

## 以扇狀地圖網絡為基的智慧吸塵機器人的覆蓋控制

鄭冠澤、蔡來旺、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

本文探討以有限感知能力之吸塵機器人搭配扇狀地圖網絡進行智慧清掃控制之研究，以隨機為基的清掃策略，利用吸塵機器人現有的紅外線感測器，配合清掃環境中的路標佈置，以反覆學習的方式，得到個別扇狀地圖網絡的核心清掃區域。隨機為基的清掃策略主要以隨機及循邊模態進行清掃，本文研究不同區域大小、長寬比及其障礙複雜程度的特徵參數，藉由辨識清掃區域的特徵參數，包括平均隨機及循邊碰撞距離、最大碰撞距離等，以田口法決定不同環境下各模態之清掃參數，使吸塵機器人能根據環境特性選擇最佳的清掃策略，藉以提升清掃效率。

**關鍵字：**吸塵機器人、環境辨識、智慧清掃、覆蓋率分析、機器人運動模擬

### 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，以往所提出之方法都須藉由一些感測器來感測環境，典型感測方式分為接觸式與非接觸式，接觸式感測經由保桿碰撞配合極限開關偵測訊號，有絕對的可靠性，但缺點為噪音及家具碰撞所產生的損傷等問題；非接觸式為紅外線、超音波感測與光遮斷器等，用來感測障礙物與環境辨識。超音波雖可避免碰撞，但易有反射干擾、價格高、測距誤差等缺點；紅外線雖然價格低、控制方便，但適於小角度的障礙偵測，需以多個紅外線感測器排列來偵測碰撞面，且有顏色辨識及受環境燈光影響的問題。因此一個完整的清掃機器人核心研究課題，包括成本、感測器整合、路徑規劃、清掃策略、室內定位與導航、避障技術等。

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[5]。及以循邊加牛耕為基建立較規則性的清掃方式，如LG的Roboking使用仰式的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[3]、NEATO清掃機器人利用微型的雷射測距儀感測並辨識周圍環境、以影像處理抓取QR code路標資訊建立導航之地圖[1]、利用光流影像建立環境資訊[2]等，但這些都需要格外價高的感測器。因此對應用於低價位消費性產品的清掃機器人來看，若能利用簡單的感測器並且改善所設計之清掃路徑的功能，將具

有低成本的優勢。因此如何利用機器人有限感知能力，結合同步定位與環境地圖建構，作為機器人的環境資訊參考，以提升清掃效率達到智慧化清掃，將會是本文的研究重點。

### 2. 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[6]。

#### 2.1. 運動機構與環境設置

首先匯入清掃機器人3D模型(如圖1)，並進行約束(Joint)設置，限定其物件的運動方式及自由度，建構出清掃機器人的運動機構，並建立輪胎模組(Tire)、驅動器(Motion)，作為清掃機器人傳動系統，且經由感測器(Sensor)功能，建立模擬碰撞行為的感測機制。

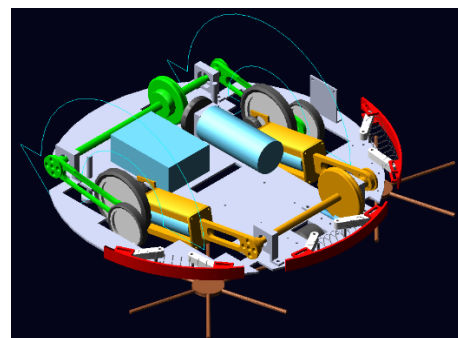


圖 1. 機器人動態機構模擬模型

#### 2.2. 清掃覆蓋率分析

利用ADAMS模擬，並配合Fortran所編譯子程序(consub)作為機器人控制邏輯，以實現機器人的運動動作及清掃路徑模擬，透過Visual C#所設計的程式介面，分析清掃機器人在環境中的覆蓋率與清掃效率，並把重複清掃次數以5種不同灰階顯示，作為不同清掃策略的效率評估如圖2、圖3所示。

