

以 FPGA 為基礎之類神經網路控制
線型超音波馬達驅動系統

*FPGA-Based Neural Networks Control for
Linear Ultrasonic Motor Drive System*

國立中央大學電機工程學系教授
國科會工程處電力學門召集人

林 法 正

E-mail : linfj@ee.ncu.edu.tw

內 容

- 一、緒論
- 二、線型超音波馬達驅動系統
- 三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片
- 四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路線型超音波馬達控制系統
- 五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型超音波馬達控制系統
- 六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型超音波馬達計算力控制系統
- 七、結論與未來研究方向

一、緒論

□ 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定位平台，因此其精密的定位技術將是本論文的研究重點。

一、緒論(續)

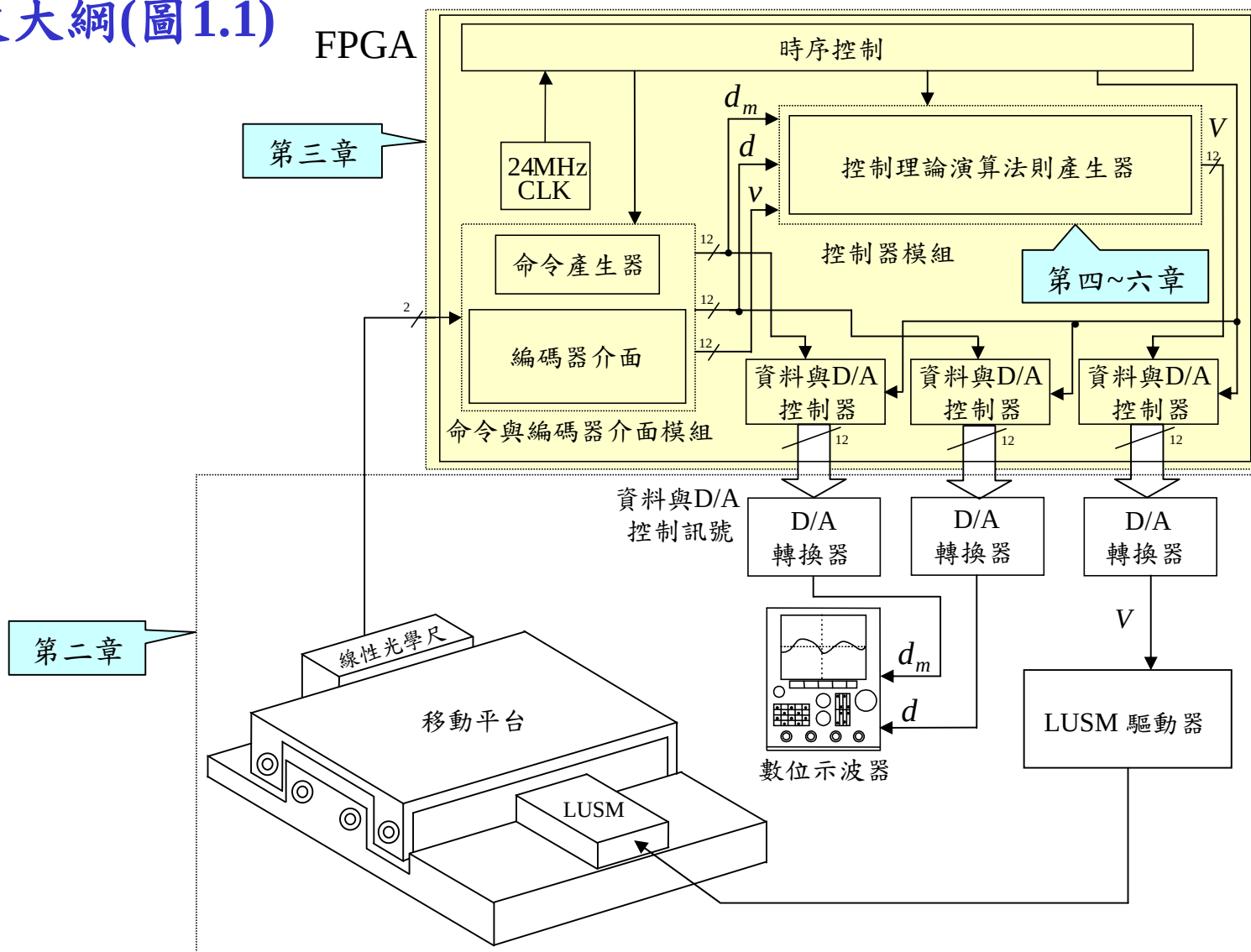
- ✓ 本論文以線型超音波馬達和線性滑軌並搭配相對應之線型超音波馬達驅動器所組成的線型超音波馬達移動平台為研究對象。
- ✓ 在線型超音波馬達移動平台控制系統中，由於線型超音波馬達本身的高度非線性及時變特性，並且在實際應用中系統的參數變化、外來負載干擾和摩擦力等種種的不確定因素，使得一些傳統控制，例如：比例-積分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制，並無法有效的達到良好精密的定位控制。

一、緒論(續)

- ✓ 本論文以小波類神經網路和Elman類神經網路為研究目標，設計了三種不同的智慧型控制器。第一個控制系統是以遞迴式小波類神經網路為主。第二個控制系統是以Elman類神經網路為主。以上兩種控制器同時證明其系統之收斂性。第三個控制系統結合Elman類神經網路、計算力控制器和強健補償控制器，並利用Laypunov穩定理論證明其系統之穩定性。
- ✓ FPGA結合了陣列邏輯閘的結構與可程式邏輯元件的可程式化特性，因此為近年來應用於開發設計數位積體電路的最佳驗證工具。本論文所提出之控制法則將會利用VHDL撰寫，並將之下載到FPGA以驗證之。

一、緒論(續)

□ 論文大綱(圖1.1)



二、線型超音波馬達驅動系統

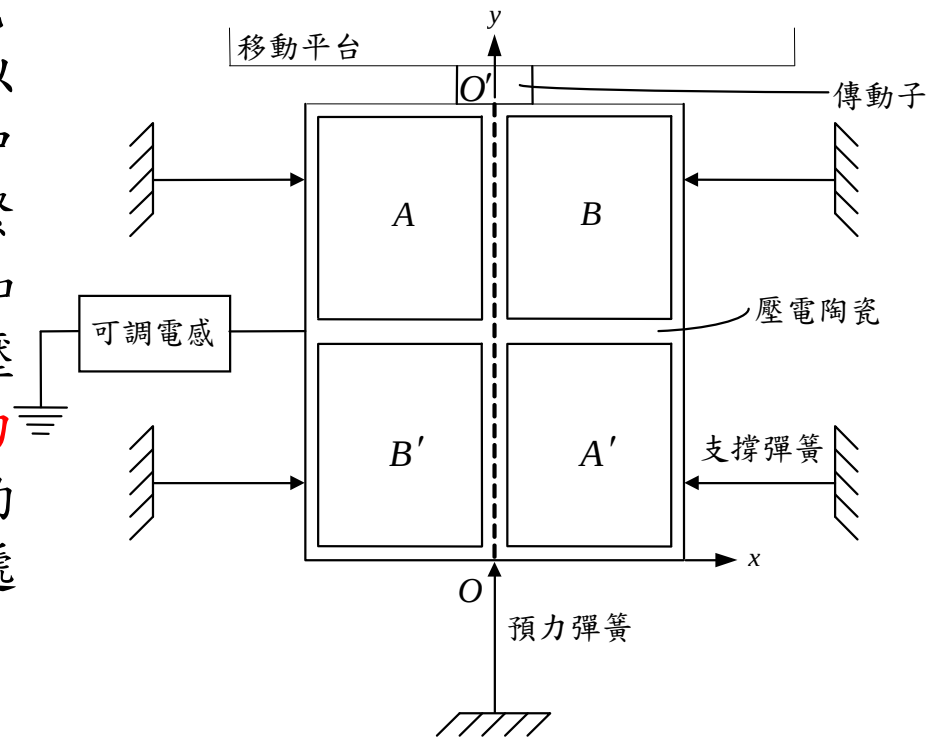
□ 超音波馬達特性

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、線型超音波馬達驅動系統(續)

□ 線型超音波馬達工作原理

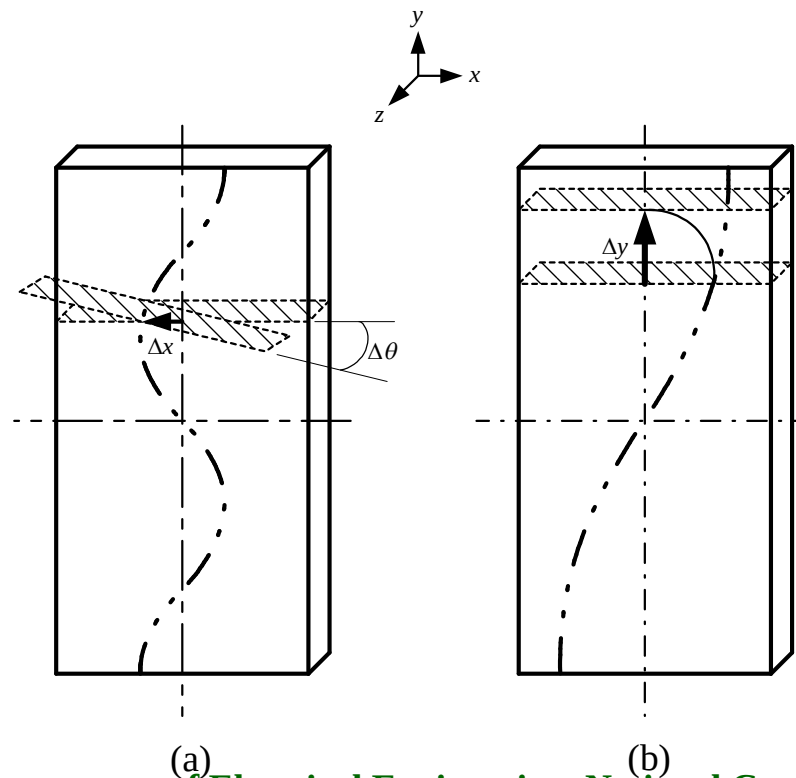
- ✓ 線型超音波馬達是由四個**薄平板**架構而成，如圖2.1所示。線型超音波馬達的運動是受限於四個高彈性係數之**支撐彈簧**，這些彈簧沿著馬達的長邊連接在壓電陶瓷上。相當硬的一個**陶瓷傳動子**以黏著劑接合在壓電陶瓷短邊的中間，而另一個短邊的中間有一緊壓在壓電陶瓷上之**預力彈簧**。如此一來，預力彈簧便可提供一壓力在傳動子和平台之間，**摩擦力**便會產生在平台和傳動子之間的表面，而傳動子即可將力量傳遞至平台並使之移動。



二、線型超音波馬達驅動系統(續)

□ 線型超音波馬達之共振模式示意圖

- ✓ 線型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、線型超音波馬達驅動系統(續)

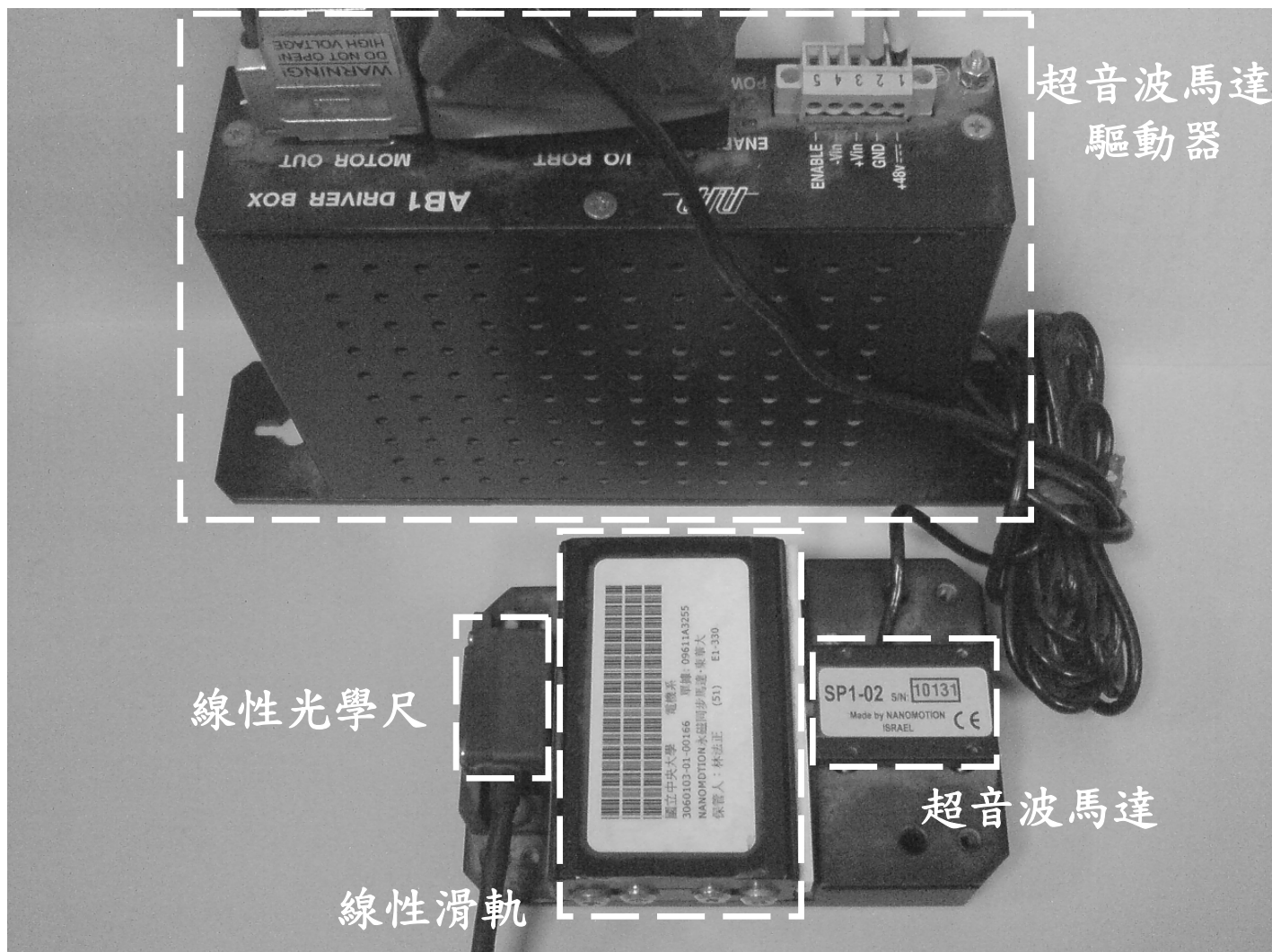
□ 線型超音波馬達動態示意圖



此動畫由NANOMOTION網站擷取

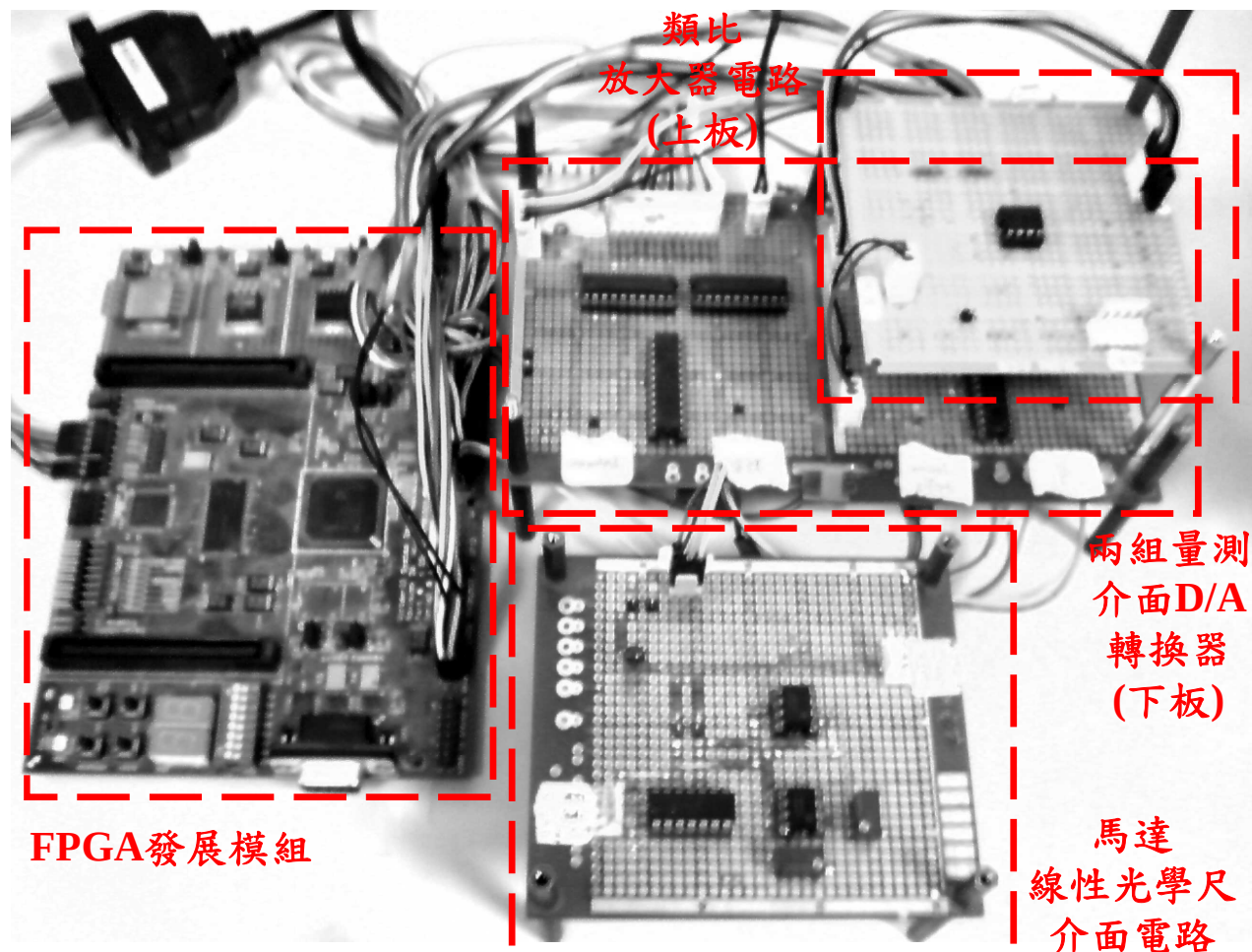
二、線型超音波馬達驅動系統(續)

□ 線型超音波馬達移動平台實體圖(圖2.5)



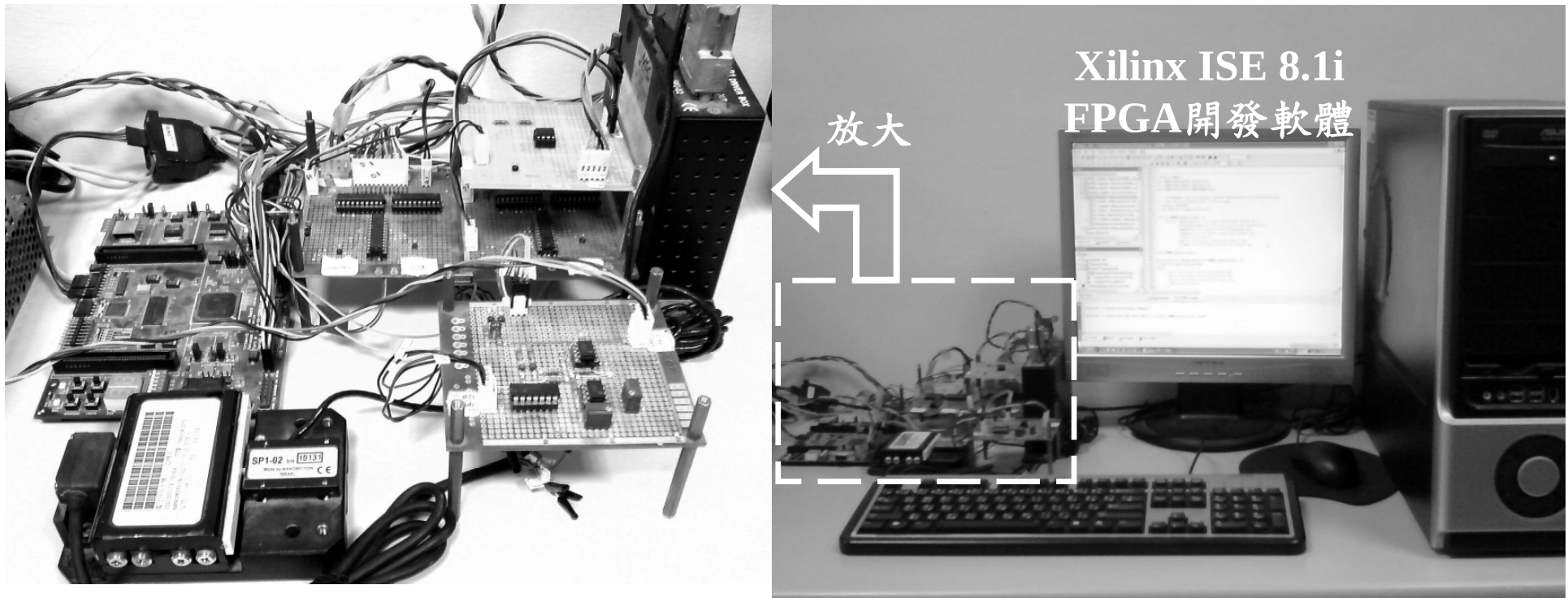
二、線型超音波馬達驅動系統(續)

□ FPGA發展模組、D/A轉換器、類比放大器電路與馬達線性光學尺介面電路之實體圖(圖2.9)



二、線型超音波馬達驅動系統(續)

□ 以FPGA為基礎之線型超音波馬達驅動系統之實體圖(圖2.10)



三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片

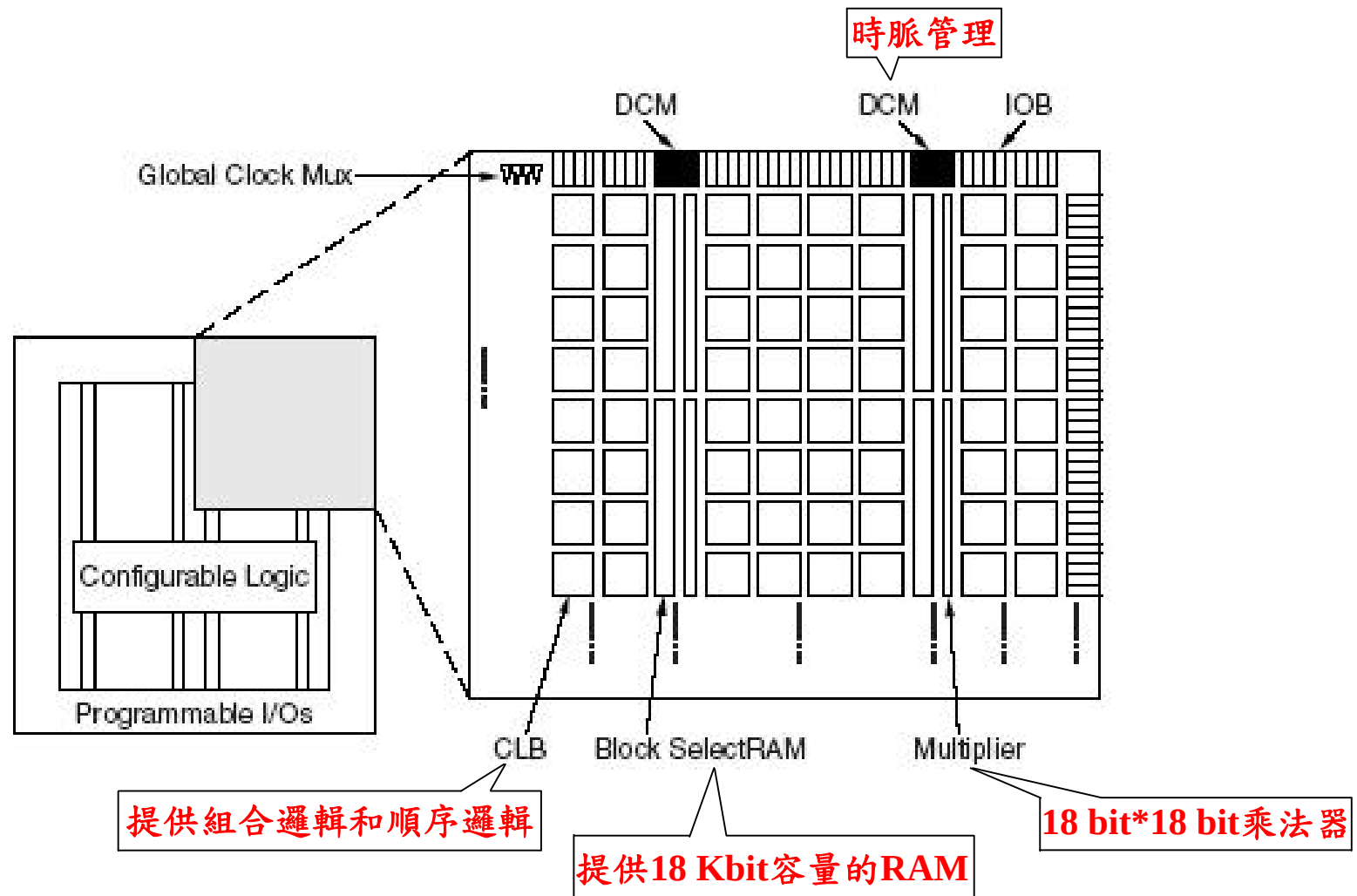
❖ FPGA之簡介

❑ Virtex-II系列之規格表(表3.1)

