

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

許育塵、鄭冠澤、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

本文探討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，以提升清掃效率與穩定性。清掃機器人利用所裝置的有限感測器，配合清掃環境中佈置之路標，利用局部座標系統建立所屬路標之扇狀環境地圖，並藉由反覆清掃學習，建立可靠的環境核心區域。同時利用核心區域覆蓋率計算，找出環境中並導引機器人前往尚未清掃之區域。本文搭配所提出之地圖配合觸發機制與清掃導引，提升其清掃效率與穩定性。在多房間環境模擬分析顯示覆蓋率與覆蓋變異率皆有提升，避免重複或是忽略某些區域的清掃，以確保清掃效率的穩定性。

關鍵字：清掃機器人、環境辨識、地圖建構、清掃效率、路徑規劃

1. 前言

自走機器人(Autonomous Mobile Robot)如何在複雜的居家環境中，作流暢的清掃動作與閃避各類型的障礙，其感測器的應用成為一個重要的因素。運用上常使用的感測器通常分為紅外線(infrared)、馬達編碼器(encoder)、碰撞(bumper)、視覺(vision)、超音波(ultrasonic)、雷射(laser)、無線射頻辨識系統(Radio Frequency Identification, RFID)、光流影像(Optical Flow)等。

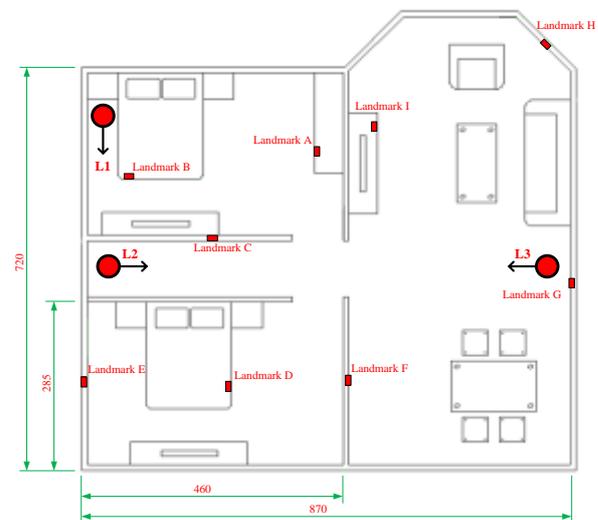
因此居家清掃機器人以如何用較短的時間內在未知環境完成全域性的清掃覆蓋為其主要目標，以往所提出之方法都必須藉由一些複雜的感測器，如利用距離感測器來辨識周圍幾何形狀[1]、以影像處理抓取QR code路標資訊建立導航之地圖[2]、利用光流影像建立環境資訊[3]、甚至利用多重感測器感測環境資訊[4]，這些感測器大都用於體型較大的載具與要價昂貴，而以居家清掃機器人能商品化及大眾所能擁有的目的來看，利用簡單的感測器並且強化所設計之清掃路徑的功能，較合乎經濟效益。而一般低成本的陀螺儀又易受到馬達運作的干擾，路標的建置雖為多數SLAM定位的依據，但再實際家用場合，一則不可能要求使用者輸入準確的路標絕對座標，二則路標的設置又必須降低對家中布置的影響，因此如何利用機器人有限感知能力，以結合同步定位與環境地圖建構，作為機器人的行進導引，以提升清掃效率，達到智慧化的清掃，將會是本文的目標。

2. 樹狀扇形地圖建構

2.1 路標設置與感測

本研究定位系統將以路標定位的方法，藉由探索路標建立出各路標相對方位與建置各路標附近之環境地圖。路標之擺放如圖所示，將各個路標黏貼至牆邊，其考量居家審美觀與操作的困難性，而機器人多具有循邊的清掃模態，在循邊時便能利用較為廉價且功能性低的紅外線感測器或RFID進行辨識路標。

