

應用環境地圖建構於清掃機器人路徑控制與效率分析

范育賢¹、余志成²

¹國立高雄第一科技大學系統資訊與控制研究所

²國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

²Email: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本文所探討家用清掃機器人可清掃區間的學習與清掃路徑控制，以提升清掃效率。清掃機器人在清掃過程中，往往藉由不同的運動模態的隨機轉換，如回彈、螺旋、牛耕型路徑與平行循邊等，使其在給定時間內可覆蓋可清掃範圍。這種局部的隨機模態策略在小區間的清掃可得到不錯的效果，但在較大與室內具有較複雜隔間時，清掃機器人可能有重覆清掃同一區域，造成部分區域未能清掃的問題，影響清掃效率。因清掃機器人不需精確的路徑控制，而在清掃區塊的辨識，本研究結合局部隨機清掃控制與全域區塊辨識，應用定位技術配合清掃區域格點化，藉由重覆的清掃記錄來辨識主要清掃區塊，降低累積誤差所造成的問題。並於清掃時分析覆蓋率變化，在覆蓋率停滯時，藉由主要清掃區塊與已清區塊的比對，找出未清掃區塊，再主動控制機器人前往未清掃區塊進行局部的清掃模態，提升覆蓋率。

關鍵字：清掃機器人、地圖建構、覆蓋率。

1. 前言

隨著電子與自動化產業的快速發展，機器人的應用不再侷限於工業生產輔具，服務型機器人為近來研究的重要課題，其中又以家用清潔機器人成為最成功的消費型機器人產品。典型的打掃機器人基本結構包括在基座中設置兩組動力輪，配合其上的掃刷與吸塵裝置，藉由感測器變換清掃模態：(1)隨機型(Random advance)，(2)之字型(Zigzagging advance)，(3)螺旋式的矩形，達成室內自動位移與清掃[1]，這種局部的隨機模態變換策略在小區間的清掃可得到不錯的效果。在較大與室內具有較複雜隔間時，清掃機器人可能有重覆清掃同一區域，造成部分區域未能清掃的問題。有些採用主動式的燈塔路標控制清掃區域的清掃順序[2]，以主動式燈塔標示清掃區域的入口，在一區清掃完畢後搜尋路標進入二區掃，但所需成本較高，且區域內的清掃仍仰賴隨機清掃模態變換。

因應複雜的居家環境，清潔機器人必須透過自身的感測器和室內定位之功能，用於障礙物偵測、取得機器人目前的位置資訊、建構週遭環境地圖，這種技術稱為同步定位與地圖建構 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) [3]。機器人基本的定位可利用全方位碰撞感測器和紅外線感測器偵測

牆面以及障礙物，配合左右兩顆驅動馬達的編碼器(encoder)來計算機器人座標及角度變換，利用牛耕田清潔路徑，完成環境清潔，並且繪製出機器人之移動軌跡與障礙物之環境地圖[4]。但若無全域的校正路標，累積的機構誤差將造成定位與地圖辨識不可行。SLAM 文獻提出許多藉助精密的感測系統如超音波(ultrasonic)[5]、視覺(vision)[6]、光流影像(Optical Flow)、雷射(laser)[7]、無線射頻辨識系統(Radio Frequency Identification, RFID) [8]作為環境辨識，但要得到精確的定位要高階的控制晶片與高價的感測裝置，這在低價位的清掃機器人商品又有實現的困難。

清掃機器人並不需精確的路徑控制，而在覆蓋率的提升。而一般的隨機模態變換策略在局部區間的清掃已有不錯的效果，因此本文結合局部隨機清掃控制與全域區塊辨識，以循邊路標辨識與驅動輪編碼器估計機器人方位，在清掃過程中將已清掃區域格點化，而在反覆清掃中辨識出主要清掃區塊，配合覆蓋率分析與已清掃區塊的比對來控制機器人往未清掃區塊中移動，進行局部隨機清掃，藉以提升清掃效率。

2. 系統架構

本文所研究的清掃機器人如圖 1 所示，以單晶片 PIC18F452 做為基本的動作模態控制，包括直行、原地轉向、平行循邊、牛耕等。由單晶片對 L298 做 PWM 控制使兩驅動輪作動，且以 Δt 的取樣時間收取編碼器訊號，藉由 HCTL2032 做解碼，計算出馬達轉動

