

## 基於分區規劃之清掃機器人覆蓋路徑模擬

張育慈、余志成\*、李金月

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

\*通訊作者: jcyu@nkust.edu.tw

### 摘要

本文以具全域定位功能的機器人為基礎，搭配驅動器的編碼器進行快速的相對移動估計，分析分區清掃模式的架構。分區清掃模式主要搭配循牆模態與Z字模態，進行規劃式的清掃與環境辨識，機器人在未知環境下以充電站為參考原點，進行全域覆蓋，考量相對位移估計可能產生的誤差累積，故以固定大小的區塊切割環境，進行區塊的辨識與分區規則化清掃，並於清掃過程中建立各區塊的格點地圖與區塊間相鄰關係之分佈矩陣。藉由MSC.ADAMS動態模擬軟體，建構仿真模擬環境，進行全域定位、馬達編碼器、紅外線感測器及障礙偵測模擬，分析分區清掃模式的策略架構和覆蓋效率。

關鍵字：清掃機器人、規劃式清掃、分區清掃、環境地圖建置

### 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，其清掃策略則分為兩大類隨機式與規則式覆蓋，隨機式主要使用近距離的感測器如紅外線、極限開關、超音波等，搭配隨機碰撞、循牆或螺旋模態進行環境清掃，使用的感測器只能進行近接障礙的偵測，與局部定位，易受到誤差累積的影響。而規則式清掃機器人，則藉由全域定位系統準確估計機器人所在的座標，以循邊模態及牛耕模態快速覆蓋環境，在清掃過程中來構建環境地圖，能夠以低重複的方式完成打掃。

面對複雜的環境或是多房間區域，若以隨機式的模態進行清掃可能會因環境問題而受限在同一區塊或重複清掃、或部分區塊沒清掃到的狀況，導致清掃效率不佳。而目前市面上的高階清掃機器人，主打規則式的清掃，但需以全域定位功能，同步定位及環境辨識技術(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)，藉由雷射[1]、影像辨識[2]等感測系統，能在未知的環境下，藉由特徵辨識估計機器人的方位，並將環境以格點化的地圖來表示，進而在清掃過程中建立出覆蓋環境地圖。

而文獻對於具全域定位的覆蓋規劃的探討並不多見。文獻[3]針對不具有精密全域定位系統的中低價位機器人，將一般封閉具線性邊界的環境，分割成小

區塊，以減少單純利用驅動編碼器估計相對位移的累積誤差，藉以進行全域覆蓋，並有效的減少重疊覆蓋率。而當結合全域定位系統如影像定位(Visual Localization)時[4]，則可進行全域地圖的建立，進行較準確的同步環境地圖建置。

本文將探討規則式清掃機器人的路徑規劃，並自行撰寫程式於MSC.ADAMS動態仿真軟體進行模擬分析，以驗證此清掃方式的可行性與覆蓋率，在此將參考LG VR64701LVM具影像定位(Visual SLAM)功能的清掃機器人，瞭解如何以全域定位的方式進行環境切割及路徑，並對應不同環境狀況調整其控制邏輯，以提升清掃效率。

### 2. LG 分區清掃模式的觀察

本研究先以LG機器人的分區模式為例，在一空曠環境進行分區清掃，一開始由充電站為中心，從左側開始以逆時針循牆模式，進行區塊邊界辨識後，再以牛耕方式覆蓋區塊內部。區塊大小約為3.2m×3.2m，之後再由充電站右側辨識區塊，並進行內部Z字形規則式覆蓋，再以逆時針進入下一區塊清掃。圖 1所示為實體機器人在環境下以分區模態進行清掃的環境區塊切割狀況，虛線部分為切割過後的區塊，實線為Z字型行駛的路徑，其中根據區塊形狀的不同，可能採取水平或垂直式的牛耕覆蓋。

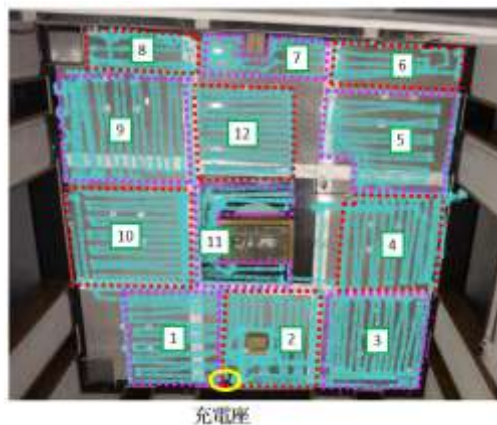


圖 1 LG 清掃機器人分區清掃實測

但圖 1 LG清掃機器人分區清掃實測中仍可看出因為障礙的存在，造成分區不完整，使得有些區域未清掃，這也是規則式清掃常見的問題。因此如何進行

分區，尤其是區塊辨識中遇到障礙時的處理方式，以及如何選擇最有效率的牛耕覆蓋方式，以減少轉次數與未清掃區域。再則如何進行分區格點地圖的建立及建構區塊間的關係，將會是本文分析的重點。

