

利用智慧型控制之壓電致動器
精密定位控制系統

**Precise Position Control System for
Piezoelectric Actuators Using Intelligent Control**

國科會電力學門召集人
國立中央大學 電機工程學系
林法正 教授

內 容

- 一、緒論
- 二、壓電致動器
- 三、壓電致動器精密定位系統
- 四、類神經網路理論
- 五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統
- 六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統
- 七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀基底函數網路控制系統
- 八、結論與未來之研究發展

一、緒論

❖ 研究動機與目的

- 奈米精密定位技術是奈米技術發展的其中一項關鍵與基礎，由於壓電致動器 (Piezoelectric Actuator, PZA) 擁有奈米級移動精度、產生力量大及響應快速等優點，所以廣泛應用於需要奈米精密定位之工業應用上。
- 壓電致動器之材料本身為一鐵磁性元件，無可避免會有磁滯現象 (Hysteresis) 產生，而造成電壓與位移之關係呈現非線性之曲線。因此為了達到奈米精密定位之目的，就必須針對磁滯現象作有效之補償與控制。

一、緒 論(續)

- 有鑑於此，本論文將建立近似之磁滯模型，進而推導出完整之壓電致動器動態模型，並利用智慧型控制理論以達到奈米精密定位控制之目的，並以實測結果來驗證所提出控制理論之正確性與可行性。

一、緒 論(續)

❖ 文獻回顧

- 摩擦力模型在精密定位控制中扮演相當重要的角色，故許多研究[26-31]已將摩擦力模型加入控制系統設計中，亦利用摩擦力模型來描述磁滯現象，因此本文將利用LuGre磁滯摩擦力模型[26]，並將其加入機械動態模型中以完成壓電致動器動態模型之建立。

一、緒 論(續)

- 磁滯摩擦力模型中有許多參數於實際應用上難以獲得，且壓電致動器中亦存在許多不確定項。因此，本文將分別利用遞迴式模糊類神經網路、小波類神經網路與遞迴式放射狀基底函數網路近似壓電致動器動態模型中所包含之非線性函數以完成智慧型控制器之設計，以達到壓電致動器精密定位控制之目的。

二、壓電致動器

❖ 簡介

- 壓電(Piezo)的命名來自於希臘字“piezen”，有推動(To Push)的意思，即當材料受到壓力時所發生的現象，為正壓電效應。而壓電致動器主要是利用壓電材料的負壓電效應，亦即在壓電材料上施加一電壓，使壓電材料產生形變而造成位移。

二、壓電致動器(續)

❖ 壓電元件

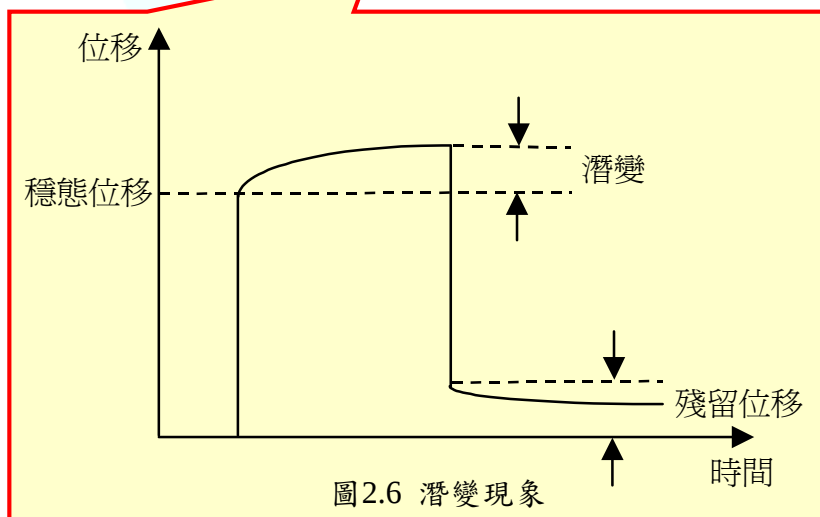
●壓電元件依材料應變運動方式可分為[57, 58]：

- (1) **直線縱向運動**：直線縱向運動元件包含單板型與積層型，其具有高剛性與軸向推力大的優點，**壓電致動器**大都使用此種元件。
- (2) **彎曲橫向運動**：彎曲橫向運動元件包含單壓電晶片型(Unimorph)與雙壓電晶片型(Bimorph)，此種運動方式之元件可產生較大的位移空間，多應用於**超音波馬達**。

二、壓電致動器(續)

❖ 壓電致動器之優缺點

- 優點：高解析度、產生力量大、響應快速、不受磁場影響、能量消耗低、無磨耗之情況、可使用於真空或無塵室及可操作在低溫環境。
- 缺點：位移量小、磁滯現象、**潛變現象**及不能受大拉力或扭力。



二、壓電致動器(續)

❖ 壓電致動器之磁滯模型

□ 磁滯模型之比較(表2.1)

磁滯模型	優點	缺點
Preisach模型	1. 磁滯特性描述完整。 2. 磁滯模型透過圖形解釋，觀念易懂。	1. 缺少物理意義的解釋。 2. 需要大量操作因子近似磁滯現象，且為積分形式使數學過於複雜，計算量過大。
Maxwell Slip模型	1. 具有物理觀念。 2. 關係式簡單易懂。	1. 磁滯特性描述不完整。 2. 參數過多，造成控制器設計困難。 3. 靜態模型，對於環境參數改變，無法有效近似磁滯模型。

二、壓電致動器(續)

Approximated Polynominal模型	1. 最簡單建立模型之方法。 2. 固定環境下最精準之模型。	對於環境參數改變，需重新近似，難以應用於控制系統。
Duhem模型	1. 適合描述鐵磁性材料。 2. 模型參數少。	1. 僅適用於固定之磁滯曲線。 2. 大多應用於振動控制。
Bouc-Wen模型	1. 模型參數少。 2. 方便控制器之設計。	1. 磁滯特性描述不完整。 2. 輸入型態有所限制的情況下，應用受限。
Simplified Dahl模型	1. 以力的方式描述磁滯現象。 2. 方便控制器之設計。 3. 不受輸入型態限制。	磁滯特性描述不完整。

三、壓電致動器精密定位系統

❖ 簡介

- 壓電致動器受到磁滯現象相當大的影響，且磁滯模型與壓電致動器本身動態模型可分開考慮 [16, 19, 21]，因此將提出利用摩擦力模型描述磁滯現象之**磁滯摩擦力模型**，並以此建立單軸與雙軸壓電致動器動態模型。
- 雙軸壓電致動器動態模型由於雙軸同動所造成之**交叉耦合作用** (Cross-Coupling Effect) 會影響系統精密度，因此於雙軸壓電致動器動態模型中增加考慮交叉耦合作用。



三、壓電致動器精密定位系統(續)

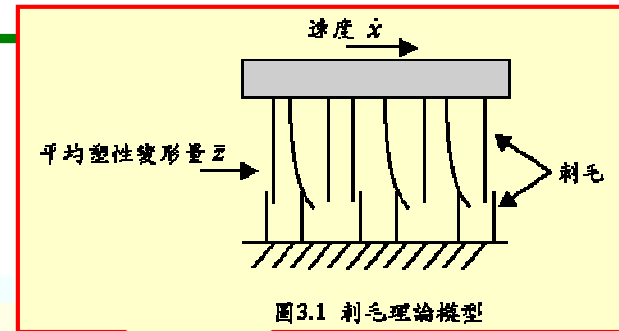
❖ 壓電致動器動態模型

● 單軸壓電致動器動態模型

- ▶ 壓電致動器之磁滯現象可利用靜摩擦力之行為加以表示，靜摩擦力的行為實際上可由以下兩種運動組合而成：

(1) 塑性變形、(2) 非線性彈性變形。

- ▶ LuGre摩擦力模型用一個假想的狀態變數 z 來描述靜摩擦力的非線性行為，並結合 Simplified Dahl 模型與摩擦力的 Stribeck 效應，建構出一個具有完整描述任何狀態下的摩擦力行為。





► LuGre摩擦模型如下：

$$F_H = \sigma_0 \bar{z} + \sigma_1 \frac{d\bar{z}}{dt} + \sigma_2 \dot{x} \quad (3.1)$$

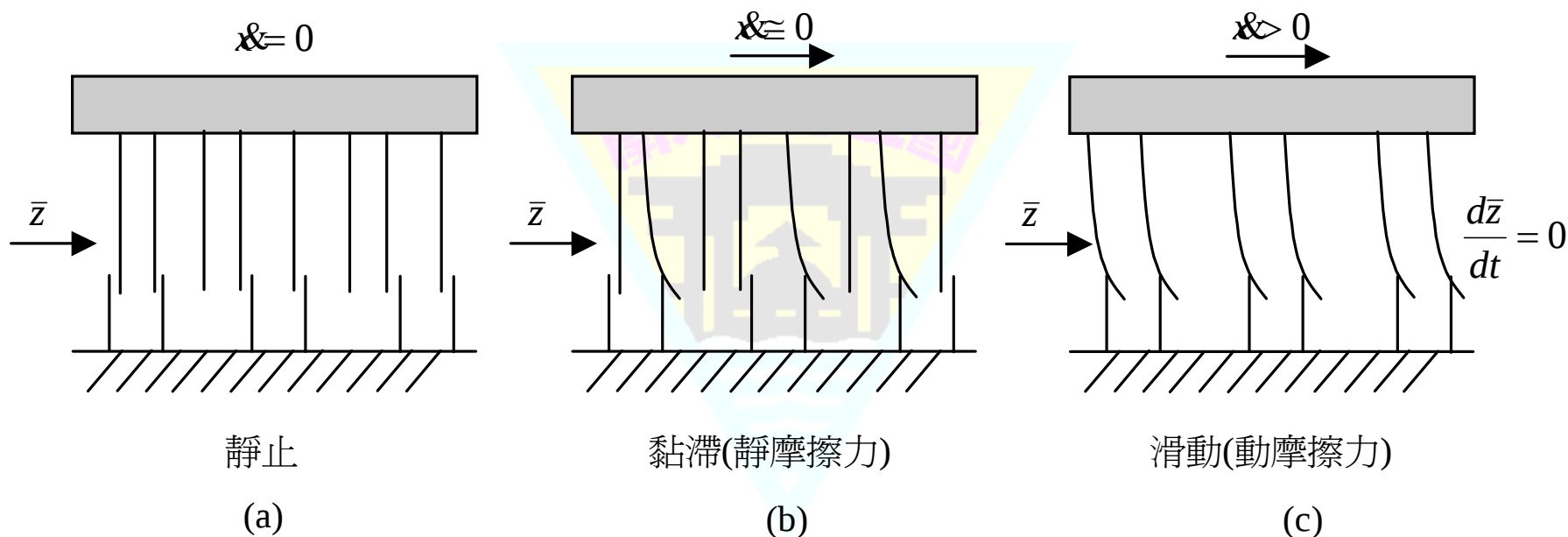
$$\frac{d\bar{z}}{dt} = \dot{x} - \frac{|\dot{x}|}{h(\dot{x})} \bar{z} \quad (3.2)$$

其中 F_H 為磁滯摩擦力； $\bar{z}$ 為假想狀態變數； $\dot{x}$ 為物體移動速度； σ_0 、 σ_1 、 σ_2 為一般未知且難以驗證的正參數，其分別代表壓電材料的剛性、阻尼與黏滯摩擦係數； $h(\dot{x})$ 為 Stribeck 效應曲線[26]。

三、壓電致動器精密定位系統(續)

□ 狀態變數與速度關係圖(圖3.2)

$$F_H = \sigma_0 \bar{z} + \sigma_1 \frac{d\bar{z}}{dt} + \sigma_2 \dot{x} \quad (3.1)$$



$$F_H = \sigma_0 \bar{z} \quad (3.4)$$

$$F_H = \sigma_0 \bar{z}_s + \sigma_2 \dot{x} \quad (3.6)$$

$\bar{z}$ 的穩態變數



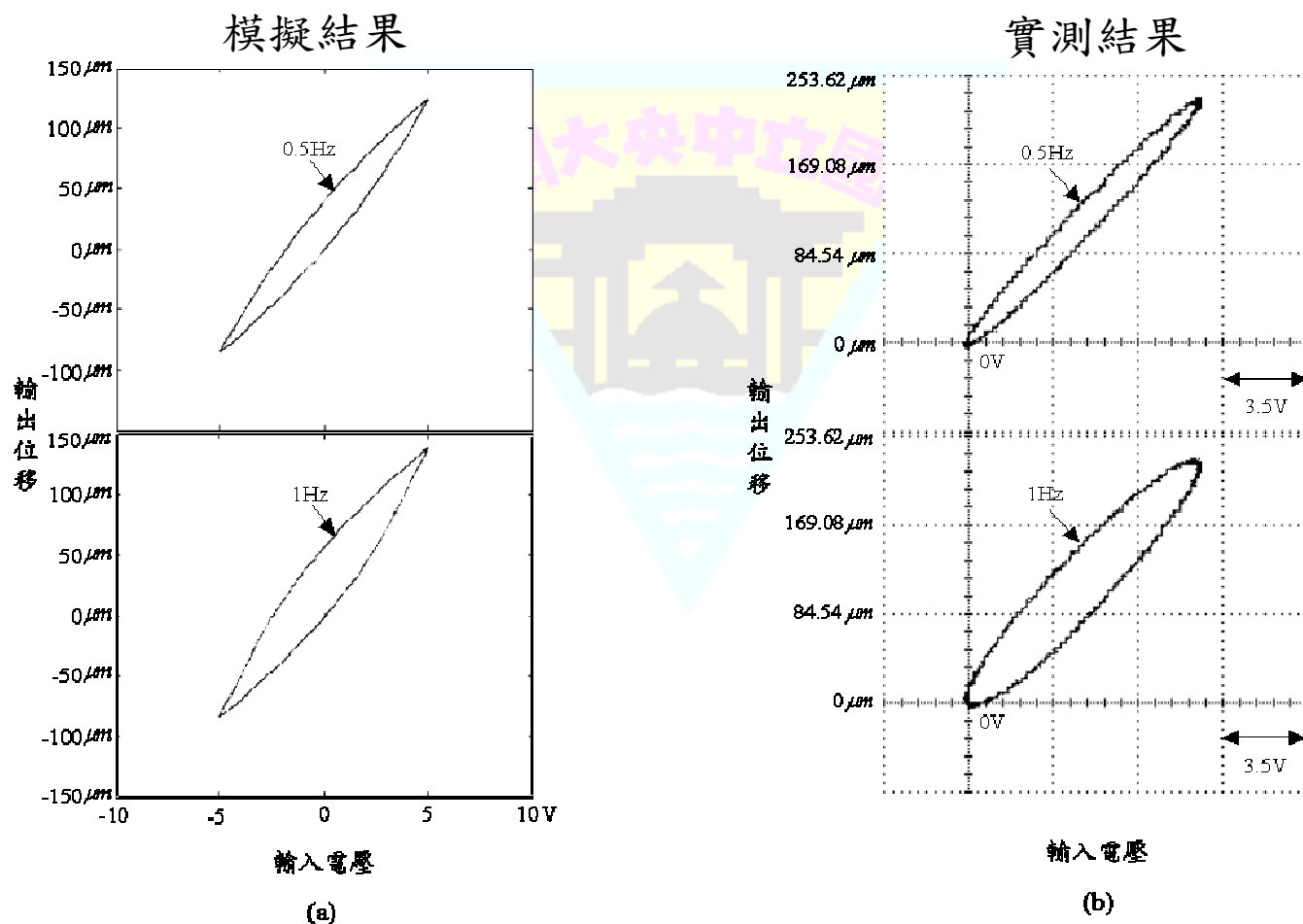
三、壓電致動器精密定位系統(續)