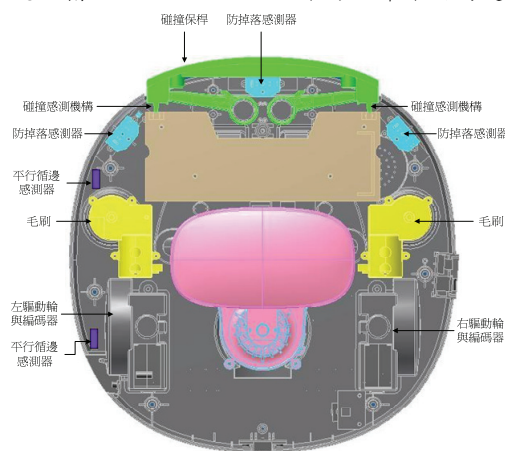


圖 1 典型清掃機器人組成架構

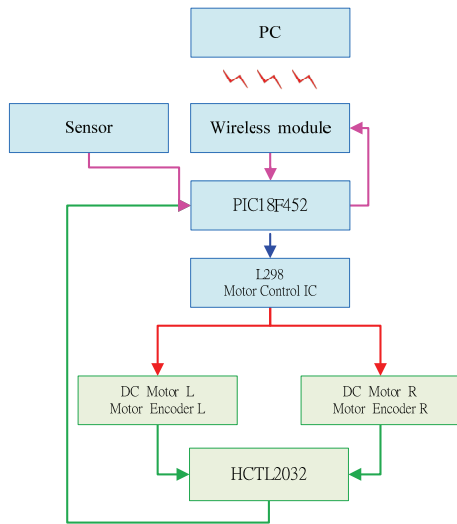


圖2 控制系統架構

量。並由感測器的觸發判斷為何種障礙，使得機器人做即時的閃避。並藉由無線網模組將感測器狀態與馬達轉動量傳遞到電腦伺服器上面，作為座標估計以及清掃策略的控制，透過 C++ Builder 建置環境建構介面，系統架構如圖 2。

3. 方位估計

3.1. 局部定位

為要能夠減少清掃軌跡建置所耗費的時間，機器人主要是由感測器計算出相對座標。行走中的機器人，經由馬達上的編碼器即時計算出機器人在 Δt 的取樣時間內，所行走的位置與方向角，由左、右兩輪馬達的編碼器計算出輪子的移動距離，透過無線網路模組的傳輸，由電腦伺服器計算兩輪的行走距離繪製出機器人的移動軌跡。相關參數如下[12]：

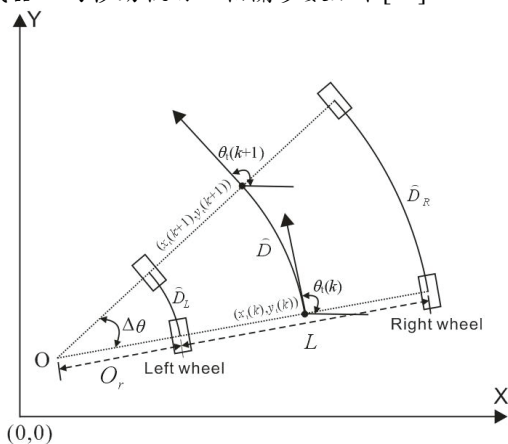


圖3 機器人以 Δt 移動量示意圖

O ：瞬時曲率中心

\hat{D}_L ：左輪行駛的距離

\hat{D}_R ：右輪行駛的距離

\hat{D} ：機器人控制點所行駛的距離

$\Delta\theta$ ：機器人的旋轉角度

L ：兩驅動輪輪距

$x_t(k)$ ：機器人在取樣時間 k 的 X 座標

$y_t(k)$ ：機器人取樣時間 k 的 Y 座標

$\theta_t(k)$ ：機器人取樣時間 k 的方向角

機器人左右輪所走的路徑長可透過馬達編碼器求出

$$\begin{cases} \hat{D}_L = E_L \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_w}{E_r} \\ \hat{D}_R = E_R \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_w}{E_r} \end{cases} \quad (1)$$

r_w ：驅動輪的半徑

E_L ：左輪馬達編碼器的數值

E_R ：右輪馬達編碼器的數值

E_r ：馬達編碼器的解析度（2470 步/轉）

因此，機器人的旋轉角度為

$$\Delta\theta = \frac{\hat{D}_R - \hat{D}_L}{L} = \frac{2\pi \cdot r_w \cdot (E_R - E_L)}{E_r \cdot L} \quad (2)$$

