央大學

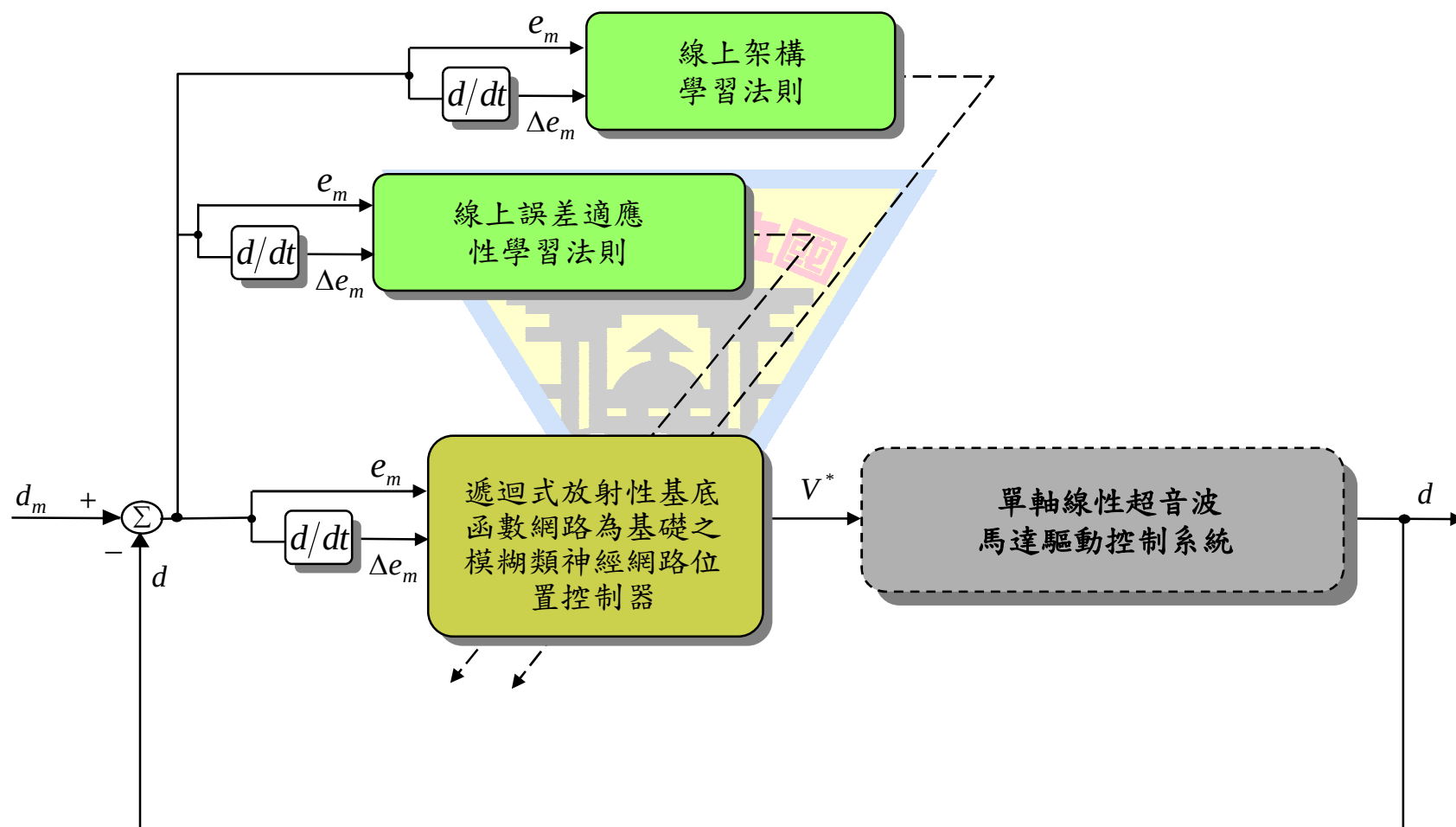
運動控制系統(續)

□ 圓形和蝴蝶形之命令軌跡



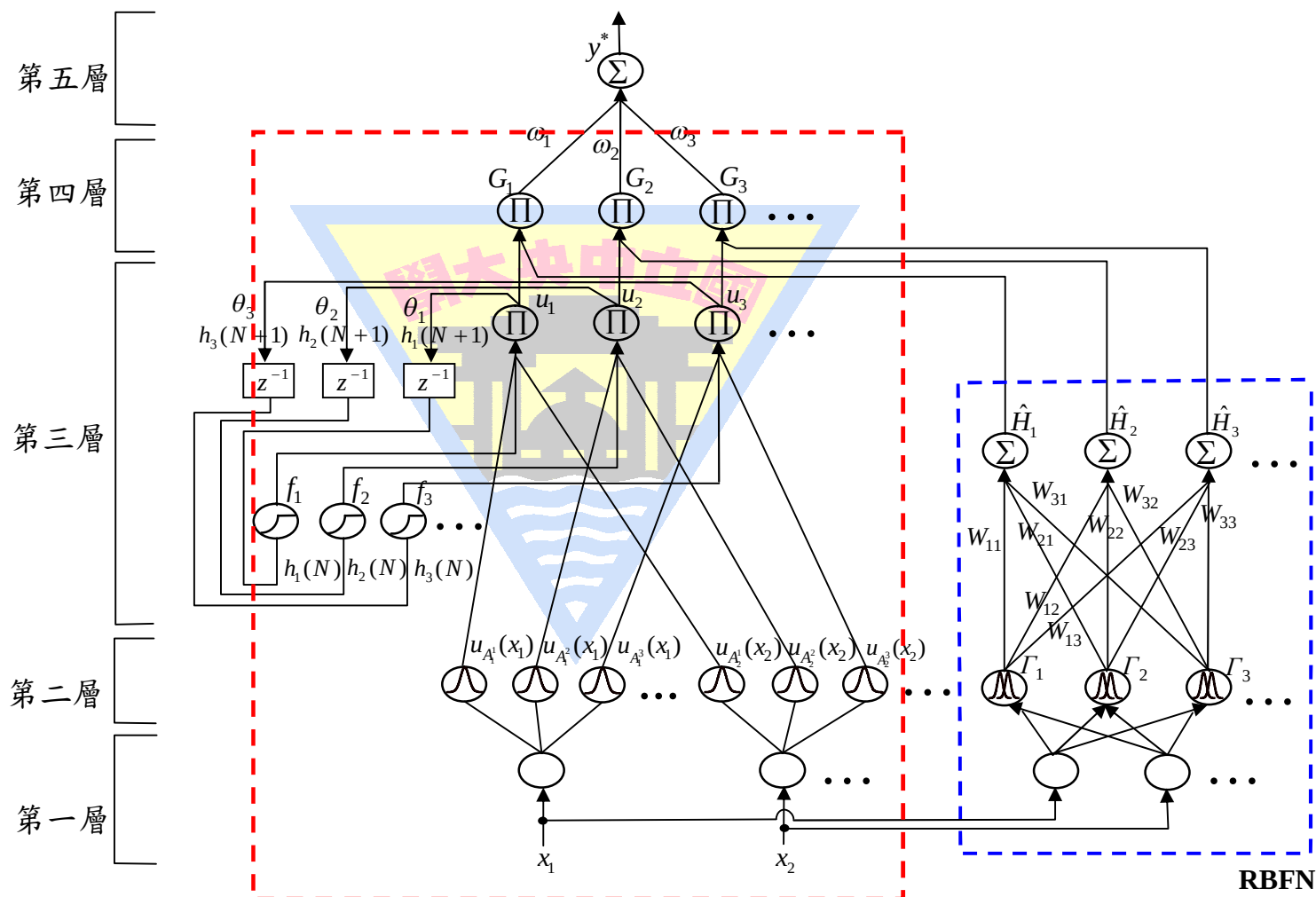
三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統

□ 控制系統架構圖 (圖3.1)



三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 網路架構圖 (圖3.1)



RBFN

三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 線上學習演算法

- ✓ 遞迴式放射性基底函數網路為基礎之模糊類神經網路有兩種形式的線上學習演算法，分別為**架構學習**和**參數學習**，此兩種形式的線上學習演算法皆可同時線上調整網路的架構和訓練演算法則。
- ✓ **架構學習**是用來尋找適合的模糊邏輯規則，而模糊邏輯規則使得產生的規則層神經元數目和每一個模糊集合裡的輸入變數之數目為最少。**參數學習**是以監督式學習演算法為基礎，本章是基於倒傳遞法則來調整規則層和輸出層間的連結權重值以及歸屬函數的參數值，使得所給定的誤差能量函數為最小。

三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 架構學習

1. $e_{\min} \leq |e_m|$ 或 $\Delta e_{\min} \leq |\Delta e_m|$ ，就必須執行架構學習。

$$2. D_j = u_j \quad j = 1, \dots, M(t) \quad (3.9)$$

$$D_{\max} = \max_{1 \leq j \leq M(t)} D_j \quad (3.10)$$

如果 $D_{\max} \leq \bar{D}$ ，一個新的歸屬函數將會產生。其中新的歸屬函數之平均值和標準偏差值選擇如下

$$m_i^{(new)} = x_i \text{ 和 } \sigma_i^{(new)} = p \quad (3.11)$$

$$a_{ik}^{(new)} = x_i \text{ 和 } s_{ik}^{(new)} = p \quad (3.12)$$

三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

3. 新的歸屬函數和已存在的歸屬函數透過歸屬函數相似度 E_n 檢測方法來計算。

$$E_{\max} = \max_{1 \leq j \leq M(t)} E(u(m_i^{(new)}, \sigma_i^{(new)}), u(m_{ij}, \sigma_{ij})) \quad (3.15)$$

如果 $E_{\max} \leq \overline{E}_n$ ，則新的歸屬函數將被採用。

三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 參數學習

- 首先，將定義能量誤差函數定義為，

$$E = \frac{1}{2}(d_m - d)^2 = \frac{1}{2}e_m^2 \quad (3.16)$$

接著利用倒傳遞演算法，求得網路參數的更新迭代：

$$\Delta\omega_j = \eta_\omega \cdot \delta^5 \cdot G_j \quad (3.18)$$

$$\Delta W_{kj} = \eta_W \cdot \delta_j^4 \cdot u_j \cdot \Gamma_k \quad (3.21)$$

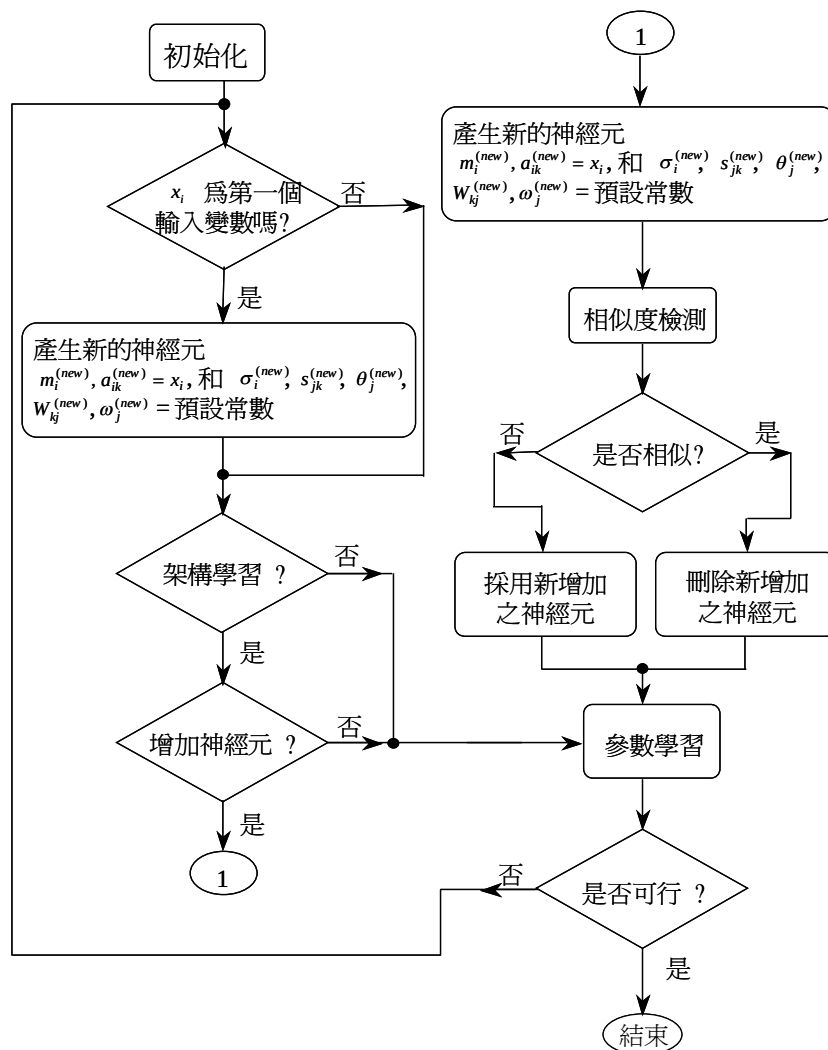
$$\Delta\theta_j = \eta_\theta \cdot \delta_j^3 \cdot f_j \cdot (1 - f_j) \cdot u_j (N - 1) \cdot \prod_{i=1}^n u_{A_i^j} \quad (3.22)$$

$$\Delta m_{ij} = \eta_m \cdot \delta_{ij}^2 \cdot \frac{2(x_i^2 - m_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (3.24)$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \eta_\sigma \cdot \delta_{ij}^2 \cdot \frac{2(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^3} \quad (3.25)$$

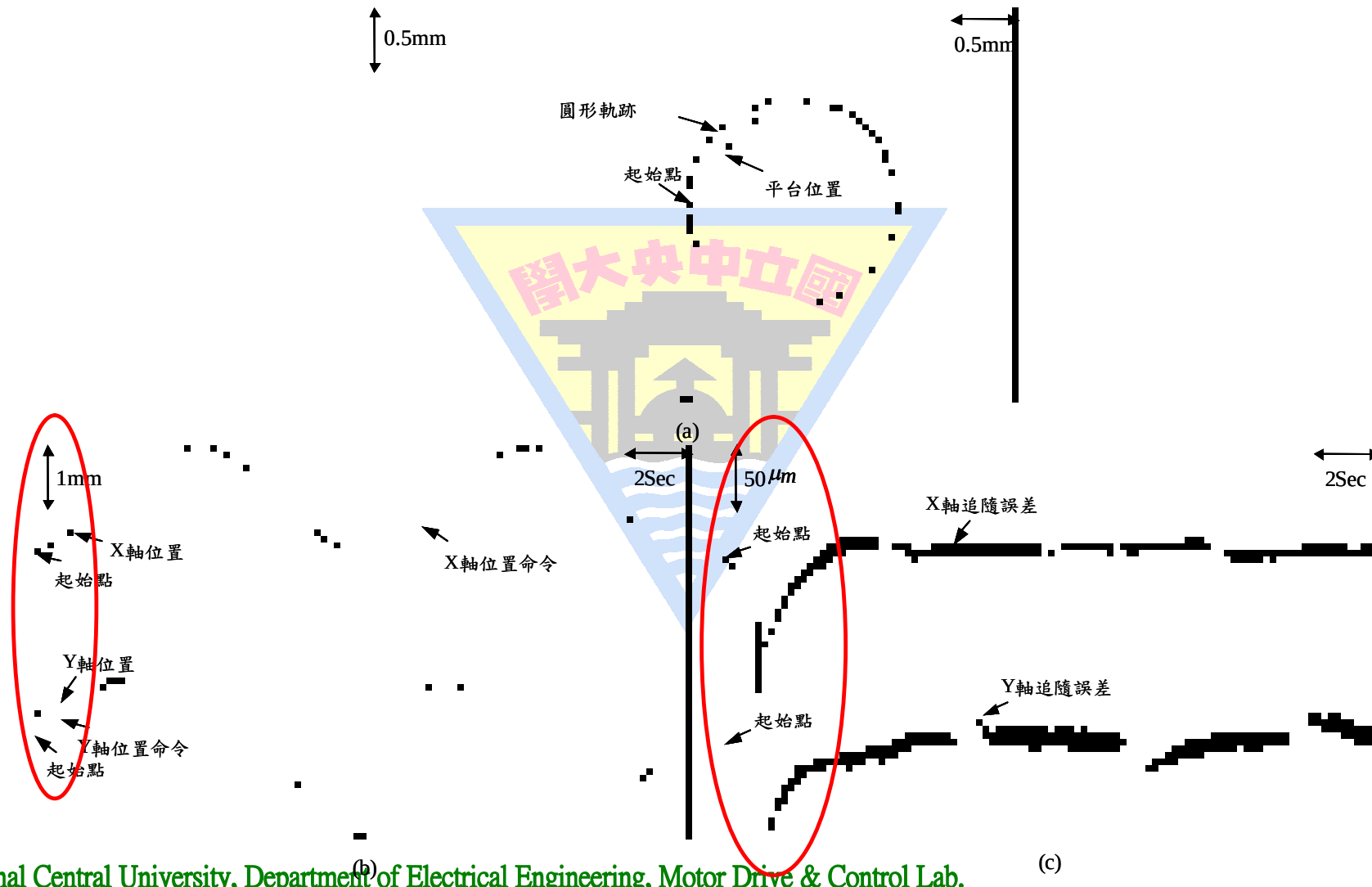
三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

學習演算法流程圖

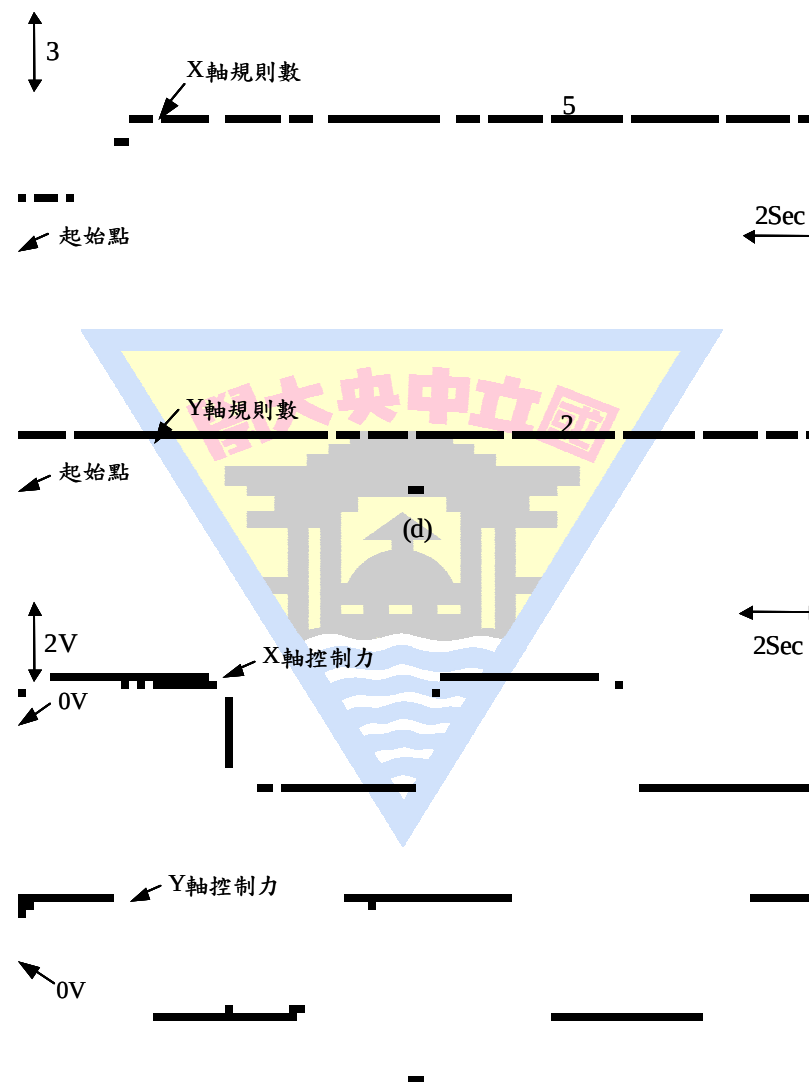


三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 圓形軌跡之實測結果 (圖3.5)



