

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 提出一個新型 CMAC 控制理論，並以 CMAC IC 來實現

### On a New CMAC Control method, and its realization by CMAC IC

計畫編號：NSC 90-2213-E-009-115

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：陳福川 交通大學電機與控制系

#### 一、中文摘要

本計畫的目的主要可以分為系統分析以及硬體設計兩方面。在系統分析方面，本論文研究 CMAC 類神經網路控制系統的控制行為並分析系統的特性。這裡使用 Runge-Kutta 法來模擬受控系統的輸出/輸入特性。CMAC 控制系統不需要關於機械臂的任何資訊，而且可以應付很大的負載變化。當輸入向量緩慢的移動的時候，CMAC 控制器會產生龐大的積分動作。但是當輸入向量快速變化的時候，CMAC 控制器也能有效的產生“遺忘”效應。論文中也證明 CMAC 控制系統能夠在目標位置收斂。在硬體設計方面，本論文規劃了 CMAC 類神經網路控制晶片的架構以及用硬體描述語言 VHDL 做更進一步的實現。在架構設計上，包括引用權重直接定址方式以心縮式陣列(Systolic Array)的結構來實現 CMAC 類神經網路中的映射關係，以及使用線性回饋暫存器(Linear Feedback Shift Register)所具備產生偽亂數的功能來簡化並完成雜湊編碼所能達到的目標等。最後，本論文提供此 CMAC 類神經網路控制晶片平行處理的解決方案，藉以增加晶片內部單元平行處理的套數並做適當的排程來大幅提升不同應用所可能需求的更高處理速度。

#### Abstract

There are two main objective of this paper, system analysis and hardware design. In the aspect of system analysis, the behavior of the CMAC control system has been studied and stability of the system has been analyzed in this thesis. The Runge-Kutta method is adapted to find out the characteristic between output and input of plant. However, the CMAC requires no

information about the robot, and can deal with large variations in load. The CMAC produces enormous *integration* action when the input vector moves slowly in the space, but it can also *forget* efficiently when the input vector moves fast in the space. It is shown that the CMAC control system can converge into the target position. In the aspect of hardware design, on the architecture design and further implementation in Hardware Description Language VHDL have been focused in this thesis. On architecture design, the *systolic array* structure in the proposed Direct Weight Address Mapping method is adapted to implement the mapping relationship in the CMAC neural network. And the hash coding function is simplified and achieved by generating pseudo-random function in the *Linear Feedback Shift Register*. At last but not least, the solution of parallel processing in the CMAC neural network chip is provided, for higher processing speed in accordance to different application.

#### 二、緣由與目的

今日科學最大的挑戰是了解人類腦部的構造，以及感知、學習、動作和記憶的生物性原理，而問題始自於人類腦部極為複雜的構造以及微妙的設計。大部分已建立的知識是關於單一細胞神經元的生化機制等低階運作方式，以及腦部內各式簡單細胞網路間的互動方式。然而，腦部在整個系統層次的運作細節至今亦是一個待研究的課題。從工程的角度，此一研究課題的目的在於嘗試將迄今對於腦部構造的特殊控制機制的了解，應用在機器人等人工智慧控制體上，而且將專注於腦部中跟運動控制相關的部分構造（CMAC 的基礎概

念即源自於人類對小腦支配運動控制上的了解)。此研究論文提出一結合 CMAC 控制器與 PD 控制器的控制架構,設計用以做複雜且精準的運動控制,並將此一改善的演算法配合數位訊號處理中的技術及架構,用最有效的方法映射到硬體架構上,最後設計以 CMAC 改進架構為基礎的晶片系統。