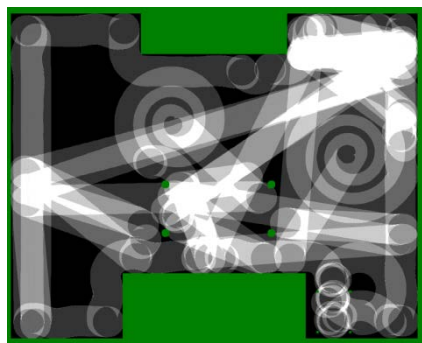


圖 2 覆蓋路徑分佈

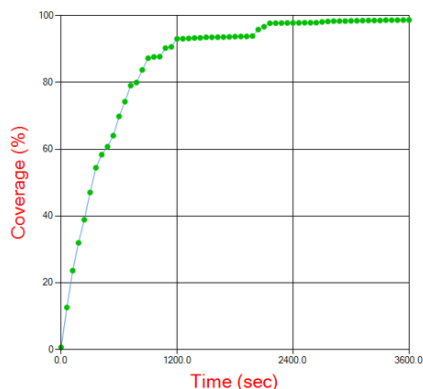


圖 3 覆蓋率曲線圖

### 3. 單一房間的清掃策略

#### 3.1. 空房間之最佳參數

本研究以隨機為基的清掃方式，由隨機碰撞與循邊清掃兩種模態交替，隨機模態以直線前進清掃，在碰到障礙後以隨機轉向方式在進行直線清掃，如此反覆，其目的用來清掃空間內部與避障。而循邊模態則用於清掃牆邊，且藉此將機器人帶到另一個區間進行隨機清掃。

然而清掃環境是多樣化的，每個房間複雜程度都不盡相同，隨機次數與循邊距離交替也有所差異，因此以下將針對不同的空房間環境狀況進行田口實驗。首先以不同寬深比與房間大小之空房間做為模擬，以15m<sup>2</sup>為標準房間基準，首先觀察現有清掃機器人在此環境下所採用隨機次數為6次，因此將其隨機清掃次數3水準設定為4、6、8次。而其他面積之隨機次數則依相對於標準房間大小15 m<sup>2</sup>之比例來做調整，例如9 m<sup>2</sup>之環境隨機次數為  $\frac{9}{15} \times 4 = 2.4 \approx 2$  次、

$$\frac{9}{15} \times 6 = 3.6 \approx 4 \text{ 次、} \frac{9}{15} \times 8 = 4.8 \approx 5 \text{ 次。}$$

而循邊距離則與房間大小成比例，以面積A的平方根作為參考尺寸，以循邊到不同牆面0.5 $\sqrt{A}$ 、1.5 $\sqrt{A}$ 、2.5 $\sqrt{A}$  (如圖4)為三個水準，因子水準設定如表1所示，依此實驗計畫模擬在三種空房間大小9 m<sup>2</sup>、15 m<sup>2</sup>、20 m<sup>2</sup>之清掃結果，以決定單一空房間之

清掃參數，並以覆蓋率做為望大訊噪比進行參數設計。

表 1.各面積控制因子水準設定

環境類型		Level 1	Level 2	Level 3
9m <sup>2</sup>	隨機次數	2	4	5
	循邊距離	1.5	4.5	7.5
15m <sup>2</sup>	隨機次數	4	6	8
	循邊距離	1.9	5.7	9.5
20m <sup>2</sup>	隨機次數	5	8	11
	循邊距離	2.2	6.6	11

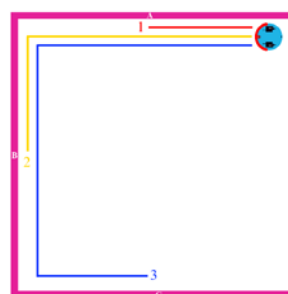


圖 4.循邊到不同牆面作為水準設定基礎

每一大小房間並以兩種深寬比，分析之結果如圖5、圖6，可發現在不同的面積寬深比下，隨機設定皆以第3水準為最佳，而循邊在寬深比為1時為第1水準最佳，寬深比為2時，為第2水準最佳，由於寬深比1.5時之循邊第1與第2水準相差不大，因此制定若為寬深比大於2，循邊才以第2水準做設定，其餘都以第1水準設定。