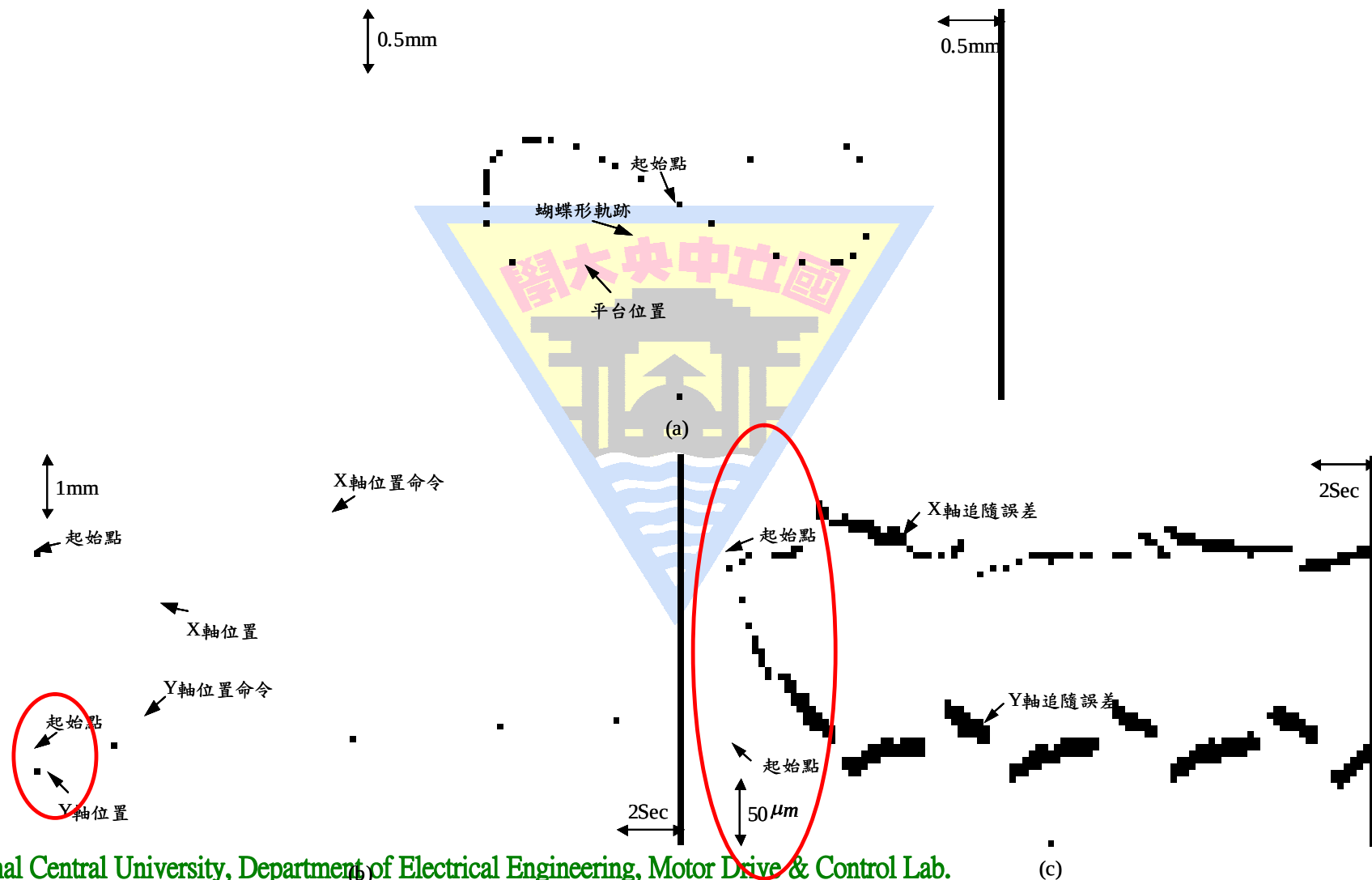
三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)



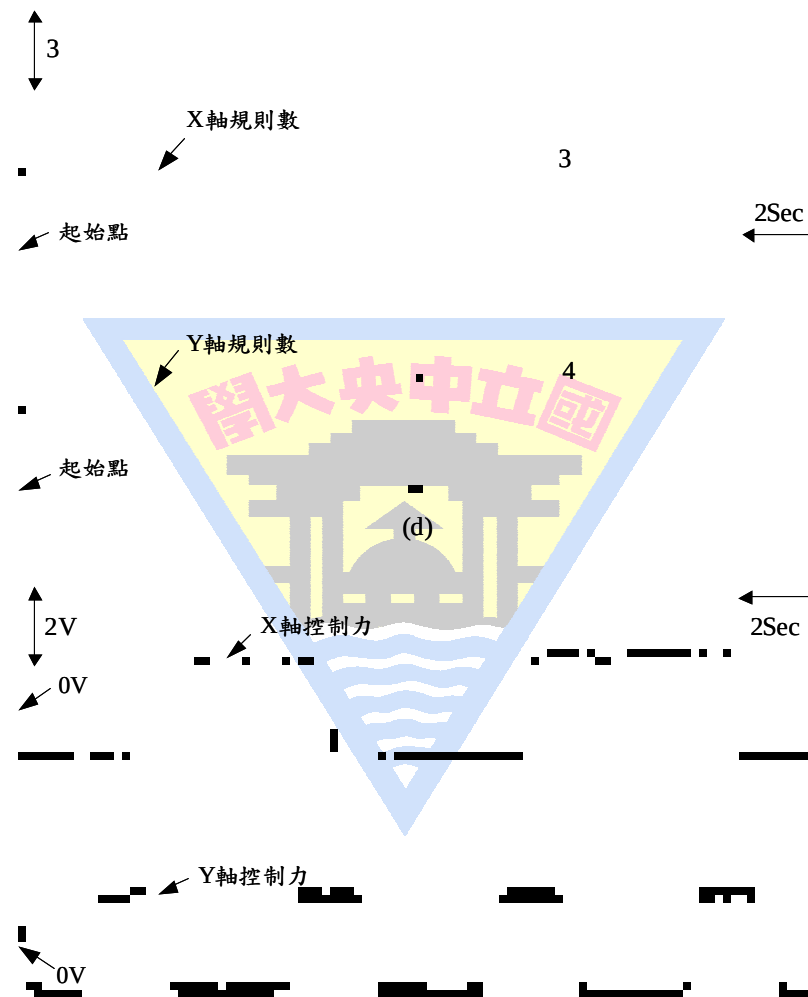
(e)

三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡之實測結果 (圖3.6)



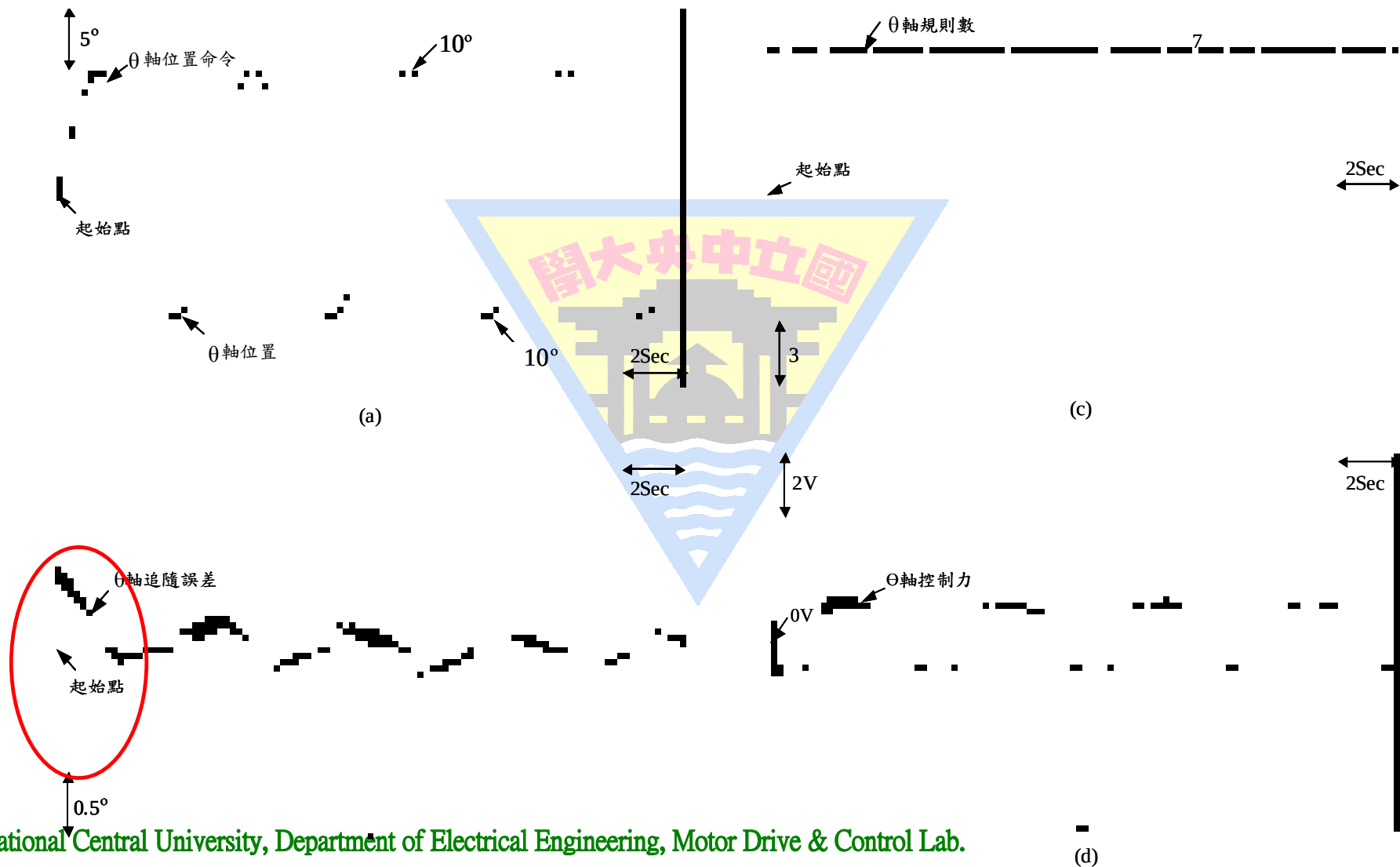
三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)



(e)

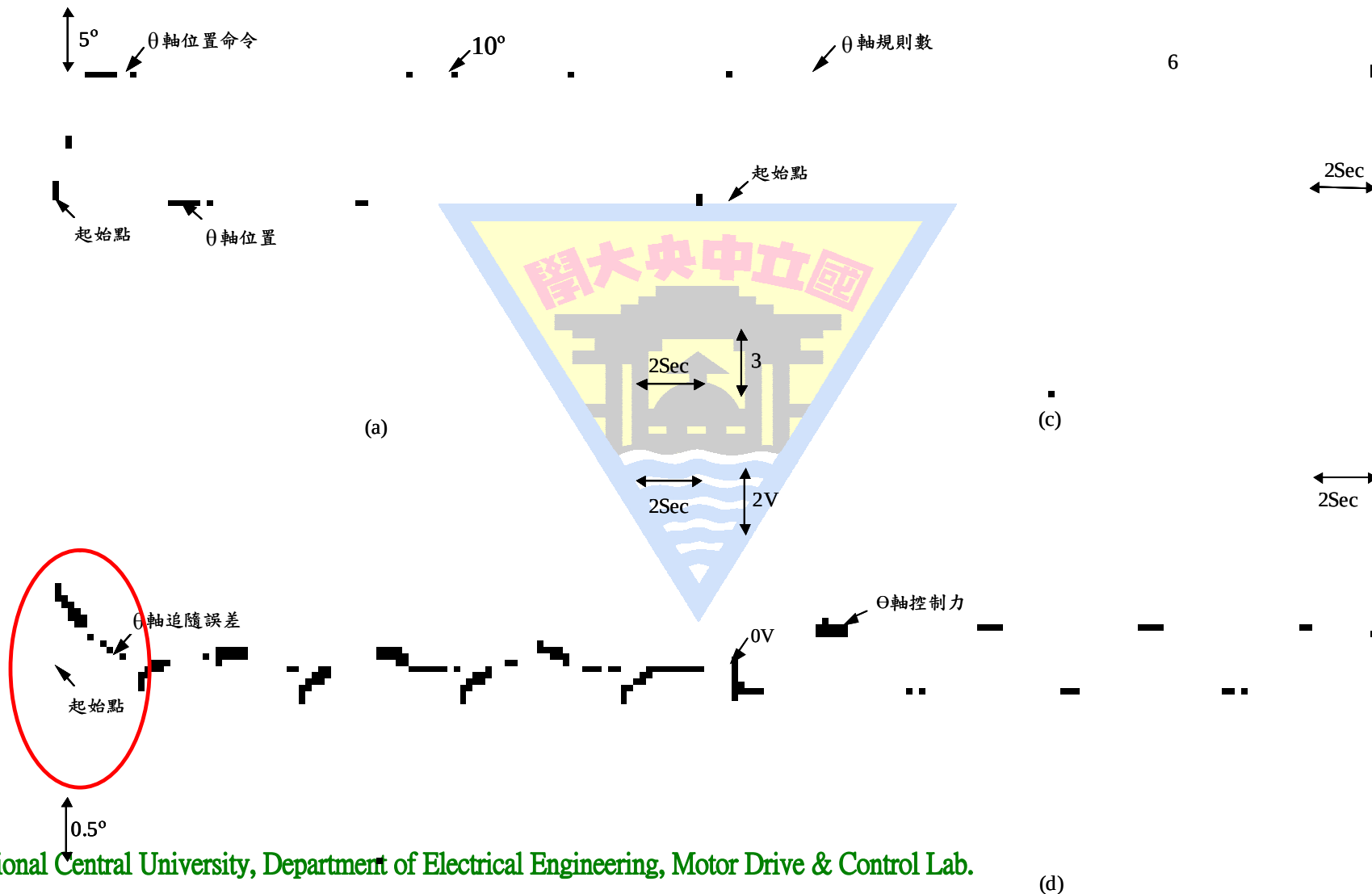
三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

□ 弦波軌跡之實測結果 (圖3.7)



三、遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統(續)

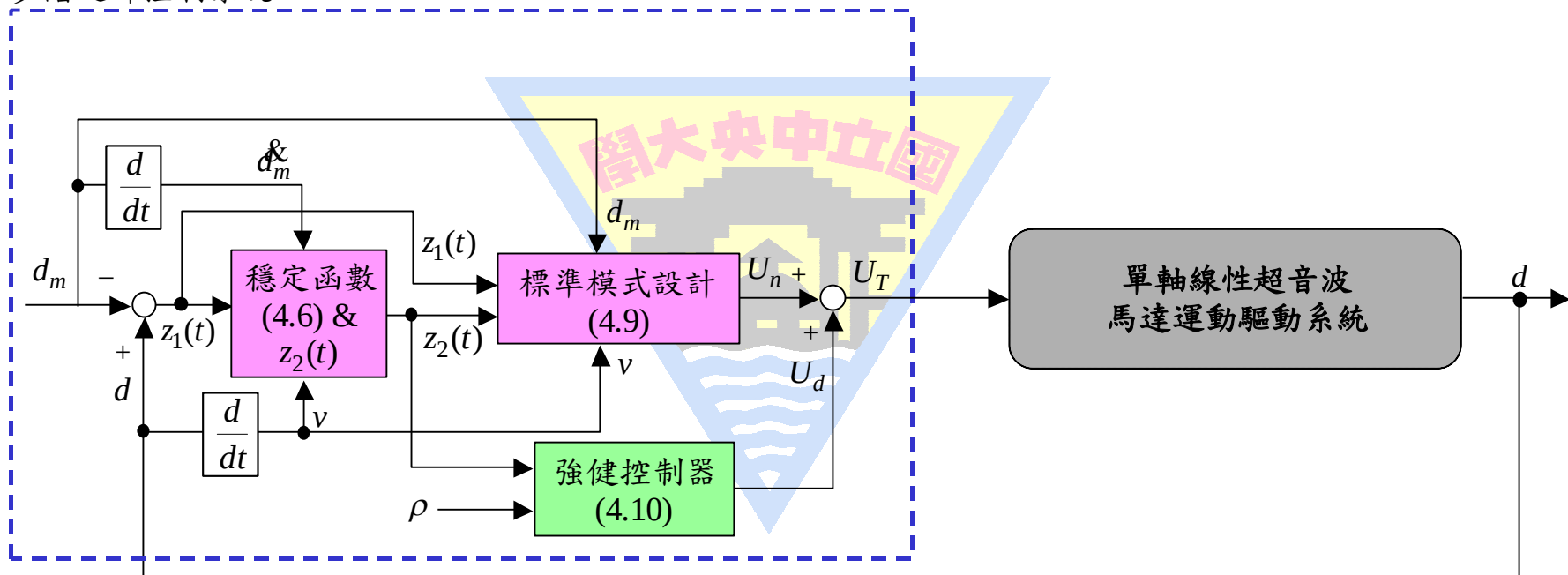
□ 梯形波軌跡之實測結果 (圖3.8)



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統

□ 步階迴歸控制系統架構圖 (圖4.1)

步階迴歸控制系統



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 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：

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}(t) &= (A_n + \Delta A)\dot{\theta}(t) + (B_n + \Delta B)U_T + (C_n + \Delta C)[F_L + f(v)] \\ &= A_n\dot{\theta}(t) + B_n(U_T + H)\end{aligned}\quad (4.2)$$

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

- 定義追隨誤差 $z_1(t) = d(t) - d_m(t)$ (4.5)

- 定義穩定函數 $\alpha_1(t) = -k_1 z_1(t) + \dot{d}_m(t)$ (4.6)

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

- 對 $z_2(t)$ 微分，可得

$$\dot{z}_2(t) = A_n\dot{\theta}(t) + B_n(U_T + H) + k_1 z_1(t) - \ddot{d}_m(t) \quad (4.7)$$

四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

- 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：

$$U_T = U_n + U_d \quad (4.8)$$

$$U_n = B_n^{-1}[\dot{x}_m(t) - A_n x(t) - k_1 \dot{x}(t) - k_2 z_2(t) - z_1(t)] \quad (4.9)$$

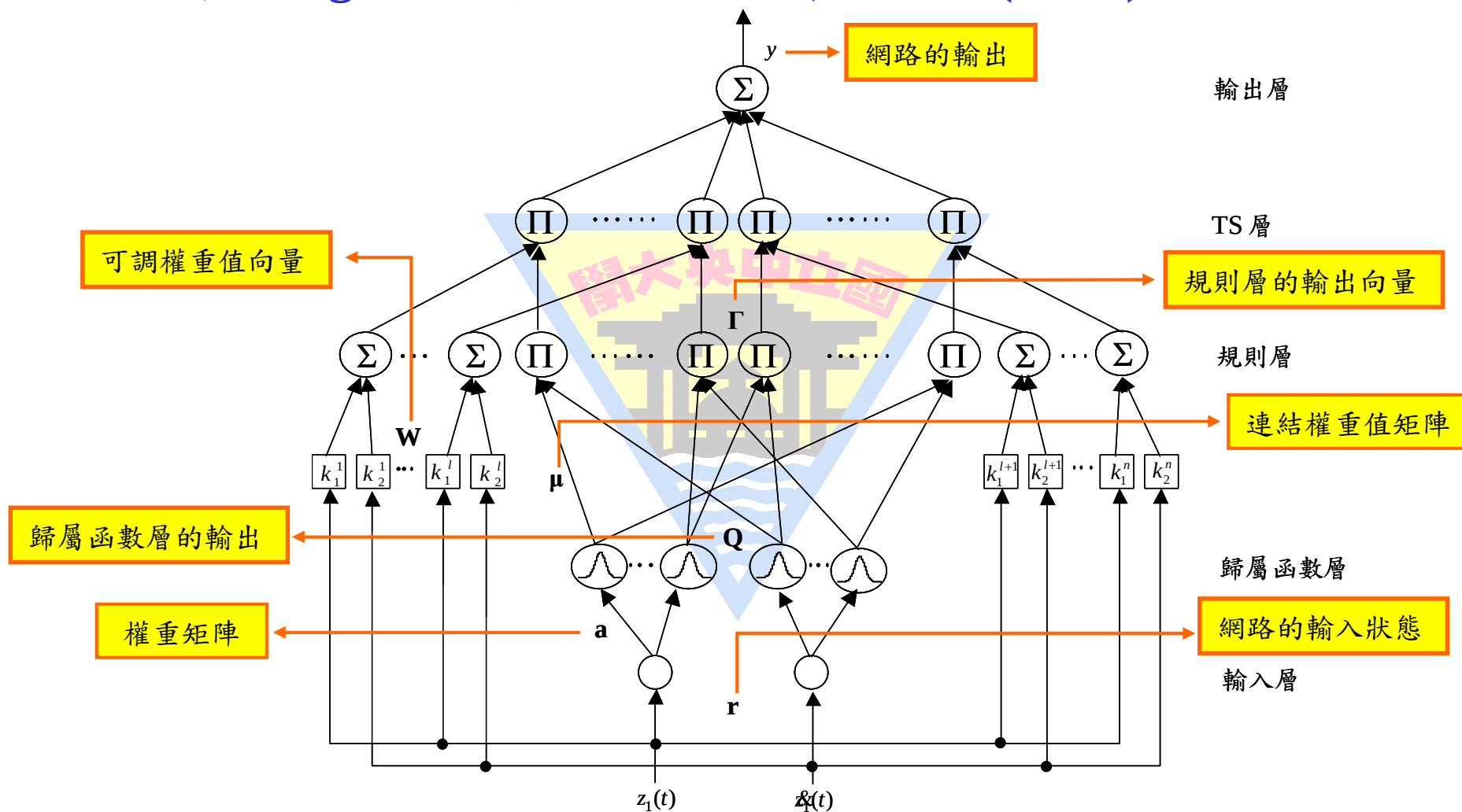
$$U_d = -\rho \operatorname{sgn}(z_2(t)) \quad (4.10)$$

U_d 為強健控制器

- 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(4.10)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 uncertainties 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。