路標之功用在於環境地圖之建構與連接各區域之方位關係，而路標之擺放位置將影響到研究之覆蓋結果，基本上，路標與路標間擺放的循牆邊距離長約五米，而每一房間至少擺放一路標，但房間常有障礙物將環境切割為兩個區域，則應隨著區域增加而增加擺放之路標。



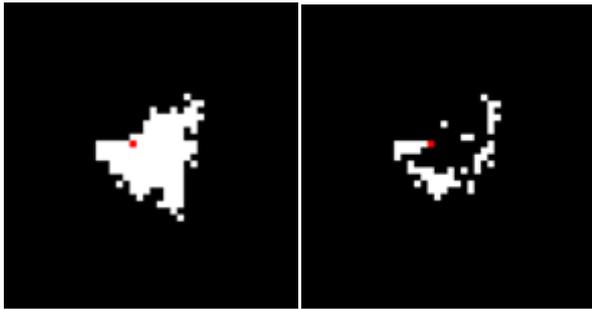
圖一：環境路標設置圖。

2.2 扇形地圖架構與清掃導引部定位系統

本研究將結合以馬達編碼器組成之局部定位系統與路標辨識，藉由路標將居家環境切割成幾個相鄰的模糊小區間。清掃機器人清掃過程將以隨機搭配循邊為主，本研究將每個路標作為單獨原點，建立相對於該路標的扇狀局部地圖，因路標將設置於牆壁下緣，將行走過的區域以格點組成，每個格點依據吸塵器吸口與掃刷的清掃範圍所決定，以該路標作為原點建立N×N的格點地圖，目前定義每個格點代表20×20 cm的



圖七：本次已清掃過之區域。



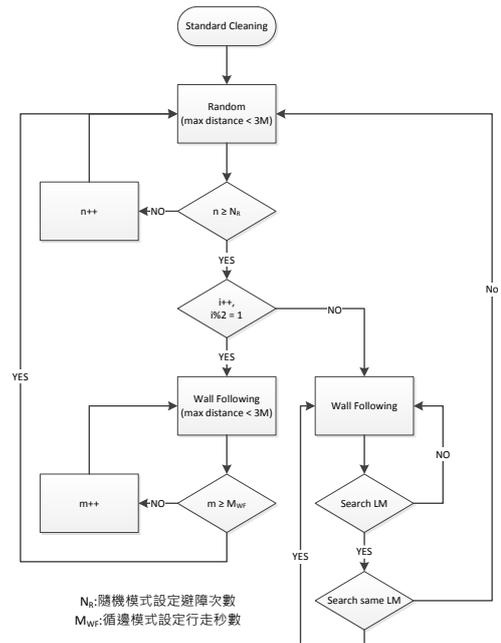
(a) (b)

圖八：路標扇型核心區域(a)原始區域(b)尚未清掃的格點。

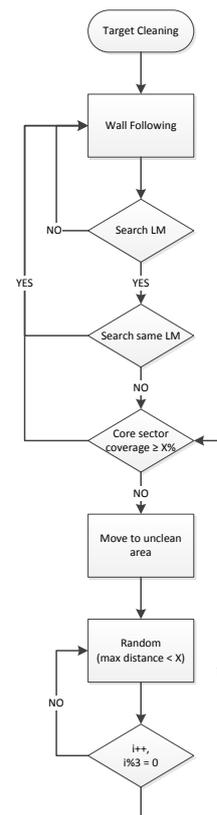
3. 樹狀地圖應用

3.1 路標設置與感測

本文之清掃控制邏輯分為兩個部分，分為標準清掃與目標清掃。標準清掃為簡單之控制作為清掃方法，如圖九所示，該方法是以Random碰撞12次搭配Wall following執行30秒與Wall following搜尋路標進行，其目的在於前期之清掃覆蓋與環境地圖之建立。在清掃之前期，環境中擁有許多未被清掃覆蓋之區域，因此以簡單之控制作為清掃方法就有不低之清掃效率，但隨著清掃時間之增加，未清掃區域之減少，造成清掃未清掃區域之難度提升。所以本研究在清掃後期以目標清掃之方法，用以提升清掃覆蓋率，圖十為目標清掃之流程圖，其首先以Wall following模式搜尋環境中之路標，並利用新建立之環境地圖比對歷史環境地圖計算出該路標扇形核心區域覆蓋率，若該覆蓋率未達到門檻值，則找出該路標待清掃區域之中心，並驅使機器人前往進行清掃，但環境地圖無法提供精確之訊息，以至於無法到達正確之座標位置，因此仍須搭配Random模式進行清掃，利用其隨機性將待清掃區域清掃。



