

多重足球機器人系統之設計與製作

文／黃漢邦* 游章釗 呂冠儒**（國立台灣大學機械系機器人實驗室）

* 教授 ** 研究生

1. 前言

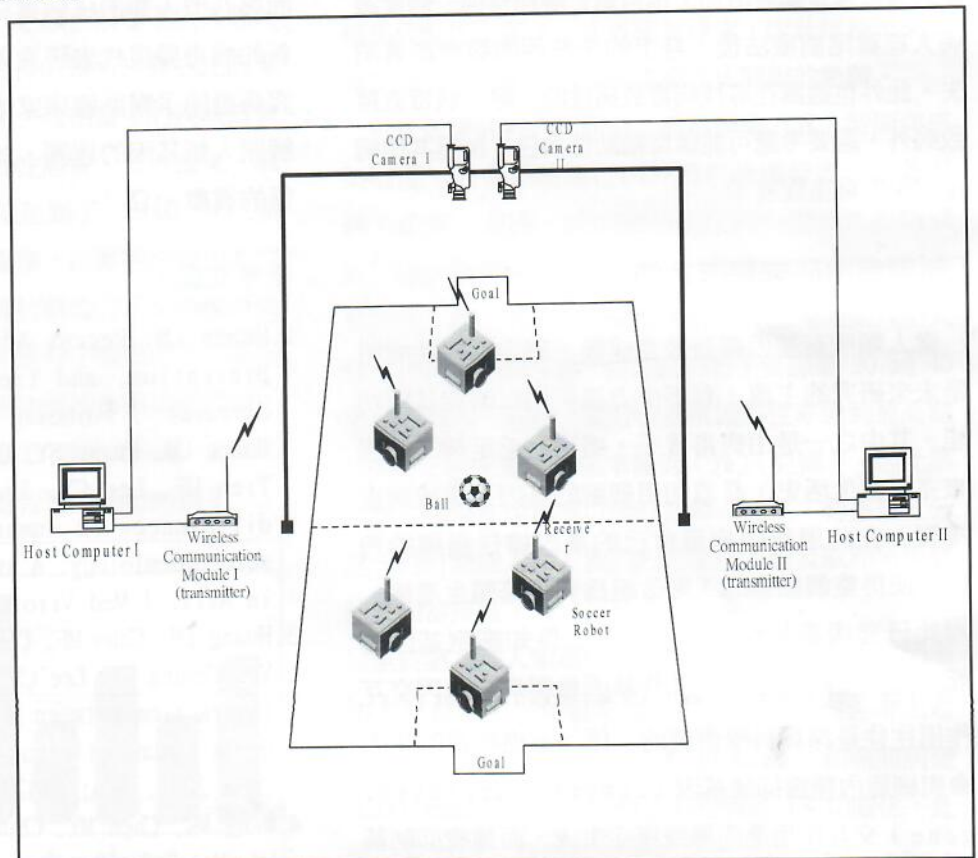
本文將對敝實驗室建構之多重機器人踢足球系統——NTU-Formosa做一概要性介紹。建構此一系統的目標在於發展出能在高度未知與動態環境下有效地完成協同工作的影像伺服多重機器人系統，並參加MIROSOT（Micro Robot Soccer Tournament）所舉辦的機器人足球賽，以挑戰在高度未知與動態環境中達成任務的目標。此系統的發展可用來試驗與開發相關領域的理論與技術，例如即時決策、型態識別、無線電通訊、影像伺服、機電整合系統、運動控制、感測器融合、多重機器人之協同式與競爭式工作以及行為動作之學習等等。在MIROSOT國際比賽中，NTU-Formosa已以相當不錯的成績證明了其性能。

目前有很多實際應用在足球競賽的多重機器人系統皆有不錯的表現，而本實驗室所發展的多重機器人系統則是對於視覺系統與運動決策有更進一步的改善。本計畫所發展的系統具有下列特點：影像伺服、集中式控制、輕巧的機器人本體以及模組化設計；此系統是由下列四個子系統所組成：多重機器人、視覺系統、無線電通訊系統以及主控電腦。

