

居家清掃機器人全域清掃路徑的規劃研究

林燁敏 余志成*

國立高雄第一科技大機械與自動化工程系

摘要

本文研究居家清掃機器人的清掃策略，探討之字型路徑在不同障礙物分布的情況下，機器人完成清掃的效率。一般移動吸塵式的清掃機器人運動模態主要分為螺旋式(Spiral)、之字型(Zigzagging)的路徑、循邊的路徑(Wall Following)等，為提升有效清掃面積與效率，本文以VB.NET軟體撰寫模擬機器人的清掃狀態，分析機器人清掃區間與障礙物分佈類型的關係，利用路徑清掃模態的轉換，尋找單一空間的各種障礙分佈下的最佳清掃策略。並應用於典型居家房間陳列的案例，驗證清掃路徑策略的功能及效益，其成果可直接運用在清掃機器人的控制上，提昇清掃效率。

關鍵字：清掃機器人、路徑規劃

1. 前言

一般室內自走式的機器人(Autonomous Mobile Robot)機器人為能自由行走於開放空間及完成自身的任務，必須具備路徑的歸劃及自動導航的能力，也就是說能建構出環境地圖、避開障礙物而行走。為達成此功能所提出的研究方法往往架構於感測器或視覺系統，在國外，長久以來都有許多的研究提出如[14]-[20]。而國內也有不少投入機器人研究的學者在這方面發表許多研究成果如[1]-[6]。近年來家用清掃機器人大量被商品化，其基本要求在於避障與要求在最短時間內，完成應用空間的清掃。但受限於體積與成本，要完成全面性的地板清潔工作，此時的路徑規劃及清掃策略，導航與避障技術上便成為主要的挑戰。

早在清掃機器人尚未商品化之前，即有一些對未知環境地板清掃方法的討論與應用的研究。1997年，Neumann de Carvalho等[10]即探討在已知的2D環境地圖上、設置未知障礙物的全面性清掃方法，由超音波偵測障礙物，以TM (Towards Marker)、UT (U turn)、SS (Side Shift)、UTI (U turn interlaced)和BT (Backtracker)五種清掃路徑模式，做為完成全面積清掃的方法。而在探討清掃機器人的移動架構方面，1998年，Lang和Chee[11]以整合定位單元、感測融合單元、地圖建立單元、路徑規劃單元、避障及導航單元等5單元模式，作為清掃機器人的系統架構。不同於以往的控制方式，行走速度及轉彎率係由fuzzy規則推論後執行。

在環境地圖的建構上，最為普遍的方式為將自走車以沿牆走的模式探索四周環境，藉由量測資料及自走車位置座標之更新，在PC主控端即時建立未知的環境地圖。常用的做法為自走車上配置編碼器做為馬達定位之用，並以超音波感測器做為環境地圖建構的感測系統[3]。但隨著超音波感測器相互間的干擾、凹凸環境外型的辨識、轉輪打滑及控制的問題等因素，所建構出的圖形與實際外型的尺寸，必須有一些校正的方法來彌補精度上的誤差。

但商品化的家用機器人，往往以實用性及經濟性為考量原則。2002年Oh和Watanabe[12]提出一簡單、有效率導航的小型家用清潔機器，只使用近接感測器來執行導航，以三種行走法則：(1)隨性型(Random advance)；(2)之字型(Zigzagging advance)：如牛耕地行走的方式；(3)螺旋式的矩形(Rectangular spiral advance)，運用於一般未知的家居環境，並分別對此三種路徑做清除垃圾的成效分析，由結果得知，行走時，轉彎角度的正確性及能自動修正方向，使能與牆壁保持一定距離平行前進，將可得到較好的清潔效果。而後應用於商品化的清掃機器人如「Roomba」[13]及「Roboking」[14]等。以「Roomba」為例，它的行走規則有(1)螺旋放大(2)沿邊跟隨(3)交叉穿越。首先採用(1)螺旋放大模式，以漸漸擴大的螺旋運行方式來涵蓋空間，在螺旋放大的過程中，當其障礙物感應器碰觸到牆壁或傢俱等大型障礙物時，就會更改為(2)沿邊跟隨模式，沿著牆壁或傢俱前進。沿著牆壁或傢俱清掃過一部份空間之後，Roomba會再更改為(3)交叉穿越模式在剛才的空間範圍來回穿越清掃，接著轉個九十度方向，走到另一個區域再依以上的路線清掃下一個區域，如此交叉重複運轉的路線，直到清掃時間結束為止。