### 3. 規則式清掃路徑規劃

#### 3.1. 區塊清掃規劃.

本文以一般家庭具隔間環境，以區塊化的方式分析清掃規劃，將環境分隔成相鄰的區塊進行內部清掃，以降低清掃的累積誤差與複雜性。典型區塊的尺寸設定為正方形，在此分析中我們採用 $320 \times 320$  (cm)。並以區塊左下方做為局部座標系的原點，而將整個環境表示為相鄰區塊的組合。在清掃過程中以循邊方式辨識出區塊的邊界，再以牛耕方式辨識區塊內可覆蓋的範圍。考量機器人的外型尺寸 (約 $\phi 40$  cm)，並以機器人中心做為路徑分析，假設清掃範圍為中心點半徑 $10$ cm的圓形，實際的機器人中心移動的最大邊界將為 $R \times R$ 的矩形，此例中 $R=280$  (cm)。考量一般家庭尺寸，我們假設這區塊都會至少有一側為牆面隔間，因此以機器人中心假設 $10$ cm半徑的清掃範圍，區塊內可覆蓋的區間可能會小於 $300$ (cm)，但一般清掃機器人設計都會有側掃刷設計，實際清掃範圍將會較大。

而機器人假設僅具有單側循牆的功能，本文以右側循牆為分析例，首先以循邊方式來設定區塊內可覆蓋範圍，而一般家庭可能遇到區塊內可覆蓋範圍的基本分類如圖 2，其判定的步驟如下：

- (1) 最初的起始點設定在充電座上，因一般充電座皆為一側靠牆設置，且考量一般家庭面積的大小，假設此時區塊的左下角原點為起始點 $S_n$ 且皆為鄰牆，以起始點為原點與牆面平行側設定為 $x$ 方向，而垂直側為 $y$ 方向。
- (2) 分區循邊過程，若沒障礙干擾，機器人可前進至區塊內的中心邊界( $R \times R$ )，每次抵達中心邊界即進行逆時針 $90^\circ$ 轉向，此時區塊內的可覆蓋範圍將如同區塊大小如圖 2(a)。
- (3) 將最初到達區邊界而轉向的位置定義為下一區塊參考點 $E_n$ 如圖 2(a)與(d)。
- (4) 若在未抵達 $x$ 或 $y$ 的寬度極限前遇到障礙，就啟動循邊模式，並紀錄碰撞點座標，當任一座標超出中心範圍時即轉向，並設定第一次超出中心邊界的轉向點為下一區塊參考點 $E_n$ 同(3)所述，如圖 2(c)(e)與(f)，此時受到環境邊界影響，區塊內可覆蓋的最大矩形將會小於區塊大小，其中心範圍的包覆矩形尺寸以 $D_x$ 、 $D_y$ 為標示。
- (5) 機器人趨近於起始點 $S_n$ 是為完成分區循邊，並移動到內部Z字清掃起始點 $Z_n=(d_z, d_z)$ ，並進行內部覆蓋。