- ▶ 將磁滯摩擦力模型套用在壓電致動器本身之機械動態模型上，用以描述具有磁滯現象之單軸壓電致動器完整動態模型：

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + F_H + F_L = K_E u \quad (3.8)$$

三、壓電致動器精密定位系統(續)

□單軸壓電致動器完整動態模型模擬與實測結果(圖3.2)

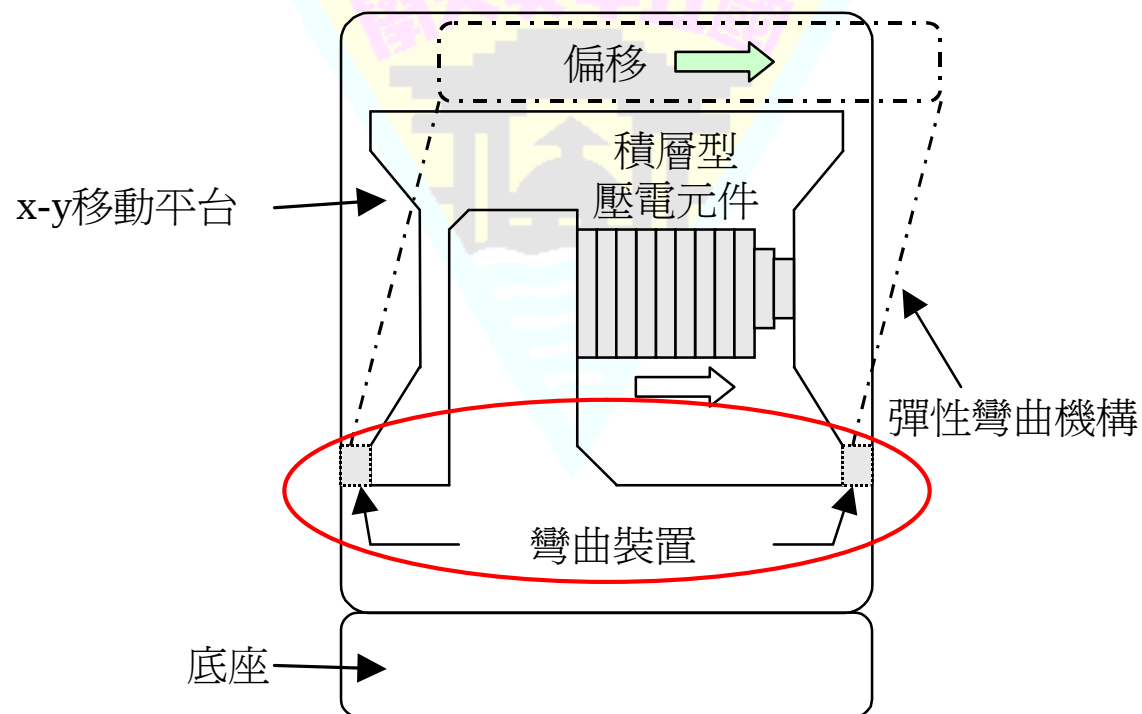




三、壓電致動器精密定位系統(續)

●雙軸壓電致動器動態模型

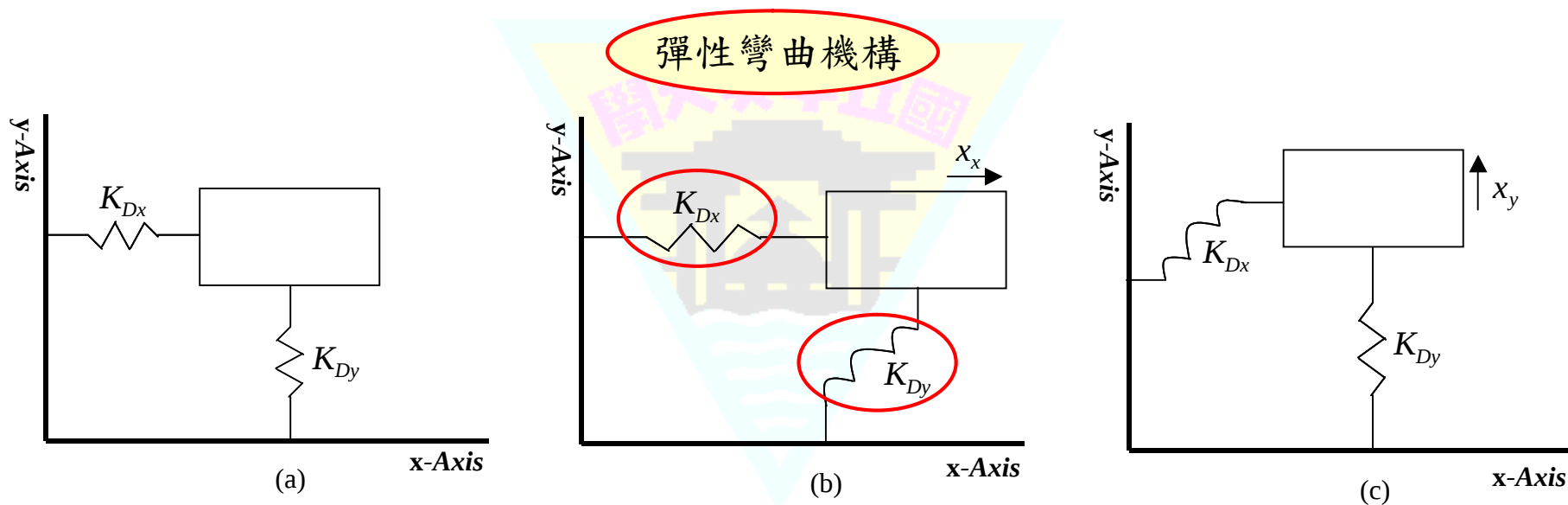
□壓電致動器動作原理(圖3.6)





三、壓電致動器精密定位系統(續)

□ 雙軸壓電致動器交叉耦合作用(圖3.7)



無偏移情形

y軸偏移情形

x軸偏移情形



三、壓電致動器精密定位系統(續)

► 雙軸壓電致動器完整動態模型：

$$M_l \ddot{x}_l + D_l \dot{x}_l + K_{Dl} x_l + F_{Hl} + F_{Ll} = K_{El} u_l \quad (3.9)$$

$$K_{Dl} = k_{nl} + \Delta k_{dl} \quad (3.10)$$

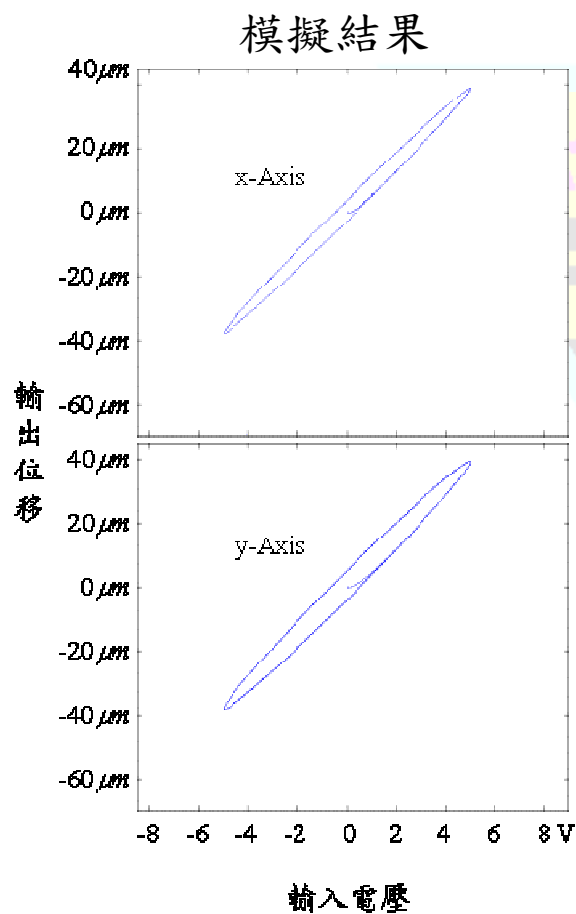
正常情況下
之彈性係數

交叉耦合作用影響
之彈性係數改變量

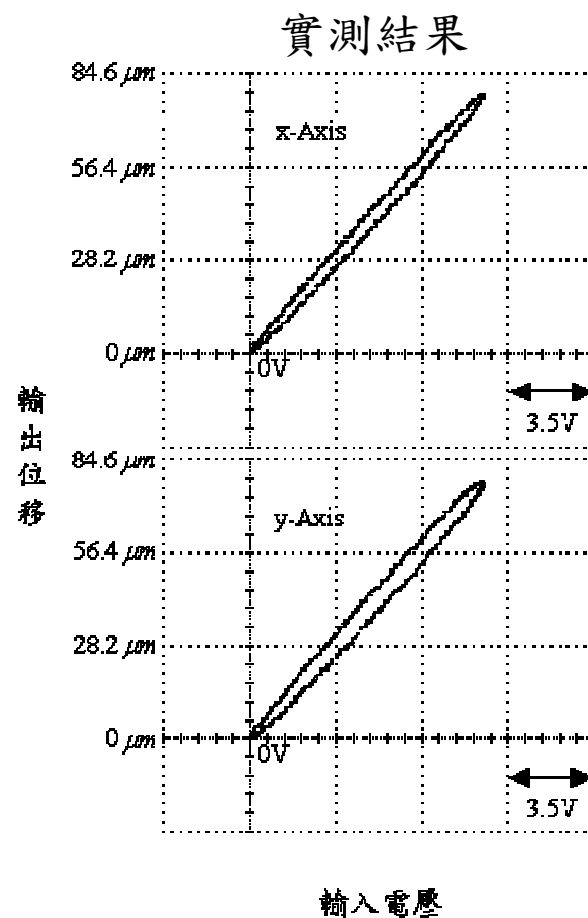


三、壓電致動器精密定位系統(續)

□ 雙軸壓電致動器完整動態模型模擬與實測結果(圖3.9)



(a)



(b)



三、壓電致動器精密定位系統(續)

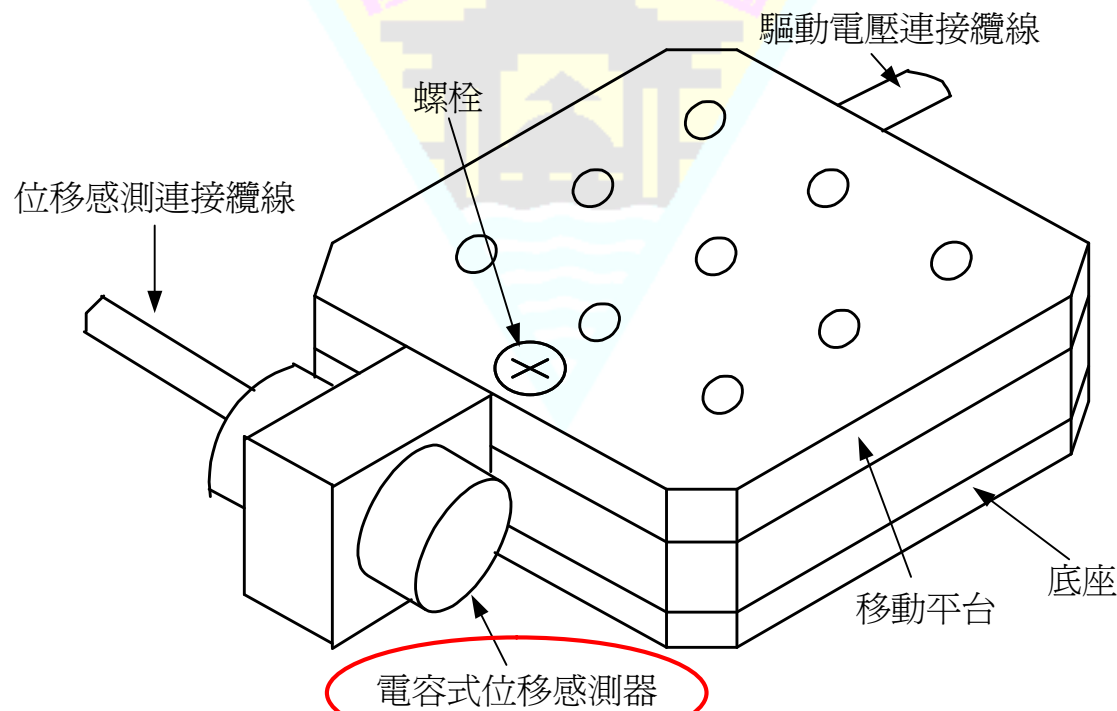
❖ 系統說明

● 單軸壓電致動器控制系統

□ 單軸壓電致動器外觀圖(圖3.10)

