

全方位中型足球機器人之定位系統模組設計

Design of a Positioning System Module for Omni-direction Soccer Robot

羅嘉寧、江叔盈*、李棟良、陳慶逸、陳焜育

銘傳大學電腦與通訊工程學系
Department of Information and Telecommunications Engineering,
Ming Chuan University

摘要

本研究比較兩種以 RoboCup 與 FIRA 為競賽目的之中型足球機器人視覺為基礎的自我定位方法，分別為雙圓定位法及應用三點定位法，用以自主推算出機器人在競賽場地的位置。雙圓定位法利用二維平面上的任意三點可決定一個圓，且兩圓相交產生兩點的概念，解出交點的座標值。使用三點定位法，機器人的視覺系統藉由放射狀的掃描方式來收集四周環境的特徵，以此建立環境資訊模型以求得球場四周的環境特徵。藉由觀測出機器人影像中心與三個已知參考物之夾角及座標，以推算出機器人在球場上的絕對座標位置。

本研究發現採用雙圓定位法時會有定位死角的狀況發生，在一些特定位置時定位誤差相當大，而採用以計算三角形性質為基礎的三點定位法時，則可有效改善定位死角之問題，可以準確的定位出機器人在實際球場上的位置，進而從推算出其他例如球、友方或敵方機器人等物體的位置，之後定位系統的結果也可以提供後端的決策系統使用，可有效提昇決策系統之戰術應用及策略規劃。

關鍵字：RoboCup、FIRA、足球機器人、三點定位法

Abstract

In this research, we compare two indoor positioning algorithms to be used in robot soccer champion RoboCup and FIRA: the two-circles positioning algorithm and the trilateration positioning algorithm. In the two-circle positioning algorithm, the position of the two cross-points of two specific circles can be derived. In the trilateration positioning algorithm, the vision system of the robot scans the objects of the environments to catch three known objects. By calculating the angels of the robot and these three known objects, the position of the robot can be derived.

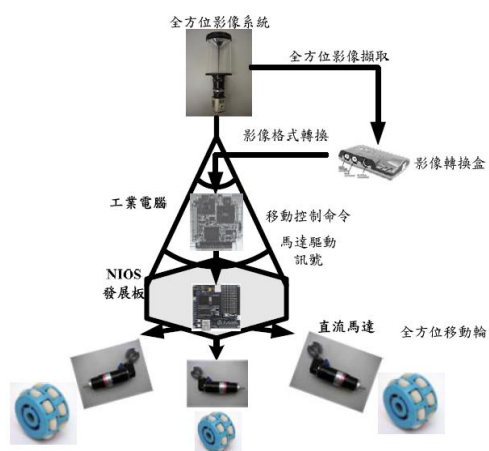
In this research we found by using the two-circles positioning algorithm, some death zones will occurs. The accuracy and precision of trilateration positioning algorithm is better than two-circles position algorithm. By using the trilateration algorithm, we can derive the absolute position of the robots, enemy robots and the football locations. The position information can be passed to the backend global decision systems to control the robot movement, and improve the tactics and strategy.

Keywords: RoboCup、FIRA、RoboSot、Trilateration positioning

*corresponding author: sychiang@mail.mcu.edu.tw

1. 簡介

足球機器人系統主要分成機構設計系統、影像系統、機器人策略系統、感測電路與馬達驅動電路系統四大部分，外觀與架構如圖 1 所示。機器人將比賽場地影像透過視覺系統做影像分析，來獲得場地資訊如球、球門、敵我雙方機器人等位置資訊。透過這些處理過後的資料，策略會根據目前機器人的狀態、球的位置，決定出機器人的動作。如搶球、擋球、射門等控制策略，並且根據各個策略動作規劃移動路徑與全方位移動的四輪速度。再將這些馬達命令傳送給 Nios 發展板。Nios 為一 16/32 位元嵌入式軟核心處理器，Nios 在接收到馬達命令後會轉換成 PWM(脈波寬度調變)訊號去控制馬達的輸入電壓，進而控制馬達的轉速。透過馬達之間不同的速度所產生的合力與分力來控制機器人往所設定的位置與方向移動，流程如圖 2 所示[4]。



(a) 中型足球機器人之外觀

(b) 中型足球機器人之硬體架構

圖1中型足球機器人 (a) 外觀示意圖 (b) 硬體架構示意圖[4]

