

自動樓梯清掃機器人的設計與運動模擬

蔡高勝、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

本文探討能在樓梯環境中行走與清掃之機器人，針對遇到的障礙狀況予以偵測，達到防掉落、碰撞迴避、循邊、尋找樓梯及上下樓等功能。所開發的樓梯清掃機器人以特殊的線性移動機構完成上下攀爬樓梯的動作，再配合紅外線感測器、極限開關對樓梯環境進行偵測與判斷，進行清掃與行進的控制。本文利用動態模擬軟體(ADAMS)所提供的模組指令及感測器的設定，建構出虛擬環境與機器人所需的感測裝置，建構樓梯環境障礙的反應模式與清掃策略，以實現機器人的運動動作及清掃路徑規劃；透過ADAMS程序腳本(Script)與巨集(Macro)指令撰寫模擬程式，分析機器人在階梯環境中的障礙偵測與行徑流程，以配合實體的設計規劃製作，進行效率評估。

關鍵字：清掃機器人、自動樓梯清掃機器人、清掃路徑、清掃模擬

1. 研究背景

目前市面上有各式各樣的清掃機器人，其結構為基座中設置兩組動力輪，配合掃刷與吸塵裝置，達成室內自動位移與清掃；但是一般清掃機器人只限於連續之平坦地面進行清掃，若遇到門檻或高架地板，仍需藉由人力抬升分區清掃，基於此有文獻提出創新越障機構設計[1][2][3]，使用兩組主動式輪臂作為平面移動，再以另一組馬達控制輪臂的開合，能越過如和室高架地面或具門檻之環境，以達到智慧清掃目的。

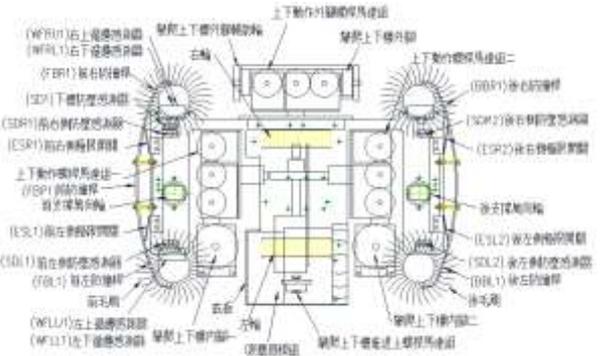
但面對辦公大樓、醫院或商場等具有樓梯環境的空間，則需具備樓梯攀爬與移動清掃的功能。在多篇文獻中[4][5][6][7]，有提出各種的樓梯機器人，如[4]的爬梯機器人，為一種利用車輪機構爬樓梯的機器人，但這些設計並未考量同時具備爬梯與清掃梯面的功能，與梯間障礙偵測與移動的功能。

而本研究提出一具爬梯與清掃功能的機器人，此機器人具上下攀爬樓梯的功能，且兼具水平梯面移動，又可於梯間平面移動進行清掃動作。同時研究如何進行爬樓梯機器人的障礙偵測與控制，包括有牆壁、階梯、防掉落、及如何辨識樓梯等相關的重點。

2. 爬樓梯清掃機器人系統架構

樓梯清掃機器人清掃範圍以樓梯梯面及轉接梯間平台為主，規劃吸塵、集塵收集器的清掃功能，並用旋轉毛刷作為集塵功用，以利清掃樓梯環境及角落

區域，如圖1所示。機器人除能攀爬樓梯外，也須前進、轉彎、後退等運動機制，利用中間兩個轉動輪及前後各一個的支撐輪，組成三點著地方式的機構原理作平面移動。在重心平衡處設置兩主輪(左輪與右輪)，對稱中心點加裝支撐萬向輪以增加行程之穩定性。另置於攀爬外腳的輔助輪，能夠讓本體在攀爬行程前移時，維持外腳的滾動與平衡，兩左右輪同向旋轉即可前進、後退，若反向旋轉即可作出轉向動作，並由下列感測器進行感測。



