

超音波馬達之驅動與智慧型控制

Drive and Intelligent Control for Ultrasonic Motor

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

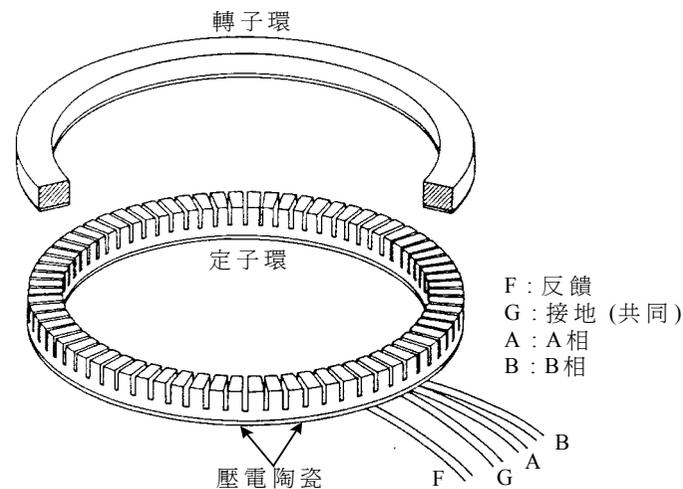
超音波馬達工作原理

□ 超音波馬達之轉動原理

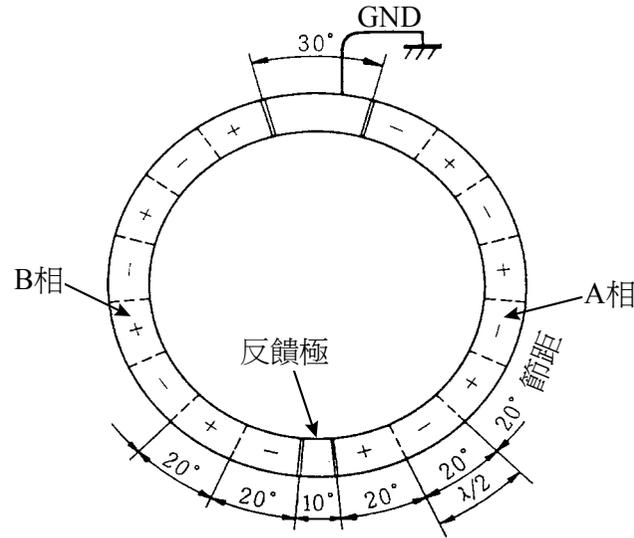
— 超音波馬達是一種應用超音波的彈性振動方式以獲得驅動動力，
然後再利用摩擦力帶動轉子而驅動的馬達

□ 超音波馬達之主要結構

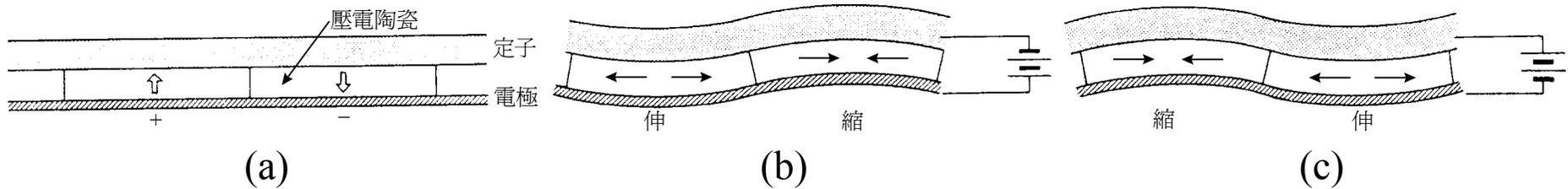
— 受超音波振動產生屈曲彈性波的定子環
— 受到來自定子的行進波產生轉動的轉子環
— 使轉子和定子緊密接觸以增加磨擦的彈性機構



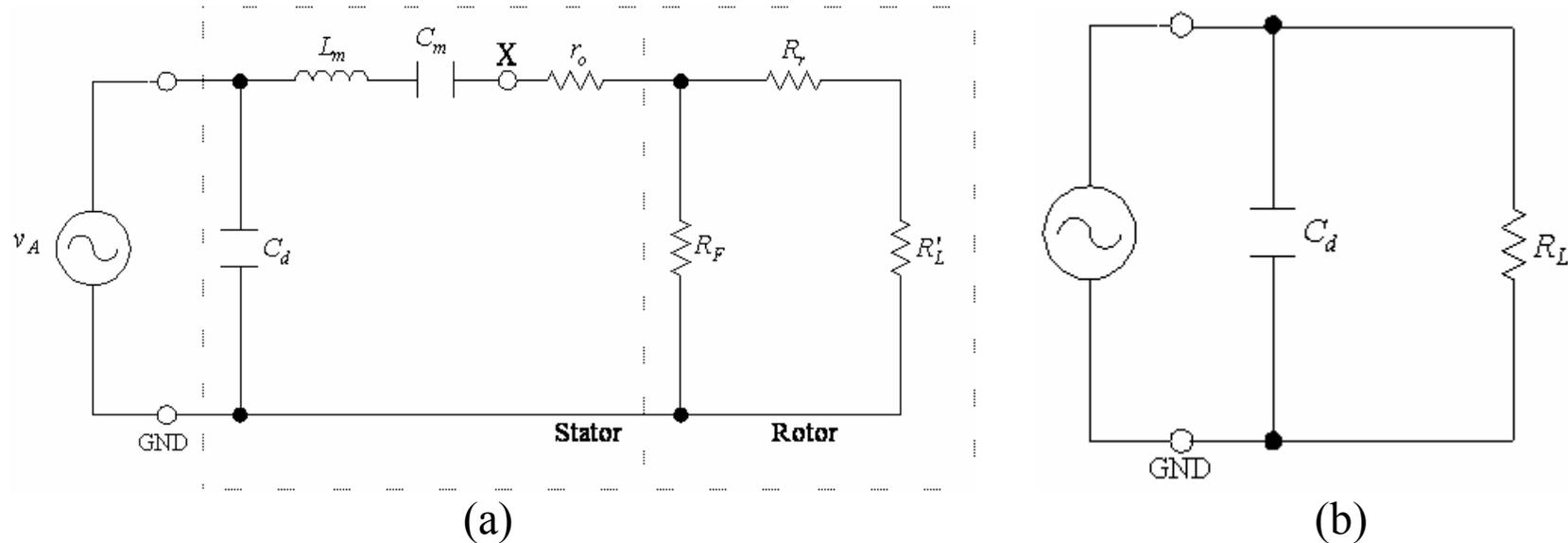
□ 超音波馬達定子上壓電陶瓷之極化排列圖，如圖 2.4 所示。



□ 利用單壓電晶片型產生屈曲彈性波之原理：(a)未加電壓；(b)加負極性；(c)加正極性

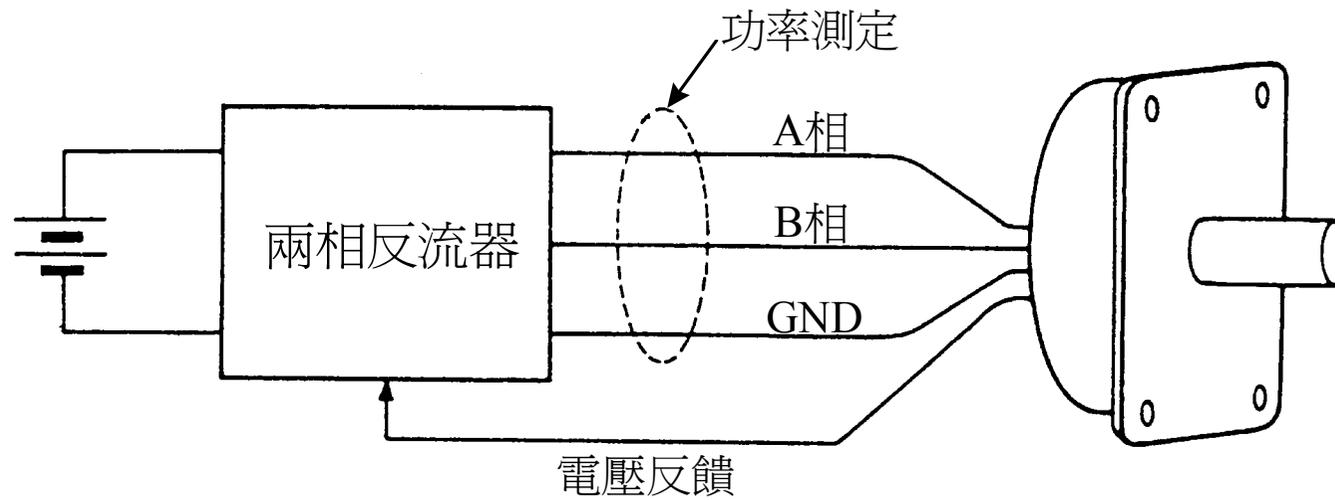


□ 行進波超音波馬達等效電路模型：(a)基本等效電路；(b)簡化後之電路

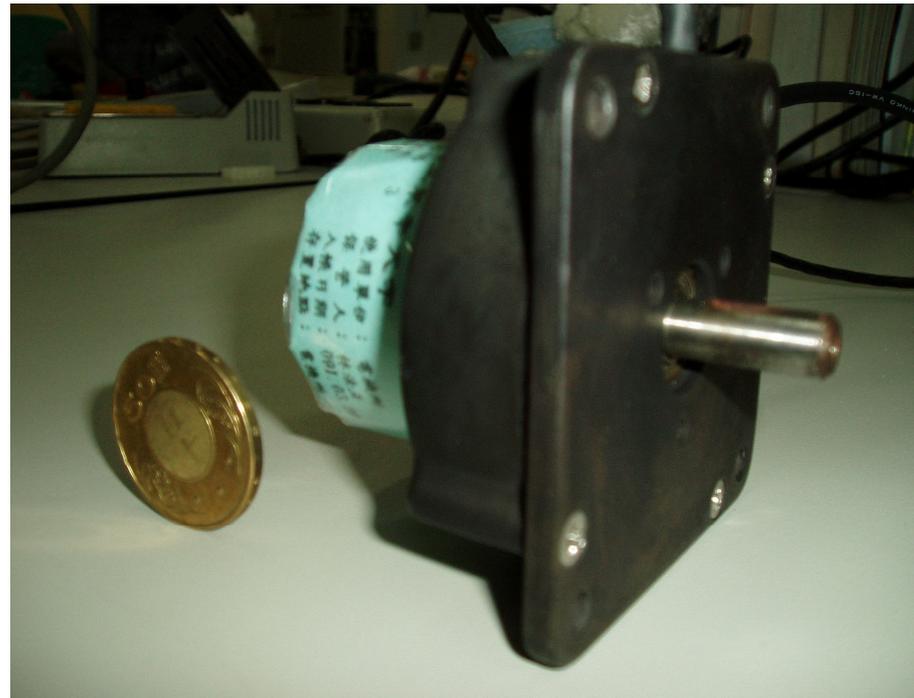


□ 超音波馬達 USR-60 之額定值為：驅動頻率 40kHz、驅動電壓 110Vrms 以及兩相之相位角為 90 度。機械共振頻率大約發生在 39kHz 左右，一般均操作在共振頻率的右邊負斜率區大約 40kHz ~ 43kHz 的範圍。

□ 超音波馬達兩相反流器驅動系統，如圖 2.6 所示。



□ 超音波馬達實體圖



□ 模糊控制系統的基本設計步驟，其說明如下：

— 步驟一：定義輸入與輸出變數

首先探討受控系統的特性，尋求有意義之狀態加以觀測作為控制器的輸入變數，同時也尋求所須的控制動作當作輸出變數。

— 步驟二：定義模糊變數與歸屬函數

根據實際情況考量輸入與輸出變數的觀測值分佈範圍來決定各個變數之論域，將其劃分成適當數量之模糊區域，再定義模糊變數和其對應的歸屬函數以涵蓋變數的分佈空間，使得任意之明確變數值皆可被模糊化。亦即可以適當的歸屬值表示其屬於某一模糊集合變數的程度。