2. 系統架構

NTU-Formosa 足球機器人系統是由下列四個子系統所組成：多重自走型機器人、視覺系統、無線電通

信系統以及主控電腦。圖一為兩隊NTU-Formosa進行足球競賽的示意圖。在圖一中，每隊NTU-Formosa共有三隻自走型足球機器人（以下簡稱足球機器人）；CCD攝影機捕捉整個足球場的影像資料並送至主控電腦，再由主控電腦分析影像資料以決定足球場目前的狀況，包括球與足球機器人的位置、方向與速度；根據足球場的現況，主控電腦決定所要採行的足球策略以及每隻足球機器人的動作，然後將速度命令經由無線電通訊系統傳給每隻足球機器人；每隻足球機器人則根據所收到的速度命令來調節左右兩輪的速度。上述的運作流程即構成一個命令週期，此命令週期所需的時間可做為預測球場即時狀況的時間補償。



圖一 足球競賽系統之示意圖。

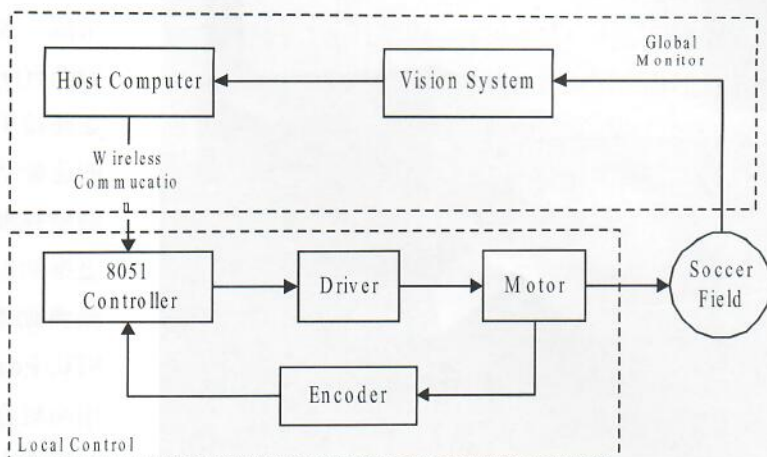
整個系統運作的方塊圖示於圖二，由圖二即可了解一個命令週期的運作流程。在圖二中，全域的監控工作（Global Monitoring）包括高階的運動控制，是交由視覺系統與主控電腦來執行；而區域的控制工作（Local Control）包括低階的運動控制，則是交由足球機器人上的 8051 單晶片控制器來達成。全域監控與區域控制各自構成一個回授控制系統，而兩者之關係為區域控制包含於全域監控之中；因此，全域監控為外迴路（Outer Loop），而區域控制則為內迴路（Inner Loop）。

由圖一及圖二可知，NTU-Formosa 中的足球機器人為遠距腦（Remote Brain）的型態，亦即環境的辨識、足球策略與動作的決策以及運動軌跡的規劃皆在遠端的主控電腦中來執行。

3. 足球機器人機構

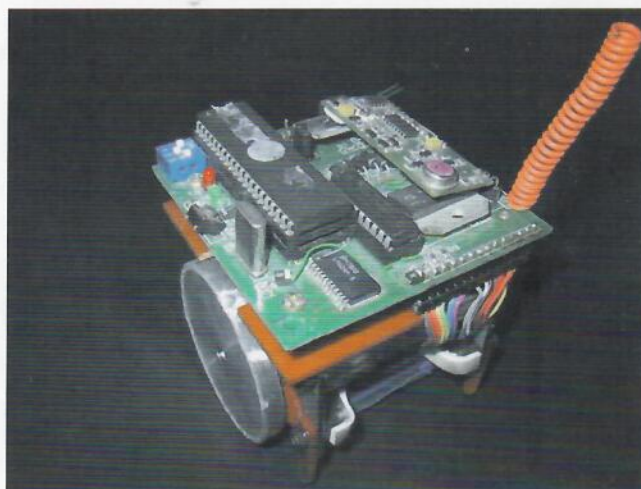
足球機器人的機構設計主要需考慮下列三個重要因素：體積、強韌性與效率。在正式的機器人足球競賽例如 RoboCup 與 MIROSOT 中，足球機器人的體積大小皆有其限制。在 MIROSOT 中，每隻足球機器人的體積大小皆須在 $7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm}$ 之內，NTU-Formosa 中的足球機器人即是遵循這個規定。因此，在選用機器人本體的零組件時，必須考量到體積大小的問題。為了減少電路板的體積，足球機器人大部份的電子零件均為表面黏著的型式，而電路的設計則以盡量簡化為原則。為了要減少齒輪組的體積，必須在機構設計上盡量減少機構的複雜度，本計畫中的足球機器人僅以簡單的減速齒輪機構來傳遞由馬達至車輪的轉矩。簡化電路與機構設計的結果，不但是減少了足球機器人的體積，也增加了足球機器人的效率與穩定性。由於在機器人足球競賽中無法避免激烈的碰撞，在足球機器人的機構設計與材料選用上必須做耐撞的考量。

