

30. 應用RFID技術於移動式機器人定位系統之研製

姚文隆 教授、陳修德
國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系

摘要

本專題為研製一套機器人導航系統，目的在解決目前室內移動式機器人使用編碼器定位法所產生之累積誤差 (cumulative error)。本系統以 RFID 技術取代傳統光編碼器，以接收訊號強度 (RSS) 定位法定位，計算目標點座標，結合灰預測法對機器人旋轉角度有效預測，縮短機器人移動路徑。本灰導航定位系統只需將電子標籤設置於目標處，機器人即可自動導航至目的地，可應用於各種不同之工作地點，節省系統開發時間。相較於光編碼器導航定位系統，在半徑 4 公尺的移動範圍中，灰導航定位系統能降低誤差 75.22%，距離誤差控制在半徑 60 公分內，有效解決傳統光編碼器累積誤差的問題。

關鍵字：RFID、接收訊號強度、灰預測法、導航系統

1. 前言

隨著技術的成熟，機器人的功能也愈來愈多元化，如：導覽機器人、清潔機器人...等。這類型的機器人在執行任務時經常要四處移動，因此要如何使機器人知道現在所處的位置也就格外的重要。在室外已有相當成熟的 GPS 技術可做為導航與定位的依據，但在複雜的室內環境中，受到障礙物干擾的影響也較大，至今仍無較完善的解決方案。

傳統機器人的定位系統多由編碼器與陀螺儀的所組成，在執行導航任務時必須知道起點與終點之間的距離，事先對工作地點進行量測，將環境資訊建構於資料庫中，才可由編碼器推算出目前位置，不過地圖的建置往往費時費力。另外機器人在移動過程中，輪子與地面有時會發生打滑，使編碼器產生測量上誤差，當時間一久，這些累積誤差 (cumulative error) 將使得我們無法忽視。

尤清達 [1] 所發展之避障機器人是以前輪為驅動器，其中機器人移動距離即是以編碼器來計算，在文章中也說明了，機器人在轉彎時是以左右輪差速的方式來實現，若機器人本體扭力過大會使輪胎抓地力不足，使輪子發生空轉的現象，並建議可以更換輪子或加大輪徑的方式來改善，但這樣還是無法將累積誤差的問題完全解決。鄭榮煌 [2] 則使用光流影像感測器

(Optical Flow Sensor) 來取代編碼器以提高定位之精確度，但在長時間運行下，還是會有累積誤差產生。

在室內定位技術方面，R. Want [3] 以漫射紅外線 (diffuse infrared) 技術發展 Active Badge 的定位系統，使用者所配戴的行動臂章會發出紅外線訊號，再由建置在室內的紅外線感測器接收，將資料傳回伺服器並計算使用者目前所在的位置。但紅外線僅能直線行進、傳輸距離短、易受外在環境干擾因此較不受到重視。L. M. Ni, Y. Liu 及 A. P. Patil [4] 在 2003 年提出了以 LANDMARC (Location Identification based on Dynamic Active RFID Calibration) 進行室內定位，在 LANDMARC 方法中，運用了 4 個讀取器 (Reader) 與 16 個主動式電子標籤 (Active Tags) 來計算追蹤標籤 (Tracking Tag) 的位置，此系統最主要的優點在於利用參考標籤 (Reference Tag) 的概念，來改善物體定位時的整體精確度。由讀取器讀取 Tracking Tag 的訊號強度並與 Reference Tag 進行比對，推算出 Tracking Tag 的位置，實驗結果顯示，定位距離誤差有 50% 約在 1 公尺左右，而最大的定位距離誤差可達 2 公尺內。

綜合以上，室內機器人若以編碼器計算移動之距離，在長時間航行後會有累積誤差，且機器人移動時所需的地圖資訊，在建構上往往費時費力。本研究將應用室內無線定位技術研製一套先進智慧型導航控制系統，機器人能迅速正確地航行至目的地。本文架構如下：第二章介紹相關研究方法，第三章對本系統進行說明，第四章為實驗之結果，第五章為結論。