— 步驟三：訂定控制規則

設計者可依據專家的工作經驗、控制知識與系統之動態特性等，擬定適合的控制策略，而以語言化的條件句撰寫成控制規則。

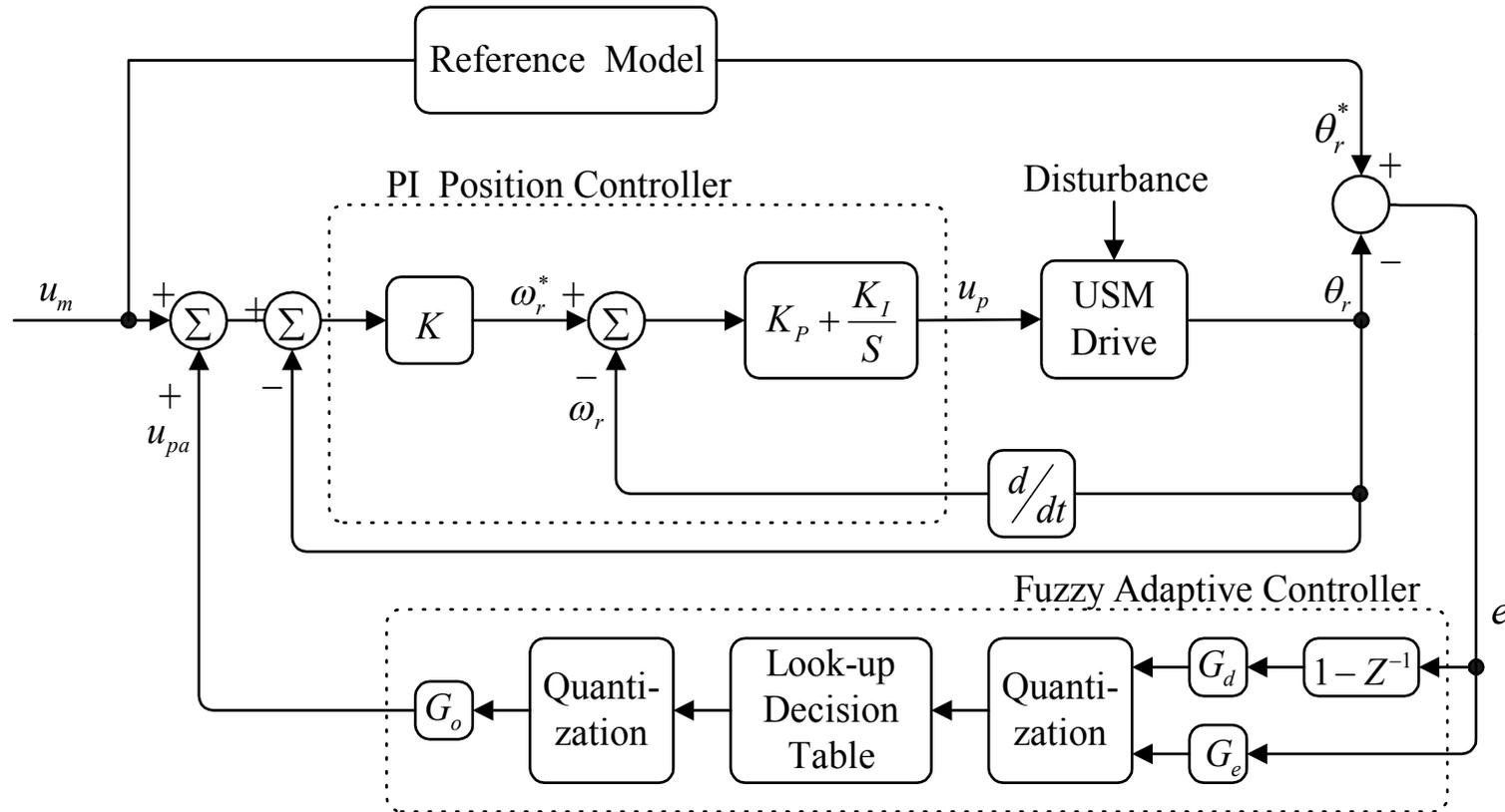
— 步驟四：訂定模糊推論的方法

模糊推論，或稱為近似推論，乃是將模糊輸入變數轉變成模糊輸出變數的推論演算程序，此為模糊控制之核心。

— 步驟五：定義解模糊化的方式

模糊推論完成之模糊輸出變數轉換為明確值之過程，即為解模糊化。

□ 超音波馬達之模糊適應模式追隨位置控制器，如圖 9.1 所示。

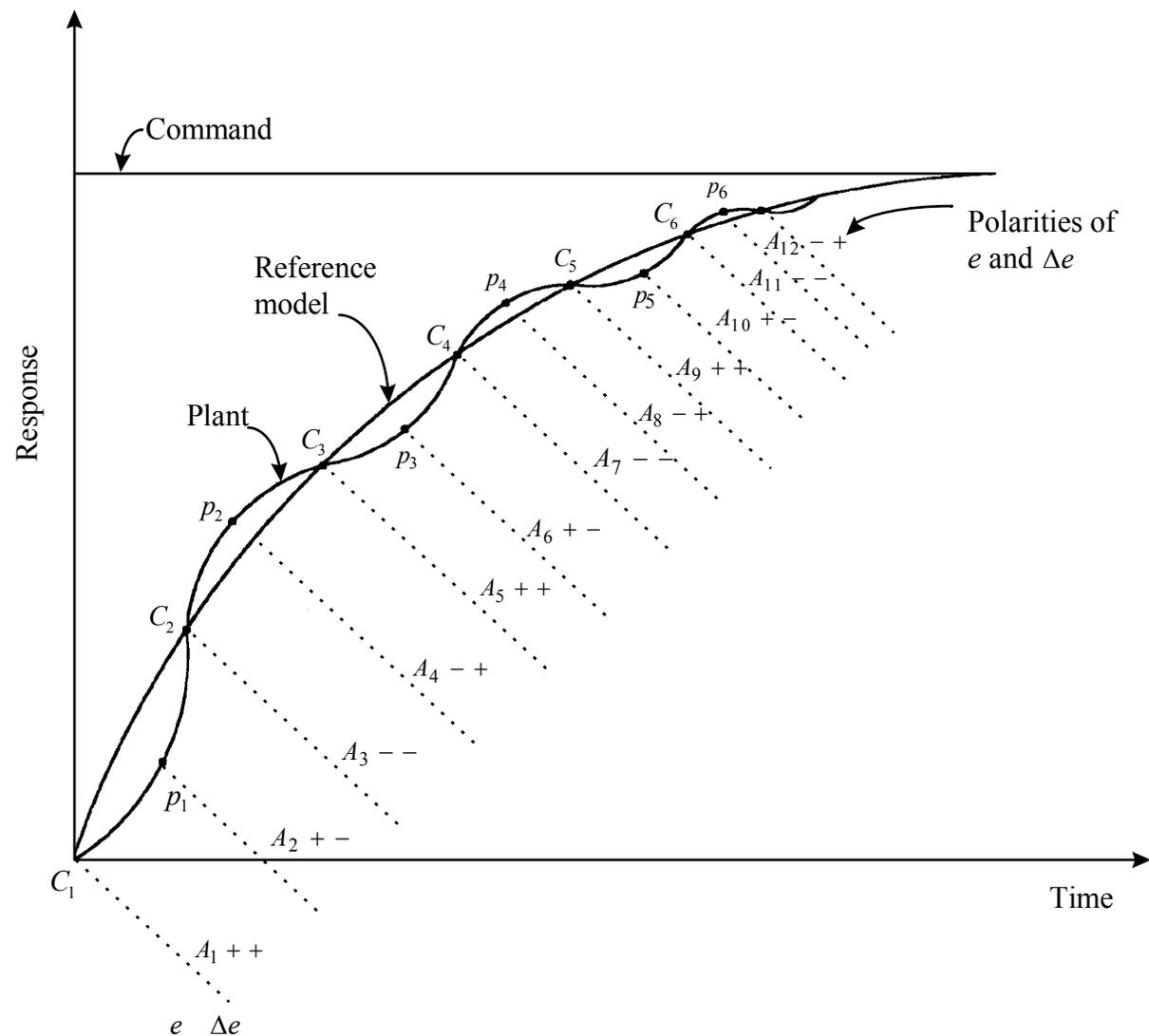


□ 定義位置誤差 e 及誤差變化 Δe

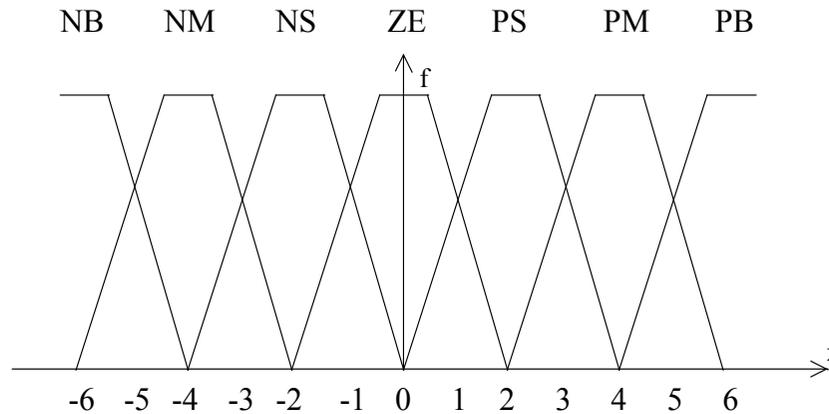
$$e(n) \triangleq \theta_r^*(n) - \theta_r(n) \quad (9.1)$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1) \quad (9.2)$$

□ 動態訊號分析，如圖 9.2 所示。



□ 模糊適應控制器選擇使用梯形的歸屬函數，如圖 9.3 所示。



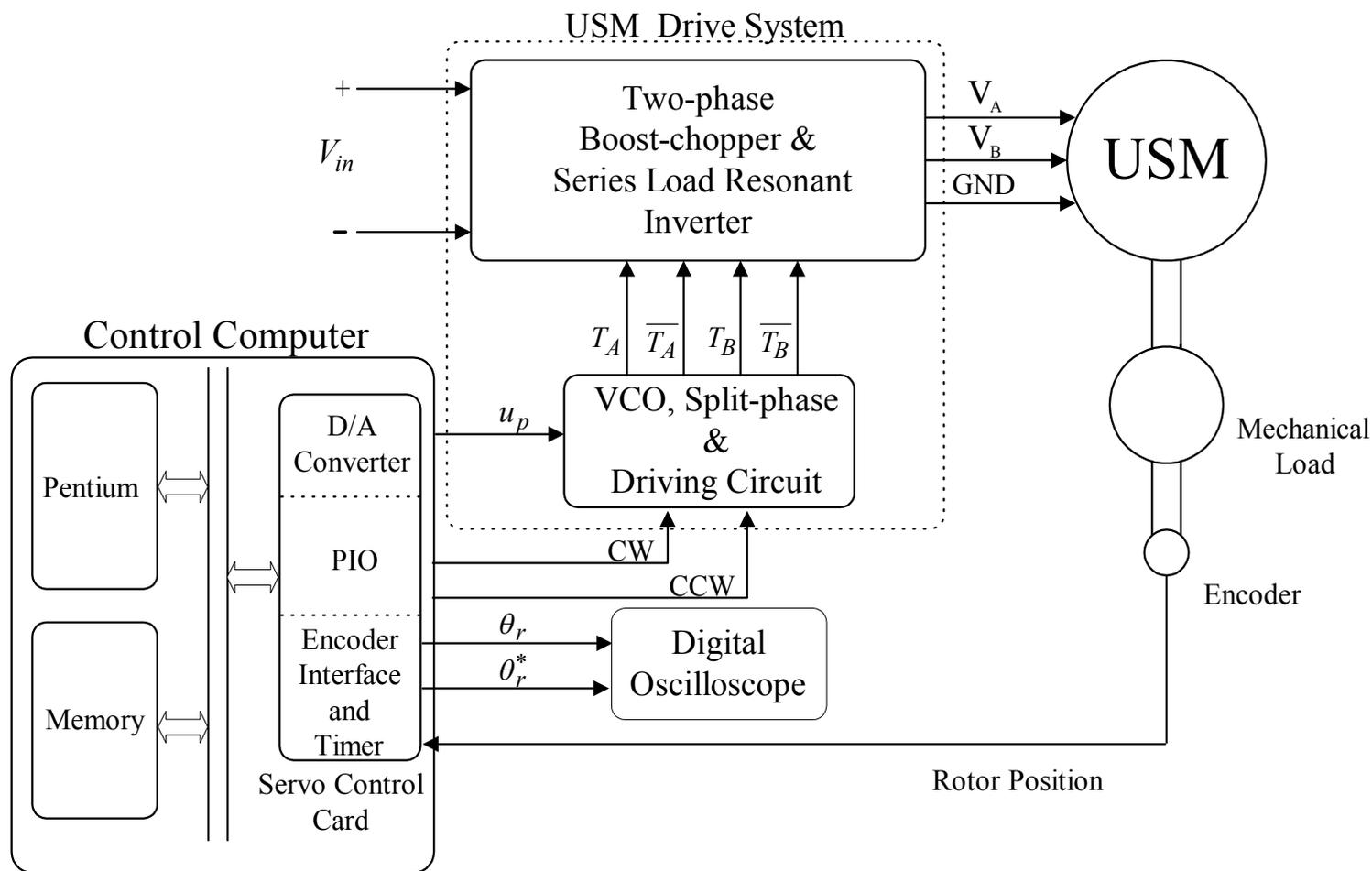
□ 引用圖 9.2 中的指標，整理並列在表 9.2 中。

e Δe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB				C_2			
NM	A_3	A_7		C_4		A_2	A_6
NS			A_{11}	C_6	A_{10}		
ZE	p_2	p_4	p_6	ZE	p_5	p_3	p_1
PS			A_{12}	C_5	A_9		
PM	A_4	A_8		C_3		A_1	A_5
PB				C_1			