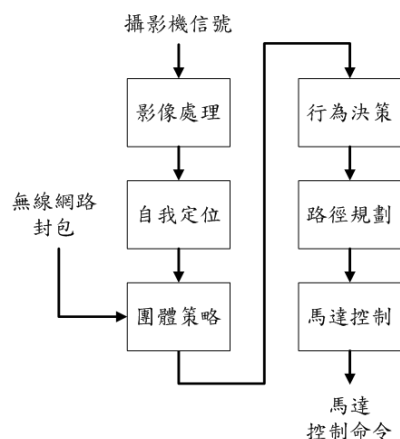


圖2系統流程圖

2. 足球機器人定位系統

2.1 球場物體資訊

球場中之物體有球、我方球門、敵方球門，我方機器人及敵方機器人等如圖 3 所示。球場目標物之座標系統可分成對自我機器人之極座標系統 $p_i(r_i, \alpha_i)$ 以及相對球場之卡式座標系統 $p_i(x_i, y_i)$ 兩種描述方式。自我極座標系統用於分析機器人車頭方向與各物體之夾角，其中 $p_i(r_i, \alpha_i)$ 分別為第 i 個目標物相對於自我機器人間之距離 r_i 與和機器人車頭方向之夾角 α_i 。而球場卡式座標系統用於將對應於車體關係的資訊與絕對資訊做整合。如圖 4 所示，故每個物體的座標皆可表示成 $p_i(r_i, \alpha_i, x_i, y_i)$ ，所以下述本研究所使用的兩種定位方法最後演算結果均為物體在球場上的卡式座標[5]。

為了估測出機器人在球場中之座標，本文透過球場中固定之目標物，例如球門的座標，與機器人觀測出目標物的距離及方向，進而推測出機器人在球場中的座標。得到以上資訊可以計算出相對的夾角度，如黃色之敵方球門與車頭的夾角、藍色之我方球門與車頭的夾角，敵方球門與我方球門的夾角。利用上述提到的全方位鏡的特性 B，運用這三個角度配合與實際已知座標進行計算，將可求出機器人本身在實際場地中的絕對座標，本研究先後使用雙圓定位法以及三點定位法進行定位。

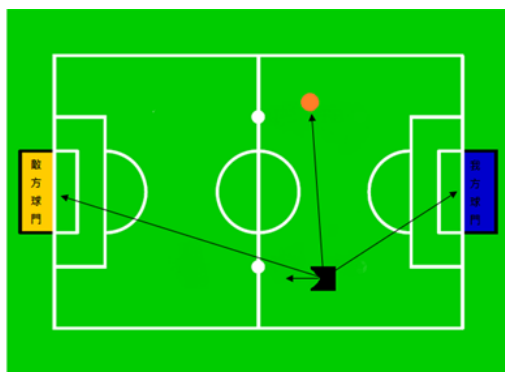


圖 3 球場示意圖

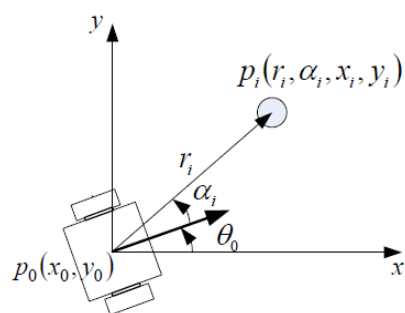


圖 4 自我極座標與球場卡式座標整合資訊示意圖

2.2 雙圓定位法

此計算方法僅需要從影像資訊中取得三個目標資訊（一球門之兩邊、另一球門之一邊等），再加上機器人本身，利用二維平面上的任意三點可決定一個圓，且兩圓相交產生兩點的概念，解出交點的座標值，如圖 5 所示，即可得知機器人在球場上的位置座標。

