

1999 TI ASIA DSP SOLUTIONS CHALLENGE

書面報告

多機器人合作系統於機器 人足球之應用

參賽隊伍：交通大學電機與控制工程學系碩士班

智慧型系統控制整合實驗室

(<http://ISCI.cn.nctu.edu.tw>)

參賽人員：唐志青 林俊育 陳宏庭 陳互志*

指導老師：宋開泰 教授

*大學部應屆畢業班

摘要：

我們這次參加 1999 TI DSP Solution Challenge 競賽的題目是”多機器人合作系統於機器人足球之應用”，運算核心使用德州儀器的 TMS320C32 DSP 晶片。DSP 晶片廣泛用於聲音，影像及其他數位訊號的處理及應用，然而基於 TMS320C32 DSP 晶片強大的運算能力，我們將其運用在分散式人工智慧的應用上，以研究多機器人系統的行為表現。研究方向共分為四大部分：多機器人合作與競爭行為研究，影像的辨識與座標計算，機器人本體的設計與製造以及通訊協定的制定。我們給這個系統一個代號 ”Emerge”，在本文中，我們主要介紹 Emerge 的硬體設計以及多機器人系統的行為研究，包括行為選擇機制和學習方法，以有效的完成多機器人間的合作行為，並以有趣的模擬及實體足球比賽方式進行實驗。

1.介紹：

在過去十多年間，多機器人系統 (Multi-robot system) 的探討始終沒有間斷過。從 1970 年代起就開始有 Multi-agent system 的研究，然而僅僅只是純粹就軟體去討論，直到 1980 年才出現在機器人實體上，我們稱之為多機器人系統。研究多機器人系統的領域可概分為兩類，多機器人的合作與多機器人的競爭。在多機器人合作系統中，由可能各不相同的機器人組成團隊去完成某個特定的任務，而且這些機器人具有某方面的能力可以自動的進行工作；此外他們也能依據環境的狀況動態的變化角色。例如危險物品清除、地板清潔、貨物運輸等都是多機器人合作的例子。

另一個研究的領域是多機器人的競爭。在這個系統中，機器人不只靠合作來完成任務，同時還要面對來自另一組機器人團隊的競爭，實際的應用包括了運動或戰爭等對抗性的活動。機器人團隊為了獲勝，必須有能力干擾或阻止對方執行任務。然而在這樣的條件下，往往造成雙方皆使用破壞性的手段導致彼此任務失敗，因此在競爭中需要有合宜的規則規範。此外，競爭通常利用執行績效來判斷能力高低，譬如分數及完成時間。與純合作的多機器人系統相較，競爭的多機器人系統有幾個潛在優勢。首先，為了與另一隻隊伍對抗，機器人團隊必須發展出特別的因應能力。此外，執行績效的衡量使機器人的行為有一個明確的評估標準，有助於以後的訓練和學習過程。我們希望藉著競爭的多足球機器人系統，去探討人類的群體智慧，並將之引入機器人中。

2.系統概述：

足球機器人系統包括一支由三隻機器人組成的隊伍、一個全域性的影像系統、一部主電腦和一個無線通訊系統。球場上方的 CCD 攝影機連續擷取球場中的影像並傳送至主電腦，接著主電腦分析影像資料且利用影像辨識技術找出重要的部份，如足球及各機器人的位置、各機器人的方向等。根據這些資料，主電腦即可決定出各機器人下一時刻的運動狀態，並透過無線通訊系統通知各機器人運作。在這種運作模式下，足球機器人系統構成了一個閉迴路的控制系統。

整個系統的示意圖（圖 2-1）及方塊圖（圖 2-2）如下：



圖 2-1 系統示意圖

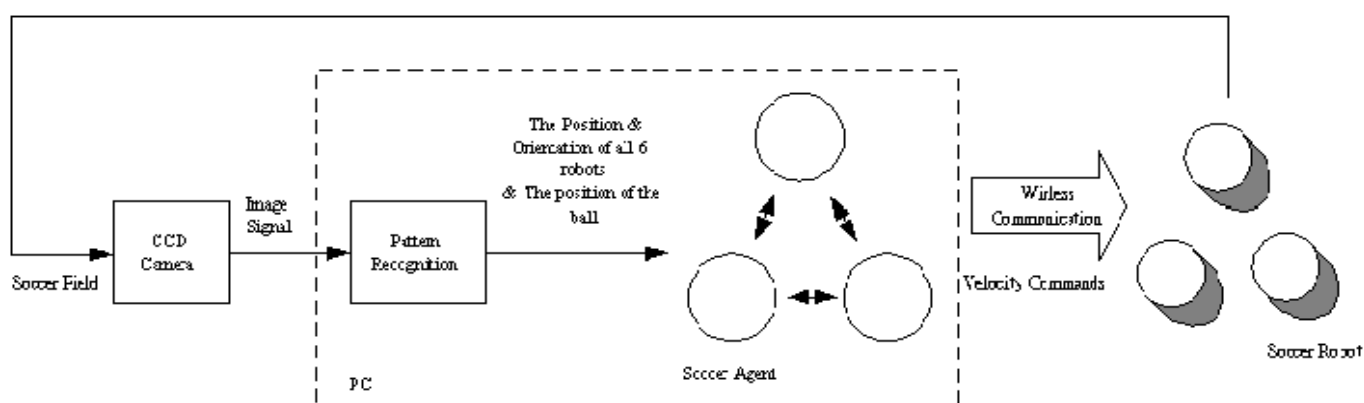


圖 2-2 系統方塊圖

2.1 機器人本體：

機器人的外型是根據 Robocup 小型機器人聯盟的規定設計（寬 11cm，高 16cm，深 15cm）。最下層為動力部份，由一組（兩邊各一個）直流馬達、減速齒輪箱、軸解碼器、H 橋式驅動器及一對差動輪組成，前後並安裝了兩組惰輪以維持平衡。直流馬達由兩個 LM629 馬達控制 IC 控制，當 LM629 接收到速度命令後，根據 PID 法則產生適當的 5 伏 PWM 驅動訊號，此訊號再經過 H 橋式驅動器生至 12 伏送至直流馬達。當馬達旋轉時，後方的軸解碼器將馬達運動狀態資料回授至 LM629，形成兩組閉迴路控制系統。