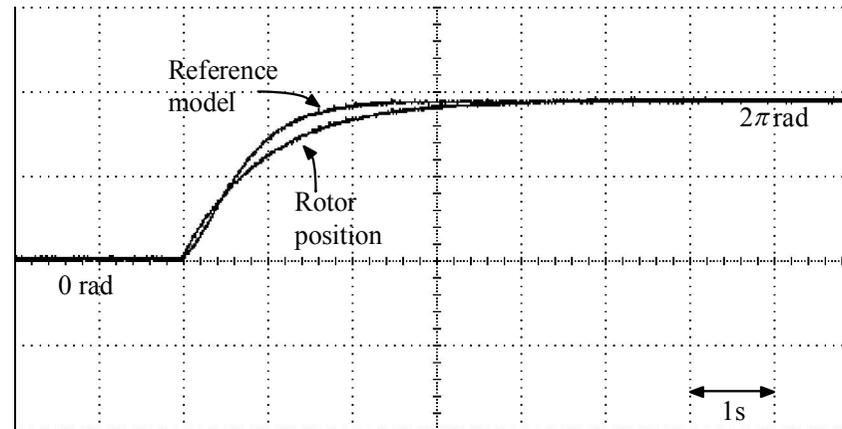
- 輸入比例因數 G_e 與 G_d 的選取則是依據觀查實驗結果來決定，本控制器中之 G_e 與 G_d 選定為 30。其量化級數 (Quantization Level)，如表 9.1 所示。
- 口語化之模糊控制規則，如表 9.5 所示。
- 利用解重心法建構一以實際數值代表控制力的正確規則表 (Decision Lookup Table)，如表 9.6 所示。
- 為了增加誤差驅動適應特性，輸出比例因數 G_o 是依據誤差來設計，如下式所示

$$G_o = \begin{cases} 0 & \text{for } e_{ro} \geq |e| \\ K_1 + K_2(|e| - e_{ro}) & \text{for } e_{ro} < |e| \end{cases} \quad (9.3)$$

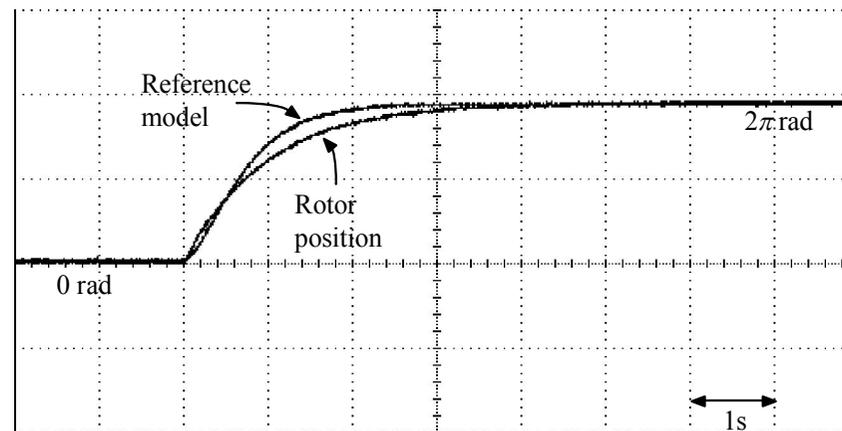
□ 超音波馬達電腦控制系統方塊圖，如圖 9.4 所示。



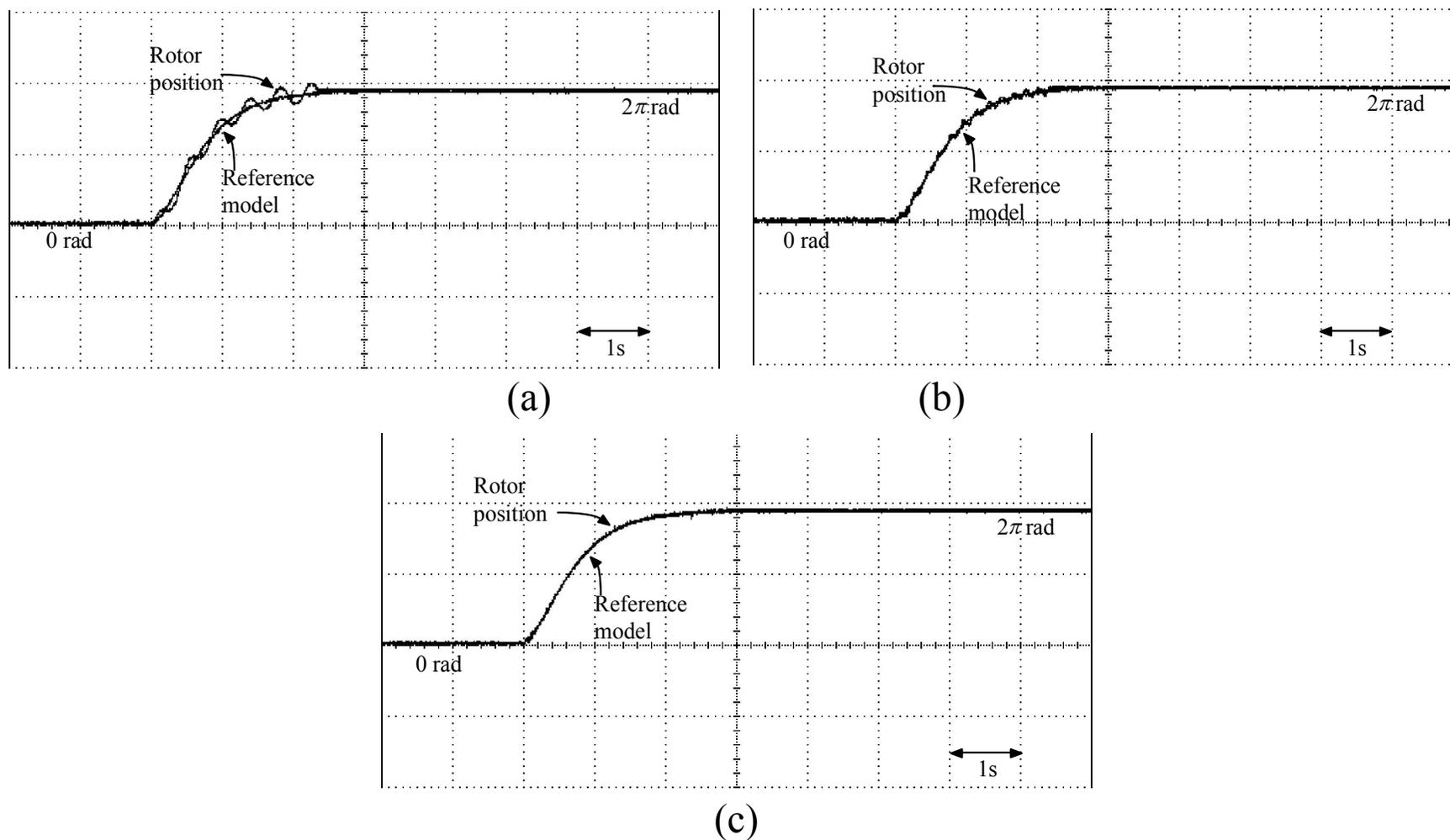
□ 比例積分位置控制器於未加載時之實測結果，如圖 9.5 所示。



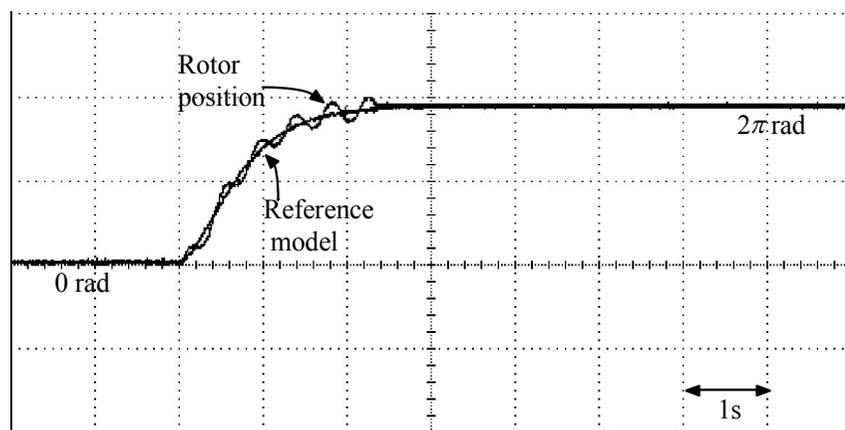
□ 比例積分位置控制器於加載時之實測結果，如圖 9.7 所示。(單軸移動平台負載 120 公斤重，大約是超音波馬達額定轉矩的 80%)



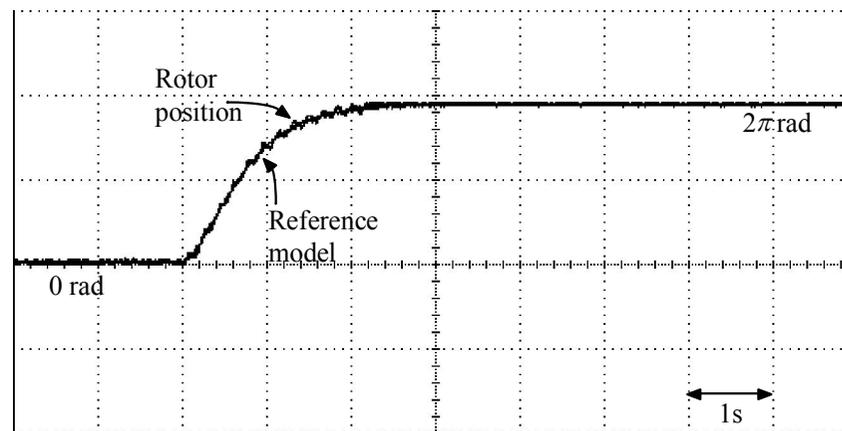
- 比例積分位置控制器與模糊適應控制器於未加載時之實測結果，如圖 9.6 所示: (a) $K_2 = 0.005$; (b) $K_2 = 0.01$; (c) $K_2 = 0.03$



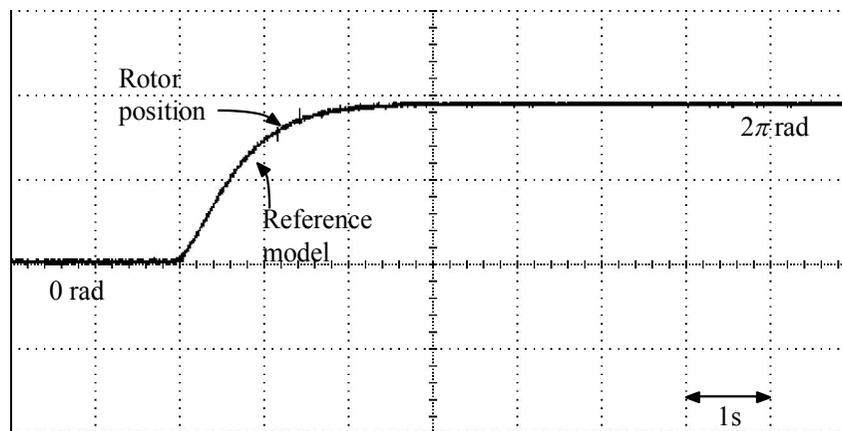
□ 比例積分位置控制器與模糊適應控制器於加載時之實測結果，如圖 9.6 所示: (a) $K_2 = 0.005$; (b) $K_2 = 0.01$; (c) $K_2 = 0.03$