區塊內部以Z字清掃進行覆蓋，進行Z字型清掃時重疊的距離為 $d_z$ ，由此進行多次的移動清掃直至完

成清掃。但在Z字清掃方向在以減少轉向次數為判斷基準，將在下節中說明。

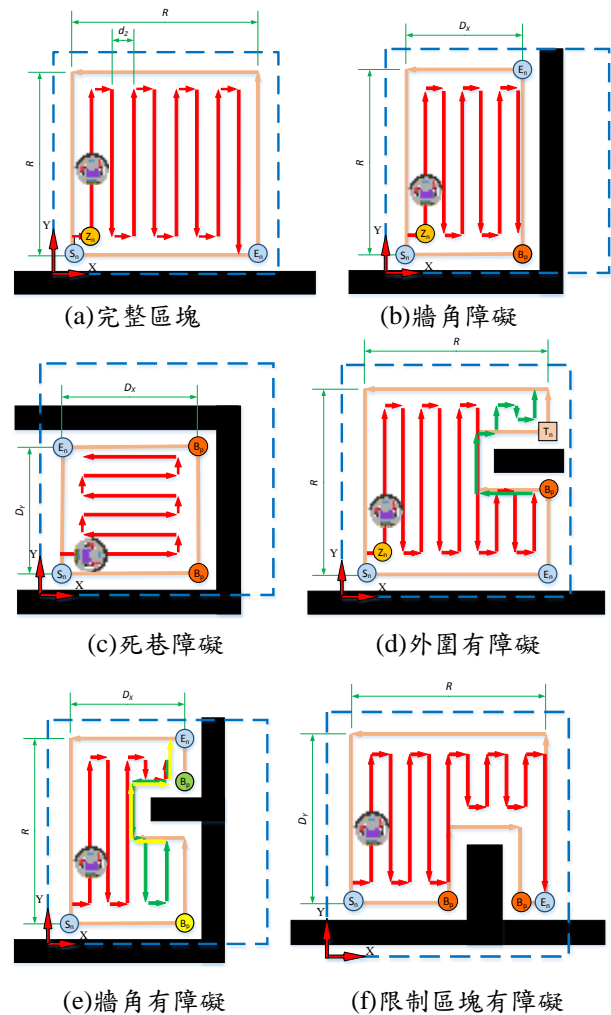


圖 2 各區塊環境的的邊界與覆蓋路徑

#### 3.2. 區塊內部覆蓋

每當完成一區塊切割後，使機器人進入區塊內部清掃，內部的清掃方式為採用的Z字型模態進行清掃覆蓋，而訂定Z字型的方向、行走距離及轉向次數 $n_z$ ，就要從分區循邊中獲得的清掃範圍大小來判斷，並設為Zigzag( $Z_n, d_z, n_z$ )模態裡的變數，本文Z字型間距 $d_z=20$ (cm)。

- (1) 當下一區塊參考點 $E_n$ 與起始點( $S_n$ )同在 $x$ 軸向，且可覆蓋中心範圍尺寸 $D_x = D_y$ ，定義Z字型方向垂直於起始點 $S_n$ 與下一區塊參考點 $E_n$ 的 $\overline{S_n E_n}$ 線段，以減少Z字型覆蓋結束時到下一區塊參考點 $E_n$ 的距離如圖 3。
- (2) 當 $D_x \neq D_y$ ，則Z字型覆蓋選擇長邊的方向，以減少轉向次數，如圖 2(b)(e)。
- (3) 當區塊邊界存在外凸障礙時，Z字型覆蓋方向將會影響單次Z字型覆蓋殘留的未覆蓋區域，考量

單純的障礙，當Z字型覆蓋方向與具外凸障礙的牆面垂直時如圖 2(f)，則單次Z字型覆蓋將有機會將區塊內可覆蓋區域清掃完畢。然而若Z字型覆蓋方向與具外凸障礙的牆面平行時如圖 2(e)，則可能因為外凸障礙造成單次Z字型覆蓋的殘留未清掃區域，則需另行規劃清掃方式以完成殘留區域的清掃。