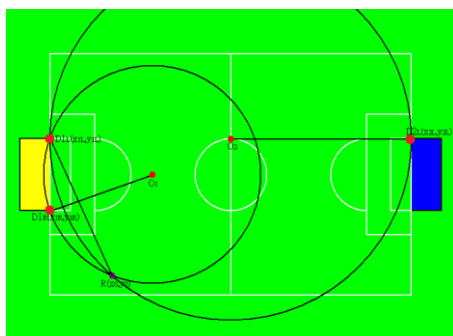


圖 5 兩圓相交時兩交點與圓心的關係

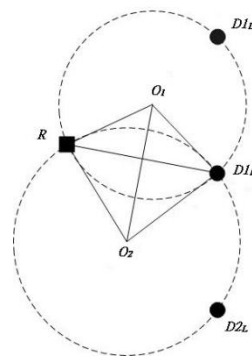


圖 6 於球場中機器人與三個目標物示意圖

透過機器人端之環境資訊模組得到球場中的物體資訊後，選取與機器人R距離較近之三個參考點。首先篩選於全方位影像上與中心點之間像素點較少的一門D1，而像素點較多的一門為D2，再由環境資訊模組所儲存的資訊中找出D1的最左邊界D1_L與最右邊界D1_R，最後再找出D2中像素點較少的一邊界，假設為D2_L，如此即可以初始化好雙圓定位法所需的基本資訊，如圖 6 所示。

R、D1_L、D1_R此三點可以構成一個圓，假設圓心座標為O₁。將由D1_R至D1_L所構成的向量V_{D1}長度減半，以逆時針旋轉(90 - θ₁)度後乘上三角形邊長的比例 $\frac{1}{\cos(90-\theta_1)}$ 成為D1_R至O₁的向量，再加上D1_R的座標即可求得O₁的座標值，如式(1)到(2)與圖 7 所示，公式中R(θ)定義為旋轉矩陣。

$$\bar{V}_{D1} = D1_L - D1_R \quad (1)$$

$$O_1 = \frac{1}{\cos(90-\theta_1)} R(90 - \theta_1) \frac{1}{2} \bar{V}_{D1} + D1_R \quad (2)$$

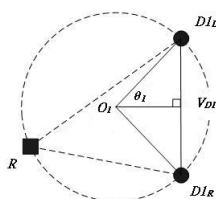


圖 7 利用 R、D1_L、D1_R 三點的關係求 O₁

同理，O₂的座標值，如圖 8 所示：

$$\bar{V}_{D2} = D1_R - D2_L \quad (3)$$

$$O_2 = \frac{1}{\cos(90-\theta_2)} R(90 - \theta_2) \frac{1}{2} \bar{V}_{D2} + D2_L \quad (4)$$

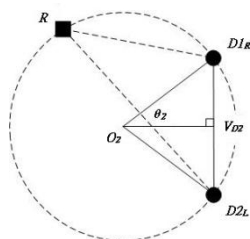


圖 8 利用 R、D1_R、D2_L 三點的關係求 O₂

由上面的式子分別求得兩圓對應於球場的圓心座標，再來只要計算出兩圓的交點就可以得到機器人R實際的位置座標。利用餘弦定理得到O₂、O₁、D1_R三點所構成的角度θ_{OD}。

$$\vec{V}_{OD2} = D1_R - O_2 \tag{5}$$

$$\vec{V}_O = O_1 - O_2 \tag{6}$$

$$\theta_{OD} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{V}_{OD2} \cdot \vec{V}_O}{|\vec{V}_{OD2}| |\vec{V}_O|} \right) \tag{7}$$

最後將向量 \vec{V}_{OD2} 以逆時針旋轉兩倍θ_{OD}角度，再加上座標O₂可得知座標R的值，就可以得知機器人在球場上的位置，即機器人自我定位計算結果，其座標表示如式(9)。

$$R = R(2\theta_{OD})\vec{V}_{OD2} + O_2 \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-2\theta_{OD}) \cdot -\sin(-2\theta_{OD}) \\ \sin(-2\theta_{OD}) \cdot \cos(-2\theta_{OD}) \end{bmatrix} \vec{V}_{OD2} + \begin{bmatrix} x_{o2} \\ y_{o2} \end{bmatrix} \tag{9}$$

完成雙圓自我定位分析後，若影像系統觀察出第i個目標物且相對車頭方向的角度θ_i，並從距離模組得出距離為r_i，由式(10)即可求出第i個目標物在球場中之座標(x_i, y_i)。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 + \theta_i) \\ \sin(\theta_0 + \theta_i) \end{bmatrix} [r_i] \tag{10}$$