2003年陸[7]針對Roomba打掃路徑多有重覆的現象，對無障礙清掃區域，由系統透過相對位置演算法規劃清掃區域中的模擬路徑，自動導引智慧型家用吸塵器，用來改善清掃路徑重疊的缺點。2005年林[8]則制定了機器人行走的全域覆蓋路徑規劃(Complete Coverage Path Planning, CCP)演算法則，從取得環境地圖開始，就可以從所指定的起點開始清潔，首先偵測最短的邊界方向，然後到牆邊以四種不同清潔模式，利用機器人本身感測器，去辨識周遭的環境和規避障礙物，避免重覆走過相同的路徑，以縮短清掃時間。

* 聯絡作者：jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

對於清潔機器人來說，如何能在未知環境內完成全域性的清掃為其首要任務，就以家用清潔機器人能商品化及普遍為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，較能合乎經濟效益。由許多相關研究的文獻中我們得知，之字型(Zigzagging)的清掃路徑，是完成全域性清掃中為最大家所採用的方式，因此，本章將以模擬方式分析之字型清掃路徑，並以循邊路徑做為清掃機器人搜尋、導航的前進模式，結合螺旋路徑應用於居家環境的清掃，以了解其清掃的成效。

2. 單一空間清掃的障礙分布與路徑的相關分析

之字型的清掃路徑以垂直上下(Y方向)或左右來回(X方向)清掃前進，遇障礙物或牆壁則清掃機器人隨即轉彎180度後，繼續前進。機器人的感測器若為紅外線光電式感測器，物件的外型並不會影響障礙物感測的判斷，當障礙物的邊緣為斜邊或圓弧形狀時，其清掃的路徑與矩形障礙物的路徑並不會有差異，但若以超音波感測器為障礙物量測時，物件如為斜邊或圓形物件如桌子、椅子腳等時，容易產生感測器相互間的干擾，而影響障礙物的判斷，也將會影響其行走路徑。

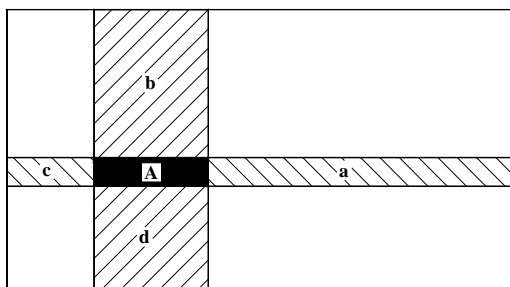


圖1 之字型清掃矩形障礙物所產生的遮蔽區

對於如圖1的矩形障礙物來說，若以之字型垂直方向的反覆清掃，可能會有b、d清掃不到的遮蔽區，本文稱為「垂直遮蔽區」；水平清掃方向則會有a、c清掃不到的遮蔽區，稱為「水平遮蔽區」。隨著障礙物的增加與不同的分布位置，這些障礙物的遮蔽區也會增加並產生交互重疊的現象，以下我們將討論如何運用不同清掃模態的組合，清除這些遮蔽區，而達到全域性的清掃目的。

2.1. 單一遮蔽區的清掃路徑

在單一障礙物的環境中，因障礙物的阻斷，以垂直的路徑清掃時會留存有一垂直遮蔽區；水平路徑清掃會留存有一水平的遮蔽區。如圖2所示，垂直路徑清掃後，所留下的垂直遮蔽區，可以水平的路徑清掃，將遮蔽區清除；同理，在水平掃瞄路徑清掃後，所留下的水平遮蔽區，也可藉由垂直的路徑清掃，將遮蔽區清除。因此，對於單一障礙物所產生的遮蔽

區，不管是由垂直開始或由水平開始，只要再配合一正交路徑，即可完成環境清掃工作。

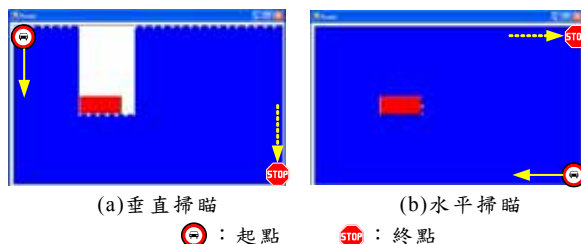


圖2 單一遮蔽區經由兩次正交清掃的結果

2.2. 同向交集的遮蔽區清掃路徑

當兩寬度相同障礙物A、B平行並列時，如圖3所示，A的水平遮蔽區與B水平遮蔽區產生交互重疊現象如圖3所示，執行之字型路徑清掃時，單以水平方向路徑清掃，將無法清除此交集區，由前推論得知，水平方向的遮蔽區，可藉由垂直方式的路徑清掃；垂直方向的遮蔽區，可由水平方式的路徑清掃。因此，先以水平方向後再加垂直方向的路徑清掃，或由垂直方向的清掃後，再加水平方向清掃，同樣都可清除此同向交集之遮蔽區。

