

應用扇狀地圖網絡於越障式清掃機器人在具樓板段差環境之智慧覆蓋規劃

蔡來旺、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

本文以具有有限感知能力之越障清掃機器人搭配扇狀地圖網絡進行智慧清掃控制，以改善清掃覆蓋率與均勻性。現有市場的機器人多採以隨機為基的清掃模式，配合避障與清掃模態的變化，具有低成本的優勢，但有清掃效率不佳的問題。近年來部分機種採用影像或雷射掃瞄建立環境地圖，輔以規則性的清掃，雖有一定的成效，但如面對家中複雜與破碎的清掃環境，則無法達到理想的效果，此外現有機器人仍無法自動克服具台階、門檻等段差的清掃環境進行清掃。

本文為隨機模態為基之越障清掃機器人，以路標作為局部定位參考點，配合馬達編碼器組成方位定位系統，並以每個路標作為單獨參考點，建立扇狀地圖網絡作為清掃導引系統，並在循邊清掃的過程中，紀錄偵測到設置於牆腳之路標的順序，藉以學習出各路標間的相對方位與相鄰性。以反覆清掃的方式進行環境地圖的學習與更新，搭配清掃路徑的規劃與智慧清掃導引規則，並導入越障模態，使清掃範圍擴大至具段差環境藉以提升整體清掃效率與均勻性。

關鍵字：清掃機器人、智慧清掃、環境地圖建構、效率分析

1. 前言

清掃機器人如何短時間內在未知環境完成全域性的清掃覆蓋為其主要目標，現有清掃機器人的清掃方式主要包括以隨機為基的感測方式如美國iRobot的Roomba以隨機碰撞數次後進入循邊清掃模式並結合light house分區技術辨識環境；或是使用攝像鏡頭辨識天花板的特徵項目做定位來編排清掃機器人的控制邏輯[4]如LG；利用微型的雷射測距儀感測並辨識周圍環境如NEATO清掃機器人，以上都需要格外價高的感測器因此而提高了清掃機器人的製造成本。而國內清掃機器人幾乎都採用隨機為基的清掃模式，如何提升其清掃效率，將會是一項挑戰。

而一般清掃機器人容易受限於門檻或具高低差的台階等障礙問題，尤其在亞洲家庭環境中此現象更為常見，文獻[5]提出一新型越障式清掃機器人，其越障機構能跨越8公分的台階及門檻(圖1)，使清掃時能克服環境中的障礙限制，達成自動清掃目的。然而面

對含段差環境清掃的清掃策略，過去並無相關文獻的探討。

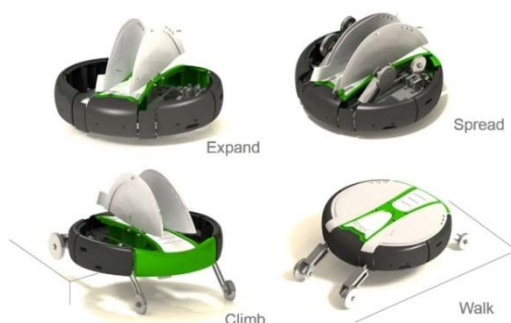


圖 1 越障清掃機器人

本文將探討具有有限感知能力以隨機為基的清掃機器人，如何利用環境特徵參數作為清掃模態的選擇，並結合同步定位與環境地圖建構，導入智慧清掃控制，以提升清掃效率達到智慧化清掃。並應用在具越障能力的清掃機器人載具，藉以達到全域自動清掃的策略。

2. 扇狀地圖的建置

2.1. 路標的設置

過去許多文獻利用路標概念應用於地圖建構，但都須輸入精確座標以便定位，此方式對於使用者來說極為不便。因此本文定位系統將參考許[5]所提出的路標定位方法，於環境中任意布置數個路標(圖2)，在機器人偵測到路標的當下，建立該路標區域的環境格點地圖，除了可有效降低滑動誤差外，操作也較方便。考量機器人在進行循邊清掃的特性，因此路標擺放位置會以牆壁底部為原則，當機器人執行循邊模態時即可讀取到路標加以辨識利用。