四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

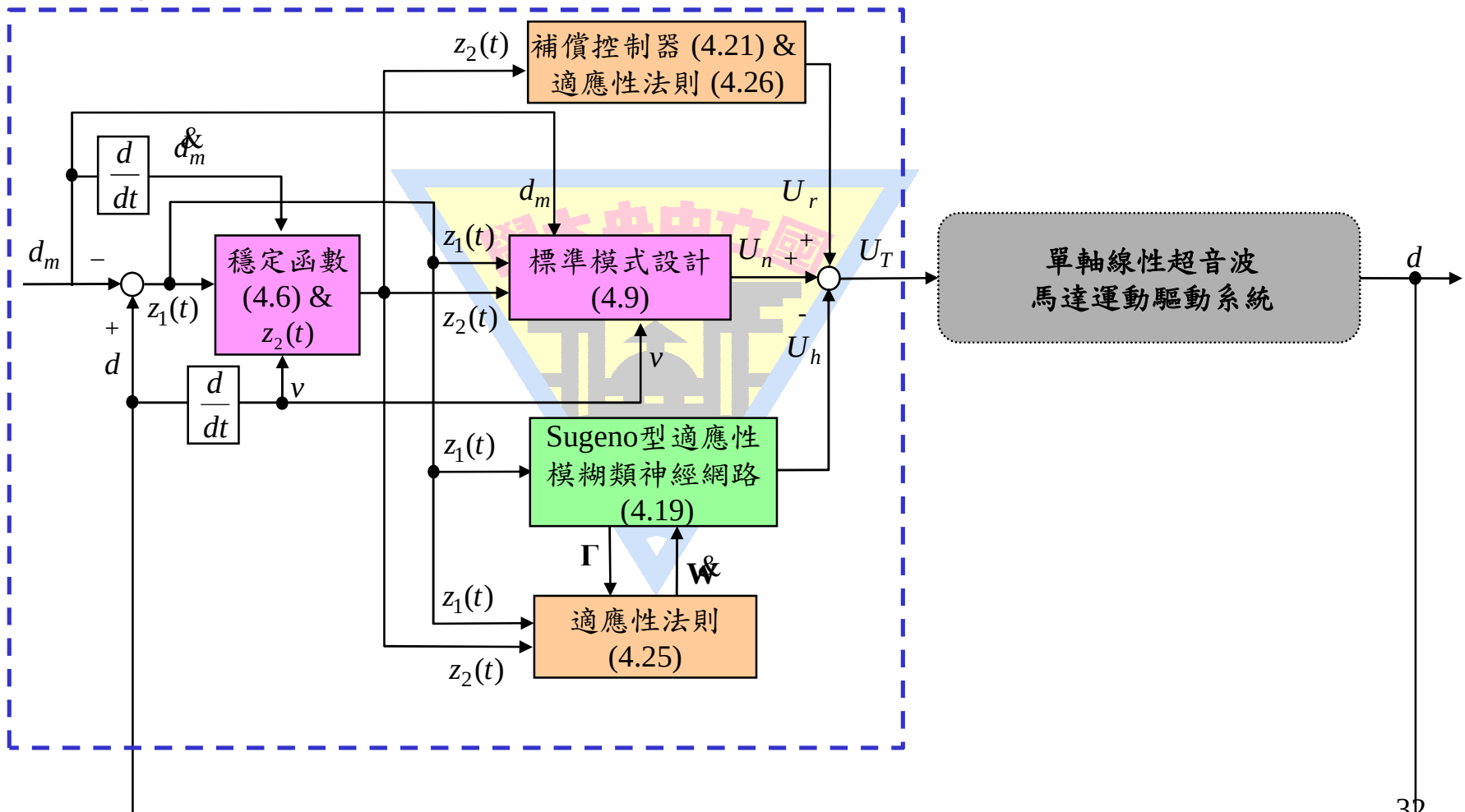
□ 五層之Sugeno型適應性模糊類神經網路 (圖4.2)



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統 (圖4.3)

強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

- 網路的輸出型式可表示如下：

$$y = \hat{H}(z_1(t) | \mathbf{W}) \equiv \mathbf{\Gamma} \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (4.17)$$

- 定義最小重建誤差 δ 如下所示：

$$\delta = H - H^*(z_1(t) | \mathbf{W}^*) \quad (4.18)$$

- 強健控制器可重新設計如下：

$$U_h = \hat{H}(z_1(t) | \mathbf{W}) = \mathbf{\Gamma} \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (4.19)$$

- 控制法則可表示如下：

$$U_T = U_n - U_h + U_r \quad (4.20)$$

$$U_r = -\hat{\delta}(t) \quad (4.21)$$

U_r 為補償控制器

四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

- 定義Lyapunov函數如下：

$$V_b(z_1(t), z_2(t), \tilde{\mathbf{W}}, \tilde{\delta}(t)) = \frac{1}{2} z_1^2(t) + \frac{1}{2} z_2^2(t) + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\delta}^2(t) \quad (4.23)$$

- 適應性法則設計如下：

$$\dot{\tilde{\mathbf{W}}}^T = \eta_1 B_n \mathbf{r} \Gamma z_2(t) \quad (4.25)$$

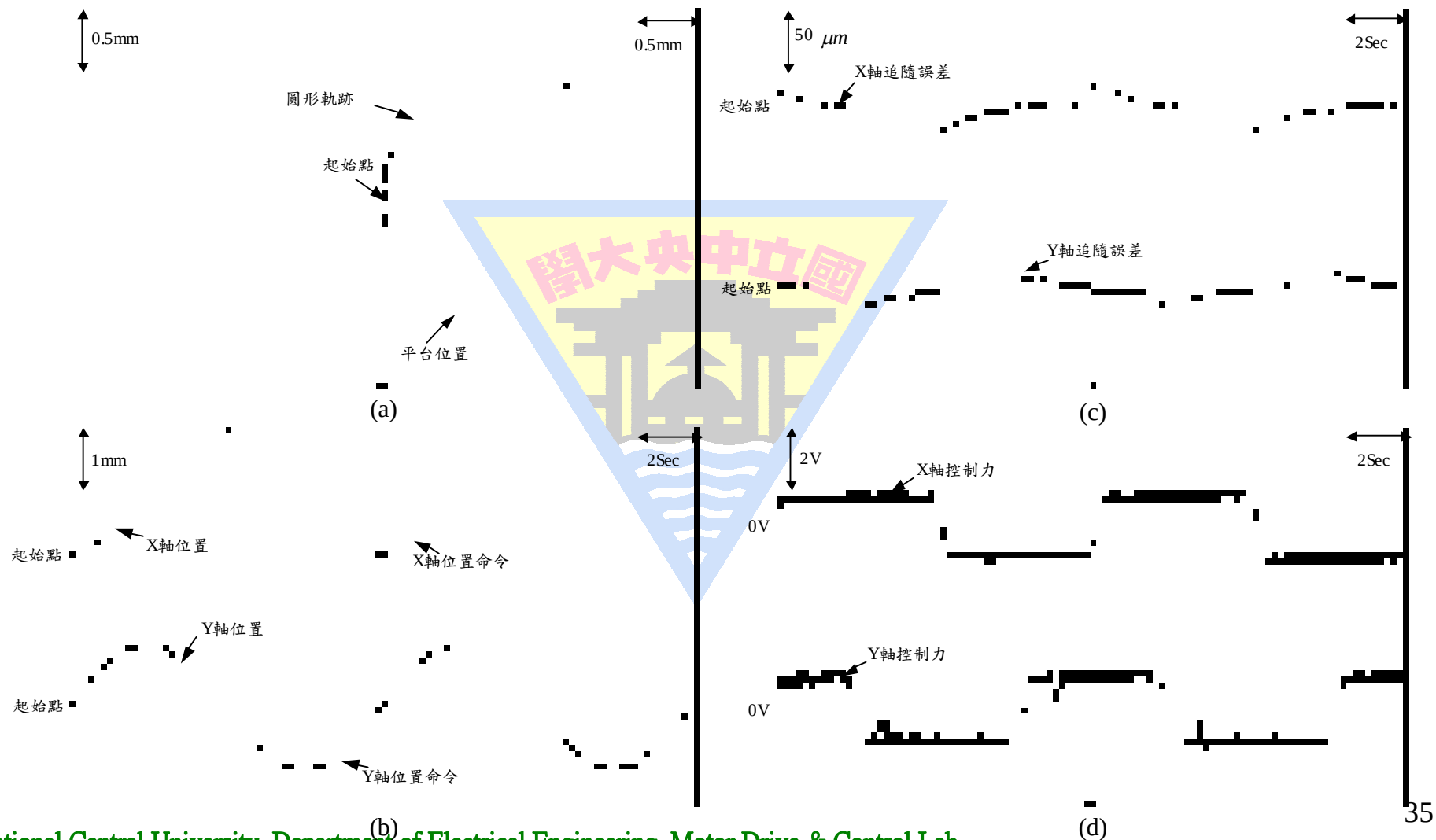
$$\dot{\tilde{\delta}}(t) = \eta_2 B_n z_2(t) \quad (4.26)$$

- 穩定度分析：

→ Lyapunov 穩定理論 & Barbalat's Lemma

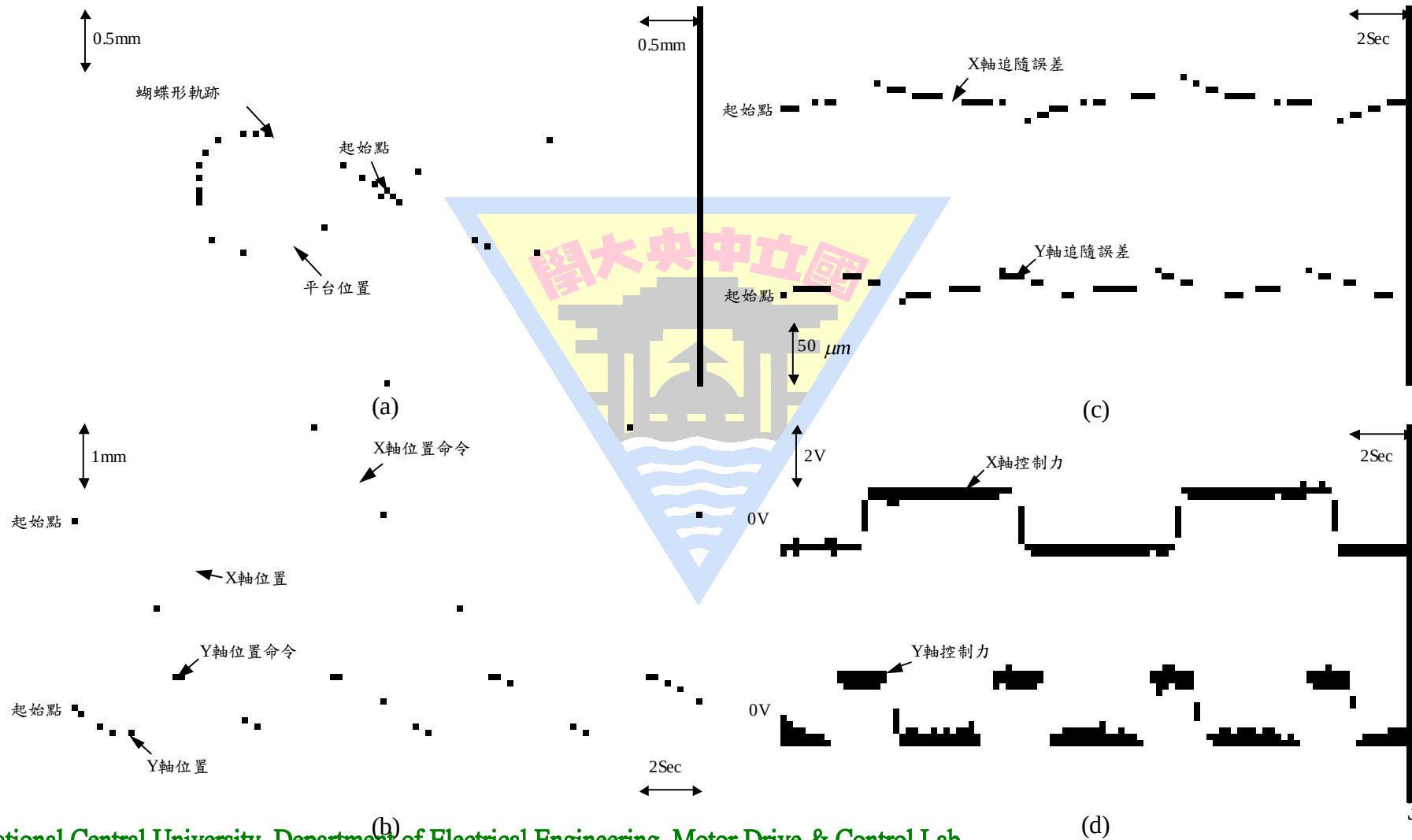
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 圓形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖4.4)



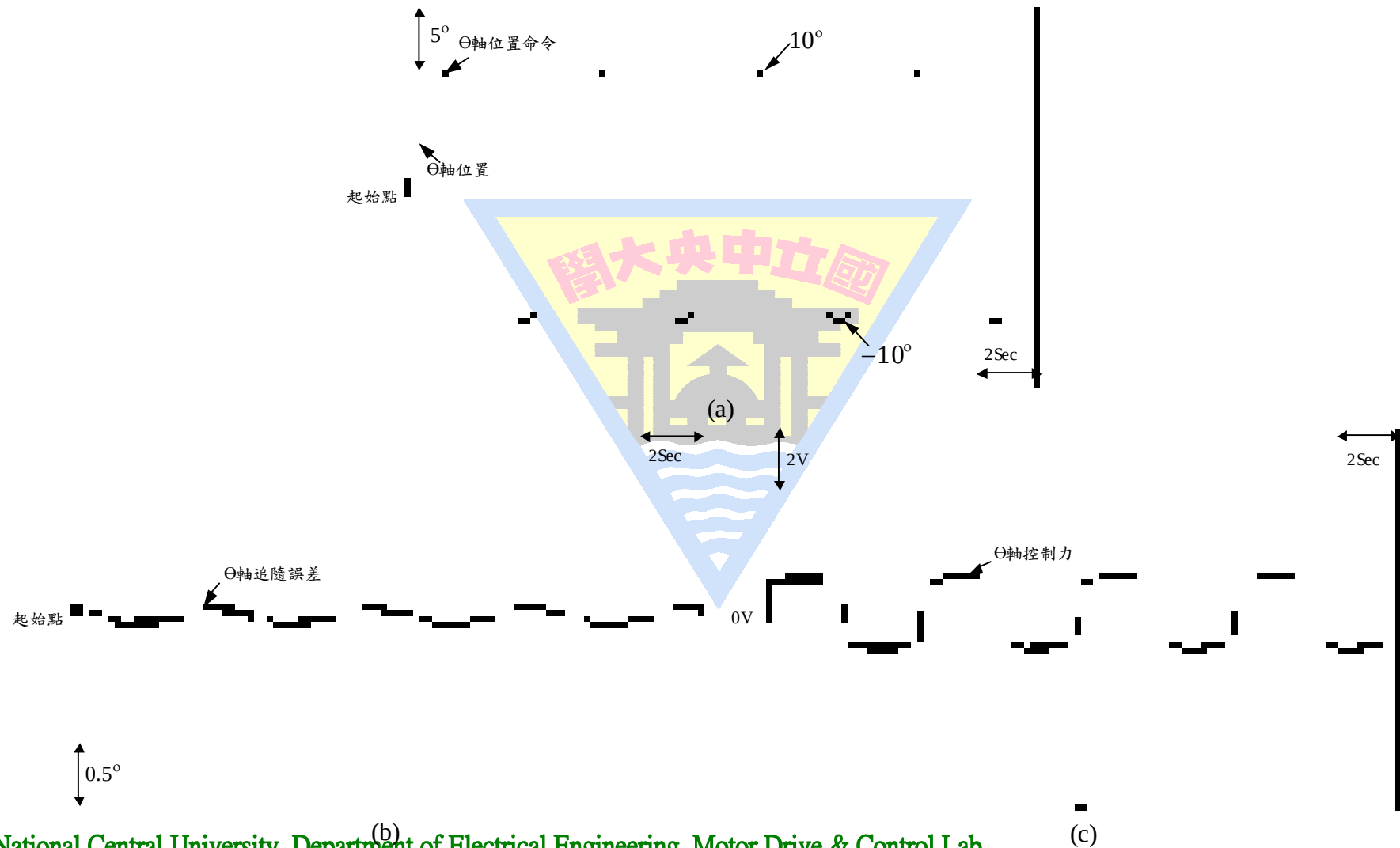
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖4.5)



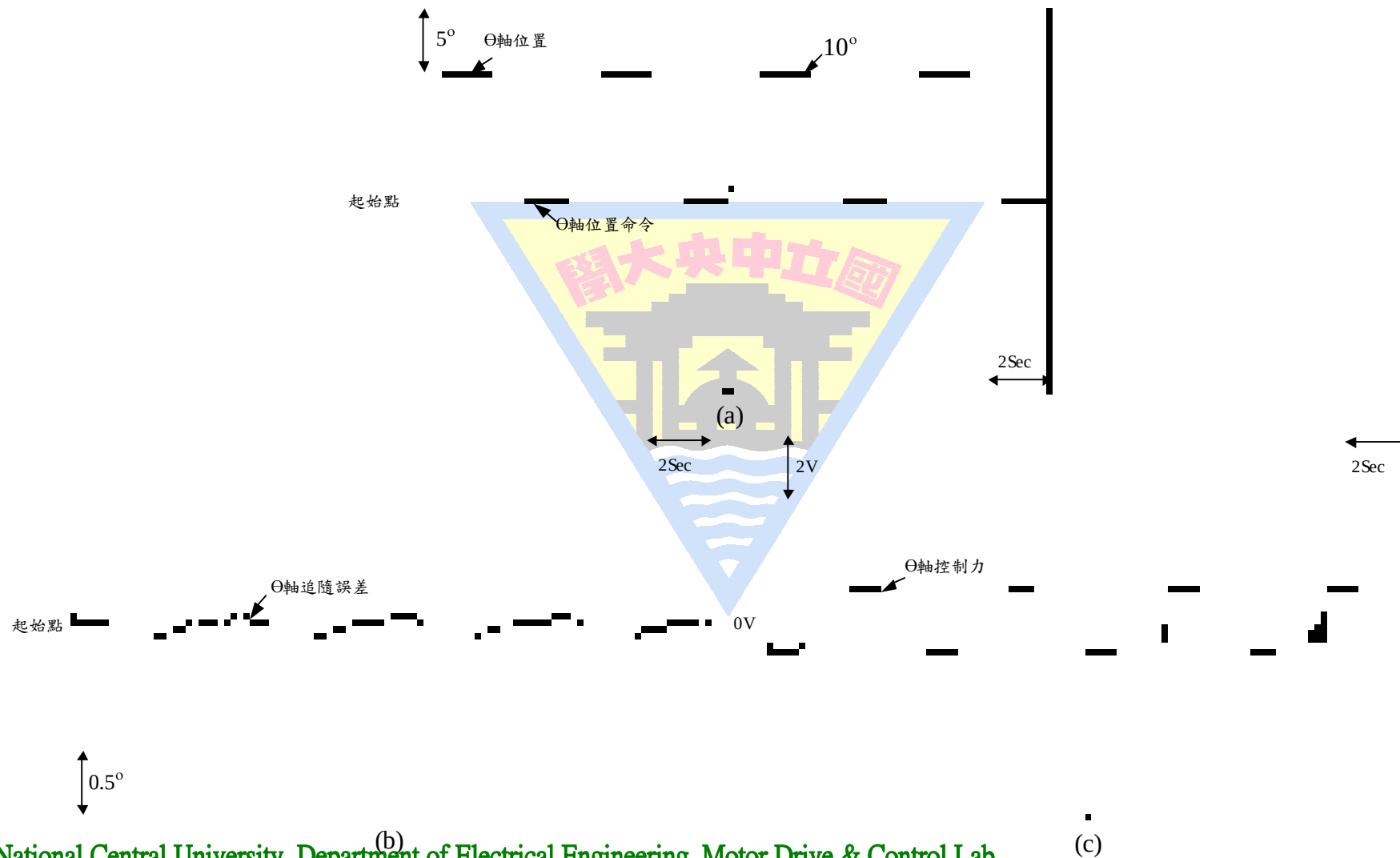
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 弦波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖4.6)