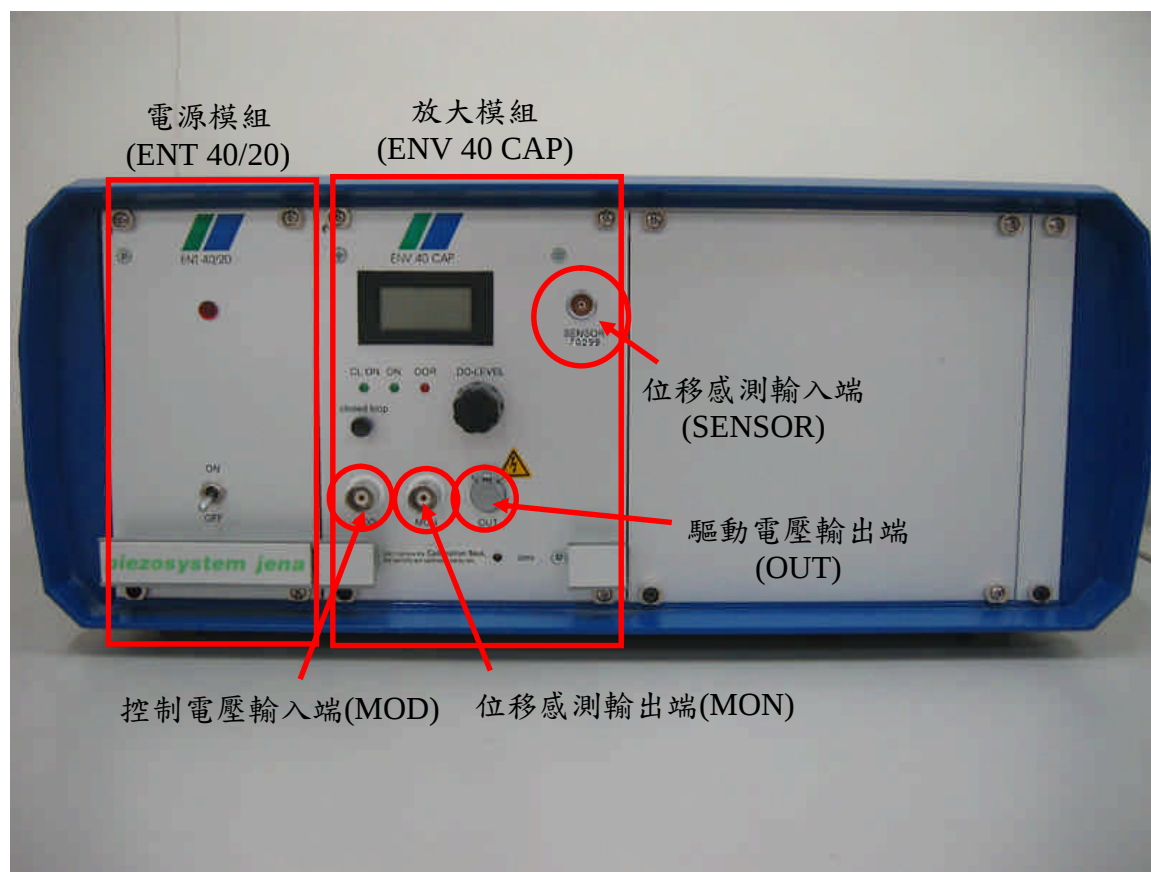
德國Piezosystem Jena PX 300 CAP

最大位移量 $240\ \mu\text{m}$



三、壓電致動器精密定位系統(續)

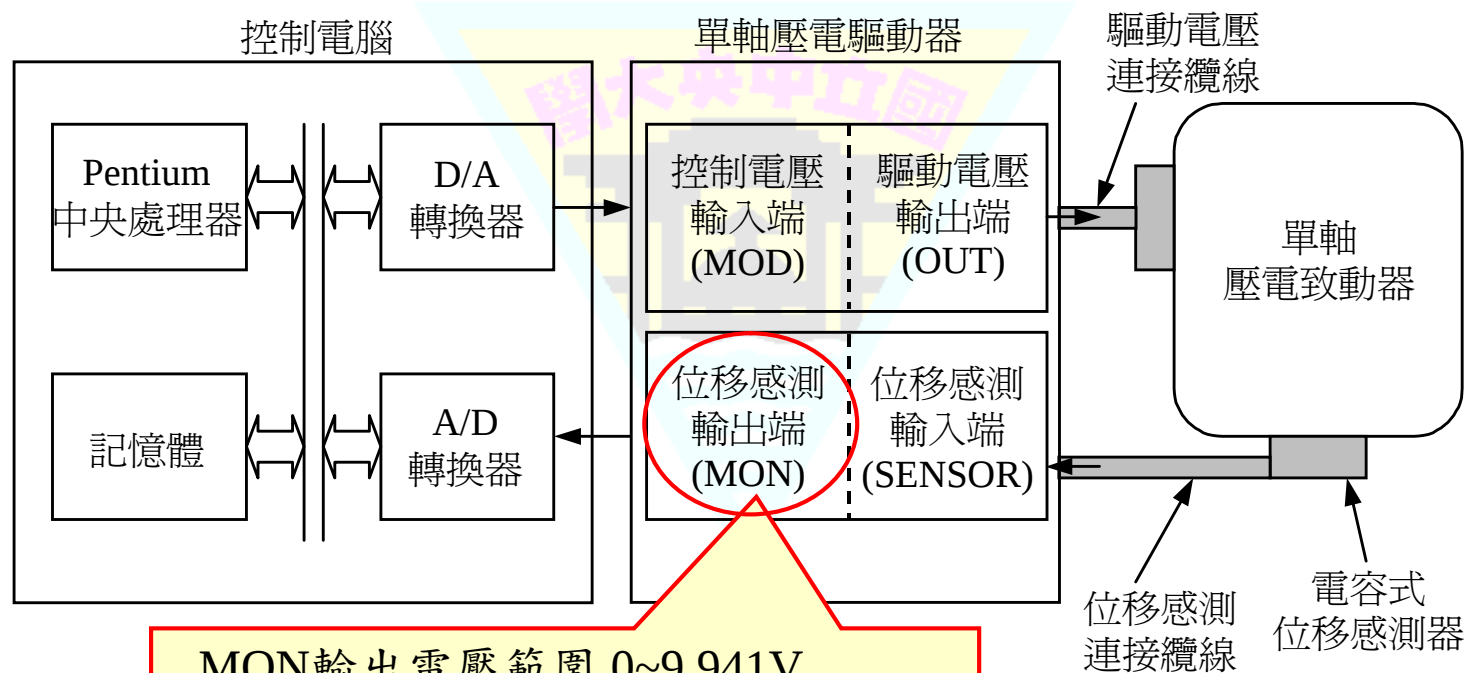
□單軸壓電驅動器實體圖(圖3.11)





三、壓電致動器精密定位系統(續)

□PC-based之單軸壓電致動器控制系統架構圖(圖3.12)



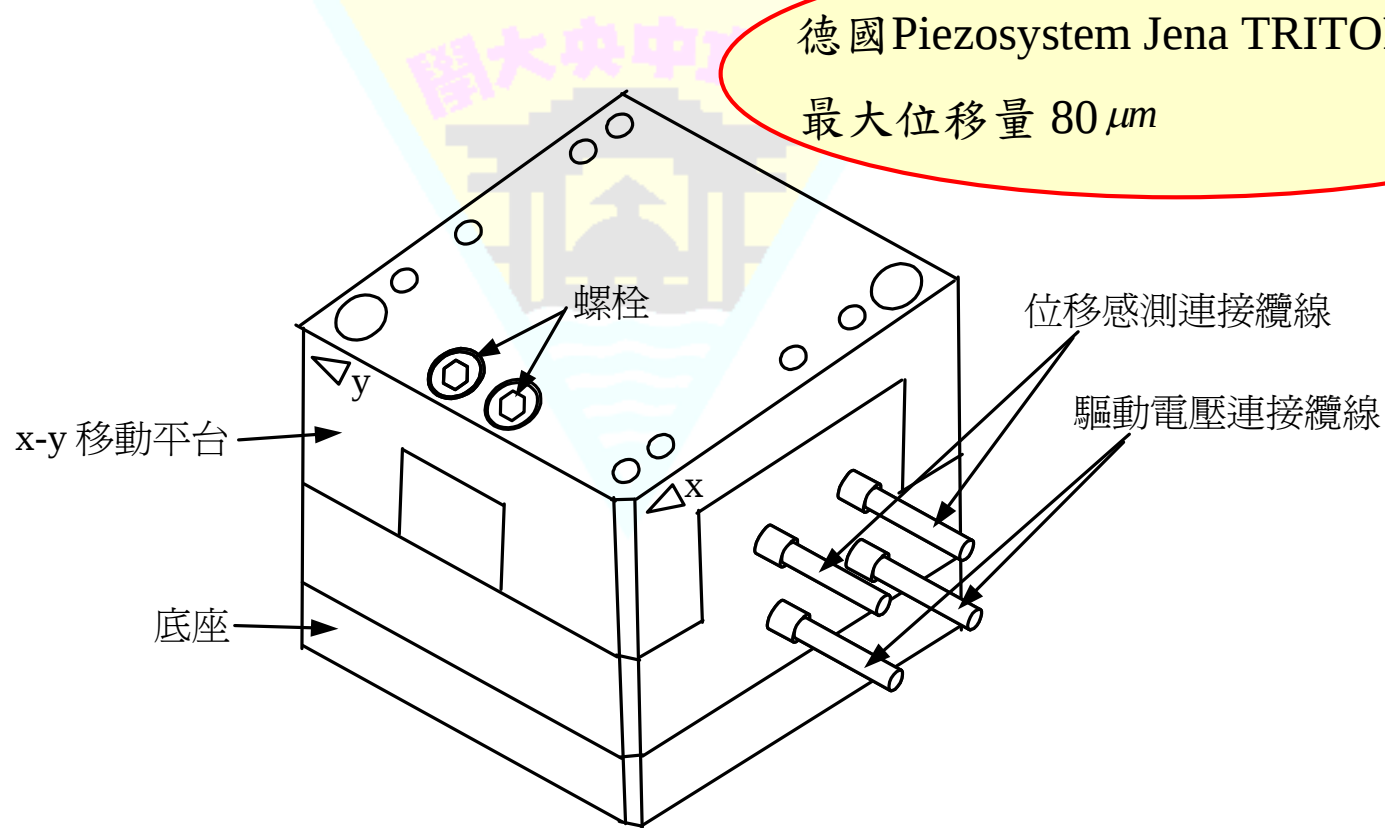
MON輸出電壓範圍 0~9.941V
相對應位移量 0~240 μm
位移感測訊號電壓規格 0.0414 V/ μm



三、壓電致動器精密定位系統(續)

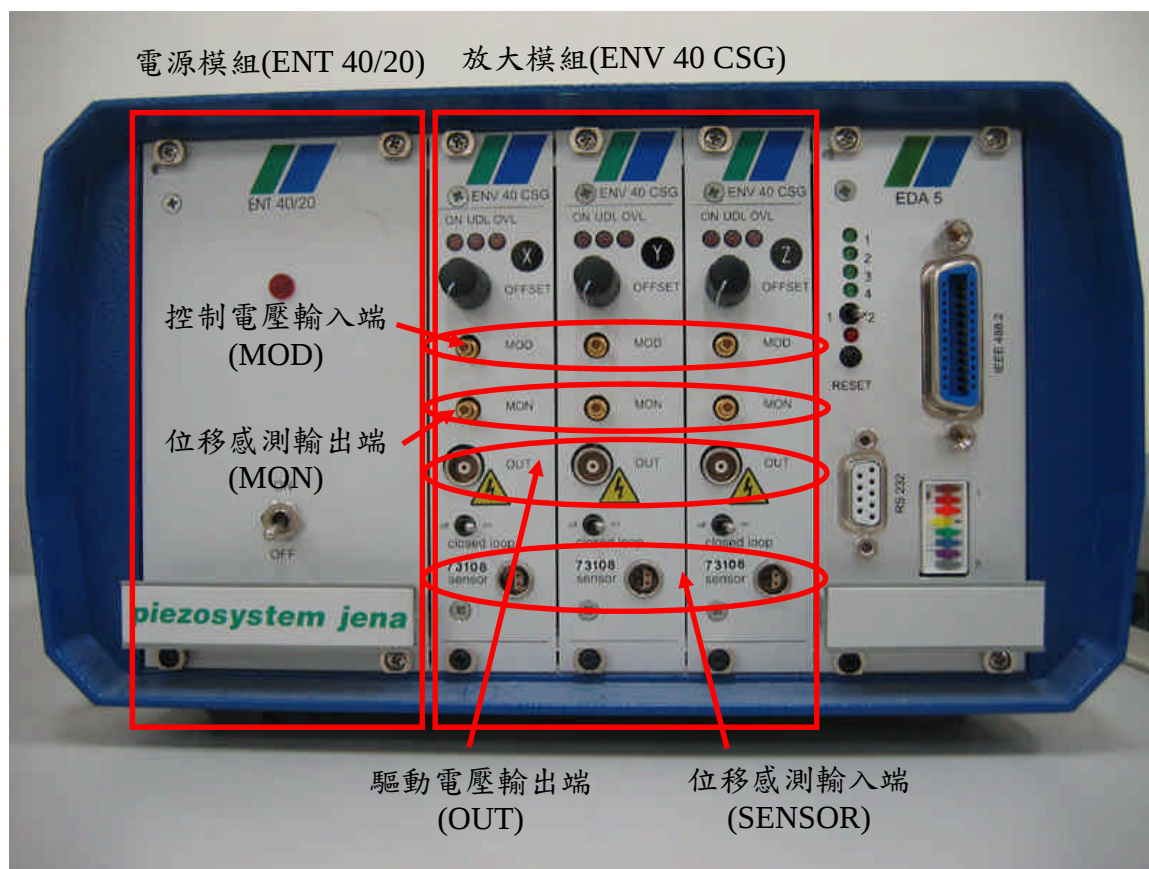
●雙軸壓電致動器控制系統

□雙軸壓電致動器外觀圖(圖3.14)



三、壓電致動器精密定位系統(續)