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。

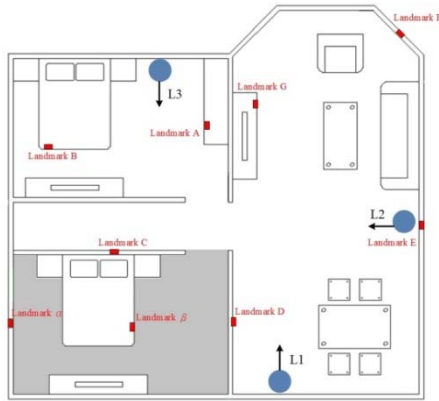
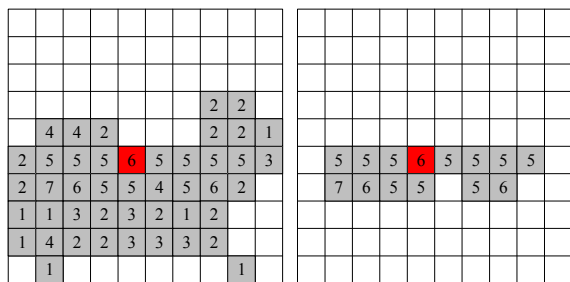


圖 2 環境路標分布圖

2.2. 扇狀地圖的組成

本文以驅動輪編碼器和路標(Landmark)辨識組成局部定位系統，由於路標本身並無發送訊號能力，在使用時也無法要求使用者輸入各路標的絕對做標，因此如(圖3)所示，在地圖的建置中將以每個路標作為獨立的原點(紅點)，以該路標原點建立100x100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20x20cm，機器人行走過的路徑資料將以格點顯示，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扇狀局部地圖(圖4)。而路標將建置於牆壁下緣，當機器人在清掃的過程中偵測到路標後，即啟動路標扇形地圖的建置。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，建立該環境地圖之核心區域，以避免因編碼器產生的累計誤差，導致機器人路徑的不準確，影響格點地圖的可靠性。



(a)格點剔除前 (b)格點剔除後(核心區域)

圖 3 路標格點地圖覆蓋次數示意圖



圖 4 路標扇狀地圖

核心區域門檻值的設定是以格點覆蓋次數之平均值+N倍的格點覆蓋標準差來做設定，門檻值過大將會影響扇狀地圖覆蓋區域，本文設定以格點覆蓋次數平均值+格點覆蓋1倍標準差做為設定，如此將使得整體的核心區域佈滿可清掃範圍。

2.3. 扇狀地圖網絡

機器人在偵測到路標的同時除了建立扇狀地圖之外，同時利用矩陣，紀錄各路標間的經過次數，例如機器人從LmA到LmB即次數+1依此類推，依其順序建立出路標與路標之間的相對方位與相鄰性(圖5)，並產生路標地圖網絡，箭頭的指向代表路標間的方向性，記錄路標間通過的次數，藉此可以得到路標與路標之間的相鄰關係。

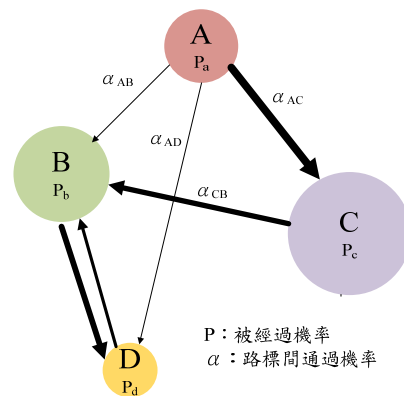


圖 5 路標關聯示意圖

並由式2計算路標間的通過機率， α_{ij} 是表示路標間的通過機率，i為起點路標j為終點路標，利用相鄰路標的通過次數(n_{ij})除以通過總數，同時也可計算單一路標被經過的機率 P_i ，計算方式如式3，以各路標經過次數(m_i)除以全部路標經過次數相加，隨著資料累積將越來越可靠，地圖完整度也將越來越高。

