

應用區域地圖網絡於隨機為基清掃機器人的覆蓋率改善

許景翔、余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

*通訊作者: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本文透過區域地圖網絡的建立，改善隨機為基機器人的清掃效率，以循邊移動的過程中辨識佈置在牆壁下緣的路標，並估計機器人相對於路標的移動路徑，轉換成格點座標建立扇狀地圖，在清掃過程中不斷更新各路標的扇狀地圖，與路標間的相鄰關係，以建立學習型的區域地圖網絡。透過優先清掃區域、優先清掃方向、清掃停止時機判定等等方法，導引機器人前往未清掃區域打掃，藉以提昇機器人的覆蓋率。最後使用RIFD無限射頻模組實際建置路標實現本文提出的地圖網絡導航，並透過覆蓋率分析與傳統隨機覆蓋模態進行比較，驗證其改善效率。

關鍵字：清掃機器人、環境地圖建構、區域覆蓋率

1. 前言

對於居家清掃機器人而言，如何在短時間內達到全域性的覆蓋為主要的目標，目前市面上的清掃機器人產品主要有隨機為基的清掃方式，透過隨機模態、循邊模態、螺旋模態等等清掃模態的切換，搭配紅外線感測器、超音波感測器等等的有限感知方式清掃，以及規則式的清掃方式，藉由雷射[1]、影像辨識[2]等等高階感測器辨識環境及分區定位，並輔以循邊模態及牛耕模態快速覆蓋環境，能夠以低重複的方式完成打掃。而台灣在清掃機器人的市場上相對較薄弱，而主打中低價位市場，但面對複雜的環境或是多房間區域，往往造成重複清掃或受限於單一區域，導致清掃效率不佳。若能利用簡單的感測器並且強化控制邏輯之設計，較能合乎經濟效益。

如何利用機器人有限感知能力認識環境後，以反覆學習的方式建立環境地圖，對應不同環境狀況調整其控制邏輯，以提升清掃效率，達到智慧化的清掃，將會是本文的目標。

2. 機器人運動控制架構

本研究以實體輪型機器人作為載具進行智慧清掃機器人的開發，主要架構分為控制架構、障礙偵測、方位估計，載具為一般清掃機器人常用之兩驅動輪搭配一萬向輪的設計，使用微控制器作為控制核心，藉由機電架構控制機器人在環境中移動並透過機身上的感測器進行環境感測及避障並使用定位感測

器搭配路標回授機器人位置使清掃工作更加聰明與智慧。

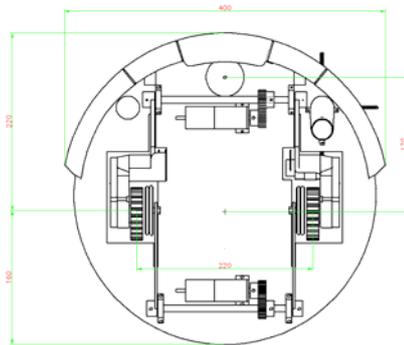


圖 1 機器人原型機

3. 扇狀地圖網絡的建立

3.1. 航位推算法

在建立格點地圖前，需透過編碼器計算左右兩輪的移動距離來推測出機器人的輪心座標及方向角，在機器人移動過程中每 Δt 時間取樣編碼器的移動量並透過以下計算公式使機器人即時運算出移動位置。