因此，機器人在下一個取樣時間的 X, Y 座標和方向角分別為

$$x_t(k+1) = x_t(k) + \left(\frac{\hat{D}_R + \hat{D}_L}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \cos \left(\theta_t(k) + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (3)$$

$$y_t(k+1) = y_t(k) + \left(\frac{\hat{D}_R + \hat{D}_L}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \sin \left(\theta_t(k) + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (4)$$

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

3.2. 全域定位

機器人於行進中以局部定位做為估算機器人座標為一簡便與低成本的方式，但機構與滑動誤差的累積將造成方位估計的錯誤，一般都會搭配全域定位校正累積誤差，但全域定位成本與所需時間較多，因此多會在以局部定位一段時間後以全域定位來校正。

為配合將來清掃機器人商品化的需求，低成本的全域定位技術為主要訴求。一般清掃機器人具備有平行巡邊的功能，因此本研究建議將路標設置於牆面，當機器人平行牆面移動時，因距離較近較容易辨識路標。我們所嘗試的方式包括有 RFID 與紅外線數位掃描兩項技術。

RFID 包括感測器 Reader 與 Tag 的應用，為非接觸式，利用電波和電磁共生的原理進行資料讀取，本研究採用被動式標籤 (Passive Tag)，每個 Tag 都有自己本身的一組代碼且免用電力，靠著天線端 (Reader) 的非接觸式來通信，Reader 與 Tag 間感測距離在 10 公分左右。RFID reader 裝置於機器人上，於平行牆面行進中若是經過 Tag 辨識出代碼，再由代碼得知所代表的座標，便取得 Tag 的座標修正目前座標，藉以

消除因局部定位的累積誤差，但要考量到 RFID 感測器的體積與電源問題。

另一種方式是以機器人本身現有的側面紅外線感測器做為路標辨識，因反射面的顏色與表面粗糙度特性，影響反射訊號的強度如圖 4 所示，其中黑色光滑面與白色粗糙面在相同距離時訊號有 50% 以上的差異，因此利用感測器對顏色與偵測物體表面的特性做讀取路標條碼。如以黑色光滑面條碼亮面代表 0、霧白面代表 1 做排列式組合成二維條碼，機器人平行循邊時，就可辨識出路標，如此具有節省空間與節省成本的優點

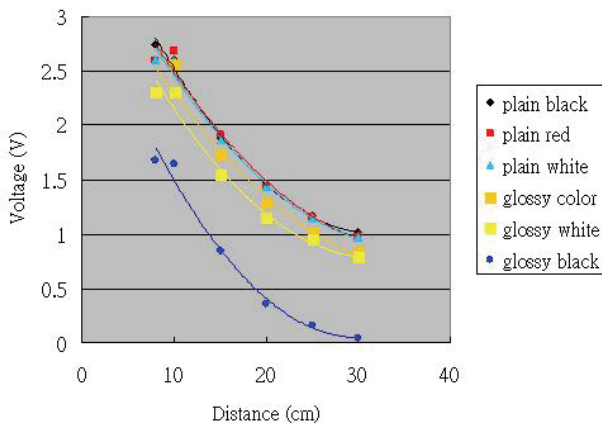


圖 4 紅外線對於顏色之距離電壓關係圖

4. 清掃區域的建構與清掃控制

4.1. 建構清掃區域

本文將行走的區域以格點組成，每個格點依據吸塵器吸口與掃刷的清掃範圍所決定，目前定義每個格點為 10*10 公分的正方，所以透過機器人本身馬達上編碼器，藉由後端電腦可估算出機器人座標，判斷距離座標點最近的方格中心點 (x_j, y_i) ，每一格點中心座標都為矩陣 $VA[i, j]$ ，對應到的格點。由預設的環境地圖大小 ΔX 與 ΔY 除以 10 可知矩陣大小 $m \times n$ ，機器人初始設定地圖大小，在經由學習後的環境地圖，假設環境地圖大小為 $X_{max}=+300$ 、 $X_{min}=-300$ 與 $Y_{max}=+300$ 、 $Y_{min}=-300$ ，可設定環境格點化為 60×60 的矩陣。