2. 研究方法

本研究以 RFID 系統作為無線通訊介面，而定位演算法則以接收訊號強度 (RSS) 定位法進行定位，由於訊號強度在量測時會受到室內環境之干擾而導致定位準確度不佳，因此加入灰預測法降低干擾對控制器之影響 (圖 1)。

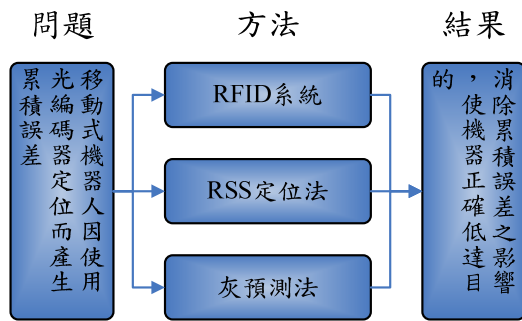


圖 1 研究架構圖

2.1 接收訊號強度測距法

接收訊號強度(Received Signal Strength · RSS) [5]是以訊號功率傳播模型為基礎，來估測發射端與接收端之距離。無線電之電磁波在自由空間中傳播，其傳播距離越遠能量密度越小，當接收器在不同位置，所量測的訊號強度也會不同。因此必須事先建構環境之訊號傳播衰減模型。而無線電訊號傳播方程式為：

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (1)$$

其中 $P_r(d)$ 為接收功率， P_t 是發射功率， G_t 是發射天線增益， G_r 是接收天線增益， λ 是工作波長， d 是傳播距離， L 是系統損耗因子 (System Loss Factor)。等式中除了距離 d 未知之外，其他參數皆已知或可以量測。

如圖 2 所示，先將三個接收點量得的訊號強度值 (RSS) 轉換成距離 r ，再以接收點為圓心，計算出來的距離為半徑畫圓，則訊號發射源將會落於此一圓上。當有三個量測點可以畫出圓時，所交會的交點即為訊號發射源的位置。

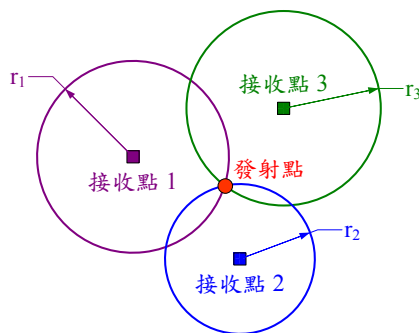


圖 2 RSS 定位法示意圖

式(2)為發射點與接收點之距離計算公式：

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2)$$

其中， r_i 為發射點至接收點之距離； (x_i, y_i) 為接收點之座標； (x, y) 為發射點座標。將距離 r (由測量之訊號強度值轉換求得) 與三個接收點之座標代入(2)式，可得下列聯立方程式：

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \end{cases}$$

將上述方程式展開後相減可得：

$$\begin{cases} r_1^2 - r_2^2 = -2x_1x - 2y_1y + 2x_2x + 2y_2y + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ r_1^2 - r_3^2 = -2x_1x - 2y_1y + 2x_3x + 2y_3y + x_1^2 + y_1^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{cases}$$

為簡化求解過程，上述聯立方程式可化為矩陣型式：

$$\begin{bmatrix} r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 \end{bmatrix}$$

整理後如式(3)所示：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (3)$$

將已知參數代入即可求得發射點座標 (x, y) 。

2.2 灰預測法

灰色系統理論 (Gray System Theory) 是由大陸學者鄧聚龍教授於 1982 年所發表之理論。其特色在於只需極少之歷史資料，即可對系統進行建模產生灰色模型 (Gray Model · GM)。「灰預測」是以灰色模型為基礎，所進行的一種預測方法，以少量的歷史數據，求得數據未來發展之情形。而灰預測共可分為下列幾項步驟：

(1) 原始數據的擷取：

此步驟是取得系統之歷史數據，作為預測未來結果之參考。

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), n \geq 2 \quad (4)$$

(2) 累加生成 (Accumulated Generating

Operation) :

AGO 的意義是使原本無規律之數列·經由數列的累加後使其呈現遞增趨勢的規律。

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)), n \geq 2 \quad (5)$$

$$\text{其中：} x^{(1)}(k) = \sum_1^k x^{(0)}(m)$$

(3) 均質生成 (Mean Value Generating Operation) :