2.3 三點定位法

由於中型足球機器人使用全方位影像，藉由觀測出機器人車頭方向 θ_0 與車頭方向與三個參考物之夾角 θ_{01} 、 θ_{02} 、 θ_{03} 以及若已知參考物在球場上之座標P₁、P₂、P₃，機器人與三個參考物連線會形成兩個三角形[5]，利用這兩個三角形的性質配合公式，則機器人在球場上之座標P₀與機器人車頭方向 θ_0 將能求得，示意如圖 9 所示。

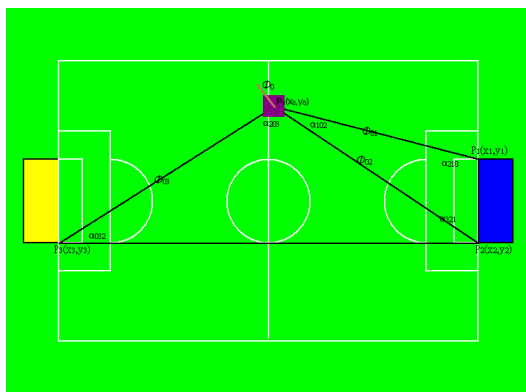


圖 9 機器人與三點連線形成兩個三角形示意圖

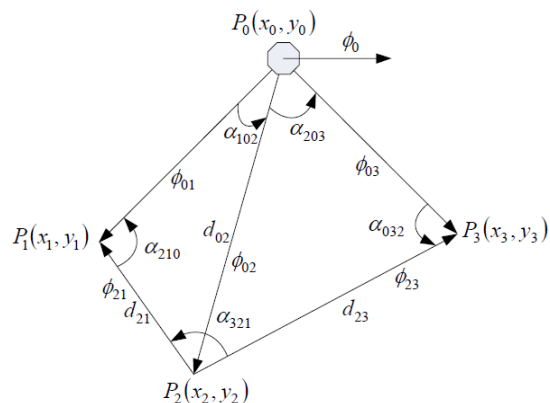


圖 10 三點定位示意圖

初始化步驟同雙圓定位法，經由環境資訊模組篩選出最鄰近的三個門的邊界 P_1 、 P_2 、 P_3 當作參考點，如圖 10 所示。再由式(11)到(14)算出參考點 P_2 到 P_1 與 P_2 到 P_3 的距離 d_{21} 與 d_{23} 與方向 ϕ_{21} 與 ϕ_{23} 。

$$d_{21} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (11)$$

$$d_{23} = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (12)$$

$$\phi_{21} = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \right) \quad (13)$$

$$\phi_{23} = \tan^{-1} \left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \right) \quad (14)$$

再透過式(15)到(17)算出機器人 P_0 與參考點 P_1 和參考點 P_2 之間的夾角 α_{102} 、機器人 P_0 與參考點 P_2 和參考點 P_3 之間的夾角 α_{203} 以及參考點 P_2 與參考點 P_3 和參考點 P_1 之間的夾角 α_{321} 。

$$\alpha_{102} = \phi_{02} - \phi_{01} \quad (15)$$

$$\alpha_{203} = \phi_{03} - \phi_{02} \quad (16)$$

$$\alpha_{321} = \phi_{21} - \phi_{23} \quad (17)$$

經由式(18)來求得 α_{210} 與 α_{032} 的角度和 β ，再由式(19)算出參考點 P_1 與參考點 P_2 和機器人 P_0 間的夾角 α_{210} ，所算出來的夾角皆正規化到 $[0, 2\pi]$ 之間如式(20)所示。

$$\beta = 2\pi - \alpha_{102} - \alpha_{203} - \alpha_{321} \quad (18)$$

$$\alpha_{210} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\beta)}{\frac{d_{21} \sin(\alpha_{203})}{d_{23} \sin(\alpha_{102})} + \cos(\beta)} \right) \quad (19)$$

$$\{\alpha_{102}, \alpha_{203}, \alpha_{321}, \beta\} \in [0, 2\pi] \quad (20)$$

透過三角幾何之邊角關係，即能由式(21)(22)算出機器人在球場上的座標 $P_0(x_0, y_0)$ 與機器人的車頭方向 ϕ_0 。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \left(\frac{d_{21} \sin(\pi - \alpha_{102} - \alpha_{210})}{\sin \alpha_{102}} \right) \begin{bmatrix} \cos(\pi + \phi_{21} + \alpha_{210}) \\ \sin(\pi + \phi_{21} + \alpha_{210}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\phi_0 = \phi_{21} + \alpha_{210} - \phi_{01} \quad (22)$$