Device	System Gates	CLB (1 CLB = 4 slices = Max 128 bits)			Multiplier Blocks	SelectRAM Blocks		DCMs	Max I/O Pads ⁽¹⁾
		Array Row x Col.	Slices	Maximum Distributed RAM Kbits		18 Kbit Blocks	Max RAM (Kbits)		
XC2V40	40K	8 x 8	256	8	4	4	72	4	88
XC2V80	80K	16 x 8	512	16	8	8	144	4	120
XC2V250	250K	24 x 16	1,536	48	24	24	432	8	200
XC2V500	500K	32 x 24	3,072	96	32	32	576	8	264
XC2V1000	1M	40 x 32	5,120	160	40	40	720	8	432
XC2V1500	1.5M	48 x 40	7,680	240	48	48	864	8	528
XC2V2000	2M	56 x 48	10,752	336	56	56	1,008	8	624
XC2V3000	3M	64 x 56	14,336	448	96	96	1,728	12	720
XC2V4000	4M	80 x 72	23,040	720	120	120	2,160	12	912
XC2V6000	6M	96 x 88	33,792	1,056	144	144	2,592	12	1,104
XC2V8000	8M	112 x 104	46,592	1,456	168	168	3,024	12	1,108

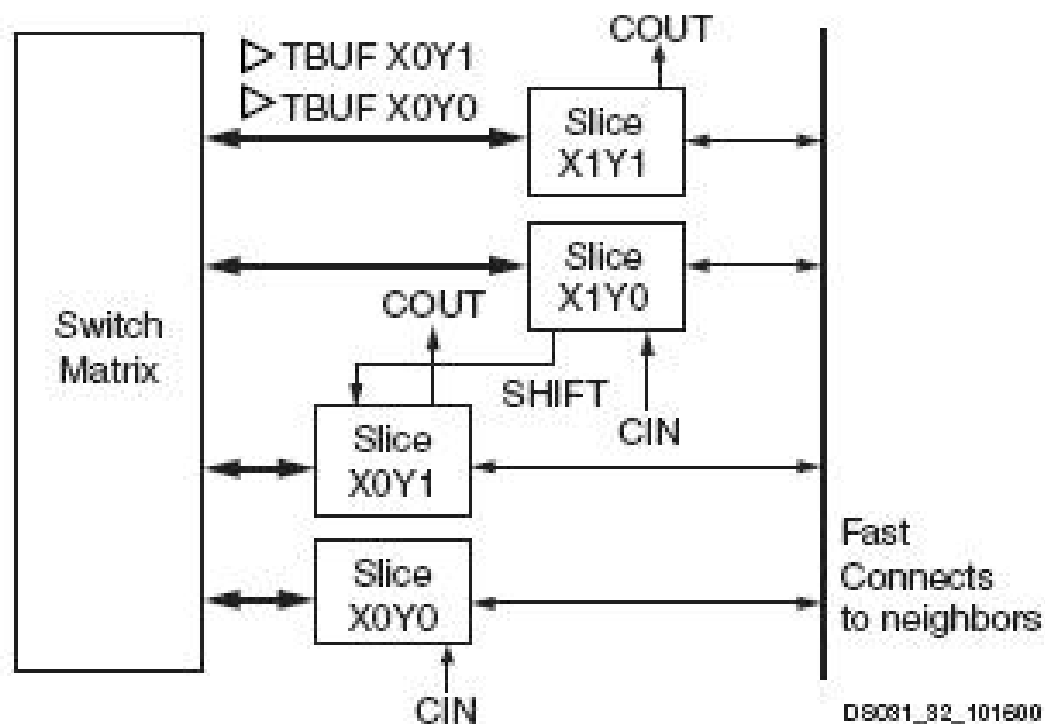
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

□ Virtex-II 內部結構(圖3.3)



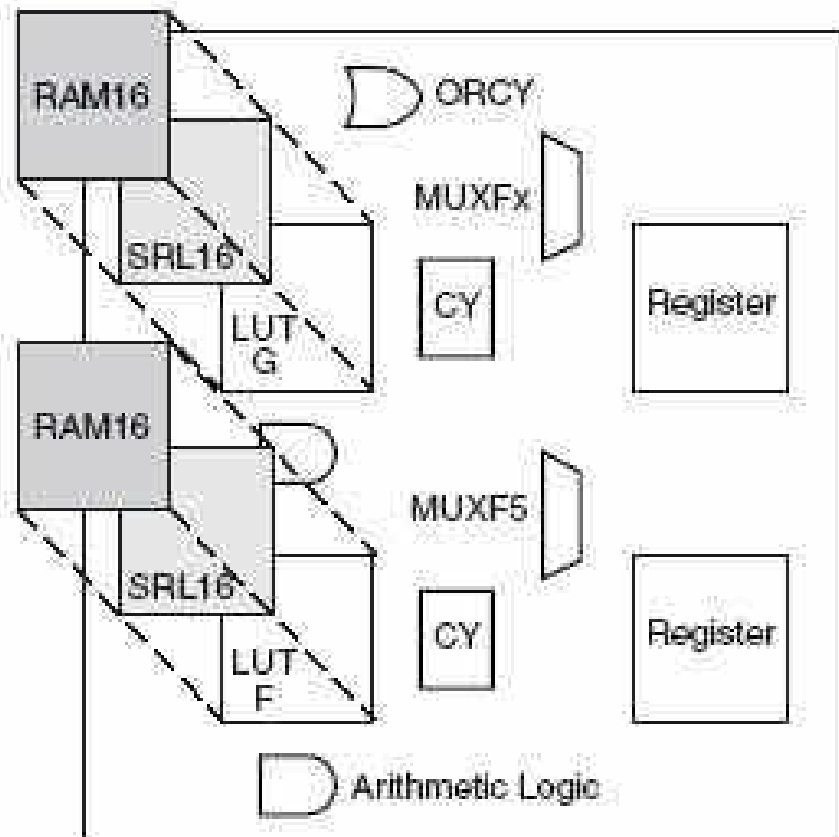
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

- ✓ 每個CLB(圖3.4)包含4個Slices和2個3-State Buffers，且每個CLB會銜接一個可程式繞線開關陣列。



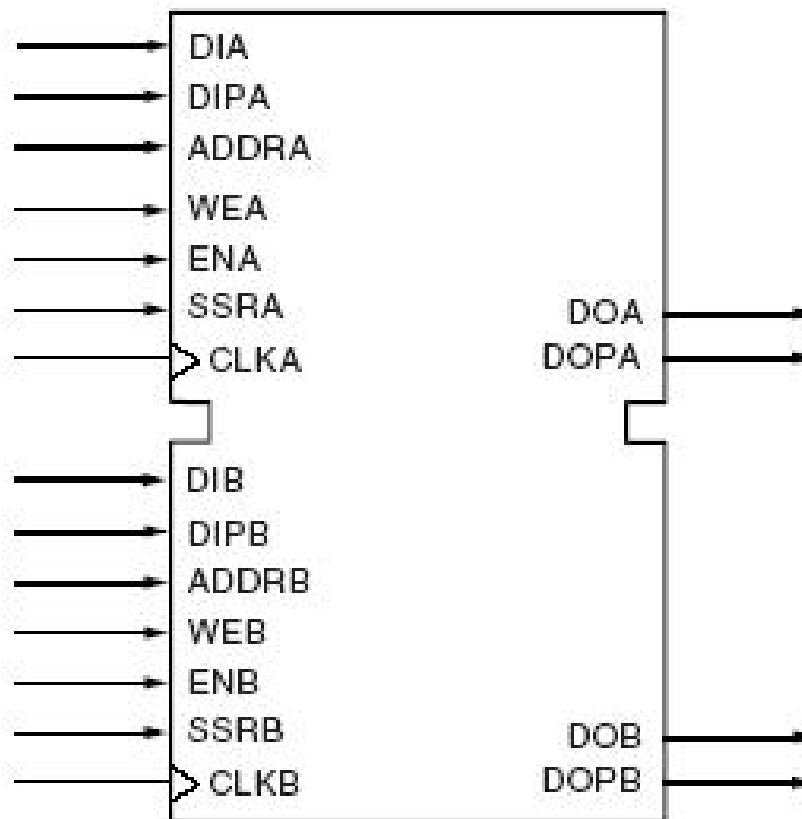
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

- ✓ 每個Slice(圖3.5)由2個函數產生器、算數邏輯閘、運送邏輯、多工器、或閘以及2個暫存器所構成。



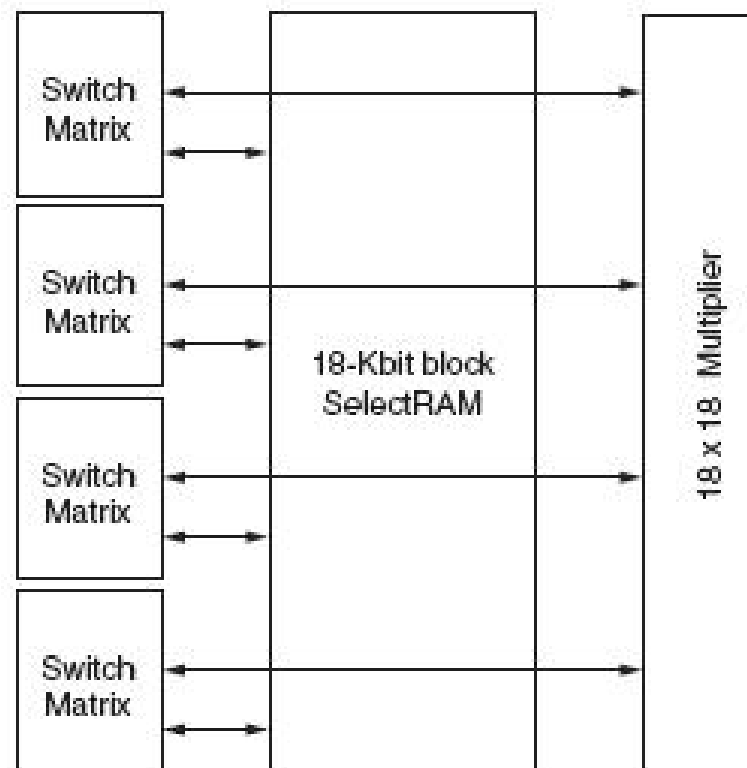
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

- ✓ SelectRAM(圖3.6)可與CLB相配使用，每個為18Kbit容量，本文所使用FPGA晶片內部共有40個SelectRAM。



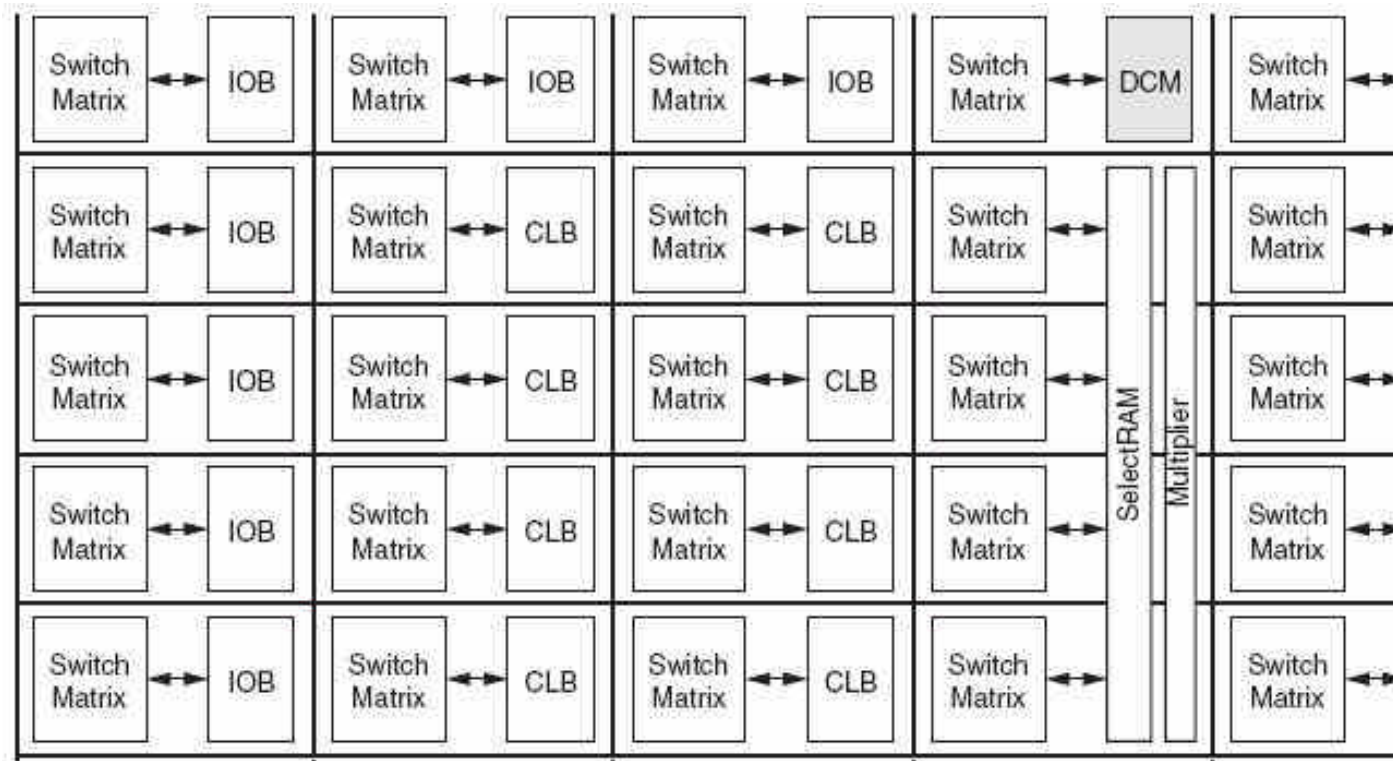
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

- ✓ 每個Multiplier為18bit*18bit之二補數有號數，且可以單獨使用或是與SelectRAM搭配使用。每個Multiplier和SelectRAM是與4個開關陣列聯繫在一起(圖3.7)。



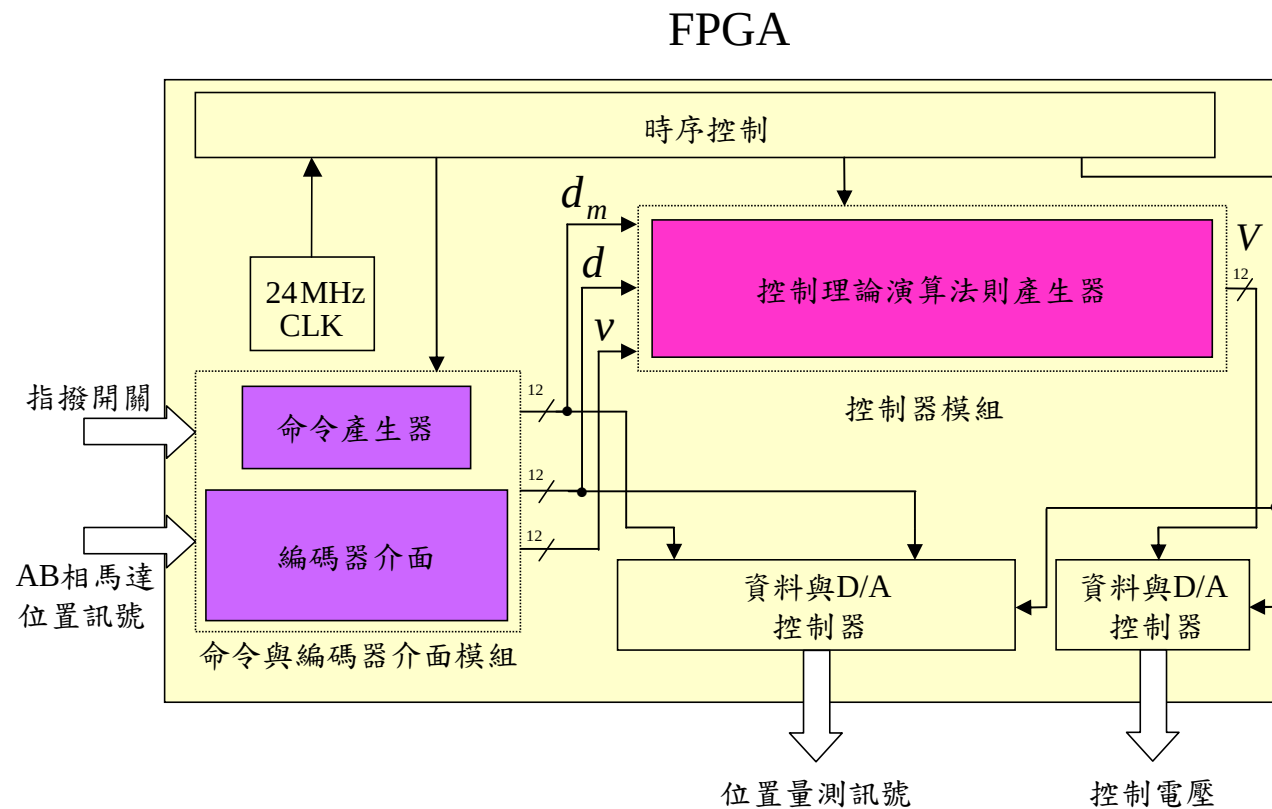
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

- ✓ 在Virtex-II裡，透過繞線資源以及開關矩陣可以將內部所有元件互相聯繫在一起(圖3.8)。



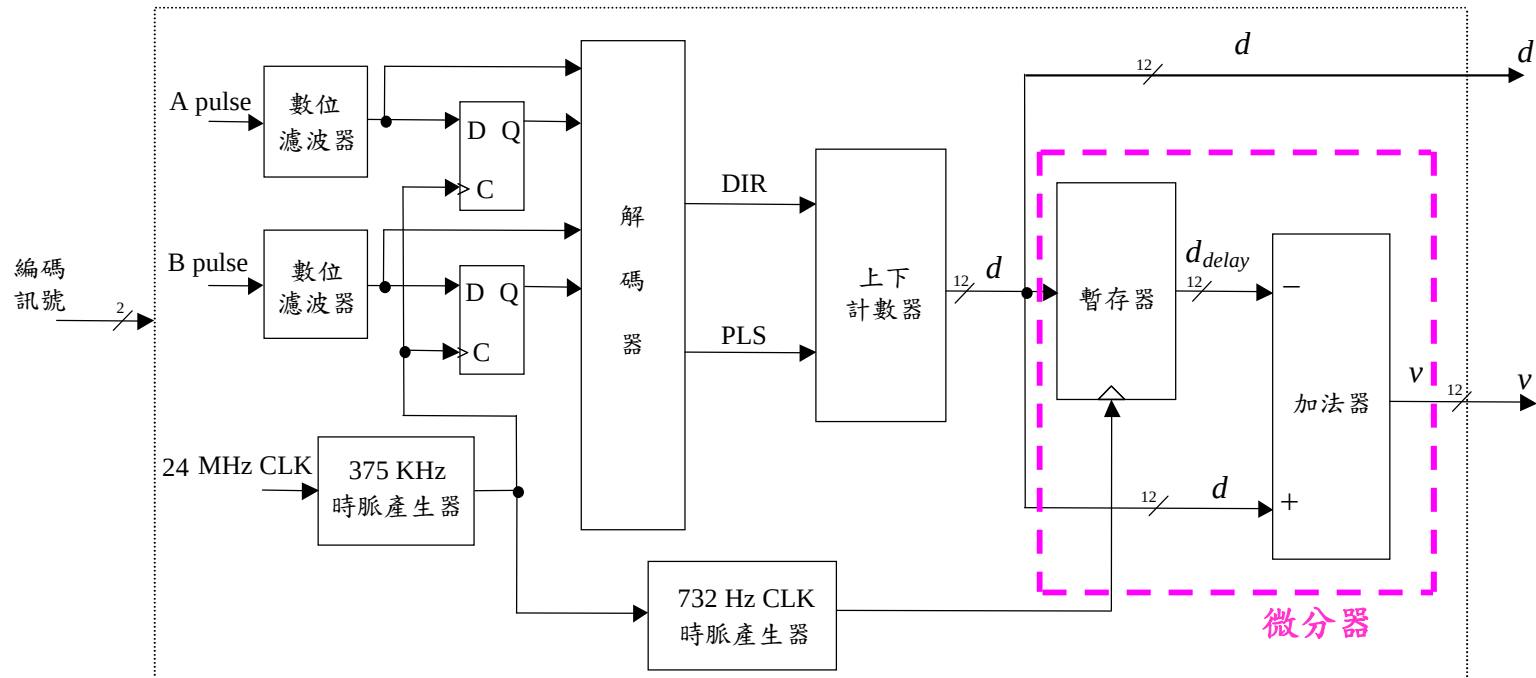
三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

□ FPGA控制晶片設計架構圖 (圖3.9)



三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

✓ 位置與速度編碼器方塊圖(圖3.10)



✓ 系統規格

1、編碼器：1mm = 1000(數位值)

2、電壓規格：1V = 409(數位值)

三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

✓ 命令產生器

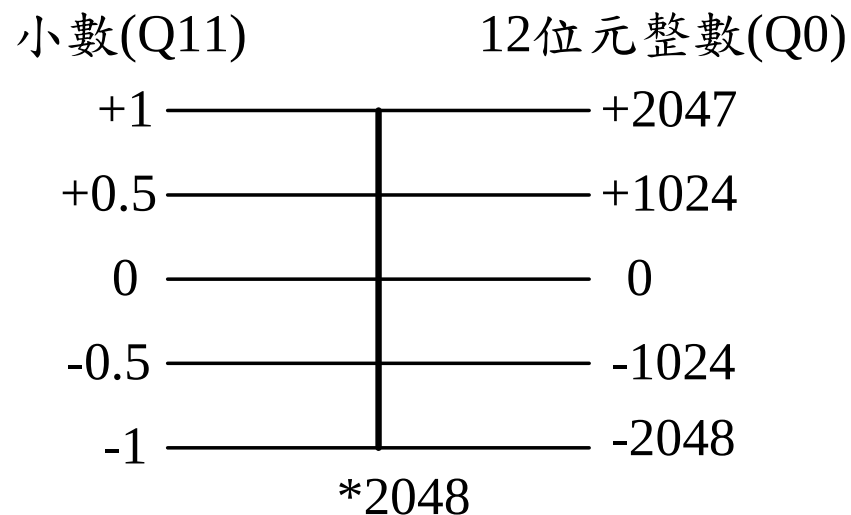
- 弦波：內建IP，週期為5.6秒，峰對峰值為-1~1mm。
- 梯形波：週期為5秒，上升下降時間各為1.5秒，高度為1mm。

三、以FPGA為基礎之線型超音波馬達控制晶片(續)