CMAC( Cerebellar Model Articulation Controller) 是模仿人類小腦學習結構的類神經網路控制法則, Albus 建立在小腦模型的基礎上,於 1975 年提出的一種類比人類的小腦的學習結構的控制器(Cerebellar Model Articulation Controller), 簡記 CMAC。就運動控制而言,運動控制需要複雜的非線性、feedback-based 的控制,此外,控制器尚需對於雜訊的處理具有一定程度的強韌性(robust)。J.S.Albus 將小腦對於運動控制的模式以具體的方式模組化。此一控制法則是目前少數能真正做到實際應用的類神經網路法則。[4]它具有很強的記憶與輸出泛化(generalization)能力。最早的傳統型 CMAC 是基於查表法輸入輸出技術的類神經網路,資訊的存儲與恢復類比小腦的聯想記憶與回想(Recall)。

本論文主要可以分為系統分析以及硬體設計兩方面。在系統分析方面,本論文研究 CMAC 類神經網路控制系統的控制行為並分析系統的特性。在硬體設計方面,本論文目標是 CMAC 類神經網路控制晶片的演算法規劃及架構設計,並且用硬體描述語言 VHDL 做更進一步的實現。

### 三、結果與討論

CMAC 控制系統在工業應用上具有很大的潛力,其中主要的原因是因為 CMAC 控制系統具有很快的學習能力。論文中描述了 CMAC 類神經網路控制系統的控制行為而且分析系統的穩定性。CMAC 控制系統可以在路徑追蹤的過程中,有效的降低系統的追蹤誤差;而在點對點的移動控制中,CMAC 控制系統可以提供較快的上升速度、較低的超越量及較短的安定時間。這些結果都再度說明 CMAC 控制系統的優勢。根據所使用的計算架構及學習法則,當輸入向量緩慢的移動的時候,CMAC 控制器會產生龐大的積分動作。但是當輸入

向量快速變化的時候,CMAC 控制器也能有效的產生“遺忘”效應。論文中也證明 CMAC 控制系統能夠在目標位置收斂。在 SoC (System-on-a-chip)已經成為既定趨勢的現今,在此論文中我們選擇嵌入式記憶體來實現 CMAC 類神經網路控制晶片內的記憶單元,同時配合該嵌入式記憶體設計記憶體控制單元,包含此部分以及邏輯電路的設計考量,就 ASIC 設計流程前端的設計經驗而言,將系統映射至晶片的設計這樣的訓練已完善。

### 四、計畫成果自評

針對 CMAC 類神經網路控制晶片的功能測試方面,我們採用的模擬工具為 Mentor Graphic 所提供的 ModelSim 及 Novas 的 Debussy,其中 ModelSim 為主要的模擬器及工具,而模擬的結果可以藉由 ModelSim 將波形 dump 成 Debussy 的 nWave 所支援的波形檔,\*.fsdb 檔。nWave 提供使用者方便的觀察波形方式,並且可以在設定 dump 的檔案中設定整個設計中所要擷取的波形,在 dump 指令後的參數代表該設計模組所需要紀錄訊號的層數,而 0 代表的是整個設計模組以下所有繼承子模組的訊號。

CMAC 類神經網路控制晶片的功能測試流程中,首先會就單一個別元件做 local simulation,以確定單一元件本身的功能正確無誤,完整確實的 local simulation 在模擬測試中是相當必要的步驟,若無法在設計初期及早確定晶片內部元件的個別功能正確,而在設計中段才來做單一元件的除錯工作,將會使得很多工作徒然無功。另一個重點是在於整個設計模組做 global simulation,此一模擬工作將會更確定整個設計模組的完整性及正確性,global simulation 必須使用適當且足夠的 test patterns 來針對整個設計模組做最完整的測試。

CMAC 類神經網路因為局部學習的特性,因而具有極為快速學習的效果,在局部學習的部分,最直接影響 CMAC 類神經網路處理速度的是參數產生量(generalization)。而此一參數的選取可以針對不同的 application 做最佳化的選擇。圖 5-22 所提供的是以軟體模擬 CMAC 類神經

網路控制晶片架構對於同一狀況的控制結果。CMAC 類神經網路控制晶片的邏輯部分是以硬體描述語言 VHDL 建構而成，配合 CIC 所提供的函式庫 cell library Compass 3.0 做合成，得到 gate-level netlist 的模擬結果如圖 5-21 所示。