中間為機器人的運算核心，此部份主要由德州儀器所製造的 TMS320C32 DSP 及一組高速 SRAM 所組成，外部工作時脈為 50MHz，浮點運算能力為 50MFLOPS，這部份在後面章節會有更進一步的介紹。最上層則為負責通訊的無線數據機，使用 RS232 傳輸介面，負責做機器人與主電腦間的通訊，在主電腦端也有一組相同的無線數據機。圖 2-3 為足球機器人的系統方塊圖。

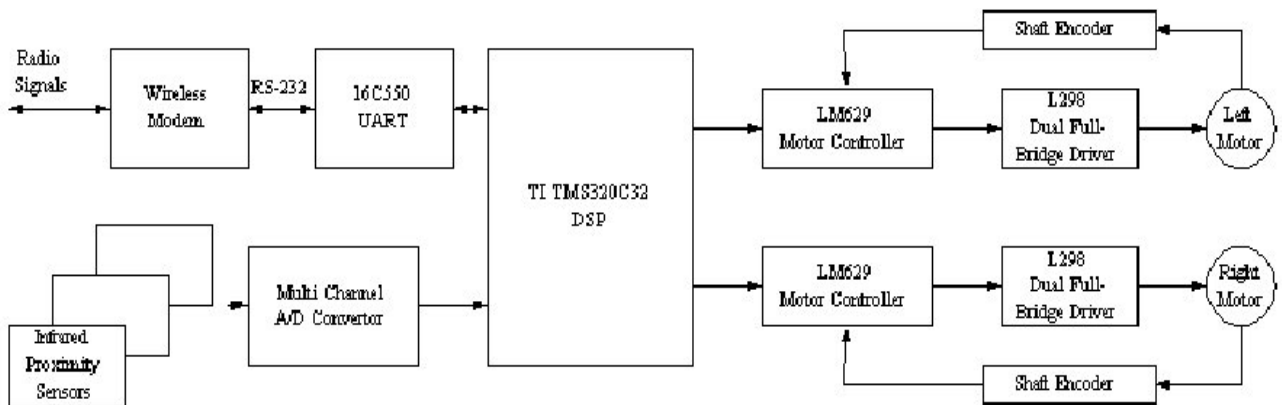


圖 2-3 足球機器人的系統方塊圖

2.2 全域影像系統：

影像系統負責收集必要的環境資料及系統狀態，包含一架 CCD 攝影機，一個插在主電腦上的影像擷取卡以及一個影像辨識程式。為了方便影像辨識程式求取機器人的位置和方向，我們在每一隻機器人都貼上兩個圓形紙片。兩個圓形紙片的顏色分別代表隊別及球員號碼。藉由這兩個圓形的圓心連線，即可獲知某隊的某一機器人之位置及方向。影像失真是一個需要解決的問題。由於要取的所有球場上的影像資料，CCD 攝影機必須使用廣角鏡頭，因而使得外緣的影像變形需要修正，所以我們使用前饋式神經網路補償此一失真效應。如此位置誤差便能降到 1cm 以內，為可以接受的範圍。在此全域影像系統中，主電腦的微處理器為 Pentium 350，影像更新率為 15Hz。

2.3 無線通訊系統：

當主電腦決定出各機器人下一時刻的運動狀態時，隨即透過無線通訊系統下達命令給各機器人。此數位訊號先經過主電腦上的無線數據機調變 (Modulation) 為無線電波訊號，然後傳送至各機器人。接著機器人上的無線數據機將收音機訊號解調 (Demodulation)，以還原成原來的數位訊號加以解讀。為了要使每隻機器人都能正確的接收命令，一個單點對多點式、廣播式的通訊協定是必要的。

通訊協定負責合宜的將主電腦的命令送達各機器人，每一道命令都會被轉化成字串，字串中的每一個字元皆代表特定的意義，當機器人接收到命令字串時便會翻譯這些字元。命令字串的格式如表 2-1：

表 2-1 通訊協定的格式

Starting Character (STX)	Slave ID	Command ID	Text	Checksum	Ending Character (ETX)
--------------------------	----------	------------	------	----------	------------------------

以下是各欄位所代表的意義：

STX：

開始字元。表示一條新的命令將被送入。

Slave ID：

這個欄位指定命令由哪一隻機器人接收。在本系統中，0X01、0X02、0X03 代表一號、二號、三號機器人。

Command ID :

本欄位表示命令指定的動作。如 0X2A 表示機器人停止運動。

Text :

有些命令需要額外的資訊才能完成，這些資訊便放在 Text 欄位。例如，左右輪的速度值必須跟在 Command ID (移動) 之後。

Checksum :

Checksum 的功能在於確保資料傳送的正确性。當主電腦傳送命令前，會根據 Slave ID、Command ID 和 Text 計算出 Checksum 的值，在機器人接受到命令後億句相同方式求出 Checksum。若兩者相同，則視為合法命令，機器人會開始動作；若不相同，則機器人會略去不理。

Checksum 計算的方式如下：

$$\text{Checksum} = (\text{Slave ID} + \text{Command ID} + \text{Text}) \bmod 254 \quad (2.1)$$

其中 254 這個數字用以避免 Checksum 的值與 STX 和 ETX 相同。

ETX :

結束字元。表示命令結束。

3.DSP 在 Emerge 中的貢獻：

本研究群所研發之基於 TI TMS320C32 的 DSP 單板非常適用於這個研究上。在這個系統中，DSP 單板被賦予重要的任務。第一、進行分散式架構人工智慧程式的運算，即時判斷運動目標。第二、對馬達控制卡下達控制命令。第三、處理無線網路傳來的資料。第四、定期讀取 ADC 的數值。由於這些處理所需要的運算量相當龐大，所以我們捨棄傳統的單晶片如 8051 等，而採用運算能力強大的 TI DSP 晶片。另外具有大量的記憶體，可以安裝複雜的 AI 程式，同時具有雙 Channel 序列通訊埠，能夠處理無線網路的資料，再加上訂定的外接匯流排，可以輕易與馬達控制卡整合，完全符合我們的需求。以下再介紹 DSP 單板中重要的部分。