本實驗室發展之第一代足球機器人是以前三層的隔板與支柱來形成機器人的骨架，馬達與齒輪組是採用遙控飛機用的伺服馬達，一個足球機器人上共有二組馬達與齒輪組，分別負責左輪與右輪。足球機器人骨架的底層放置馬達、編碼器（Encoder）與齒輪組，中層放置兩排電池，而上層則放置電路板與無線電接收裝



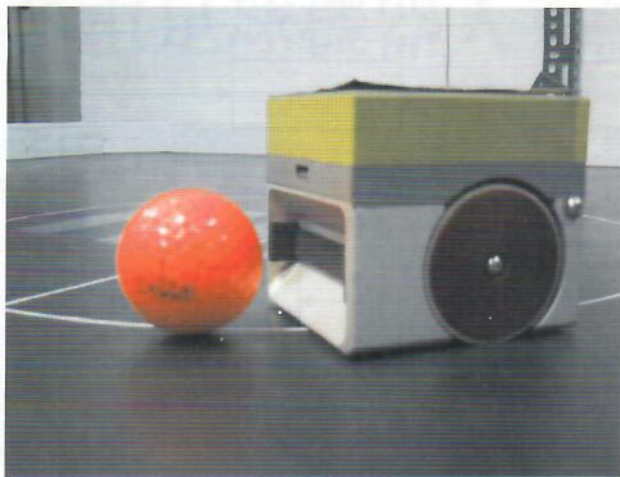
圖二 系統運作之方塊圖。

置。此種配置方式的優點是重量大部份集中於底層而可以降低足球機器人的重心，避免在轉向或碰撞時翻倒。支撐架的設計採用組合式，可以在比賽時快速更換外殼零件，減速齒輪也因此而能快速地更換。一個足球機器人的重量約為 290 公克。整個足球機器人的實體模型如圖三所示。



圖三 第一代 NTU-Formosa 機器人本體照片。

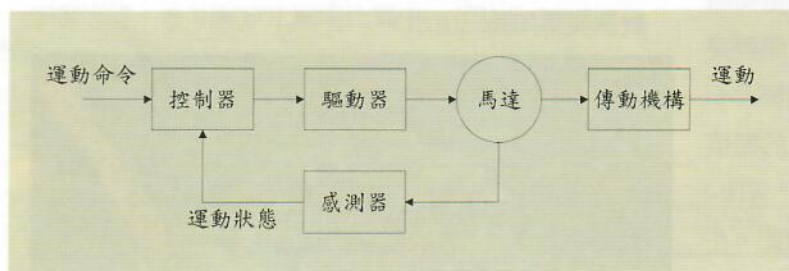
然而在實戰中，我們發現組合式機殼的抗衝撞性相當差且齒輪磨耗的嚴重程度也超乎我們的想像，在時間與人力限制下，對於此系統的發展乃先針對影像伺服系統與運動決策系統的改善為主，足球機器人本體則是外購自韓國，至於新一代自製機器人則是下一階段的改進目標。雖然外購的機器人具有較佳的抗撞性與性能，但基本的控制架構仍與本實驗室設計之第一代機器人大同小異。圖四是目前使用的機器人本體照片。