$$\alpha_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^{\lambda} n_{ik}} \quad (2)$$

$$P_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \quad (3)$$

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

應用於實際單房間，網絡結果如(圖6)所示，圖中各路標以不同球體大小與顏色作劃分，球體面積越大表示該路標被經過次數越多次，同時各路標間的相對經過次數以不同線條粗細來做劃分，並以箭頭表示方向，線條越粗代表兩路標間的網絡聯結越強，且兩路標間有較多的相對經過關係，反之線條越細代表兩路標關係較弱，箭頭上的數字為通過機率。因此經由路標地圖網絡圖可探討各路標的相對關係。

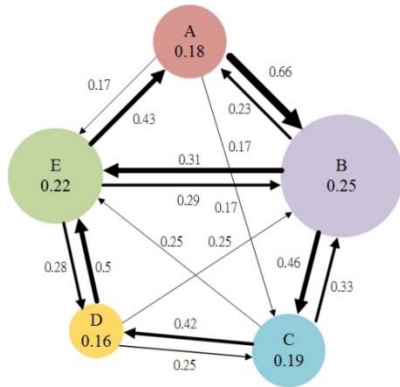


圖 6 平均循邊碰撞距離之趨勢線

3. 扇狀地圖網絡應用於全域清掃

本研究清掃邏輯主要是以隨機→短循邊→隨機→短循邊→隨機→循路標為循環進行環境的打掃，並結合扇狀地圖網絡進行應用。經由多次清掃學習達一定程度後，可得到穩定的核心區域，此時往後的每次清掃可與核心區域進行比對，得到核心區域覆蓋率，並導引機器人往未清掃區域方向進行打掃，同時根據核心區域覆蓋結果與網絡關聯，可進行優先清掃區域的選擇，使機器人在清掃過程中先往清掃期望值較高之區域進行打掃，可有效提升覆蓋率。

3.1. 核心區域覆蓋率

經由多次的清掃建立核心區域後，往後的每次清掃都建立一當次所屬路標之已清掃區域，該地圖可用於比對路標核心區域，找出未清掃過之區域(圖7)，並利用核心區域格點數與未清掃區域格點數計算出該路標所屬區域覆蓋率(式4)，稱為核心區域覆蓋率，

$$\text{核心區域覆蓋率} = \left(\frac{\text{已清掃區域格點數}}{\text{核心區域格點數}} \right) \times 100\% \quad (4)$$



圖 7 路標未清掃區域

且每次偵測到路標時，此時機器人與路標累積滑動誤差較少，座標位置最為準確，因此計算該區域面積之形心座標方位(Xi,Yi)，在與機器人現有位置比對，取θ作為需旋轉角度，驅使機器人原地旋轉至該方向後，在直行接隨機及循邊清掃模態交互應用進行打掃。

3.2. 優先清掃區域選擇策略

另外本文提出以期望值作為機器人參考繼續於該路標區域清掃與否的判斷依據，藉由各個路標的歷

史核心區域扇狀地圖資料，於每次清掃過程中，根據以知的路標間相鄰機率(α)及核心區域覆蓋改善率(CI)，來計算各路標的清掃期望值(式5)，並比較機器人當前所在路標區域，與該路標相鄰之路標，其未清掃區域之期望值(Expectations)差異。如圖8所示，假設當前路標區域X清掃期望值，大於機器人往下個路標區域Y及Z的清掃期望值總和時，即留在原區域進行目標清掃，反之如果小於，則進入長循邊模式往下個路標移動，使機器人於清掃過程中可自行判斷是否往下個路標區域清掃進行清掃，或是留在原區域打掃，以得到較高的效益(Benefit)。