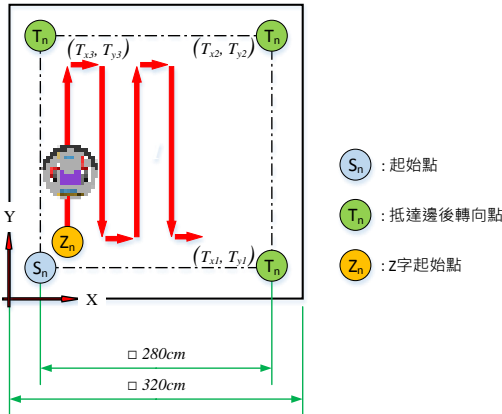


圖 3 分區清掃 Z 字型判定

### 3.3. 建立環境地圖

從機器人行走路徑規劃可建構可區塊可覆蓋地圖，本文根據機器人吸口大小與掃刷清掃範圍定義每格點設為 $20 \times 20 \text{cm}$ ，因為機器人在循邊時受限於本體尺寸，因此機器人與牆面障礙將會有約 $20 \text{cm}$ 的距離，但一般機器人設計都會有側掃刷設計，可清潔機器人與牆面間的縫隙，因此在地圖建立過程將以中心可行邊界 $280 \text{cm}$ 計算，每一區塊的可覆蓋範圍以 $15 \times 15$ 的格點矩陣來簡化地圖的紀錄，而此時實際的環境平面尺寸為 $320 \times 320 \text{cm}$ ，區塊局部座標系統的原點將會在左下角格點的中心位置。並為了瞭解區塊邊界情況，將矩陣擴大為 $17 \times 17$  (圖 4)，將最外側的行與列作為相鄰資訊的紀錄。同時機器人行走過程中的路徑透過定位系統紀錄並將資料轉換為格點顯示，且格點矩陣內紀錄機器人覆蓋的次數，並可藉由循邊與障礙碰撞，紀錄存在障礙的格點，由此建立各區塊的歷史地圖。

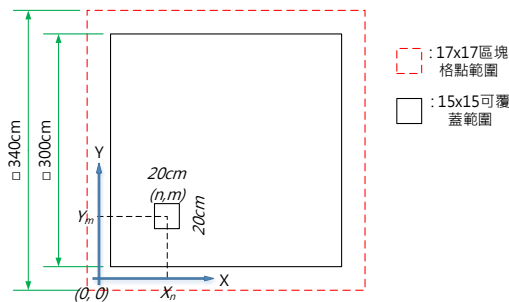


圖 4 區塊格點及局部座標系的設定

### 3.4. 區塊格點與相鄰關係資料結構

當一區塊分區完成後，即可判定出下一區塊的位置及方向性，我們紀錄區塊邊界判斷時找出的下一區塊的參考點 $E_n$ 與方向性 $c_D$ ， $c_D$ 記錄下一區塊相對於全域座標系統的方位，並將這些資料紀錄在區塊格點地圖與相鄰的資料結構中 $cell(n, O_n, M, E_n, c_D)$ ，其中

$n$ ：區塊編號

$O_n$ ：區塊原點全域座標

$M$ ：區塊矩陣本文以 $17 \times 17$ 為例代表 $340 \times 340 \text{cm}$ 的格點地圖

$E_n$ ：下一區塊參考點全域座標

$c_D$ ：下一區塊方向性， $x=+1, -x=-1, y=+2, y=-2$

而由 $O_n$ 與方向性 $c_D$ 可判斷出下一區塊的原點 $O_{n+1}$ ，兩個區塊在邊界會有 $20 \text{cm}$ 的重疊，以確保在相鄰邊界能覆蓋完全。而從參考點 $E_n$ 與下一區塊方向性 $c_D$ 則可判斷下一區塊的起始點 $S_{n+1}$ ，即沿 $c_D$ 方向平移 $20 \text{cm}$ 。而相鄰區塊間包含一列重疊的格點，藉以紀錄邊界資訊與下一區塊間的關係如圖 5。圖 6 中灰色部分為一具隔間的環境例，及其以區塊辨識後的覆蓋狀況，可看見區塊地圖的相鄰關係與覆蓋順序。

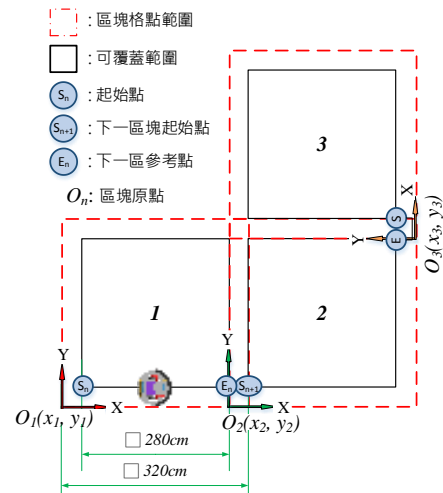


圖 5 相鄰區塊原點與起始點關係



圖 6 區塊相鄰分佈示意圖

## 4. 仿實境環境模擬分析

本文利用 MSC.ADAMS 仿真模擬軟體所提供的模組，建構虛擬環境與機器人機構，進行動態模擬分析，以三層式程式架構的方式進行 C 語言程式的撰寫建置環境與移動控制邏輯[5][6]，進行規劃性的區塊的模擬清掃，包括區塊的辨識與內部牛耕模式覆蓋如



向點判斷Z字型方向、轉向次數及長度，但在區塊矩陣中發現有未清掃到的格點(圖 13)，以目前的清掃邏輯還未能解決此種狀況，但會以每一區塊的環境格點來判斷是否有未清掃到的地方，格點為0代表未清掃，便會希望機器人能再Z字結束後，以最短路進行駛至最近的未清掃格點，並開始做Z字型清掃，將該未清掃部分清掃到，但仍然有小部分未清掃到。