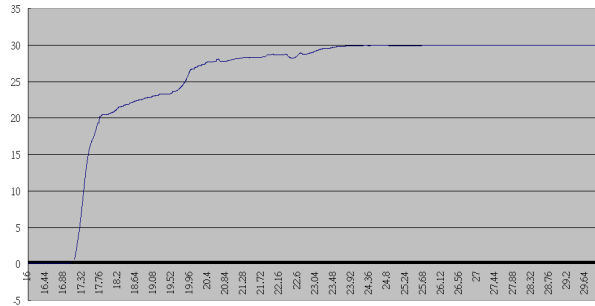


圖 5-21 CMAC 類神經網路控制晶片的模擬結果

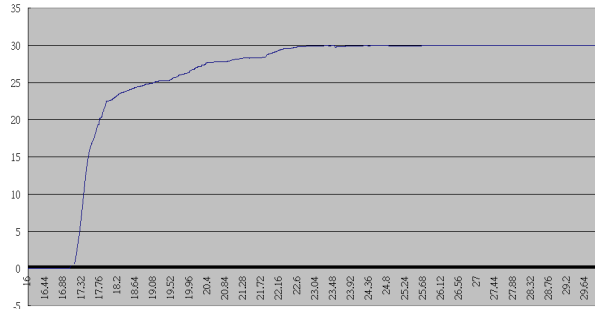


圖 5-22 以軟體模擬 CMAC 類神經網路控制晶片架構的模擬結果

## 五、參考文獻

[1] J. S. Albus, "A New Approach in the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 220-227, Sep. 1975 .

[2] J. S. Albus, "Data Storage in The Cerebellar Model Articulation Controller", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 228-233, Sept. 1975

[3] *Martin.C.*,  
" [http://ai.iit.nrc.ca/~martin/talks/bio\\_1](http://ai.iit.nrc.ca/~martin/talks/bio_1)

*earning\_control*], " , 1998

[4] W. T. Miller, "A nonlinear learning controller for robotic manipulators," in *Proc. SPIE, Intell. Robots and Computer Vision, vol. 726*, pp. 416-423, Oct. 1986.

[5] W.T. Miller, F.H. Glanz and L.G. Kraft, "Application of a General Learning Algorithm to the Control of Robotic Manipulators," *International Journal of Robotic Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 84-98, 1987

[6] W.T. Miller, R.H. Hewes, F.H. Glanz and L.G. Kraft, "Real-Time Dynamic Control of an Industrial Manipulator using Neural-Network-Based Learning Controllers," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 1-9, Feb. 1990

[7] F.-C. Chen and C.-C. Liu, "Adaptive Control of Nonlinear Continuous-Time Systems using Neural Networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 1306-1310, June 1994.

[8] F.-C. Chen and H.K. Khalil, "Adaptive Control of a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems using Neural Network," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 791-801, May 1995.

[9] F.L. Lewis, A. Yesildirek, and K. Liu, "Multilayer Neural-Net Robot Controller with Guaranteed Tracking

Performance,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, pp. 1-11, Mar. 1996.

- [10] G.A. Larsen, S. Cetinkunt and A. Donmez, “CMAC Neural Network Control for High Precision Motion Control in the Presence of Large Friction,” *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, pp. 415-420, Sep. 1995.
  
- [11] H. Shiraishi, S.L. Ipri and D. Cho, “CMAC Neural-Network Controller for Fuel-Injection Systems,” *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 3, pp. 32 – 38, 1995
  
- [12] F.-C. Chen and C.-H. Chang, “Practical Stability Issues in CMAC Neural Network Control Systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 86-91, January 1996.

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※

提出一個新型 CMAC 控制理論，並以 CMAC IC 來實現  
On a New CMAC Control method, and its realization  
by CMAC IC

※※※

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2213-E-009-115

執行期間：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

計畫主持人：陳福川

共同主持人：

計畫參與人員：竇振誠

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：交通大學電機與控制系

中 華 民 國      91 年      10 月      9 日