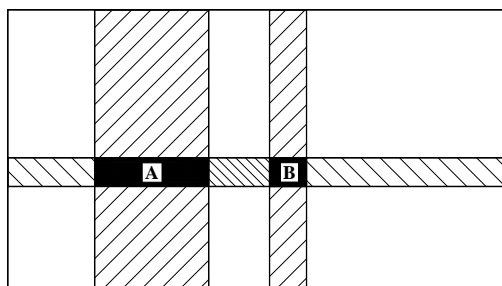


圖3 兩寬度相同平行並列障礙所產生的遮蔽區

由此得知，即使是多個障礙物所造成的同向交集的遮蔽區，仍只要有一正交的路徑即能清除該遮蔽區。因此，對於同垂直方向或同水平方向交集的遮蔽區，它的清掃路徑，仍只需運用水平與垂直的結合路徑，就能達成全域性清掃目的。

2.3. 不同向交集遮蔽區的清掃路徑

若兩障礙物A、B不是平行位置時，A垂直方向之遮蔽區會與B水平方向之遮蔽區交叉重疊在一起；A水平方向之遮蔽區會與B垂直方向之遮蔽區交叉重疊在一起，因此，會有兩個正交遮蔽區的交集產生，如圖4交叉的區塊a、b所示。由前述的推論，只要是同向的重疊交集的遮蔽區，所需的清潔方式只要一次水平搭配一次垂直就可清掃完所有區域，對於垂直與或水平與垂直重疊交集的遮蔽區，每一重疊區均需要一個垂直加水平的路徑清除，因此，要完成全域性的清掃，則可能要重覆兩次水平與垂直清掃的組合，才能清除水平與垂直交集的遮蔽區。

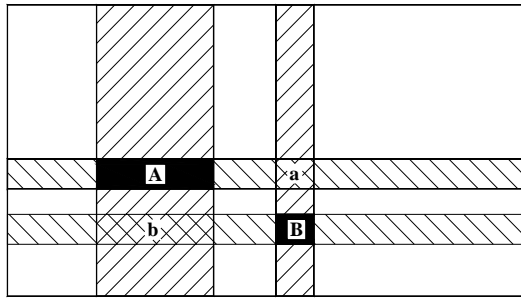


圖4 不同向重疊交集的遮蔽區

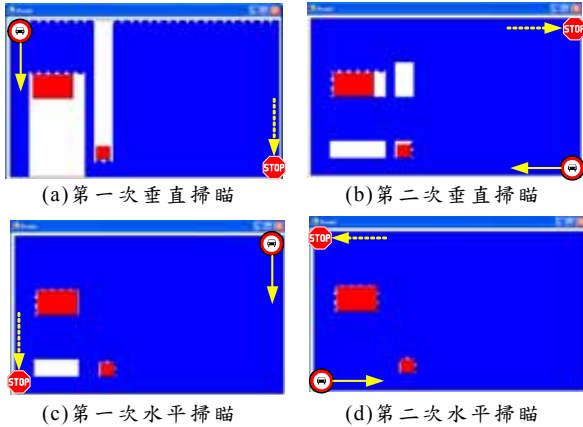


圖5 「垂直→水平→垂直→水平」的清掃路徑

如圖5兩相異位置障礙物的清掃所示，經過第一次的垂直→水平路徑後，出現兩個重疊交集的遮蔽區a、b，經第二次的垂直路徑，清除a遮蔽區，再經第二次的水平路徑清除b遮蔽區，即是由「垂直→水平→垂直→水平」路徑完成兩個水平與垂直重疊交集遮蔽區的清掃。

由上的討論，完成兩障礙物環境全域性清掃的基本路徑為「垂直→水平→垂直→水平」，但此路徑會有一缺失，因為經過第一次的「垂直→水平」後，如其停留的位置是原來出發的位置，則後續之「垂直→水平」的路徑將可能重覆第一次的路徑。因此，若再執行下一次的「垂直→水平」的路徑等於是再重覆執行原路徑，仍會留下原有的未清掃區。同理，即使採用「垂直→水平→水平→垂直」的路徑，或「水平→垂直→垂直→水平」的路徑，都有可能產生類似路徑重覆的問題。