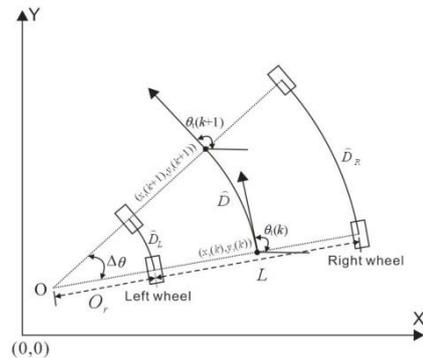


圖 2 機器人單位時間相對移動示意圖

機器人所走的路徑長 \hat{D} 為：

$$\hat{D} = \frac{\hat{D}_R + \hat{D}_L}{2} \tag{1}$$

機器人的旋轉角度 $\Delta\theta$ 為：

$$\Delta\theta = \frac{\hat{D}_R - \hat{D}_L}{L} \tag{2}$$

透過編碼器計算左右兩輪的移動距離可推測出機器人的輪心座標 $x_t(k)$ 、 $y_t(k)$ 及方向角 $\theta_t(k)$ ，並在機器人移動過程中每 Δt 時間取樣編碼器的移動量來更新座標。

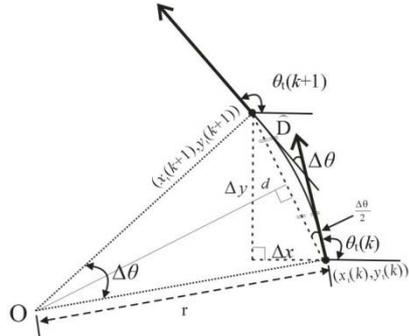


圖 3 機器人以 Δt 移動量的幾何關係示意圖

$$x_t(k+1) = x_t(k) + \left(\frac{D_R + D_L}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \cos \left(\theta_t(k) + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (3)$$

$$y_t(k+1) = y_t(k) + \left(\frac{D_R + D_L}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \sin \left(\theta_t(k) + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (4)$$

$$\theta_t(k+1) = \theta_t(k) + \Delta\theta \quad (5)$$

3.2. 扇狀地圖的建立

本文以驅動輪編碼器和路標(Landmark)辨識組成局部定位系統，在地圖的建置中將以每個路標作為獨立的原點(紅點)(圖4)，以該路標原點建立 40×40 的格點地圖矩陣，同時根據機器人吸口與掃刷清掃範圍定義每個格點為 $20 \times 20 \text{cm}$ ，機器人行走過程中的路徑透過編碼器紀錄並將資料轉換為格點顯示，且格點中的數字代表機器人經過次數，由此建立相對於各路標的歷史地圖。同時利用格點覆蓋次數，推算出一過濾門檻值(threshold)，剔除與路標原點不相鄰之零散或離島區域(圖5)，建立該環境地圖之核心扇狀地圖，當機器人在清掃的過程中偵測到路標後，即啟動扇狀地圖，透過當前的清掃紀錄與扇狀地圖進行比對，以導引機器人進行清掃工作。

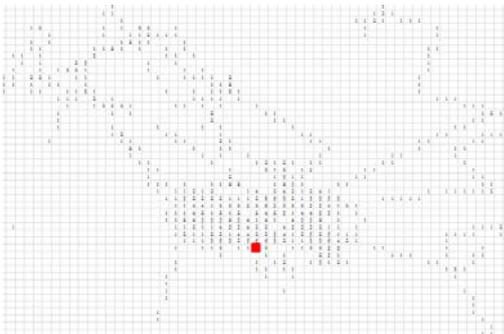


圖 4 路標格點地圖累積覆蓋次數示意圖

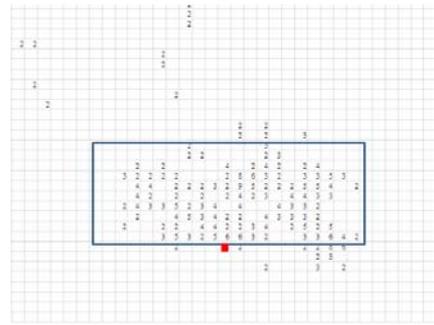


圖 5 路標核心扇狀地圖

3.3. 區域地圖網絡

在過去許多利用路標定位的文獻中，大多需要在環境地板上放置大量的路標[3]，且需要確定每個路標的座標位置，此方法需要專門的裝潢且設置上也相當不便，因此本文將路標放置在牆壁下緣[4]，不需要精確的定位路標的座標位置，透過機器人循邊模態的特性，在循邊的過程中感應到路標，建立路標間的相鄰關係，並分別將相對於每個路標的格點地圖記錄下來，作為定位及清掃導航的依據。