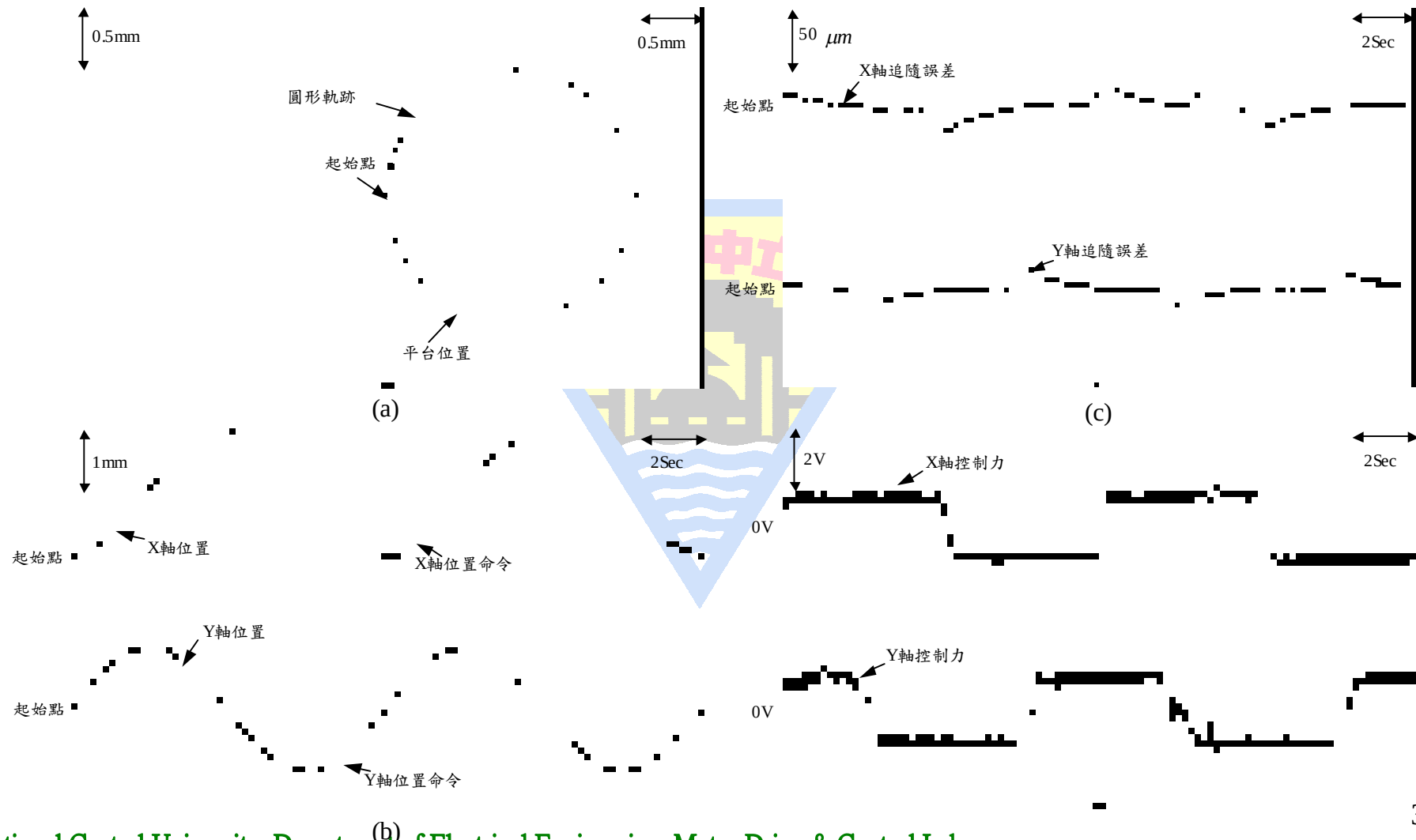
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 梯形波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖4.7)



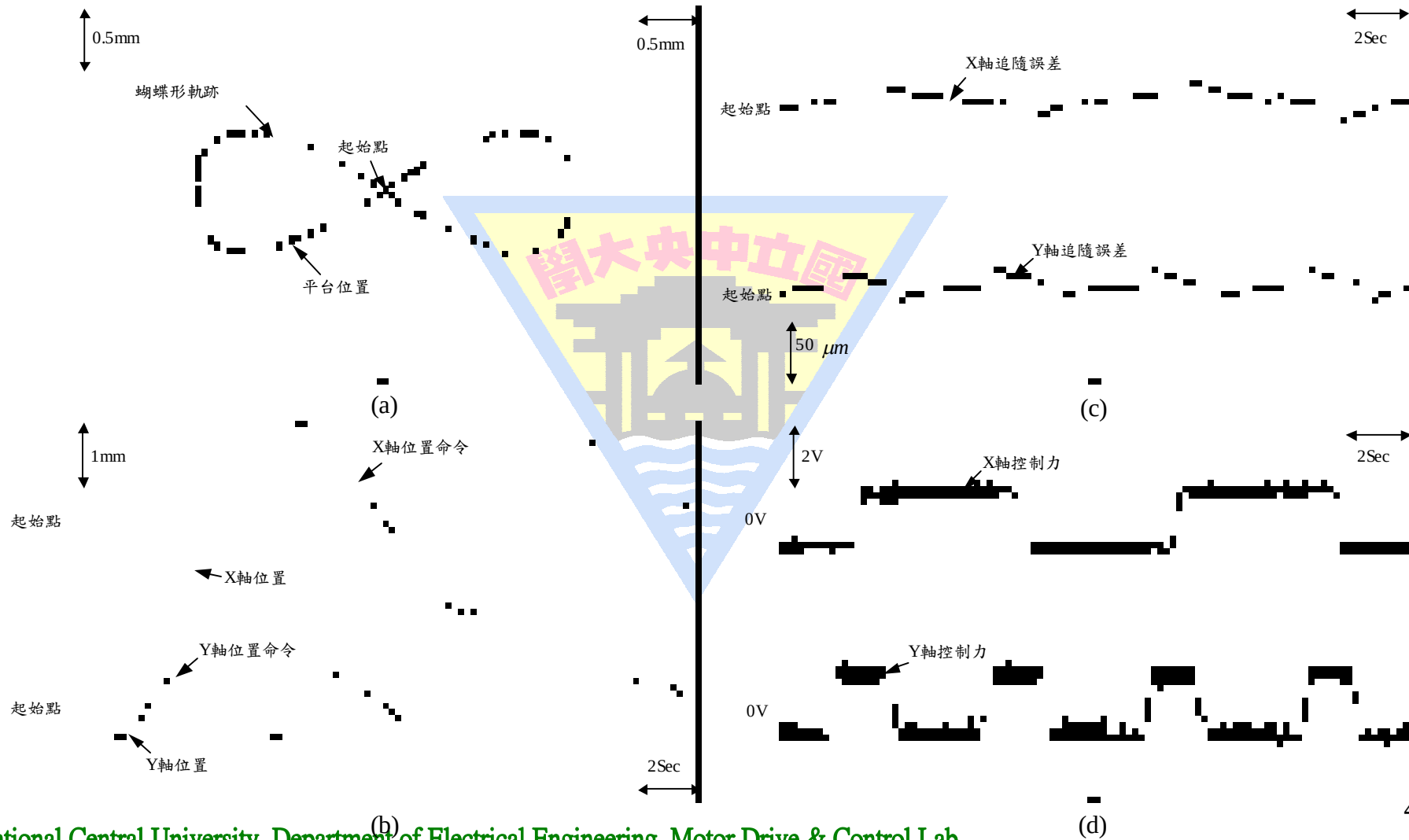
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 圓形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖4.8)



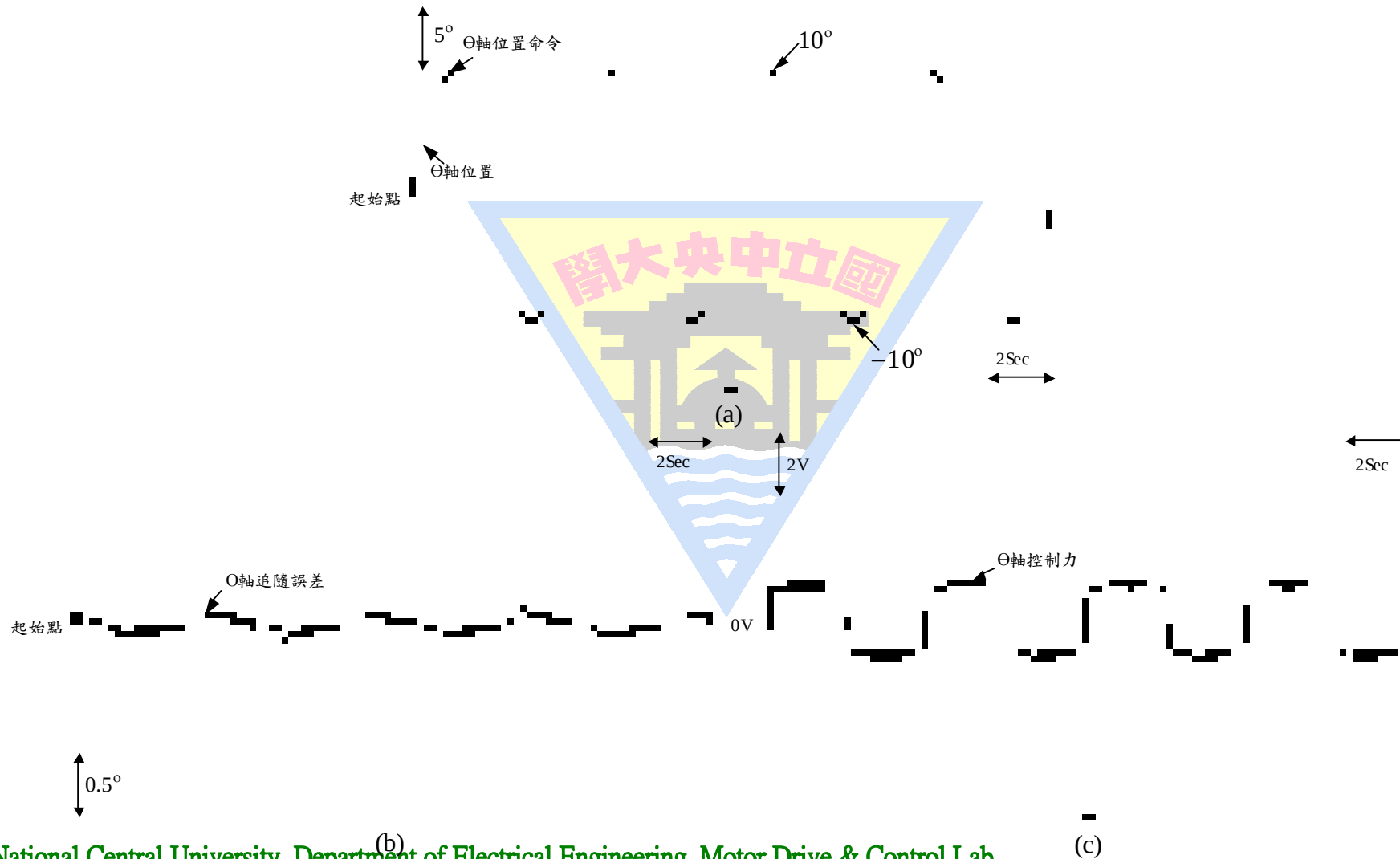
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖4.9)



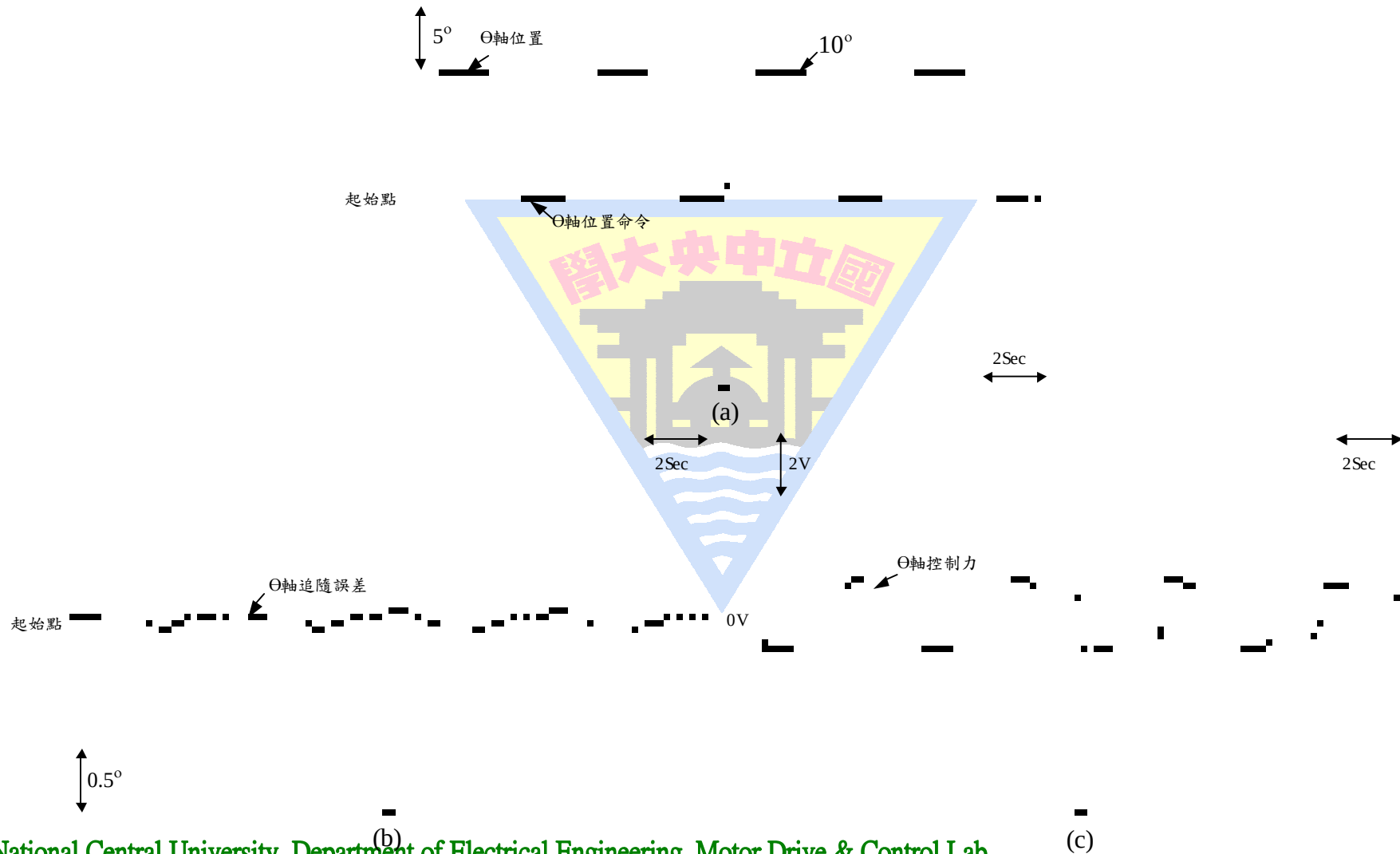
四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 弦波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖4.10)



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

□ 梯形波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖4.11)



四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

表4.1：狀況一下之X-Y軸性能量測

μm 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路控制系統	
	圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值	72.9	71.35	24.1	23.39
平均值	13.5	15.58	8.34	8.13
標準偏差值	14.4	15.46	8.39	7.3

表4.2：狀況一下之 Θ 軸性能量測

deg 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路控制系統	
	弦波	梯形波	弦波	梯形波
最大值	0.353	0.44	0.145	0.117
平均值	0.14	0.169	0.043	0.027
標準偏差差	0.102	0.105	0.029	0.025

四、強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路 步階迴歸控制系統(續)

表4.3：狀況二下之X-Y軸性能量測

μm 追隨誤差	控制器 & 軌跡	遞迴式模糊類神經網路控制系統		強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路控制系統	
		圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值		107.67	72.09	24.6	23.5
平均值		14.67	16.8	8.54	8.33
標準差		16.63	16.19	8.3	7.6

表4.4：狀況二下之 Θ 軸性能量測

deg 追隨誤差	控制器 & 軌跡	遞迴式模糊類神經網路控制系統		強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路控制系統	
		弦波	梯形波	弦波	梯形波
最大值		0.41	0.46	0.15	0.124
平均值		0.163	0.172	0.051	0.032
標準差		0.116	0.108	0.039	0.034

五、第二型區間模糊類神經網路控制系統

□ 第二型區間模糊邏輯系統

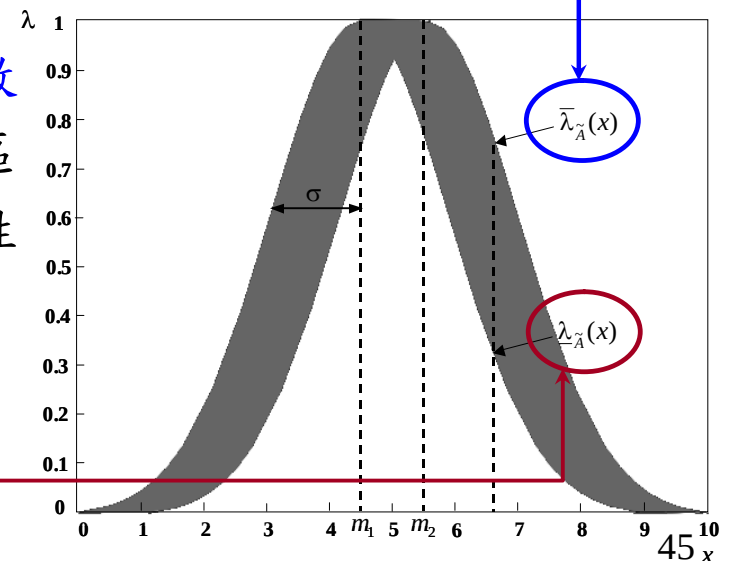
- 第二型區間模糊集合可表示成如下式所示：

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \lambda_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in P_x} 1/u \right] / x, \quad P_x \subseteq [0, 1] \quad (5.5)$$

其中 $\lambda_{\tilde{A}}(x)$ 可以被稱為第二型的區間歸屬函數，其數學式如下。

$$\lambda_{\tilde{A}}(x) = \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2} \right], \quad m \in [m_1, m_2] \quad (5.6)$$

第二型模糊集合是由一個上層歸屬函數 $\bar{\lambda}_{\tilde{A}}(x)$ 和一個下層歸屬函數 $\lambda_{\tilde{A}}(x)$ 所區隔出的一個區域，可視為一個不明確性的移動軌跡，如圖5.1所示。

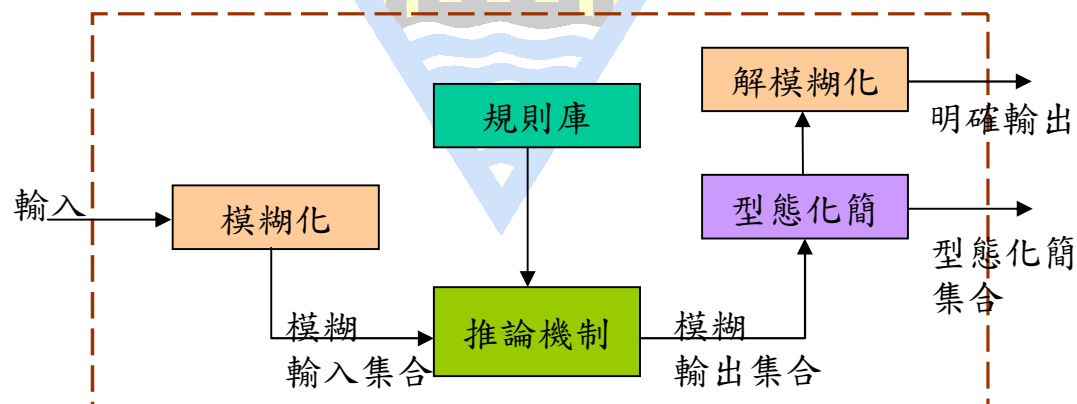


五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 第二型區間模糊類神經網路

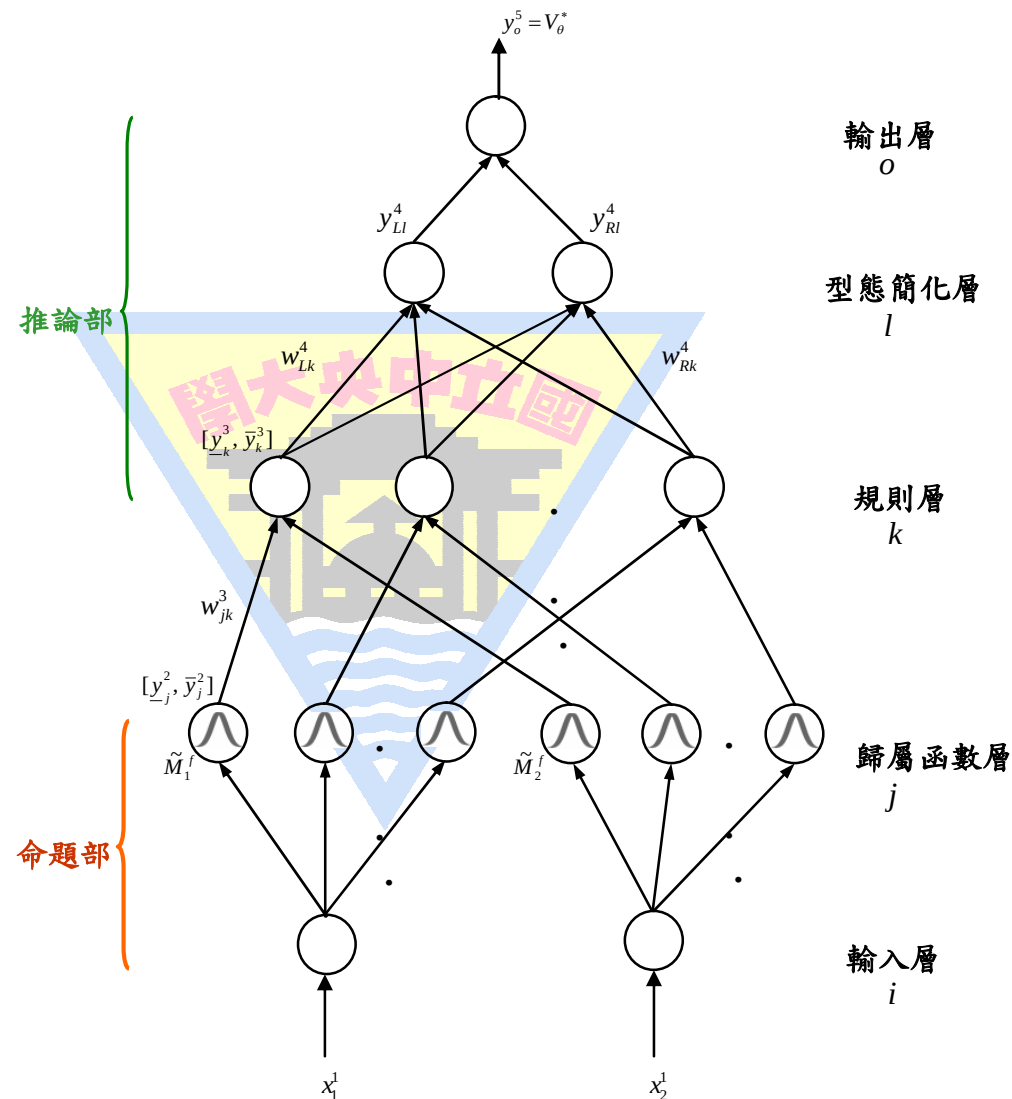
- 第二型區間模糊類神經網路是結合了第二型區間模糊邏輯系統和類神經網路的優點。
- 其目的在實現如下圖所示之第二型區間模糊邏輯系統。此第二型區間模糊類神經網路之IF-THEN邏輯規則可以表示如下：

$$R_f: \text{IF } x_1^1 \text{ is } \tilde{M}_1^f, \text{ and } x_2^1 \text{ is } \tilde{M}_2^f, \text{ THEN } y_1 \text{ is } [w_{Rf}^4, w_{Lf}^4] \quad (5.8)$$