將數列前後兩項相加求取其平均值·可使數列較具有線性化。

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)) \quad (6)$$

$$\text{其中：} z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$$

(4) 建構數據矩陣 B 及數據向量 y_N :

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ -z^{(1)}(4) & 1 \end{bmatrix} \quad y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \end{bmatrix}$$

(5) 求解 GM (1,1) 模型參數 :

將第(4)步之 B 矩陣與 y_N 矩陣代入下列方程式

後·即可求得 GM (1,1) 之模型參數 a、b。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (7)$$

(6) 建立 GM (1,1) 預測模型 :

將第(5)步所求得之參數 a、b 代入 GM (1,1) 預測模型·即可求得本系統之灰預測模型。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (9)$$

(7) 求預測值 :

將 k=4 代入(2-12)式·即可求得預測值 $\hat{x}^{(0)}(5)$ 。

3. 系統介紹

3.1 移動式機器人

本研究以輪式機器人為載具·研製移動式機器人之導航定位系統·機器人硬體架構如圖 3 所示·共分為控制、電力、感測、定位四大系統·各系統所使用元件如表 1 所示 :

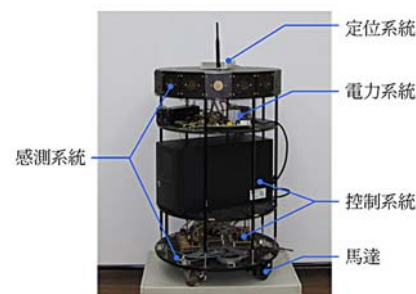


圖 3 機器人硬體架構圖

表 1 機器人系統分類表

系統分類	使用元件
控制系統	<ul style="list-style-type: none"> ■PC Controller ■感測器控制模組 ■馬達控制模組 ■串列埠傳輸模組
電力系統	<ul style="list-style-type: none"> ■電壓轉換模組 ■鉛酸電池
感測系統	<ul style="list-style-type: none"> ■超音波感測器 ■紅外線感測器
定位系統	<ul style="list-style-type: none"> ■RFID 讀取器 ■RFID 電子標籤

輪式機器人在定位上最大的問題發生於·使用光編碼器計算距離時會產生誤差·此誤差會不斷累積無法消除·因此本研究以 RFID 系統取代光編碼器·來解決累積誤差的問題。

3.2 RFID 系統

RFID (Radio Frequency Identification)·中文名稱為「無線射頻辨識系統」·是一種非接觸式自動識別系統·主要是由讀取器(Reader)·電子標籤(Tag)·天線 (Antenna) 三個元件所組成·讀取器會與電腦連接·主要是用來讀取電子標籤的訊號·而讀取器與電子標籤之間是透過射頻訊號來進行資料的傳遞·其運作流程是由讀取器發出命令給電子標籤·當電子標籤接收到訊號後·由內部 IC 將資料進行處理並回傳至讀取器·完成發射、接收的循環。

本研究採用讀取器之頻率為 2.4GHz，以及主動式電子標籤 (Active Tag) (圖 4)，標籤是以電池作為電力來源。與讀取器之間是透過反向散射耦合 (Backscatter Coupling) 的方式傳輸，此傳輸方式傳輸距離較長，動作流程如圖 5 所示，由讀取器發出命令透過天線將訊號發射出去，當電子標籤接收到訊號後，則會驅動內部 IC 進行邏輯的運算與資料的處理後再將資料回傳給讀取器。主要應用範圍為醫療、運輸管理等用途。



圖 4 RFID Reader(左)、RFID Tag(右)

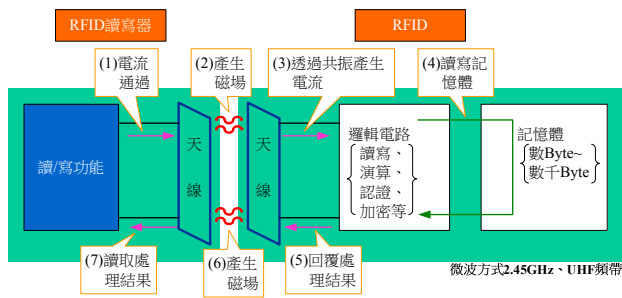


圖 5 RFID 傳輸原理 [7]