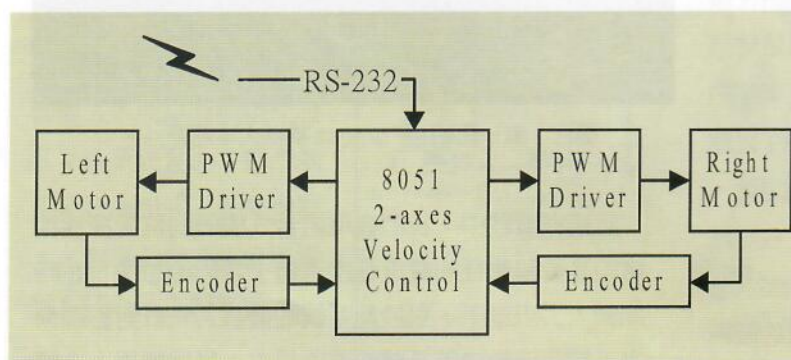
圖四 韓國製足球機器人本體照片。

4. 控制與通訊系統

4.1. 運動控制系統



圖五 運動控制方塊圖。



圖六 足球機器人上的運動控制系統。

本計畫所使用的足球機器人，是以兩個直流馬達分別帶動左右兩個輪子，使得足球機器人能進行前進、

轉彎等運動。在運動系統中，馬達提供系統動力的來源，並負責產生運動，馬達運動控制的流程圖示於圖五。在圖五中，感測器量得馬達的運動狀態，並將結果傳給控制器；控制器根據運動命令及目前的運動狀態，以控制理論算出控制訊號，並將結果送至驅動器；驅動器將控制訊號的能量放大，並以之推動馬達依照規劃的軌跡運轉；馬達的運轉軌跡經傳動機構轉換後，即能得到所規劃的運動。在 NTU-Formosa 中，每一隻足球機器人的運動控制是由兩組直流小馬達及編碼器所組成，它們構成了足球機器人上的回授控制系統，目的在於執行精確的速度控制。圖六為足球機器人上的運動控制系統。

在圖六中，主控電腦經由無線通訊模組及 RS-232 將運動命令傳送給單晶片處理器 8051，而 8051 在處理運動命令及編碼器的訊號後，再將脈衝訊號 (Pulse Signal) 送至 PWM 驅動器以推動及控制馬達。上述功能所需的控制、通訊、及相關週邊電路均佈線於足球機器人上層的 PCB 印刷電路板上。

4.2. 無線電通訊系統

為了讓足球機器人能自由在地四處游走運動控制命令不能以線控的方式傳至足球機器人上，必須經由一組無線電通訊模組來傳送與接收控制命令。無線電通訊的應用非常廣泛，常見的包括家庭與公司行號的保全系統、火災警報、未知與危險環境的資料傳輸、工業製程的遠端監控、機電設備的遠端控制、醫院警示與呼叫系統以及車庫搖控門等等。目前市面上的無線電通訊產品組的型式在銷售，一個無線電通訊模組包含了一個無線電發射模組 (Radio Transmitter Module) 以及一個無線電接收模組 (Radio Receiver Module)。無線電發射模組將數位命令信號調變 (Modulate) 成無線電信號 (Radio Signal)，再將訊號傳給無線電接收模組；

無線電接收模組接到訊號後，再將無線電信號解調 (Demodulate) 成原來的數位命令信號。在 NTU-Formosa 中，考量實際的需要以及空間與成本的節省，主控電腦採單向無線電通訊的

方式與足球機器人的溝通，意即主控電腦只負責發射訊號，而足球機器人只負責接收訊號。

無線通訊系統設計上最重要的兩個問題是體積與信號的穩定性。由於足球機器人體積上的限制，在其上無線電接收器的體積必須最小化。一般而言，接收端電路遠較發射端電路來得複雜，所以接收端所佔體積也會相對地大出許多，這使得自製 NTU-Formosa 的無線電通訊系統的難度增加許多。因此本計畫決定採用市面上商品化且模組化的產品，這不但在發射與接收訊號的穩定性上較有保障，而且也可選購到輕巧的產品以滿足體積限制上的需求。