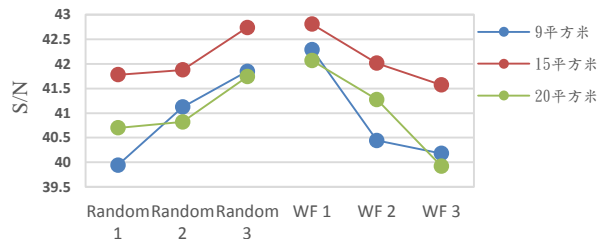


圖 5.控制因子對訊噪比的響應圖(寬深比 1:1)

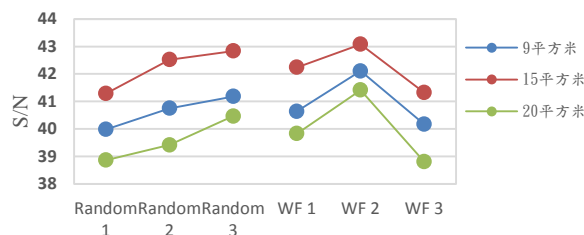


圖 6.控制因子對訊噪比響應圖(寬深比 1:2)

### 3.2. 最佳循邊距離

通常在清掃環境中，必定含有家具之環境，而加入家具對於循邊模態則影響最大，因此以下將針對不同的家具含量(如圖7)，利用上述之最佳參數固定隨機模態，觀察循邊改變(0.5√A、1.5√A、2.5√A)後覆蓋效率，並同時紀錄平均循邊碰撞距離，在以平均循邊碰撞距離與覆蓋效率之關係決定最佳循邊距離。

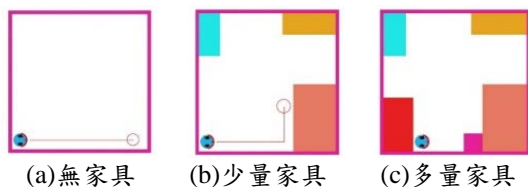


圖 7.不同家具含量之 15m<sup>2</sup>房間

分析結果得到在環境(a)中平均循邊距離為1.36m，最佳的循邊距離為1.9m、環境(b)中的平均循邊碰撞距離為1.03m，最佳循邊距離為5.7m、環境(c)中平均循邊碰撞距離為0.79m，最佳的循邊距離為9.5m，因此可以得到如圖8之趨勢線，並可利用式(1)來計算含家具時之最佳循邊距離。

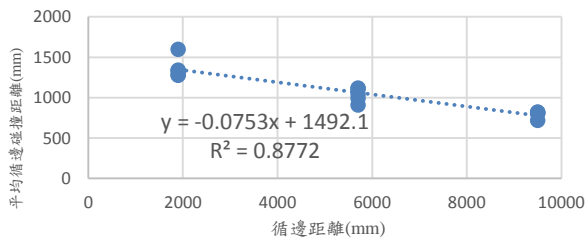


圖 8.平均循邊碰撞距離之趨勢線

$$\text{最佳循邊距離} = \frac{14921 - \bar{y}}{0.0753} \quad (1)$$

### 4. 隨機次數驗證

理論上在時間足夠下，覆蓋率都可達到95%以上，單純比較覆蓋率將無法判斷清掃之好壞，因此本文提出以覆蓋變異率(Coverage Variation Coefficient, CVC) [7](式2)作為後期清掃結果的定量評估基準，其計算方式係將模擬圖形中的可清掃區域各畫素的覆蓋次數計算其覆蓋次數標準差與平均值，CVC 越低代表整體清掃均勻性越好，也代表清掃效率較佳。

$$CVC = \frac{\text{清掃格點的清掃次數標準差}}{\text{清掃格點的平均清掃次數}} \quad (2)$$

而整體的清掃效率則以覆蓋率/CVC作為評定基準，由於3.2推導出最佳循邊距離，因此在此反過來驗算3.1利用可清掃面積大小對隨機次數縮放概念是否正確，將剛得到的最佳循邊距離固定，並把隨機次數上下各加一水準，觀察清掃之結果，其結果如表2、表3、表4，可以得到原本水準設定的效率為最佳，因此確定此縮放隨機次數之概念為合理的。