✓ 資料與D/A控制器

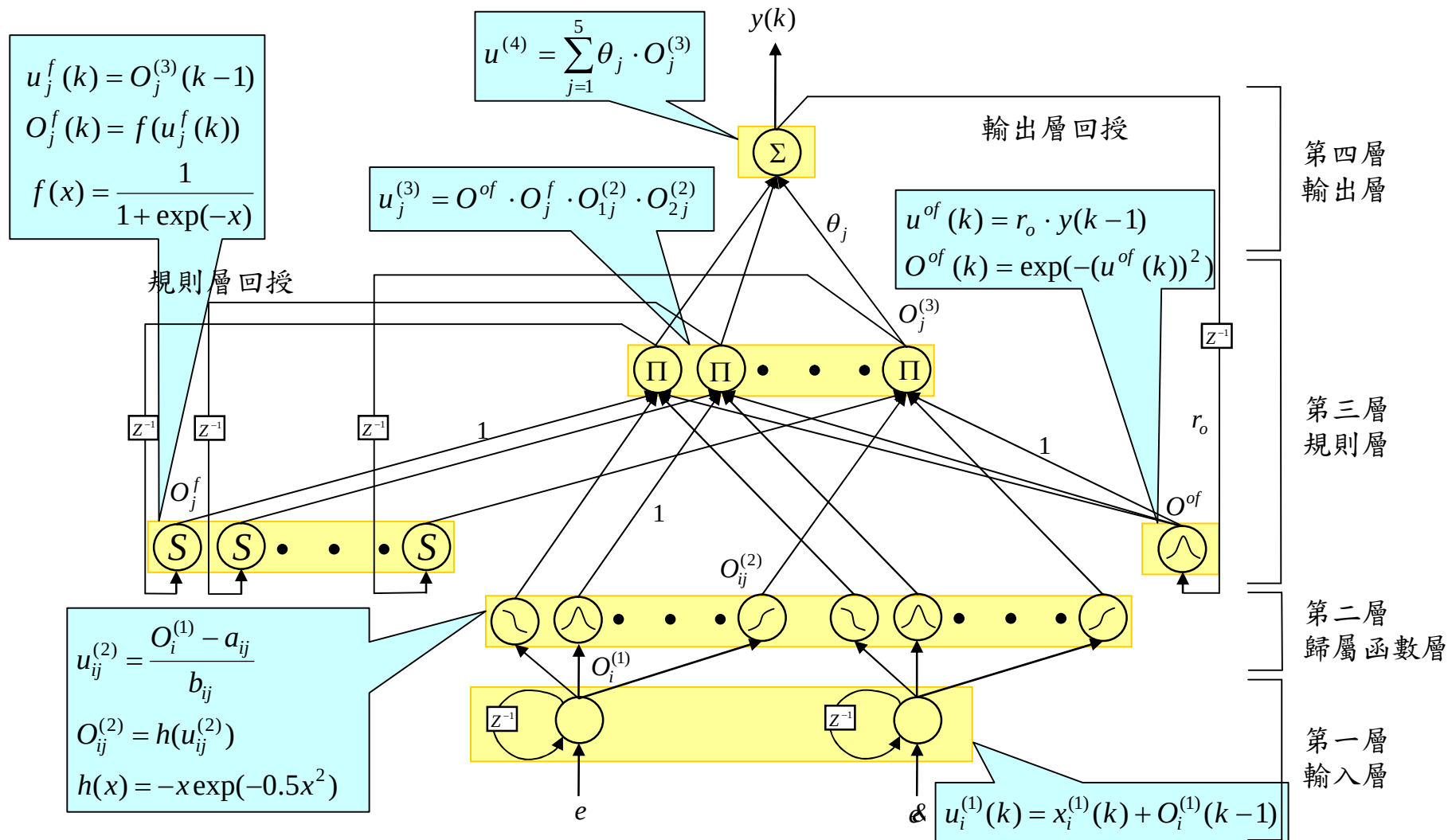
使用的D/A晶片型號為DA7237，規格為0~4095(數位值)對應到-5~5V(類比值)。

✓ 數值系統，Q值概念，圖3.16說明12位元(Q11)與整數(Q0)間的對應。



四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統

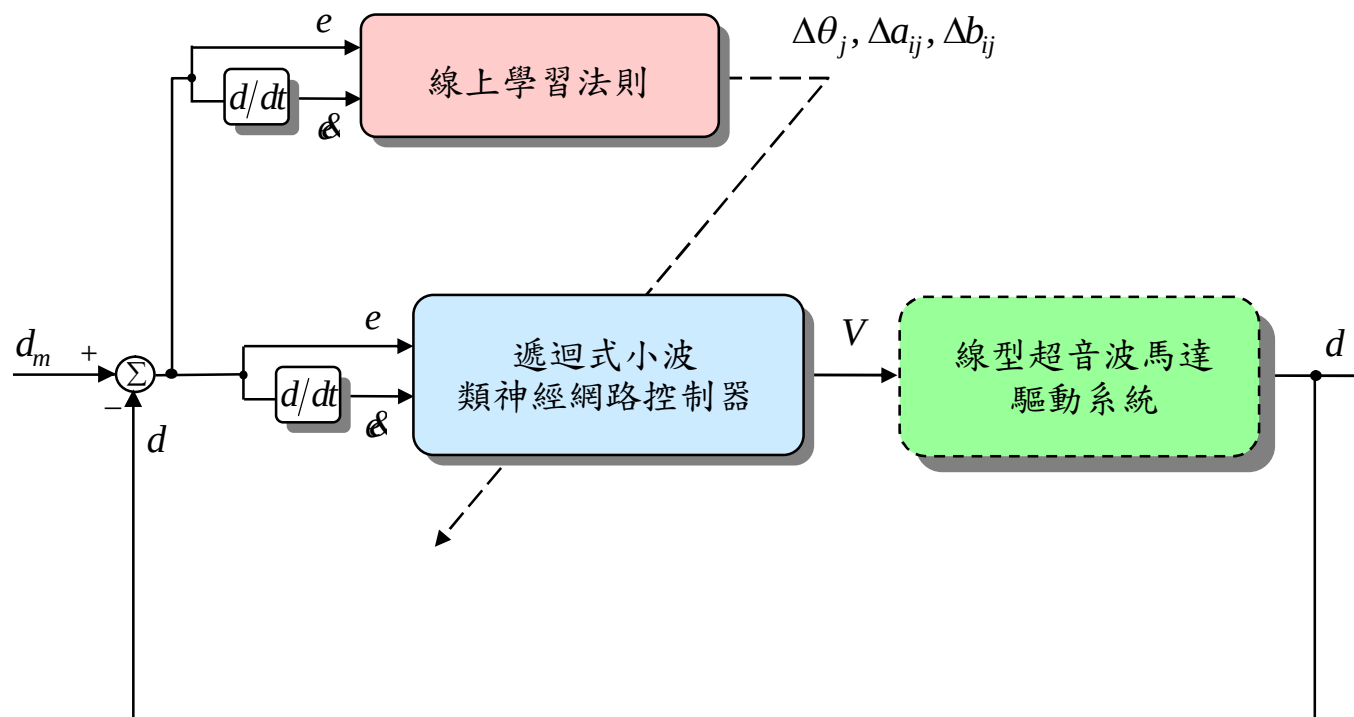
□ 遞迴式小波類神經網路架構圖(圖4.1)





四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

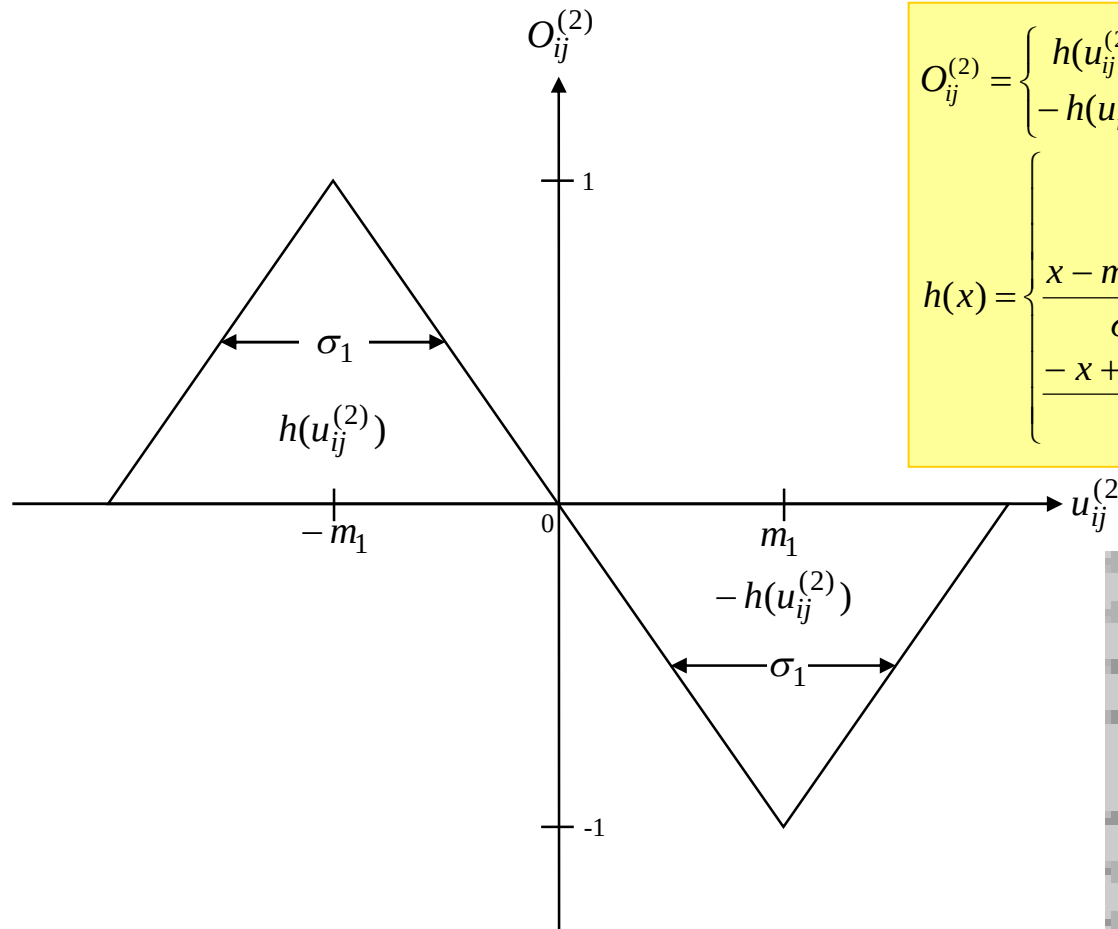
□ 遞迴式小波類神經網路線型超音波馬達控制系統方塊圖(圖4.2)



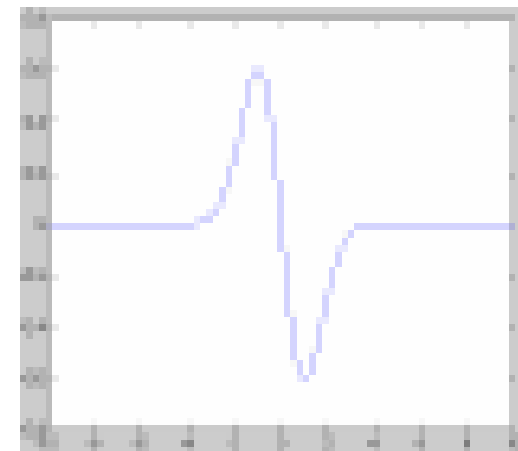


四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 遞迴式小波類神經網路函數近似圖(圖4.3)



$$O_{ij}^{(2)} = \begin{cases} h(u_{ij}^{(2)}) & \text{if } u_{ij}^{(2)} < 0 \\ -h(u_{ij}^{(2)}) & \text{if } u_{ij}^{(2)} > 0 \end{cases}$$
$$h(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \geq m_1 + \sigma_1, \\ & x \leq m_1 - \sigma_1 \\ \frac{x - m_1 + \sigma_1}{\sigma_1} & \text{if } m_1 - \sigma_1 < x \leq m_1 \\ \frac{-x + m_1 + \sigma_1}{\sigma_1} & \text{if } m_1 < x \leq m_1 + \sigma_1 \end{cases}$$

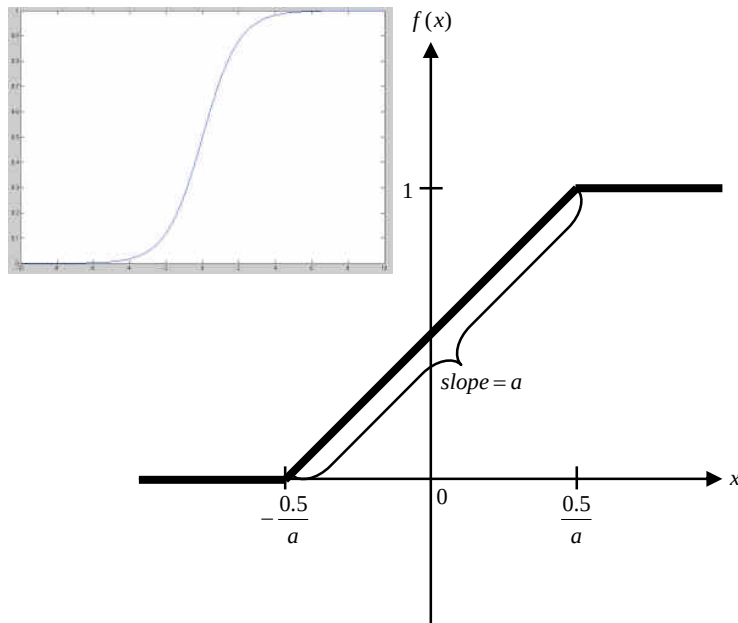


(a) 高斯函數的一階微分之近似



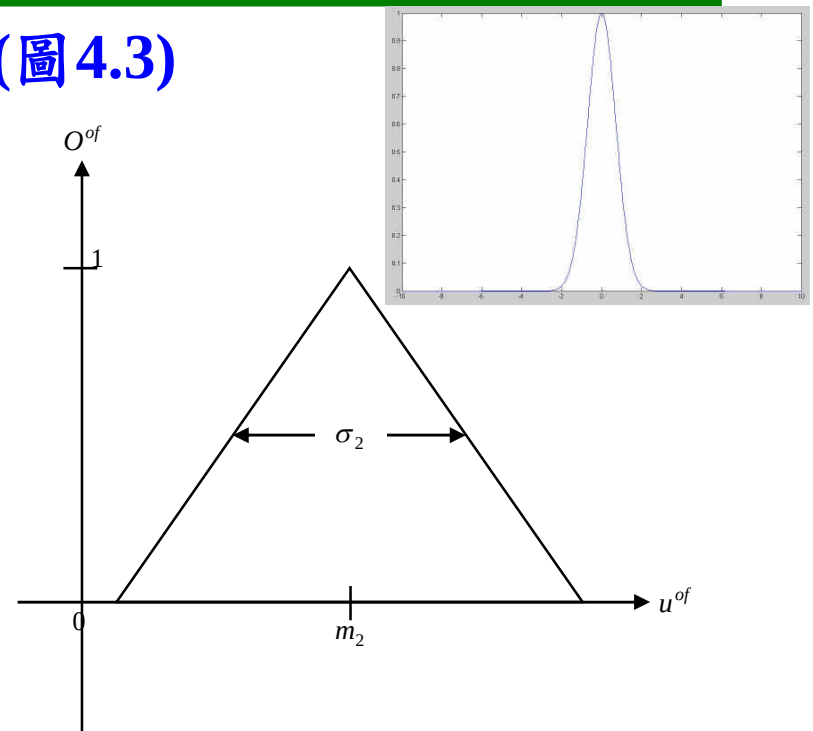
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 遞迴式小波類神經網路函數近似圖(圖4.3)



(b) Sigmoid函數之近似

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0.5/a \\ 0 & \text{if } x < -0.5/a \\ a \times x + 0.5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

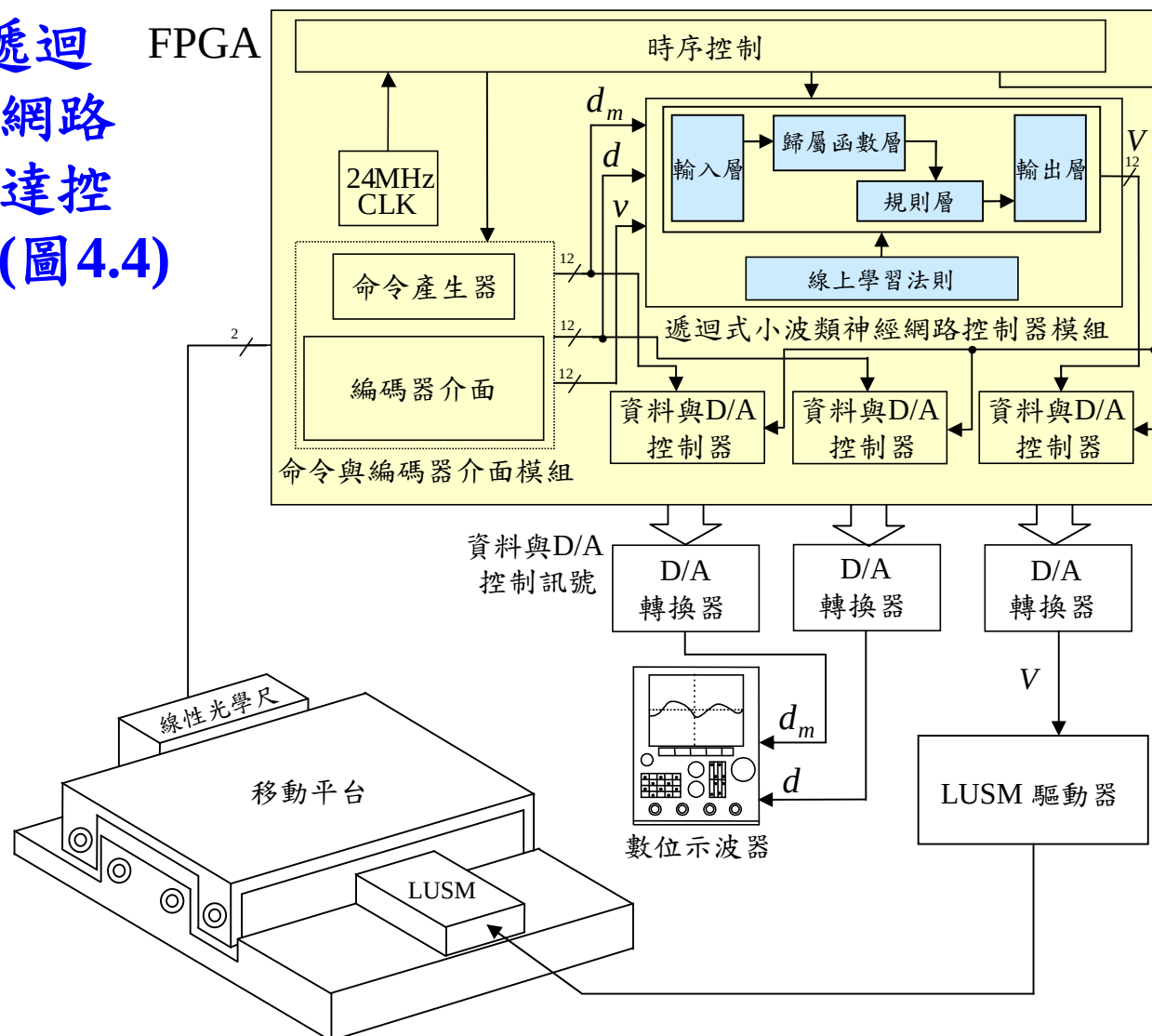


(c) 指數函數之近似

$$O^{of}(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } u^{of}(k) \geq m_2 + \sigma_2, \\ & u^{of}(k) \leq m_2 - \sigma_2 \\ \frac{u^{of}(k) - m_2 + \sigma_2}{\sigma_2} & \text{if } m_2 - \sigma_2 < u^{of}(k) \leq m_2 \\ \frac{-u^{of}(k) + m_2 + \sigma_2}{\sigma_2} & \text{if } m_2 < u^{of}(k) \leq m_2 + \sigma_2 \end{cases}$$

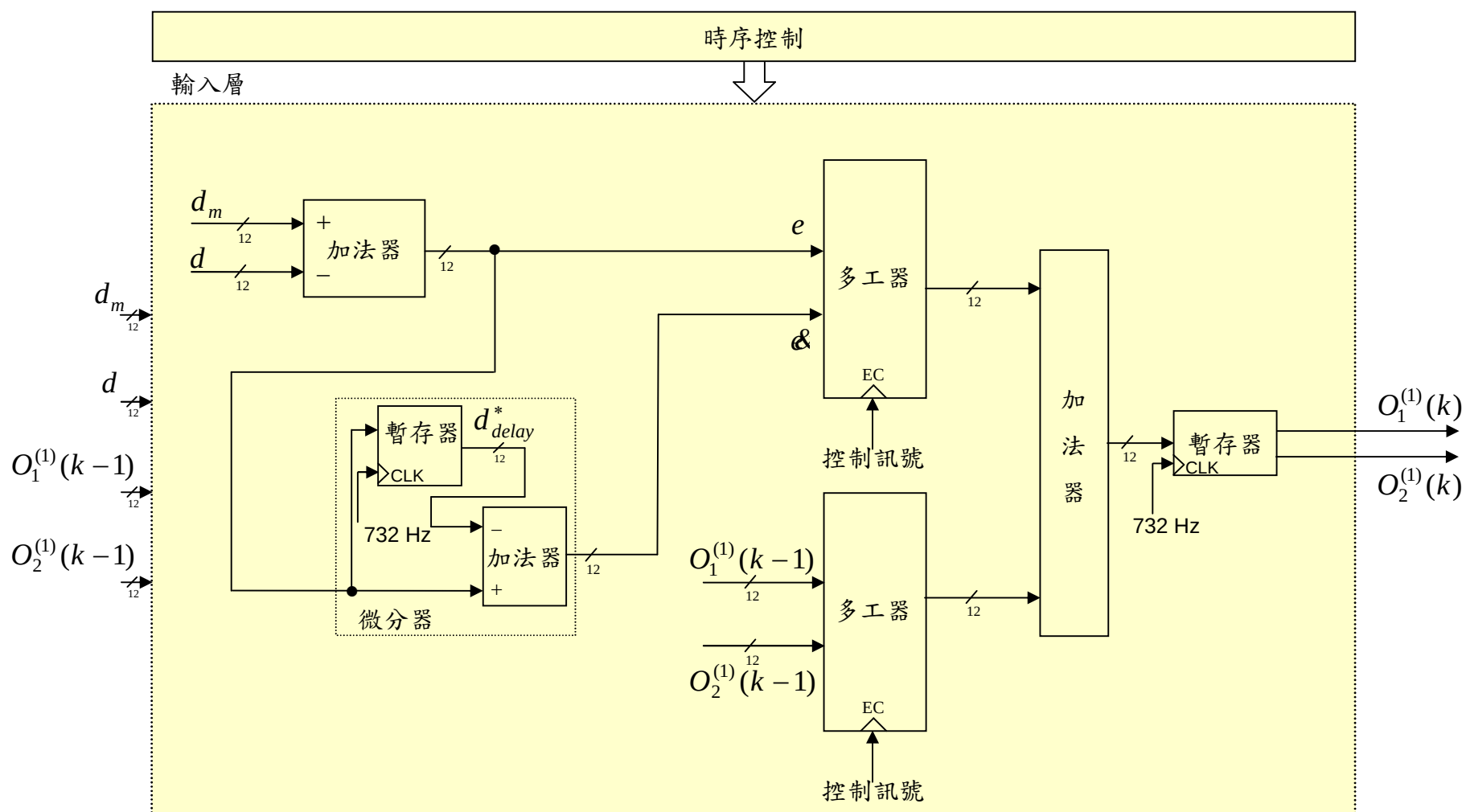
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

- 以FPGA實現遞迴式小波類神經網路
線型超音波馬達控制系統架構圖(圖4.4)