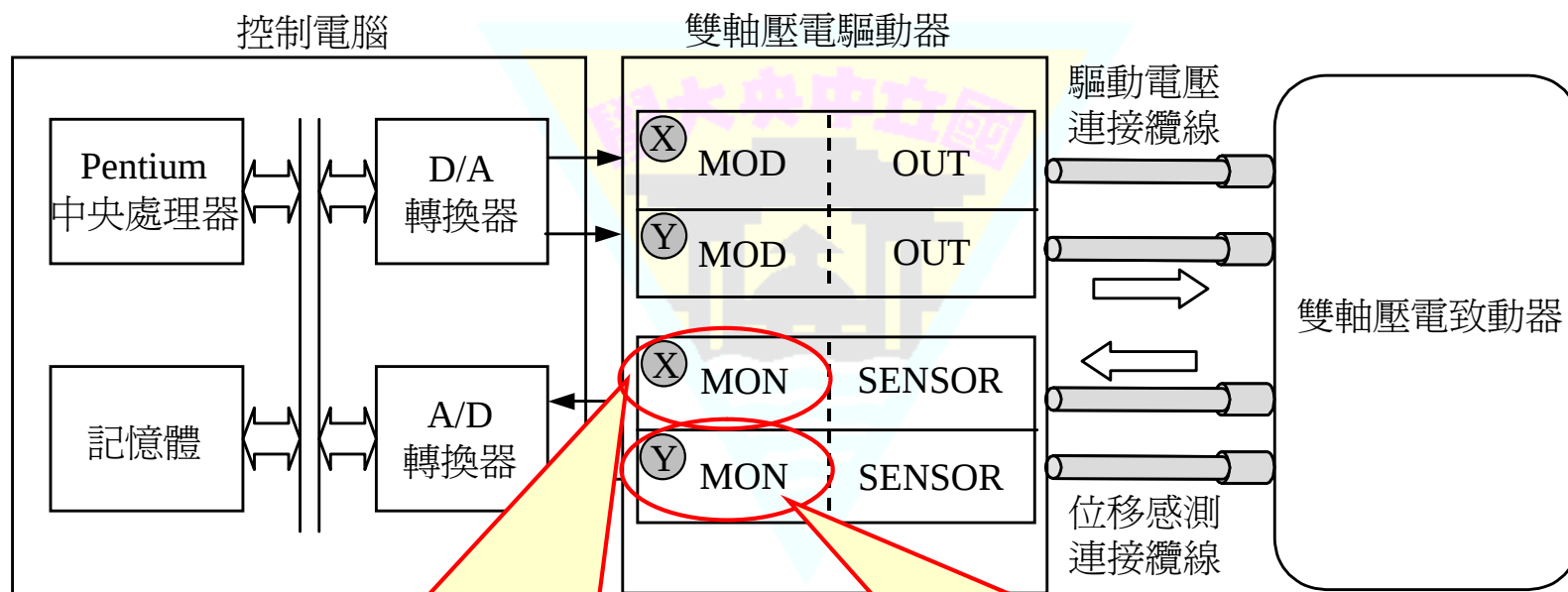
□雙軸壓電驅動器實體圖(圖3.15)





三、壓電致動器精密定位系統(續)

□PC-based之雙軸壓電致動器控制系統架構圖(圖3.16)



MON輸出電壓範圍 0~9.951V
相對應位移量 0~80 μm
位移感測訊號電壓規格 0.1244 V/ μm

MON輸出電壓範圍 -0.021~9.953V
相對應位移量 0~80 μm
位移感測訊號電壓規格 0.1247 V/ μm

四、類神經網路理論

❖ 簡介

- 單軸或雙軸壓電致動器動態模型皆具有許多在實際應用中難以獲得的參數，且存在許多不確定項，因此為了達到性能良好之精密定位控制目的，本論文將利用類神經網路理論近似壓電致動器動態模型中之非線性函數。

遞迴式模糊類神經網路

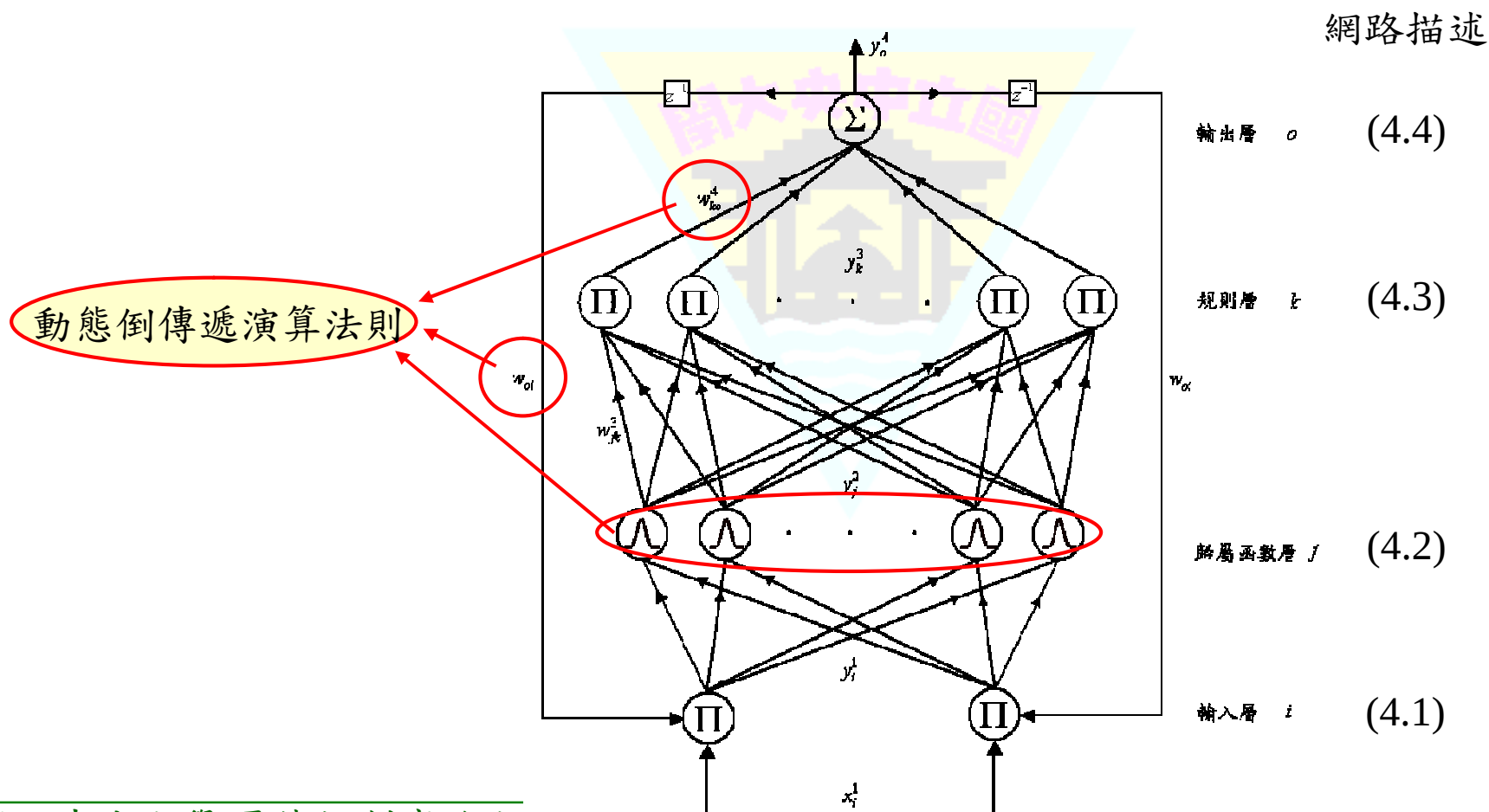
小波類神經網路

遞迴式放射狀基底函數網路

四、類神經網路理論(續)

❖ 遞迴式模糊類神經網路

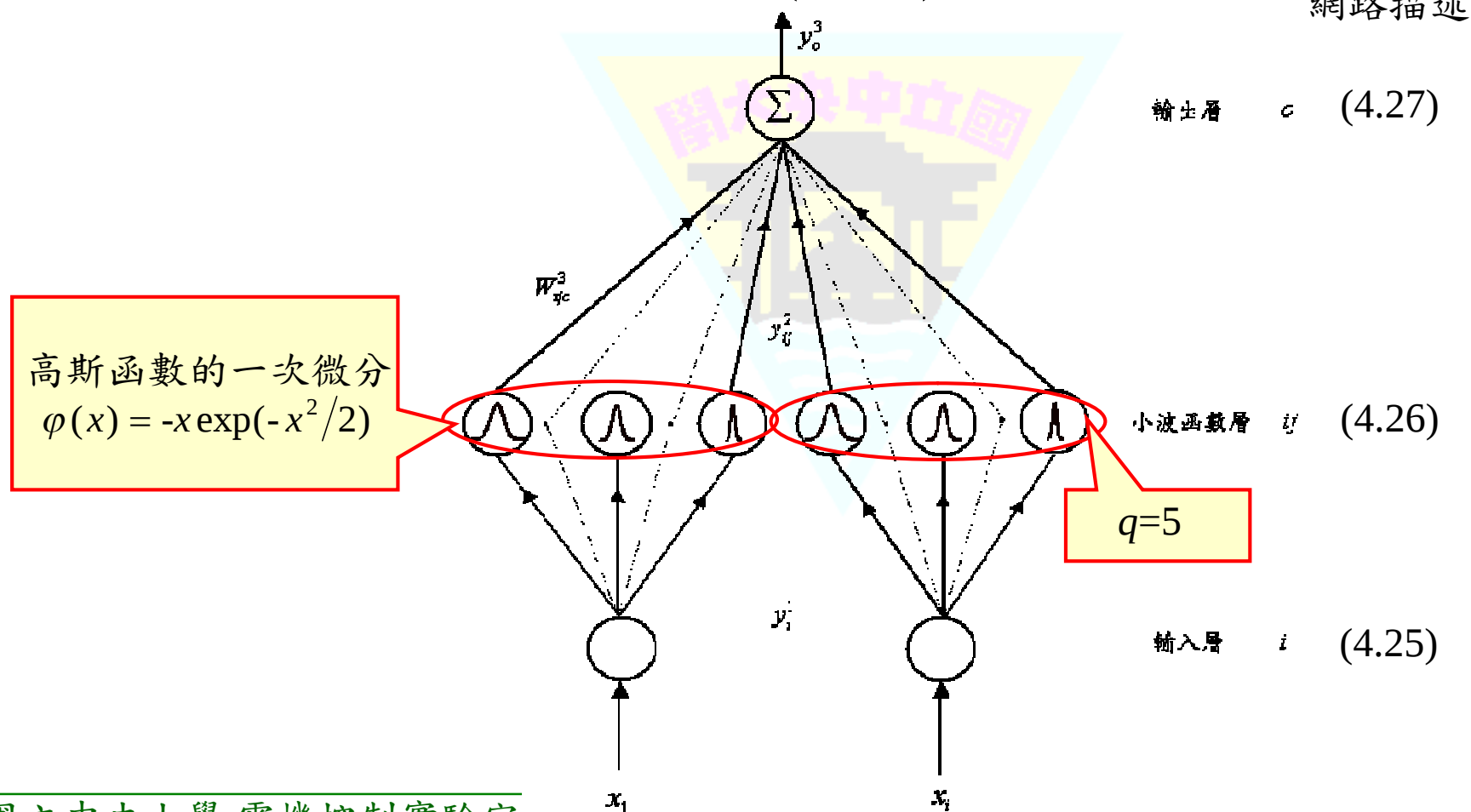
□ 遞迴式模糊類神經網路架構圖(圖4.1)



四、類神經網路理論(續)

❖ 小波類神經網路

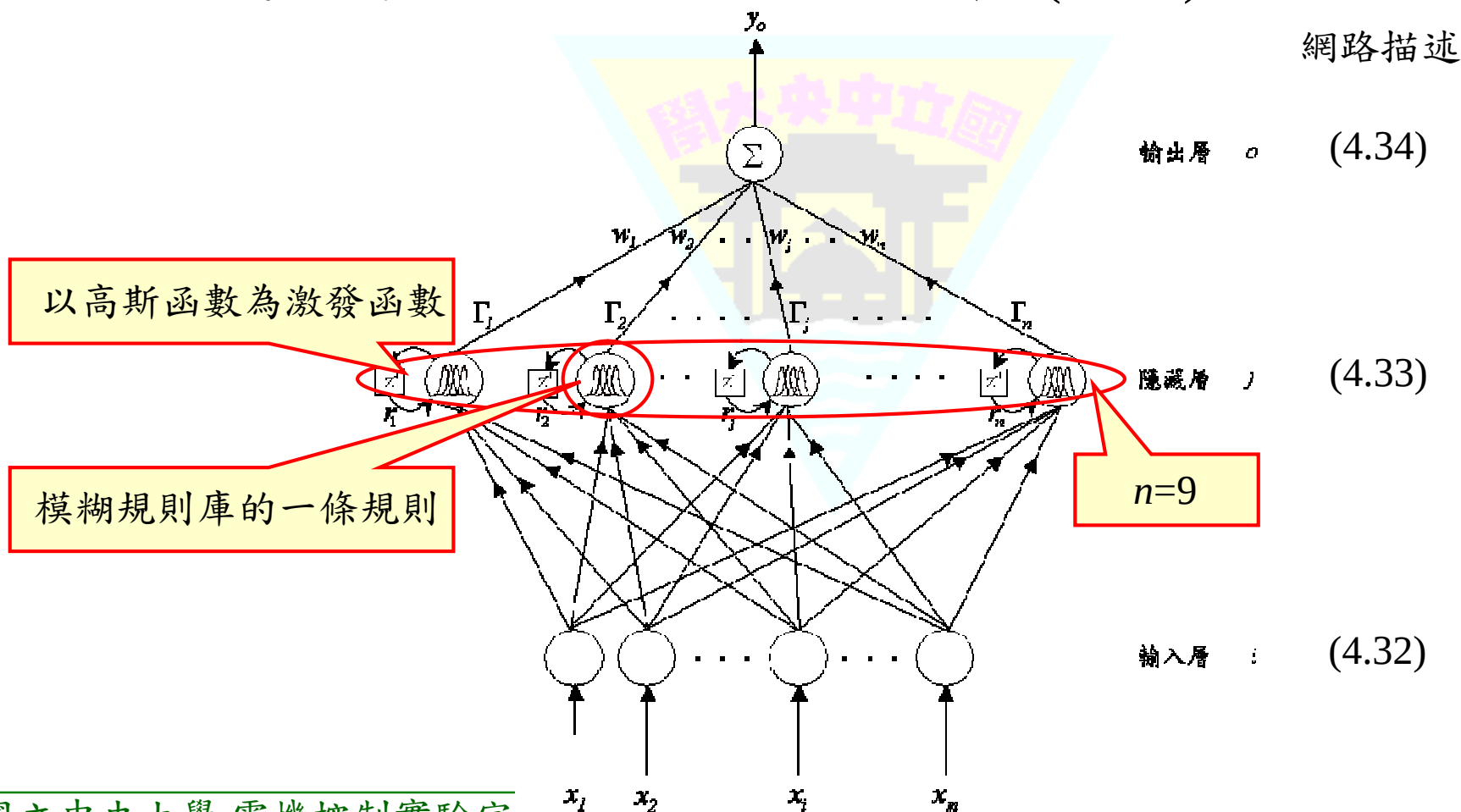
□ 小波類神經網路架構圖(圖4.5)