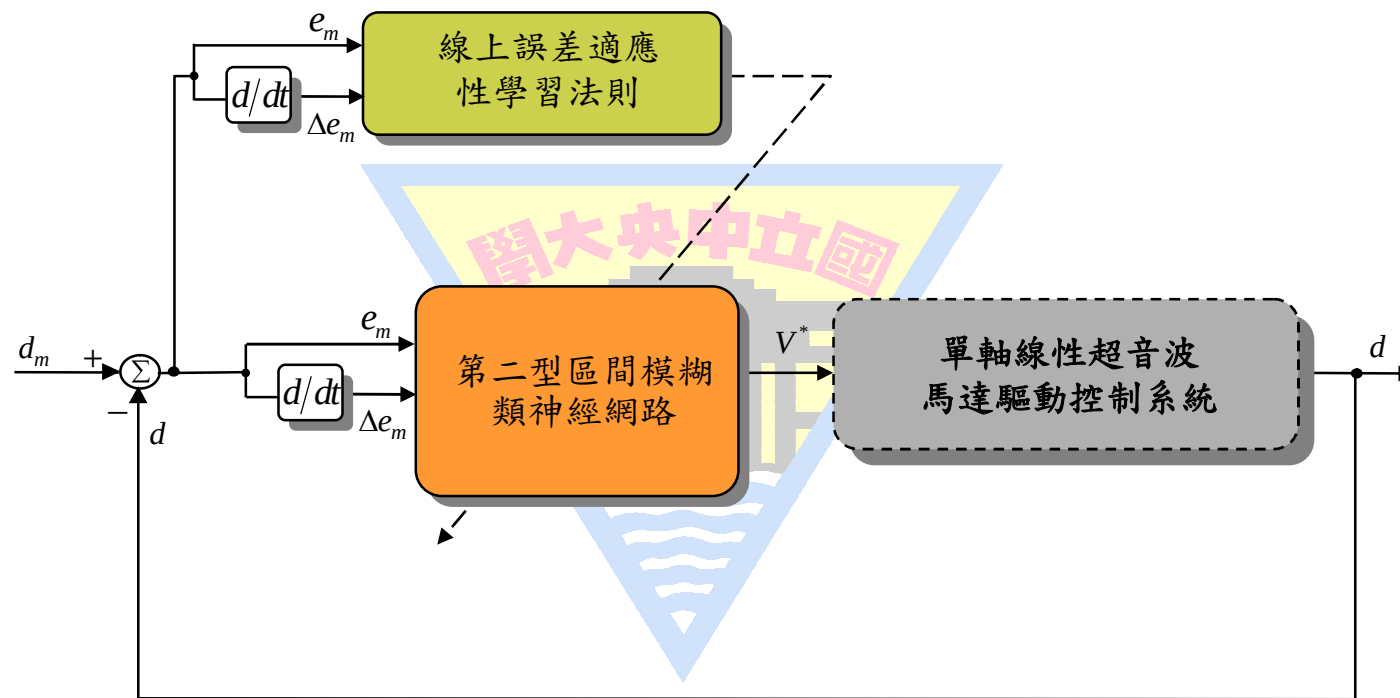
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 第二型區間模糊類神經網路簡化架構圖



五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 第二型區間模糊類神經網路控制系統架構圖



五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 參數學習演算法

- 首先定義一能量函數 E

$$E = \frac{1}{2}(d_m - d)^2 = \frac{1}{2}e^2 \quad (5.15)$$

- 基於倒傳遞演算法，其網路參數之迭代公式為：

$$\Delta w_{Rk}^4 = -\eta_w \frac{\partial E}{\partial w_{Rk}^4} = -\left[\eta_w \frac{\partial E}{\partial net_l^4} \frac{\partial net_l^4}{\partial y_{Rl}^4} \frac{\partial y_{Rl}^4}{\partial w_{Rk}^4} \right] = \eta_w \delta^4 \frac{y_k^3}{\sum_{k=1}^n y_k^3} \quad (5.18)$$

$$\Delta w_{Lk}^4 = -\eta_w \frac{\partial E}{\partial w_{Lk}^4} = -\left[\eta_w \frac{\partial E}{\partial net_l^4} \frac{\partial net_l^4}{\partial y_{Ll}^4} \frac{\partial y_{Ll}^4}{\partial w_{Lk}^4} \right] = \eta_w \delta^4 \frac{y_k^3}{\sum_{k=1}^n y_k^3} \quad (5.19)$$

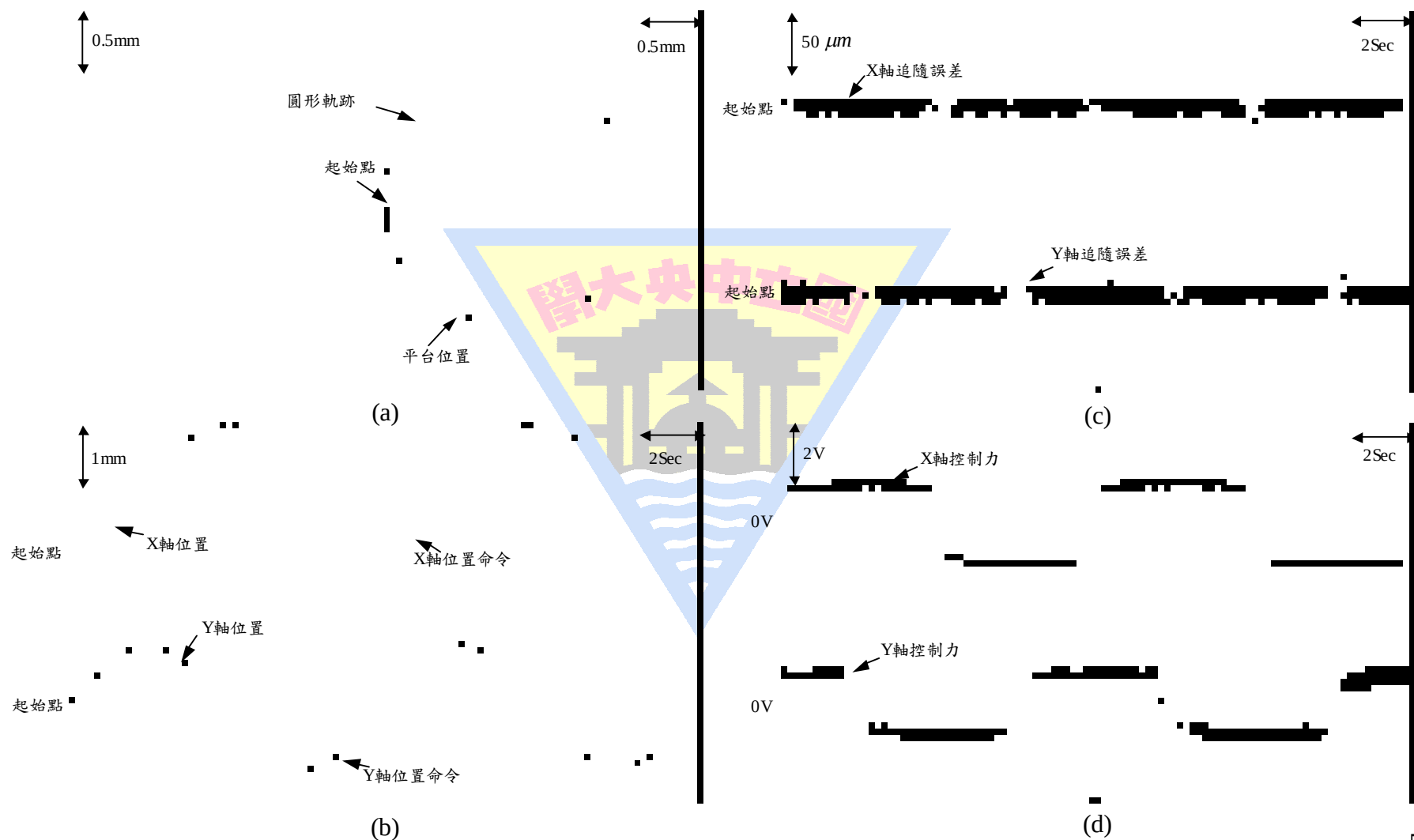
$$\Delta \bar{m}_{ij} = -\eta_m \frac{\partial E}{\partial \bar{m}_{ij}} = \left[-\eta_m \frac{\partial E}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial \bar{m}_{ij}} \right] = \eta_m \delta^3 y_j^2 \frac{(x_i^2 - \bar{m}_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (5.21)$$

$$\Delta \underline{m}_{ij} = -\eta_m \frac{\partial E}{\partial \underline{m}_{ij}} = \left[-\eta_m \frac{\partial E}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial \underline{m}_{ij}} \right] = \eta_m \delta^3 y_j^2 \frac{(x_i^2 - \underline{m}_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (5.22)$$

$$\Delta \sigma_{ij} = -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = \left[-\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial \sigma_{ij}} \right] = \eta_\sigma \delta^3 y_j^2 \frac{(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^3} \quad (5.23)$$

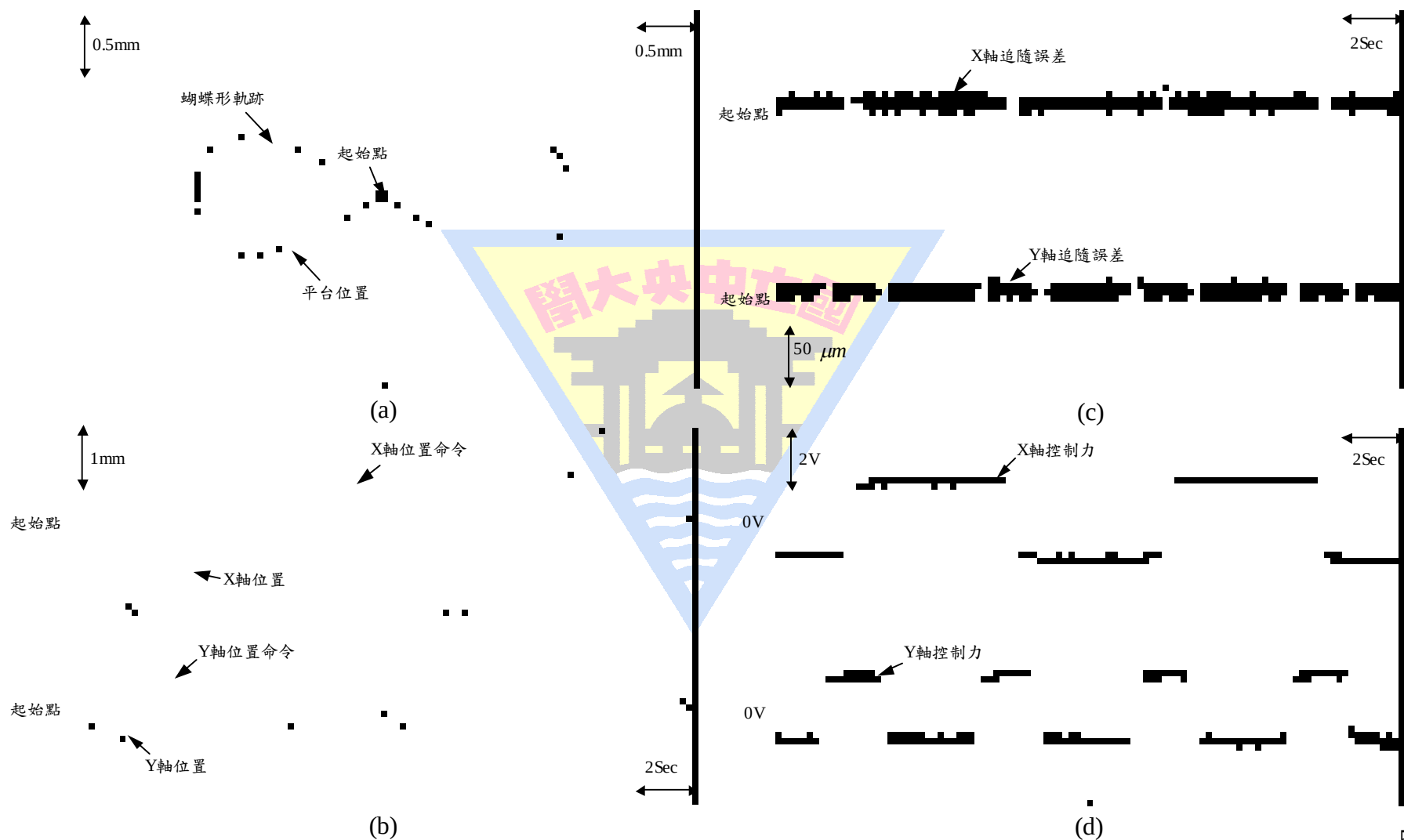
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 圓形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖5.5)



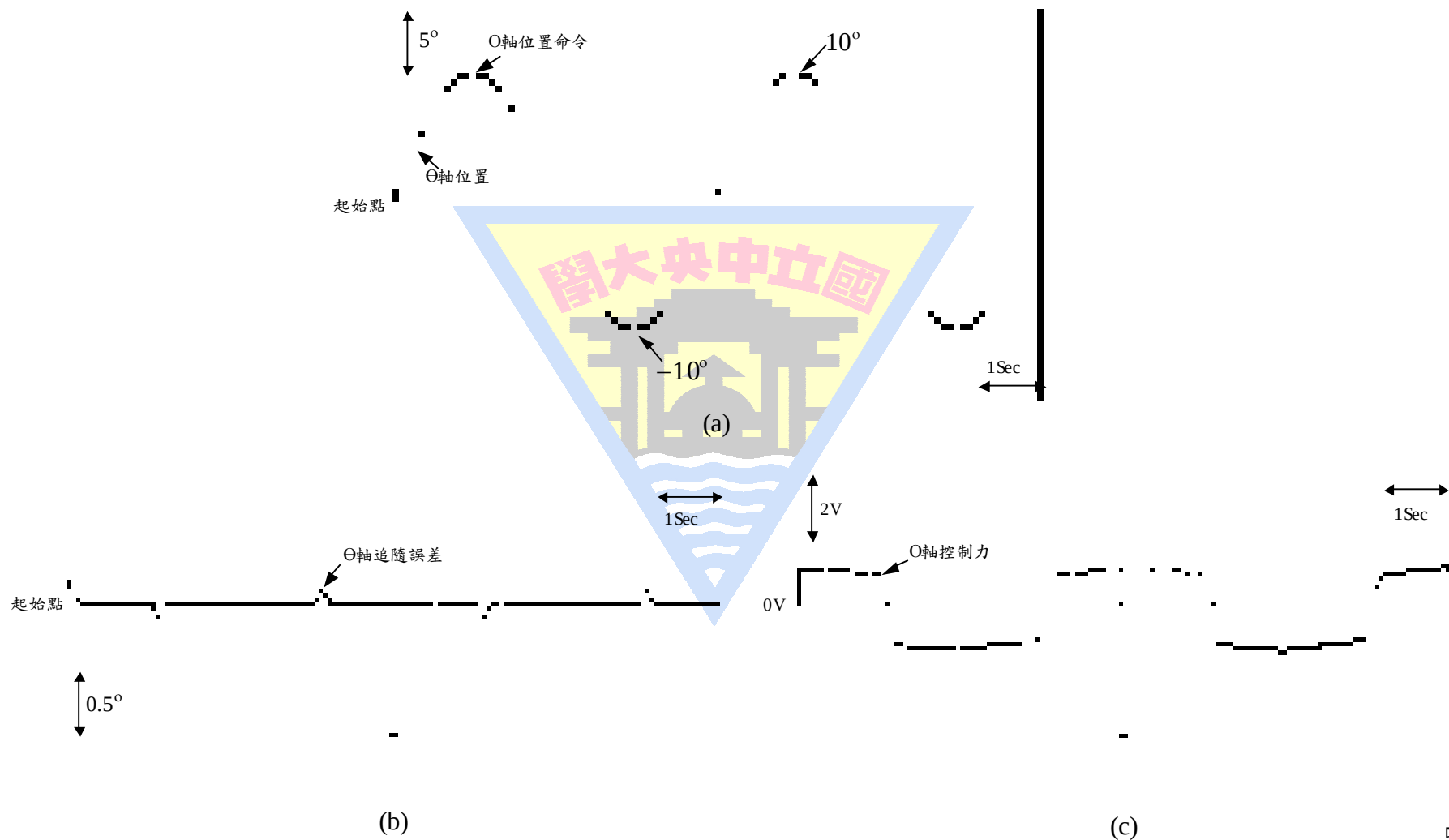
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖5.6)



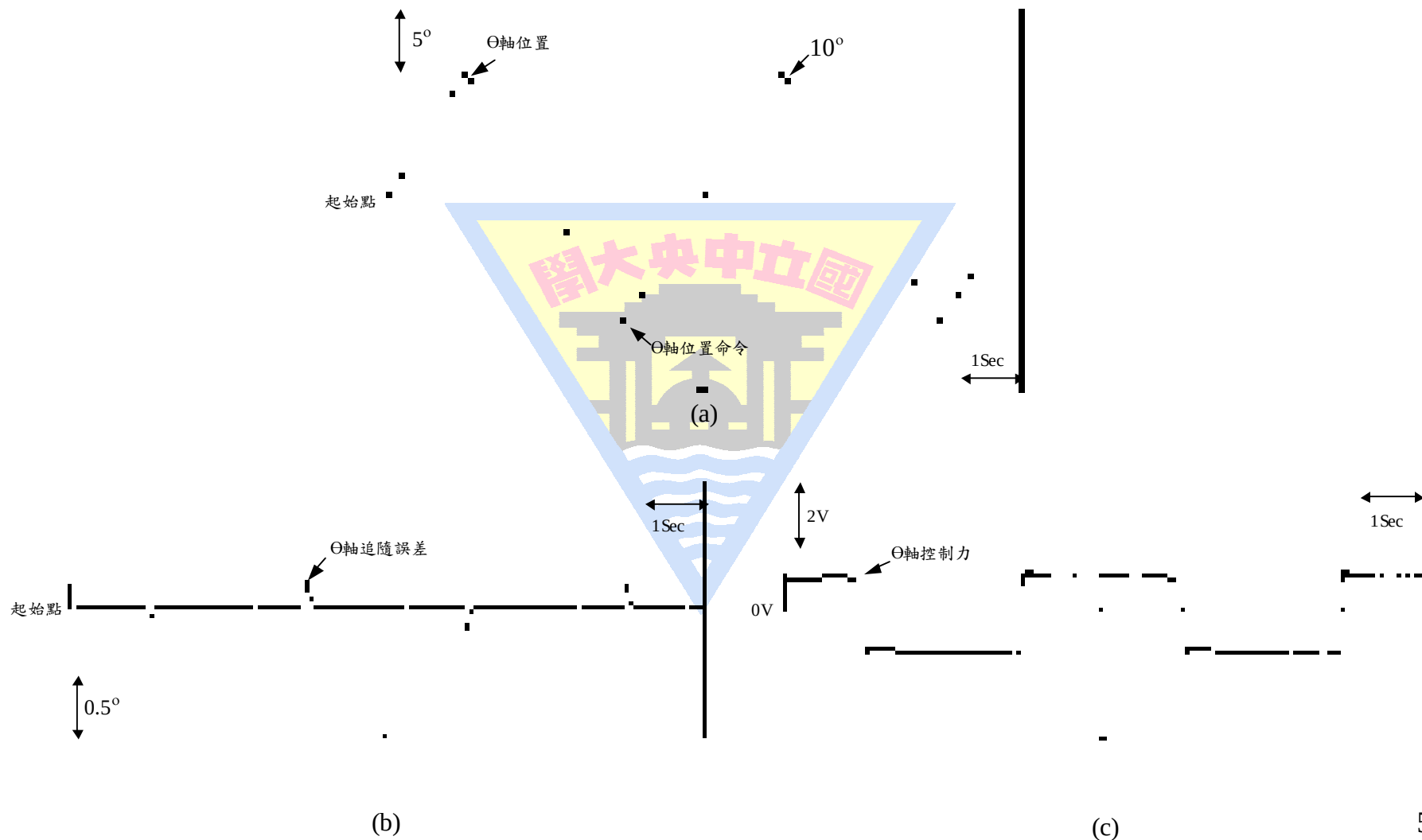
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 弦波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖5.7)