當透過三點自我定位分析後，求得機器人在球場中之座標 $P_0(x_0, y_0)$ 與方向 ϕ_0 。最後，影像系統偵測出第 i 個目標物相對機器人車頭方向 α_i 與機器人距離 r_i ，由式(23)來求出第 i 個目標物在球場中之座標 (x_i, y_i) 。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_0 + \alpha_i) \\ \sin(\theta_0 + \alpha_i) \end{bmatrix} [r_i] \quad (23)$$

2.4 實驗結果

本論文將實際場地上白色邊線的左上角假設為平面座標系的原點(0,0)，虛擬場地上白色邊線的左上角亦假設為平面座標系的原點(0,0)，而兩者的比例為 1 cm : 1 pixel，我們將機器人擺放在球場中之幾個位置，並分別以雙圓定位法及三點定位法之結果加以分析比較，虛擬球場中的紫色點為定位的結果，上方為實際球場照片，左下方為三點定位法，右下方為雙圓定位法。

圖 11 中，機器人擺放位置為球場中線偏外側，實際位置座標為(300,315)，使用雙圓定位時座標為(323,346)，直線誤差為 38.6cm; 採用三點定位時座標為(300,345)，直線誤差為 30.0 cm。三點定位法之精準度明顯較雙圓定位法高。



圖 11 三點定位法與雙圓定位法定位結果比較圖(一)



圖 12 三點定位法與雙圓定位法定位結果比較圖(二)

圖 12 中，機器人擺放位置為敵方前門正前方，雙圓定位法之誤差為 19.6 cm，而三點定位法之誤差為 13.6cm，三點定位法之精準度亦明顯較雙圓定位法高。

圖 13 中機器人之擺放位置為敵方球門側方之 (75,100) 位置，採用三點定位法時定位座標為 (62,113)，直線誤差為 18.4cm。然而採用雙圓定位法時，因計算以雙方球門所求得之圓的屈率過大，經計算後其推導得之座標為 (150, 176) ，距離實際位置 106.8 cm。由此可知雙圓定位法之定位明顯錯誤。

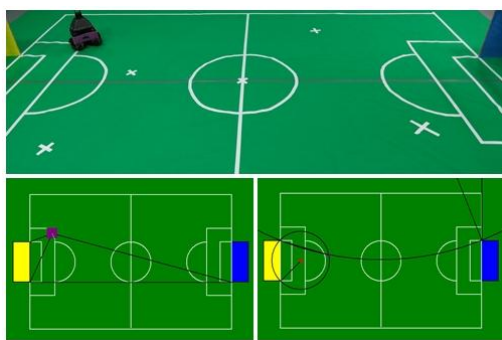


圖 13 三點定位法與雙圓定位法定位結果比較圖(三)

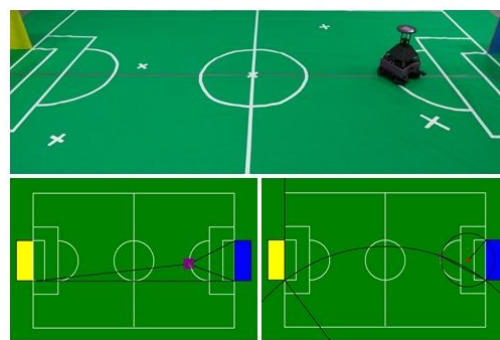


圖 14 三點定位法與雙圓定位法定位結果比較圖(四)

圖 14 中機器人擺放位置為我方球門正前方，雙圓定位法之誤差為 11.0 cm，而三點定位法之誤差為 7.2cm，三點定位法之精準度較雙圓定位法高。

圖 15 中機器人擺放位置為靠近球場外緣之(410,83)位置，採用三點定位法時定位結果些為(368,115) ，誤差約 38.3cm，較實際位置微偏左下。而此用雙圓定位法時，因以雙方球場為參考點之圓之屈率過大，因此定位結果在(385,212)位置，誤差高達 131.4cm 結果明顯的定位錯誤。