圖九：標準清掃控制流程圖。



圖十：目標清掃控制流程圖。

在路標待清掃區域之計算，首先利用核心區域與已清掃區域之面積差異，找出未清掃區域(如圖十一)，接者利用被已清掃區域所切割的未清掃島區，找出最大面積之未清掃島區(如圖十二之橙色區域)，並將其

作為路標待清掃區域，即可利用局部座標系統找出其區域中心，以利機器人清掃導引用。

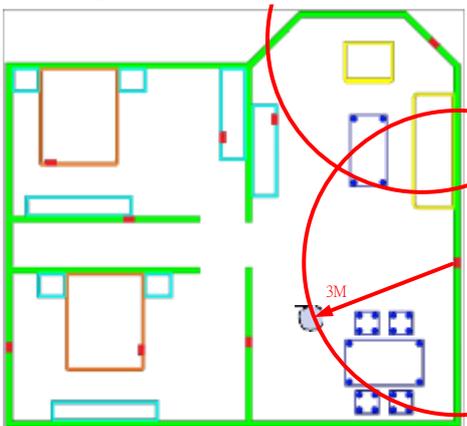


圖十一：待清掃區域計算之未清掃區域。



圖十二：未清掃區域之島區劃分。

每個路標皆有各自之扇形地區，其形狀與大小都代表了該路標附近環境狀況，為了使機器人在行徑途中不超出該扇形地區，以限制機器人與路標之距離不得超過3米(如圖十三)，其目的在於讓每個路標之扇形區域有部分重疊，使路標之擺放可覆蓋至整個環境。



圖十三：機器人與路標距離3米限制。

當在直線前進的過程中，超出設定之限制距離時，機器人將會轉向，往路標方向移動。若是在循邊過程中，超出設定之限制距離，機器人將轉向，往路標方向移動並切換至隨機模態。

在清掃後期之判斷，本文是以覆蓋率之上升速率作為判斷依據，當覆蓋率上升速率小於一門檻時則進入目標清掃以提升清掃效率，但是實際覆蓋率需利用電腦後製所得，所以本研究以全核心區域覆蓋率做為控制用之參數，全核心區域覆蓋率為整個環境之核心

區域覆蓋率，而非單一路標之核心區域覆蓋率，而其值之計算將在搜索到路標時進行，同時也進行判斷其值是否小於門檻，也就是判斷是否進入清掃後期。

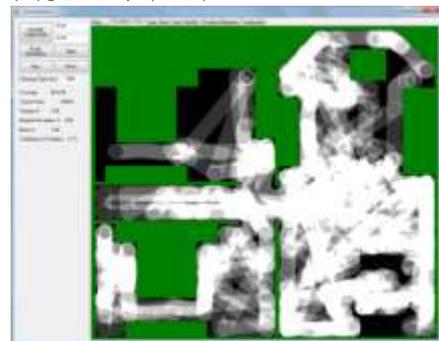
而清掃後期之門檻值，是利用每一次清掃進行學習而得，方法為紀錄每次清掃之清掃環境50%(即覆蓋率50%)所需時間，由於本研究路標與路標間擁有一部分重疊區域，因此將覆蓋率50%設定為全核心區域覆蓋率30%，即全核心覆蓋率若到達30%，則環境將近有50%之空間已清掃，因此將每次紀錄之時間取平均值(T_{ave})，利用下列公式算出清掃後期之門檻(C_T)，而每次清掃30%之時間不同，為了避免這些差異造成過早判斷為清掃後期，因此將門檻值乘上一係數以提高門檻值。