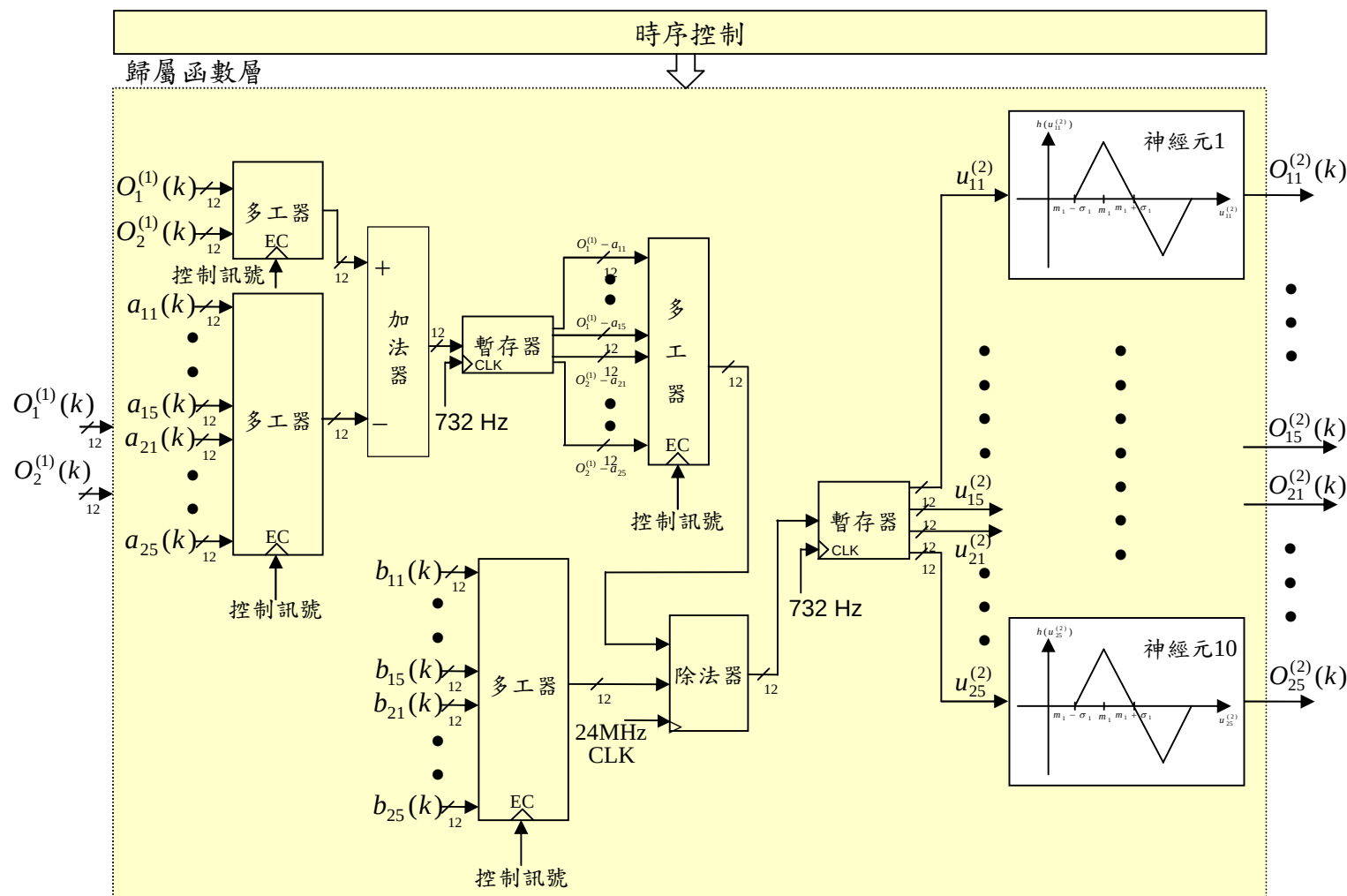
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 輸入層方塊圖



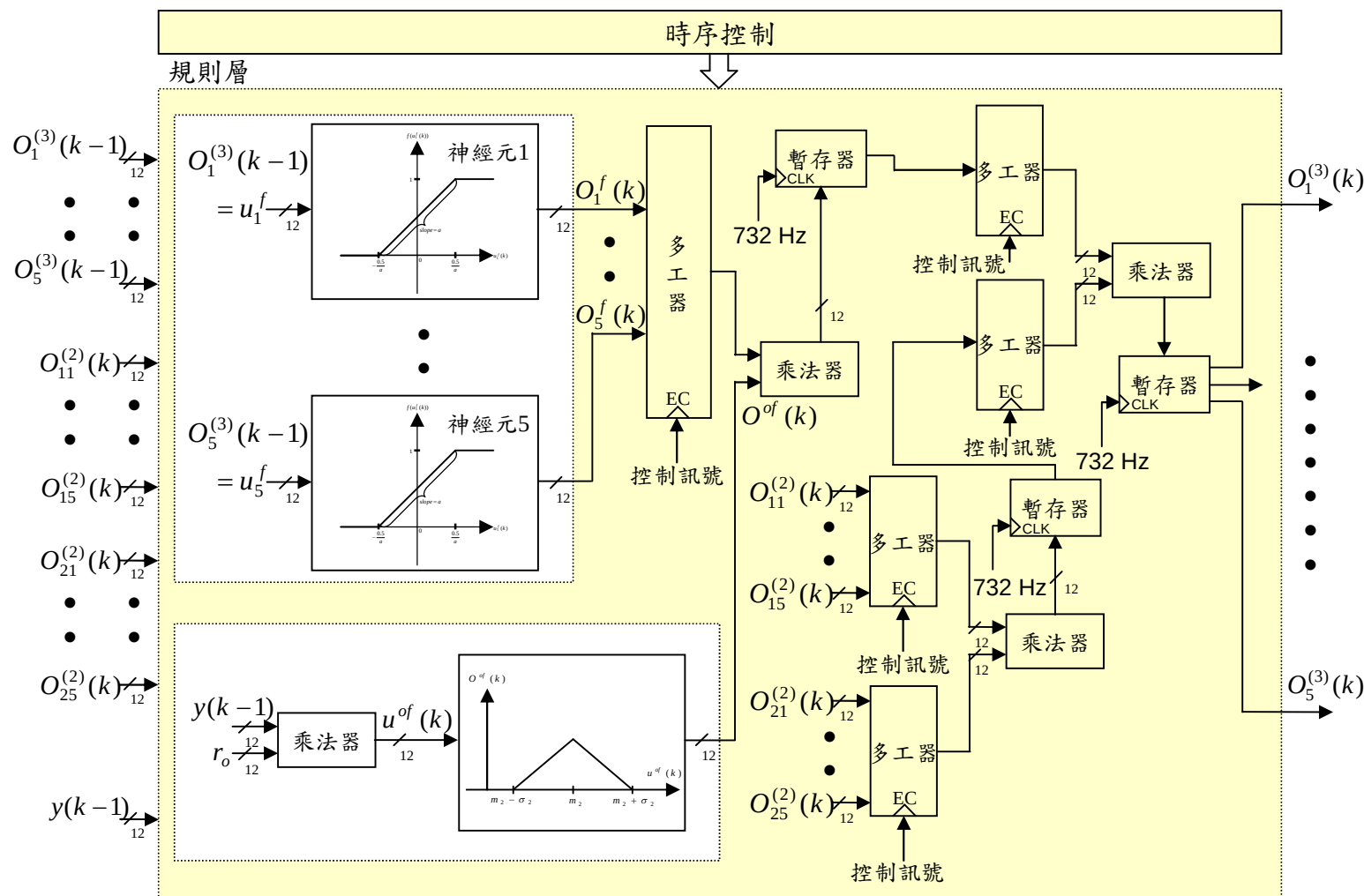
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

歸屬函數層方塊圖



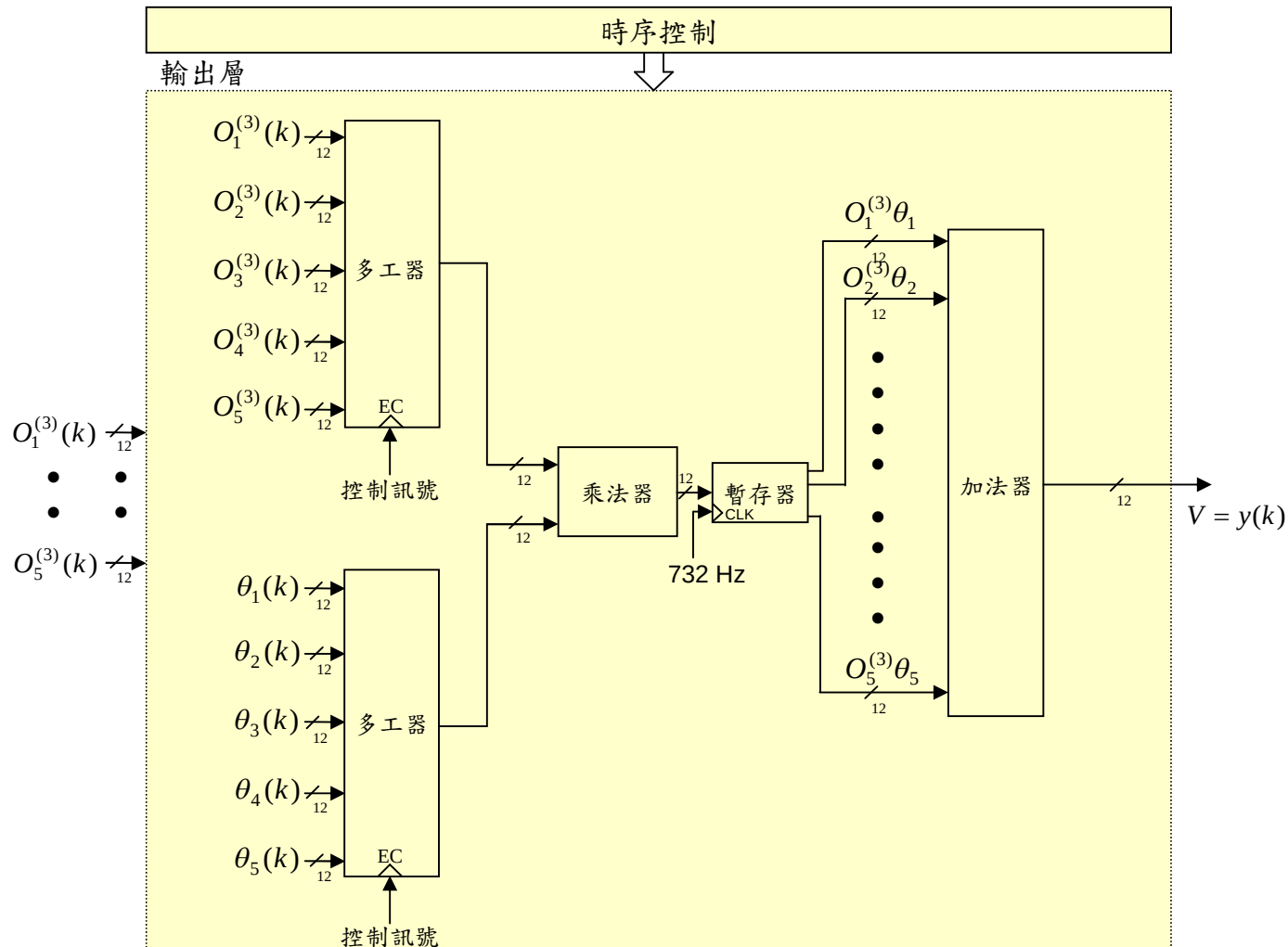
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

規則層方塊圖



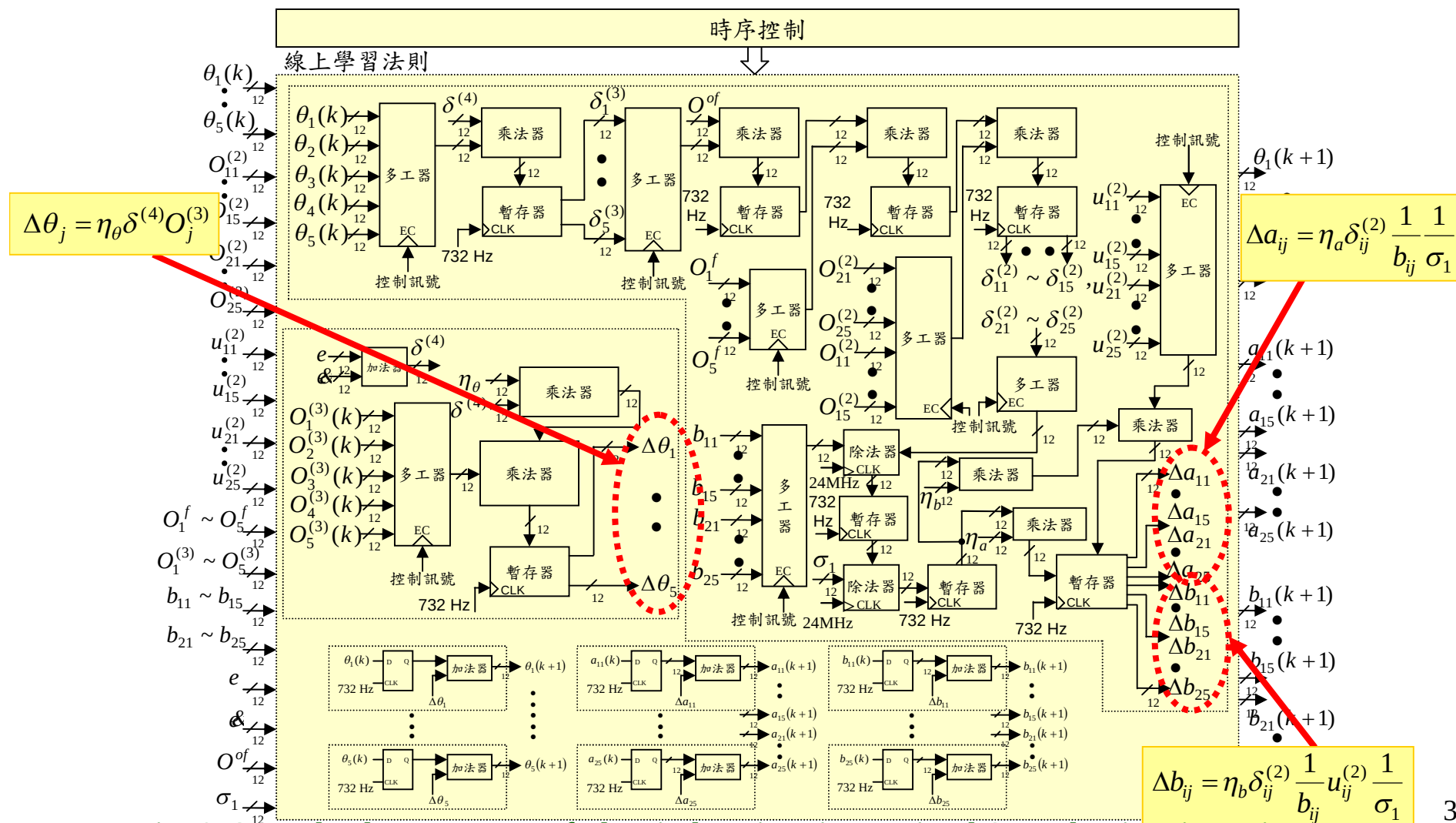
四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 輸出層方塊圖



四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

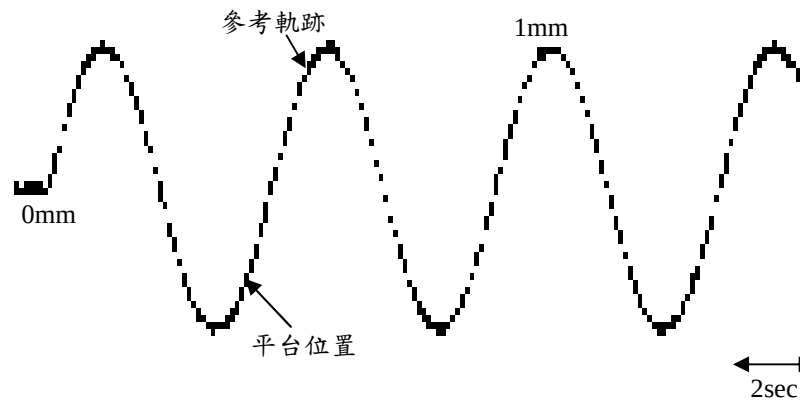
線上學習法則方塊圖



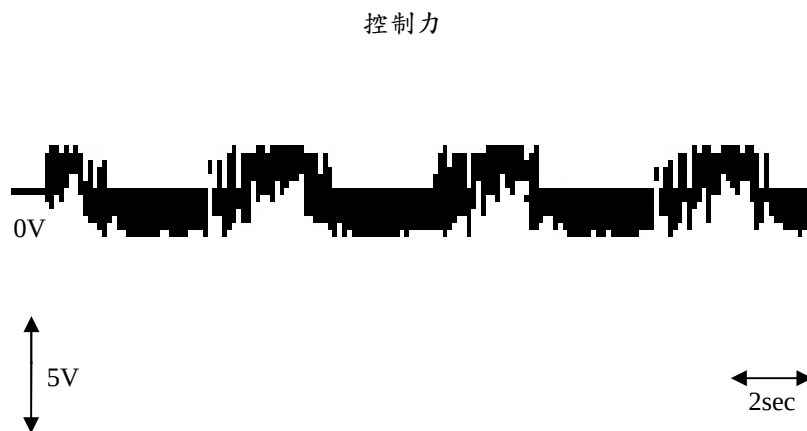


四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

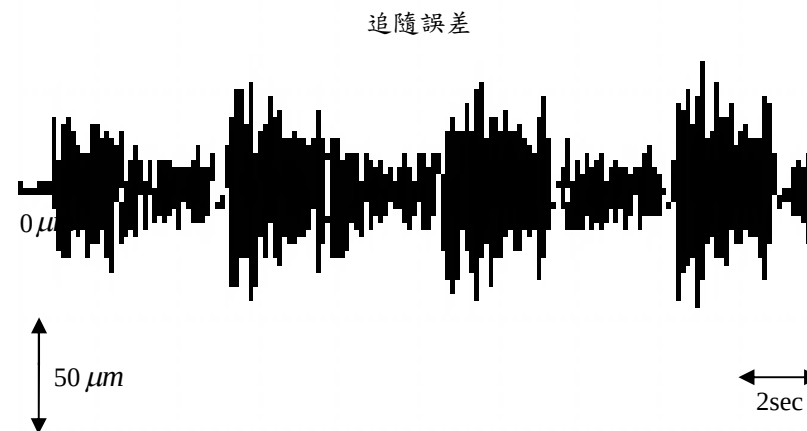
□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖4.6)



(a)



(b)



(c)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

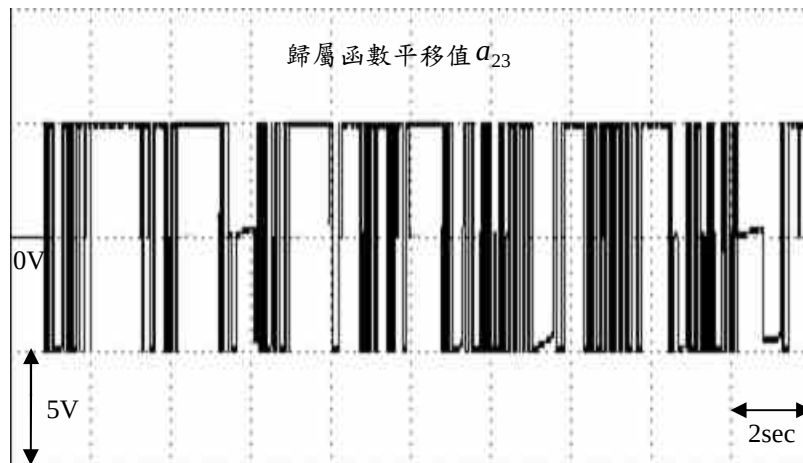
□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖4.6續)

輸出連結權重值 θ_3



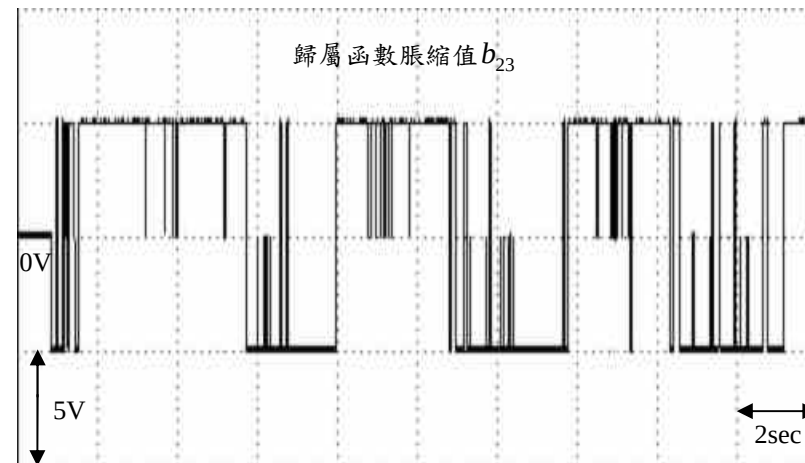
(d)

歸屬函數平移值 a_{23}



(e)

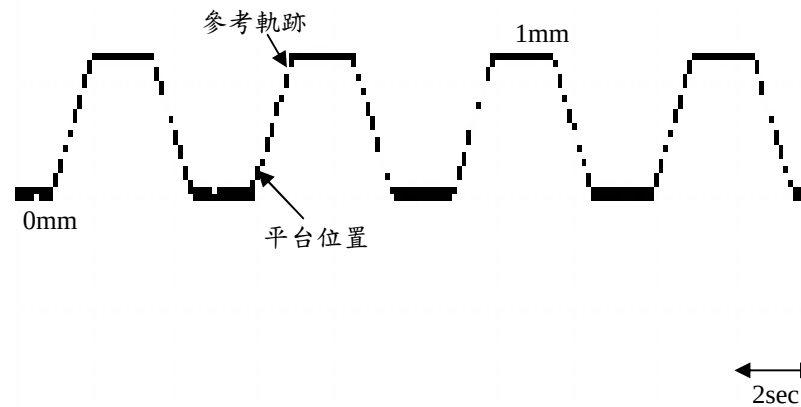
歸屬函數脹縮值 b_{23}



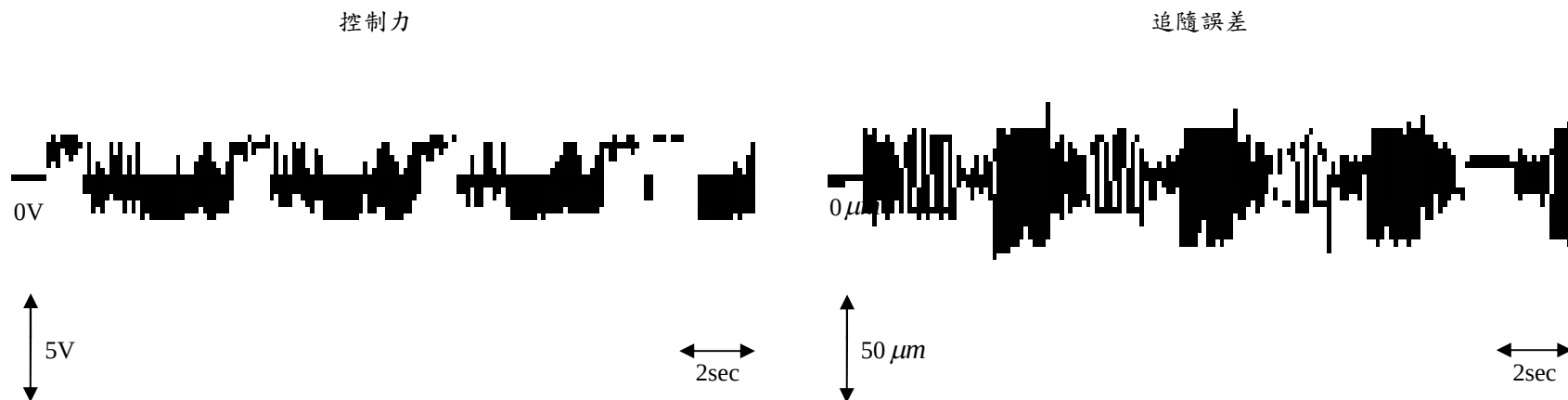
(f)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖4.7)



(a)



(b)

(c)



四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

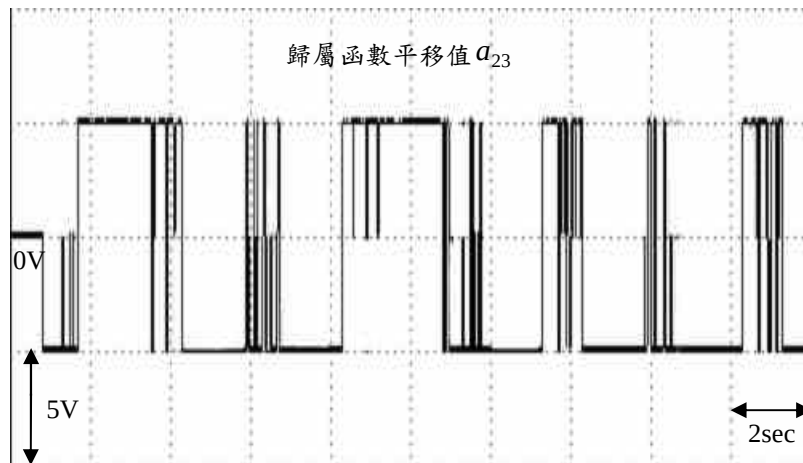
▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖4.7續)