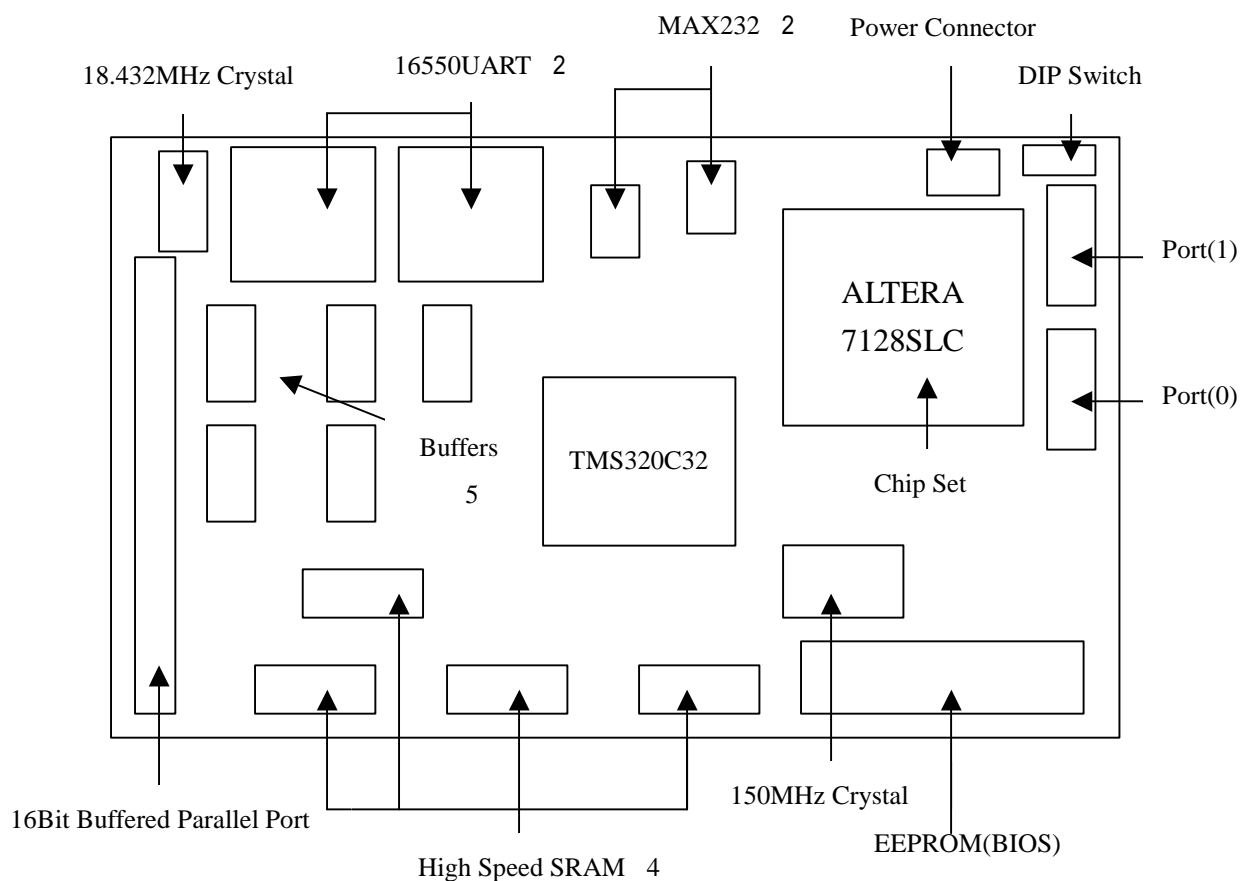
TMS320C32：分散式架構下的機器人團隊裡的每一隻機器人都具有人工智慧，能獨立判斷下一時刻的動作。然而人工智慧的演算往往需要運用到大量的浮點運算，並且擁有較高的精確度。C32 支援高達 40 位元的浮點運算，使用內部主要之 32 位元暫存器，再加上附加的 8 位元浮點運算專用暫存器，便能輕易使用特殊格式的 40 位元浮點運算，即使要精確到小數點後十位也輕而易舉。另外，C32 在運算指令上的功能相當強大，不但擁有乘法運算，還可以在一個指令內進行三連加、三連減，甚至三連乘的連續運算，這都是一般 8 位元的單晶片所辦不到的。

16550UART:在序列通訊 IC 我們選擇 16550UART 來作為 RS232 的控制 IC。16550 最大的優點在於速度，其最快可以在 24MHz 下工作，若使用內部的 Baud

rate generator，可以得到 1.5Mbps 的超快傳輸速率。另外 16550 內建 FIFO (First In First Out) 記憶體，可以先把陸續送達的資料儲存，等到達一定數量再使用 DMA mode 一次丟出去。序列傳輸顧名思義就是把資料一個位元一個位元的傳送，所以嚴格說來只需要兩條線 (訊號線與地線)，又因為整個系統的傳輸線數量減少，所以每一條線都可以輕易的增加 driver，這樣傳輸距離增加了，訊號強度也變的可靠。然而序列傳輸因先天上的限制速度始終比不上平行傳輸，故大多應用於資料量較少的通訊上。

16bit Buffered Parallel Port：結構類似 PC 中的 ISA Bus，擁有 16-bit 寬度的資料匯流排，16-bit 寬度的位址匯流排，以及兩個通道的中斷訊號，再加上 Read/Write 等控制接腳使得幾乎其它各種用途的單板都能與 DSP 單板整合。

EEPROM：我們把機器人的程式碼放入 EEPROM 中，並使用 Boot Loader 將程式碼載入 SRAM 中執行。圖 3-1 是 DSP 單板的說明圖示。



然而由於頻寬不足的問題，目前即時判斷運動目標的計算仍然由主電腦負責，DSP 單板負責接收無訓通訊訊號並對其下的馬達控制卡下達命令。圖 3-2 是 DSP 單板的實體照片。