四、類神經網路理論(續)

❖ 遞迴式放射狀基底函數網路

□ 遞迴式放射狀基底函數網路架構圖(圖4.7)



四、類神經網路理論(續)

□類神經網路理論之特點(表4.1)

類神經網路理論	特點
遞迴式模糊類神經網路	1. 模糊理論處理不確定性訊息能力。 2. 類神經網路線上學習能力， 3. 遞迴式網路良好動態特性。
小波類神經網路	1. 以小波理論作為網路之激發函數，故具有小波理論高精確度函數近似能力。 2. 類神經網路線上學習能力。
遞迴式放射狀基底函數網路	1. 以放射狀基底函數作為網路之激發函數，故只需三層網路架構便可有效近似非線性函數，並具有局部協調能力。 2. 以放射狀基底函數實現模糊規則庫，可省略模糊推論中的模糊化及解模糊化，加速模糊推論機制。 3. 遞迴式網路良好動態特性。

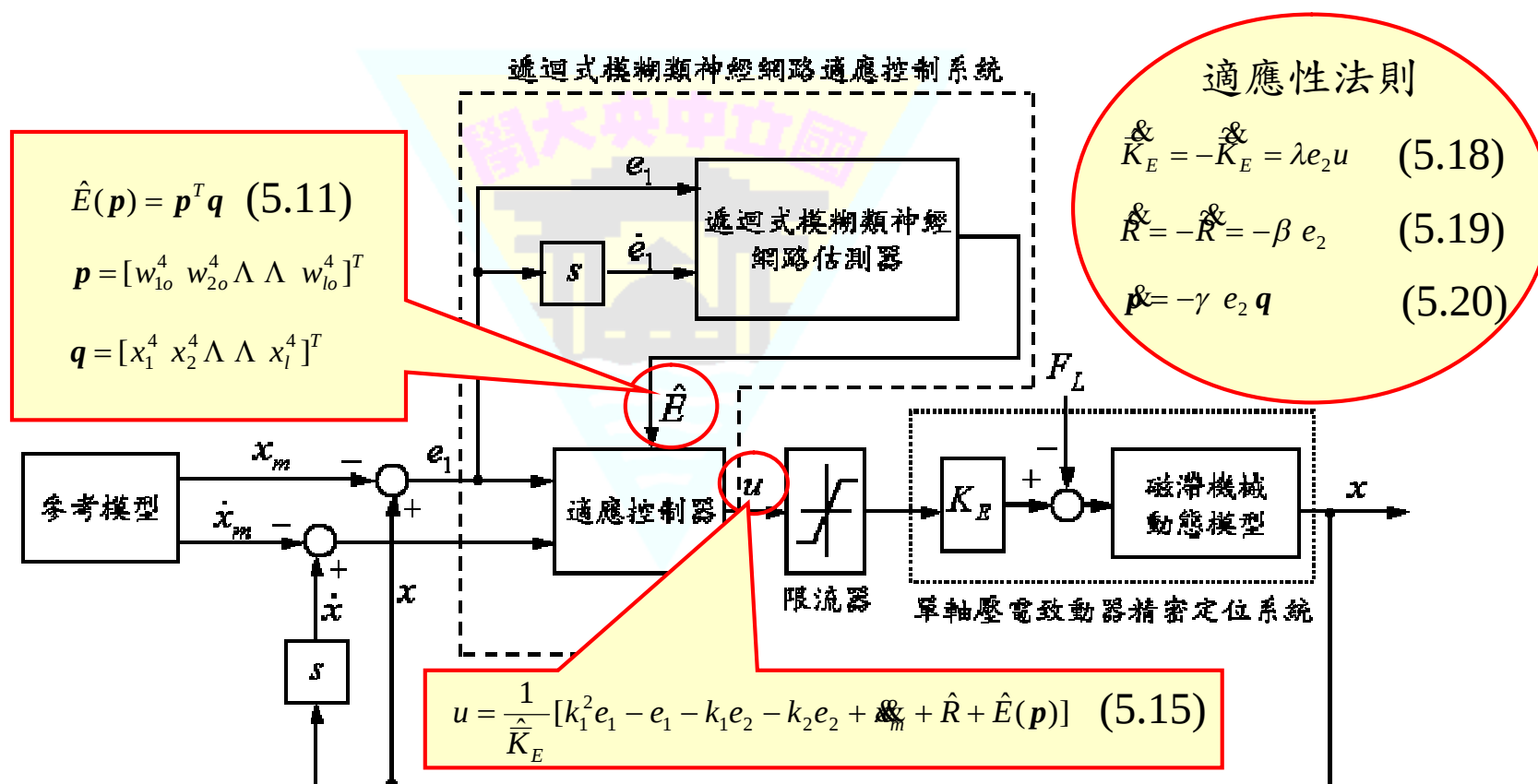
五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統

❖ 簡介

- 利用適應控制推導出包含磁滯現象、參數變化與外力干擾等不確定量之控制系統，並提出遞迴式模糊類神經網路不確定量估測器用以估測適應控制系統中所需之總集不確定量。此外，並藉由Lyapunov穩定理論與梯度遞減法則(Gradient Descent Algorithm)線上訓練遞迴式模糊類神經網路之參數。

$$E \triangleq \frac{(\sigma_0 \bar{z} - \sigma_1 \frac{1}{h(x_2)} \bar{z} |x_2| + (\sigma_1 + \sigma_2 - D)x_2 + F_L)}{M} \quad (5.4)$$

□遞迴式模糊類神經網路適應控制系統方塊圖(圖5.1)



五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路 適應控制系統(續)

- 規則層與輸出層間**連接權重值**的更新疊代

$$w_{ko}^4 = -\gamma e_2 x_k^4 \triangleq -\gamma \frac{\partial V_3}{\partial \hat{E}} \frac{\partial \hat{E}}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial w_{ko}^4} = -\gamma \frac{\partial V_3}{\partial \hat{E}} x_k^4 \quad (5.27)$$

- 高斯函數的**平均值** m_{ij} 和**標準偏差值** σ_{ij} 的更新疊代

$$m_{ij} = -\frac{\partial V_3}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial m_{ij}} = \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (5.30)$$

$$\sigma_{ij} = -\frac{\partial V_3}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial \sigma_{ij}} = \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^3} \quad (5.31)$$

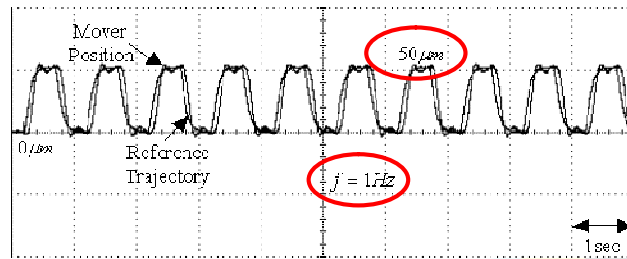
五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路 適應控制系統(續)

● 遞迴權重值 w_{oi} 的更新疊代

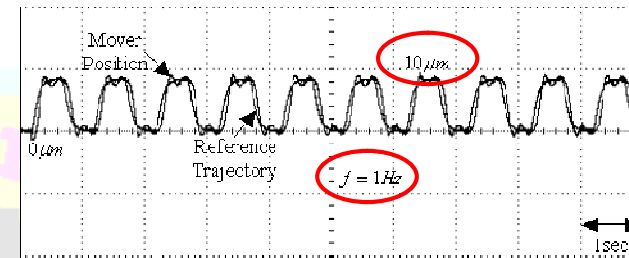
$$\begin{aligned} w_{oi} &= - \frac{\partial V_3}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial y_i^1} \frac{\partial y_i^1}{\partial net_i^1} \frac{\partial net_i^1}{\partial w_{oi}} \\ &= \sum_j \delta_j^2 \frac{2(m_{ij} - x_i^2(N))}{(\sigma_{ij})^2} x_i^1(N) y_o^4(N-1) \end{aligned} \quad (5.32)$$

五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統(續)

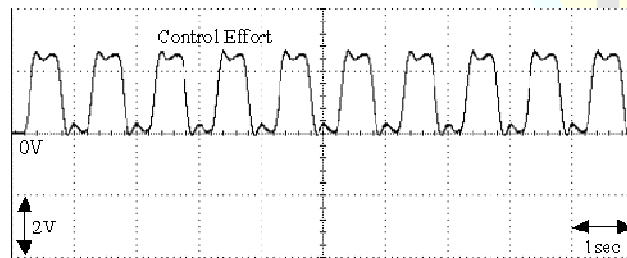
□ 比例-積分控制系統週期性步階命令實測圖(圖5.3)



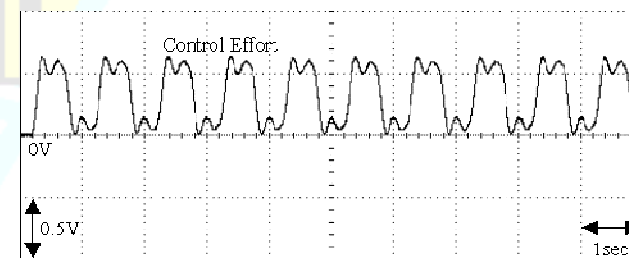
Time (sec)
(a)



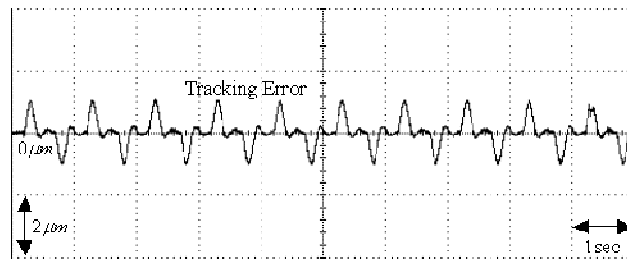
Time (sec)
(d)



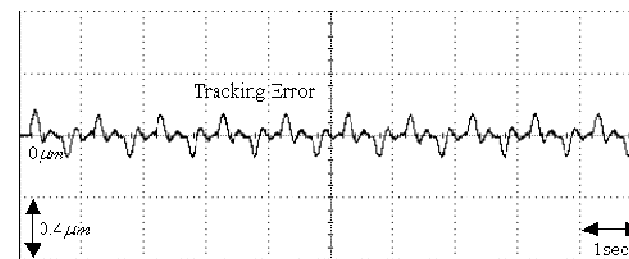
Time (sec)
(b)



Time (sec)
(e)



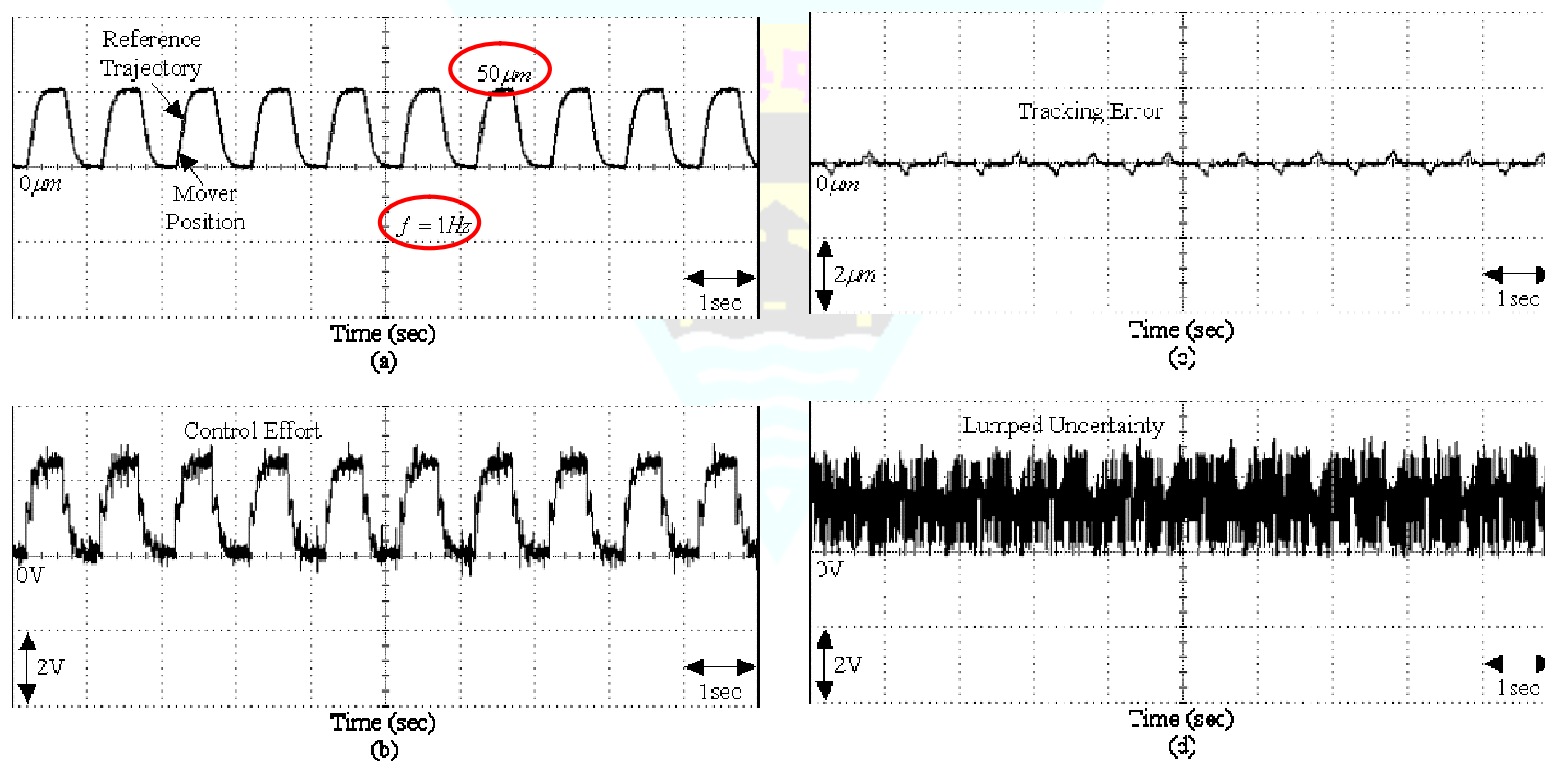
Time (sec)
(c)



Time (sec)
(f)