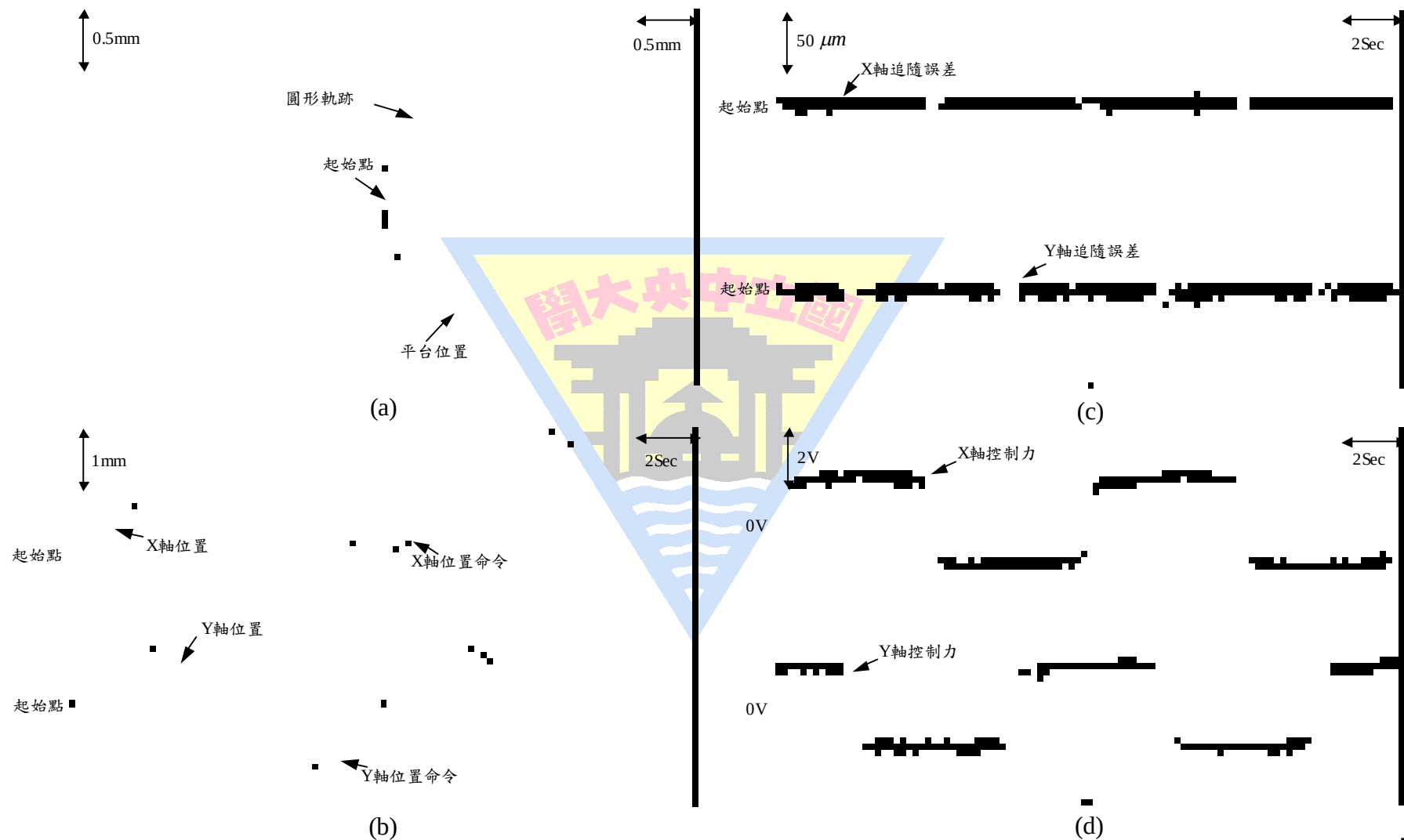
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 三角波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖5.8)



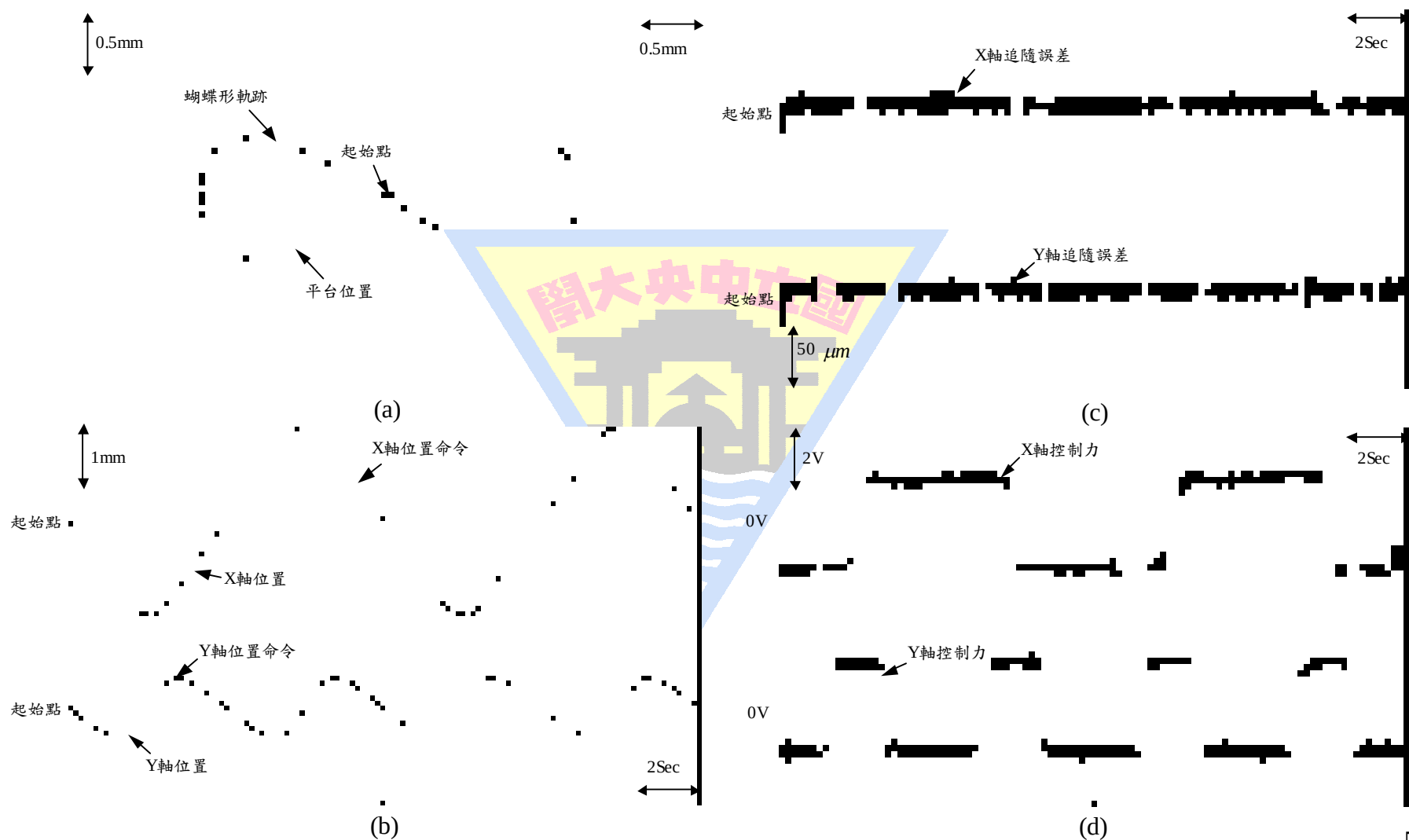
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 圓形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖5.9)



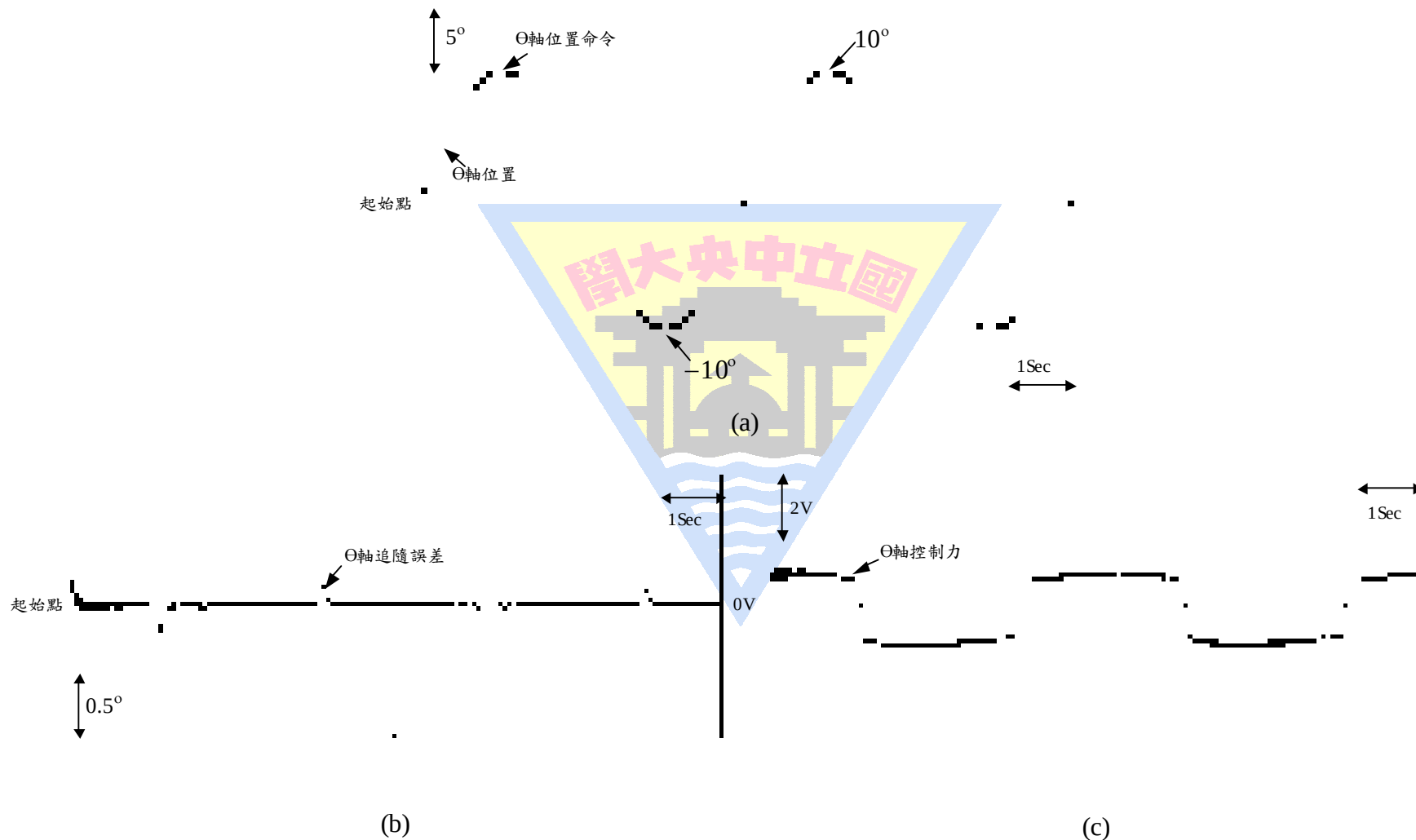
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖5.10)



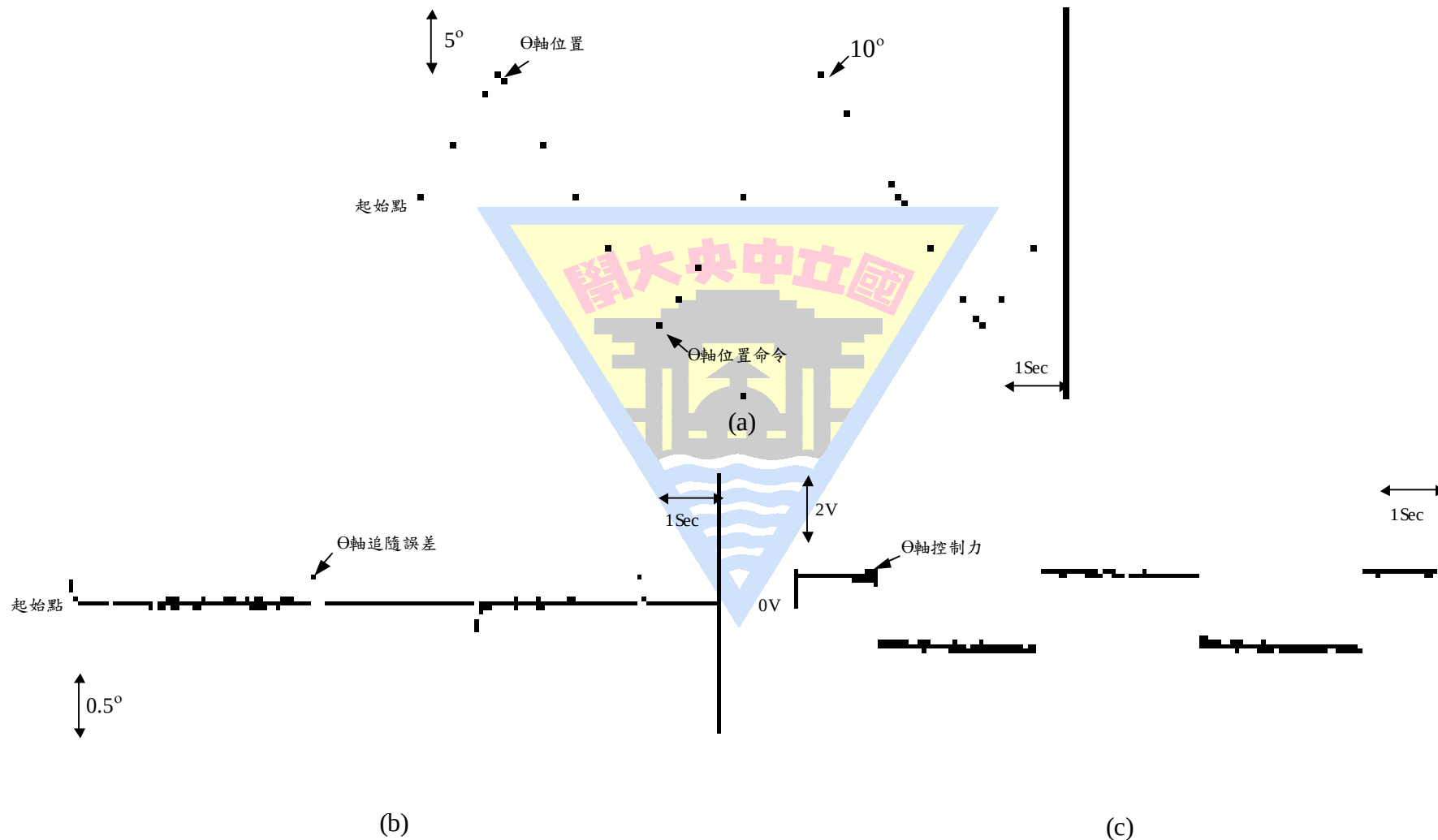
五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 弦波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖5.12)



五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 三角波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖5.13)



五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

表5.1：狀況一下之X-Y軸性能量測

μm 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值	72.9	71.35	25.3	26.6
平均值	13.5	15.58	6.3	7.3
標準差	14.4	15.46	4.23	4.09

表5.2：狀況一下之 Θ 軸性能量測

deg 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	弦波	三角波	弦波	三角波
最大值	0.353	0.50	0.193	0.252
平均值	0.14	0.182	0.012	0.013
標準差	0.102	0.133	0.026	0.025

五、第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

表5.3：狀況二下之X-Y軸性能量測

μm 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值	107.67	72.09	24.6	29.5
平均值	14.67	16.8	6.28	7.62
標準差	16.63	16.19	4.31	4.89

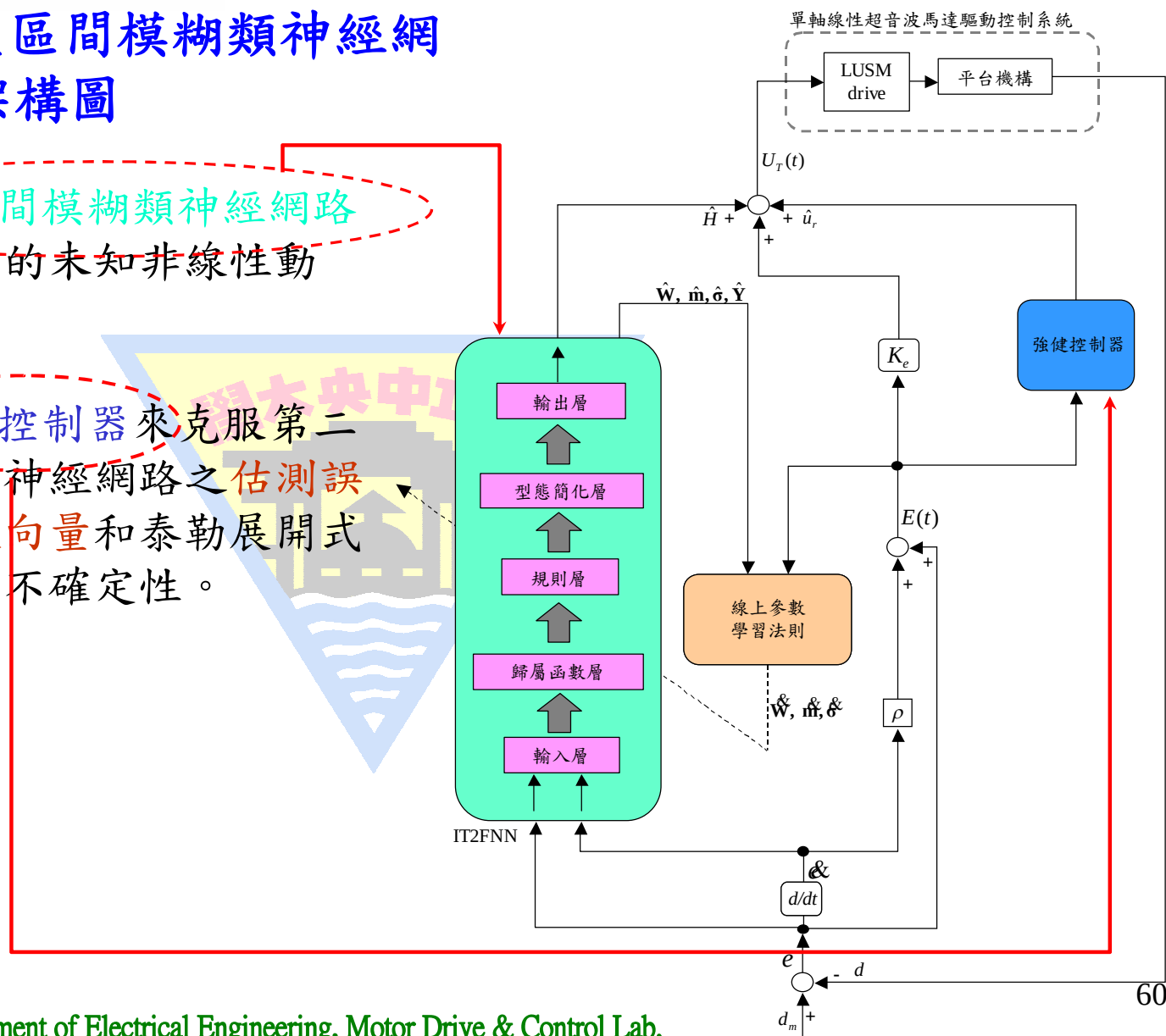
表5.4：狀況二下之 Θ 軸性能量測

deg 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	弦波	三角波	弦波	三角波
最大值	0.41	0.55	0.222	0.281
平均值	0.163	0.21	0.015	0.021
標準差	0.116	0.13	0.031	0.033

六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統

□ 適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統架構圖

- 利用第二型區間模糊類神經網路來近似系統中的未知非線性動態函數。
- 設計一個強健控制器來克服第二型區間模糊類神經網路之估測誤差、最佳參數向量和泰勒展開式中的高階項等不確定性。



六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

- 將第二型區間模糊類神經網路的輸出型式表示如下：

$$y_o = \frac{1}{2} \mathbf{W}^T \mathbf{Y}(\mathbf{x}^1, \mathbf{m}, \sigma) \quad (6.7)$$