輸出連結權重值 θ_3



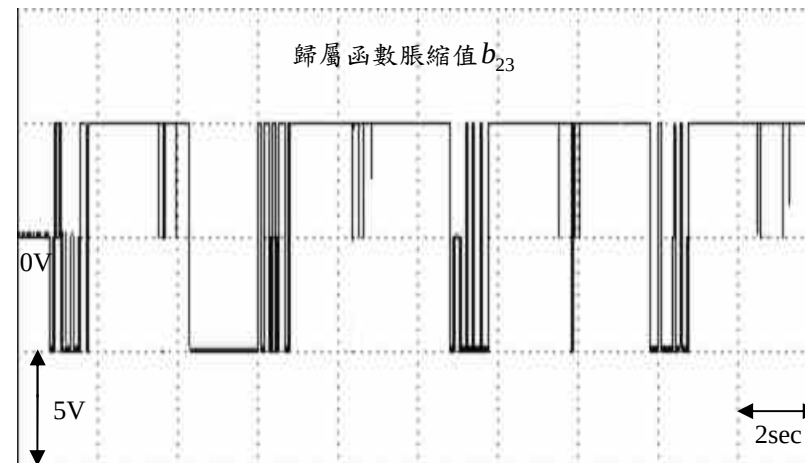
(d)

歸屬函數平移值 a_{23}



(e)

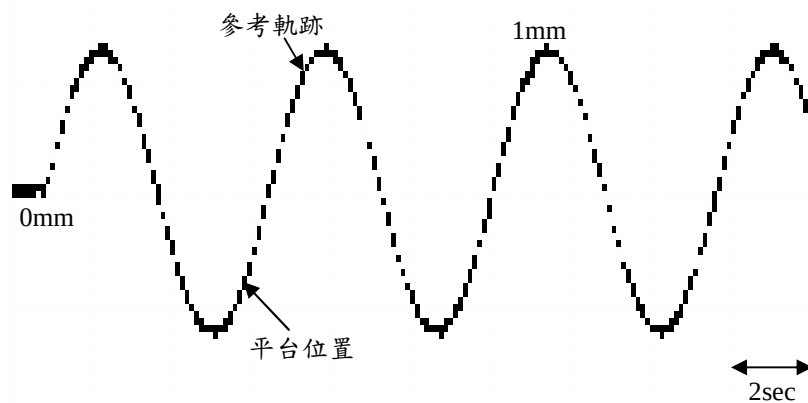
歸屬函數脹縮值 b_{23}



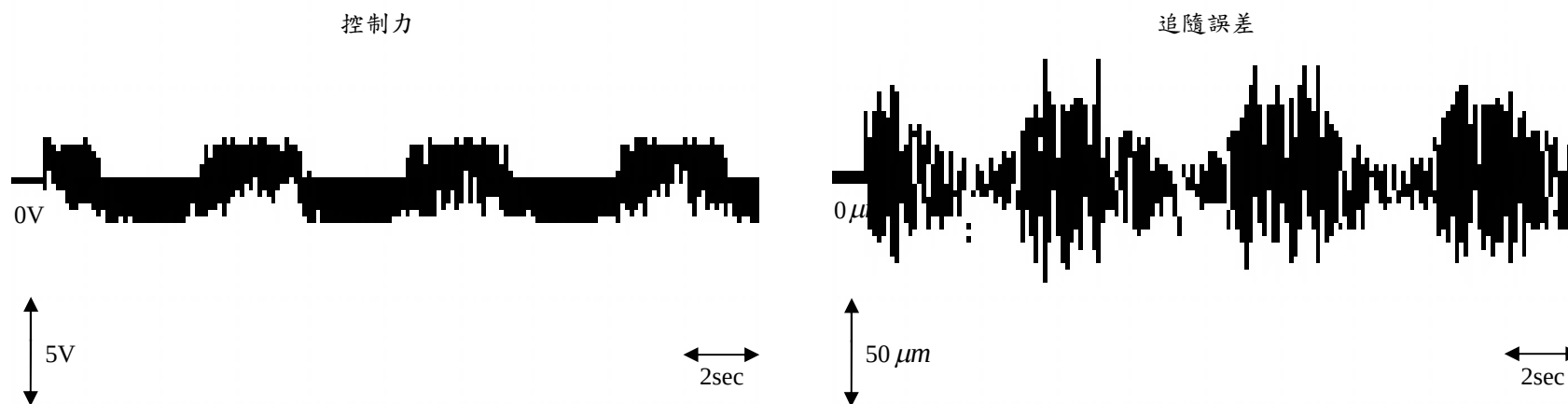
(f)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖4.8)



(a)



(b)

(c)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

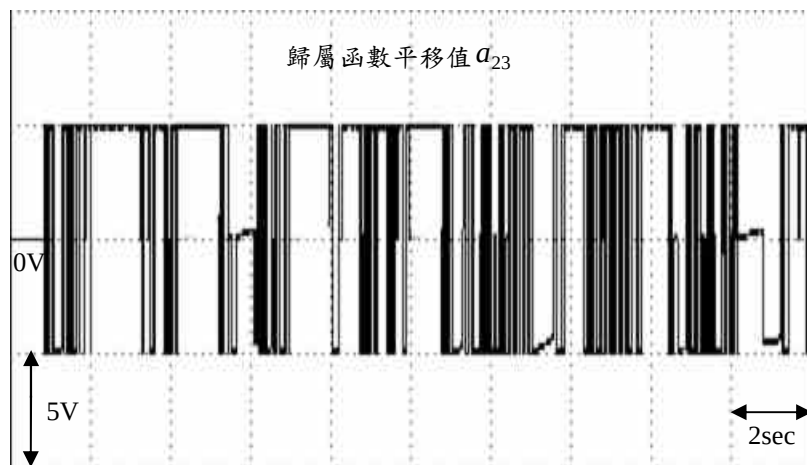
□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖4.8續)

輸出連結權重值 θ_3



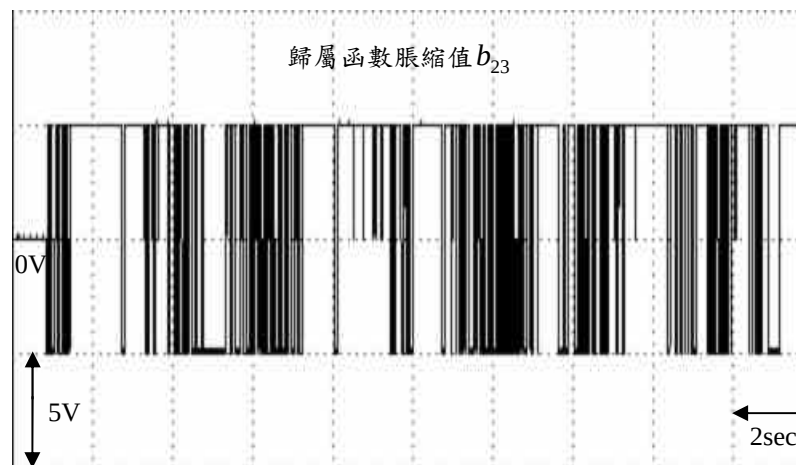
(d)

歸屬函數平移值 a_{23}



(e)

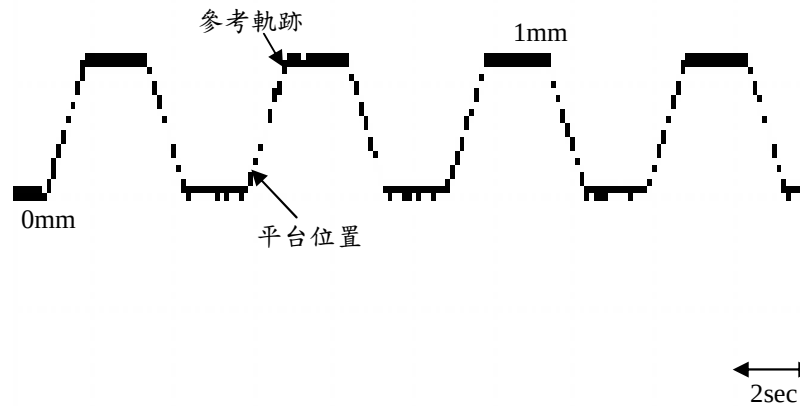
歸屬函數脹縮值 b_{23}



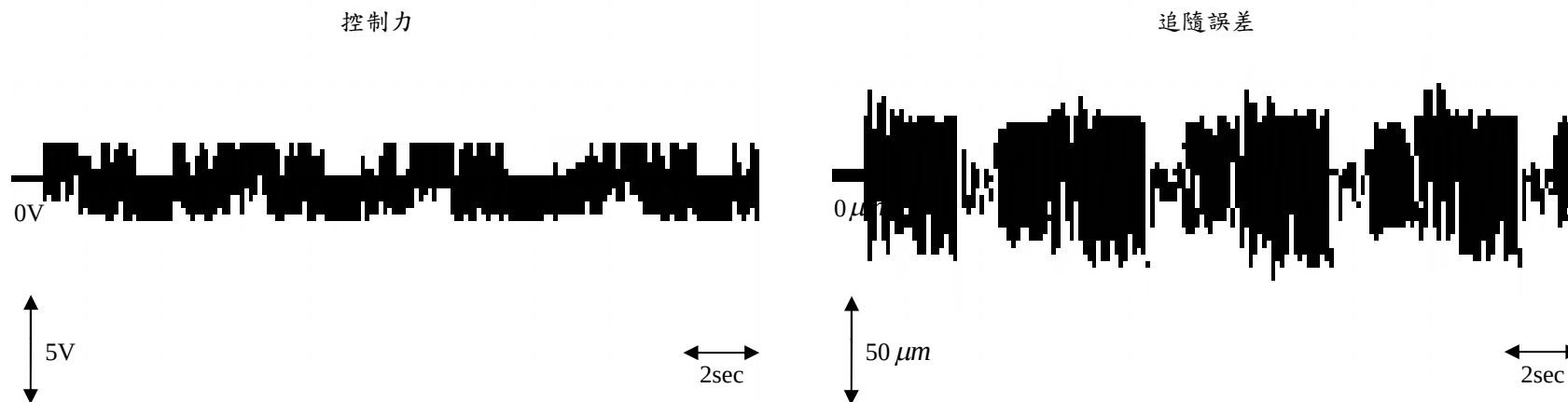
(f)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖4.9)



(a)



(b)

(c)

四、以FPGA為基礎之遞迴式小波類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

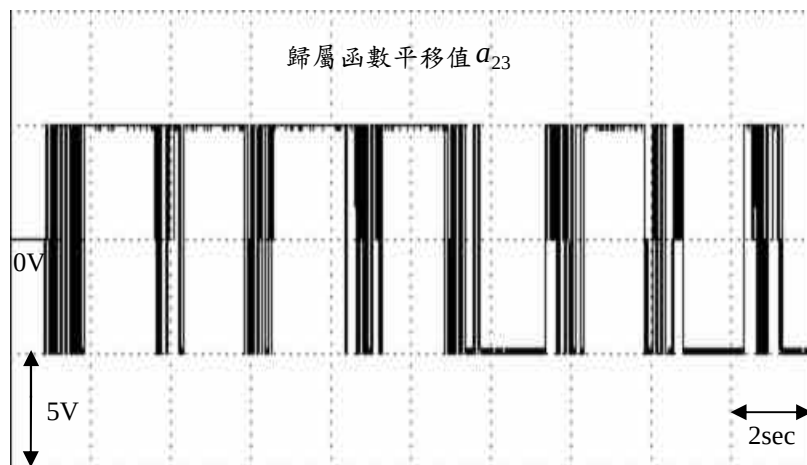
▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖4.9續)

輸出連結權重值 θ_3



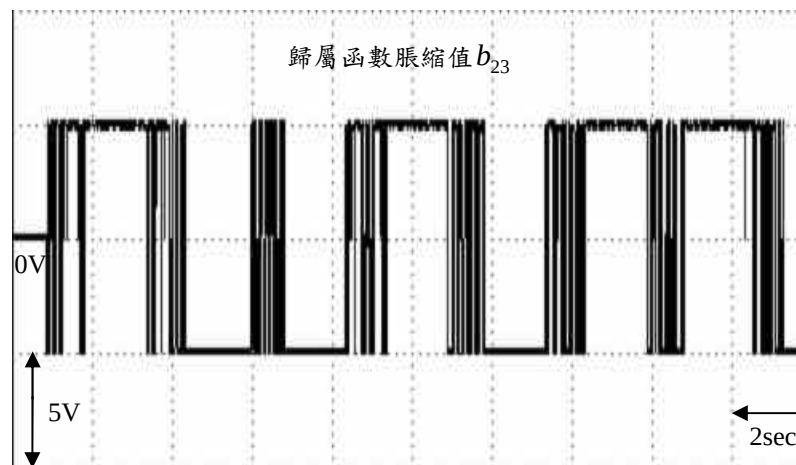
(d)

歸屬函數平移值 a_{23}



(e)

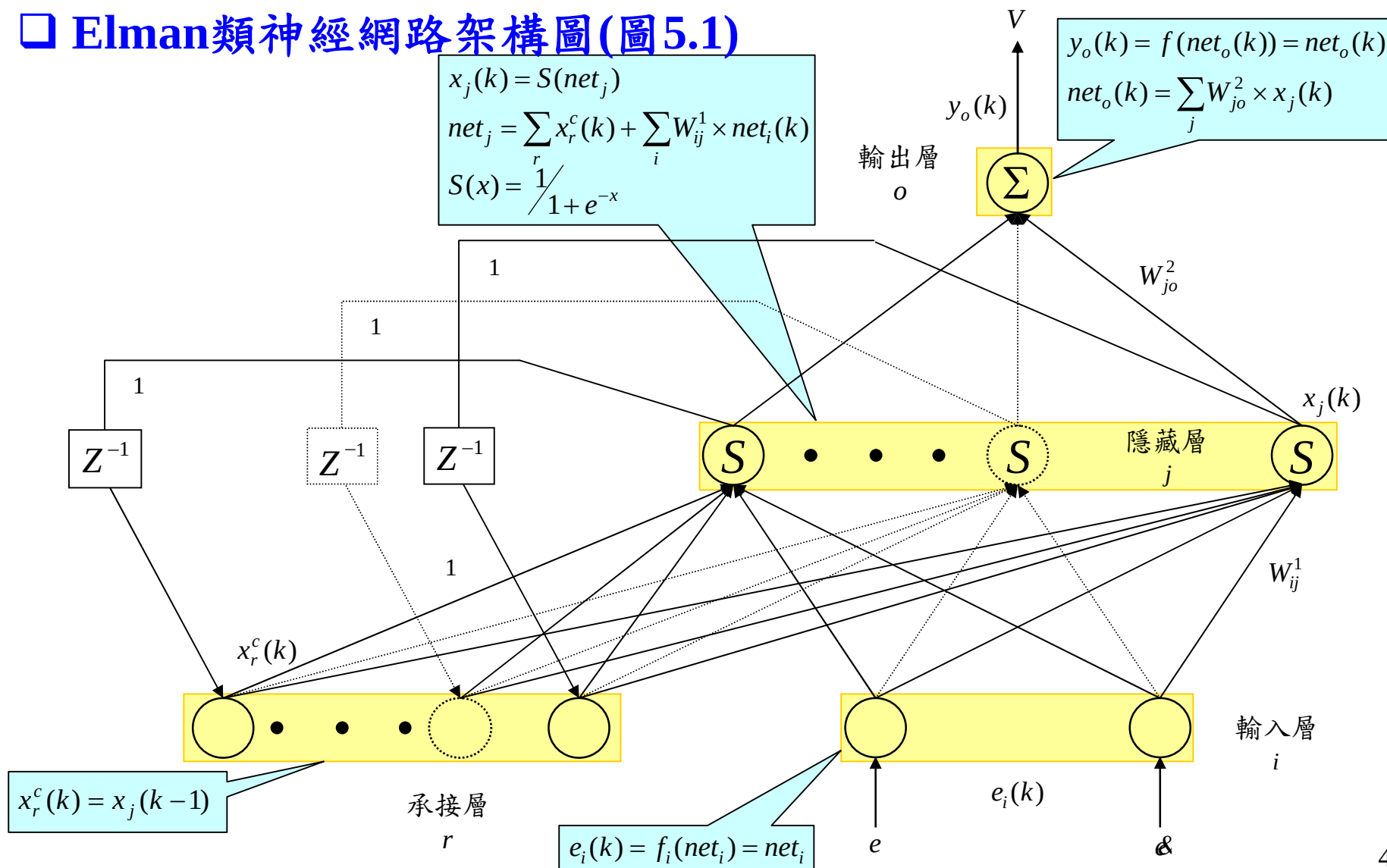
歸屬函數脹縮值 b_{23}



(f)

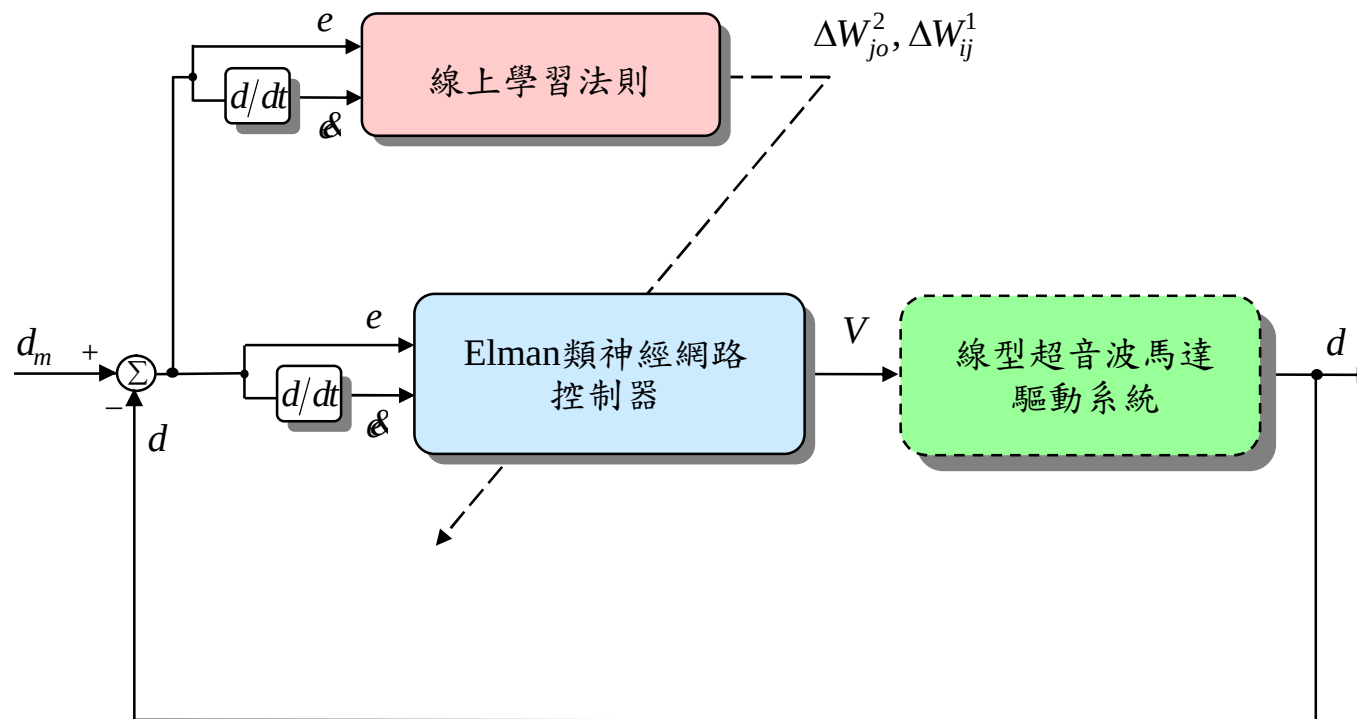
五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統

□ Elman類神經網路架構圖(圖5.1)



五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ Elman類神經網路線型超音波馬達控制系統方塊圖(圖5.2)

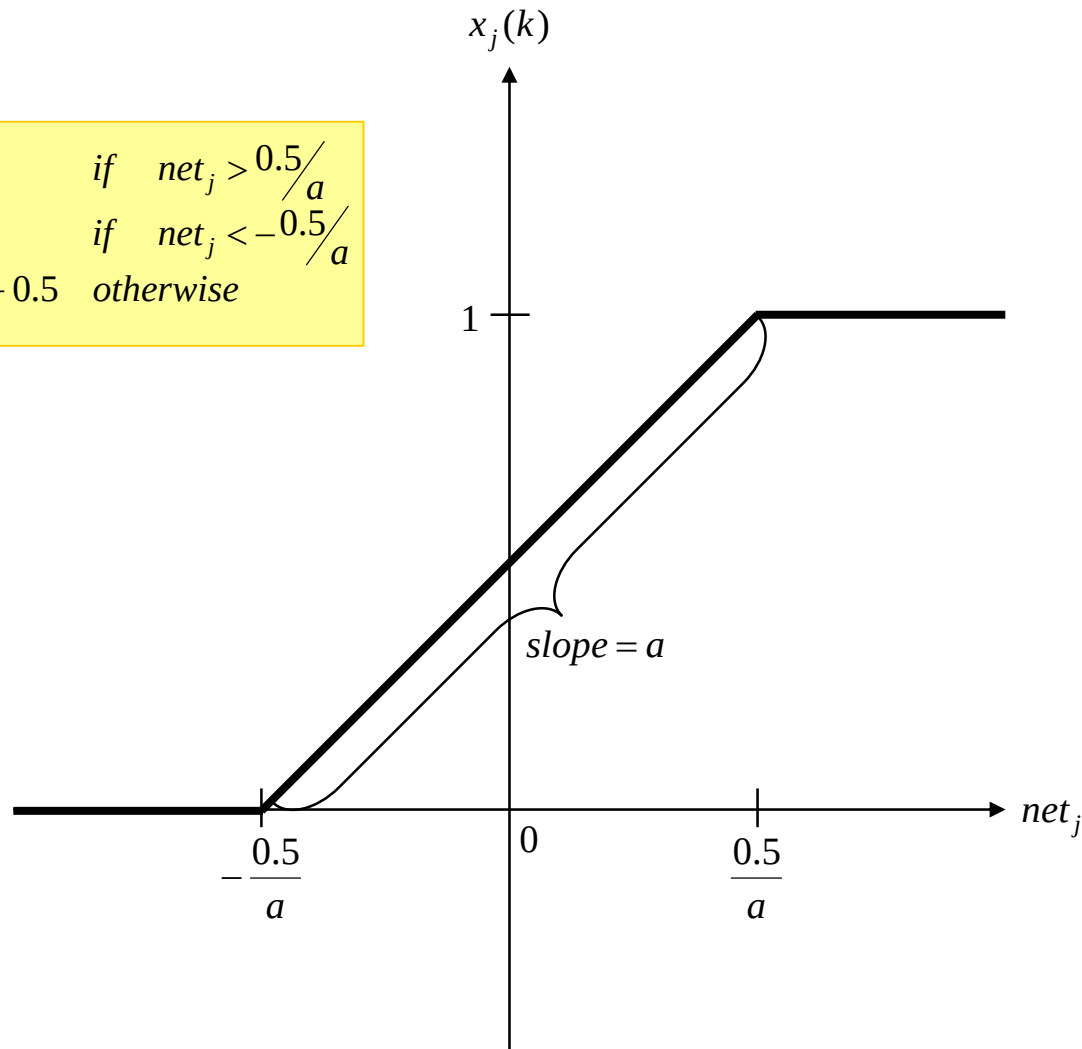




五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ Elman類神經網路隱藏層中之片段連續函數(圖5.3)