(a)

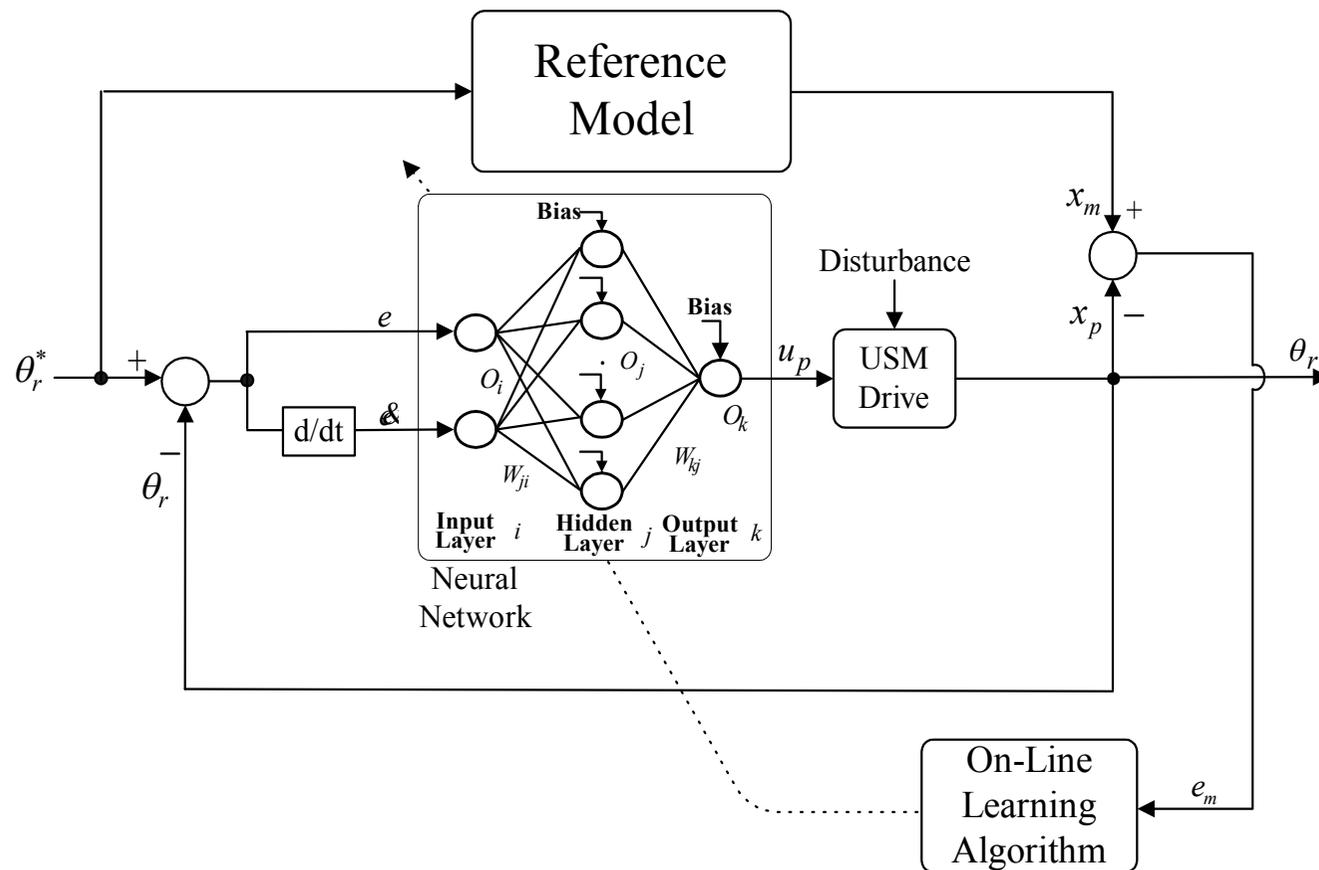


(b)



(c)

□ 線上訓練類神經網路模式追隨位置控制器，如圖 11.1 所示。



□ 輸入層 (Input Layer) 節點 i 為

$$net_i = x_i$$

(11.1)

而節點 i 對應的輸出為

$$O_i = f_i(net_i) = net_i \quad (11.2)$$

□ 輸入到隱藏層 (Hidden Layer) 節點 j 為

$$net_j = \sum_i (W_{ji} O_i) + \theta_j \quad (11.3)$$

而節點 j 對應的輸出為

$$O_j = f_j(net_j) = \frac{1}{1 + e^{-net_j}} \quad (11.4)$$

□ 輸入到輸出層 (Output Layer) 節點 k 則為

$$net_k = \sum_j (W_{kj} O_j) + \theta_k \quad (11.5)$$

其所對應的輸出為

$$O_k = f_k(net_k) = net_k \quad (11.6)$$

□ 為了描述類神經網路控制器線上學習法則，首先定義誤差函數 E

$$E = \frac{1}{2} (x_{m,N} - x_{p,N})^2 = \frac{1}{2} e_{m,N}^2 \quad (11.7)$$

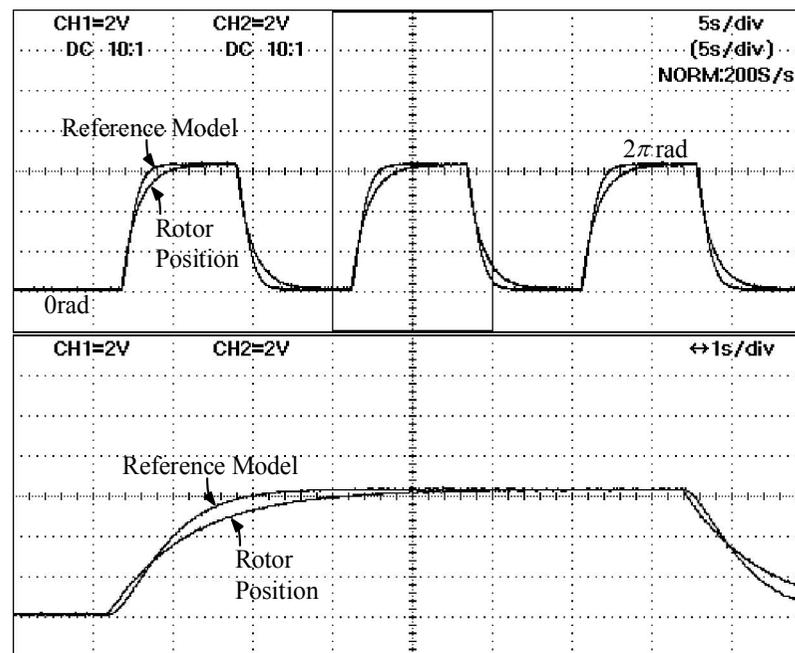
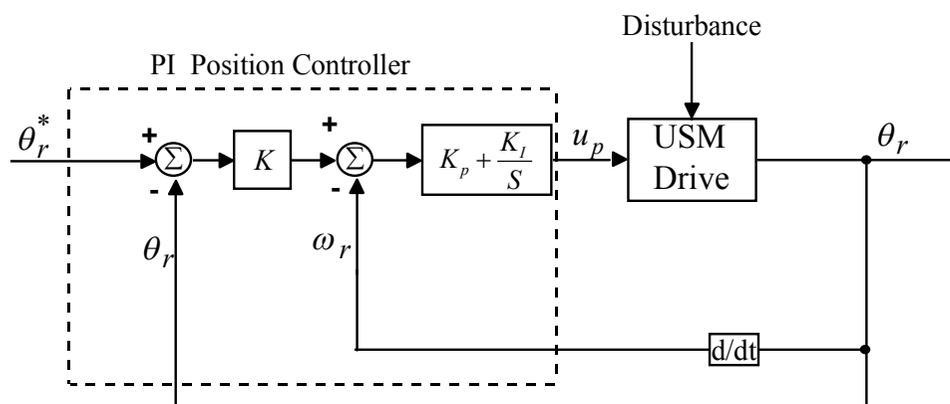
□ 利用倒傳遞演算法 (Backpropagation) 來更新類神經網路控制器的連結權重值

$$W_{ji,N+1} = W_{ji,N} - \eta \frac{\partial E}{\partial W_{ji,N}} + \alpha \Delta W_{ji,N-1} \quad (11.8)$$

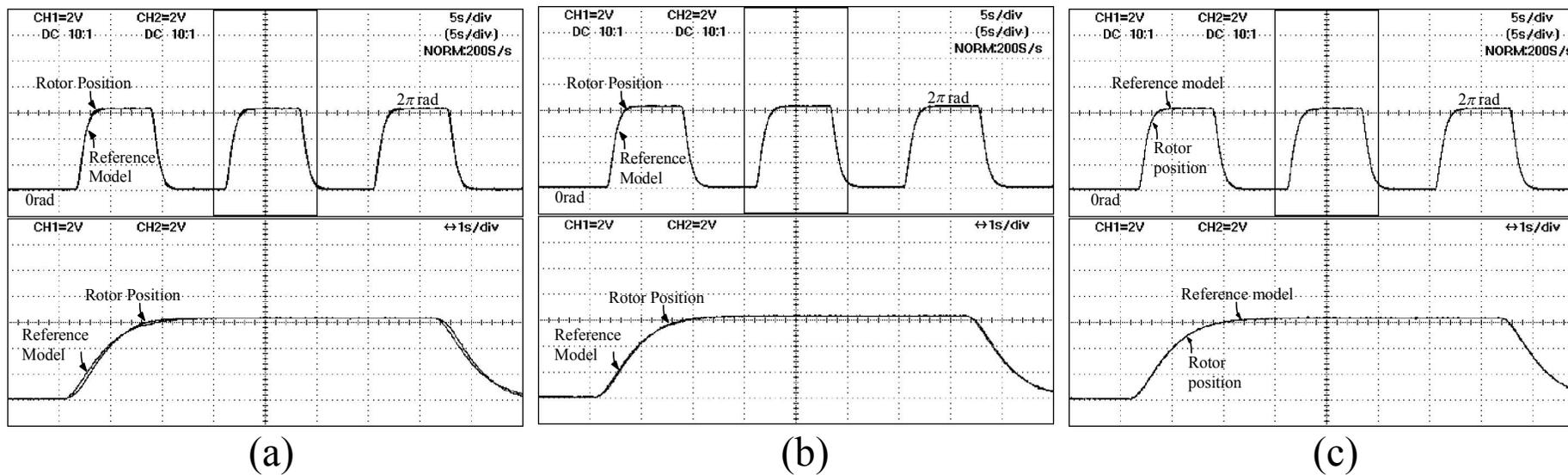
$$W_{kj,N+1} = W_{kj,N} - \eta \frac{\partial E}{\partial W_{kj,N}} + \alpha \Delta W_{kj,N-1} \quad (11.9)$$