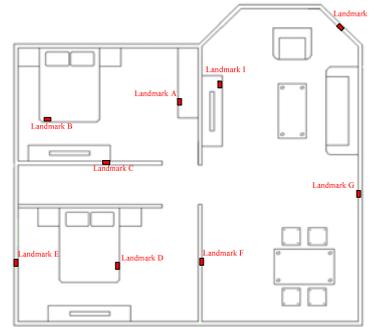


圖 6 路標建置示意圖

透過不斷的學習與更新，各個路標可逐漸得到其扇狀地圖，但各路標的地圖之間是不相連的，因此在清掃過程中需要導引機器人在路標間切換移動，而其依據則透過清掃過程中紀錄路標與路標間的通過機率和次數，作為路標導引的判斷。由下式計算路標間的通過機率， i 、 j 分別為兩個路標，利用通過次數(n_{ij})除以通過總數($\sum_{K=1}^{\lambda} n_{ik}$)，藉此了解路標之間的方向及強弱關聯性。同時以各路標經過次數(m_i)除以全部路標經過次數相加後($\sum_i^M m_i$)計算單一路標的被經過機率 P_i ，以了解路標與其它路標間鏈結強度。

$$\alpha_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{K=1}^{\lambda} n_{ik}} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{m_i}{\sum_i^M m_i} \quad (7)$$

α_{ij} ：路標間通過機率
 n ：相鄰路標的通過次數
 P_i ：單一路標被經過的機率
 m_i ：各路標經過次數
 M ：所有路標總數

4. 扇狀地圖用於全域清掃

4.1. 清掃覆蓋率分析

當機器人得知扇狀地圖後，往後每當機器人經過路標時，即可比對扇狀地圖和當下的清掃狀況，找出未清掃的區域，在每次清掃時將扇狀地圖減掉當前覆蓋區域即可計算出未清掃區域，而我們即可透過核心清掃覆蓋率來估計機器人在一個環境的清掃效率和覆蓋程度。

$$\text{區域覆蓋率} = \left(\frac{\text{已清掃區域格點數}}{\text{扇狀地圖格點數}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

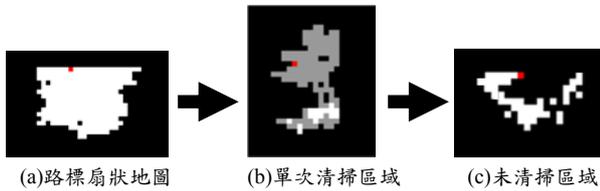


圖 7 未清掃區域

4.2. 優先清掃方向

機器人在清掃過程中，如何快速的覆蓋未清掃區域是一個重要問題，本研究透過扇狀地圖的建立，可找出當次清掃時的未清掃區域，而優先清掃方向執行的時機為每次機器人經過路標時，此時機器人的位置及轉向角度誤差最少，因此我們可利用此特性導引機器人轉往尚未清掃的方向，以利覆蓋率的快速提升。轉向角度的計算方法為，求出未清掃區域的形心座標 (x_i, y_i) ，並計算路標與形心的 θ 角度，轉向後即朝向形心前進，並隨時計算路標與形心之間的距離，過程中如遇到障礙則透過循邊模態繞行障礙避開。