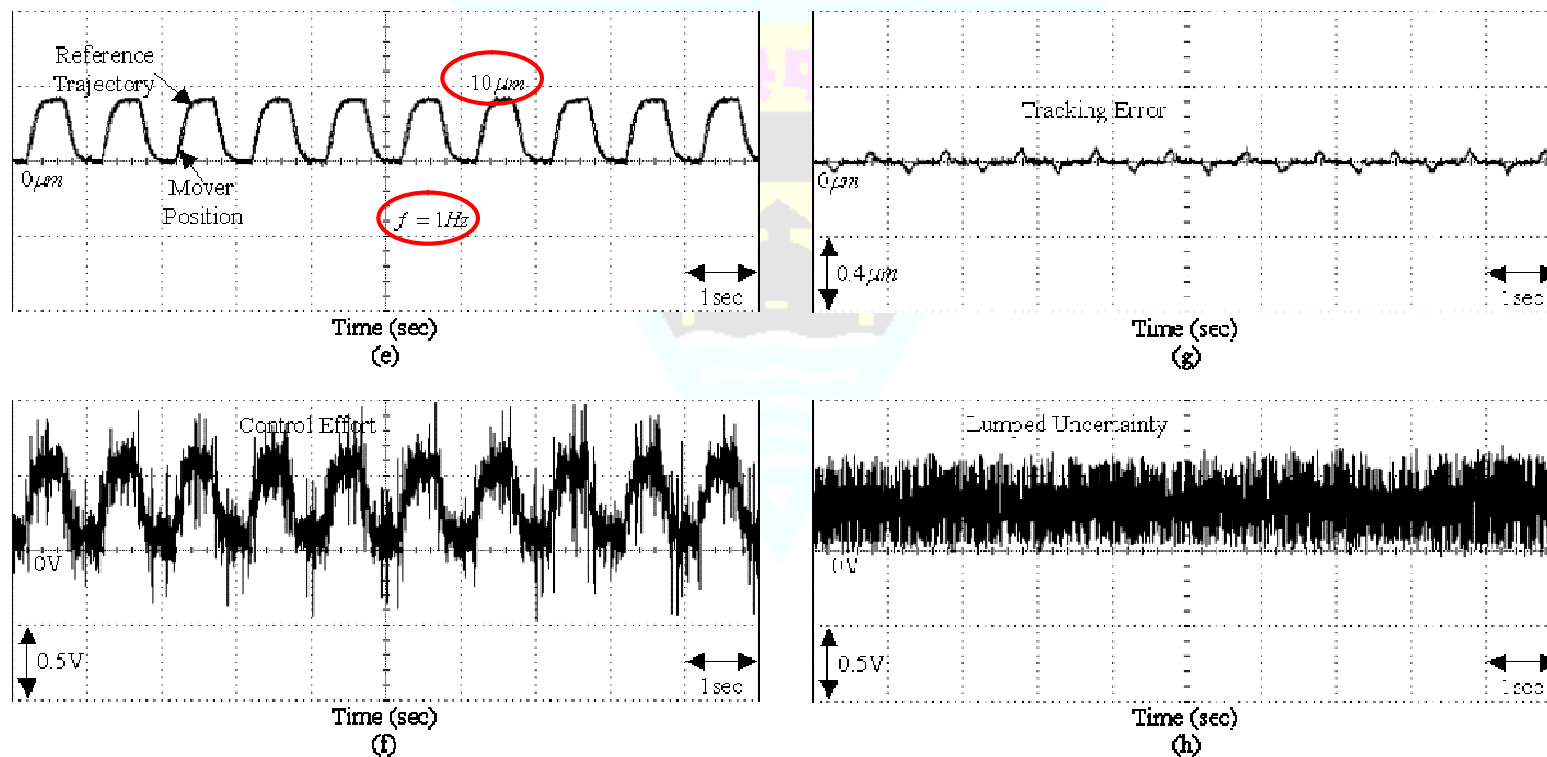
五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統(續)

□ 遞迴式模糊類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖5.4)



五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統(續)

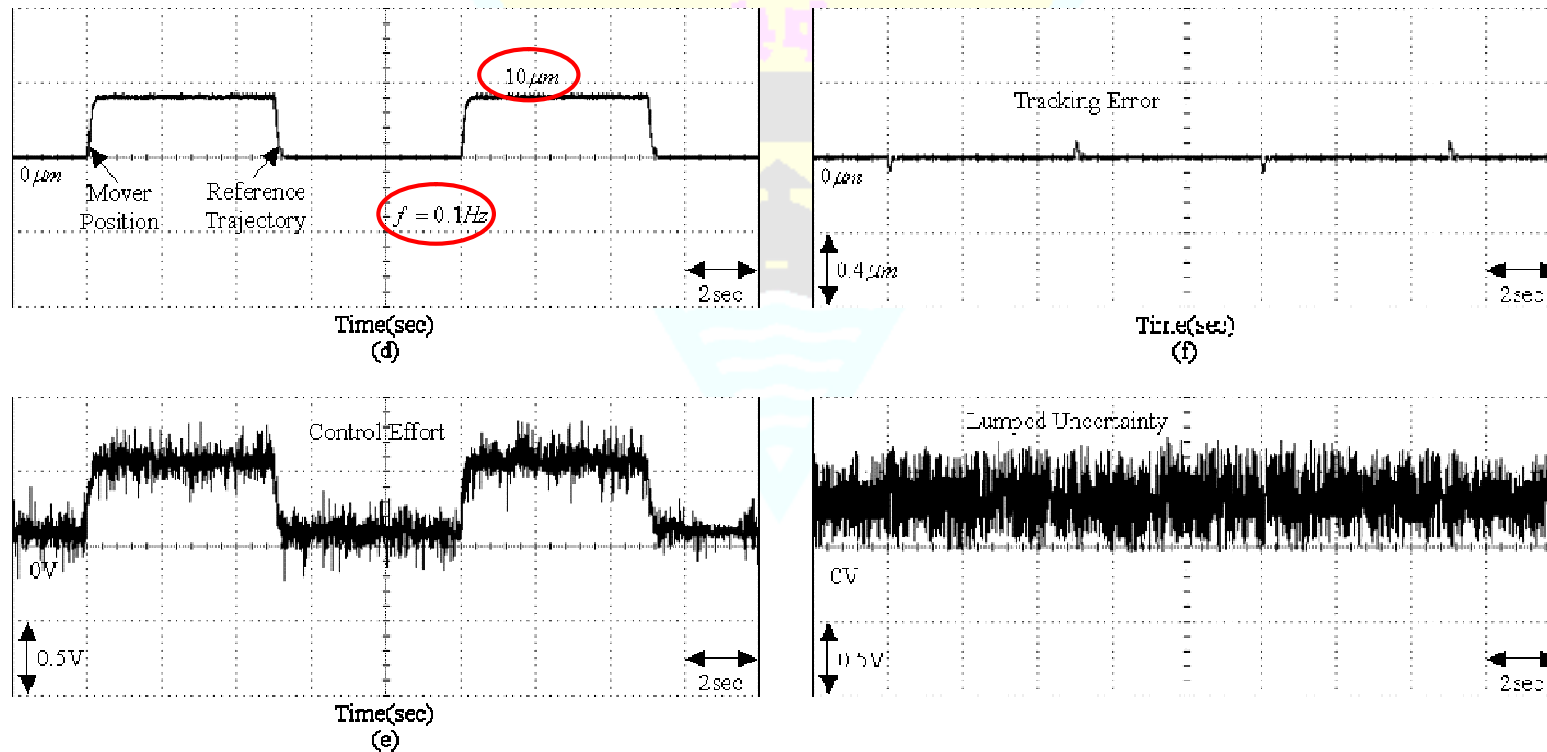
□ 遞迴式模糊類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖5.4續)



五、單軸壓電致動器之遞迴式模糊類神經網路適應控制系統(續)

- 外力干擾下遞迴式模糊類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖5.6續)

1.02Kg(10N) 砵碼塊



六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統

❖ 簡介

$$\dot{f} = A_p[\dot{x}_m - B_p F + \lambda e(t)] - A_p C_p [\dot{x}_m + \lambda e(t)] \quad (6.4)$$

$$F = (\sigma_0 \bar{z} + F_L) - \sigma_1 \frac{1}{h(x)} \bar{z} \dot{x} + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x}$$

- 利用小波類神經網路近似單軸壓電致動器精密定位系統的未知動態函數，並藉由Lyapunov穩定理論所推導出之適應性學習法則用來線上學習小波類神經網路的連結權重值、脹縮值與平移值。再設計強健控制器加以補償，由泰勒展開式中極小近似誤差、最佳參數向量及高階項向量所組成的總集不確定量，且由於強健控制器所需之總集不確定量估測值，將再設計總集不確定量適應性估測法則。

$$E = W^*(A^T m^* + B^T c^* + H) - \hat{W}(A^T m^* + B^T c^*) + \varepsilon_f$$

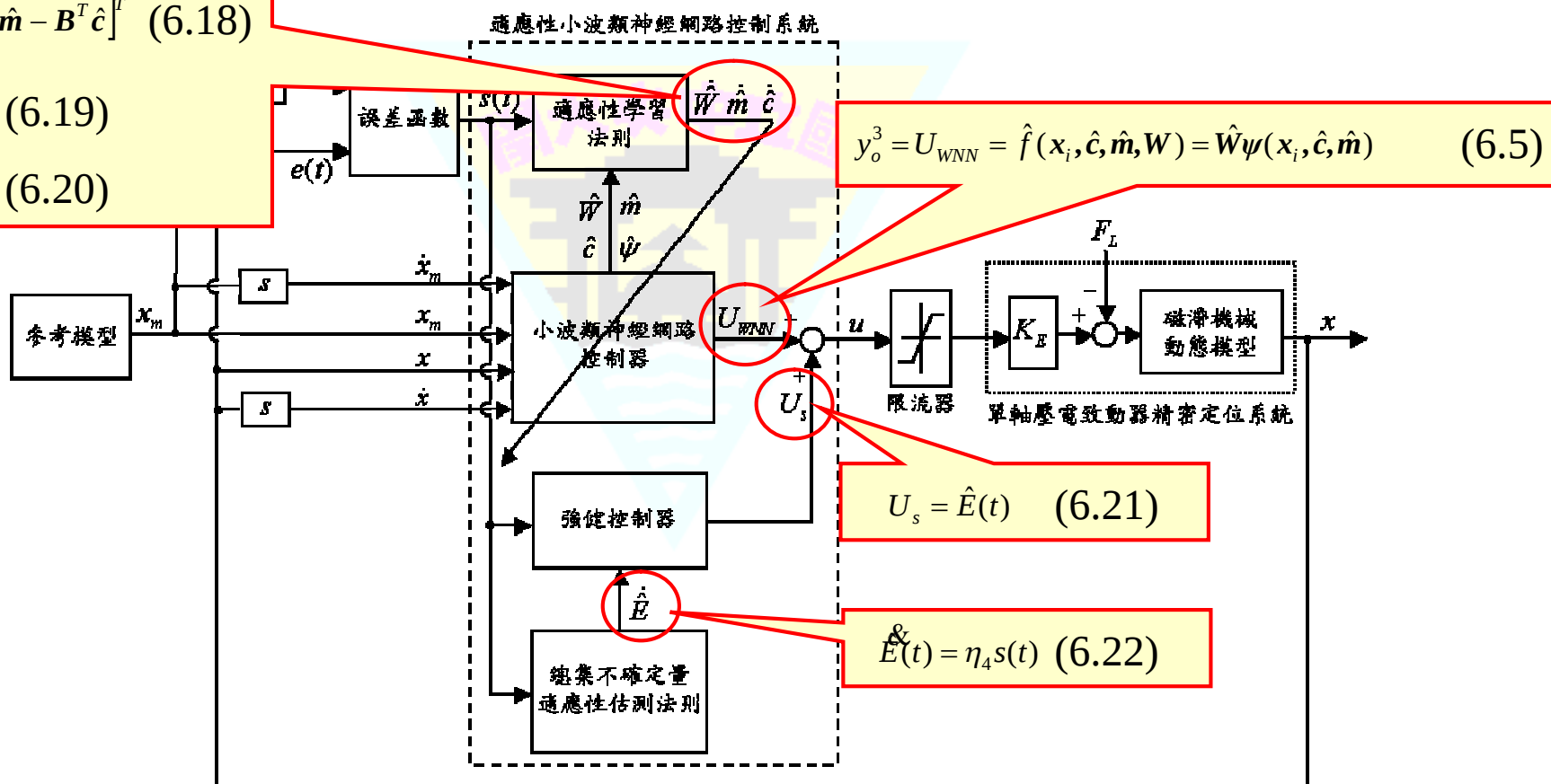
六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統(續)

□適應性小波類神經網路控制系統方塊圖(圖6.1)

$$\dot{\hat{W}} = \eta_1 s(t) [\hat{\psi} - A^T \hat{m} - B^T \hat{c}]^T \quad (6.18)$$