□ 因為超音波馬達系統動態的不確定性，利用簡單的符號函數 (Sign Function) 來近似系統靈敏度 (Jacobian)。

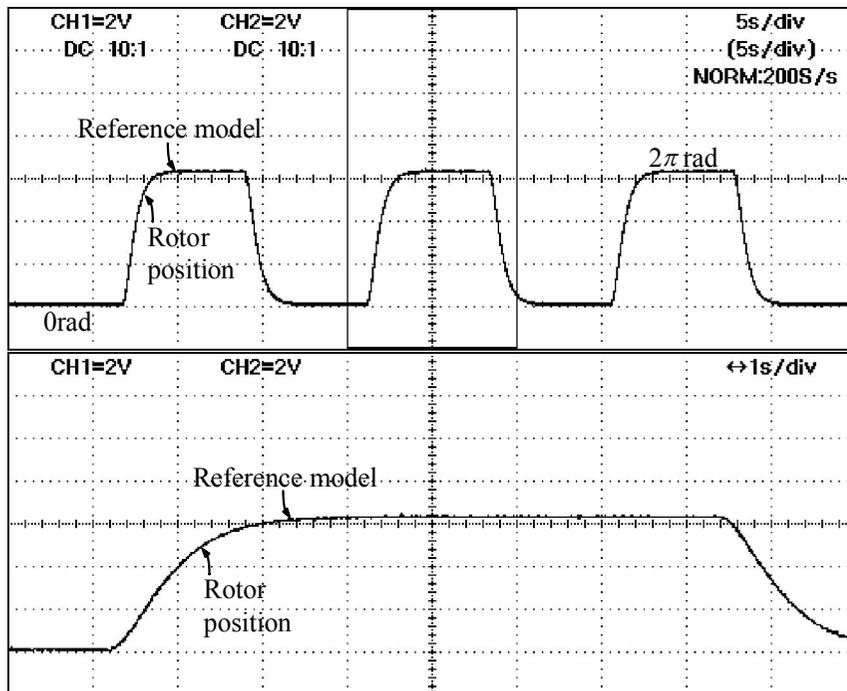
- 超音波馬達電腦控制系統方塊圖，如圖 9.4 所示。
- 比例積分型位置控制器架構，如圖 11.2 所示。
- 比例積分控制器的轉子位置響應，如圖 11.4 所示。



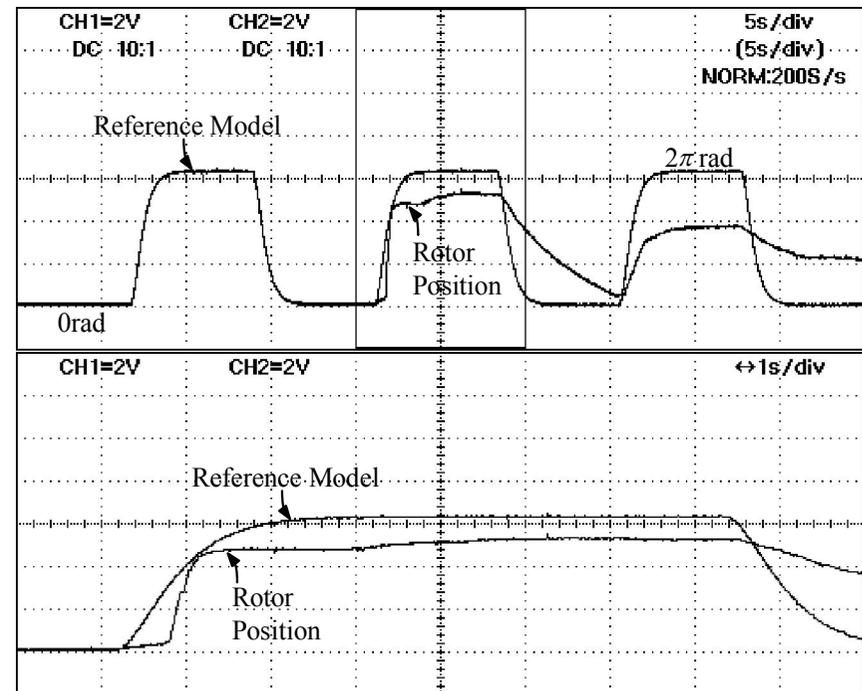
- 類神經網路模式追隨控制器 (固定學習速率 η 和 α 等於 0.01):
 (a) 10 個隱藏層神經元; (b) 20 個隱藏層神經元; (c) 30 個隱藏層神經元



- 類神經網路模式追隨控制器 (固定 30 個隱藏層神經元): (a) 學習速率 η 和 α 等於 0.02; (b) 學習速率 η 和 α 等於 0.03

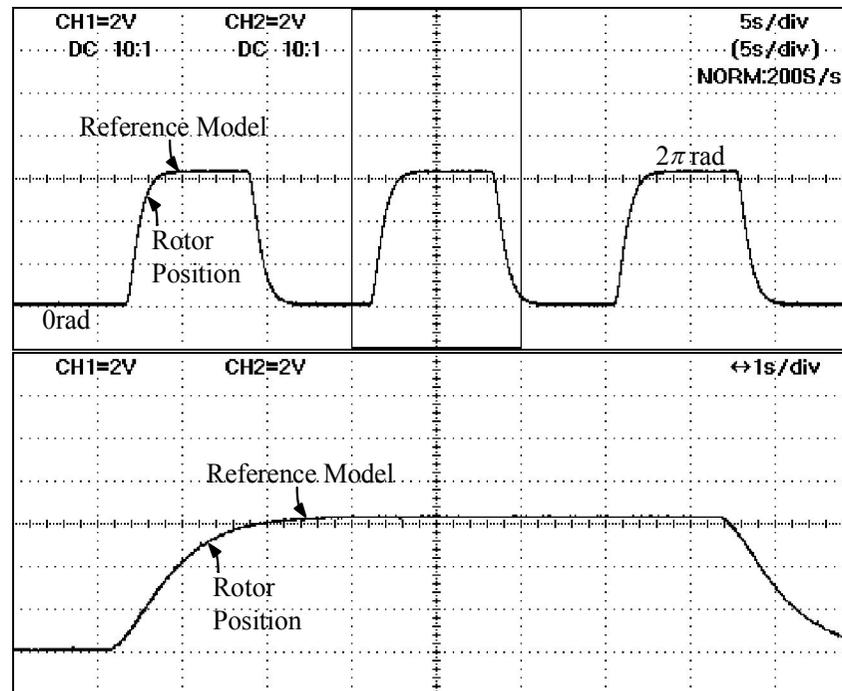


(a)

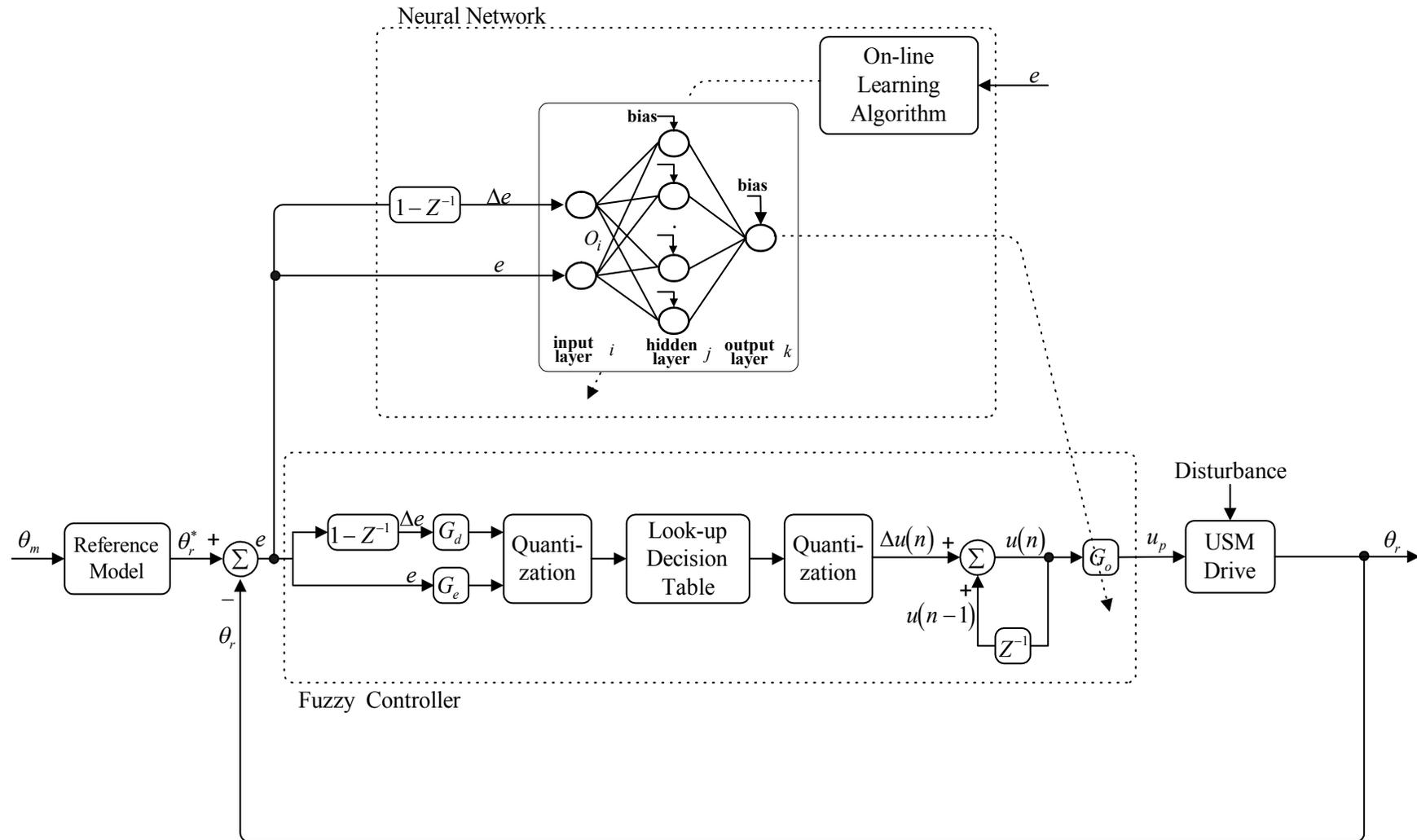


(b)

- 類神經網路模式追隨控制器於加載情況 (30 個隱藏層神經元及學習速率 η 和 α 等於 0.02)



□ 模糊與類神經網路控制架構，如圖 12.1 所示。



- 模糊控制器的輸入變數分別為位置誤差 $e(n)$ 以及位置誤差變化 $\Delta e(n)$ ；輸出變數為控制力變化 $\Delta u(n)$ ，其中定義如下

$$e(n) \triangleq \theta_r^*(n) - \theta_r(n) \quad (12.1)$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1) \quad (12.2)$$

$$u(n) \triangleq u(n-1) + \Delta u(n) \quad (12.3)$$

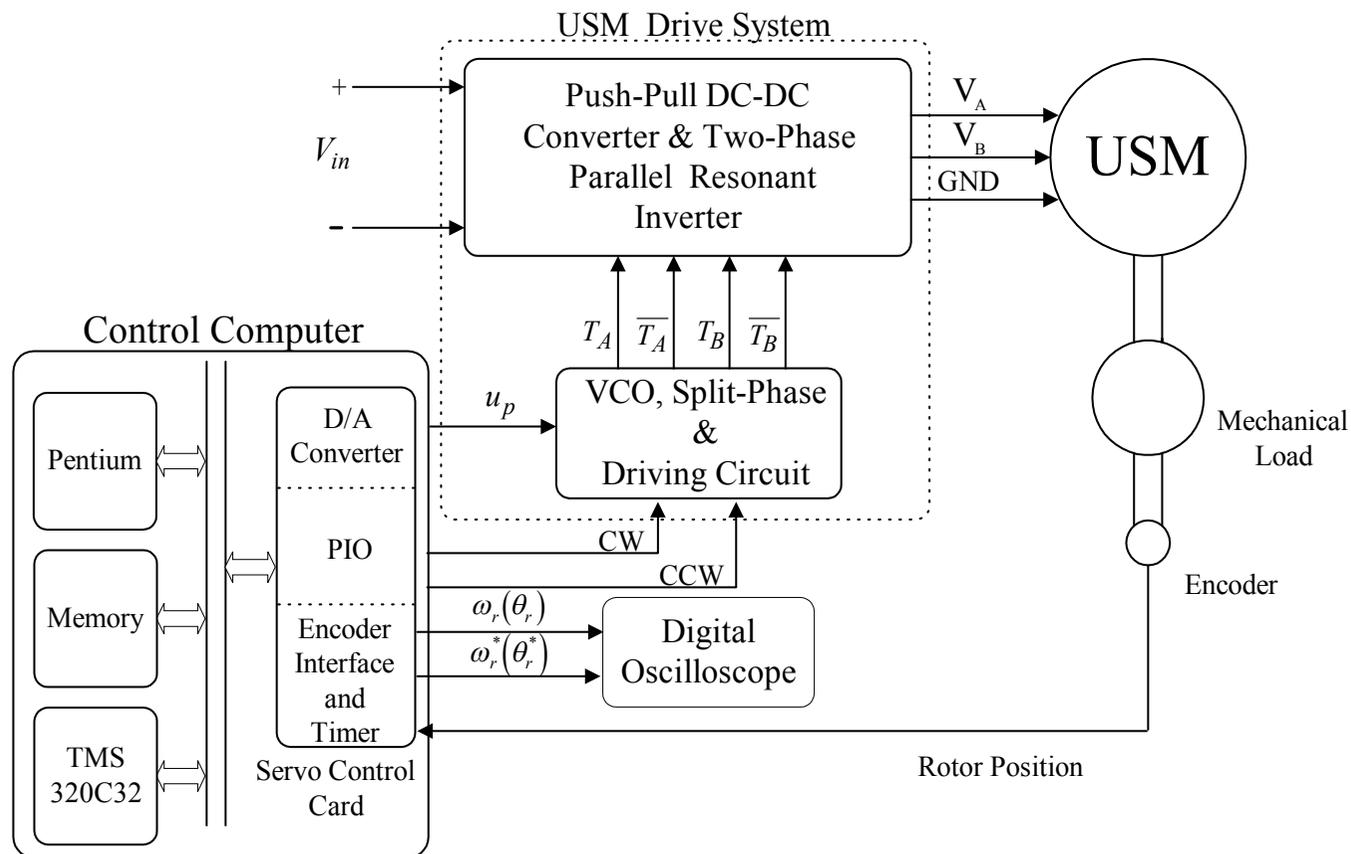
- 本章之模糊控制器與第九章所提的不同點在於：前者為主控制器，後者為補償控制器，用來補償比例積分位置控制器 (PI Position Controller) 之缺失；前者提出以線上調整之類神經網路來調變模糊控制器的輸出比例因數，後者則以誤差適應法則來調變輸出比例因數。
- 類神經網路的輸入變數分別為位置誤差 $e(n)$ 以及位置誤差變化 $\Delta e(n)$ ；輸出變數為模糊控制器之輸出比例因數 G_o 。