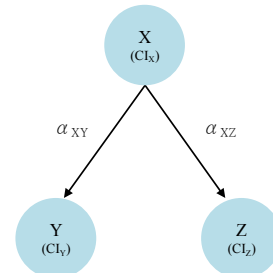


圖 8 優先清掃區域判斷示意圖

$$E(CI_{in}) = \sum_{j=1}^{\lambda} (\alpha_{ij})(CI_j) \quad (5)$$

CI_i=清掃區域 i 的覆蓋率改善值

α_{ij}=路標間通過機率

E(CI_i)=相鄰區域 i 的預期改善指標

L=相鄰路標

而當機器人清掃一段長時間後，可能受限於環境複雜程度不同或傢俱移動等因素，使機器人如果再繼續清掃可能改善效果仍然不大，因此當全核心覆蓋率達70%，本文此時將觀察覆蓋率時間曲線上升趨勢(圖9)，以每個固定時間為基準，該時間是以單次清掃模態為參考，當覆蓋率的增量少於1%時，則代表清掃完成。

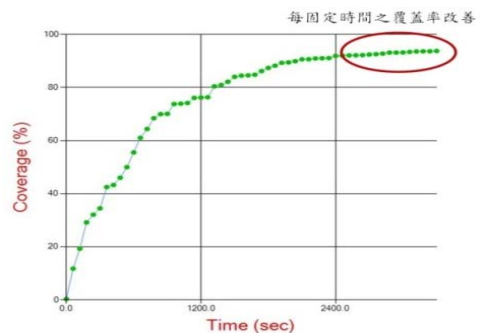


圖 9 自動清掃停止判斷

3.3. 地圖網絡智慧清掃控制邏輯

本文提出智慧清掃控制邏輯主要是由標準清掃與優先清掃區域判斷兩個部分所組成(圖10)。標準清

掃是以Random碰撞12次搭配Wall following執行30秒交互搭配應用，在清掃初期，標準控制邏輯作為清掃方法即有不低的清掃效率，並隨時注意受困情形，適時的啟動脫困機制，同時於循邊過程中偵測路標並建立環境地圖，當Local核心區域覆蓋率達定值時，則開始隨時觀察當前路標區域覆蓋狀況，並計算清掃期望值，比較路標間的清掃效益，如此可得到較均勻的清掃結果。清掃末期時覆蓋率提升有限，此時當Global核心區域覆蓋率當達定值後，而固定時間內覆蓋率曲線又無明顯上升的話，則停止該區域打掃或是開始尋找段差環境入口，前往下個環境繼續清掃。

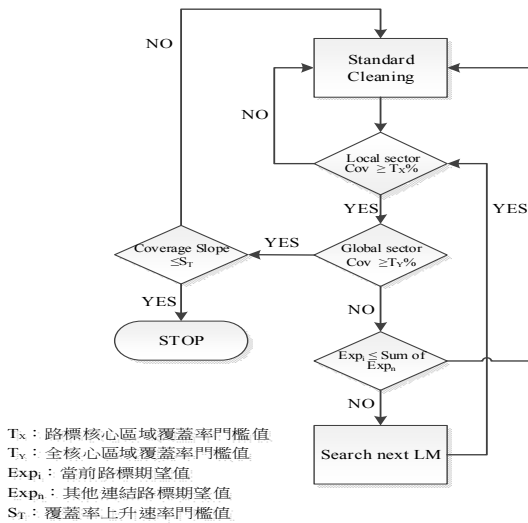


圖10.環境路標設置圖

4. 段差環境地圖網絡關係

在亞洲家庭中，清掃機器人常普遍受限於門檻或具高低段差的环境而無法達到全域清掃的目的。因此本文將利用越障模態結合扇狀地圖網絡對清掃機器人進行導引，平面清掃過程中建立扇狀地圖並紀錄各路標相對應關係建立地圖網絡，以便搜尋段差環境入口路標(圖11路標C)。當平面清掃完成後，隨即進入循路標模式，先以長循邊探索路標，如未順利找到則搭配隨機模態加上短循邊模式尋找該路標。