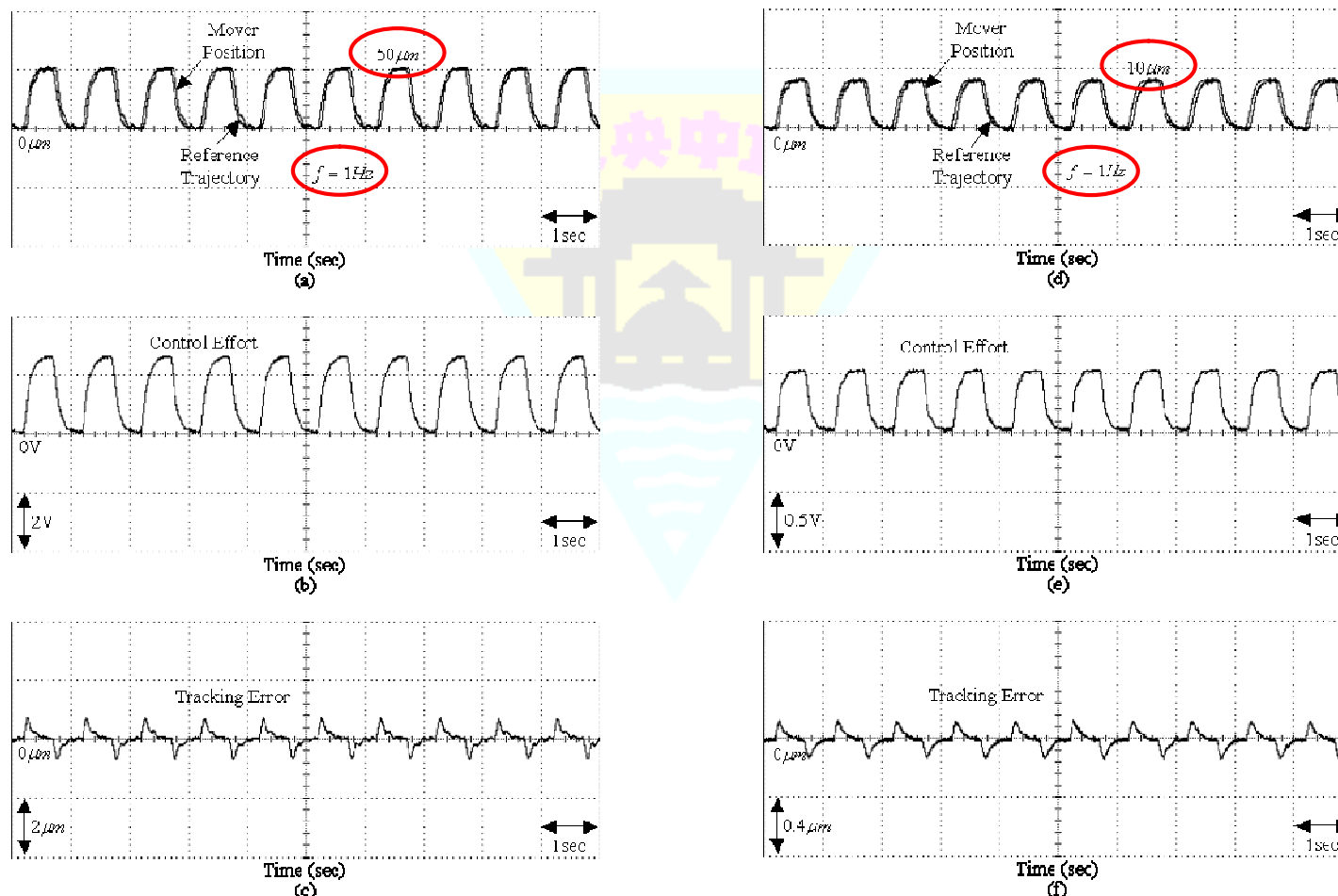
$$\dot{\hat{m}} = \eta_2 s(t) A \hat{W}^T \quad (6.19)$$

$$\dot{\hat{c}} = \eta_3 s(t) B \hat{W}^T \quad (6.20)$$



六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路 控制系統(續)

□ 計算轉矩控制系統週期性步階命令實測圖(圖6.2)



六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統(續)

□適應性小波類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖6.3)



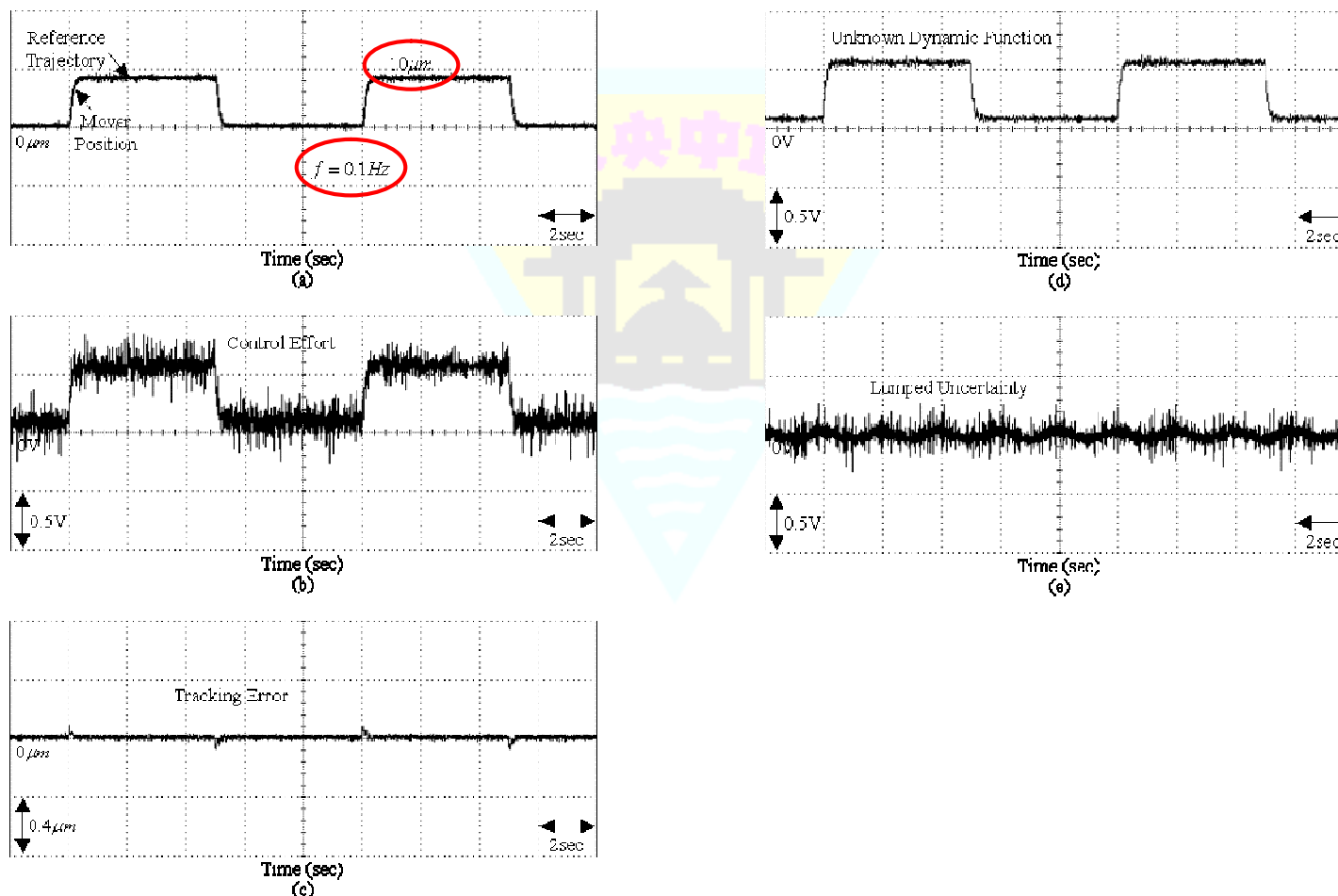
六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統(續)

□適應性小波類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖6.4)



六、單軸壓電致動器之適應性小波類神經網路控制系統(續)

□ 外力干擾下適應性小波類神經網路控制系統週期性步階命令實測圖(圖6.9)



七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統

❖ 簡介

$$\dot{f} = A_p[\dot{x}_m - B_p F + \lambda e(t)] - A_p C_p [x_m + \lambda e(t)] \quad (7.3)$$

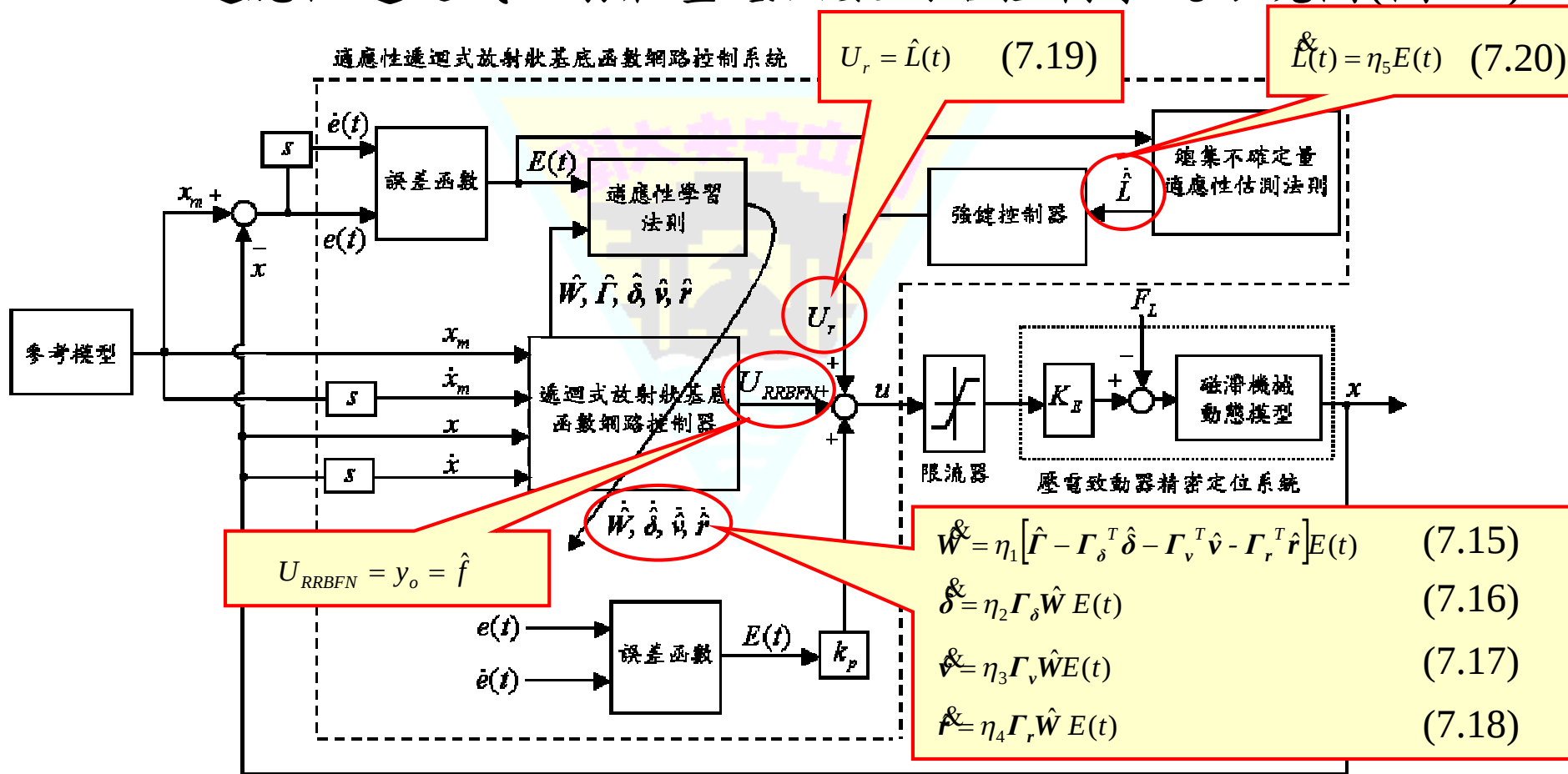
$$F = (k_n + \Delta k_d)x + (\sigma_0 \bar{z} + F_L) - \sigma_1 \frac{1}{h(x)} \bar{z} + (\sigma_1 + \sigma_2)x$$

- 利用具有準確近似能力、網路架構簡單及快速學習能力之遞迴式放射狀基底函數網路近似雙軸壓電致動器動態模型中所包含的未知動態函數，並藉由Lyapunov穩定理論推導出適應性學習法則用來線上學習遞迴式放射狀基底函數網路的參數。此外設計強健控制器加以補償總集不確定量所造成的影響，且再設計適應性估測法則估測強健控制器所需估測之總集不確定量。

$$L = W^{*T}(\Gamma_\delta^T \delta^* + \Gamma_v^T v^* + \Gamma_r^T r^* + H) - \hat{W}^T(\Gamma_\delta^T \delta^* + \Gamma_v^T v^* + \Gamma_r^T r^*) + \varepsilon_f$$

七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀基底函數網路控制系統(續)

□ 適應性遞迴式放射狀基底函數網路控制系統方塊圖(圖7.1)



七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

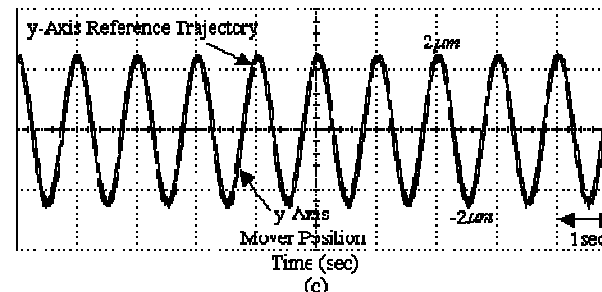
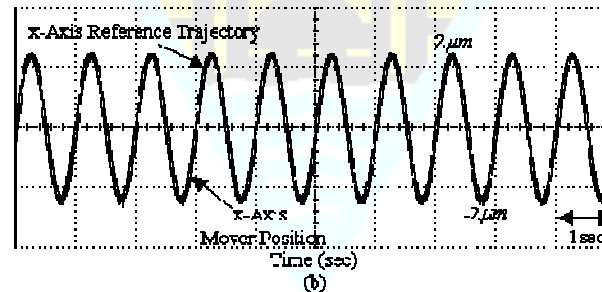
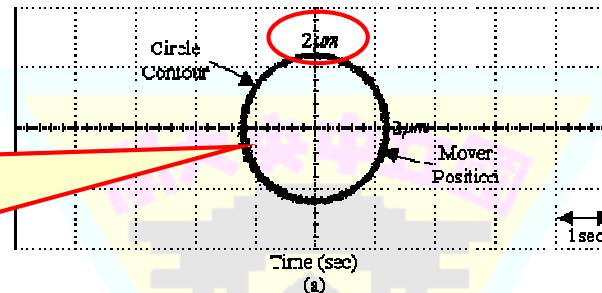
□比例-積分控制系統圓形輪廓軌跡命令實測圖(圖7.2)