圖 6 為本系統所使用之 RFID 設備之訊號強度與距離關係曲線，水平軸為距離；垂直軸為訊號強度，圖中圓點是在指定位置上所測得之訊號強度，而實線則是將數據以二階曲線擬合之結果，所得曲線方程式為：

$$RSS = 0.00018x^2 - 0.20329x + 194.9196 \quad (10)$$

在程式中將以此方程式做為訊號強度與距離之轉換依據。

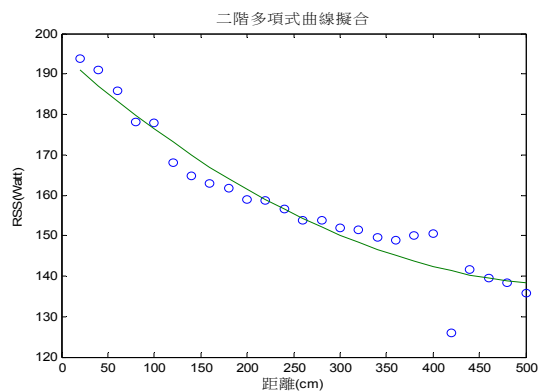


圖 6 訊號強度與距離關係曲線

3.3 灰控制器設計

灰控制器是以 RFID 系統為架構，包含 RSS 定位法以及灰預測法之導航控制器，其控制順序如表 2 所示；機器人航示圖如圖 7，訊號強度 (RSS) 與距離之將以(11)式作轉換。控制流程如下列步驟：

- (1) 設機器人初始座標為 (x_0, y_0) ，此處可量得訊號強度值 RSS_0 。由於目前資訊不足，因此假定目標位於正前方 (a_1, b_1) 處，令機器人旋轉角 $\phi_0 = 0$ ，並前進單位步長 S 。
- (2) 當機器人移動到座標 (x_1, y_1) 可量得訊號強度值 RSS_1 。將 RSS_0 、 RSS_1 轉換成距離 L_0 、 L_1 後與單位步長 S 可由餘弦定理計算出目標點 (a_2, b_2) ，並求得 (x_1, y_1) 到 (a_2, b_2) 之距離與角度 (r_1, ϕ_1) ， ϕ_1 則為機器人在 (x_1, y_1) 之旋轉角，旋轉 ϕ_1 後則移動單位步長 S 至 (x_2, y_2) 。
- (3) 在 (x_2, y_2) 可量得 RSS_2 ，將 RSS_0 、 RSS_1 、 RSS_2 轉換成距離 L_0 、 L_1 、 L_2 後可以三角測距法求目標點 (a_3, b_3) ，而 (x_2, y_2) 到 (a_3, b_3) 之相對位置為 (r_2, ϕ_2) 。機器人則旋轉 ϕ_2 、前進 S 距離後移動到 (x_3, y_3) 。
- (4) 在 (x_3, y_3) 可量得 RSS_3 ，同樣將 RSS_1 、 RSS_2 、 RSS_3 轉成距離 L_1 、 L_2 、 L_3 ，以三角測距法計算目標點 (a_4, b_4) ，而 (x_3, y_3) 至 (a_4, b_4) 之相對位置為 (r_3, ϕ_3) 。在此可判斷訊號強度是否逐漸增強，若滿足 $RSS_0 < RSS_1 < RSS_2 < RSS_3$ ，則表示朝目標點之方向前進。為了降低干擾的影響，避免機器人不時的左右旋轉，並減少移動距離，可先以 (x_3, y_3) 與 ϕ_3 計算下一點座標 (x'_4, y'_4) ，並將 ϕ_0 、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 以灰預測法預測機器人於 (x'_4, y'_4) 之旋轉角 ϕ'_4 ，由 (x'_4, y'_4) 與 ϕ'_4 再求得下一點座標 (x'_5, y'_5) 。此時若將移動路徑改由 (x_3, y_3) 移動至 (x'_5, y'_5) 則可減少機器人旋轉次數，而修正的角度變為 $\phi_3 + \phi'_4/2$ ，此角度即為機器人在 (x_3, y_3) 之旋轉角。