表 2.無家具之房間清掃效率(覆蓋率/CVC)

Random	WF(m)	P1	P2	P3	P4	P5	Avg.
6	1.9	138.5	151.0	127.1	139.6	145.9	140.4
8	1.9	149.0	149.2	153.4	149.9	145.3	149.4
10	1.9	139.0	147.6	140.8	148.8	155.8	146.4

表 3.含少量家具之房間清掃效率(覆蓋率/CVC)

Random	WF(m)	P1	P2	P3	P4	P5	Avg.
4	5.7	117.7	105.9	127.4	115.2	150.0	123.2
6	5.7	171.6	145.7	132.0	151.6	144.0	145.0
8	5.7	140.3	147.4	130.1	122.0	143.5	136.7

表 4.含多量家具之房間清掃效率(覆蓋率/CVC)

Random	WF(m)	P1	P2	P3	P4	P5	Avg.
3	9.5	105.6	123.4	122.5	83.0	94.1	105.7
5	9.5	134.6	142.8	130.0	134.7	161.6	140.7
7	9.5	106.8	122.0	131.8	148.6	130.1	127.9

## 5. 扇狀地圖網絡的建置與學習

本文利用一具有限感知能力清掃機器人的導引系統，以路標作為局部定位配合驅動馬達上的編碼器所組成的方位定位系統，建立扇形地圖樹狀架構作為環境地圖[7]，並考量累積滑動誤差，以反覆學習的方式找出每個路標的核心清掃區域，應用在居家清掃機器人的清掃導引，而當機器人在執行循邊模態且偵測到路標時，可針對此路標的地圖資訊回饋來改變清掃參數達到智慧清掃的概念，以提升覆蓋率與覆蓋均勻率。

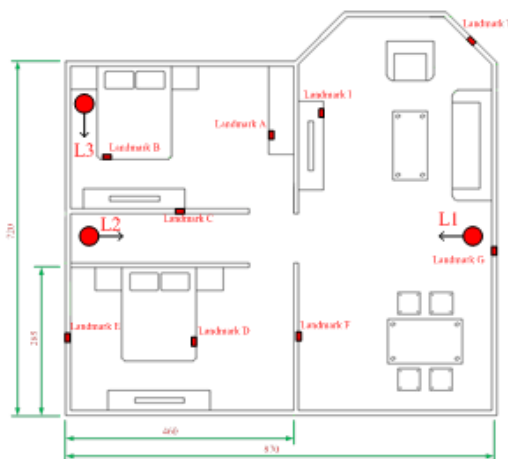


圖 9.環境路標設置圖

### 5.1. 路標之建置

本文以路標定位方法，藉由路標建立起個別環境格點地圖及各區間方位關係。其擺放位置如圖9所示，擺放原則為路標與路標間距離約五米，每一房間至少擺放一路標，如遇房間常有障礙物將環境切割為

兩個區域，則應隨著區域擴大而增加路標數量，並將各個路標黏貼至牆邊，以機器人循邊清掃模式時偵測路標，主要是考量到居家審美觀與操作的困難性，而路標感測原理則以RFID或紅外線掃瞄條碼方式。

5.2. 扇形地圖架構

本文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模糊小區間，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，將清掃過的區域以格點標示，每個格點依據機器人吸塵口與掃刷的清掃範圍為20x20(cm)所決定，以該路標作為原點建立N×N的格點地圖，當機器人偵測到路標，就啟動扇形地圖機制，利用驅動馬達上的編碼器將機器人所在之格點標記，就可建立該路標之環境地圖(如圖10)，紅色格點為路標原點，而每個格點記錄重複覆蓋次數，利用覆蓋次數計算設置一過濾門檻(threshold)，藉以建立該環境地圖之核心區域，以避免因機構滑動的累計誤差，導致機器人路徑不準確，影響格點地圖的可靠性，如圖10所示白色區域為該路標之核心區域。