圓形輪廓軌跡

$$\varphi_z = \varphi_{z-1} + \Delta\varphi$$

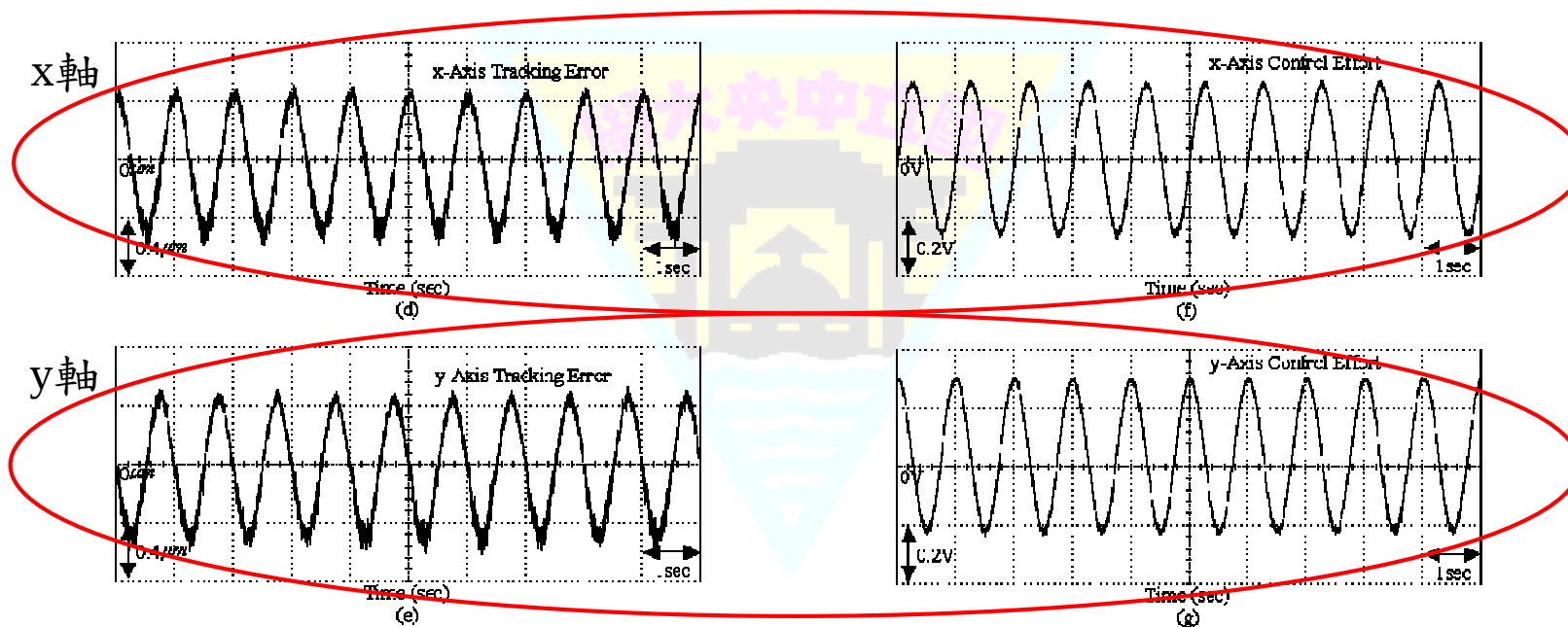
$$C_x = R\sin(\varphi_z) \quad (7.26)$$

$$C_y = R\cos(\varphi_z)$$



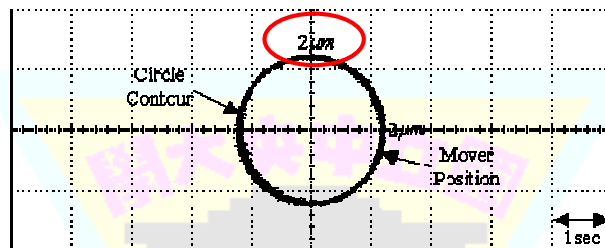
七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

□比例-積分控制系統圓形輪廓軌跡命令實測圖(圖7.2續)

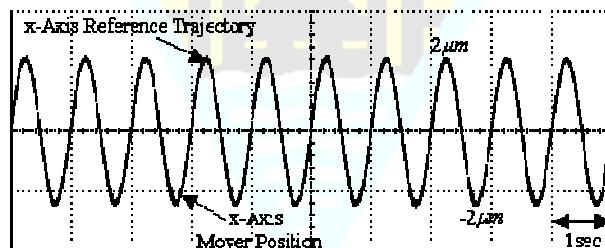


七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

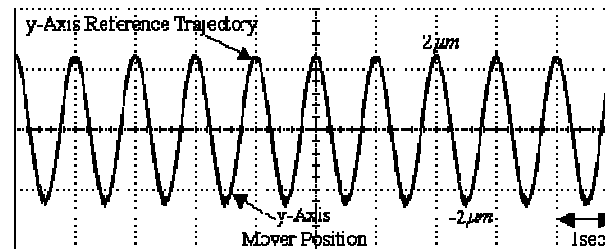
- 適應性遞迴式放射狀基底函數控制系統圓形輪廓軌跡命令
實測圖(圖7.3)



(a)



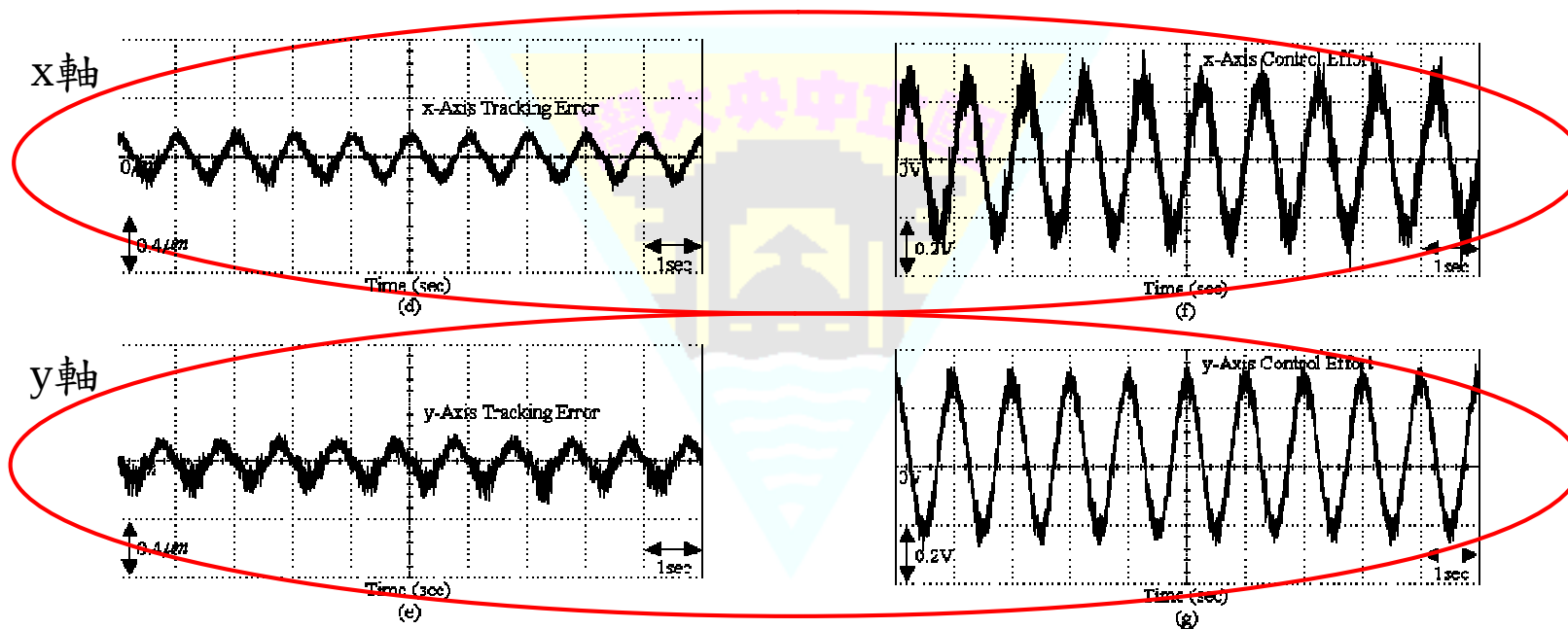
(b)



(c)

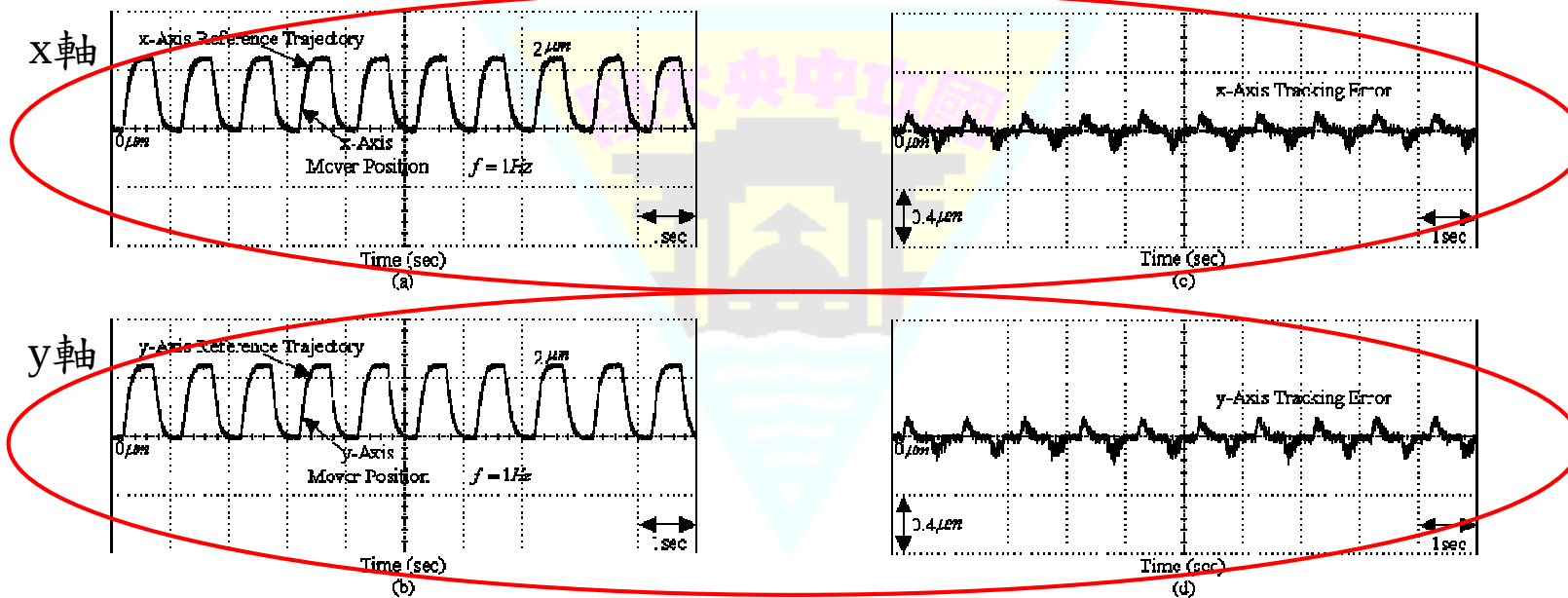
七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

□適應性遞迴式放射狀基底函數控制系統圓形輪廓軌跡命令
實測圖(圖7.3續)



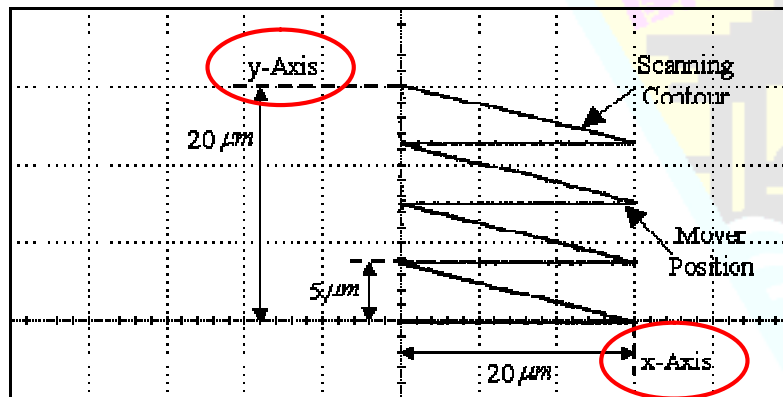
七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

□ 外力干擾下適應性遞迴式放射狀基底函數控制系統週期性
步階命令實測圖(圖7.6)

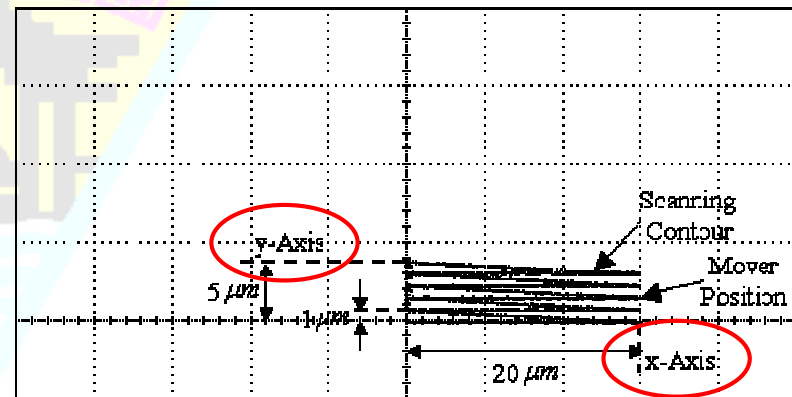


七、雙軸壓電致動器之適應性遞迴式放射狀 基底函數網路控制系統(續)

- 適應性遞迴式放射狀基底函數控制系統鋸齒形掃描輪廓命令實測圖(圖7.7)



(a)



(b)

八、結論與未來之研究發展

❖ 結論

- 完成單軸與雙軸壓電致動器之完整動態模型

- ▶ 建立磁滯摩擦力模型並套用於壓電致動器之機械動態模型，進而完成單軸與雙軸壓電致動器之完整動態模型，且於雙軸壓電致動器動態模型中增加考慮交叉耦合作用。

- 完成PC-based之單軸與雙軸壓電致動器控制系統

- ▶ 以壓電致動器、壓電驅動器、個人電腦與AD/DA伺服控制卡，分別完成PC-based之單軸與雙軸壓電致動器控制系統。

八、結論與未來之研究發展(續)

- 完成智慧型控制之壓電致動器精密定位控制系統
 - ▶ 遞迴式模糊類神經網路適應控制系統。
 - ▶ 適應性小波類神經網路控制系統。
 - ▶ 適應性遞迴式放射狀基底函數網路控制系統。

八、結論與未來之研究發展(續)

❖ 未來之研究發展

- 推導出更接近現實中存在於壓電致動器之磁滯現象的**磁滯摩擦力模型**，用以提高壓電致動器動態模型之準確性。
- 壓電致動器控制系統中採用更高精準度之**量測系統**，用以提高壓電致動器精密定位控制之精準度，進而達到更小之控制精度。
- 發展更完善、更適合應用於壓電致動器控制系統之**智慧型控制架構**，以提高控制精度。

八、結論與未來之研究發展(續)

- 由數位信號處理器(Digital Signal Process, DSP)負責智慧型控制架構之運算，並配合人機介面相關之軟、硬體，結合DSP單板電腦，以取代個人電腦，建立一具商業價值之工業級壓電致動器精密定位控制系統，並可朝向多軸運動控制方向來研究。



Thank you for your attention