$$\text{未清掃區域方向角度} = \tan^{-1} \left(\frac{y_i}{x_i} \right) \quad (9)$$

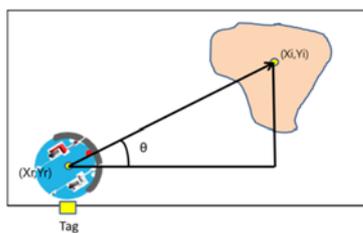


圖 8 轉向未清掃區域重心角度

4.3. 優先清掃區域

本文使用的清掃方式為隨機>循邊>隨機>循邊>隨機>長循邊(尋找路標)，透過此清掃方式在單一路標中進行清掃，並以長循邊在路標和路標間進行切換

的動作，因此可得到路標之間的相鄰關係，以期望值的方式在每次通過路標時判斷是否該留在原本的路標清掃，或是前往其它路標清掃。

判斷方法為計算當前地區路標及相鄰區域的期望值，將各路標間的通過機率 α_{ij} 乘上覆蓋率改善值 CI_i 得到相鄰路標間的清掃期望值並比較各路標期望值決定是否留在原路標繼續清掃或是前往其它路標對全域覆蓋率的提升最有幫助。

$$E(CI_j) = (\alpha_{ij})(CI_i) \quad (10)$$

$E(CI_i)$ = 路標區域 i 的清掃期望值

CI_i = 路標區域 i 的覆蓋率改善值

α_{ij} = 相鄰路標經過機率

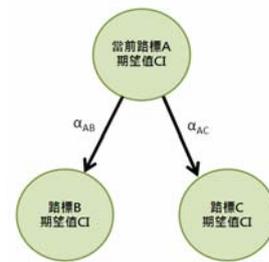


圖 9 優先清掃區域

4.4. 清掃停止時機判定

機器人經過不斷反覆清掃後，覆蓋率隨著時間而不斷上升，理論上只要有足夠的時間，清掃覆蓋率都能達到 80-90 % 以上，且全域清掃覆蓋率會有逐漸趨緩的趨勢，因此在清掃工作後期我們加入一個判斷條件使機器人自行判斷是否結束清掃工作，以避免過度打掃延長工作時間，運作方式為每當全核心覆蓋率達到 70 % 以上後，即開始判斷全核心覆蓋率是否有繼續上升的趨勢，以每單次的清掃循環為單位判斷是否有使全域覆蓋率上升 1 % 為原則，若無明顯上升為條件，控制機器人結束工作。

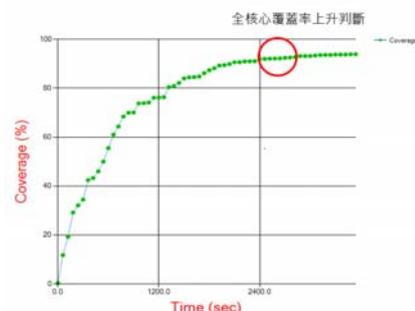


圖 10 清掃停止判斷

5. 感測與移動誤差分析與校正

機器人在室內環境中移動，我們希望機器人可以依照所編寫的程序移動，但事實上卻不容易辦到，原

因是機器人根據內部感測器反饋估計值進行移動的控制，而感測器通常會有一定的誤差範圍，且可能受到的影響造成誤判，如我們透過馬達編碼器來控制機器人移動，但在長時間移動下可能會因滑動、重心等原因產生誤差，因此本節將分析驅動與感測器誤差，並提出改善方案。

5.1. 兩輪同動校正

機器人在分別給予兩輪馬達相同的PWM脈波訊號使兩輪以相同速度前進時，結果可能不盡然如我們想的直線前進動作，其原因可能為重心分配不均勻造成兩輪負載不同或兩輪行駛在不同材質的地面上等等，而透過同動控制即時監測兩輪轉速可有效解決以上問題，其運作原理如下(圖11)，首先給予指定前進速度(公分/秒)並在兩輪轉動時透過編碼器即時回授兩輪的轉速，並給予右輪維持轉速在指定的輪速，並根據回授的速度控制左輪速度，如不足即增加PWM值；超過則減少PWM值，持續調整兩輪趨近指定速度。