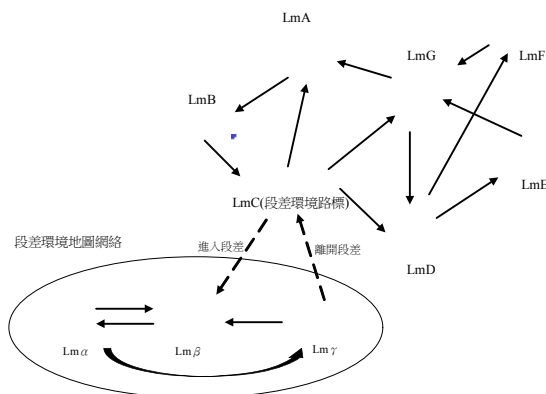


圖 11 段差環境路標位置示意圖

5. 清掃覆蓋的模擬

清掃機器人主要由運動單元、感測單元與清潔單元所組成。在平面移動時是藉由兩側驅動輪的轉速控制來達到移動與轉向目的，而清掃環境與狀況是多變化的，為了得到與實際機器人運動狀態相似的情境，本文利用動態模擬軟體ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)所提供的模組建構虛擬環境與機構，並進行模擬與分析[8]。

5.1. 清掃覆蓋率分析

經由ADAMS的環境建置，並進行清掃模態模擬後，將各項動作資料輸出，並結合Visual C#設計虛擬清掃環境進行清掃效率分析，作為清掃機器人的運動控制評估。此清掃評估系統，是計算可清掃區域內，機器人走過各畫素的覆蓋次數，將覆蓋次數透過五種不同色階方式呈現(圖12)，白色色階越高代表覆蓋次數越多次，清掃較乾淨，由此得知當次清掃所耗費之時間、覆蓋率等各項評估指標。

而理論上在時間足夠下，一般隨機為基的清掃機器人覆蓋率都可達到95%以上，單純比較覆蓋率將無法判斷清掃效率，因此本文以覆蓋變異率(Coverage Variation Coefficient, CVC) [8](式1)作為後期清掃結果的定量評估基準，其計算方式係將可清掃區域的覆蓋次數標準差除以平均值，CVC 越低代表整體清掃均勻性越好，也代表清掃效率較佳。

$$CVC = \frac{\text{清掃格點的清掃次數標準差}}{\text{清掃格點的平均清掃次數}} \quad (1)$$

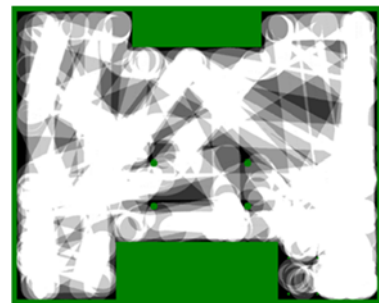


圖 12 覆蓋路徑分佈

5.2. 智慧型清掃模擬

本文利用ADAMS，建置真實兩房兩廳且含傢俱環境(圖13)，並進行三個不同初始位置/方向之模擬分析，灰色區域為段差高度8cm的環境，以LmC作為越障穿越路標，當清掃結束後將搜尋此路標進行越障動作。以Coverage及CVC作為整體清掃效率評估標準，進行連續區域及含段差區域的清掃模擬。

5.2.1. 連續區域清掃控制結果

比較傳統清掃和本文所提出的以地圖網絡為基搭配智慧邏輯控制之差異性。根據覆蓋結果(表1-表3)可發現傳統清掃相較於地圖智慧清掃因缺乏地圖導引及清掃區域判斷，因此清掃過程容易出現過度集

中，或是有區域尚未清掃到等情況，且面對狹小空間較難脫困，覆蓋率上升有出現停滯現象。藉由地圖網絡的導引及清掃區域選擇判斷，不論中期或後期，覆蓋結果皆較為均勻且完整覆蓋於可清掃環境內。同時根據覆蓋率曲線圖(圖15)所示，藍色系為地圖網絡智慧清掃三個出發點結果，綠色系為傳統清掃三個出發點結果，地圖清掃覆蓋率直到清掃中期都呈現穩定上升狀況，直到清掃結束時的總清掃時間(表4)也都較傳統清掃來的好。