相較於以上幾種方法，以垂直(去)、垂直(回)；水平(去)、水平(回)的路徑組合便有其優點了，因理論上垂直去的起點與垂直回來的終點，不會是同一位置；在去程到達終點後，是原地轉180°依原路徑反向回來，與原來的路徑相同，但轉彎將會在原轉彎的另一端，如此可讓路徑在碰到原障礙物時，會走前次清掃的另一側，如此便能避免再次重覆原路徑，同時回程的終點會在與起點同側的另一端如圖6(b)所示。

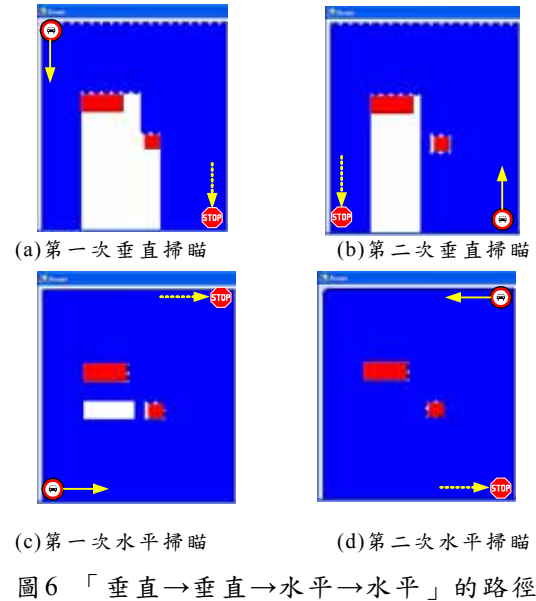


圖6 「垂直→垂直→水平→水平」的路徑

2.4. 多方向遮蔽區交集的清掃路徑

當有多個障礙物的時候，遮蔽區的交集處也會增多，如圖7具有三個障礙物的環境，其遮蔽區呈現出多個水平與垂直交叉重疊現象。因此藉由2垂直與2水平的路徑，其模擬清掃顯示雖有多重的交叉重疊區，還是能完成全域性的清掃。

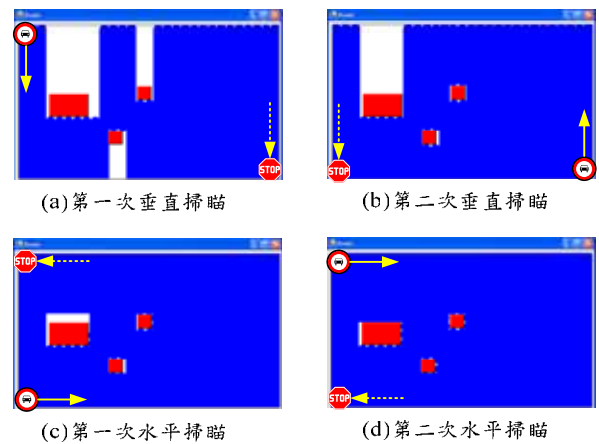


圖7 多方向交集遮蔽區的清掃路徑

由上我們延伸至多個障礙物所構成的環境空間，形成多個多方向、同向及不同向交叉重疊的遮蔽區，如圖8圖中黑色區塊所示，同樣由2垂直與2水平的路徑清掃，所得到模擬清掃結果如圖9所示，雖有多重的交叉重疊區，還是能由2垂直與2水平構成的路徑完成全域性的清掃。