- 由於超音波馬達之動態模型並非十分清楚，提出以 θ_r 與 u_p 比值之符號函數 (Sign Function) 來近似系統靈敏度。
- 選擇類神經網路之學習速率，對於網路之特性具有相當大的影響力。學習速率越小者，則參數調整越緩慢，其收斂較慢；越大者參數調整越激烈，雖然收斂較快，但可能產生震盪導致系統不穩定。
- 根據離散型 (Discrete-type) 之 Lyapunov 函數推導出可變學習速率，確保軌跡追蹤誤差收斂。

$$\eta_{kj} = 16 / (R_{kj} u^2)$$

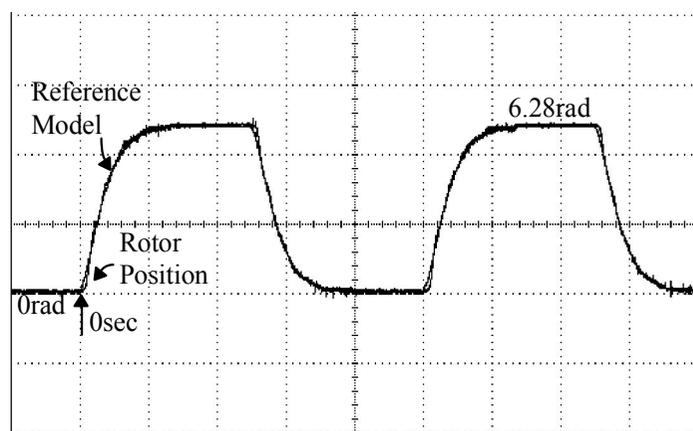
$$\eta_{ji} = 256 O_{i \min}^2 / \left[\|W_{kj}\|_{\max}^2 R_{kj} u^2 \right]$$

□ 超音波馬達電腦控制系統方塊圖，如圖 12.2 所示。

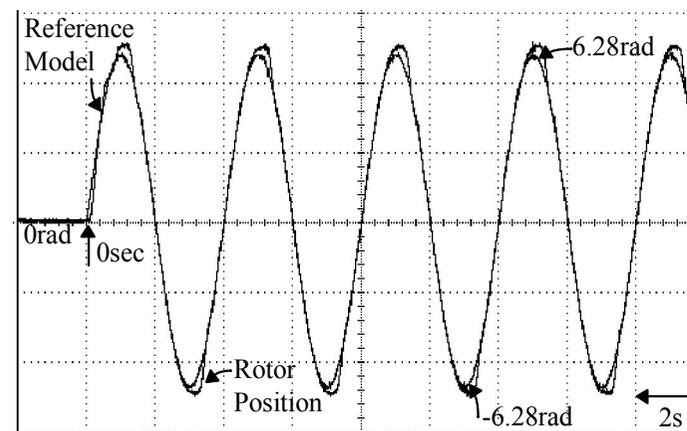


□ 使用具能量反饋功能之並聯共振驅動電路，如第五章所述，來驅動超音波馬達。

- 個人電腦之中斷服務程式 (ISR) 的工作為從編碼器讀回轉子位置、利用參考模式產生監督訊號、致動 DSP、透過雙向傳輸埠 (DPRAM) 獲得模糊控制器之輸出比例因數以及實現模糊控制器。DSP 的工作為透過雙向傳輸埠獲得位置誤差訊號、實現類神經網路、計算可變學習速率、線上訓練類神經網路及透過雙向傳輸埠提供模糊控制器之輸出比例因數。
- 模糊適應模式追隨位置控制器之實測結果(未加載): (a)週期步階命令; (b) 週期旋波命令

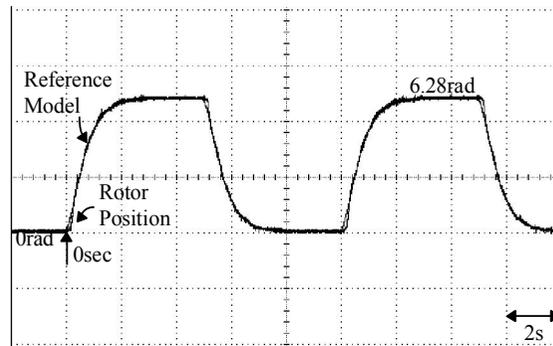


(a)

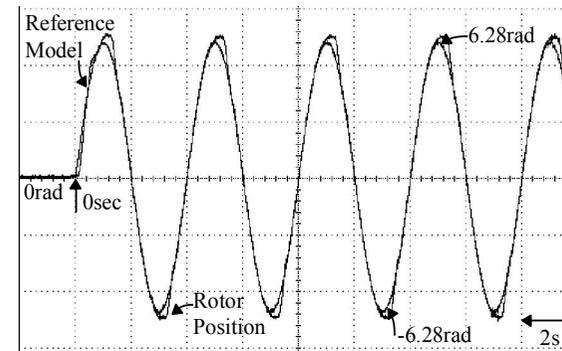


(b)

- 模糊適應模式追隨位置控制器之實測結果(加載): (a)週期步階命令; (b) 週期旋波命令

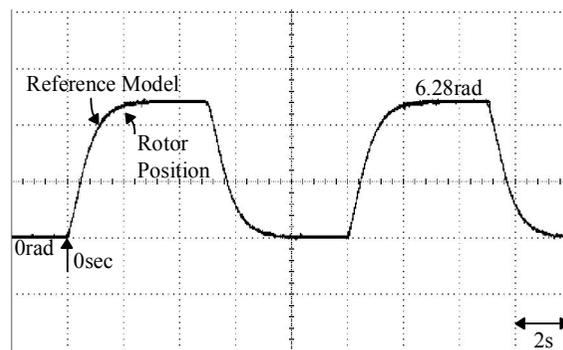


(a)

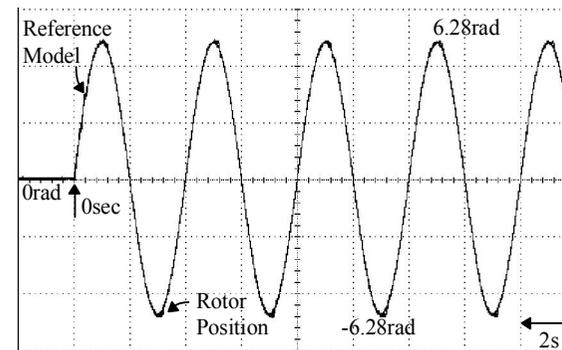


(b)

- 模糊與類神經網路控制器之實測結果(未加載): (a)週期步階命令; (b) 週期旋波命令

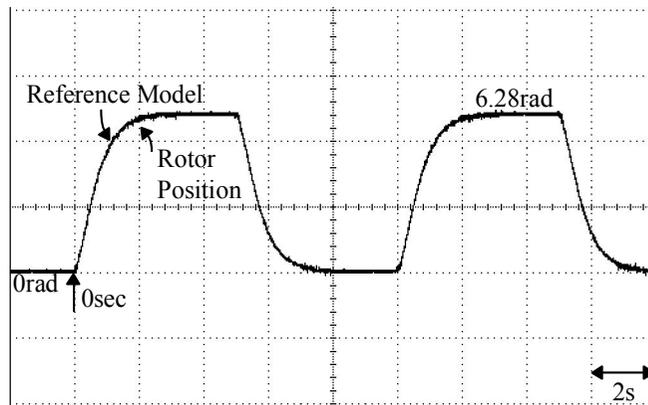


(a)

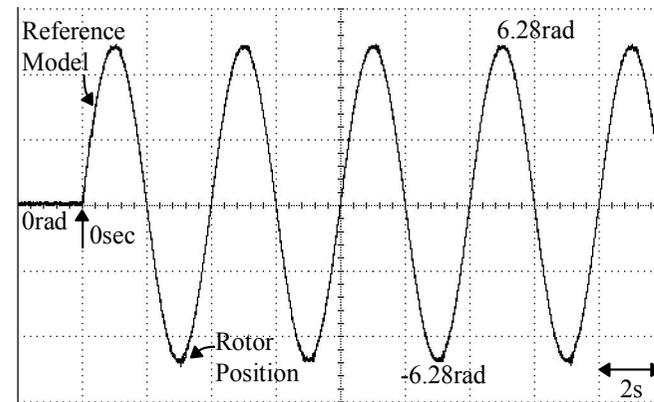


(b)

- 模糊與類神經網路控制器之實測結果(加載): (a)週期步階命令; (b)週期旋波命令

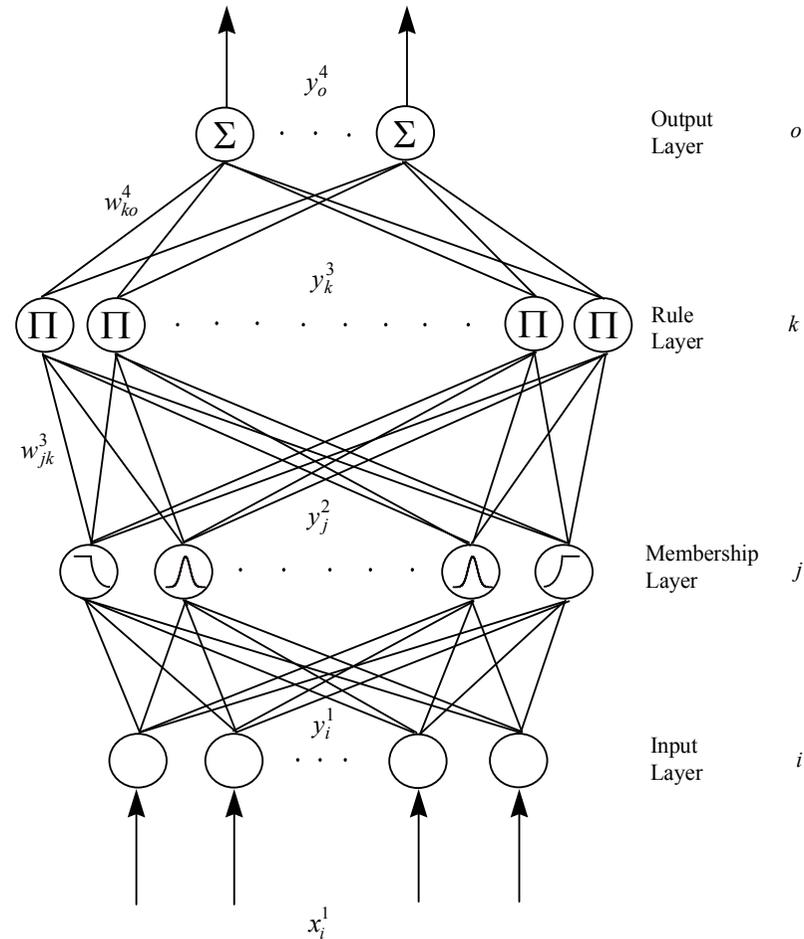


(a)