無線電訊號可以調幅 (AM) 或調頻 (FM) 兩種模式來傳送，但因其中調幅容易受到環境空間配置的影響而使接收品質不良，故本計畫採用調頻為信號傳送的模式。調頻中又可分為 UHF 與 VHF 兩個波段，因為考慮 VHF 較易受到外界環境的干擾，故本計畫採用 UHF 波段的無線電通信。考慮上述兩項因素，NTU-Formosa 在參考目前市面上所售的無線通訊模組後，決定採用英國 Radiometrix 公司所生產的 TXM-418-A 發射模組以及 SILRX-418-A 接收模組，這兩個模組是設計來搭配使用的，如圖七所示。

在圖七中，右上角的接收模組要比左下角的發射模組來的大。無線電的傳輸距離會隨著所使用的天線及操作環境而改變，若使用較小的天線、有干擾存在或環境有障礙時，有效的傳輸距離就會下降，若發射模組使用較高的天線、接收模組使用較大的天線或以較慢的速度傳輸資料時，有效的傳輸距離就會提高。這個產品的發射與接收模組都是完整的元件，只需要 8051 的一個接腳便可使用。惟一的缺點是這個產品使用時需要再調整，而且並不是十分方便，若是調整得不正確，這個產品的可靠度便會降低許多。

5. 視覺系統與主控電腦

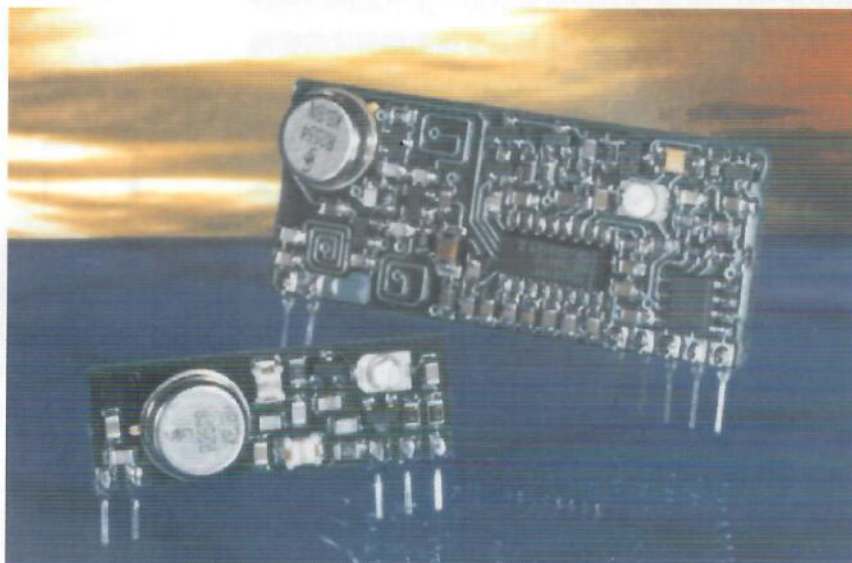
NTU-Formosa 的視覺系統包含 CCD 攝影機、影像擷取卡與影像處理函式庫三部份。在機器人足球競賽中，CCD 攝影機懸掛於足球場上方以持續地捕捉足球場的

影像，並將所得影像傳給位於主控電腦 PCI 插槽上的影像擷取卡；影像擷取卡將影像數位化後，將結果存於主控電腦的記憶體中。主控電腦以影像處理函式庫為基礎，分析足球場的數位影像以獲得關於足球比賽的重要資訊：足球機器人與球的位置和速度。根據這些重要資訊，主控電腦以其決策系統決定現行的策略與動作，並以其控制系統來控制足球機器人執行所決定的動作。