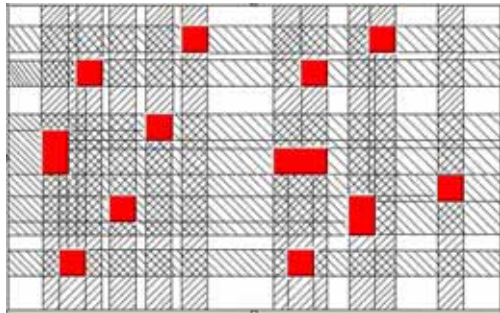


圖8 多方向、同向、不同向交集的遮蔽區

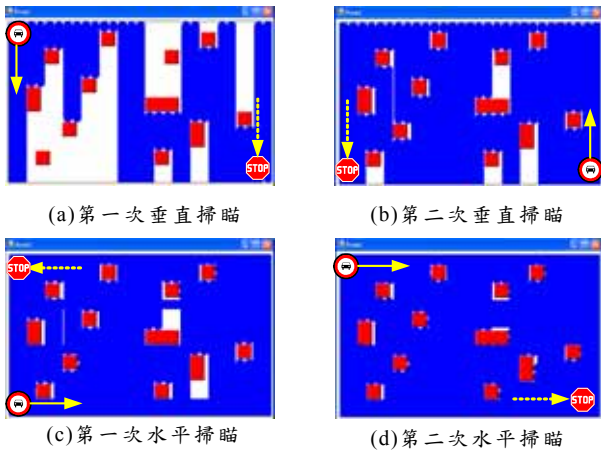


圖9 多方向、同向、不同向交集遮蔽區的清掃路徑

2.5. 不同向靠邊交集的遮蔽區清掃路徑

目前所討論的障礙物環境,均能讓路徑暢行無阻的由起始端走至另一對邊底端,因而能完成全域性覆蓋的清掃任務。當障礙物的位置是位於環境周遭的邊緣處時,如圖10中的障礙物A、B所示,此時A垂直方向之遮蔽區與B水平方向之遮蔽區會交叉重疊靠在邊緣區C; A水平方向之遮蔽區與B垂直方向之遮蔽區也會交叉重疊靠在邊緣區D。當清掃機器人行走至障礙物角落時,由於障礙物的位置阻斷了路徑的連續性,將誤以為已到行程的終點而往回走,如圖11之(a)、(b)所示,因而無法橫越障礙物繼續清掃,雖然以上述的方式再加以水平的路徑清掃,但將無法完成遮蔽區的清除,如圖11之(c)、(d)所示。

為解決此類障礙物的環境清掃,我們在控制程序上增設一判別機制,當之字型路徑180度轉彎後,側邊感測器一直觸發至前端感測器觸發,而作下一個轉彎動作時,此側邊障礙物被視為牆壁邊界,則依正常之路徑執行,若側邊感測器在被短暫的觸發後,前端感測器也被觸發,側邊感測器只被短暫的觸發,此側邊障礙物被視為邊緣區的障礙物,機器人將在原地旋轉180度後,直行通過障礙物,再轉彎回原路徑進行清掃,如此便能橫越障礙物,完成連續的路徑清掃,如圖12(b)所示。