本文以格點方式作為行走區域的辨識，將行走路徑用一個矩陣來表示，每一格對應到的是矩陣位置，當機器人行走過一次時為 1，未行走過為 0。而行走過的格點會將其加 1，判斷目前所在格點的中心座標與目前座標的距離若 $d \leq 4$ 且目前機器人座標位於格點與前一個格點相同，則將機器人座標視為於同一格點內不需標記；反之標記為已清掃格點，也就是為避免在行走時於同一位置會重覆紀錄，建構行走範圍流程如圖 5 所示。

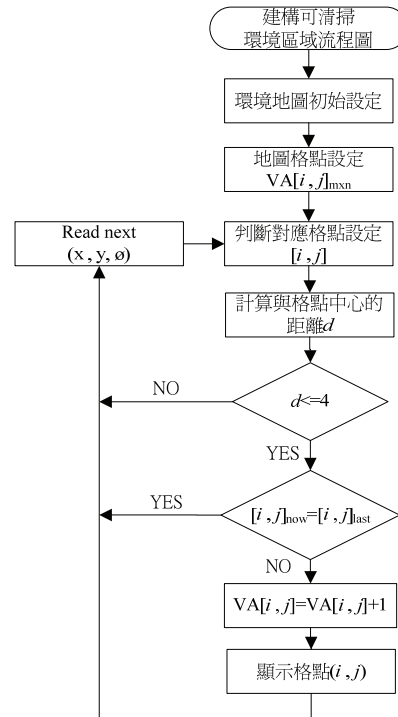


圖 5 建構行走範圍流程图

4.2. 清掃效率的評估

機器人的清掃性能可由兩個指標來評估：覆蓋率 (coverage) 與清掃速率 (cleaning rate)，覆蓋率指的是在一段時間內，機器人所清掃過的面積除以所有應清掃的面積如(6)所示，而清掃率則是指已清掃面積的加速率。

$$\text{覆蓋率} = \frac{\text{機器人清掃區域面積}}{\text{地板面積}} \times 100\% \quad (6)$$

本架構可作為不同清掃策略的評估，分析不同清掃策略的清掃效率。由不同的清掃模態於環境中清掃來得知覆蓋率的變化，若當此模態覆蓋率變化不好，就將其清掃模態移除不用，以此概念來做學習的應用。

4.3. 清掃路徑的控制

在不斷的清掃學習過程中，可能會有機器人一直於同一區域清掃的情況，此時當覆蓋率的變化量即清掃速率小於一定值時，便啟動向未清掃區域移動的機制，將搜尋未清掃區域重心，藉以控制機器人往該位置移動並清掃，而為要能夠得到未清掃區域由行走過中記錄格點於矩陣，使得機器人具有環境學習的功能。在此先將整個環境區域視為已知的清掃區域，藉由比對目前現有的已經清掃區域，來得知兩者間的差異，就可以了解還有哪些區域未清掃，利用重心搜尋的方式如式(7)、(8)將每一個格點的中心座標 X_i 全部相加除以格點數目 G_n ，便可得到重心 \bar{X} ，相同的 Y_i 全部相加除以格點數目 G_n 得到重心 \bar{Y} ，可得到未清掃

重心的位置在 (\bar{X}, \bar{Y}) 。假設機器人位置於 (X, Y) 角度為 θ ，那機器人由 (X, Y) 由此點到 (\bar{X}, \bar{Y}) 所需旋轉的角度為 θ 減掉 θ 與直線行走距離 d ，其中 θ 可由三角函數求得、兩點間距離公式可得 d 。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{G_n} \quad (7)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{G_n} \quad (8)$$