重覆上述步驟，若訊號強度為遞增時，則進入灰

預測模式；若訊號強度非遞增時，依三角測距法估測訊號發射點座標，修正移動方向，直到抵達目的為止。

表 2 灰控制器之控制順序

機器人座標	訊號強度	目標估測	目標方位	機器人預測座標	目標方位預測值	機器人旋轉角度
(x_0, y_0)	RSS 0	(a_1, b_1)	(r_0, ϕ_0)	-	-	$\phi_0 = 0$
(x_1, y_1)	RSS 1	(a_2, b_2)	(r_1, ϕ_1)	-	-	ϕ_1
(x_2, y_2)	RSS 2	(a_3, b_3)	(r_2, ϕ_2)	-	-	ϕ_2
(x_3, y_3)	RSS 3	(a_4, b_4)	(r_3, ϕ_3)	(x'_4, y'_4)	(r_4, ϕ'_4)	$\phi_3 + \frac{\phi'_4}{2}$

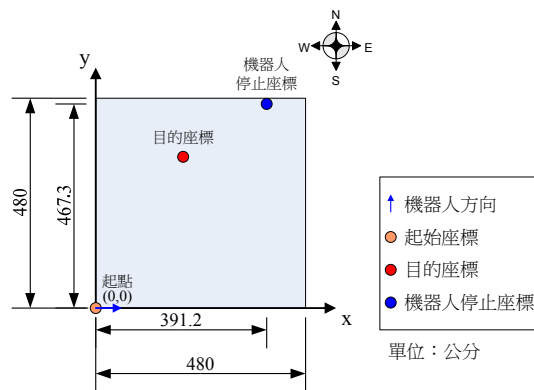


圖 8 光編碼器導航定位系統之機器人移動距離誤差

圖 8 為機器人移動之結果，最終機器人停止位置為(391.2,467.3)，機器人與目標點之距離誤差計算如下：

$$\begin{aligned}
 e &= \sqrt{(391.2 - 200)^2 + (467.3 - 346.5)^2} \\
 &= \sqrt{(191.2)^2 + (120.8)^2} \\
 &= 226.16 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

誤差造成的原因主要是來自於光編碼器的累積誤差以及電子羅盤測量誤差的影響，光編碼器會因輪子打滑與圓周率計算而產生誤差，此誤差會不斷的累積無法消除，而電子羅盤容易受到磁性物體的影響(例：地板下的電線、鐵製品...等)，使機器人在角度計算上發生誤差。由實驗結果看來，當與目標相距 4 公尺時距離誤差為 226.16 公分，當機器人運行時間愈長或是移動的距離愈遠，則誤差也會相對增加。

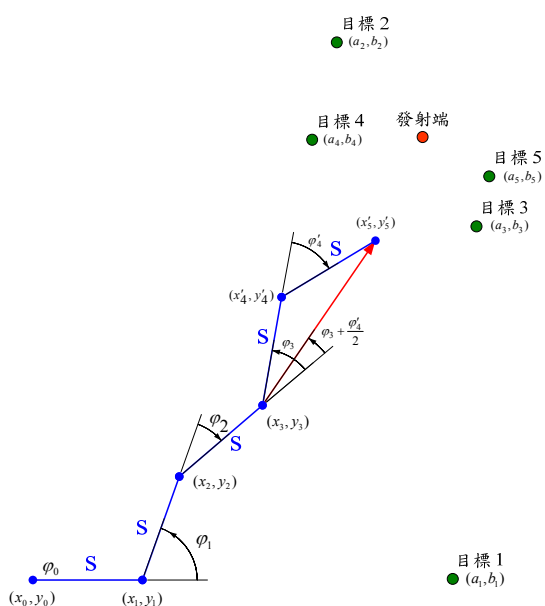


圖 7 機器人航行示意圖

4. 實驗結果

導航程式是以 VB 6.0 所撰寫，分成光編碼器定位系統與灰導航定位系統，在此實驗中機器人皆由原點位置出發，目標點設於與機器人相距 4 公尺，與 x 軸夾 60°角處，相當於平面座標(200,346.5)之位置。以下將對此兩種系統進行比較：