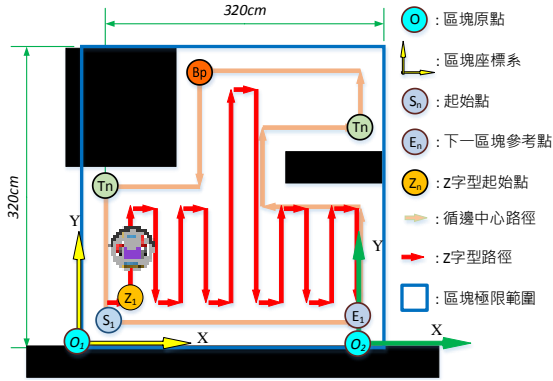


圖 12 左右障礙示意圖

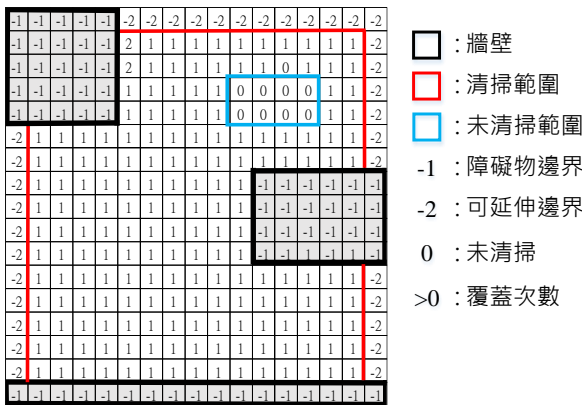


圖 13 左右障礙區塊矩陣

#### 4.1.4. 內部障礙

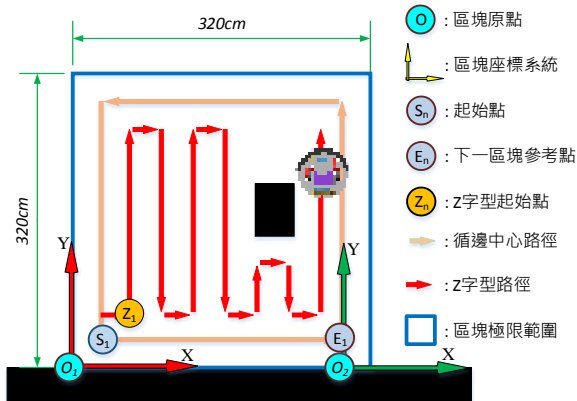


圖 14 內部障礙示意圖

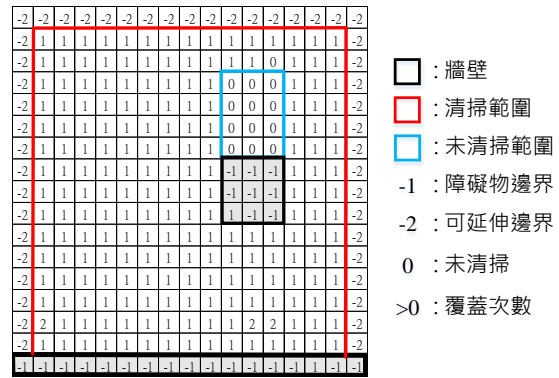


圖 15 內部障礙區塊矩陣

當區塊具有內部障礙如圖 14時，圖 15顯示在Z字清掃過程中會發生因障礙遮蔽會有未清掃的格點，此時將需判斷是否有未清掃到的地方，在機器人Z字結束後，以最短路進行駛至最近的未清掃格點，並開始做Z字型清掃，將該未清掃部分清掃到。

#### 4.1.5. 限制範圍單一區塊清掃模擬

清掃的過程中也會因一些特殊狀況使每一區塊的清掃範圍受到限制，比如說牆角或走道的狀況，因此區塊矩陣的方向性會因此改變，但區塊大小依舊不變，當受限區塊清掃完畢後，後面的區塊也會因區塊矩陣位置使得清掃範圍受限。