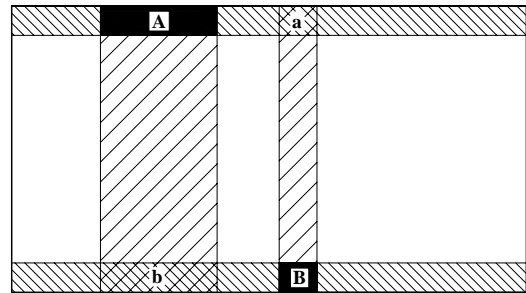


圖10 不同向靠邊交集的遮蔽區

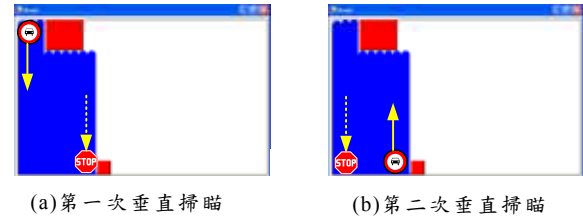


圖11 連續同向路徑於不同向靠邊交集遮蔽區的清掃

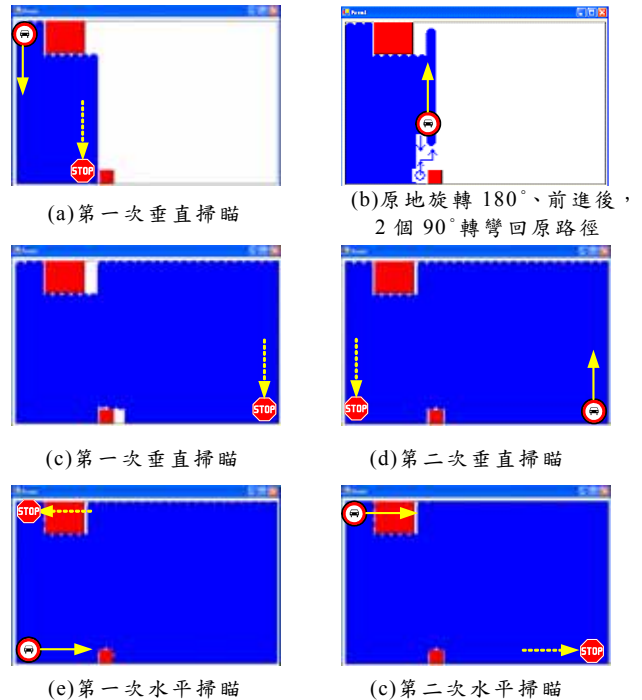


圖12 不同向靠邊交集遮蔽區的清掃路徑

2.6. 同方向交集遮蔽區的特例

當由相同邊長障礙物所構成之垂直同方向的遮蔽區與水平同方向的遮蔽區交集重疊在一起時,如圖13之中央交集區塊所示,此重疊區即使以多次之之字型垂直與水平複合的路徑方式清掃,都將無法清除此區域。必需另由其他的路徑如螺旋或隨機路徑來克服此特殊區域,此為同方向遮蔽區交集的清掃特例。

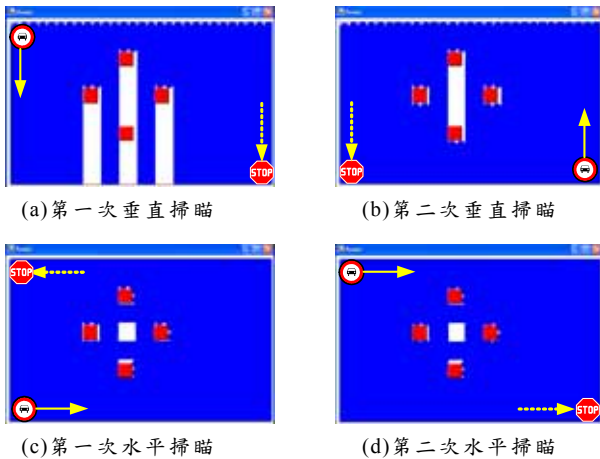


圖 13 兩同方向垂直相交重疊之遮蔽區的清掃路徑

3. 單一空間的居家環境清掃應用

本文所採用的清掃行走模態有：(1)螺旋式的矩形(Rectangular spiral advance):以矩形行走，類似螺旋狀的由內往外逐漸擴張、延伸，如圖 14 (a)，(2)巡邊式(Wall following):沿著障礙物邊緣行走，如圖 14 (b)，(3)之字型(Zigzagging advance):如牛耕地行走的方式如圖 14 (c)，(4)隨機型路徑，如圖 14 (d)。對於一般家庭環境，則必須要藉由多種清掃模態的轉換，來完成全域性的清掃。

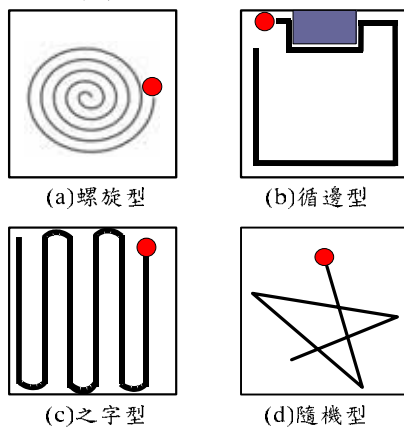


圖 14 基本清掃模態

由之前的討論得知，以 2 垂直、2 水平及障礙物判斷機制的之字型清掃路徑，可完成大多數全域性的環境清掃，然而應用在實際單一空間的居家環境，如客廳的清掃時，由於機器人打掃位置並不一定放置於一定位置，亦或有某一區域較為髒亂，為了能快速的將此一髒亂的區塊清除，可先以螺旋式的路徑將此區域清掃後，再循邊找到角落起點後，繼以之字型的路徑做整體環境的清掃，如此更能確保清掃的效率。而在完成清潔工作後，清掃機器人必須能自主性的返回基座處充電或待命執行下一次的清掃工作，因此應用循邊的路徑模式做返回基座之路徑導航，同時藉以清除牆角的縫隙，也能提升清潔效率。甚至於為更確保清潔的效果，要讓清潔機器人再重掃一次時，可讓機器

人先以隨機型的路徑清掃一段時間後，再繼以如前述規劃的路徑對整體環境再做一次全面性的清掃，如此更能再次的確保清掃的效率。因此，本文規劃以螺旋式的路徑、之字型的路徑及循邊型的路徑為居家環境清掃的應用，如圖 15 所示。其清掃過程及成效說明如下：