(b)

- 一般型式的四層模糊類神經網路如圖 13.1 所示，這個網路是由輸入層 (Input Layer)、歸屬函數層 (Membership Layer)、規則層 (Rule Layer) 及輸出層 (Output Layer) 所組成。



□ 第一層：輸入層

$$net_i^1 = x_i^1, \quad y_i^1 = f_i^1(net_i^1) = net_i^1 \quad (13.1)$$

□ 第二層：歸屬函數層

$$net_j^2 = -\frac{(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^2}, \quad y_j^2 = f_j^2(net_j^2) = \exp(net_j^2) \quad (13.2)$$

□ 第三層：規則層

$$net_k^3 = \prod_j w_{jk}^3 x_j^3, \quad y_k^3 = f_k^3(net_k^3) = net_k^3 \quad (13.3)$$

□ 第四層：輸出層

$$net_o^4 = \sum_k w_{ko}^4 x_k^4, \quad y_o^4 = f_o^4(net_o^4) = net_o^4 \quad (13.4)$$

- 為了描述使用監督式梯度下降法的模糊類神經網路之線上學習演算法，首先定義一能量函數 E

$$E = \frac{1}{2} (x_{m1} - x_{p1})^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (13.5)$$

其中 x_{m1} 和 x_{p1} 分別代表參考模式輸出與超音波馬達之轉子位置。

- 因為超音波馬達之動態模型並非十分清楚，以致於其系統靈敏度 $\partial x_{p1} / \partial y_o^4$ 很難正確獲得。提出以誤差適應法則 (Delta Adaptation Law) 來近似 (13.6) 中之系統靈敏度，如 (13.15) 所示。

$$\delta_o^4 = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} = \left[-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y_o^4} \right] = \left[-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x_{p1}} \frac{\partial x_{p1}}{\partial y_o^4} \right] \quad (13.6)$$

$$\delta_o^4 \cong (x_{m1} - x_{p1}) + (x_{m2} - x_{p2}) = e + e_c \quad (13.15)$$

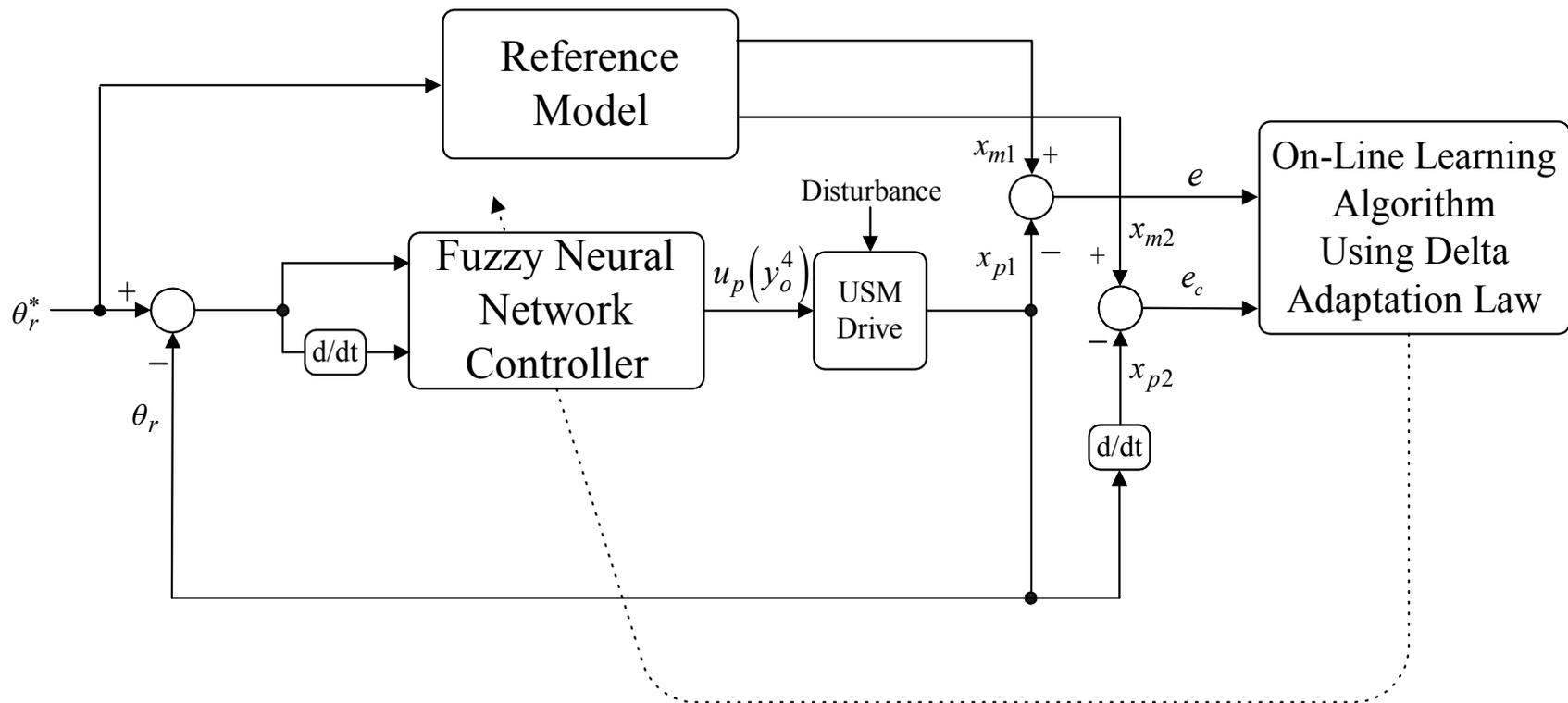
- 選擇模糊類神經網路之學習速率，對於網路之特性具有相當大的影響力。學習速率越小者，則參數調整越緩慢，其收斂較慢；越大者參數調整越激烈，雖然收斂較快，但可能產生震盪導致系統不穩定。
- 為了有效訓練模糊類神經網路，根據離散型 (Discrete-type) 之 Lyapunov 函數推導出適應學習速率 (Adaptive Learning Rate)，確保輸出誤差收斂。

$$\eta_w = \lambda / R_u$$

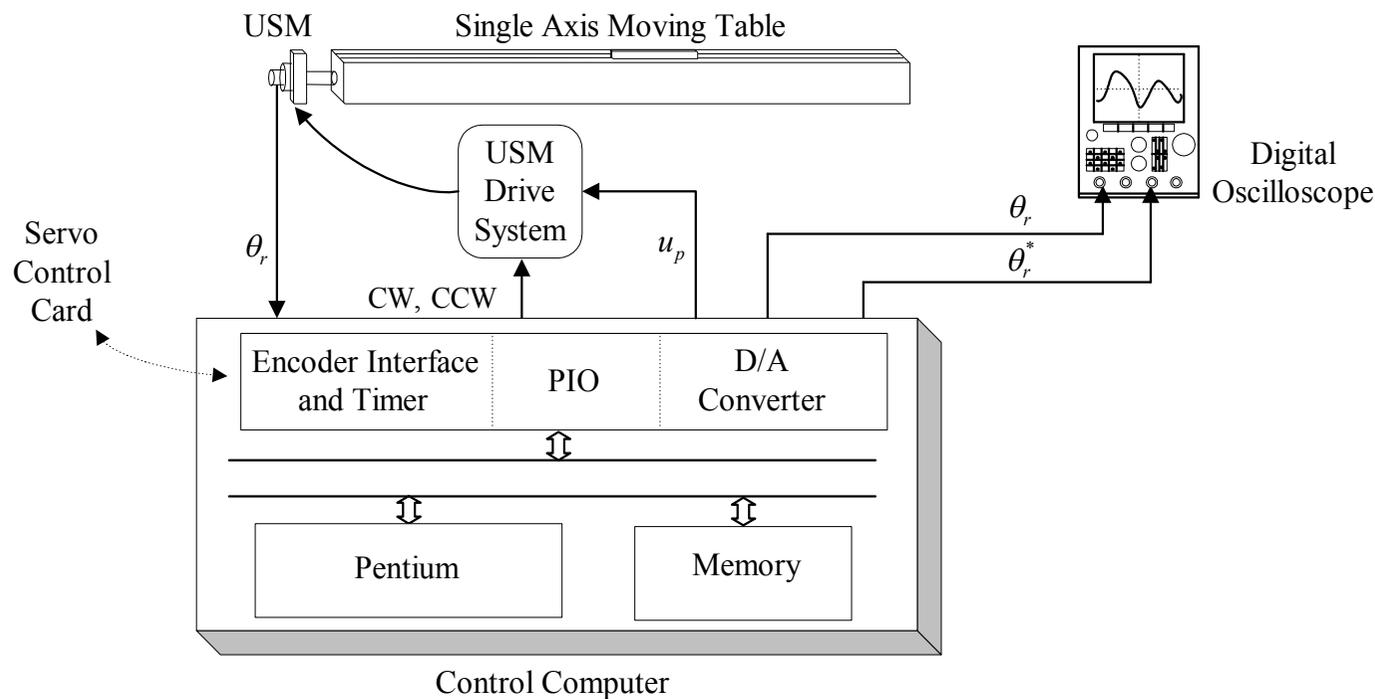
$$\eta_m = \eta_\sigma = \eta_w \left[\left| w_{ko}^4 \right|_{\max} \left(2 / \sigma_{ij \min} \right) \right]^{-2}$$

其中 η_w 為模糊類神經網路鍵結值之學習速率； η_m 和 η_σ 為模糊類神經網路之高斯歸屬函數平均值及標準偏差值的學習速率； R_u 是模糊類神經網路之規則數。