5.1. 視覺系統

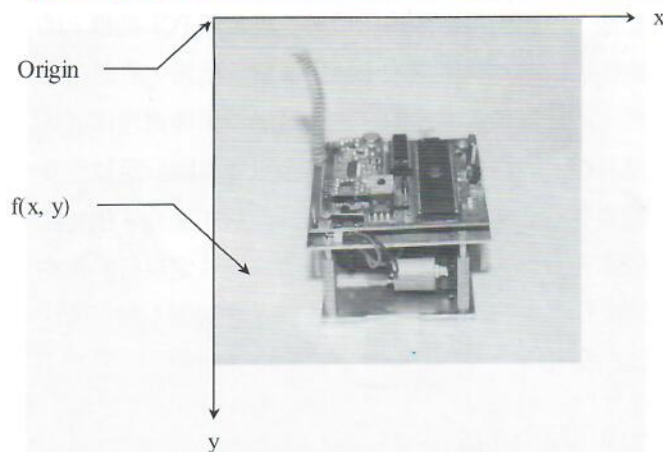
視覺系統是指可擷取及處理影像的系統，本計畫的視覺系統只針對數位影像來做處理，並以圖八中的二維影像為例，來說明影像及數位影像定義。

在圖八中， x - y 座標為影像座標， (x, y) 代表二維空間上的一點； $f(x, y)$ 的值代表影像在座標 (x, y) 的明亮度，且與明亮度成正比。若一個影像中每一點都只包含著明亮度的資訊，則稱此影像為灰階影像。 $f(x, y)$ 即為所定義的二維灰階影像，它代表著灰階影像明亮度在空間上的分佈。一影像若為數位影像，則其空間座標及座標上的影像資訊皆被數位化或離散



圖七 Radiometrix 公司的無線電發射模組 (左下) 與接收模組 (右上)。

化，亦即空間座標只能在均勻分佈的空間格子點上，而影像資訊只能為均勻分佈的明亮度格子點上的一點。灰階影像的影像資訊只有明亮度，而彩色影像的明亮度則包含了 RGB (紅、綠、藍) 三原色的明亮度。以 $640 \times 480 \times 8$ 的灰階數位影像為例，影像座標只能



圖八 定義影像及數位影像的二維灰階影像。

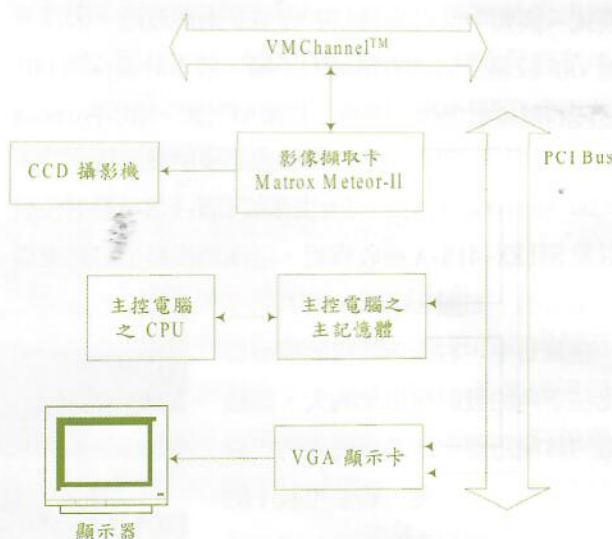
落在 (i, j) $i=1, 2, \dots, 640, j=1, 2, \dots, 480$ 的格子點上，而以 8 個位元來代表每一點上的影像資訊 - 明亮度，因此每一點的明亮度只能為 0, 1, ..., 255=28-1，其 0 中代表全黑，而 255 代表全白。