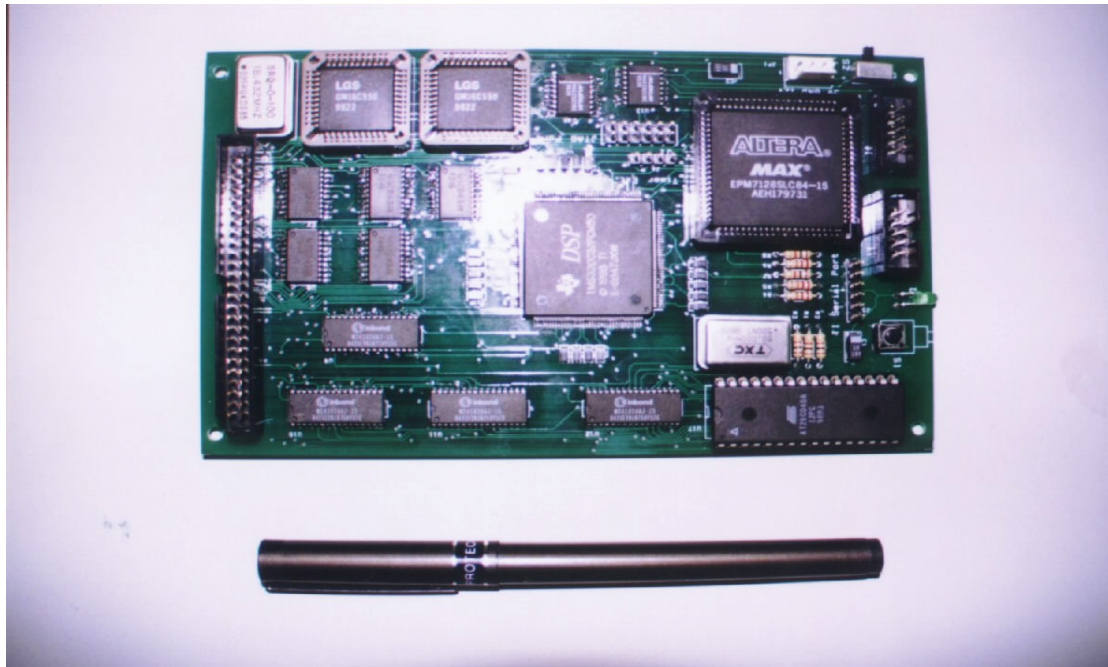


圖 3-2 DSP 單板電腦

4. Emerge 的行為設計：

在機器人足球賽中，每一機器人必須具備一些基本的動作及策略行為，像傳球、射門及防守等。同時也要有能力閃避突如其來的障礙物，如對方的機器人或球場四周的牆壁。因此我們為機器人設計了兩類行為模式來因應：倖存行為（Survival behavior）及策略行為（Strategy behavior）。其中前者是機器人在球場上必備的基本行為能力，如閃避障礙物等。後者是為了與隊友合作，作進攻防守相關較高級的戰術動作。值得一提的是，在此架構中策略行為包含許多因應各種戰況需求而設計的基本動作，由於每一時刻只能有一個最適當的行為發揮作用，因此這些策略行為是平行競爭的。我們用四個基於數學模式的自動決策機制：實用性(Practicability)、可行性(Feasibility)、傾向性(Tendency)及優先權(Priority)來選取每一機器人當時最適當的策略行為。經由這個精心設計的合作機制，我們實現了一個智慧型的分散式控制架構。以下說明這些行為的設計。

4.1 倖存行為的設計：

倖存行為的設計是為了對運動中的機器人做有效率且安全的路徑規劃，其中最基本的行為就是路徑追蹤及避障（Obstacle-avoidance）。由於球場中的目標物幾乎都是會移動的，因而必須建構有效的即時路徑來追蹤；而球場中的障礙物也有靜態及動態障礙物，需要閃躲的動作。在設計過程中，有幾件事需要注意：

1. 障礙物（機器人及球場）的尺寸是已知的。
2. 障礙物可能會移動。
3. 機器人可以前進或後退。
4. 球和機器人的位置資料須以適當的頻率更新。

4.1.1 目標追蹤：

由於要追蹤的目標物通常處於運動狀態，我們不可能一直轉動機器人到對準目標物為止，所以我們設計了一個簡單又有效率的方式：當機器人和目標物的相對角度小於 $\pi/4$ 時，機器人向前移動並施加往目標物方向的側向速度；若角度大於 $\pi/4$ 時，則機器人停止運動，俟轉動到適當角度（小於 $\pi/4$ ）後再行前進。

4.1.2 障礙躲避：

4.1.2.1 尋找動態次要目標：

在一般的情況下，機器人都會朝主要目標移動，當機器人發現障礙物時，就必須立刻決定出一個次要目標來追蹤，以閃避障礙物。為了確實的避免碰撞，我們在系統中將機器人定義成一個虛擬圓，這個圓以機器人上視圖的幾何中心為圓心，以適當半徑構成一個可以將機器人包圍起來的圓形（如圖 4-1）。

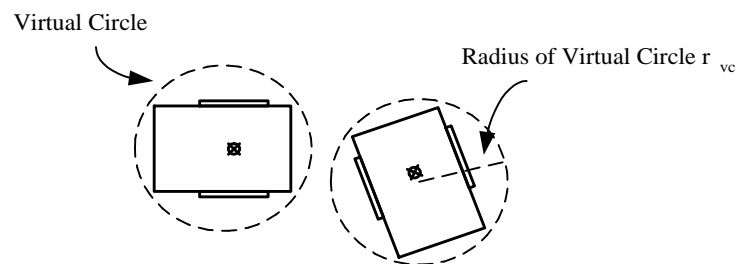


圖 4-1 虛擬圓示意圖

當機器人要閃避另一隻機器人時會將其視為一個被化成圓形的障礙物。首先過自己（也是一個圓）的圓心與障礙物做切線，找出障礙物上的兩個切點。接著將兩切點與障礙物的圓心連線向外延伸兩倍，得到兩個次要目標，然後根據兩個次要目標與自己的相對角度大小決定左次要目標及右次要目標（如圖 4-2）。