4.1 光編碼器定位系統試驗

在光編碼器定位系統測試實驗中，機器人移動時所使用的感測元件為光編碼器、電子羅盤，光編碼器是計算脈波數目來推算移動的距離，電子羅盤是利用地磁來判斷目前方位。

4.2 灰導航定位系統試驗

本灰導航定位系統是由 RSS 導航定位系統結合灰預測法所研製而成。灰預測法主要是對機器人之旋轉角度進行預測，提前修正機器人移動路徑，縮短機器人行走距離，減少不必要的旋轉角度，使機器人更快抵達目的。

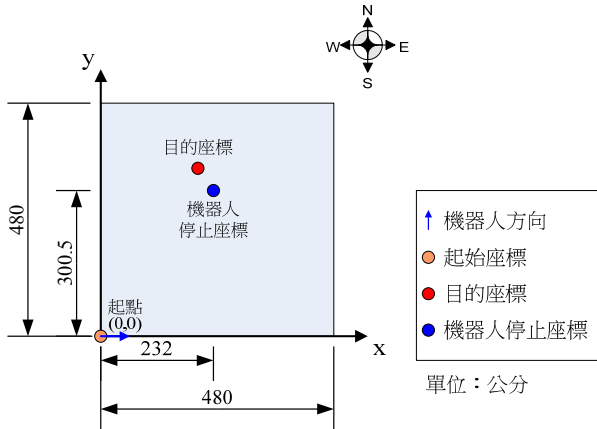


圖 9 灰導航定位系統之機器人移動距離誤差

在圖 9 中機器人最終停止座標為(232,300.5)·與目的座標之距離誤差為：

$$\begin{aligned}
 e &= \sqrt{(232 - 200)^2 + (300.5 - 346.5)^2} \\
 &= \sqrt{(32)^2 + (-46)^2} \\
 &= 56.03 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

相較於光編碼器定位系統·灰導航定位系統可將機器人與目標點之距離誤差控制在半徑 60 公分內·降低誤差 75.22%·能有效解決累積誤差的問題·本研究先進智慧型灰導航定位系統可作為室內移動式機器人之導航系統·提升導航效率。

5. 結論

本研究解決機器人因使用光編碼器計算位置座標時·會產生累積誤差之問題·以 RFID 技術取代傳統光編碼器·使用 RSS 定位法計算目標點座標·為避免機器人移動時不必要的旋轉·本研究導入灰預測法計算機器人之旋轉角度·提出以灰預測法結合 RSS 定位法之灰導航定位系統·由實驗中可知·灰導航定位系統可將機器人與目標點之距離誤差控制在半徑 60 公分內·可以降低誤差 75.22%·能夠有效地解決累積誤差的問題·本導航系統以 RFID 進行定位·只需將電子標籤設置於目標處·機器人即可自行追蹤進行導航·可應用於各種不同之工作地點·節省系統開發時間。

參考文獻

1. 尤清達·以數位訊號處理器實現模糊理論於車型機器人之避障策略·碩士論文·逢甲大學·台中·台灣·2005
2. 鄭榮煌·使用光流影像感測的全方向運動平台之空間軌跡追蹤系統設計·碩士論文·交通大學·新竹·台灣·2006
3. R. Want et al., The Active Badge Location System, ACM Trans. Information Systems, Jan.1992, pp. 91-102.
4. L. M. Ni, Y. Liu and A. P. Patil, LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID, Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom' 03), 2003, pp. 407-415.
5. Lau Erin-Ee-Lin, Lee Boon-Giin, Lee Seung-Chul, Chung Wan-Young, ENHANCED RSSI-BASED HIGH ACCURACY REAL-TIME USER LOCATION TRACKING SYSTEM FOR INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS, INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS, VOL. 1, NO. 2, JUNE 2008
6. 鄧聚龍·灰色系統理論與應用·高立圖書·台北·台灣·2000
7. 日經編輯部著·周湘琪譯·RFID 技術與應用·旗標·台北·台灣·2004