表 1 清掃中期 Coverage 比較

清掃邏輯	L1	L2	L3	Avg.
傳統清掃	75.2%	83.9%	79.4%	79.5%
智慧清掃	86.3%	86.3%	87.4%	86.6%

表 2 清掃末期 Coverage 比較

清掃邏輯	L1	L2	L3	Avg.
傳統清掃	91.3%	91.7%	89.0%	90.7%
智慧清掃	93.1%	92.2%	93.8%	93.0%

表 3 清掃末期 CVC 比較

清掃邏輯	L1	L2	L3	Avg.
傳統清掃	0.66	0.66	0.76	0.69
智慧清掃	0.65	0.7	0.59	0.65

表 4 總清掃時間比較(min)

清掃邏輯	L1	L2	L3
傳統清掃	60	60	60
智慧清掃	56	53	55

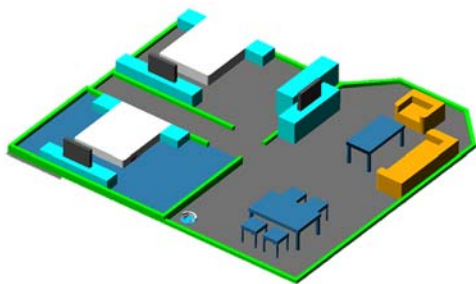
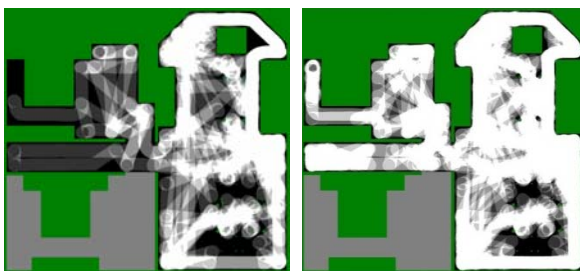


圖 13 兩房兩廳含家具



(a)模擬中期(30分鐘) (b)模擬末期(56分鐘)

圖 14 清掃模擬結果

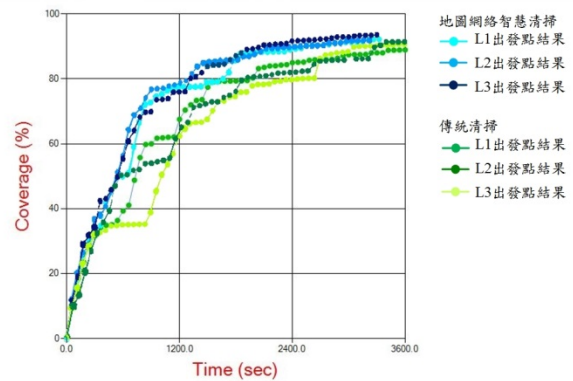


圖 15 覆蓋率曲線比較圖

5.2.2. 含段差環境清掃控制結果

在環境中連續區域清掃完成後，藉由路標導引，接續對具段差房間的環境進行模擬分析，藉由越障狀態克服家中高架地板或是門檻環境等狀況，與圖14傳統清掃機器人相比，具有清掃段差的功能，使清掃含蓋區域更加廣闊。進入段差環境後，使用智慧清掃方法依舊有效的將環境迅速覆蓋，都達93%左右的覆蓋效果，且在覆蓋率上升飽和後自動停止清掃時間，

表 5 兩房兩廳具段差環境清掃結果比較

	L1	L2	L3	Avg.
覆蓋率	93.0%	92.6%	93.8%	93.1%
CVC	0.67	0.70	0.62	0.66
時間(min)	69	65	68	67