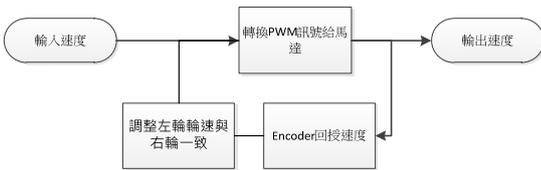


圖 11 兩輪同動校正

5.2. 直行前進誤差測試

我們將機器人放置在相同的環境中，給前進指令，分成不同長度測試五次距離20-200公分，從相同的起點出發測試機器人在不同的距離其誤差值(圖12)，從誤差趨勢線來看，其誤差量是可以準確預測到的，而誤差值主要都有略為縮減的趨勢，因此判斷可能為機器人的軟性輪胎在地面上壓縮使輪徑減少所造成的距離縮減。根據測試結果可將直行指令的輪徑(D)的大小減少以補正直行誤差。

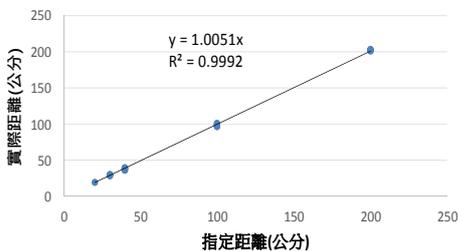


圖 12 直行前進誤差測試

5.3. 原地旋轉誤差測試

原地旋轉實機測試，在相同環境的平面地板上分別測試不同的旋轉角度，我們以每45度為一組測試0-180度，每組測試五次並使用精度為1度的量角器量測其誤差值(圖13)。

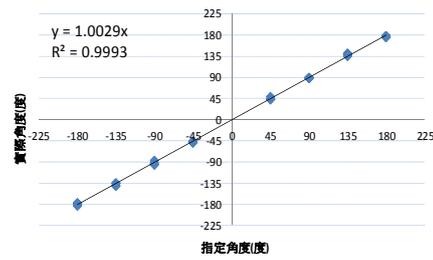


圖 13 原地旋轉誤差測試

藉由測試結果我們可以將誤差值擬合成趨勢線並得到趨勢線公式 $y=1.0029x$ ，將指定角度乘上公式將會得到實際的預測角度值，並將誤差與趨勢線值求出其均方根誤差(Root mean squared error)，公式如下(5)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

根據計算結果可得知實驗數據與真實值的離散程度，作為角度校正時的參考，依據各角度的測量結果誤差利用均方根誤差公式計算RMSE值為3.4度，假設數據為常態分佈將有95%的誤差在±8度內。

6. 區域地圖的實現與測試

6.1. 單路標地圖建置

本文使用RFID射頻辨識的作為路標的實測方法，使用小型的無源式RFID Tag(圖14)並貼於牆壁下緣，本研究使用低功耗型RFID Reader判讀距離最遠可達10(公分)，將RFID Reader設置於機器人側邊(圖15)，在機器人循牆移動的過程中即可辨識並設定機器人位於區域地圖之起始位置。



圖 14 RFID Tag



圖 15 RFID Reader

接著我們針對單一路標測試扇狀地圖的建置效果，首先我們將機器人擺放在一空曠區域進行實測如下(圖16)黃色範圍，接著將路標擺放至中間下方的綠色位置。測試結果我們可以看到，每次清掃過程中不斷記錄的歷史地圖(圖16)，透過門檻值剔除低覆蓋區

域後可以得到扇狀地圖(圖17)，我們從扇狀地圖可以發現雖然有效的減少許多格點但還是有些許區域出現在範圍外，造成此誤判的原因有可能是機器人的編碼器經過多次轉向後，累積的角度造成誤差，因此需要更多時間累積以得到完整的扇狀地圖。