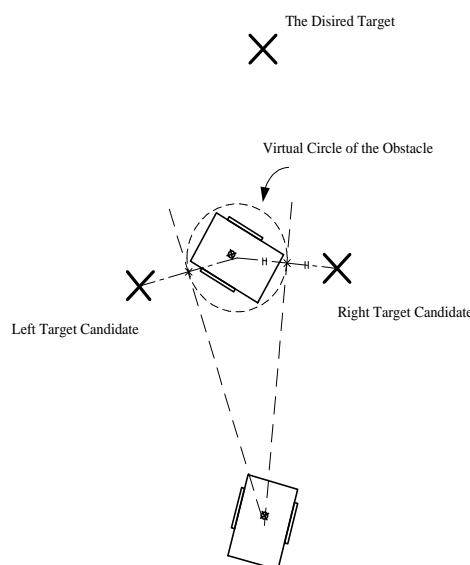


圖 4-2 動態次要目標選擇

4.1.2.2 決定動態次要目標：

前面提到的是遇到單一障礙物的情形，若是遭遇一個以上的障礙物時，。同樣根據以上的方式找出這群障礙物中最左邊及最右邊的次要目標，然後依以下的條件決定真正的次要目標：

障礙物和球場邊牆的距離：

若障礙物（群）靠近球場邊牆，選擇遠離邊牆的次要目標。

障礙物的側向運動：

若障礙物（群）某方向的側向速度較大，選擇側向速度小的次要目標。

障礙物及主要目標的相對位置：

若障礙物在主要目標的右側（從機器人的角度看），選擇左邊的次要目標；在左側則選擇右邊的次要目標。

其他機器人（在自己與主要目標之間）的分佈情形：

利用自己和主要目標連線與球場寬度之半，往左右各建立一個矩形區域，若右邊的矩形區域中的機器人較左邊多，選擇左邊的次要目標，反之亦然。

藉由全域影像系統所提供的場中機器人及球之位置估測資訊，實際實驗證明足球機器人具有令人滿意之路徑追蹤與閃避障礙物行為。

4.2 策略行為的設計：

為了更聰明的進行一場足球賽，我們為機器人設計了十二種策略行為，包括攔截、射門、盤球、傳球至前鋒、傳球至中場、傳球至後衛、到接球位置、到卡位位置、守門、阻擋射門、阻擋傳球及掃球。詳細描述如表 4-1：

表 4-1 策略行為

策略行為	行為內容
攔截	使機器人能預測球下一時刻的位置以便攔截
射門	使機器人能在許可情形下將球推向球門
盤球	使機器人能夠利用推球將球帶至前場，找尋有利的射門機會
傳球至前鋒	使機器人將球傳至前鋒球員身上
傳球至中場	使機器人將球傳中場球員身上
傳球至後衛	使機器人將球傳至後衛球員身上
到接球位置	使沒有帶球的機器人移至存在良好射門角度的位置等待隊友傳球。若此位置不存在，則機器人會移至前場中預設的位置等待下一個機會
到卡位位置	使沒有帶球的機器人移至後場預設的卡位線上等待傳球
守門	使後場球員到球門前防止對方球員射門。若沒有任何對方球員在來球附近，機器人會將球推向前場
阻擋傳球	使機器人移至對方球員和對方球員間，以阻止對方傳球。
阻擋射門	使機器人移至對方球員和我方球門間，以阻止對方射門。
掃球	使機器人能在邊線附近運球而不出界

有了以上這十二個策略行為，機器人就能更真實的進行一場激烈的足球競賽了。

4.3 行為選擇機制的設計：

雖然機器人的位置及運動狀態可以經由圖像辨識及座標計算得知，但是每個機器人的行為並非只有單純的移動而已，由於機器人的角色及周圍環境都是時變

的，為了真正達到合作的目的，在每一個時刻每一隻機器人都必須觀察球及其他五隻機器人的狀態，以做出最佳的戰術反應。人類在面對必須協調合作的情形時，依據人類的群體智慧及經驗來達成。為了讓不具智慧的機器人完成相同的行為，我們設計了行為決定機制。這個行為決定機制包含四個基於數學模式的參數：實用性(Practicability) 可行性(Feasibility) 傾向性(Tendency)及優先權(Priority)來選取每一機器人當時最適當的行為。圖 4-3 顯示 Emerge 的架構圖。以下說明行為決定機制的設計步驟：