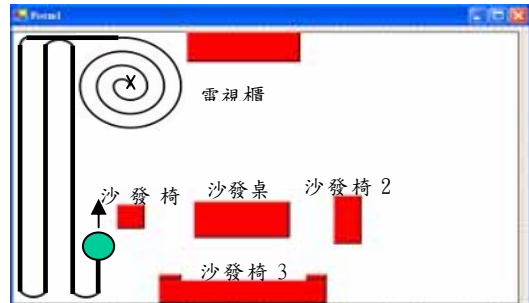


圖 15 單一空間的居家環境

常見的一般居家空間環境擺設有電視櫃、1+2+3 組合式的沙發椅及沙發桌，如圖 15 所示。其清掃模擬過程如圖 16 所示；圖(1)中機器人以螺旋方式由內而外擴展至感測到電視櫃後，直行前進至牆壁邊界後，循邊行走至角落處後旋轉 180°，開始進入之字型清掃模式。這裡所定義的角落，係以機器人前端感測器與兩側邊感測器中之其中一側同時被觸發時，即為開始執行之字型路徑之處，否則則依循邊路徑繼續找尋。經由兩次垂直與兩次水平的之字型路徑完成清掃工作後，清掃機器人再由循邊路徑返回基座處。

本模擬狀態並未考慮機器人實體清掃機構的限制，如牆角、障礙物的角落或傢俱的邊緣等，均被列為可清除的範圍，其完成清掃面積應為 100%，但因模擬圖形為一圓弧型，因而在接觸障礙物迴轉後會留存有圓弧間的空隙，即未清除到的區域，因此，完成單一空間居家環境的清掃後，經由面積計算所得全域性覆蓋的清掃效率約為 98%，如圖 16(g) 所示，所遺留下的少許未清除的區域，乃受限於機器人寬度所造成的清掃餘隙空間。

4. 結論

就以家用清潔機器人能商品化及普遍為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，較能合乎經濟效益。本研究以簡單的感測模式，模擬分析之字型清掃路徑，並以循邊路徑做為清掃機器人搜尋、導航的前進模式，結合螺旋路徑應用於居家環境的清掃，經由清掃面積的計算得知所規劃的清掃策略及路徑具有高效益的清掃成效。然因本研究的模擬狀況並未考量機器人所使用感測器的效益及機器人於直線行走與轉彎角度的誤差，如何控制機器人準確行走出之字型清掃路徑，將會是一項挑戰。因此，未來在實體機器人的清掃應用上，必須考量以上的影響因素，才能真正獲得理想的清掃效率。