圖 16 測試歷史地圖

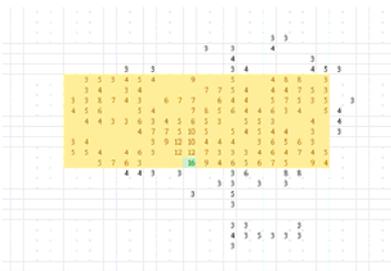


圖 17 測試核心地圖

6.2. 多路標地圖建置

測試了單一路標的建立後，接著我們在區域中利用圍障礙物劃分清掃區域(圖18)，並在環境中適當的佈置三個路標並測試各路標的地圖建立情況，並將各地圖組合成完整的區域地圖網絡(圖19)。藉由組合結果，我們可以看到各路標區域的扇狀地圖拼接的示意圖也能初步得到接近路標相似的環境形狀。

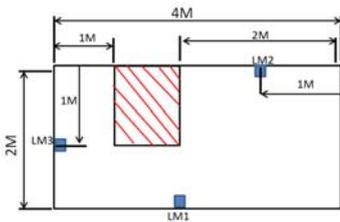


圖 18 多路標測試環境配置

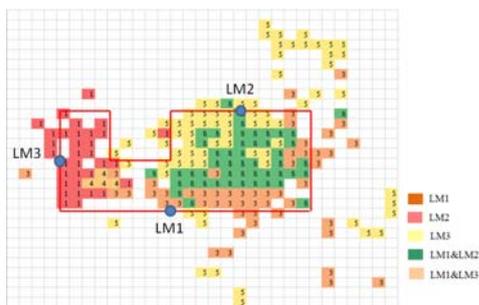


圖 19 整合扇狀地圖網絡

6.3. 路標相鄰關係建立

接著要取得路標地圖網絡之間的關係，我們在測試過程中記下路標之間的相鄰關係，經過測試後可得到強弱關係圖(圖20)。透過強弱關係圖可以得知每個路標的經過機率，也能知道各路標之間的關聯與各路標的方向性，結合各路標地圖覆蓋率後，可計算出各路標的清掃期望值，導引機器人優先往低覆蓋區域清掃。

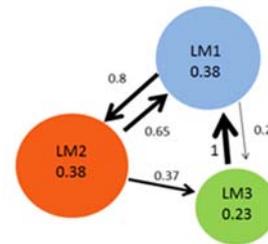


圖 20 路標地圖網絡

6.4. 地圖網絡實測與覆蓋率分析

最後，我們透過得到的區域地圖網絡來進行一般清掃方式和利用區域地圖網絡清掃的覆蓋率上升比較，分別可以看到三個路標在清掃35分鐘後的覆蓋率上升情形，由一般模式清掃下(圖21)，路標1可以有效且穩定的進行覆蓋直到80%，而路標2在覆蓋過程中則會有停止上升的情況如5-10分鐘，路標3則上升緩慢，只到達38%。可以推斷路標1和路標2之間由於沒有切換機制導致路標2無法穩定的覆蓋，而路標3由於中間的障礙使得機器人有較少的機會通往路標3，因此使得覆蓋率無法有效提升。

同樣測試透過區域地圖網絡清掃35分鐘結果(圖22)，在清掃過程中能穩定的進行覆蓋，到了清掃中後期，原先覆蓋率較差的路標3由於優先清掃區域的選擇，因此後期路標1和路標2覆蓋趨緩後，集中往路標3進行清掃，有效的將覆蓋率提升到近70%。