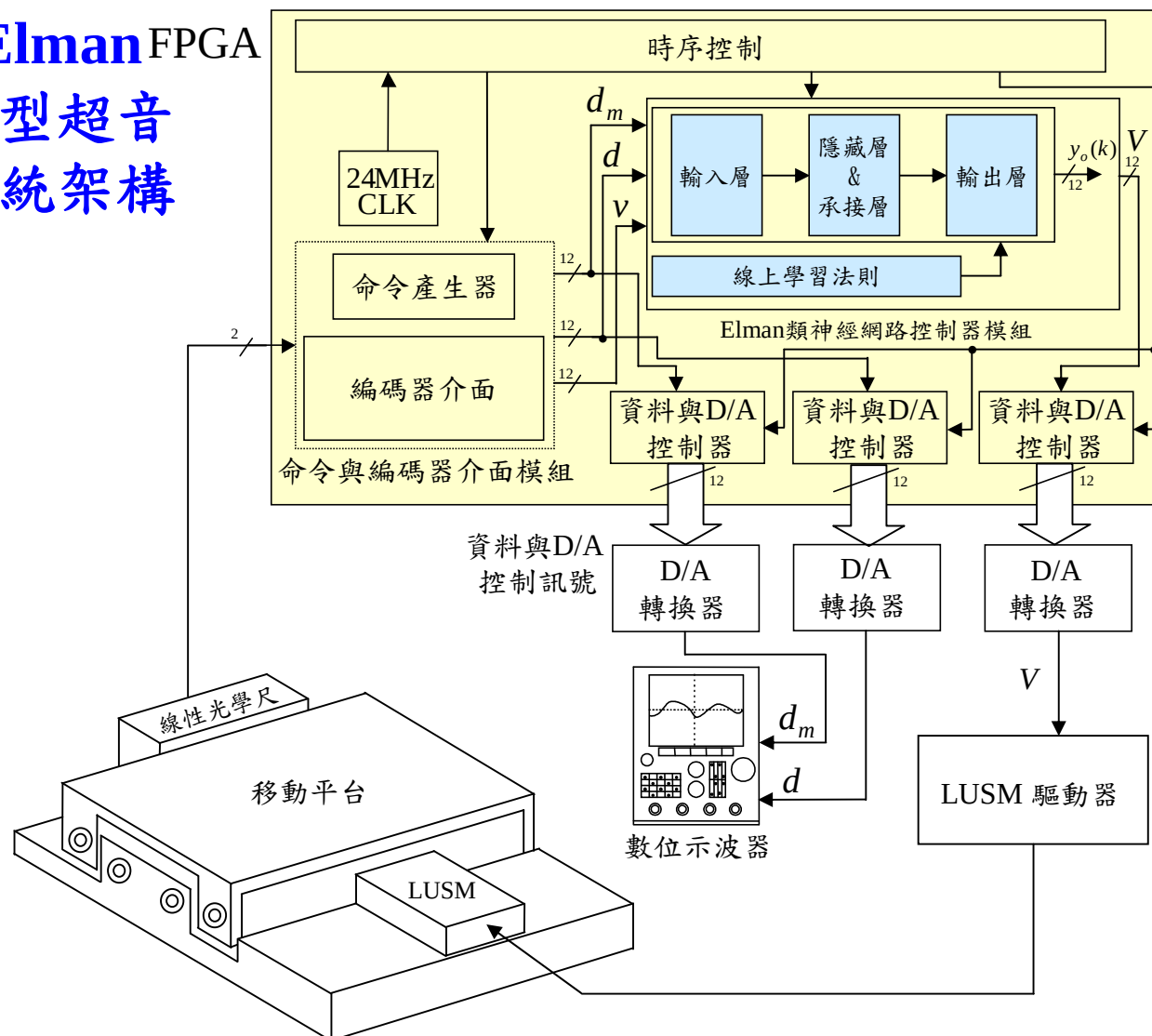
$$x_j(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } net_j > 0.5/a \\ 0 & \text{if } net_j < -0.5/a \\ a \times net_j + 0.5 & \text{otherwise} \end{cases}$$



五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

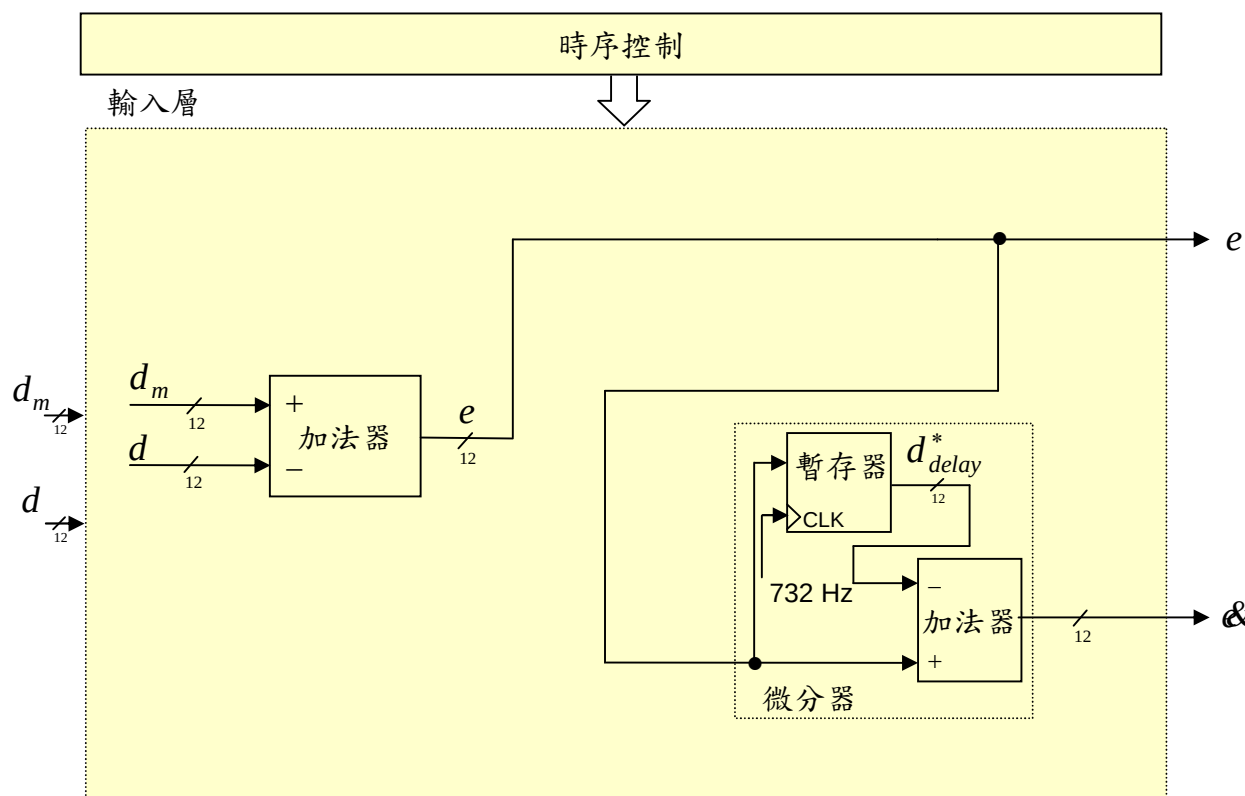
□ 以FPGA實現Elman FPGA

類神經網路線型超音
波馬達控制系統架構
圖(圖5.4)



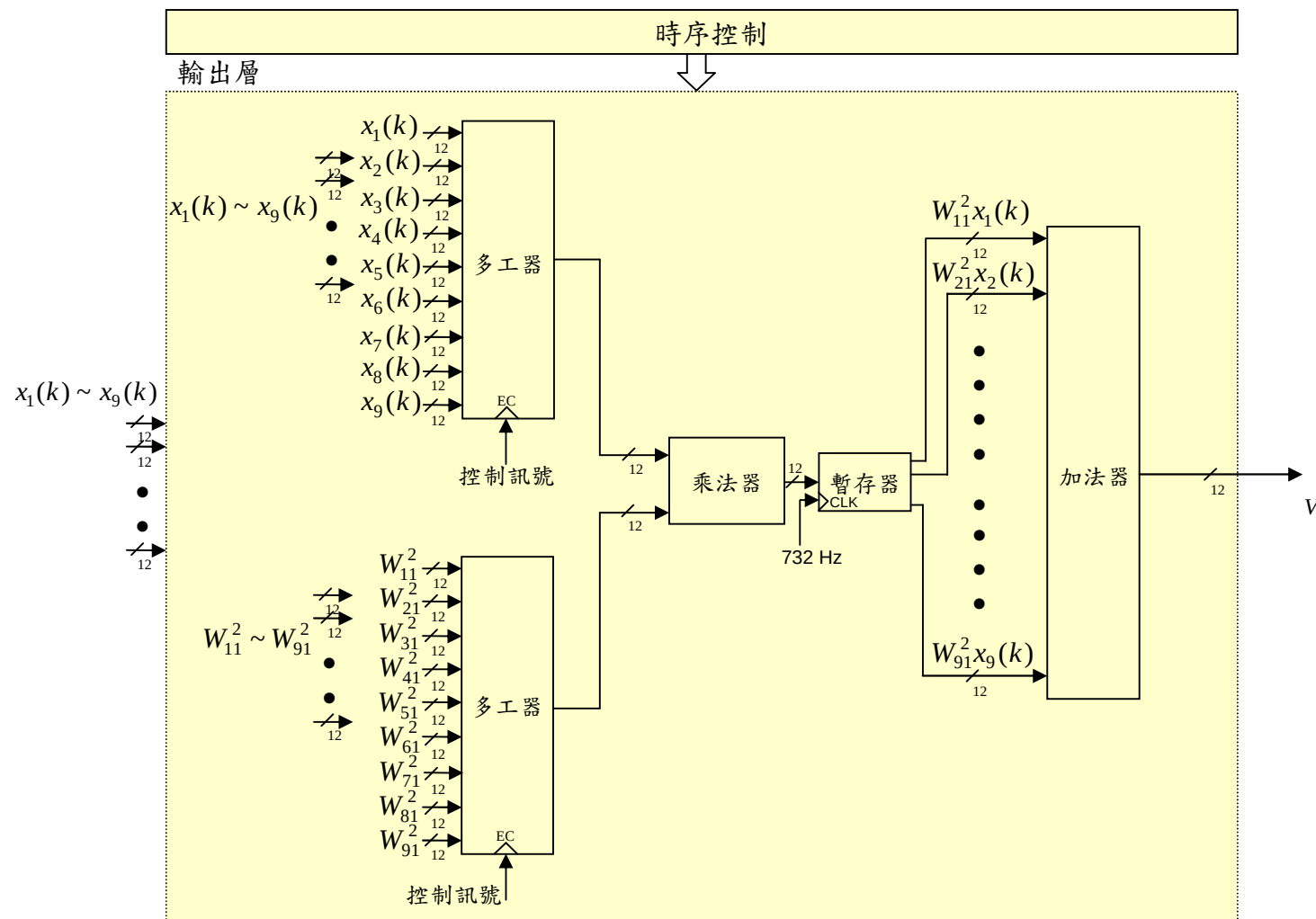
五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 輸入層方塊圖

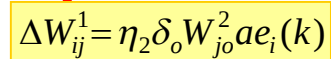


五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 輸出層方塊圖

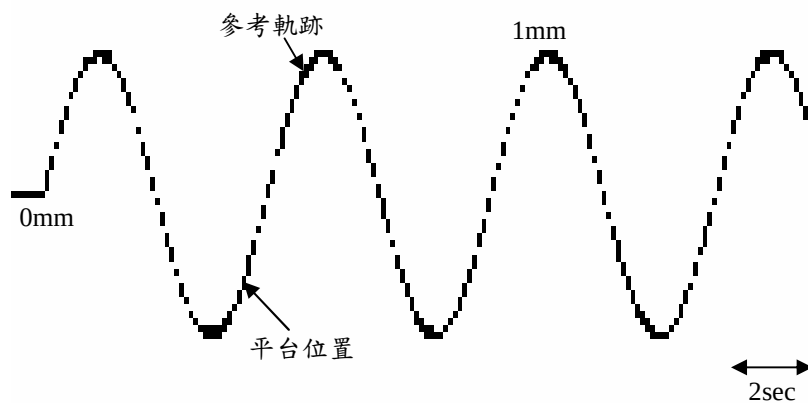


□ 線上學習法則方塊圖

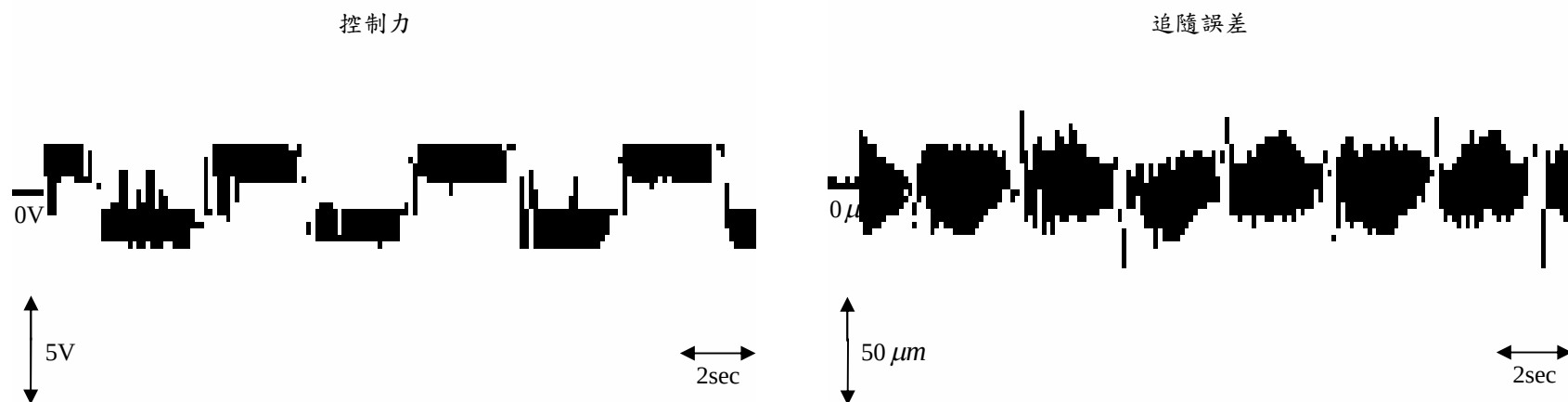


五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖5.6)



(a)



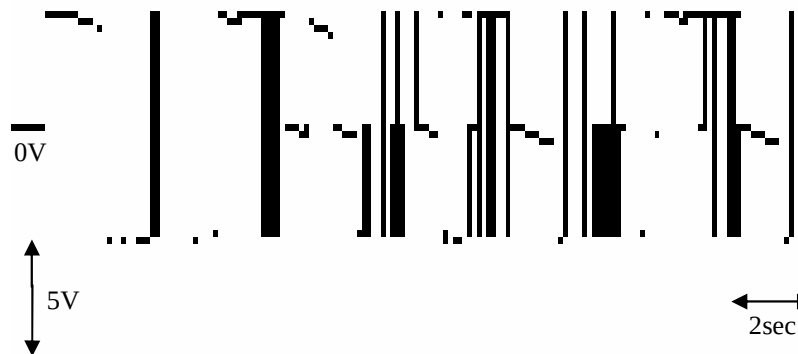
(b)

(c)

五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

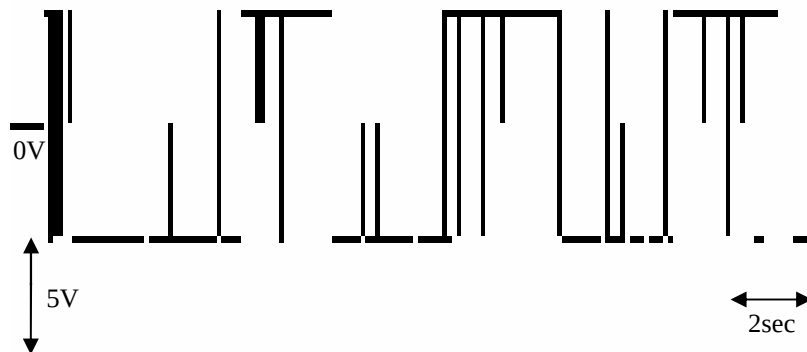
□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖5.6續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(d)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1

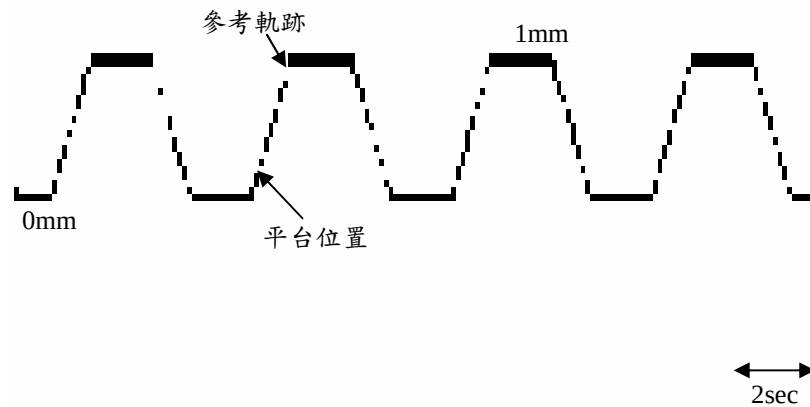


(f)

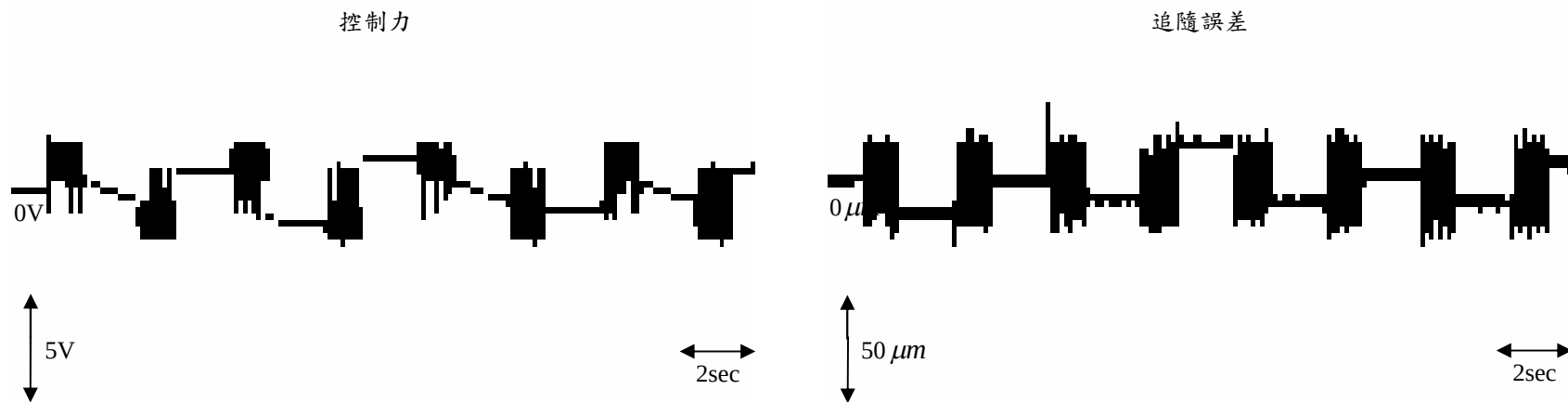


五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖5.7)



(a)



(b)

(c)

五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

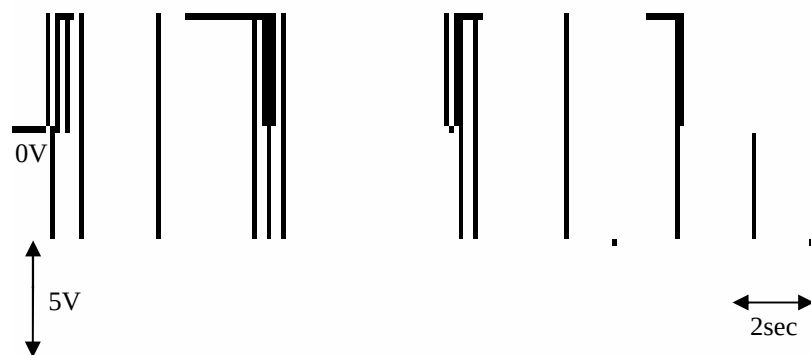
▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖5.7續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(d)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1

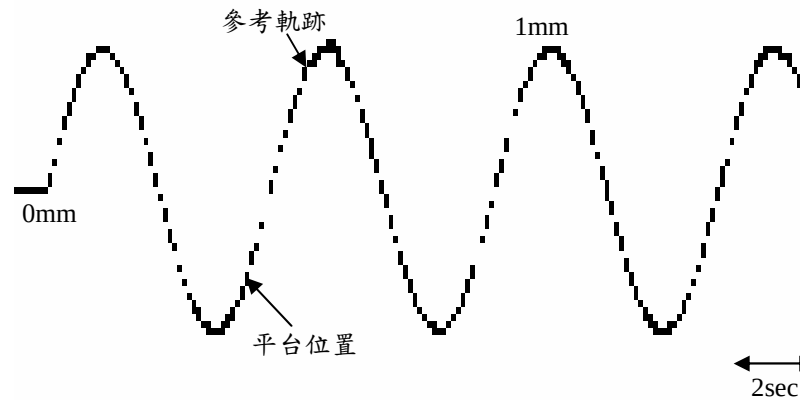


(f)

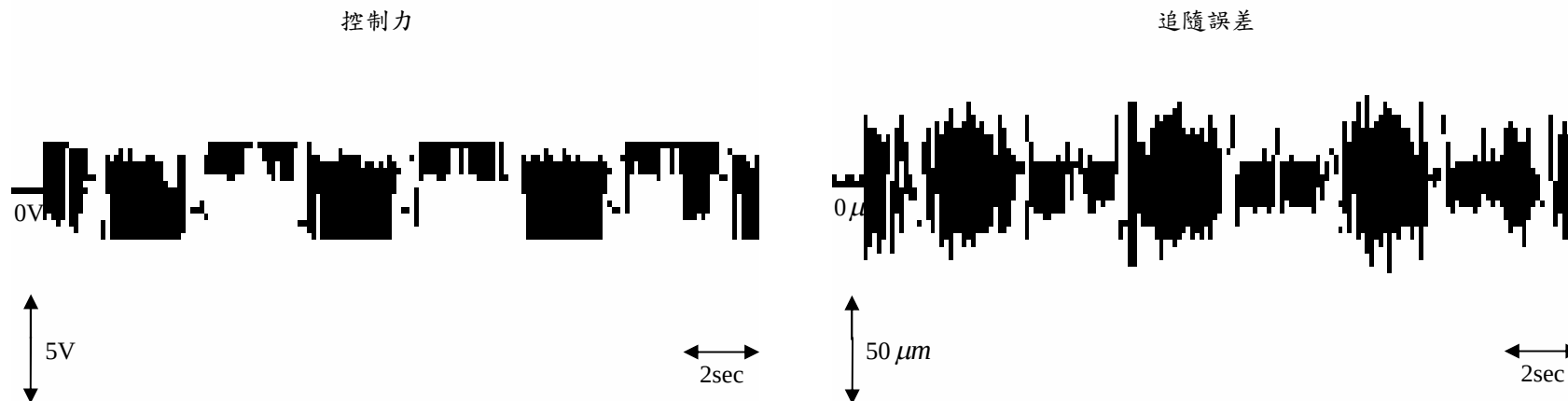


五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖5.8)



(a)



(b)

(c)

五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖5.8續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(d)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(e)

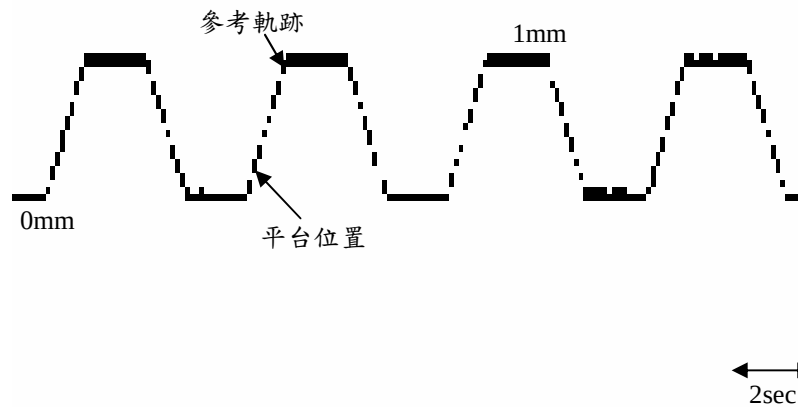
輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1