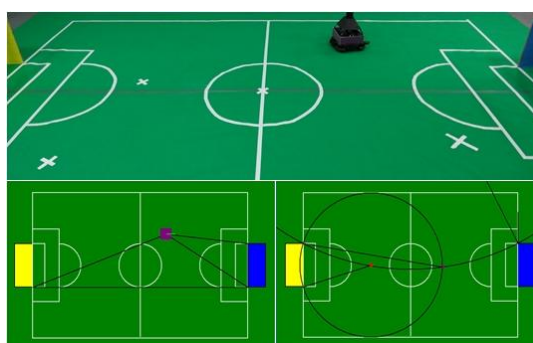


圖 15 三點定位法與雙圓定位法定位結果比較圖(五)

上列五張圖片之誤差比較如表 1 所示。從上述分析中我們可以得知當機器人擺放位置為靠近球場中央時，採用兩種定位法之誤差皆不大，然而三點定位法之精準度較雙圓定位法來得高。然而當機器人擺放位置在球場偏外側時，雙圓定位法所定出之位置明顯偏差太大，原因是在偏外側之位置時，採用雙圓定位法將因其中一參考圓之預估屈率過大，無法涵蓋整個球場之範圍，導致計算兩圓交點結果之不正確。

表 1 定位座標比較表

	實際座標	雙圓定位座標	三點定位座標	雙圓座標與實際座標之直線誤差	三點座標與實際座標之直線誤差
圖 11	(300,315)	(323,346)	(300,345)	38.601	30.000
圖 12	(140,200)	(135,219)	(129,208)	19.647	13.601
圖 13	(75,100)	(150,176)	(62,113)	106.775	18.385
圖 14	(460,200)	(461,189)	(464,206)	11.045	7.211
圖 15	(410,83)	(385,212)	(368,115)	131.400	38.275

3. 結論

本論文的主要目的在於比較兩種定位方法在實現中型足球機器人定位需求的完成度，但是實際球場的狀況與模擬環境將會有些不同。由於攝影機以擷取影像時，距離過遠的一門在視覺系統的影像中將被扭曲的很小，定位系統無法正確辨識出球門之兩端點，因而產生微小的初始化差異，導致演算結果將誤差放大而定位失準的現象。

採用雙圓定位法時，因雙圓定位法使用的參考物為位於場地內部的兩球門之邊界，兩圓交點並無法涵蓋整個球場範圍，所以產生定位有死角的狀況發生，導致定位會有相當大的誤差。也因如此，雙圓定位法必須在範圍有限的參考物資訊中計算定位座標，無法完全符合實際競賽時的狀況與需求，依雙圓定位法所定出之座標傳送至後端的決策系統時，決策系統會因為定位失準而導致採用之團體策略錯誤，錯失搶球時機，並有可能與其他機器人產生碰撞。

本論文改採用以計算三角形性質為基礎的三點定位法，來修正雙圓定位法之定位誤差。在視覺系統與環境資訊分析模組所整合之資訊無誤的情況下，三點定位法可以準確的定位出機器人在實際球場上的位置，進而從定位出的機器人座標配合距離模組定位出其他例如球、友方或敵方機器人等物體的位置，之後定位系統的結果也可以提供後端的決策系統使用，藉以計算出一有效率且快速反應之組織策略，提高於機器人足球賽中之獲勝機率。

誌謝

感謝淡江大學電機工程學系智慧型控制實驗室的相關技術指導，使定位系統之架構能夠在規劃時程內順利建構完成，並感謝銘傳大學提供競爭型預算以支持本計畫之進行。

參考文獻 (References)

- [1] RoboCup, <http://www.robocup.org/>, 更新日期：2012/5/20。
- [2] FIRA | Federation of International Robot-soccer Association, <http://www.fira.net/>, 更新日期：2012/5/20。
- [3] 鄧宏志, 中型機器人足球系統之即時影像處理, 淡江大學電機工程學系控制晶片與系統組, 碩士論文, 民國 95 年, 頁 46-64。
- [4] 何丞堯, 全方位視覺足球機器人自我定位系統的設計與實現, 淡江大學電機工程學系機器人工程組, 碩士論文, 民國 98 年, 頁 14-27。
- [5] 王侯禕, 多足球機器人之策略設計, 淡江大學電機工程學系, 博士論文, 民國 97 年, 頁 21-26。