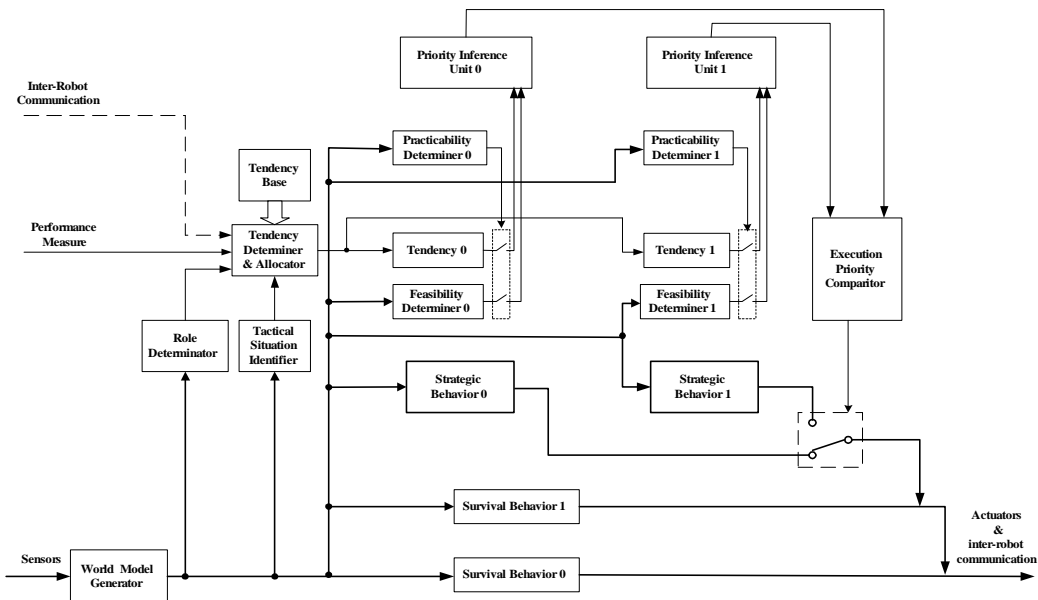


圖 4-3 Emerge 架構圖

1. 設計環境模型產生器：

產生球的位置及所有機器人的位置及方向。

2. 設計角色決定器及空間狀態辨認器：

在足球機器人系統中共有三個角色：前鋒、中場以及後衛，透過角色決定器，每一機器人可以在面對不同的環境狀況時扮演適當的角色。此外，我們將個別隊伍在場中分為三個狀態：進攻模式、防守模式以及未定模式。為了便於決定這些模式，我們將球場分為三等分，以距離己方球門的遠近劃分，最遠的是前場，再來是中場，最近的是後場。當球在前場，或是球在中場但由我方持球並朝向我方前場時屬於進攻模式；當球在後場，或球在中場但由對方持球並朝向我方後場時屬於防守模式。不屬於上述狀況時，則歸類於未定模式。

3. 設計 Practicability 決定器的規則：

Practicability 決定器決定在某一時刻下，採用的策略行為的實用程度。這是一個二值的參數，如果是真(True)，則所屬的行為才有可能被激發(依據其可行性及傾向性的表現)，否則此行為將不被考慮。十二種策略行為的實用性之設計如表 4-2：

表 4-2 策略行為的實用性

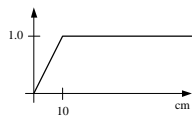
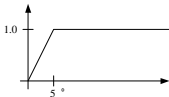
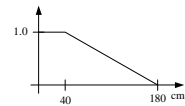
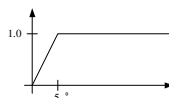
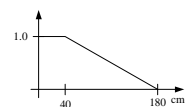
策略行為	實用性
攔截	True if (the ball is not closed to the boundary wall AND the ball intercepting)

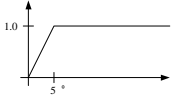
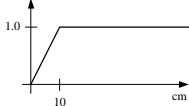
	direction is not toward the team's goal.)
射門	True if (the ball is not closed to the boundary wall AND the ball possesses a non-zero shooting angle)
盤球	True if the ball is not closed to the boundary wall
傳球至前鋒 傳球至中場 傳球至後衛	True if (the ball is not closed to the boundary wall AND no robots exist between the ball and the specific robot to pass.)
到接球位置	True
到卡位位置	True
守門	True
阻擋傳球	True
阻擋射門	True if (opponent striker is behind the ball.)
掃球	True if the ball is closed to the boundary wall

4. 求出 Feasibility 影響因子並設計相關的歸屬函數：

Feasibility 表示在某一時刻某策略行為的可行性，每一個策略行為的可行性亦有相關的影響因素，在此我們以歸屬函數來表示 Feasibility。十二種策略行為的影響因子及相關的歸屬函數如表 4-3：

表 4-3 策略行為的可行性影響因子及相關的歸屬函數

策略行為	可行性影響因子，歸屬函數及其相對的重要性
攔截	The leading distance of the robot to the ball, compared with that of the opponent robot closest to the ball, 1.0 
射門	Shoot angle of the ball, 0.6  The distance of the ball to the goal, 0.4 
盤球	Degree of feasibility = 0.8
傳球至前鋒 傳球至中場 傳球至後衛	The shoot angle of the specific robot, 0.6  The distance of the specific robot to the goal, 0.4 

到接球位置	Degree of feasibility = 0.6
到卡位位置	Degree of feasibility = 0.8
守門	Degree of feasibility = 0.6
阻擋傳球	Degree of feasibility = 0.6
阻擋射門	<p>hooting angle of the ball to the team's goal,0.6</p>  <p>The lagging distance of the robot to the ball, compared with that of the opponent striker,0.4</p> 

5.設計傾向性(Tendency)：

在不同的角色及模式下，機器人對每一種策略行為應有不同的傾向，因此我們為 Emerge 中不同的角色及模式設傾向性，如表 4-4~6：

表 4-4 進攻模式下的傾向性

Position	Shoot	Dribble	PTS	PTM	PTD	GRP	GCP	Goalkeep	BS	BR	Intercept	Sweep
Striker	0.8	0.6	0	0.6	0.6	0	0	0	0	0	0	0.8
Midfielder	0.5	0.2	0.2	0	0.2	0.8	0	0	0	0	0	0
Defender	0	0	0.6	0.6	0	0	0.8	0	0	0	0.6	0

表 4-5 防守模式下的傾向性

Position	Shoot	Dribble	PTS	PTM	PTD	GRP	GCP	Goalkeep	BS	BR	Intercept	Sweep
Striker	0	0.8	0	0	0	0	0	0.2	0.7	0	0	0.8
Midfielder	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.8	0	0
Defender	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0

表 4-6 未定模式下的傾向性

Position	Shoot	Dribble	PTS	PTM	PTD	GRP	GCP	Goalkeep	BS	BR	Intercept	Sweep
Striker	0.6	0.8	0	0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0.8
Midfielder	0.4	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0
Defender	0	0	0	0	0	0	0.5	0.8	0	0	0	0

6.比較優先權：

在求得 Feasibility (f_i) 及 Tendency(t_i)之後，依據式 4-1 求出每一個策略行為的優先權，以決定最後真正執行的策略行為。

$$P_i(t) = \begin{cases} (f_i(t) + t_i(t)) / 2, & \text{if } p_i = \text{true and } t_i(t) \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-1)$$

以上所設計之各種行為以及行為決定機制是 Emerge 之核心，在機器人足球

賽進行過程中，每一隻機器人都獨立執行一套 Emerge，經由此分散式控制，達成合作競賽的任務。

5.發展學習機制：

發展學習機制的目的在於讓機器人團隊能夠憑過去的比賽經驗改進行為績效。在 Emerge 中，機器人的行為選擇靠某些行為參數決定，參數的設定對團隊合作績效的影響很大。雖然每一個參數都具有真實的意義，設計者很容易便能訂出不錯的參數值，然而畢竟機器人才是最後的執行者，所以更理想的方式是機器人藉由每一次執行任務的結果，自行調整至最佳的參數值。