4.4. 有效清掃區域辨識

在清掃效率的評估與清掃控制中，要知道需清掃的地板面積，一般未知清掃區域可由清掃範圍的累積記憶來學習，目前做法是將清掃區域都記錄在 $VA[i, j]$ 的矩陣內，所以經由重覆的學習 $VA[i, j]$ 內的值就代表著從以前到現在掃過的次數，過程中可以建立清掃區域，藉由反覆的清掃可以將過去的清掃區域面積累計起來，因誤差的關係清掃次數較少的，就有可能是誤差累計所造成的，就可以用設定門檻值的方式，將這些應由長時間累計出來的資料，但是清掃的次數卻很少的區域將其排除掉，那就可以擷取出一個比較有效的一個清掃區域。

5. 實驗結果

5.1. 清掃覆蓋率的比較

本文所提出的覆蓋率分析可作為清掃策略的評估，本實驗以固定清掃時間比較兩種不同清掃策略組合的清掃模態所得到的覆蓋率變化：(a) 隨機與循邊行走模態的搭配，(b) 隨機與循邊行走模態再加上牛耕模態的搭配。

(a) 隨機與循邊行走模態的搭配

由實驗機器人隨機碰撞 15 次與循邊行走 3 分鐘的搭配執行 50 分鐘可得到覆蓋率為 56.3%，實驗結果如圖 6、圖 7 所示。

(b) 隨機與循邊行走模態再加上牛耕模態的搭配

由實驗機器人隨機碰撞 5 次與循邊行走 3 分鐘再以牛耕行走碰撞 6 次的搭配執行 50 分鐘可得到覆蓋率為 49.2%，實驗結果如圖 8、圖 9 所示。

實驗結果發現策略(a) 較於策略(b) 可得到較佳的覆蓋率，原因在於牛耕模態讓機器人較常於同一區域清掃。因此測略(b)可搭配覆蓋率的變化來提升清掃效率。策略(b) 在清掃 30 分鐘時，由圖 9 發現覆蓋率有停滯的現象，清掃控制系統可藉由比較應清掃範圍與已清掃範圍，辨識出尚未清掃的區域，導引機器人往該區域進行局部清掃。

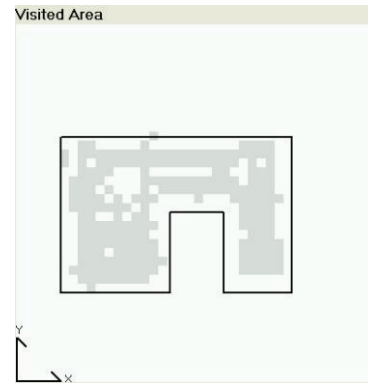


圖 6 隨機與循邊行走區域

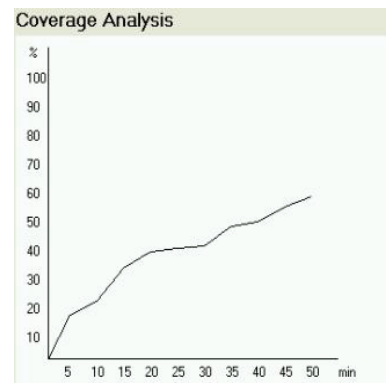


圖 7 隨機與循邊行走覆蓋率變化圖

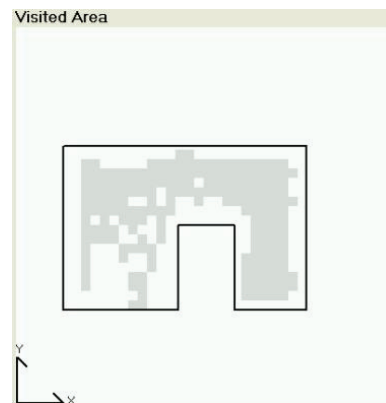


圖 8 隨機與循邊行走模態搭配牛耕行走區域

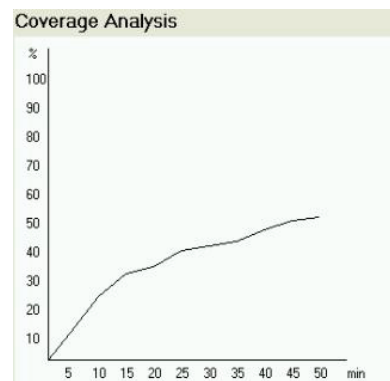


圖 9 隨機與循邊行走模態搭配牛耕覆蓋率變化圖

(c) 未清掃區域重心搜尋

當系統在原先策略(a) 施行 25 分鐘時，發現覆蓋率有停滯的現象，因此啟動重心法計算未清掃區域的重心，如圖 10 所示，座標為(155, 175)，紅點為其位置。之後導引機器人往未清掃區域的重心移動，並再以隨機模態直行至 50 分結束可得覆蓋率為 61.6%，相較於原本策略(a) 56.3% 覆蓋率有所提升，如圖 11 所示，而這種方式可以反覆執行，將可有效率的提升覆蓋率。