$$C_T = \frac{30\%}{T_{ave}} \times 0.95 \quad (2)$$

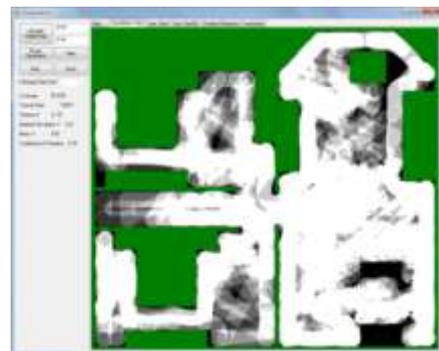
3.2 實驗與結果

應用提出之控制邏輯在環境中進行模擬分析，其模擬方法為利用ADAMS動態分析軟體進行清掃機器人路徑分析，並配合C#進行清掃效率之分析[5]，針對分析環境，進行三個不同初始位置方向之模擬分析。其房間尺寸與出發點及方向如圖所示，圖中紅色圓點與箭頭為Robot出發位置與方向(L1,L2,L3)。其中共佈置了九個路標(紅色方塊)。

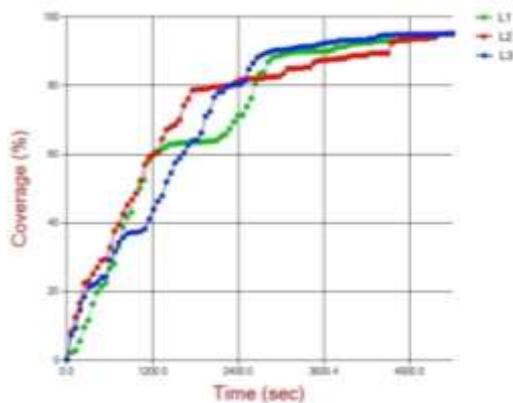
機器人在出發位置與方向L1、L2及L3處進行模擬分析，由清掃之模擬分析，將機器人在環境中模擬60分鐘與90分鐘之路徑結果以灰階輸出(如圖十四、圖十五所示，為L2出發位置之結果)，藉由觀察覆蓋分佈情形與覆蓋率時間曲線(如圖十六)，來評估清掃邏輯在環境中之清掃效率。



圖十四：模擬分析 L2(60min)。



圖十五：模擬分析 L2(90min)。



圖十六：模擬分析覆蓋率時間曲線圖。

由多次模擬結果可發現，不同初發位置與方向並不影響清掃結果，而提出之控制邏輯能有效的清掃覆蓋至未清掃區域，如圖十四及圖十五所示，環境左上角未清掃區域被清掃過了，而在圖十六出發位置L1之曲線前期，可發現很明顯之清掃停滯現象，但是由提出之判斷機制判斷，改以目標清掃模式清掃，改善了清掃覆蓋率。

3.3 清掃效率評估

本研究以三種不同控制邏輯作為此次分析之清掃效率評估：

- (1) 清掃邏輯A：一般清掃，只利用Random與Wall following 模式進行清掃，反覆依序進行。
- (2) 清掃邏輯B：標準清掃，跟一般清掃差別在於多了路標之地圖建構，因此控制邏輯有些許改變，如循邊將搜索路標、限制機器人與路標之距離等(如圖九)。
- (3) 清掃邏輯C：標準清掃加入了地圖應用，加入此次研究所提出之目標清掃模式(如圖十)。