- 接著定義追隨誤差 $e(t) = d_m(t) - d(t)$ 與誤差函數 $E(t) = \dot{e}(t) + \rho e(t)$ 。並且將誤差函數微分，可得下式：

$$B_n \dot{E}(t) = B_n A_n E(t) - U_T(t) + H \quad (6.10)$$

未知的非線性函數 H 定義如下

$$H \equiv B_n \left\{ \Delta A \cdot \dot{d}(t) + \Delta B \cdot U_T + (C_n + \Delta C)[F_L + f(\dot{d}(t))] + [\ddot{d}_m(t) + \rho \dot{e}(t)] \right\} \\ - B_p A_p [\dot{d}_m(t) + \rho e(t)]$$

- 系統之控制法則設計如下：

$$U_T(t) = K_e E(t) + \hat{H} + u_r = V^* \quad (6.12)$$

網路輸出估測值 $\hat{H}$ 強健控制器 u_r

六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

- 定義Lyapunov函數：

$$V_L(E(t), \tilde{\mathbf{W}}, \tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\boldsymbol{\sigma}}, \tilde{T}(t)) = \frac{B_n}{2} E^2(t) + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\mathbf{m}}^T \tilde{\mathbf{m}} + \frac{1}{2\eta_3} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^T \tilde{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{1}{2\eta_4} \tilde{T}^2(t)$$

- 適應性學習演算法設計如下：

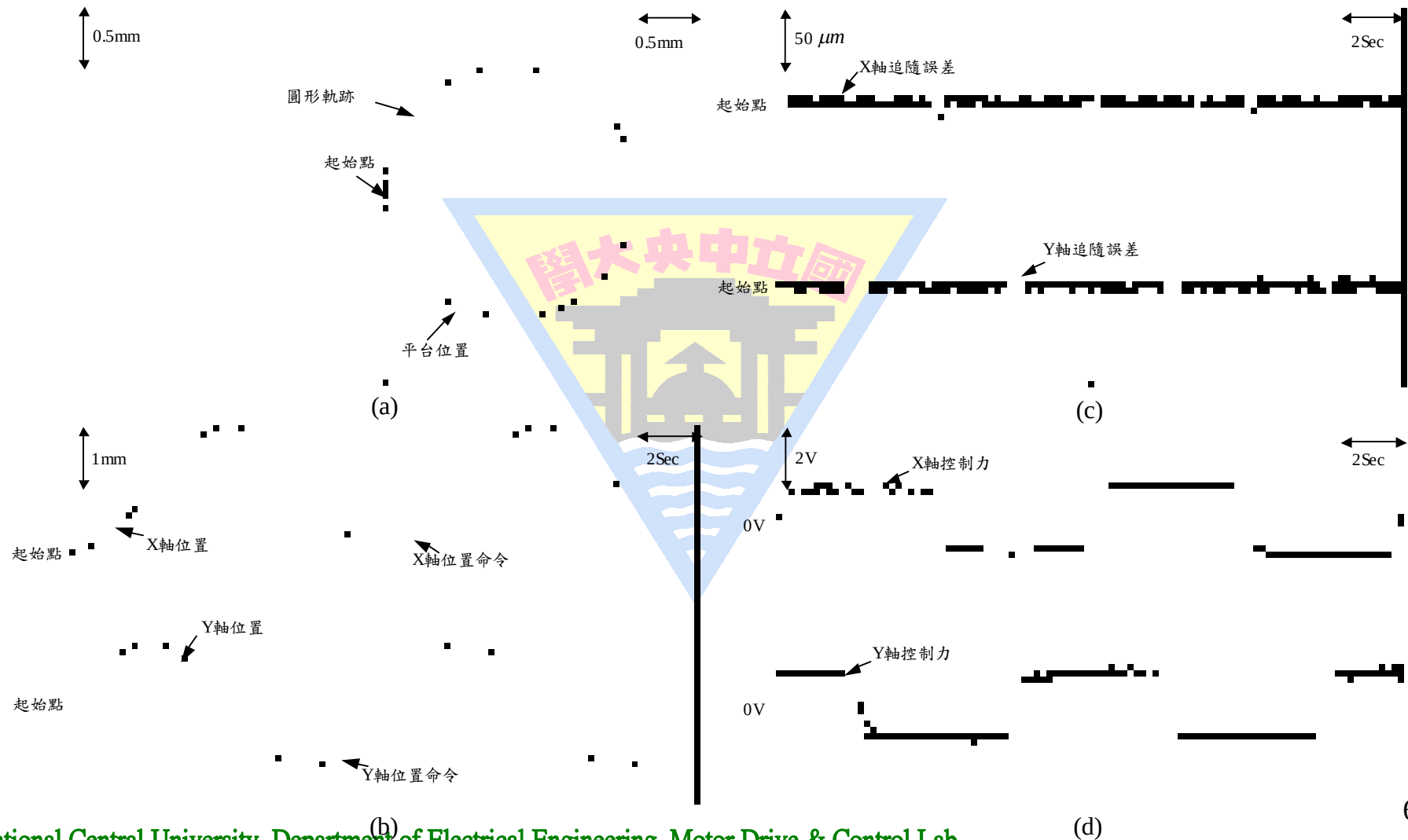
$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = \frac{1}{2} \eta_1 (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_m^T \hat{\mathbf{m}} - \mathbf{Y}_\sigma^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}) E(t) \\ \dot{\tilde{\mathbf{m}}} = \frac{1}{2} \eta_2 \hat{\mathbf{W}} \mathbf{Y}_m E(t) \\ \dot{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}} = \frac{1}{2} \eta_3 \hat{\mathbf{W}} \mathbf{Y}_\sigma E(t) \\ \dot{\tilde{T}}(t) = \eta_4 E(t) \\ u_r = \hat{T}(t) \end{cases}$$

- 穩定度分析：

→ Lyapunov 穩定理論 & Barbalat's Lemma

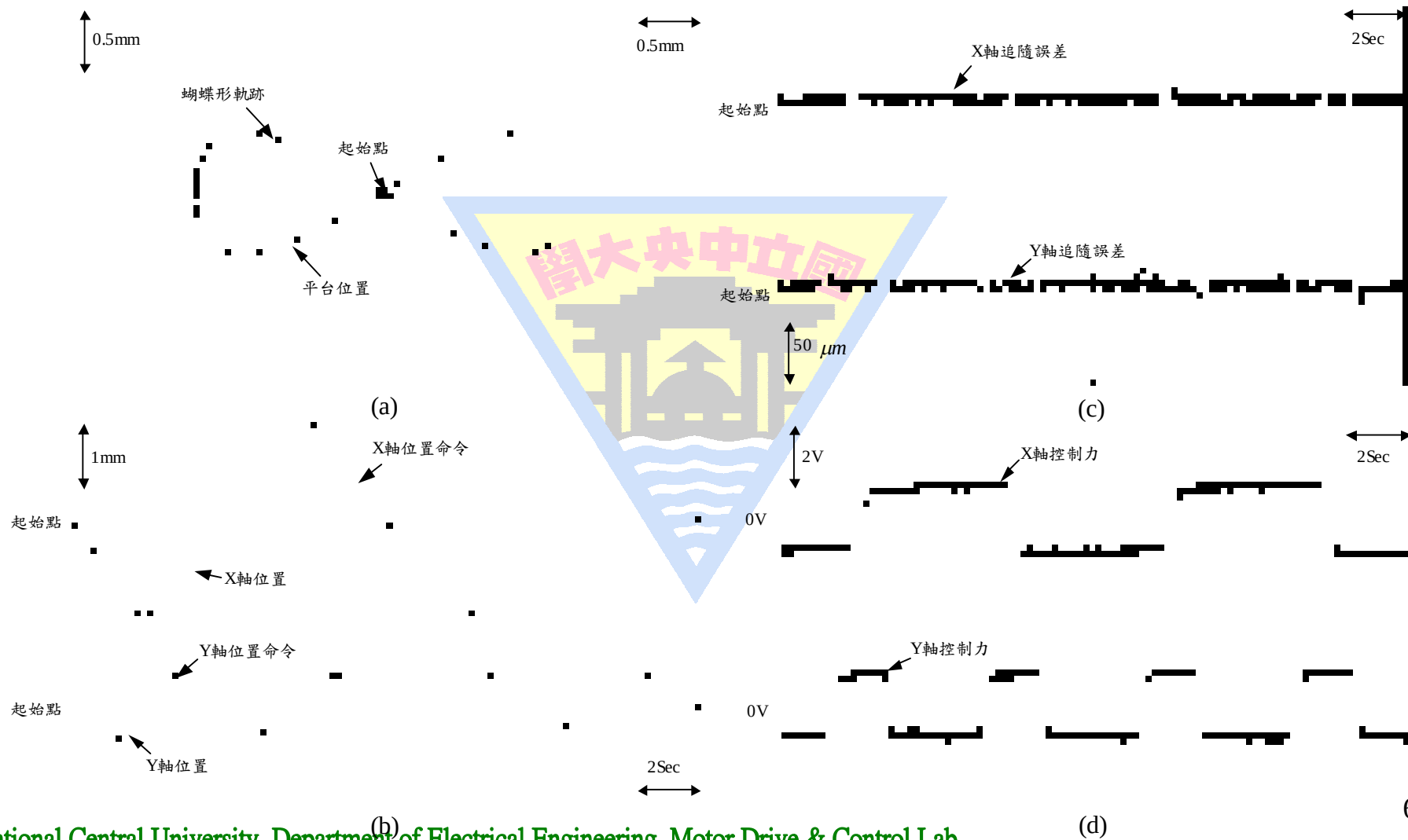
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 圓形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖6.2)



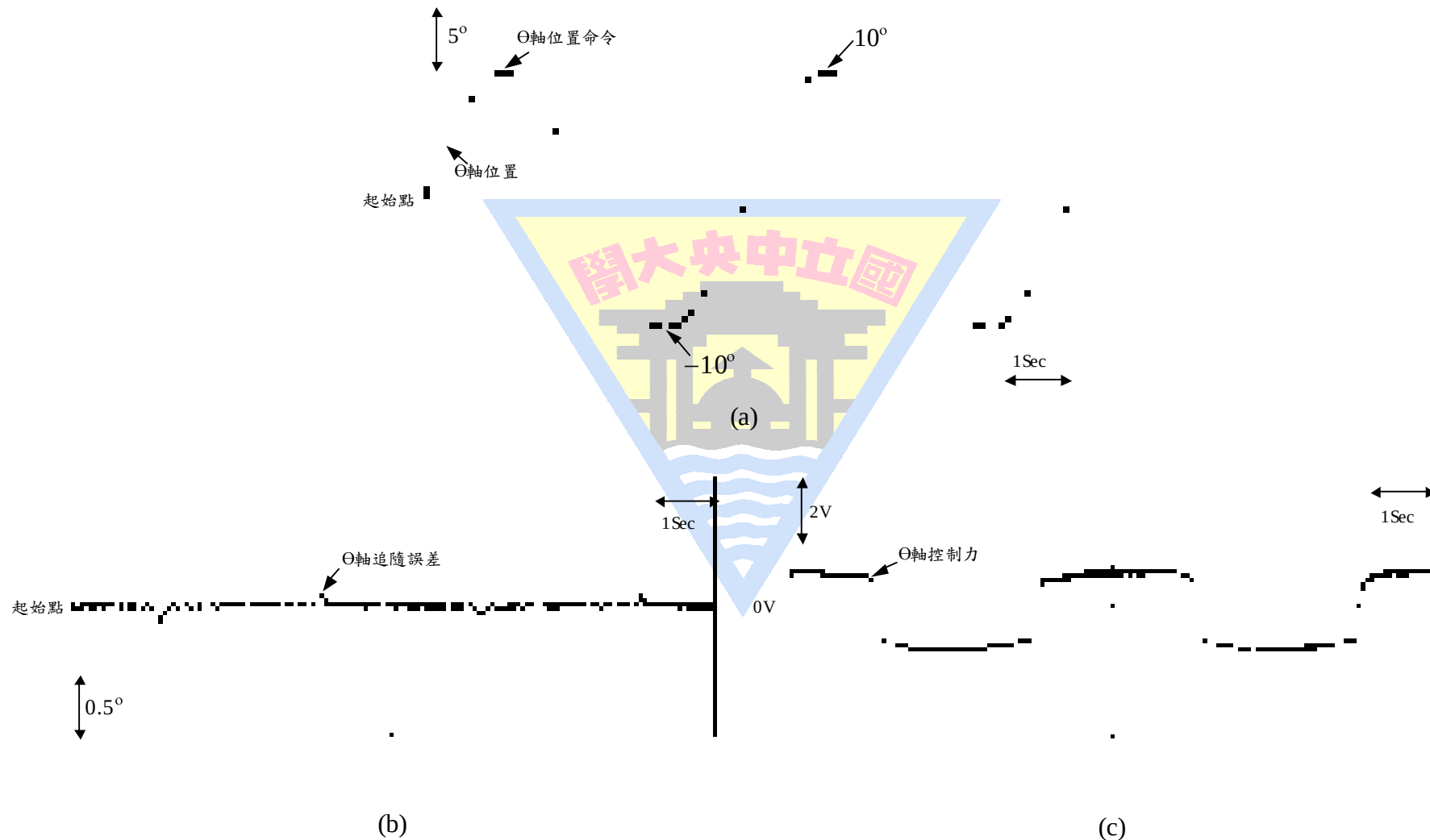
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在標準狀況之實測結果 (圖6.3)



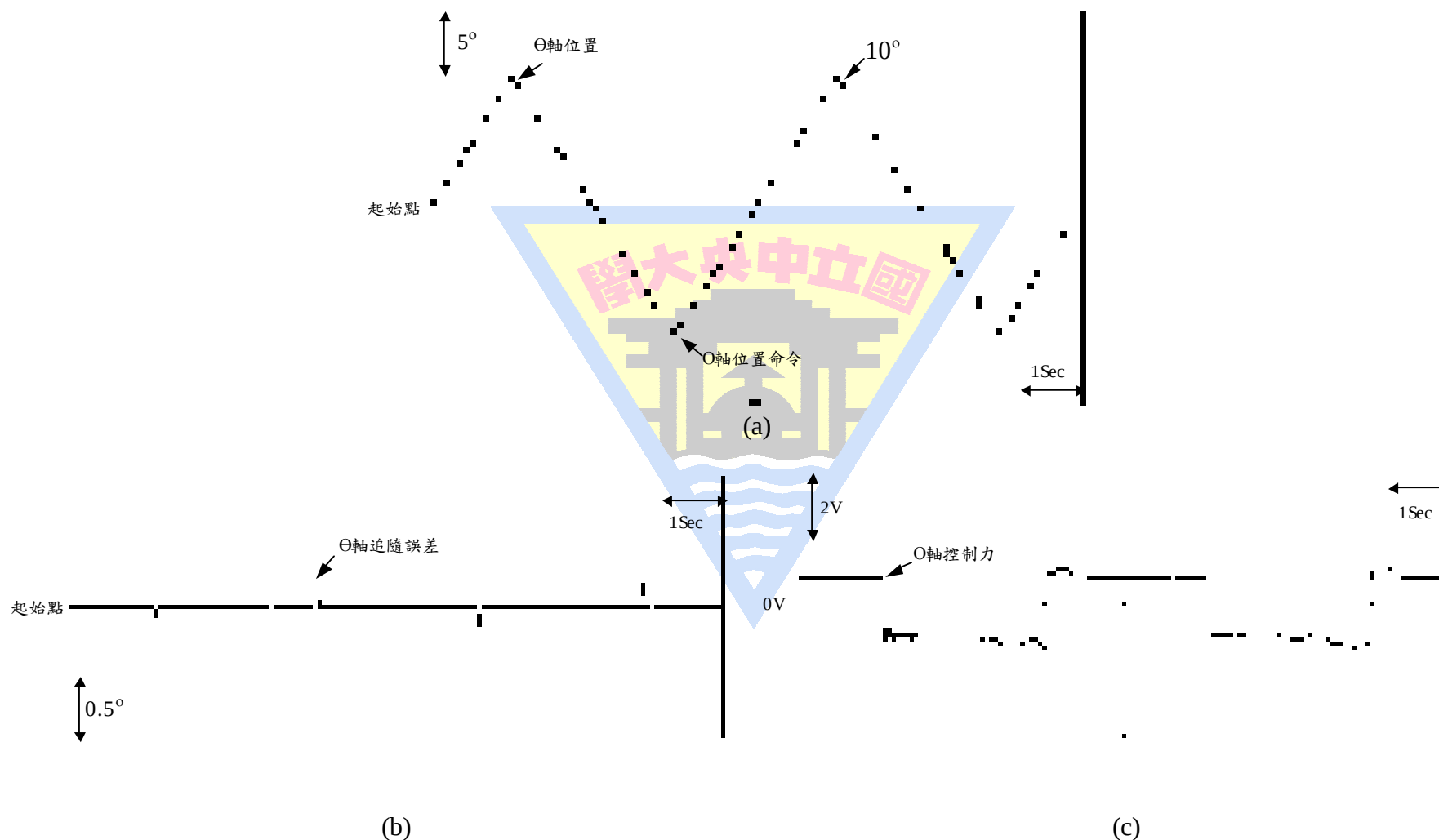
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 弦波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖6.4)



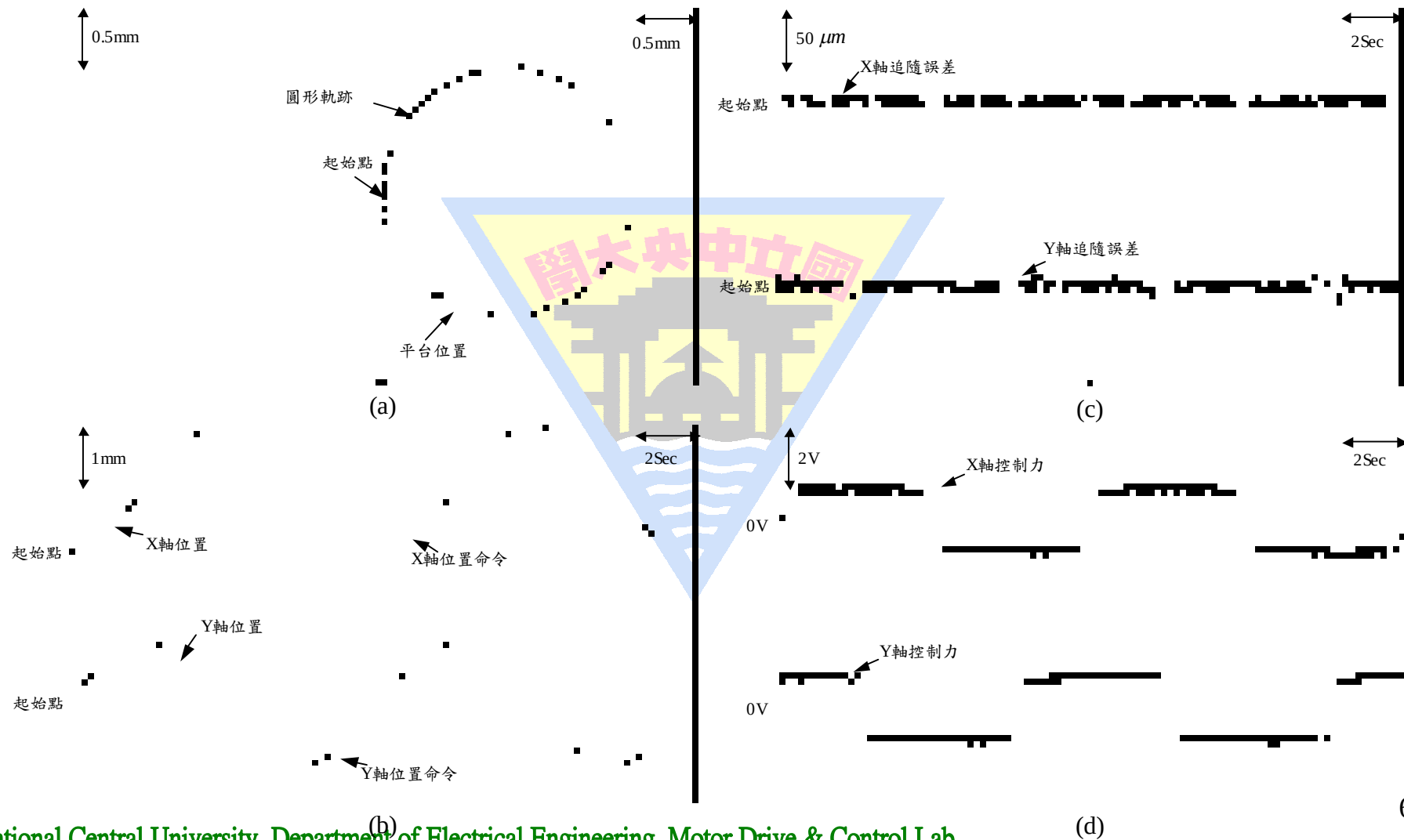
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 三角波軌跡在標準狀況之實測結果 (圖6.5)