而全域覆蓋率的上升結果(圖23)，雖然上升情況接近，而路標3因區域較小因此對全域覆蓋率影響較不明顯，由上升趨勢可以看出區域地圖網絡方法的上升較為穩定且平緩。

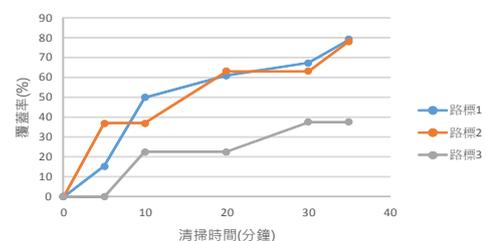


圖 21 一般清掃方式覆蓋率

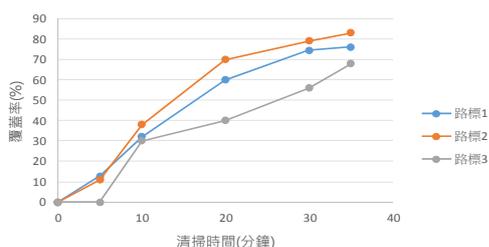


圖 22 區域地圖網絡清掃覆蓋率

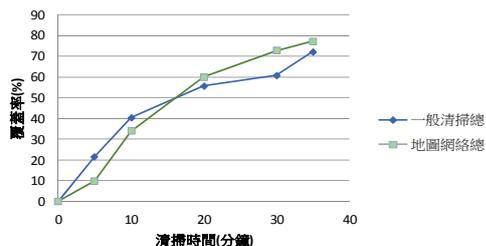


圖 23 全域覆蓋率上升比較

7. 結論

本文藉由實體原型機的建置並使用RFID實現路標地圖的概念，機器人則根據辨識到的路標建立扇狀地圖，利用馬達編碼器推算出座標位置及方向角，並導入格點，經過多次清掃並使用門檻值過濾出核心地圖，並以一系列的判斷邏輯導引機器人在路標之間切換移動，最後實際建立路標地圖進行實測，包含單路標、多路標地圖建立，及路標相鄰關係的建立，最後利用區域地圖網絡的導引，比較一般清掃方式和區域地圖網絡方法的清掃效果，並以清掃覆蓋率做為評估指標，初步驗證區域地圖網絡的有效。但單純以編碼器估計航位將會有累積誤差，未來將嘗試以多感測器融合，配合卡爾曼濾波器方式提升定位精度。

8. 參考文獻

- [1] Calves, J.-G., Costa, P, "Proposal of a Low cost Mobile Robot Prototype with On-Board Laser Scanner: Robot@Factory Competition Case Study," IFAC-PapersOnLine 49, 2016.
- [2] Fleer, D., Möller, R., Lee, K.-M, "Comparing holistic and feature-based visual methods for estimating the relative pose of mobile robots," Robotics and Autonomous Systems 89, 2016.
- [3] Peng, S., Dong, W., "Robot Navigation System with RFID and Sensors," International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 5-6 March, Hunan, China, 2012.
- [4] 許育塵, 以具有有限感知能力之清掃機器人進行樹狀地圖建構及路徑導引之研究, 碩士論文, 國立高雄第一科技大學, 高雄, 台灣, 2014。

Application of sector mapping network to improve the coverage of vacuum robots using random walks

Jing-Xiang Xu and Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and Automation Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology

*Corresponding author: jcyu@ncku.edu.tw

Abstract

Typical random based vacuum robots adopt infrared or ultrasonic sensors to detect obstacles, and apply a cleaning strategy consisted of a fixed alternation pattern among random walk, wall following, and spiral modes to cover a domestic area in a finite period of time. These robots have limited sensing capability but has a low cost advantage. However, in case of complex environments or multi-room areas, the random based cleaning strategy can cause repeated cleaning and miss some area in a multi-room layout, which results in poor cleaning efficiency. This study proposes a sector mapping network to improve the efficiency of the random-based robot cleaning. The robots can identify the RFID landmarks arranged at the lower edge of the wall during wall-following clean mode. The movement path of the robot relative to the landmark is estimated during the movement and converted to a grid-based sector map. The sector map and the neighboring information and relative direction of the landmarks are constantly updated during the process of cleaning, which is compiled into a sector mapping network. The sector mapping network is applied to determine the priority cleaning area, priority cleaning direction, cleaning stop criteria to improve the coverage efficiency. Finally, we test the prototype to implement the proposed mapping network and compare the coverage efficiency with the conventional method to demonstrate the application potential.

Keywords: Cleaning robot, Map building, Area coverage