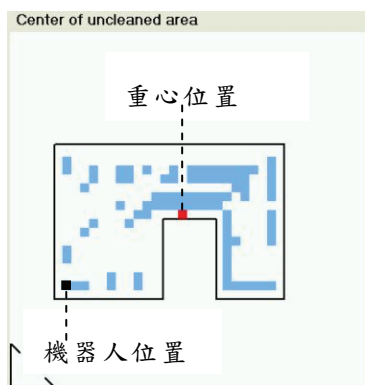


圖 10 未清掃區域的重心位置

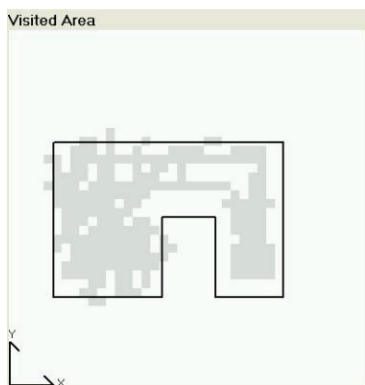


圖 11 搭配未清掃區域重心搜尋清掃後的區域

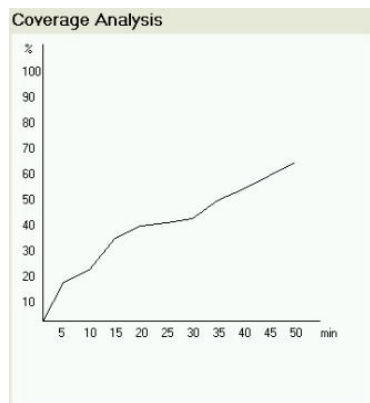


圖 12 搭配未清掃區域重心搜尋清掃變化圖

5.2. 有效清掃區域的辨識

之前面的分析是暫時假設應清掃區域為已知，我們可利用環境地圖的學習經由多次的清掃累積得到清掃區域，如圖 13 到圖 16 分別為第一次到第四次清掃累積的結果。為避免累積誤差造成需清掃區域的誤判，可刪除清掃歷史中清掃次數較少的格點，藉以找出主要清掃區塊，圖 17 為去除累積清掃歷史中，清掃次數少於 2 的格點，所得主要清掃區塊如圖 17 所示，因此機器人若在此次清掃中尚未完成主要清掃區塊的清掃，就可控制機器人往未清掃區域的重心移動。