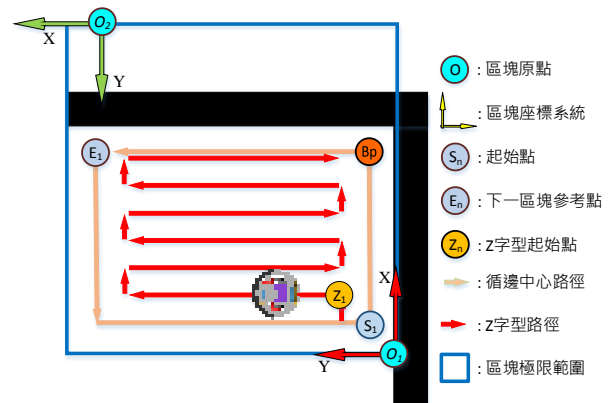


圖 16 牆角障礙示意圖

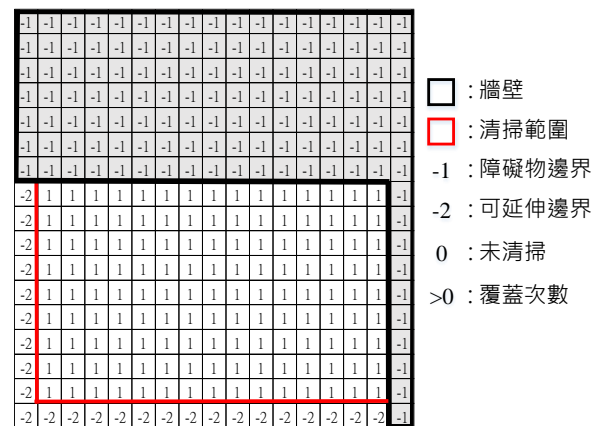


圖 17 牆角障礙區塊矩陣

牆角障礙也會使清掃範圍受到限制的狀況(圖 16)，在受限的範圍中，當 $x$ 方向可覆蓋尺寸小於預設最大尺寸時，下一區塊將會在局部座標系統 $y$ 軸方向，而非之前的 $x$ 軸向相鄰區塊。此時下一區塊參考點是此區塊原點的右上方，所對應的區塊矩陣如圖 17。

## 5. 結論

本文以具全域定位功能之機器人在未知環境下，以規劃式分區清掃的方式，規劃分區方式，與內部可覆蓋區域的辨識，並建立區塊清掃的資料結構及清掃邏輯控制，以使清掃機器人在降低覆蓋重疊率的條件下完成全域覆蓋，藉以提升清掃效率。並透過實境模擬每一區塊會遇到的各種環境來，評估規劃式分區清掃的覆蓋效率與需面對的挑戰。

## 6. 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] Fleeer, 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] Lee, T. K., Baek, S., & Oh, S. Y., "Sector-based maximal online coverage of unknown environments for cleaning robots with limited sensing." Robotics and Autonomous Systems, Vol.59, No.10, pp.698-710, 2011.
- [4] Lee, T. K., Lee, S., & Oh, S. Y., "A Hierarchical RBPF SLAM for Mobile Robot Coverage in Indoor Environments." Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, pp. 841-846, 2011.
- [5] 許育塵、余志成 (2013 年 12 月)。智慧型清掃機器人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，宜蘭大學，台灣。
- [6] 蔡來旺、鄭冠澤、余志成 (2015 年 12 月)。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 32 屆全國學術研討會，高雄蓮潭會館。

# Coverage Simulation and Path Planning for Cell-Decomposition-Based Cleaning Robot

Yu-Chi Jhang, Jyh-Cheng Yu\*, Jin-You Li  
Department of Mechanical and Automation Engineering,  
National Kaohsiung University of Science and Technology

\*Corresponding author: jcyu@nkust.edu.tw

## Abstract

This paper will study the programmed patterns for a SLAM based cleaning robot. The localization system consists of a global positioning system and a rapid relative motion estimation using the encoder information from the actuators. The study starts from a close observation of a LG HOM-BOT to analyze the programmed cleaning strategy. The robot starts from the charging station in an unknown environment and cleans the environment cell-by-cell to reduce the cumulated errors from the estimates of relative displacements. This study uses MSC.ADAMS dynamic simulation software to simulate the cleaning strategy. We proposed a framework for cell-by-cell pattern coverage. The cell is covered by boundary following and zigzag mode. A grid map of each cell is established along with the cell distribution matrix to represent the coverage map of the environment. The preliminary simulation result demonstrates the feasibility of the programmed pattern coverage, and can be used to analyze the coverage efficiency of different cleaning schemes.

Keywords: Cleaning Robot, Path Planning, Cell Decomposition, Coverage simulation, Environment mapping