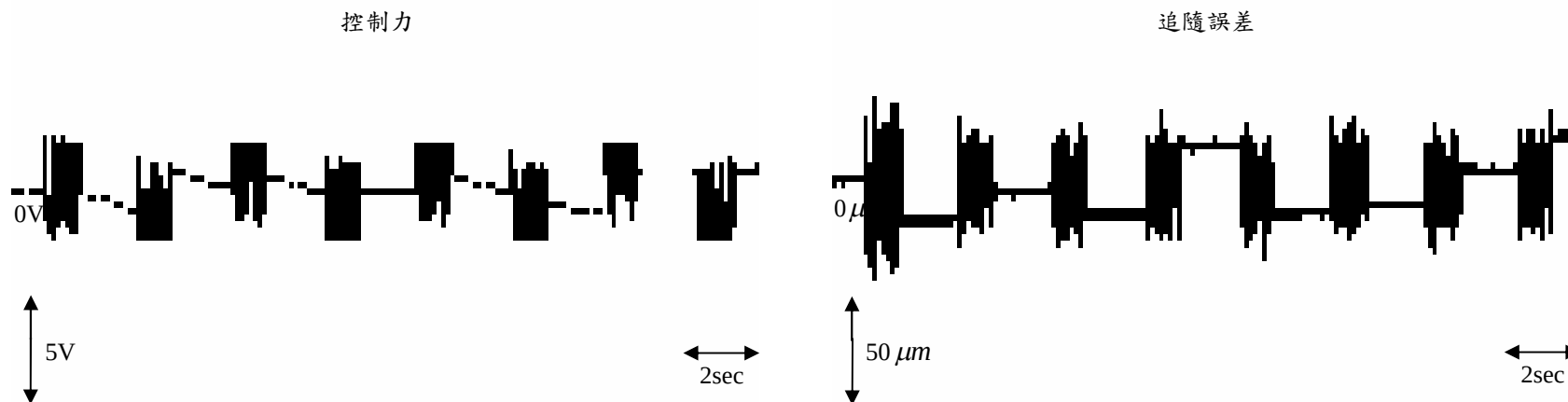
(f)

五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖5.9)



(a)



(b)

(c)

五、以FPGA為基礎之Elman類神經網路 線型超音波馬達控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖5.9續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(d)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(e)

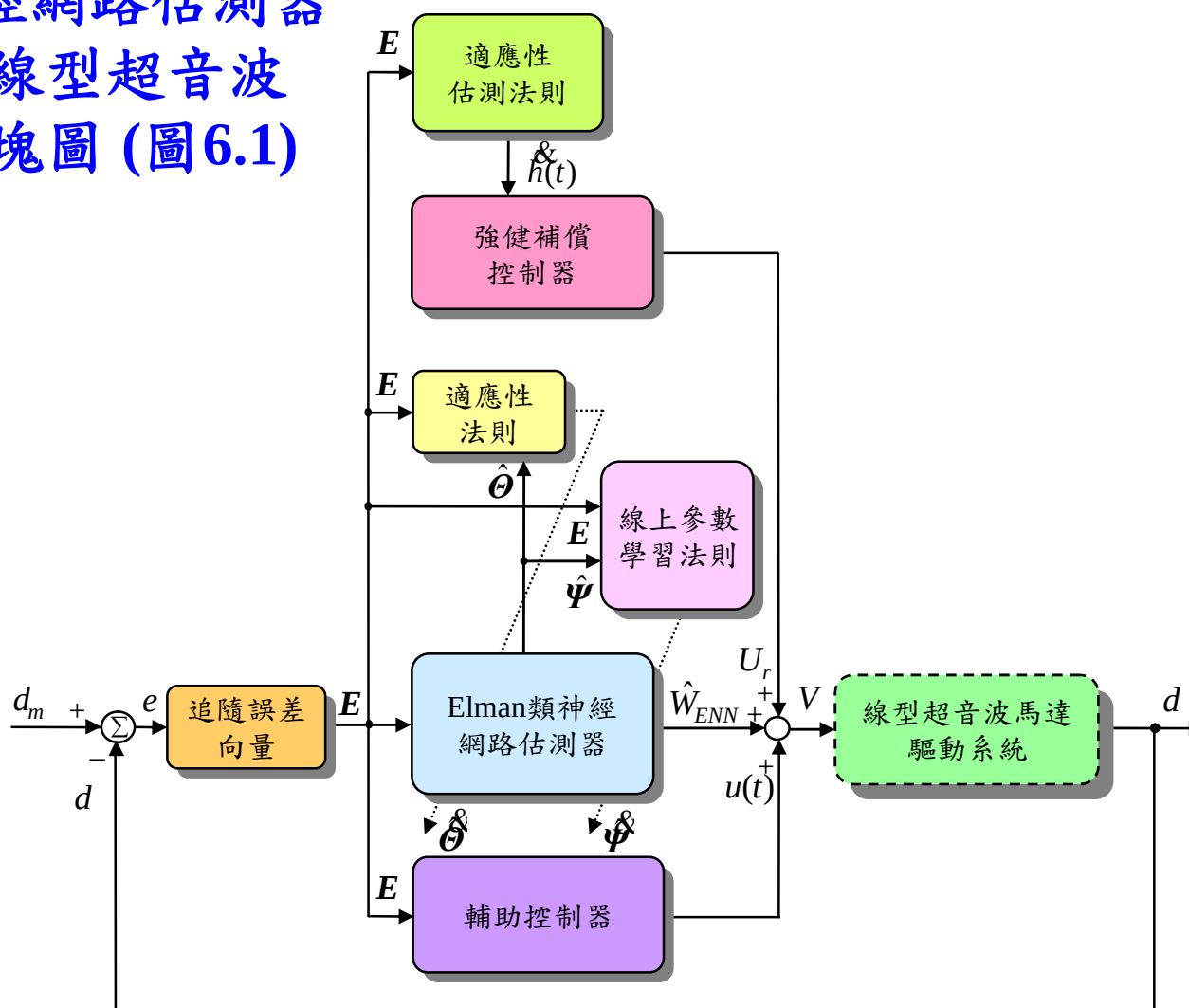
輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1



(f)

六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統

- 包含Elman類神經網路估測器
之計算力控制器線型超音波
馬達控制系統方塊圖 (圖6.1)



六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

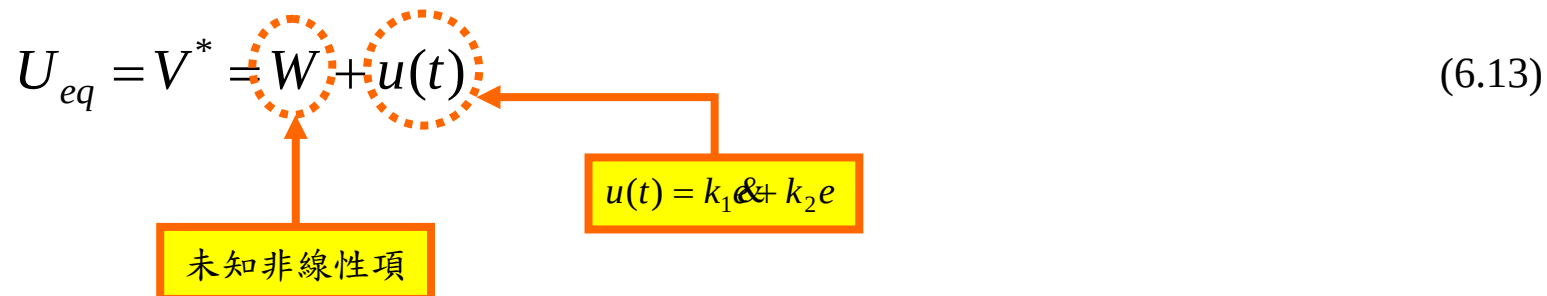
□ Elman類神經網路計算力控制器

- 當線型超音波馬達運動控制系統受到不確定項干擾時，也就是說系統的參數發生變動或是外來干擾和摩擦力加入系統，則動態方程式可改寫如下：

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}(t) &= (A_n + \Delta A)\dot{\theta}(t) + (B_n + \Delta B)V + (C_n + \Delta C)[F_L + f(v)] \\ &= A_n\dot{\theta}(t) + B_nV + L(t) \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}_m(t) - A_n\dot{\theta}(t) - B_nV - L(t) \quad (6.8)$$

理想計算力控制法則可設計為：

$$U_{eq} = V^* = W + u(t) \quad (6.13)$$


未知非線性項

$u(t) = k_1\dot{\theta} + k_2e$

六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ Elman類神經網路之設計

然而在實際應用上**非線性項** W 是未知的，以至於(6.13)式所示之控制法則亦無法實現。因此設計一**實際計算力控制法則** $\hat{U}_{eq}$ 如下式來近似 U_{eq} ：

$$\hat{U}_{eq} = \hat{W}_{ENN} + U_r + u(t) \quad (6.16)$$

強健補償控制器
Elman類神經網路估測器

其**適應性法則**、**線上參數學習法則**及**強健補償控制器**設計為

$$\dot{\Theta} = \alpha_1 \mathbf{E}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \Gamma^T \quad (6.30)$$

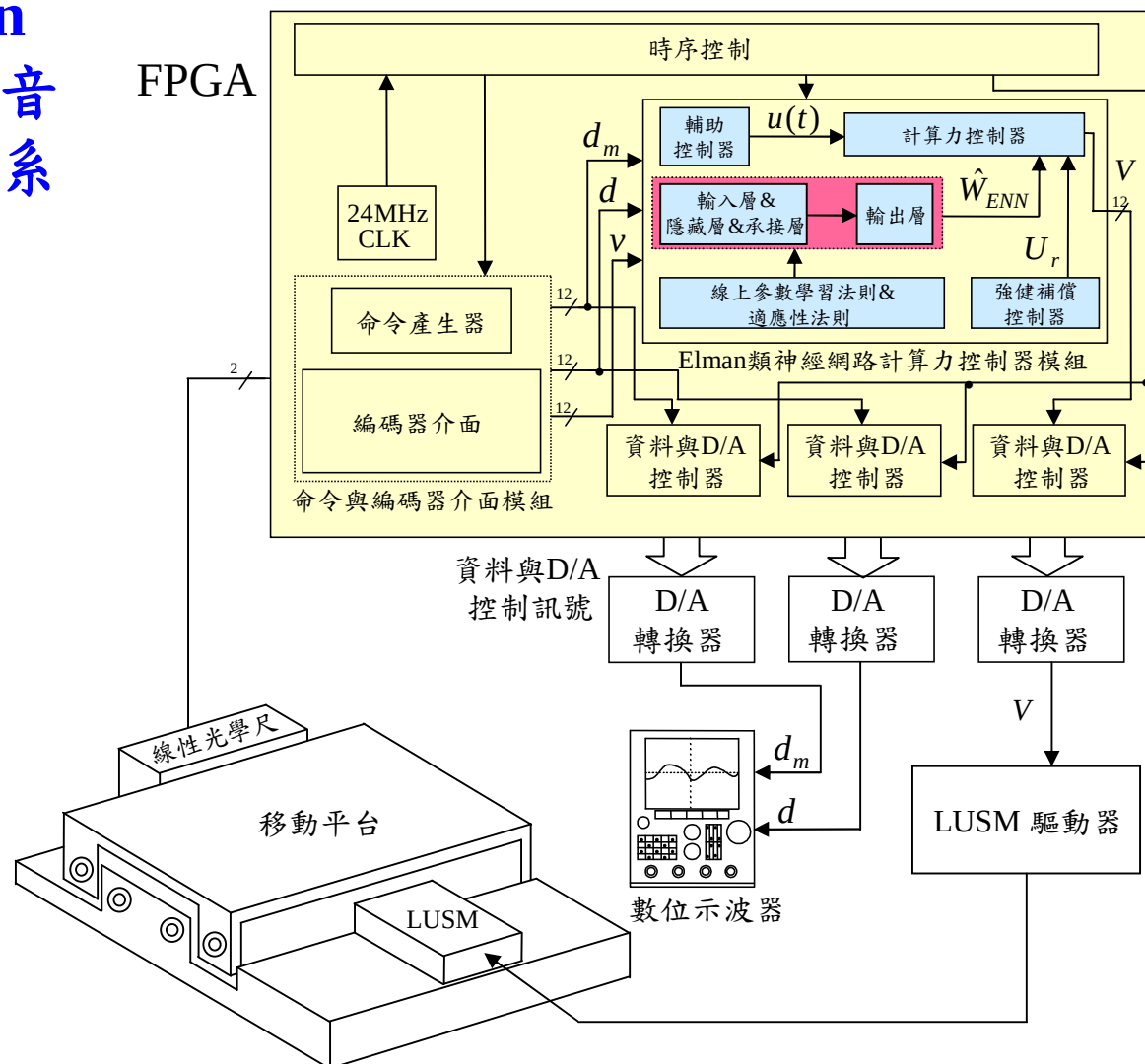
$$U_r = \hat{h}(t) \quad (6.31)$$

$$\dot{\hat{h}}(t) = \alpha_2 \mathbf{E}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \quad (6.32)$$

$$\dot{\Phi} = \eta_1 \delta_{j_0} e_i(k) \quad (6.43)$$

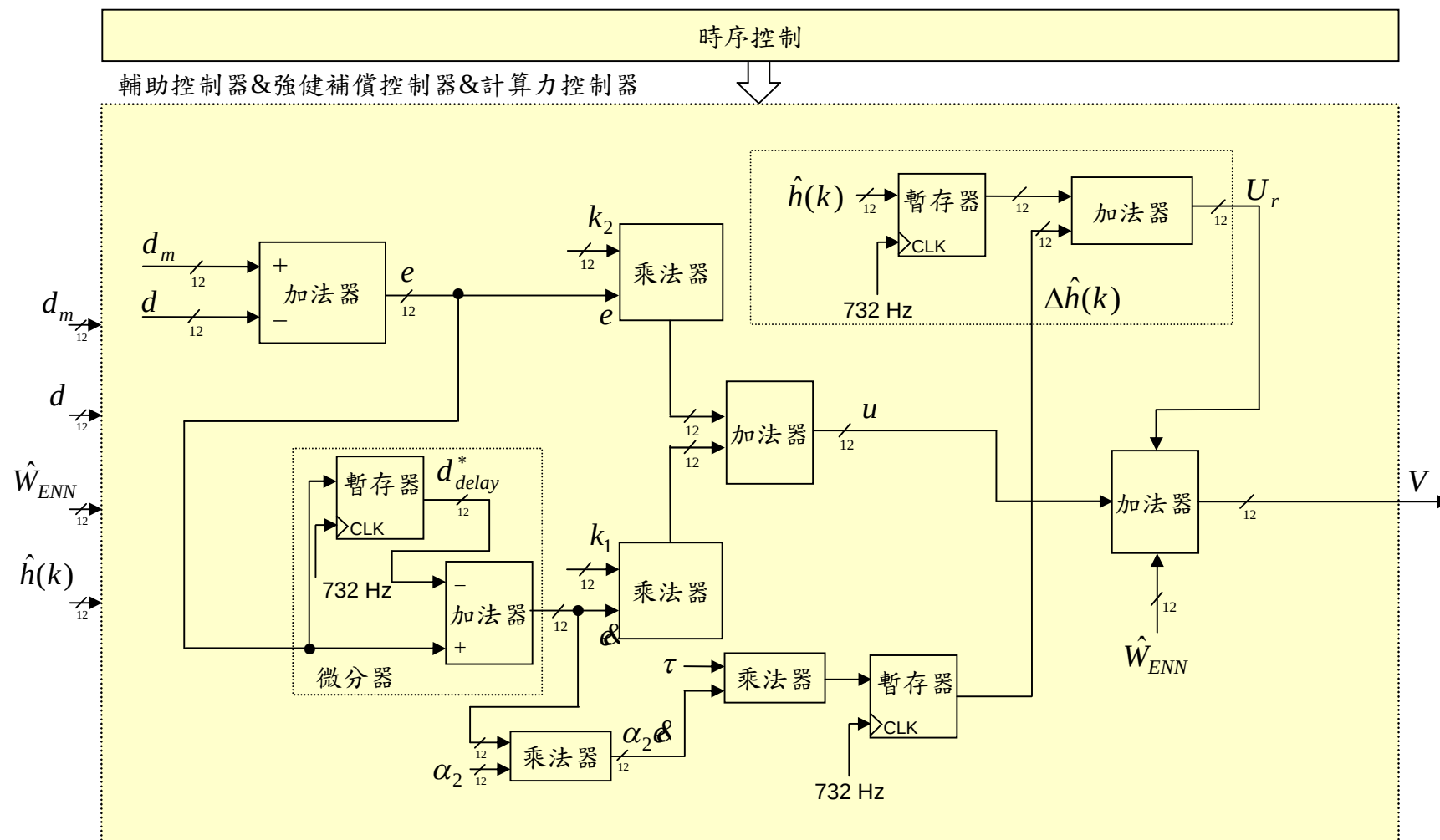
六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ 以FPGA實現Elman 類神經網路線型超音 波馬達計算力控制系 統架構圖(圖6.4)



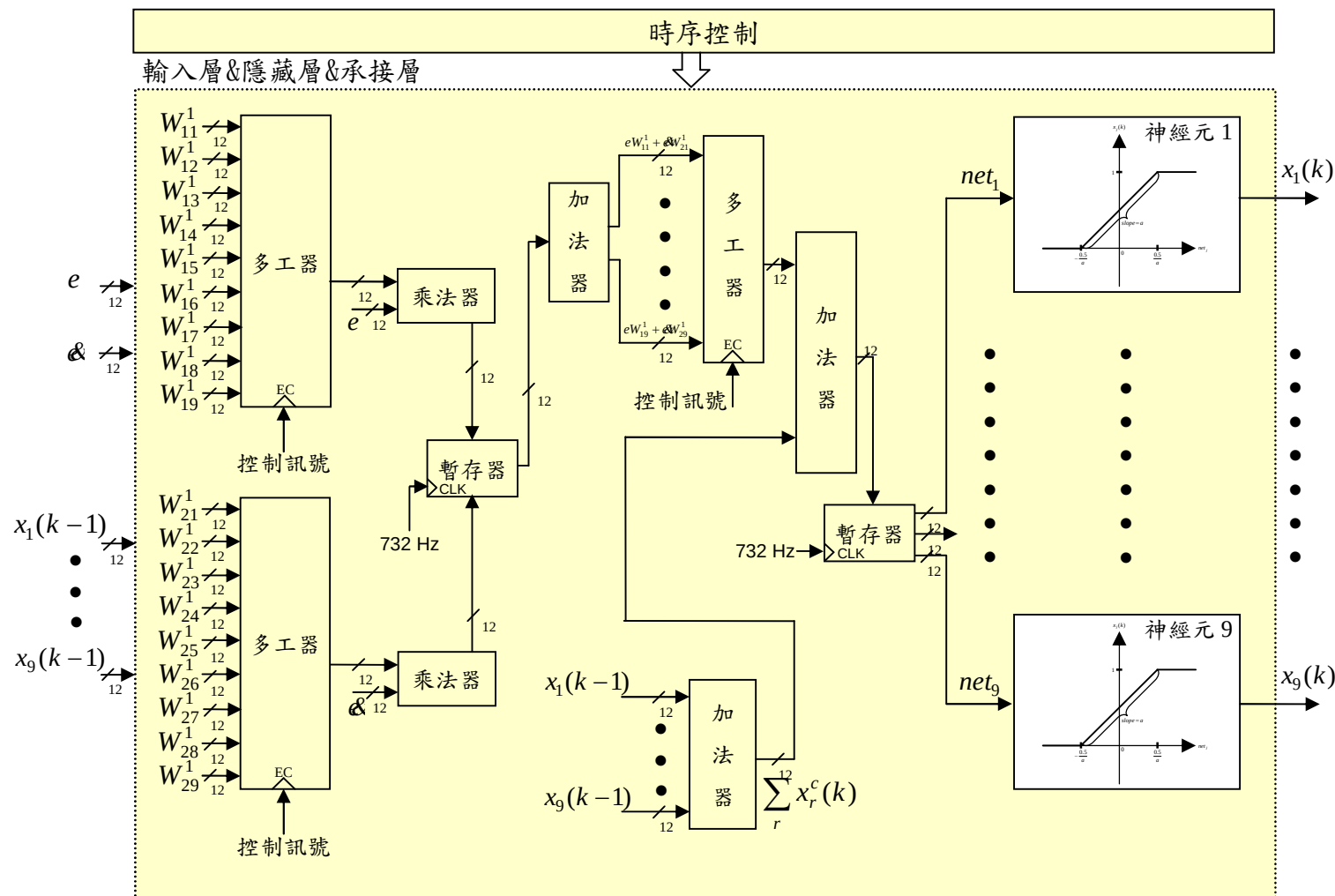
六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ 輔助控制器，強健補償控制器與計算力控制器方塊圖



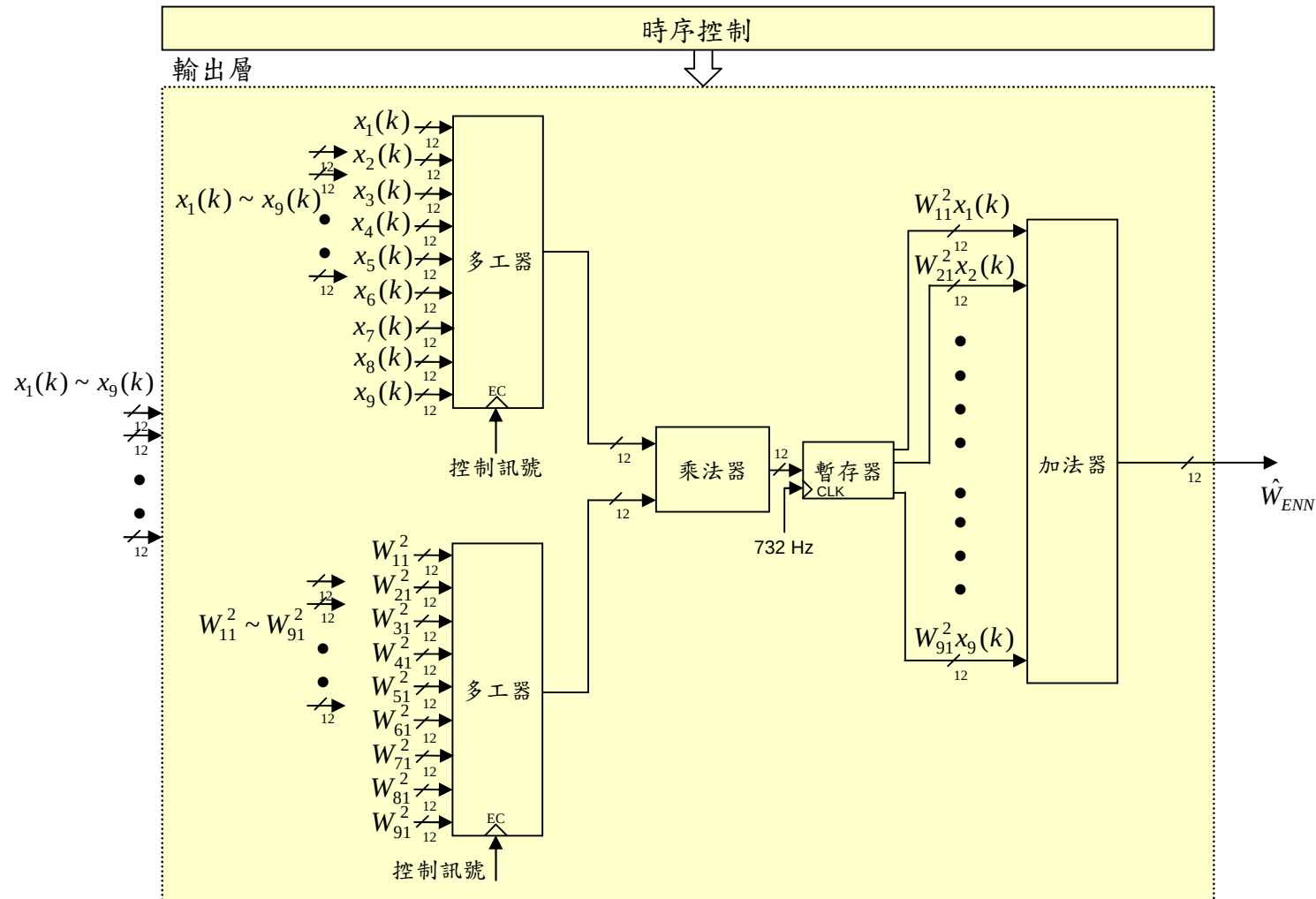
六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ 輸入層，隱藏層與承接層方塊圖