在 Emerge 的學習過程中，利用真值基因演算法 (Real-valued genetic algorithm) 用來完成參數自我修正的工作。最先形成的是一群代表行為傾向的染色體，這些傾向與機器人的空間狀態與角色有關。起初機器人會根據第一條染色體決定行為模式，動作完成後依照適應函數求出這一次的適應度。接著下一次的行為傾向被第二條染色體所取代，然後算出第二次的適應度。如此不斷進行，直到所有的 n 個染色體的適應度求出為止。這 n 個染色體經過繁殖、交配及突變過程產生新的 n 個染色體，機器人再按照新染色體的行為傾向執行動作，一直演化到滿足設計者的要求為止。詳細的演化過程如下：

繁殖 (Reproduction)：

類似生物的無性生殖。染色體的適應度越高，被選入自我複製的機率也就越大。假設 r_i 代表第 i 個母染色體中染色體，被選入自我複製的機率 P_i 可用下面的式子求得：

$$P_i = \frac{r_i}{\sum_{j=1}^n r_j} \quad (5.1)$$

必須複製出和母代相同數目的 n 個染色體，放入交配池中等待交配。

交配 (Crossover)：

從交配池中隨機選出兩個染色體互換基因，以產生子代。在實數基因演算法中以多維向量表示染色體的基因，若有 p 個策略行為、 q 個空間狀態、 r 個球員角色，則用 $p \times q \times r$ 為向量代表染色體。假設 x_1 、 x_2 代表被隨機選出的雙親染色體，則一對子染色體 x_1' 、 x_2' 可用下面的式子求得：

$$\begin{cases} x_1' = x_1 + f(x_1 - x_2) \\ x_2' = x_2 - f(x_1 - x_2) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\text{或} \begin{cases} x_1' = x_1 + f(x_2 - x_1) \\ x_2' = x_2 - f(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (5.3)$$

其中 f 為一個隨機變數。

突變 (Mutation)：

突變的方式是將染色體加入某個隨機數，以產生新的子代式樣，這個隨機數

的大小由設計者指定。突變在基因演算法中屬於次要地位，但是可以開發新的搜尋領域，防止收斂於局部最佳點，而探尋整體最佳點。由 x 突變為 x' 的關係如下：

$$x' = x + s \cdot n \quad (5.4)$$

其中 n 表示隨機突變向量， s 表示隨機突變向量的大小。

6. 模擬與實驗結果：

6.1 模擬結果：

為了檢驗 Emerge 的學習能力，我們進行了近千場模擬的三隊三機器人足球賽，兩隊的機器人完全相同，但是我們只啟動其中一隊的學習機制。在模擬中，我們根據五項資料來評估機器人團隊的整體效能，分別是己隊的分數（ ts ）、敵隊的分數（ os ）、我方處於進攻模式的時間百分比（ om ）、我方處於未定模式的時間百分比（ um ）以及己方球員射門次數的百分比（ sc ）。透過這五項資料，構成如下的適應方程式，以評估整體效能：

$$f(\bar{x}) = y_{ts} \cdot ts - y_{os} \cdot os + y_{om} \cdot om + y_{um} \cdot um + y_{sc} \cdot sc + c \quad (6-1)$$

由圖 6-1 到圖 6-4 我們可以看出，團隊的整體效能的確隨比賽次數而逐漸增加。

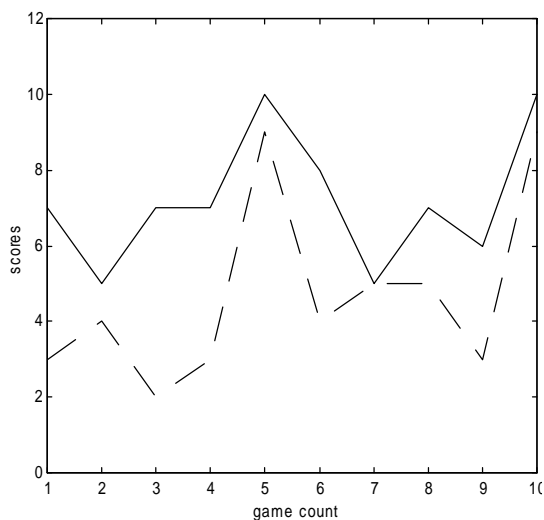


圖 6-1 比賽得分

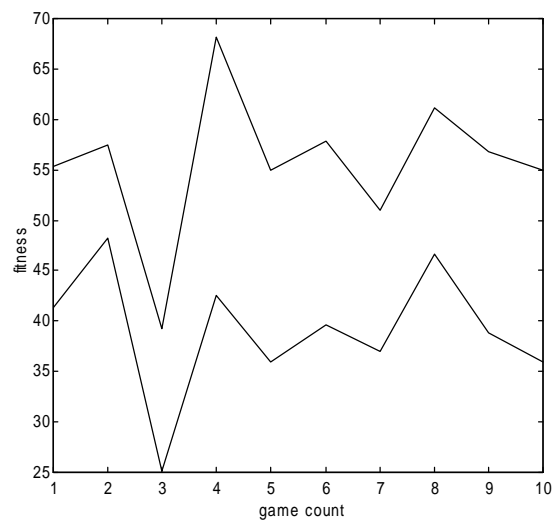


圖 6-2 適應度

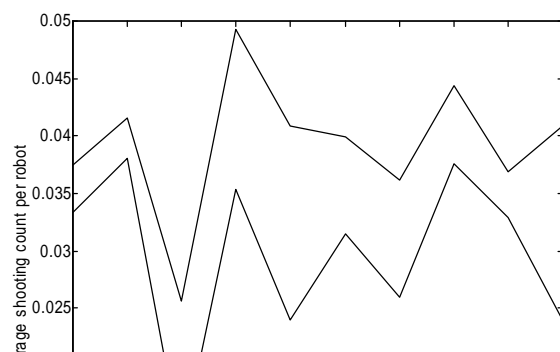
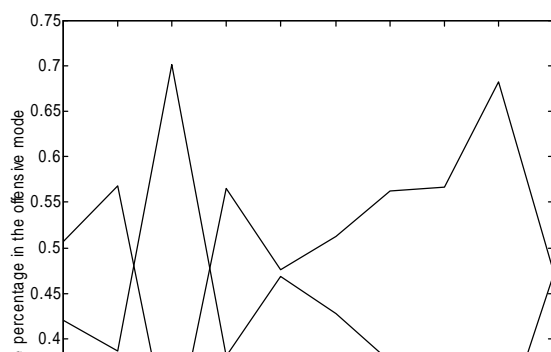