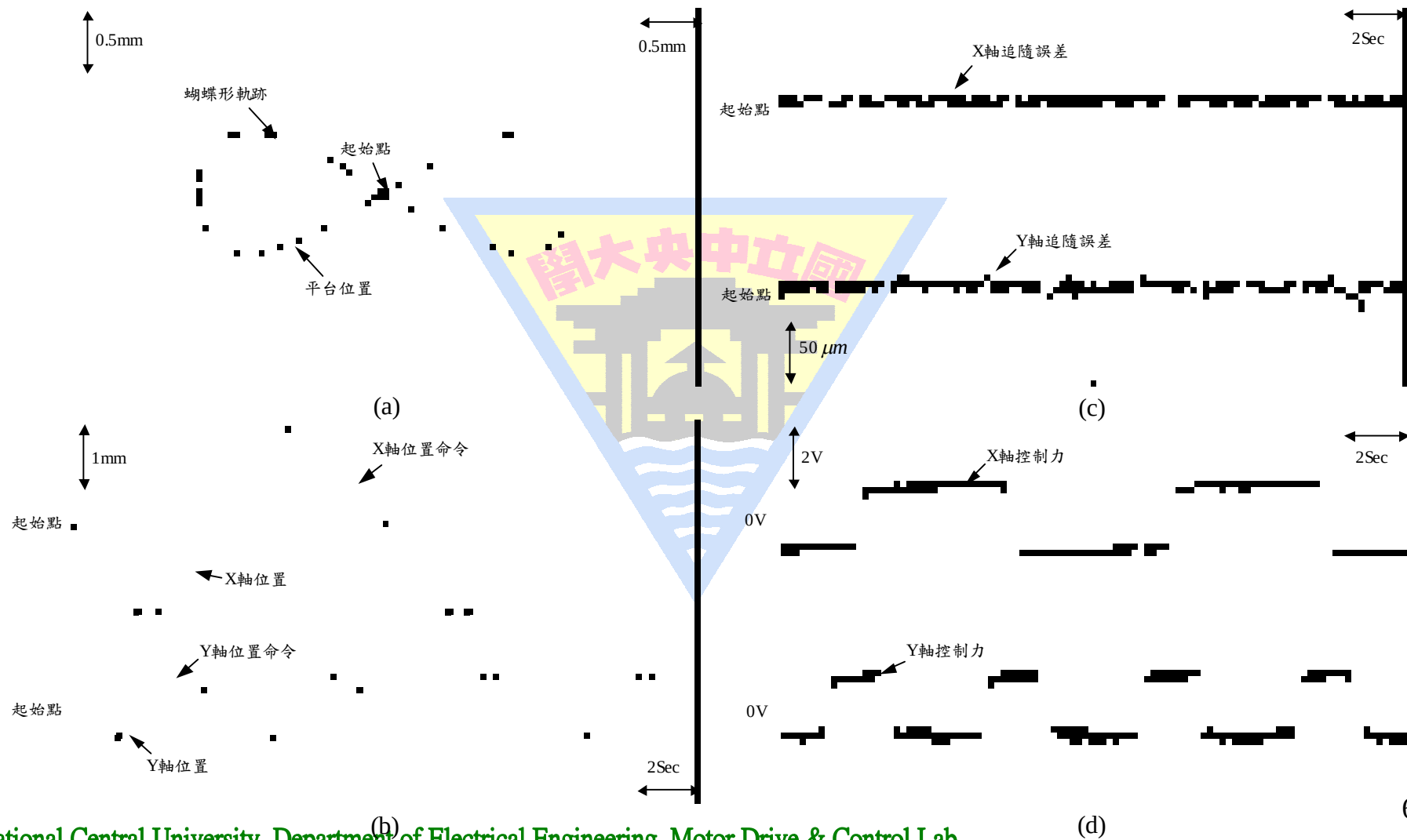
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 圓形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖6.6)



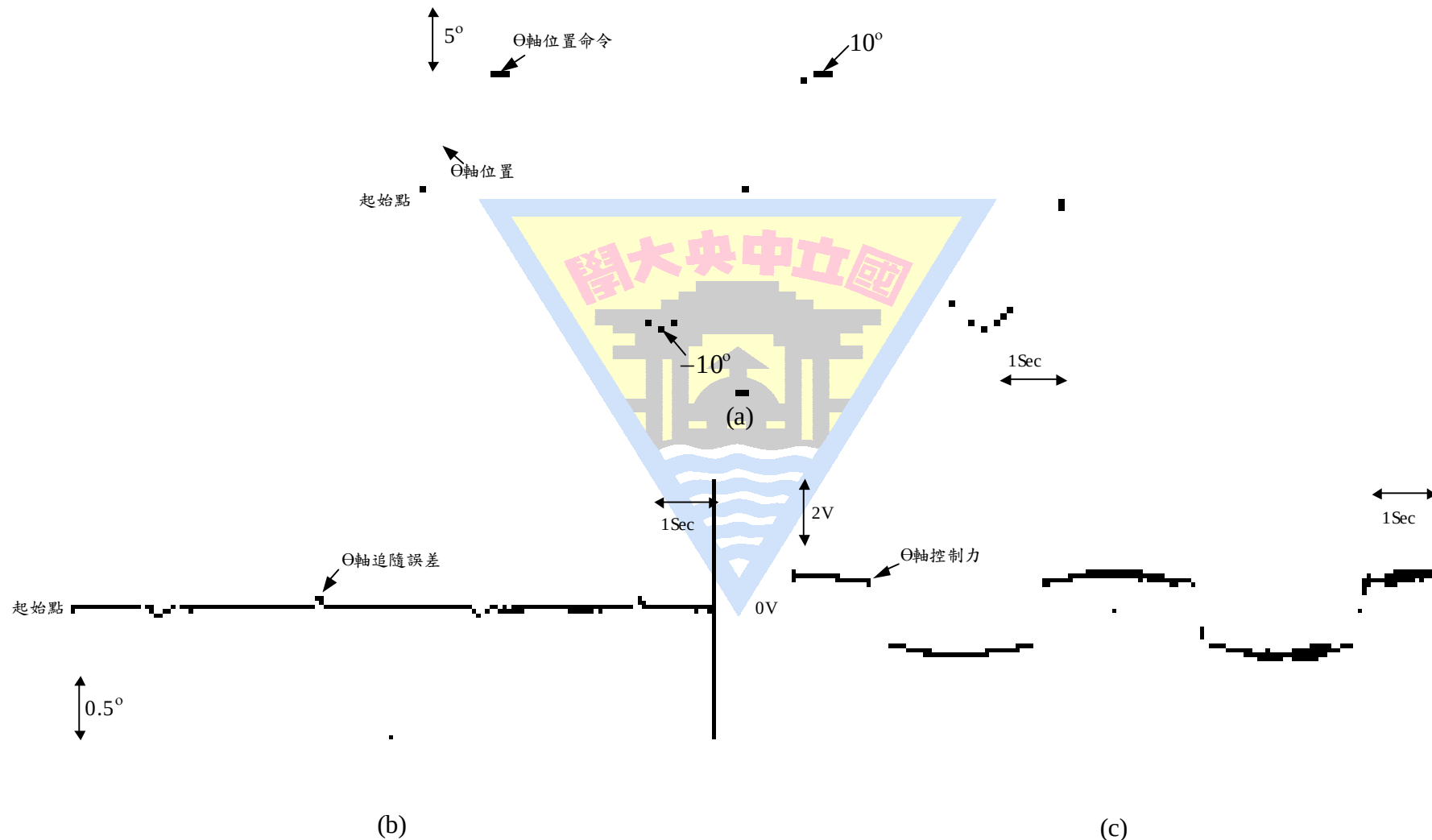
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 蝴蝶形軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖6.7)



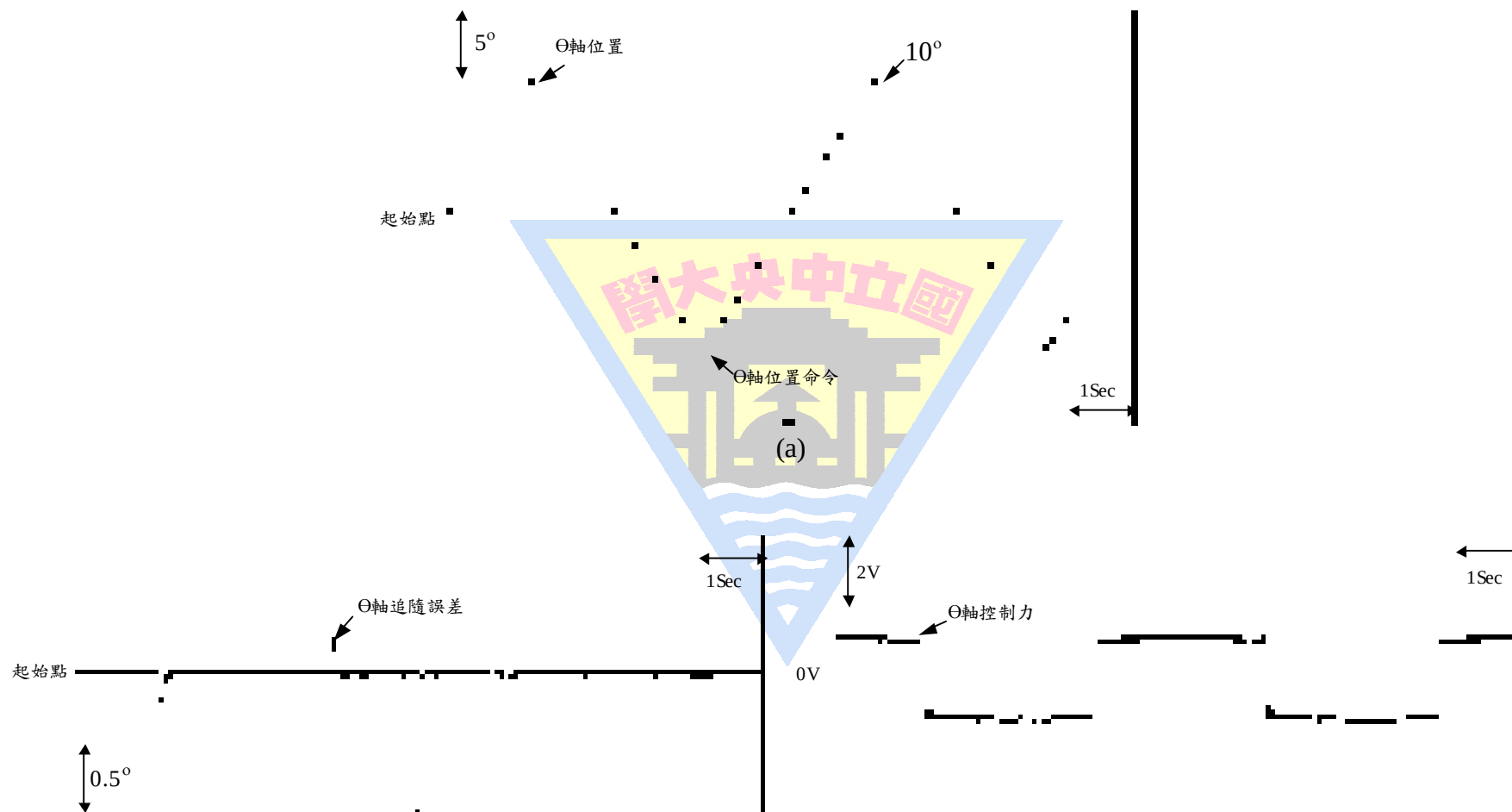
六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 弦波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖6.8)



六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)

□ 三角波軌跡在外力干擾下之實測結果 (圖6.9)



六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)



表6.1：狀況一下之X-Y軸性能量測

μm 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值	72.9	71.35	19.6	21.2
平均值	13.5	15.58	3.53	3.36
標準差	14.4	15.46	3.1	3.2

表6.2：狀況一下之 Θ 軸性能量測

deg 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	弦波	三角波	弦波	三角波
最大值	0.353	0.50	0.117	0.27
平均值	0.14	0.182	0.0089	0.009
標準差	0.102	0.133	0.015	0.022

六、適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統(續)



表6.3：狀況二下之X-Y軸性能量測

μm 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	圓形	蝴蝶形	圓形	蝴蝶形
最大值	107.67	72.09	21.2	22.5
平均值	14.67	16.8	3.58	3.32
標準差	16.63	16.19	3.3	3.34

表6.4：狀況二下之 Θ 軸性能量測

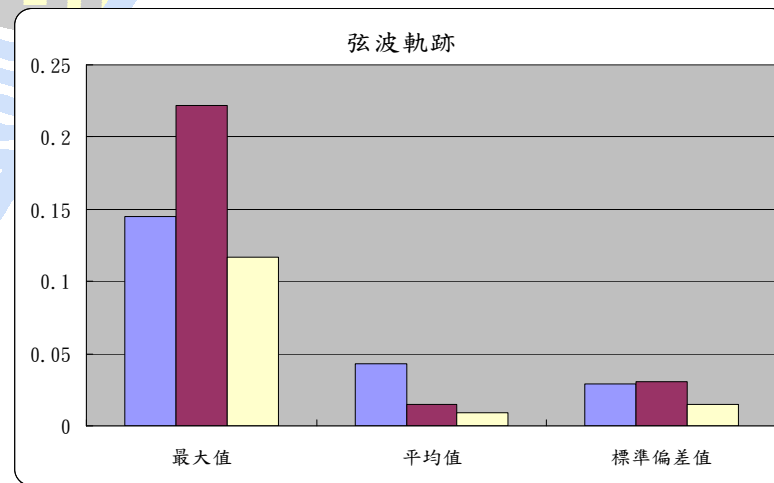
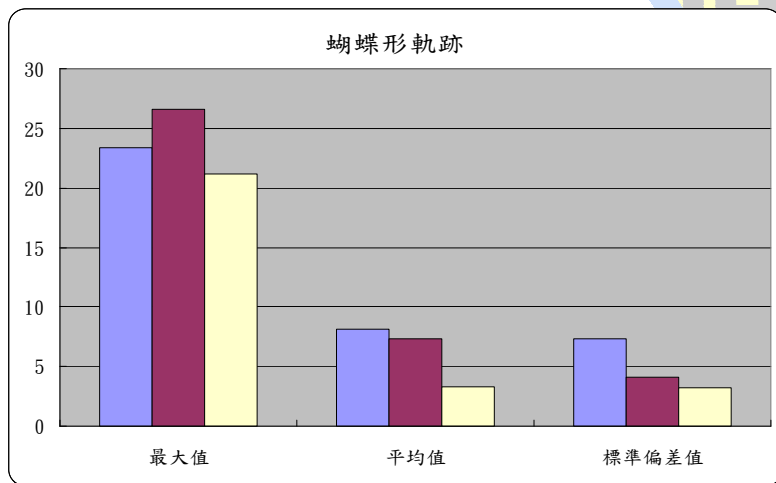
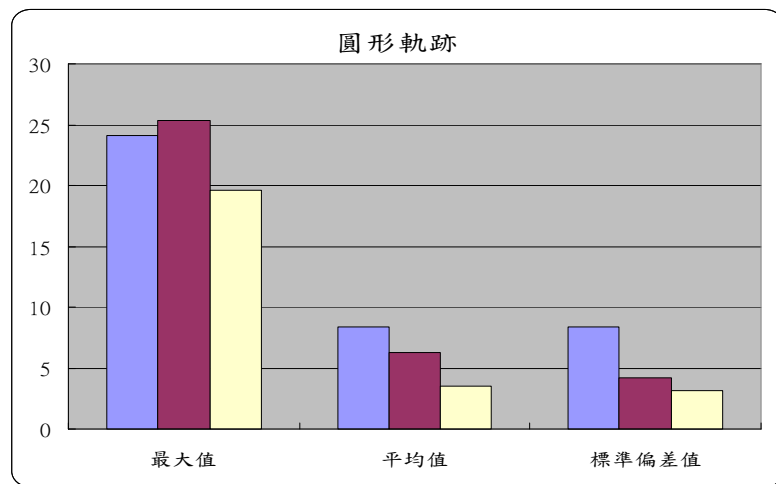
deg 控制器 & 軌跡 追隨誤差	遞迴式模糊類神經網路控制系統		適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統	
	弦波	三角波	弦波	三角波
最大值	0.41	0.55	0.133	0.278
平均值	0.163	0.21	0.015	0.0064
標準差	0.116	0.13	0.019	0.024



七、控制系統性能比較

狀況一之比較結果

■ 適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統 ■ 第二型區間模糊類神經網路控制系統 ■ 強健性第二型區間模糊類神經網路控制系統

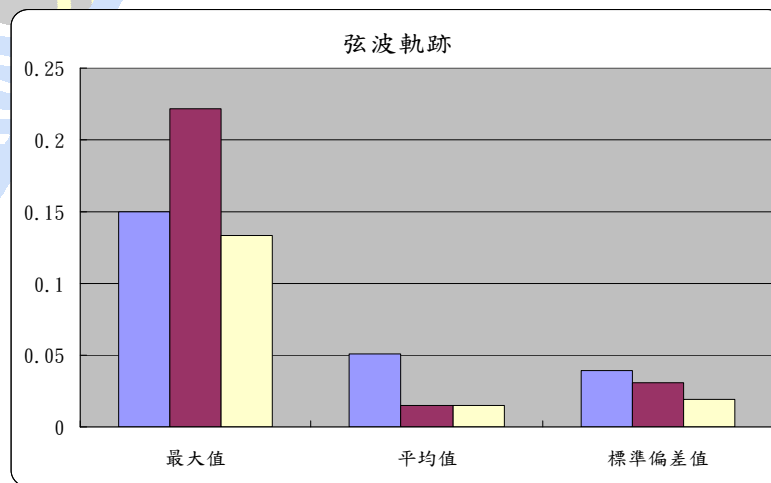
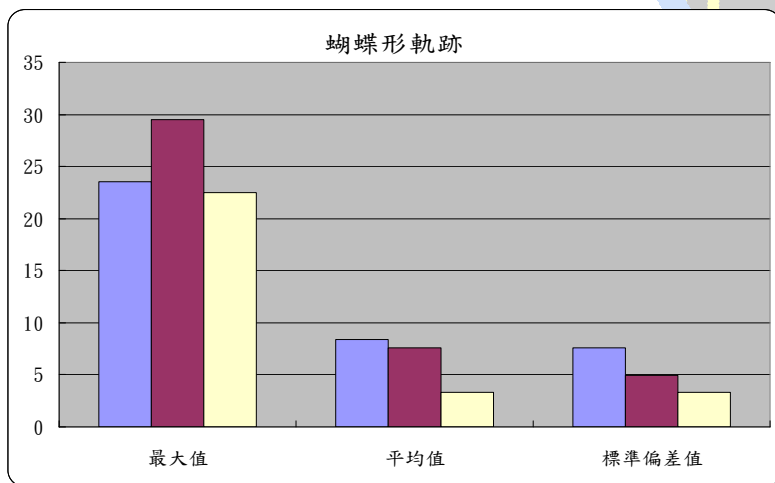
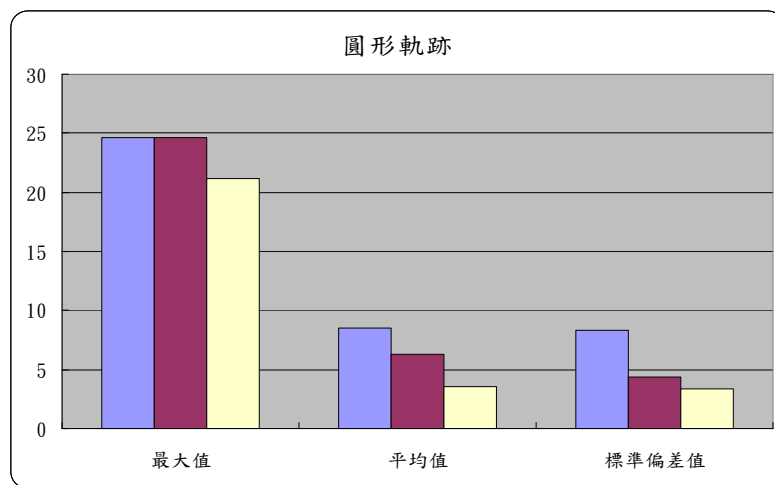




七、控制系統性能比較(續)

狀況二之比較結果

■ 適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統 ■ 第二型區間模糊類神經網路控制系統 ■ 強健性第二型區間模糊類神經網路控制系統





□ 結論

- 發展PC-Based之X-Y- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台運動控制系統，並且設計與發展具有強健特性之智慧型控制器，

以達到精密定位控制的目的。

- 利用第一型模糊類神經網路所發展出的遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統與強健性Sugeno型適應性模糊類神經網路步階迴歸控制系統，接著是利用第二型模糊類神經網路所發展出的第二型區間模糊類神經網路控制系統和適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統。

■ 遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統

- 同時執行架構與參數的線上學習法則使得遞迴式放射狀基底函數網路為基礎之模糊類神經網路控制系統具有動態且即時的調整網路架構及參數的功能。



八、結論與未來研究方向(續)

☞ 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。

☞ 第二型區間模糊類神經網路控制系統

- 結合第二型區間模糊邏輯系統和類神經網路的優點。
- 利用誤差適應法則的監督式梯度陡降法來調整網路架構內的參數和連結權重值。

☞ 適應性第二型區間模糊類神經網路控制系統

- 利用第二型區間模糊類神經網路近似系統中的未知非線性動態函數。
- 強健控制器補償總集不確定量，並提出適應性估測法則用以估測強健控制器所需之總集不確定量大小。



□ 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- Θ 三軸線性超音波馬達移動平台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。
- 以第二型區間模糊類神經網路為主，結合其他適應性控制理論和非線性控制理論，發展更完善的混合型第二型區間模糊類神經網路控制架構。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。

***Thank You for Your
Attention!***