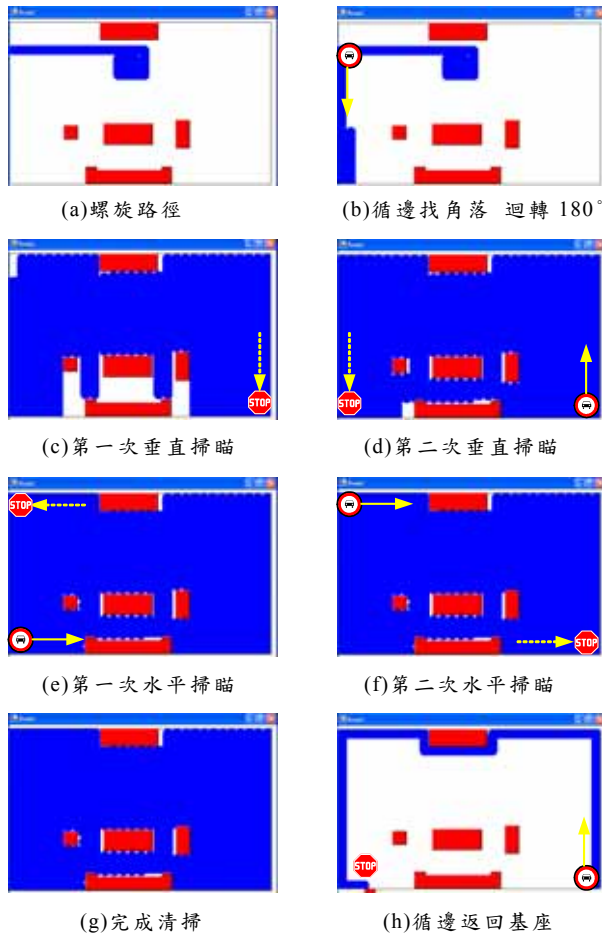


圖 16 單一空間居家環境的清掃路徑

5. 參考文獻

- [1] 林懋瑜, 2000, 無人式自走導航與避障系統之研究, 國立成功大學, 碩士論文
- [2] 陳巧茵, 2001, 小型自走車以超音波避障之研究, 國立成功大學, 碩士論文
- [3] 顧高至, 2002, 智慧型多功能自走車之研發, 國立成功大學, 碩士論文
- [4] 陳柏昌、顧高至、周榮華, 2003, “應用單一超音波建立未知環境地圖”, 中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會, 台北, 台灣
- [5] 楊雅兆, 2004, 使用超音波感測之自走車避障實務設計, 私立中原大學, 碩士論文
- [6] 林子璇, 2005, 以超音波感測器建立自走車環境地圖研究, 國立成功大學, 碩士論文
- [7] 陸偉權, 2003, 智慧型家用吸塵器影像導引控制系統之研究, 私立大同大學, 碩士論文
- [8] 林宗德, 2005, 居家清潔機器人之全域覆蓋路徑規劃與實現, 國立成功大學, 碩士論文
- [9] 陳朝陽, 2005, 智慧型居家清潔機器人之研發, 國立成功大學, 碩士論文
- [10] Neumann de Carvalho, R., Vidal, H.A., Vieira, P. and Ribeiro, M.I., 1997, “Complete Coverage Path Planning and Guidance for Cleaning Robots”, ISIE'97 - Guimarães, Portugal, pp 677-682
- [11] Lang, Sherman.Y.T. and Chee, B.Y., 1998, “Coordination of Behaviours for Mobile Robot Floor Cleaning”, Proceedings of

- the IEEEERSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Victoria, Canada, pp 1236-1241
- [12] Oh, Y.J. and Watanabe, Y., 2002, “Development of Small Robot for Home Floor Cleaning”, Aug. 5-7, SICE, pp 3222-3223
- [13] <http://www.cyut.edu.tw/~s9120090/tyms/cont5.htm>
- [14] Kim, Sewan, 2004, “Autonomous Cleaning Robot: Roboking System Integration and Overview”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, pp 4437-4441
- [15] Choi, J.S. and Park, S.K., 2002, “Sensor-Based Motion Planning for Mobile Robots”, FIRA Robot World Congress
- [16] Wong, S.C. and MacDonald, BA., 2003, “A topological Coverage Algorithm for Mobile Robots Ozguner”, Intelligent Robots and Systems, IROS . Proceedings. IEEE/RSJ International Conference, vol.2, pp 1685- 1690
- [17] Marzouqi, M., Jarvis, RA., Wong, S.C and MacDonald, BA., 2004, “Covert Robotics: Covert Path Planning in Unknown Environments”, Intelligent Robotics Research Centre Monash University Victoria, 3800, Australia
- [18] Yamashita, A., Fujita, K., Kaneko, T. and Asama, H.F., 2004, “Path and Viewpoint Planning of Mobile Robots with Multiple Observation Strategies”, IROS .Proceedings. IEEE/RSJ International Conference, vol.4, pp 3195- 3200
- [19] Lingemanna, K., Nuchter, A., Hertzberg, J. and Surmann, H., 2005, “High-speed laser localization for mobile robots”, Robotics and Autonomous System, pp 275-296
- [20] Sgorbissa, A. and Zaccaria R., 2003, “Roaming Stripes: integrating path planning and reactive navigation in a partially known environment,” 11th Int. Conference on Advanced Robotics – ICAR 2003, Coimbra, Portugal.

Complete Coverage Cleaning Path Planning for a Domestic Cleaning Robot

Yeh-Min Ling and Jyh-Cheng Yu*

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

Abstract

This paper presents a complete coverage cleaning path and strategy for a domestic cleaning robot. A VB.NET software has been developed to simulate the cleaning efficiency of various combination of zigzagging patterns. The characteristics of blocking regions for a zigzagging path for various distributions of obstacles are studied to contrive the optimum combination of orthogonal scanning directions. A typical domestic setting of a single room is used to verify the efficiency of the cleaning strategy. The proposed strategy consists of a spiral mode, a wall following mode, and several orthogonal zigzag modes. Simulation results demonstrate the feasibility and efficiency of this proposed strategy, and the concerns in applications are discussed.

Keyword: Cleaning Path, Cleaning Strategy, Cleaning Robot, Zigzag Path