表一、表二與表三為此次模擬分析之覆蓋率與覆蓋變異率結果，L1、L2 與 L3 分別代表不同之初始位置與方向，由結果與表中可發現，清掃邏輯 C 在覆蓋變異率有明顯的提升，這代表了清掃更加地均勻，至於清掃前期之覆蓋率(如表一)，看似不盡理想，但 B 與 C 清掃邏輯在清掃前期之控制都為相同，卻有明顯之覆蓋率差異(如圖十八)，這代表了應用簡單控制邏輯擁有著清掃不穩定的現象，若由清掃瓶頸時間點進行比較，清掃瓶頸大約都在清掃 30-40 分鐘發生，清掃邏輯 C 之覆蓋率提升速度較快於清掃邏輯 B，尤其是清掃效率較為穩定，由圖十七可觀察到其餘清掃邏輯之清掃效率時好時壞，不能確保每一次清掃都能得到較佳之清掃效率，但是加入了地圖應用，不只有清掃效率提升，更能確保每一次清掃都能得到較佳之清掃效率。表一：環境 60 分鐘之覆蓋率。

清掃邏輯	L1	L2	L3	Average
A	88.3%	85.8%	90.2%	88.1%

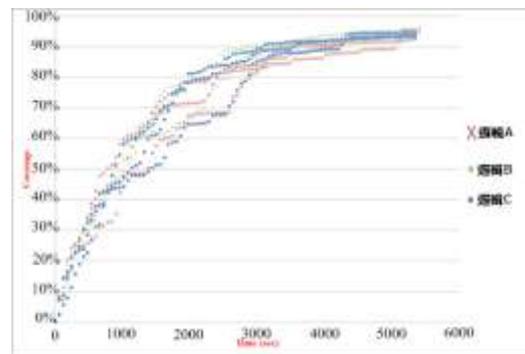
B	90.0%	92.1%	90.9%	91.0%
C	90.1%	88.0%	92.5%	90.2%

表二：環境 90 分鐘之覆蓋率。

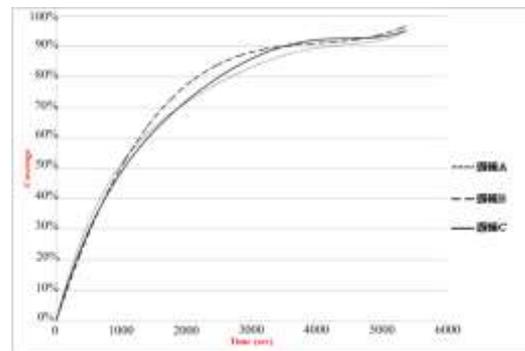
清掃邏輯	L1	L2	L3	Average
A	95.7%	94.3%	92.4%	94.1%
B	93.8%	94.2%	95.4%	94.5%
C	95.1%	95.1%	95.3%	95.2%

表三：環境 90 分鐘之覆蓋變異率。

清掃邏輯	L1	L2	L3	Average
A	0.67	0.59	0.75	0.67
B	0.70	0.61	0.65	0.65
C	0.64	0.59	0.57	0.60



圖十七：清掃覆蓋率分析比較圖。

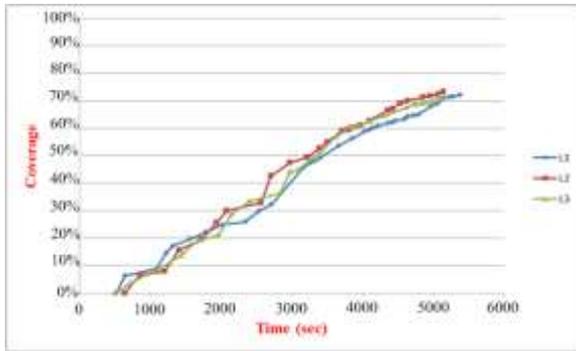


圖十八：清掃覆蓋率趨勢分析比較圖。

3.4 路標扇形核心區域覆蓋率

圖十九為模擬分析L1、L2與L3之全核心區域覆蓋率時間曲線圖，利用這些圖與電腦模擬分析所得之覆蓋率時間曲線圖(如圖十六)進行比較，可發現其覆蓋率曲線走勢略同，在清掃較為緩慢地方都有表現出來，較為影響覆蓋率高低的是在清掃初始，因無路標資訊，而無法建立已清掃區域地圖造成全核心地圖覆蓋率為零，使得清掃後期會因再次掃過前期無紀錄資訊之區域，造成全核心地圖覆蓋率有提升之現象，但若將初始點(充電站)也作為路標將可以改善此問題。而全核心區域覆蓋率無到達100%，是因為路標與路標間擁有部分重疊之區域。