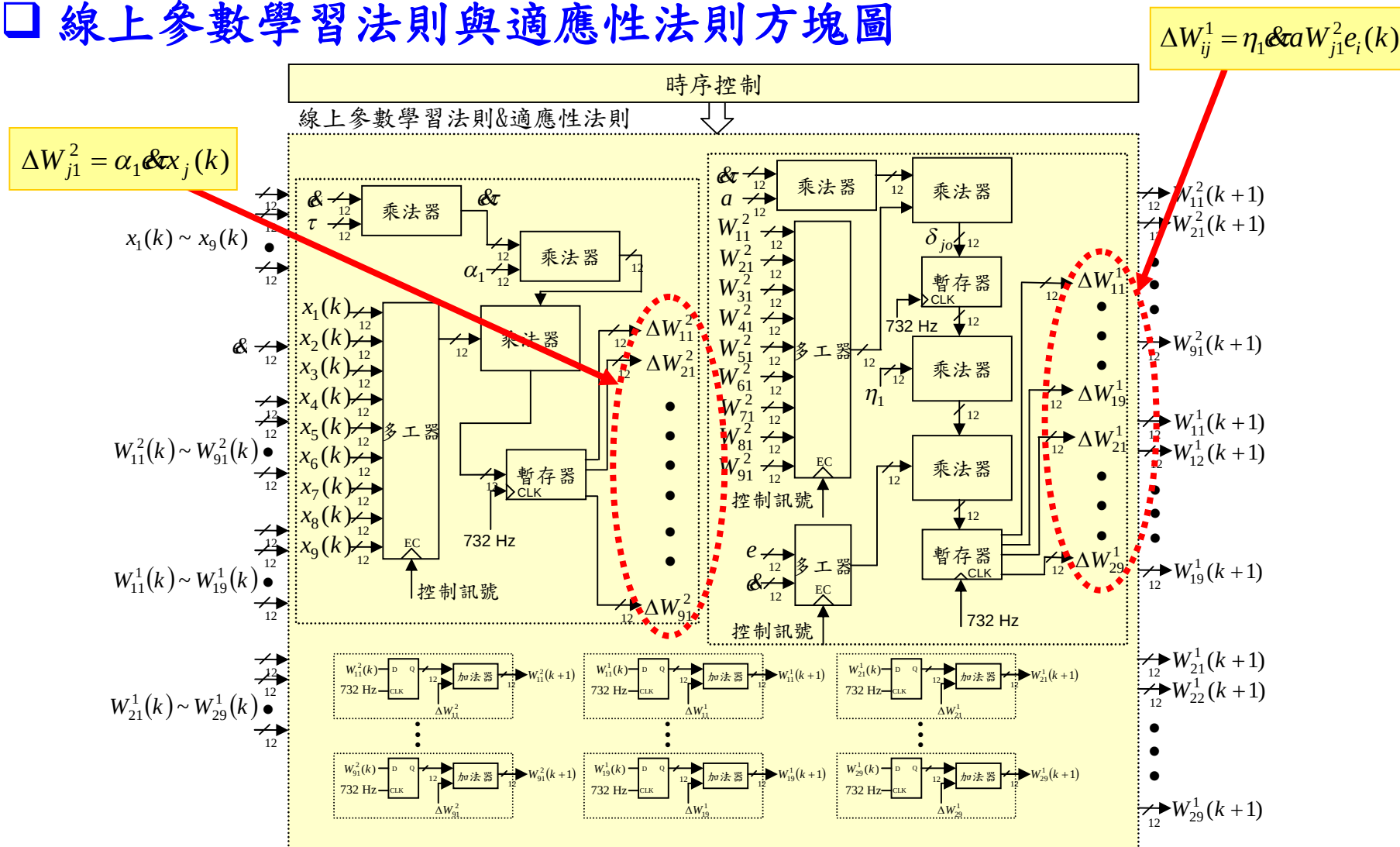
六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ 輸出層方塊圖



六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

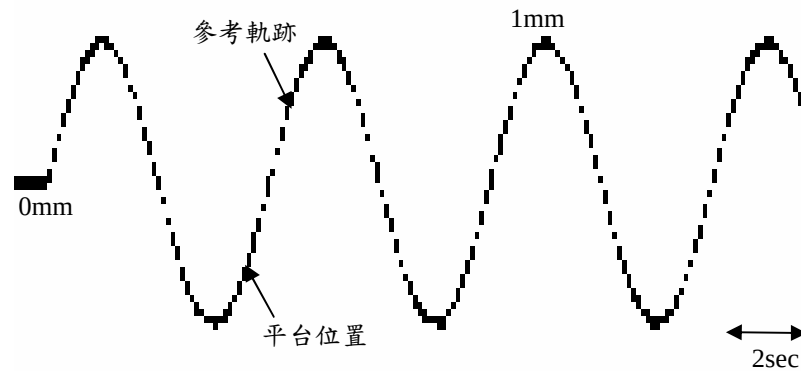
□ 線上參數學習法則與適應性法則方塊圖



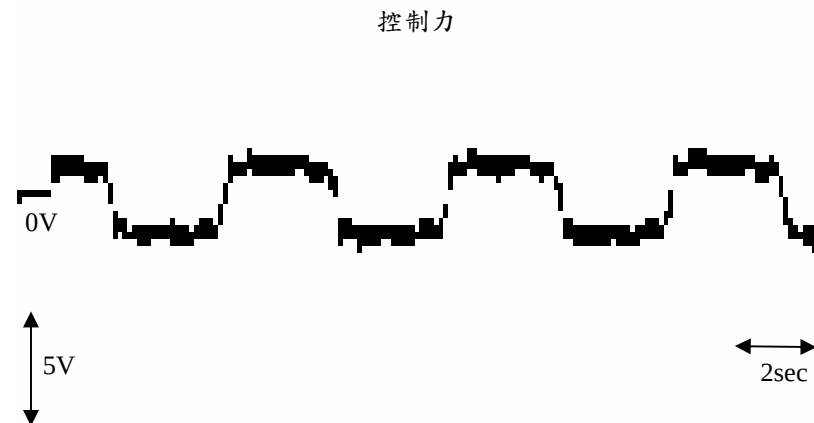


六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

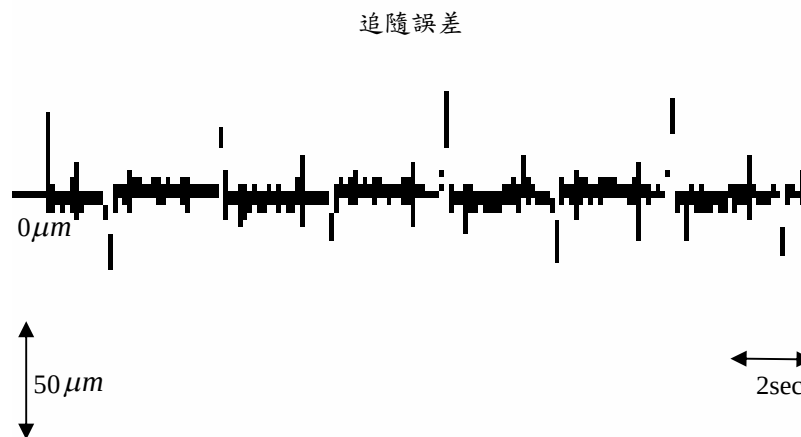
□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖6.6)



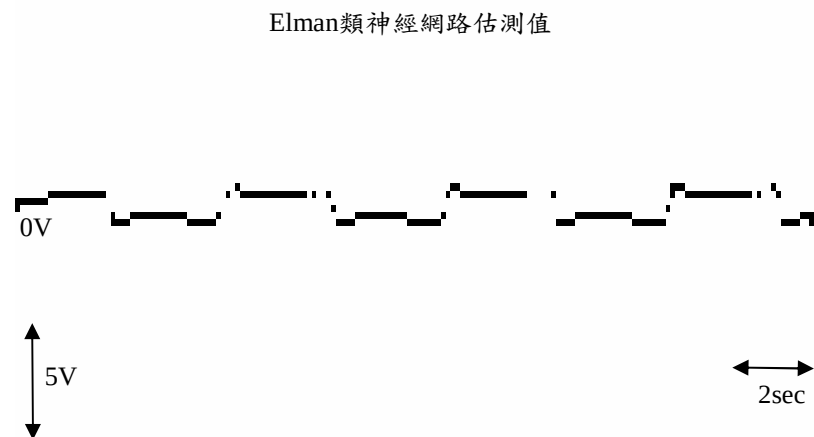
(a)



(b)



(c)



(d)

六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

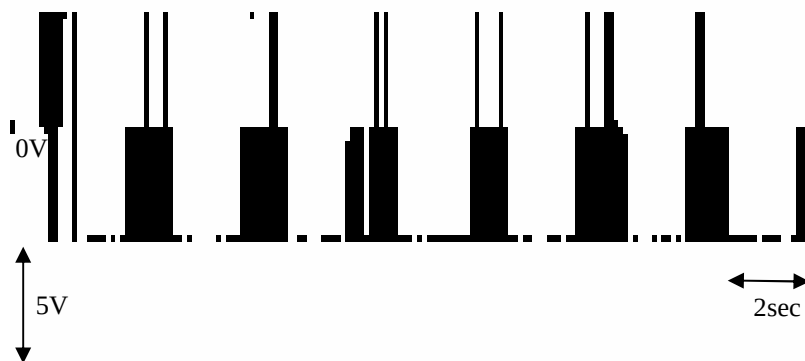
□ 弦波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖6.6續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(f)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1

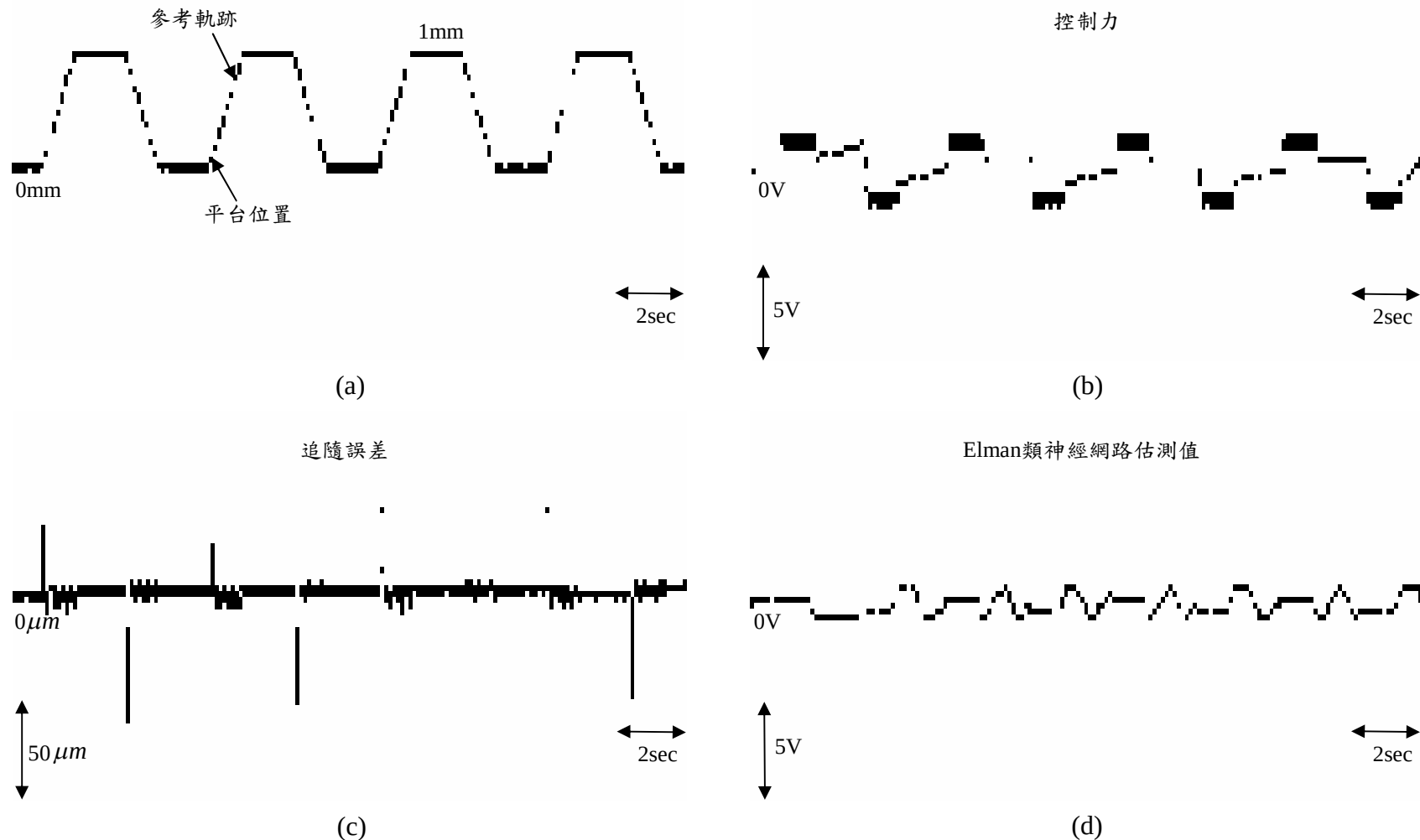


(g)



六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖6.7)



六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

▣ 梯形波軌跡在正常狀況下之實作結果 (圖6.7續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(f)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1

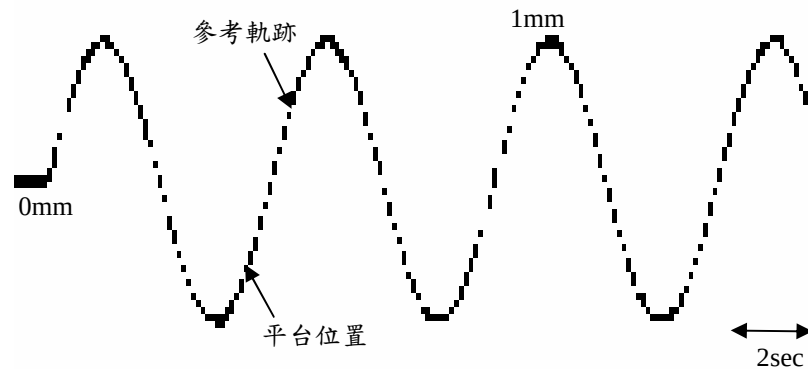


(g)

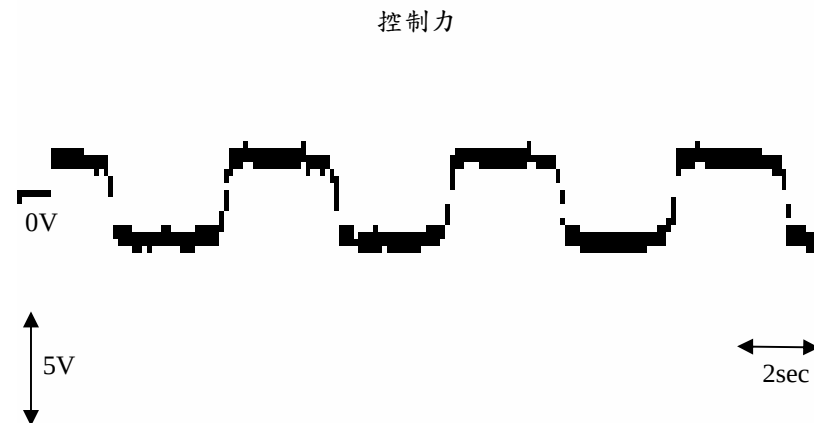


六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

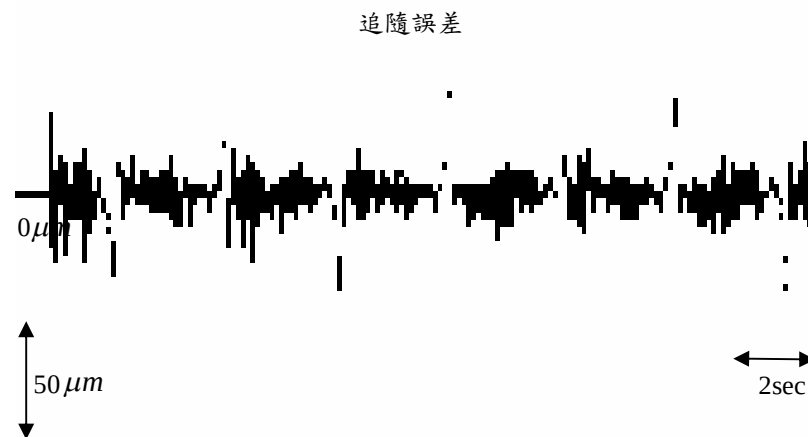
□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖6.8)



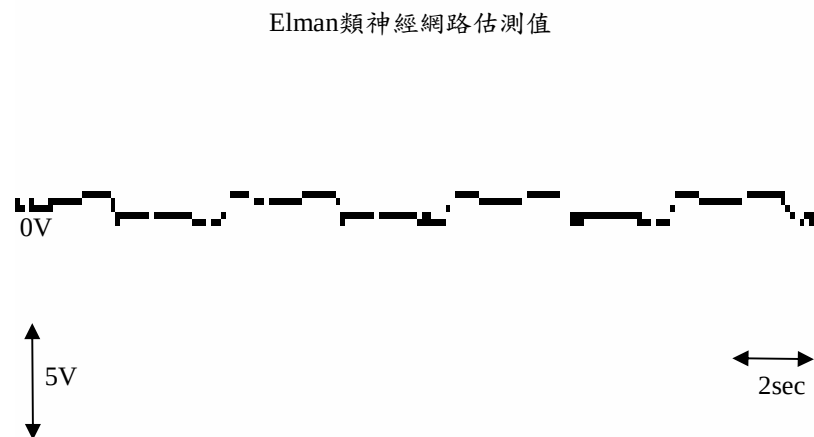
(a)



(b)



(c)

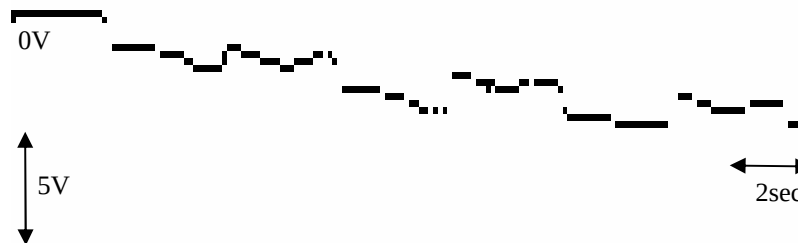


(d)

六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

□ 弦波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖6.8續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(f)

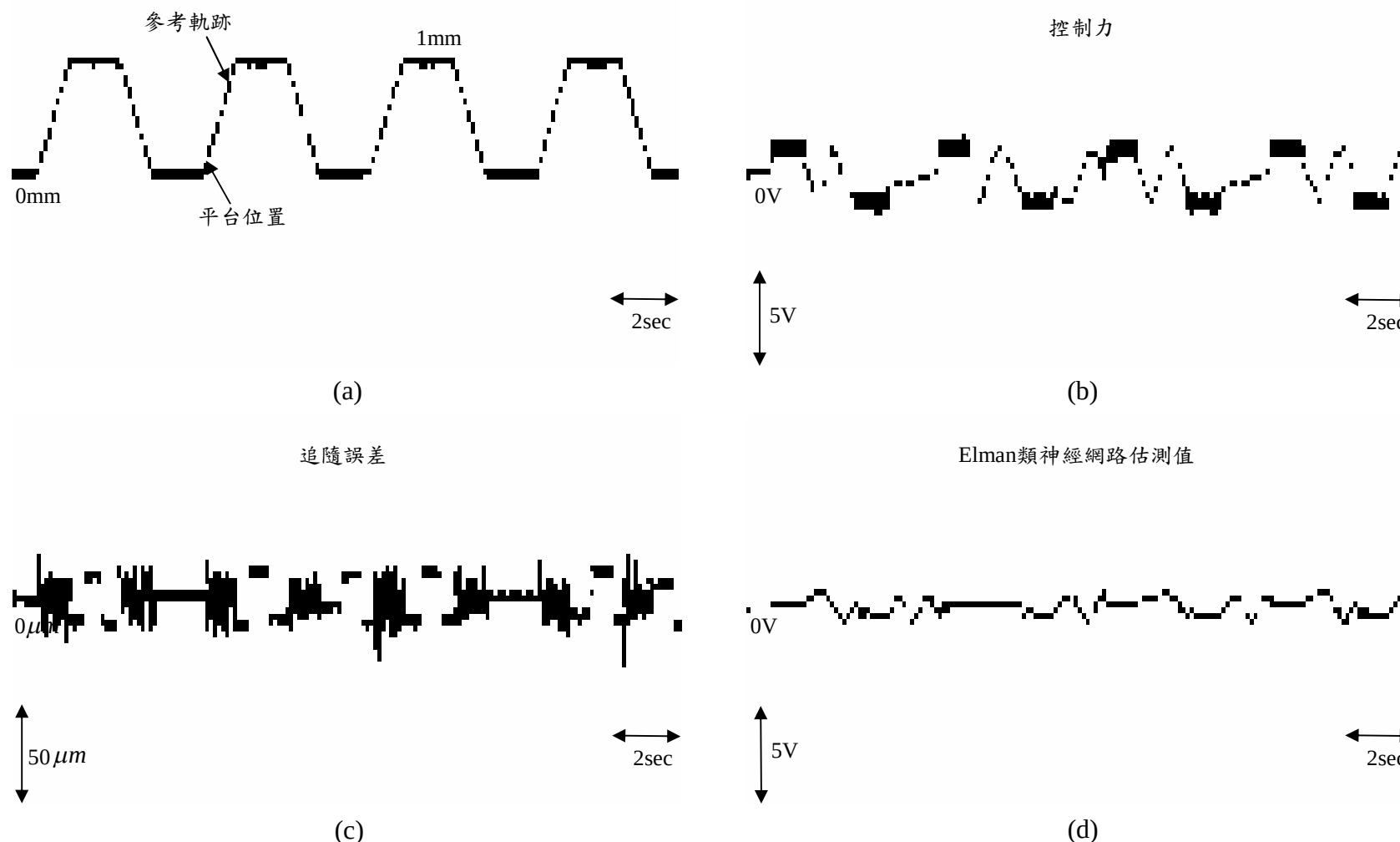
輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1



(g)

六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

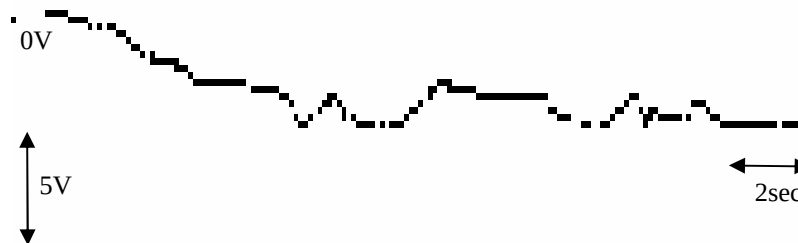
▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖6.9)



六、以FPGA為基礎之Elman類神經網路線型 超音波馬達計算力控制系統(續)

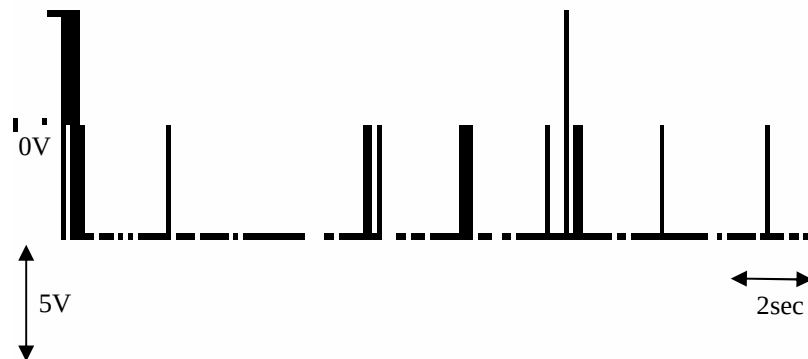
▣ 梯形波軌跡在參數變化狀況下之實作結果 (圖6.9續)

隱藏層與輸出層間之連結權重值 W_{51}^2



(e)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{15}^1



(f)

輸入層與隱藏層間之連結權重值 W_{25}^1



(g)

七、結論與未來研究方向

□ 結論

- 本論文係在發展一個以FPGA為基礎之線型超音波馬達移動平台控制系統，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。
- 首先發展遞迴式小波類神經網路控制器，與Elman類神經網路控制器，但在此兩種控制器中有較大的追隨誤差；同時在前兩種控制器之發展中，對於總集不確定項並無深入去探討，因此提出一Elman類神經網路計算力控制器，利用Elman類神經網路來估測非線性項，以克服總集不確定項所造成的影響。

七、結論與未來研究方向(續)

□ 未來研究方向

- 提高線型超音波馬達移動平台精密定位控制之精準度與頻寬，達到更小之**控制精度**及更快速之**控制頻率**。且建立一**具商業價值**之工業級線型超音波馬達移動平台控制系統，並可朝向**多軸**以上的運動控制方向來研究。
- 發展超音波馬達**驅動類比電路**，甚至將此部份類比電路轉為**FPGA數位電路**內，省掉馬達控制架構電路的體積與成本。
- 實現**浮點運算**之應用，優點在於數值運算上更加準確，缺點為更耗費硬體資源，如何在這兩者當中取捨達到最高效益值，再利用FPGA發展其他強健控制、非線性控制、智慧型控制理論。

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