在路標辨識過程同時記錄每一扇狀地圖間的相鄰性如圖11所示，累積所學習所建立核心區域之集合，將各扇狀地圖與實際地圖疊合(圖12)可看出路標核心區域幾乎涵蓋了整個可清掃之環境，顯示本方法可有效辨識出環境之可清掃區域。

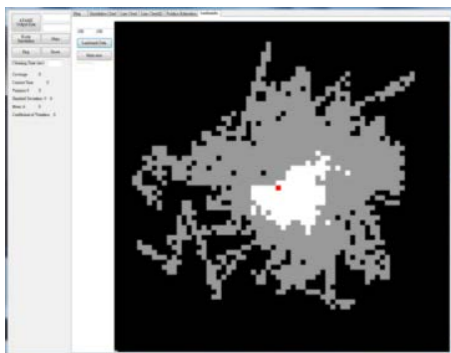


圖 10.路標環境地圖

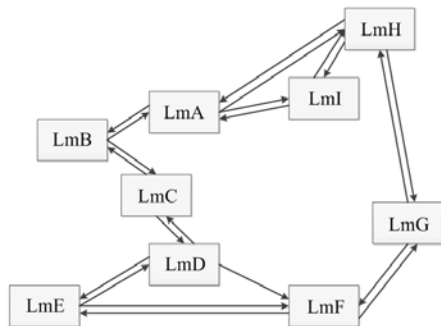


圖 11.路標樹狀圖

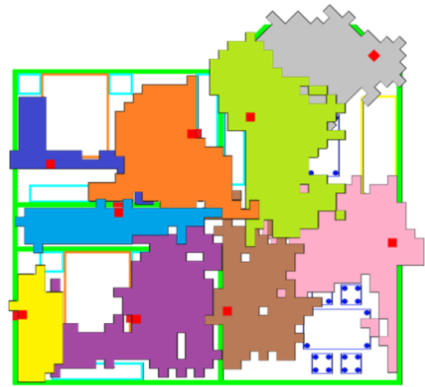


圖 12.環境之路標覆蓋範圍

6. 智慧清掃控制應用與流程規劃

由路標的資訊可以得到各區域的格點核心地圖，藉以估計路標附近可清掃區域的面積與深寬比(如圖13)，並以此代入3.1所推導的田口法得到最佳之清掃參數。而此參數經式(3)進行修正，其代表意義為環境面積的複雜程度，藉以修正隨機次數 $R_0$ 與循邊距離 $W_0$ ，

$$COA = \frac{\text{核心區域格點數}}{W \times h} \tag{3}$$

$$R_1 = R_0 \times COA \tag{4}$$

$$W_1 = W_0 / COA \tag{5}$$

$$W_2 = W_1 \times 0.5 + \text{應循邊距離} \times 0.5 \tag{6}$$

並應用 $R_1$ 、 $W_2$ 執行清掃動作，

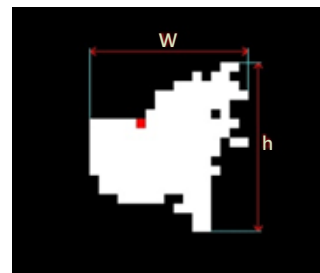


圖 13.扇狀地圖格點面積

7. 結果與討論

本文利用ADAMS動態仿真模擬軟體針對兩房兩廳環境(圖14)做清掃模擬，並配合C#進行清掃效率分析[4]，且以三個不同初始位置進行模擬分析，其房間尺寸與出發點及方向如圖9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)。並以Coverage/CVC作為整體清掃效率評估標準，當覆蓋率越大，且均勻性越高，則整體清掃效率越大。

比對一般清掃邏輯隨機8次、循邊1.9m循環做清掃90分鐘，和本文所提出的以地圖網絡為基搭配智慧

邏輯控制清掃90分鐘之差異性。由清掃模擬分析得到結果，並將模擬60分鐘與90分鐘之路徑結果以灰階輸出觀察其結果。其清掃結果如圖15、圖16，其政體清掃效率整理如表5與表6。而圖17顯示藍色曲線為地圖智慧清掃覆蓋率上升情形，綠色曲線為一般清掃控制之覆蓋率上升情形，可以觀察到地圖智慧清掃之結果在清掃初期時，覆蓋率上升的比較快且較穩定。