因此透過分析結果可知，利用路標扇形核心區域之覆蓋率來判斷環境是否已清掃，及利用各路標扇狀地圖找出未清掃區域，使機器人前往該區域清掃之方法是有效的，這更證明了全核心區域覆蓋率可顯示出機器人在環境中之清掃表現，使其可作為清掃瓶頸之判斷依據。



圖十九：全核心地圖覆蓋率時間曲線圖。

4. 結論

本文之主要目的為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，其利用清掃機器人上所裝置的有限感測器，配合清掃環境中佈置之路標，利用局部座標系統建立所屬路標之扇形環境地圖，再以核心區域與目前已清掃過區域之差異，找出該路標還未清掃之範圍，同時利用核心區域覆蓋率計算，找出環境中尚未清掃之路標區域，並驅使機器人前往進行清掃。

本研究以簡易之清掃控制邏輯作為基本架構，以搭配所提出之地圖應用方法，並以提出之判斷機制作為應用時機，以提升其清掃效率與穩定性。清掃機器人在多房間環境進行模擬分析，其覆蓋率與覆蓋變異率(CVC)皆有提升，最重要的是這方法有效降低了清掃的不確定性，避免重複清掃某些區域或是或略了某些區域的清掃，以確保每次清掃都得到穩定之清掃效率。

5. 參考文獻

- [1] Martin Werner, Moritz Kessel, "Organisation of Indoor Navigation Data from a Data Query Perspective", (2010), Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS)
- [2] Wu Hao, Tian Guo-hui, Li Yan, Zhou Feng-yu, Duan Peng, (2013), "Spatial semantic hybrid map building and application of mobile service robot", Journal of Robotics and Autonomous Systems.
- [3] Yung Siang Liao, Qun Zhang, Yanan Li and Shuzhi Sam Ge, "Non-Metric Navigation for Mobile Robot Using Optical Flow", (2012) IEEE/RSJ International Conference on Intelligent

Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal

- [4] SanghoonBaek, Tae-Kyeong Lee, Se-Young Oh and KwangroJu, (2011), "Integrated on-line localization, mapping and coverage algorithm of unknown environments for robotic vacuum cleaners based on minimal sensing", Journal of Advanced Robotics, Vol. 25, pp 1651-1673.
- [5] 許育塵、余志成(2013)“智慧型清掃機器人控制與清掃效率分析的實境模擬系統”，中國機械工程學會第三十屆全國學術研討會論文集，2013/12/6-7，宜蘭，宜蘭大學。

Sector-Based Mapping and Path Planning for Cleaning Robots with Limited Sensing

Yu-Chen Hsu, Kuan-Tse Cheng, Jyh-Cheng Yu*
Department of Mechanical and Automation Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology

*Corresponding author: jcyu@nckust.edu.tw

Abstract

This paper discusses the construction of a sector-based map and path guidance of a cleaning robot with limited sensing capability to enhance cleaning efficiency and robustness. Cleaning robots use a local sector map based on the scattered and unpositioned landmarks. A learning process of a core sector map based on the landmark is proposed from accumulation of cleaning path. Clean robot calculates the cleaning path based on the relative position with the last landmark, which is converted to a grid sector map of covered area. A tree structure of the core sector map is established, and applied to navigate the robot to move to uncovered area. A path guidance strategy based on the proposed tree structure of sector maps is presented to demonstrate the improvement on cleaning efficiency and stability. The robot will automatically determine the application timing of sector map guidance based on the coverage rate of core sector map. The simulation of multiple room, both the coverage and coverage variation coefficient improve in the simulation of a multi-room environment cleaning.

Keywords : Cleaning robot, Map building, Cleaning Efficiency