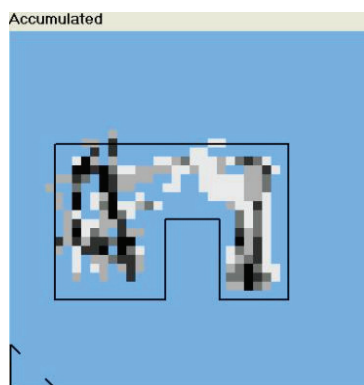


圖 13 第一次清掃累計的結果

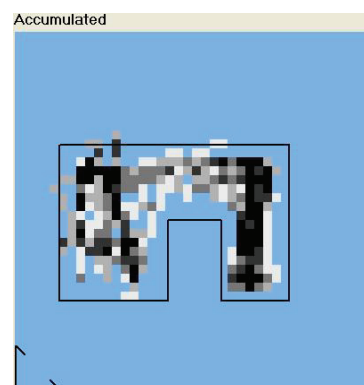


圖 14 第二次清掃累計的結果

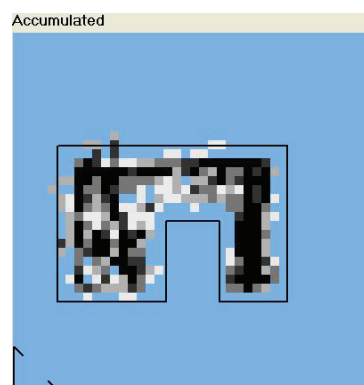


圖 15 第三次清掃累計的結果

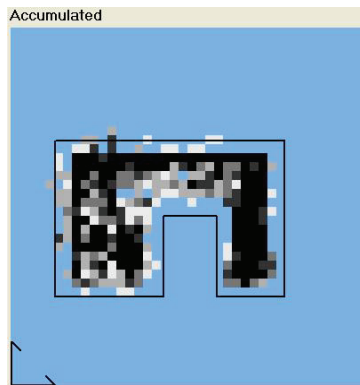


圖 16 第四次清掃累計的結果

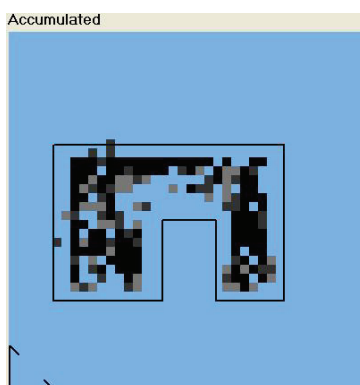


圖 17 去除 $VA[i, j] \leq 2$ 所得之主要清掃區域

6. 結論

本文之主要目的為應用環境地圖於機器人路徑控制與效率的分析，利用參數化指令的方式，以單晶片設計控制機器人動作，及模組化清掃模態控制架構，讓清掃控制較為容易，另外應用定位技術來配合清掃路徑格點化，藉由重覆的清掃紀錄來辨識可清掃範圍，並以覆蓋率的評估做路徑控制，使得機器人往未清掃區域移動，以提升覆蓋率。本研究以單晶片做為機器人控制核心，透過無線網路使機器人將兩驅動輪變化輛數值傳回電腦伺服機，以 C++ Builder 建立一環境學習介面，實驗結果驗證本研究應用於消費型清掃機器人的可行性。

7. 參考文獻

- [1]. Y. J. Oh, Y. Watanabe, 2002, "Development of Small Robot for Home Floor Cleaning", Aug.5-7, SICE, pp 3222-3223.
- [2]. http://www.irobotstore.nl/index.php?main_page=household_robots_robots&dir=home
- [3]. R. Ouellette, K. Hirasawa, 2007 "A Comparison of SLAM Implementations for Indoor Mobile Robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1479-1484.
- [4]. 禡建威, 2007, 居家環境清潔機器人, 國立成功大學, 碩士論文。
- [5]. J. Choi, K., Lee, S., Ahn, M. Choi, and W. K.

- Chung, (2006) "A Practical Solution to SLAM and Navigation in Home Environment", SICE-ICASE International Joint Conference, pp. 2015-2021.
- [6]. 徐名彥、余志成, 2004, 應用環場影像器於自主式越障車之定位與路線規劃系統, 中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會, 控制與自動化論文集, pp.1725-1730。
- [7]. C. F. Chang, C. C. Tsai, J. C. Hsu and C. C. Lin (2003), "Laser pose tracking for a mobile robot using fuzzy adaptive extended information filtering", Proceedings of the American Control Conference, Vol. 3, p.p 2471-2476.
- [8]. D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin and M. Philipose (2004), "Mapping and Localization with RFID Technology", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA, pp. 1015-1020.
- [9]. C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade, and S. A. Shafer, May. 1988 "Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10, no. 3, pp. 362-373.
- [10]. L. Montano and J. R. Asensio, 1997 "Real-time robot navigation in unstructured environments using a 3D laser rangefinder" Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 526-532.
- [11]. V. Sommer, A. Rocher, 2003, "A new exploration strategy for mobile robots based on a cost function approach", Intelligent Robots and Systems, IROS. Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on, Volume: 2, On page(s): 1697- 1702 vol.2
- [12]. 蔡振霖、余志成(2008) "家用服務型機器人之同步定位與環境地圖建構", 中國機械工程學會第二十五屆全國學術研討會, 中華民國九十七年 11 月 21~22 日, 彰化, 大葉大學。