圖 6-3 處於進攻模式的時間

圖 6-4 機器人平均射門次數

6.2 實驗結果：

在第一個實驗中，我們讓敵隊（紅色）的機器人靜止不動，觀察機器人間的合作行為，圖 6-5 的曲線部分為機器人行走的軌跡。在實驗中，一號機器人將球傳至二號機器人前面，然後二號機器人在到達具有良好射門角的位置時將球推入球門；三號機器人則在後場尋找替隊友卡位的位置。

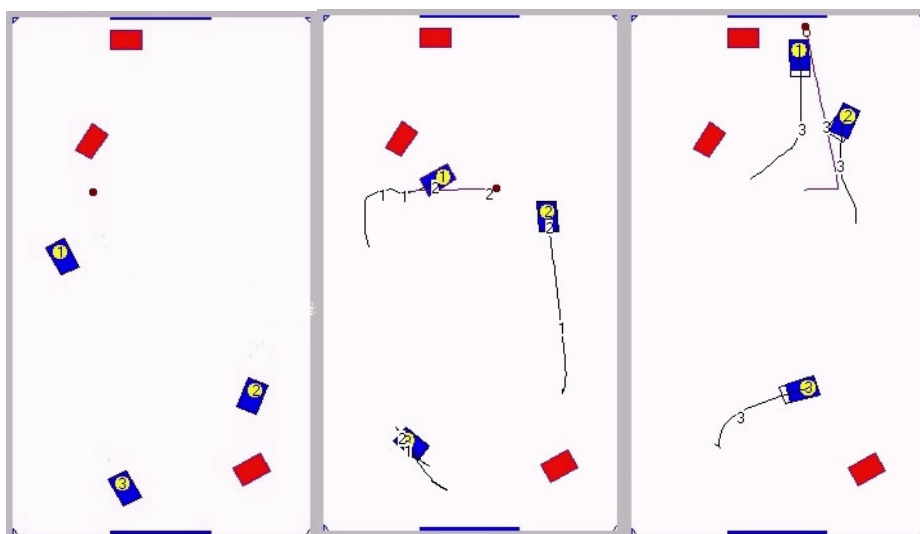


圖 6-5 實驗一的結果

第二個實驗讓機器人團隊互相競爭，以檢驗 Emerge 在這樣的情形下行為選擇能力是否可靠並具有彈性。如同實驗一一般，藍色的隊伍攻上方而紅色攻下方。實驗開始時，敵隊最接近球的球員將球往下方推，我方的機器人一二號迅速到達球的位置。在球在一二號機器人間反彈三次後，由二號機器人取得控制權，同時一號機器人往上移動尋找有利的射門位置。三號機器人在整個實驗中皆扮演守門的角色，所以停留在球門前（圖 6-6）。

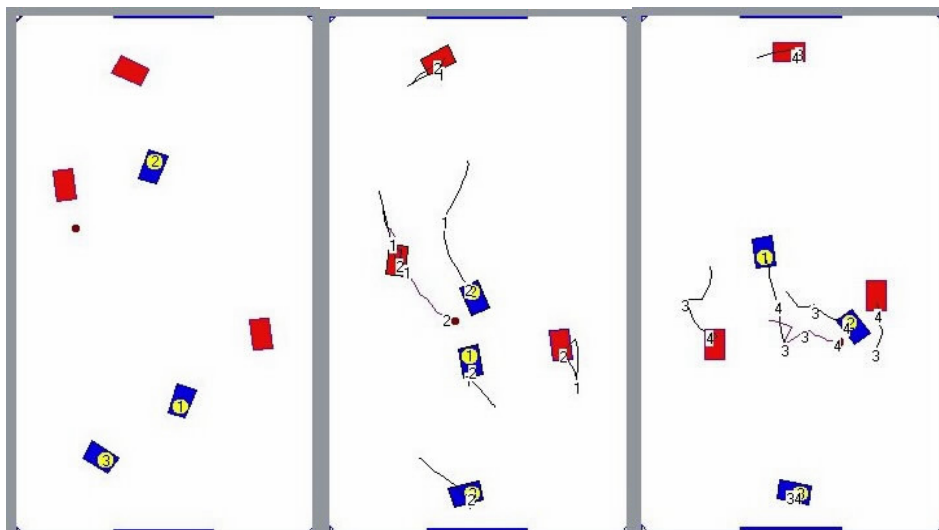


圖 6-6 實驗二的結果

7.結論和未來發展方向：

在這個研究中，我們嘗試建構出一個分散式控制的多機器人系統，以更有彈性、更可靠的方式對抗敵方並完成任務。Emerge 使機器人能根據任務需求彈性的選擇最適當的行為，這個行為選擇機制是透過我們所提出的由四個數學模式所計算的內在參數來完成。在這些參數的協助下，牽涉到模糊概念的人類知識可以很容易的被引入系統中。另外我們也設計了學習機制，靠著修正內在參數，機器人可以依過去執行任務的經驗提高執行績效，改進合作行為。雖然這些處理所需要的通訊及運算量非常龐大，而且必須達到 Real-time 的反應，但是浮點運算能力強大的 TMS320C32 DSP 晶片及其他模組可以滿足我們的需求。同時，DSP 單板接收無線訊號並下達命令給馬達控制單元，在主電腦與機器人間做協調，成為 Emerge 系統中不可或缺的關鍵角色。未來我們將嘗試解決通訊帶來的頻寬問題，使機器人有足夠的資源用於運算，不須經由主電腦的協助，完全由 DSP 晶片處理，以達到智慧型分散式控制的目標，希望有朝一日能站上世界舞台，與各國好手設計的足球機器人一較高下。