表 5. 清掃模擬 60 分鐘之 Coverage/CVC

清掃邏輯	L1	L2	L3	Avg.
一般清掃	1.22	1.09	1.16	1.16
智慧清掃	1.40	1.55	1.48	1.47

表 6. 清掃模擬 90 分鐘之 Coverage/CVC

清掃邏輯	L1	L2	L3	Avg.
一般清掃	1.39	1.24	1.51	1.37
智慧清掃	1.53	1.53	1.68	1.56

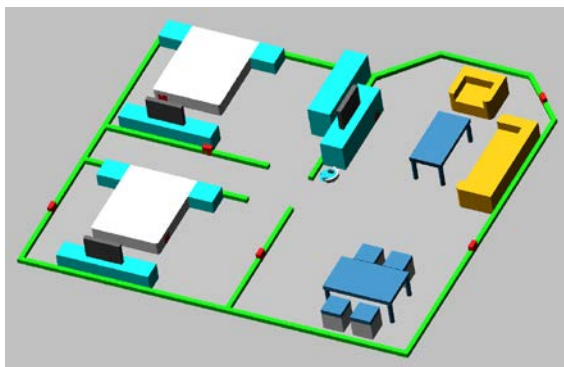


圖 14. 兩房兩廳含家具



圖 15. 模擬 60 分鐘



圖 16. 模擬 90 分鐘

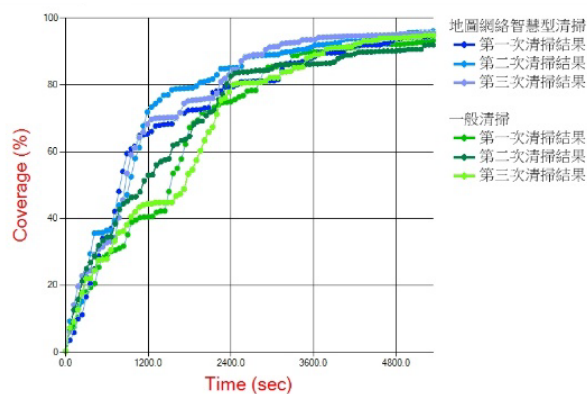


圖 17. 覆蓋率曲線比較圖

## 8. 結論

本文以隨機為基的清掃邏輯搭配扇狀地圖網絡來判斷最佳清掃參數，並且隨著地圖建構的完整性持續改變清掃邏輯參數，另外在清掃的過程中也持續蒐集環境參數，以達到智慧邏輯清掃的概念。從分析的結果得到整體清掃效率Coverage/CVC在多次60分鐘的清掃模擬中相較於傳統故清隨的隨機清掃提升了26%，而90分鐘之模擬提升了14%。顯示當吸塵機器人面對不同的環境時，若能快速的熟悉環境狀況並且學習環境特徵，則能使吸塵機器人得到更佳的工作效率。

## 9. 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] 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。
- [5] 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
- [6] 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。
- [7] 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

## Coverage Control of Cleaning Robots Using Intelligent Cleaning Strategy and Sector Based Mapping Network

Kuan-Tse Cheng, Lai-Wang Tsai, 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 study discusses sector-based map network of a vacuum robot using intelligent cleaning strategy control with limited sensing. Since the environment is diversified, different area ratio and environmental size lead to different result of environmental parameter. This paper characterizes the cleaning environment for different area and aspect ratio such that the robot can adopt a most suitable cleaning strategy to improve cleaning efficiency. We apply the simulation analysis of MSC.ADAMS to take advantages of module instructions and verisimilitude to construct a virtual prototyping environment and vacuum robot. The vacuum robot adopts infrared sensor and landmark's message to estimate every individual area of network and through Taguchi-method to determine the optimum parameters for cleaning strategy. A sector-based map network is established to enhance cleaning efficiency for multi-room environment. The cleaning strategy improves both coverage and coverage variation coefficient in the cleaning simulation of a multi-room environment cleaning and demonstrates the efficiency.

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