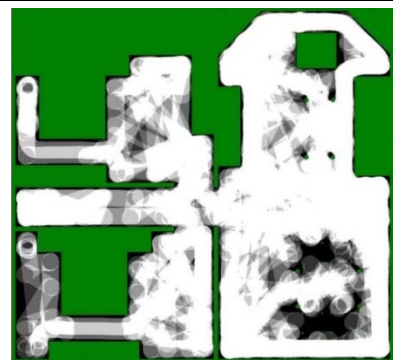


圖 16 含段差環境清掃模擬結果

6. 結論

本論文主要是以具有有限感知能力之越障式清掃機器人進行智慧清掃控制，以克服段差環境並改善清掃覆蓋效果。首先於環境中布置數個路標，配合機器人現有的感測器進行感測，建立各個路標之扇狀環境地圖，透過不斷的清掃學習與資料累積，建立出可靠的核心區域及地圖網路，並藉此判斷優先清掃區域及方向，驅使機器人進行清掃。且從覆蓋率變化狀況，用於脫困模式的啟動與自動判斷清掃時間，藉以提升整體清掃效率與均勻性。由三次模擬結果確實發現，

智慧清掃覆蓋率平均達93%，較傳統清掃來的更佳，且耗費時間也較短，而越障模態的應用也有效清掃段差區域，使清掃機器人不受門檻等環境影響。

7. 參考文獻

- [1] Wu, H., Tian, G.H., Li, Y., Zhou, F.Y., Duan, P., (2014), "Spatial semantic hybrid map building and application of mobile service robot", *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 62(6): 923–941.
- [2] Liao, Y. S., Zhang, Q., Li, Y. and Ge, S. S. (2012), "Non-Metric Navigation for Mobile Robot Using Optical Flow," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Algarve, Portugal, pp. 4953 – 4958.
- [3] Lee, S., et al. (2012). "Illumination-Invariant Localization Based on Upward Looking Scenes for Low-Cost Indoor Robots." *Advanced Robotics* 26(13): 1443-1469.
- [4] Kostavelis, I., et al. (2016). "Robot navigation via spatial and temporal coherent semantic maps." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 48: 173-187.
- [5] 張書榮、余志成(2008) "居家清掃機器人之清掃區域規劃與控制"，中國機械工程學會第二十五屆全國學術研討會，2008/11/21-22，大葉大學，彰化
- [6] 鄭冠澤、許育塵、余志成(2014) "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"，中國機械工程學會第三十一屆全國學術研討會論文，2014/12/6-7，逢甲大學，台中。
- [7] Sommer, V. and A. Rocher (2003). "A new exploration strategy for mobile robots based on a cost function approach." *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*. vol.2: 1697 - 1702
- [8] 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。
- [9] 鄭冠澤、許育塵、余志成(2014) "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"，中國機械工程學會第三十一屆全國學術研討會，2014/12/6-7，逢甲大學，台中
- [10] 蔡來旺、鄭冠澤、余志成(2015) "以扇狀地圖網絡為基的智慧吸塵機器人的覆蓋控制"，中國機械工程學會第三十二屆全國學術研討會論文集，2015/12/11-12，蓮潭會館，高雄

Application of Sector Based Mapping Network to Intelligent Coverage Planning of Cleaning Robot with Striding Capability in Step Environment

Lai-Wang Tsai, Jyh-Cheng Yu*

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

*Corresponding author: jcyu@ncku.edu.tw

Abstract

This study present an intelligent cleaning strategy using a sector-based mapping network for a vacuum robot with limited sensing and striding capability to improve cleaning efficiency and robustness. Most domestic cleaning robots adopt random based cleaning strategy which is unable to effectively enhance the coverage especially for a multi-room environment and the rooms with elevated floor. This study uses infrared sensor to detect the landmark attached to the skirting boards of wall, and establishes a local sector map using the locomotion estimation from the motor encoders. A core sector map based on the landmark is setup from the accumulation of cleaning learning process to guide the robot toward uncovered area to improve coverage efficiency. The neighboring information of the landmarks along with each sector map becomes a sector based mapping network. The robot will automatically determine the required cleaning time from the coverage rate of core sector map. This study applied MSC.ADAMS to construct a virtual environment to simulate the cleaning efficiency of a vacuum robot. The simulation result demonstrates the superior efficiency and robustness of the proposed scheme especially for a multi-room cleaning with uneven floor levels.

Keywords: Vacuum robot, Intelligent cleaning strategy, SLAM, Coverage Efficiency, Robot Simulation, ADAMS