□ 模糊類神經網路位置控制器，如圖 13.2 所示。

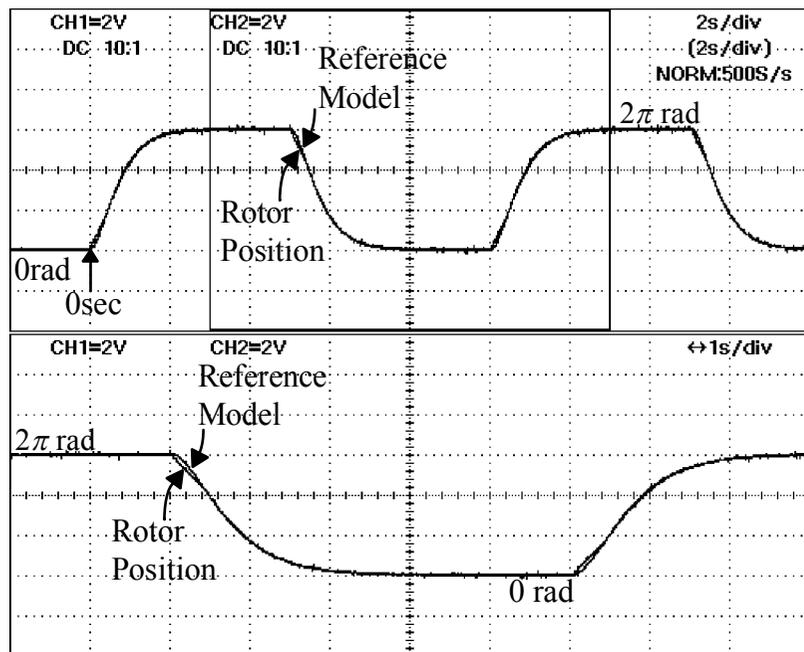


□ 超音波馬達電腦控制系統方塊圖，如圖 13.3 所示。

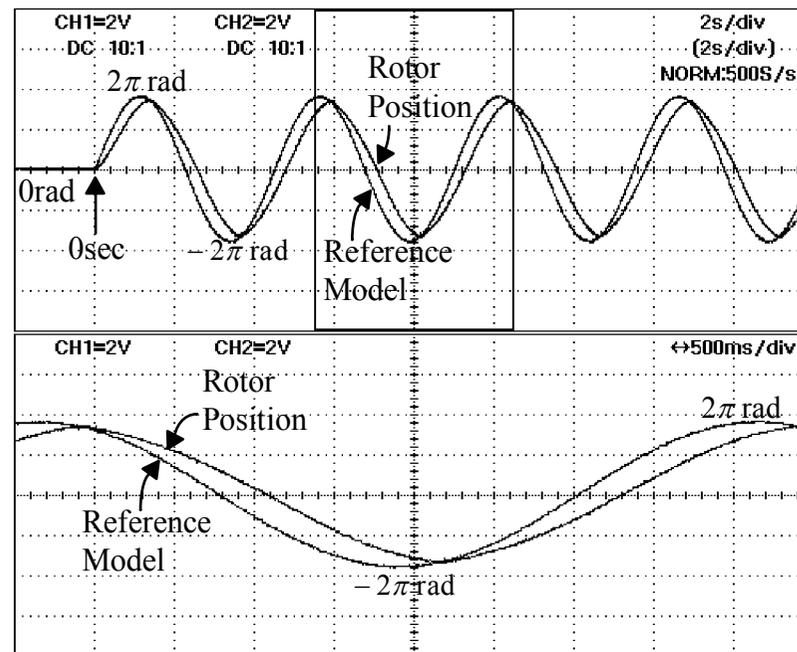


□ 使用推挽式直流轉換器與串聯共振反流器的驅動電路，如第四章所述，來驅動超音波馬達。

- 模糊適應模式追隨位置控制器於未加載情況: (a)步階命令; (b)旋波命令

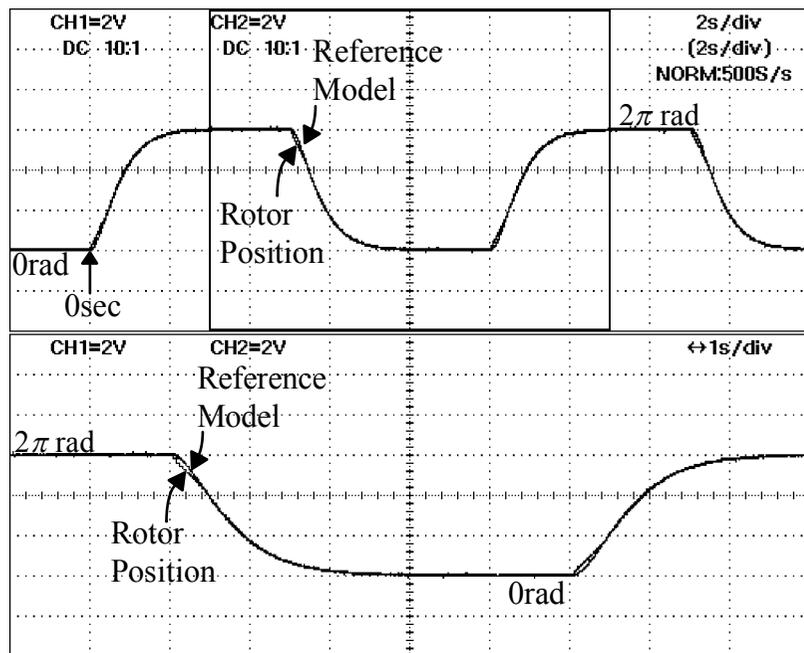


(a)

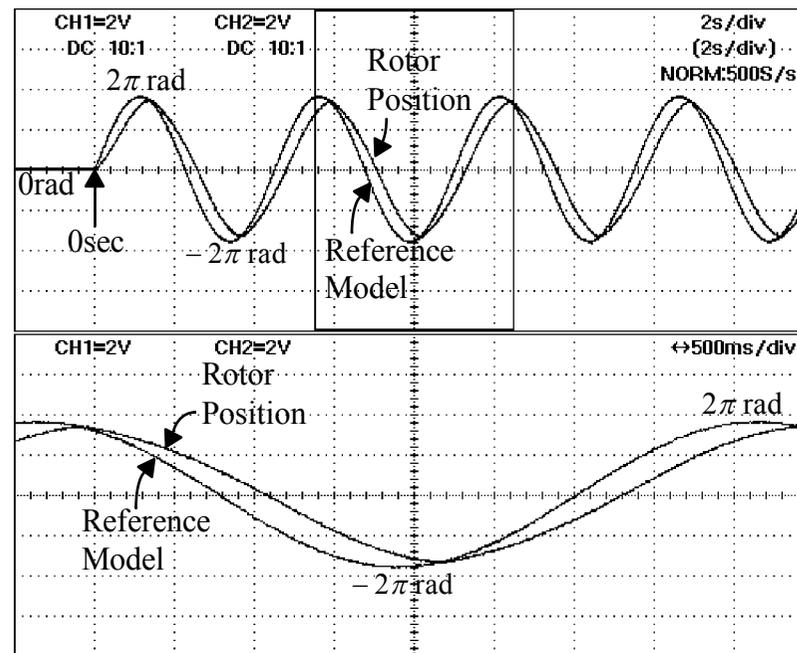


(b)

□ 模糊適應模式追隨位置控制器於加載情況: (a)步階命令; (b)旋波命令

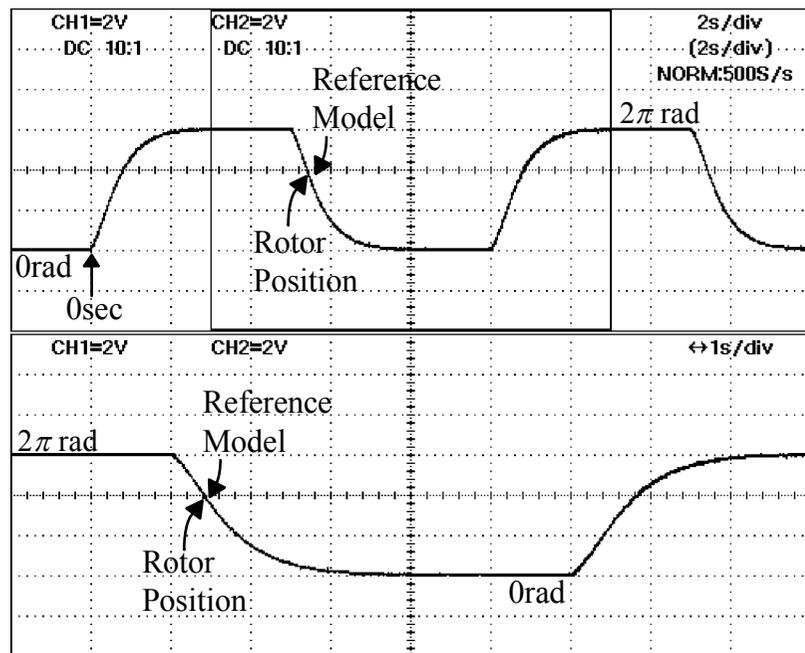


(a)

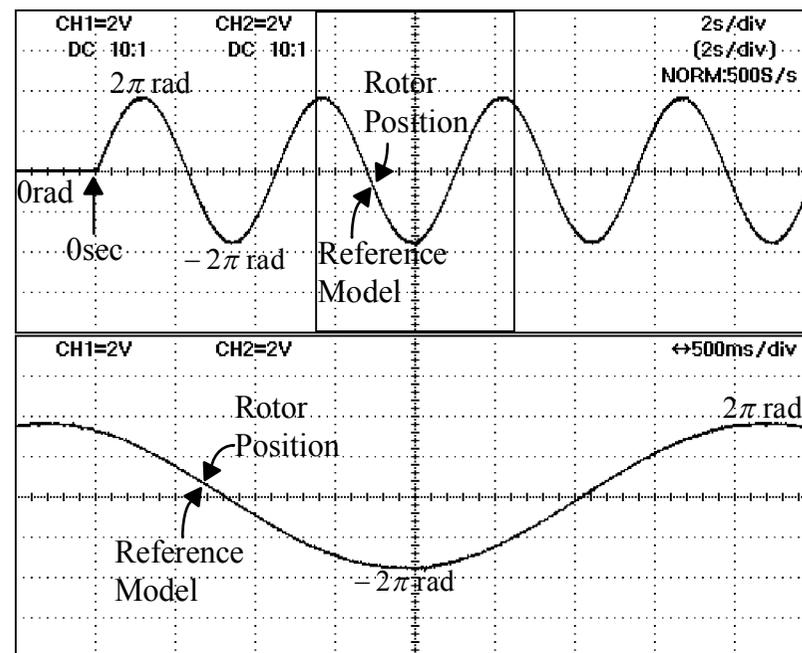


(b)

- 模糊類神經網路位置控制器於未加載情況: (a)步階命令; (b)旋波命令

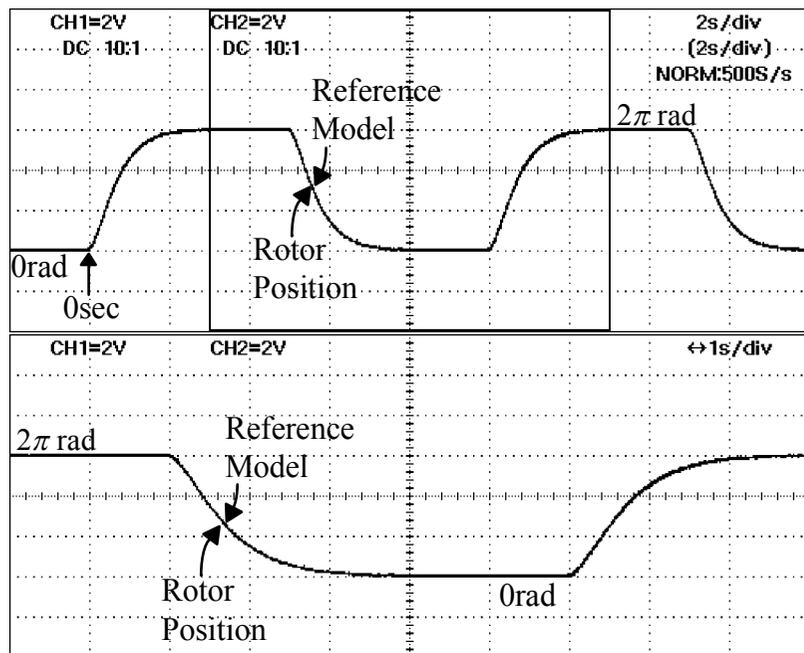


(a)

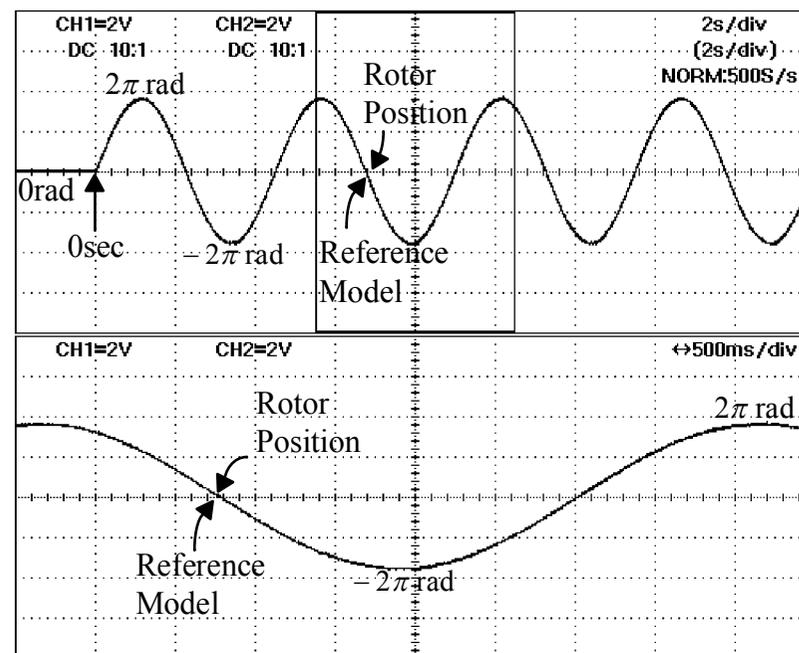


(b)

□ 模糊類神經網路位置控制器於加載情況: (a)步階命令; (b)旋波命令



(a)



(b)