視覺系統是 NTU-Formosa 的重要回授感測器，其反應速度與影像解析度是整個系統表現優劣的重要關鍵。本系統所採用的 CCD 攝影機為 JAI 公司所生產的 CVS-3200 彩色攝影機。本系統所採用的影像擷取卡是 Matrox 公司出品的 Meteor-II。對灰階影像而言，Matrox Meteor-II 將 CCD 攝影機傳來的影像資料轉換成 $640 \times 480 \times 8$ 的數位影像資料，亦即每一個長方形的數位影像畫面為水平 640 個像素、垂直 480 個像素，而每一個像素由 8 位元來表示其 256 個灰階值 (0 ~ 255, 28)。同理，對彩色影像而言，Matrox Meteor-II 將 CCD 攝影機傳來的影像資料轉換成 $640 \times 480 \times 24$ 或 $640 \times 480 \times 32$ 的數位影像資料。Matrox Meteor-II 與支援快速線性記憶體存取 (Fast Linear Memory Access) 的 VGA 顯示卡搭配，可不經主控電腦的 CPU 而直接將數位影像資料傳給該 VGA 顯示卡，以進行即時影像顯示；若與其它類型的顯示卡搭配，則 Matrox Meteor-II 須透過主控電腦的 CPU 來將數位影像先暫存至主控電腦的主記憶體，然後再將影像資料傳至 VGA 顯示卡，如此只能進行虛擬的 (Pseudo) 即時影像顯示。以 Matrox Meteor-II 為主的影像系統架構圖示於圖九。

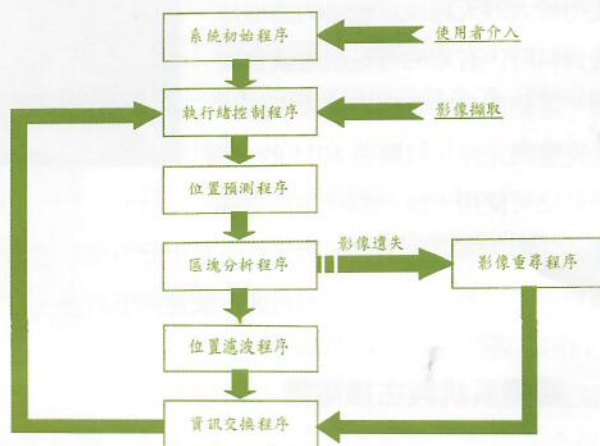
在圖九中，主控電腦的 CPU 與記憶體、VGA 顯示卡以及影像擷取卡 Matrox Meteor-II 之間是靠 PCI Bus 來傳送資料，而 Matrox Meteor-II 与其它 Matrox 公

司的影像擷取卡或影像處理卡之間則是靠 VMChannel 來傳送資料；PCI Bus 中的虛線代表著 Matrox Meteor-II 直接與間接透過 VGA 顯示卡顯示數位影像資料的管道。

本系統所採用的影像處理程式庫是 Matrox 公司出品的 MIL (Matrox Imaging Library) 6.1 版，這是一套相當完整且功能強大的影像處理軟體，具有影像前處理、型樣比對、區塊分析、量測、繪圖以及顯示等等功能。MIL 這套影像處理軟體須與程式語言發展工具來搭配，才能開發出視覺系統的應用程式，可搭配的程式語言包括 Visual C++、Borland C++ 以及 Visual Basic，本系統是以 Visual C++ 6.0 為程式語言開發工具。圖十是整個影像伺服系統的處理架構。



圖九 影像系統之架構圖。

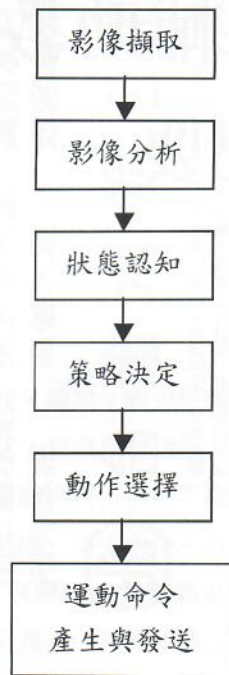


圖十 NTU-Formosa 影像處理架構。

5.2. 主控電腦

主控電腦從視覺系統接收足球場的影像資訊，然後對所得影像進行分析以便進行足球策略與動作的決策，最後再將運動命令透過無線電通訊系統傳給其所監控的每一隻足球機器人。因此，主控電腦包含了影像處理軟體、決策與控制系統以及無線電通訊介面。主控電腦可說是 NTU-Formosa 的中央控制器，所有的足球機器人策略與

動作皆由主控電腦決定。圖十一為主控電腦運作的方塊流程圖。由圖十一可知，NTU-Formosa 的決策系統是由策略決策與動作決策所組成。以足球場的資訊做為回授訊號，而以運動命令作為驅動訊號來控制足球機器人，足球機器人的動作會改變足球場的環境，以上資訊流程構成一個循環，所以圖十一中的系統為一回授控制系統。



圖十一 主控電腦運作之方塊流程圖。

6. 系統性能實戰表現

國際足球機器人聯盟(Federation of International Robot-soccer Association)是一個世界性的微型足球機器人競賽組織，每年都會舉辦比賽，邀請各國大學參加。NTU-Formosa 在 2000 年的澳洲賽中，因機器人之耐用性不足而無緣晉級決賽。在改採新型機器人並重建影像伺服系統與運動決策系統後，於 2001 年 3 月在阿拉伯聯合大公國的杜拜市所舉行的 FIRA ISI-Robot Soccer Championship 中，終於獲得第二名的成績。這次比賽共有八國八隊參與，分別是台灣，韓國，新加坡，菲律賓，英國，德國，波蘭及奧地利，相較之下歐洲的隊伍較亞洲的隊伍實力差了许多。NTU-Formosa 在預賽中分別勝波蘭及英國晉級決賽，而在另一分組，德國及奧地利則雙雙遭韓國及菲律賓所淘汰，因此決賽前四強皆是亞洲隊伍，其中以本隊隊齡最年輕。準決賽中，台灣隊遭遇強隊韓國，終場以 2:2 進入延長賽，最後以 3:2 氣走韓國，使得韓國僅能跟輸給新加坡的菲律賓爭第三位。決賽中，我國以 5:7 輸新加坡，得第二位，而韓國以 11:2 勝菲律賓得第三位。

由於此足球機器人競賽是由韓國所發起，韓國國內有相當多大專院校投入其中的研發，因而在往年的國際競賽中，韓國代表隊的成績一向極為突出。在這次的賽事中，雖然我們僅能獲得第二名的成績，但能擊敗韓國隊，代表本系統在性能與穩定度上，皆有相當不錯的水準。而在與新加坡的比賽中，由於有幾次操作上的人為失誤造成數分的失分，則是相當令人遺憾之處。

7. 結論與未來發展

本實驗室建構了一影像伺服多重機器人系統，系統中的多重機器人可在未知與動態的環境中共同協力完成指定的工作，即參加足球競賽並完成贏球的任務。在實際國際比賽中，本系統以相當不錯的成績證明其可靠度與優越性。

NTU-Formosa 是以全域監視及集中式控制的方式來監控其足球機器人，意即足球機器人本身只有低階運動控制但並無偵測環境的能力。在未來的發展中，可朝向分散式視覺系統與獨立控制來建構新一代機器人架構，而達到具備高度自主性與機上視覺(On Board Vision)能力的多重機器人系統。

對決策系統、型樣識別、影像處理、自主學習、運動控制等研究主題來說，NTU-Formosa 系統是很好的測試與發展環境。為了要贏得高度競爭性的比賽，所需要的策略與演算必須具備即時性、智慧型、可靠、強韌以及隨機性。本實驗室會持續發展具備些能力的策略及演算法，並以 NTU-Formosa 驗證之。Ω

參考資料

1. T. Y. Kuc, and S. M. Baek, "Robust Learning of Mobile Robotic Motion," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 677 -682, 1999.
2. K. J. Lu, "Real-Time Visual Servoing Systems and Applications in Multi Agent Robot Soccer Systems", Master thesis, Department of mechanical engineering, National Taiwan University, 2001.
3. B. J. Lee, S. O. Lee, and G. T. Park, "Trajectory Generation and Motion Control for The Robot Soccer Game," *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1149-1154, 1999.
4. M. Veloso, M. Boeling, S. Achin, K. Han, and P. Stone, "The CMUnited-98 Champion Small Robot Team," *RoboCup '98*, Springer Press, Berlin, 1999.
5. M. Wargui, and A. Rachid, "Stability of Real-Time Control of An Autonomous Mobile Robot," *5th IEEE Intl. Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 311-316, 1996.
6. C.C. Yu, "Coordination and Control of Multi Agent Systems for Robot Soccer", Master thesis, Department of mechanical engineering, National Taiwan University, 2001.