中華民國一百零四年十二月十一、十二日

±60°、±90°、±120°、±150°十個選項角度中，依不同障礙方向的可行角度如圖2所示，隨機選擇一可行角度轉向而後離開障礙物，並繼續執行清掃任務。

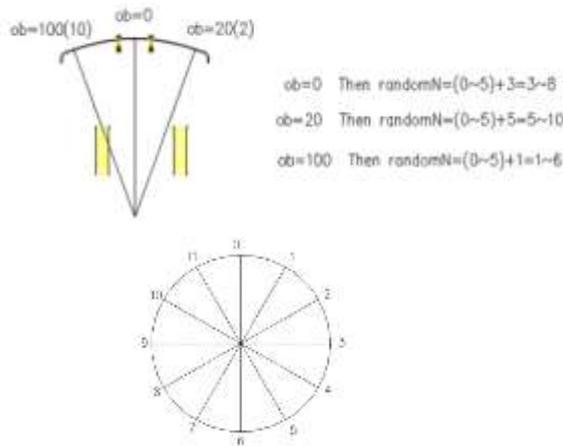


圖 2 障礙碰撞三個方向及對應的可行轉向角度

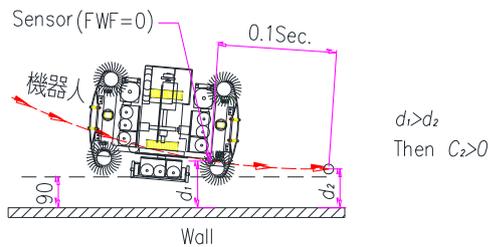


圖 3 循牆邊機器人內傾狀況之微調係數示意圖

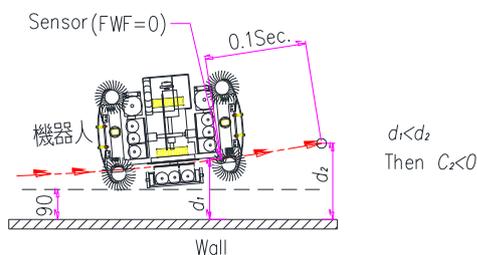


圖 4 循牆邊機器人外離狀況之微調係數示意圖

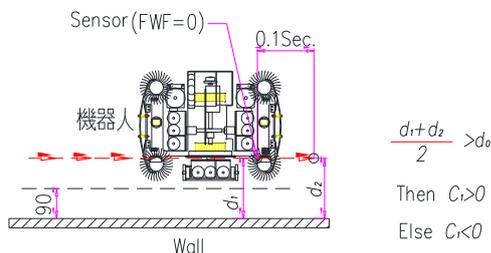


圖 5 平均距離大於預設距離之微調係數示意圖

3.2. 循邊運動模態

循邊路徑(Wall Following)模態，是利用紅外線右下循邊感測器(WFRL1)對牆壁感測，採逆時針方向循邊，依其感測值改變左右輪的轉速，修正移動以達到固定距離平行牆面或障礙物。循邊路徑能清掃牆角、

繞行障礙標的或尋找上下樓梯的位置。右下循邊感測器(WFRL1)對牆壁感測而修正左右輪的轉速如(1)(2)。

$$AngleL=275+C_1*\left(\frac{(d_1+d_2)}{2}-d_0\right)-C_2*(d_1-d_2) \quad (1)$$

$$AngleR=275-C_1*\left(\frac{(d_1+d_2)}{2}-d_0\right)+C_2*(d_1-d_2) \quad (2)$$

本文設定機器人的右下循邊感測器(WFRL1)的感測點與牆邊之預設循邊間距 d_0 為90(mm); 機器人初始循邊行走驅動輪轉速為275°/sec，由感測器回傳每0.1秒WFRL1所量之兩距離 d_1 (mm)與 d_2 (mm)，如圖3圖4所示，可判斷為內傾牆或外離牆而去，進而微調值 C_1 與 C_2 常數， C_1 為時間差的平均距離與設定牆距差異係數， C_2 為時間差的距離差異係數，以調整固定距離平行牆面移動，如圖5所示。本文經由試誤法採用 $C_1=1$ ， $C_2=2.5$ 。循邊過程中若前方保桿碰觸並感測到牆面障礙物，則後退一段距離後左轉90°，再依右下循邊感測器循牆面移動。若前右防墜感測器(SDR1)或前左防墜感測器(SDL1)偵測到懸崖及樓梯邊，則退後由可行方向隨機轉向後離開循邊模態。

3.3. 下樓梯的運動模態

機器人於梯間清掃，採用隨機模式與循邊模式交替方式進行，直到預定清掃時間結束將會尋找樓梯下樓，步驟順序如下：(1) 利用右下循邊感測器(WFRL1)採逆時針方向循牆面移動。(2)當WFRL1超過循邊感測範圍，即會右轉入樓梯梯邊，(3)當觸動機器人前端右防墜感測器(SDR1)，則機器人左轉入梯內，(4)並觸動下樓防墜感測器(SD1)，機器人右轉出梯外直線再前進，如此反覆轉向前進，直到兩感測點SDR1與SD1維持一個在梯面一個梯外直線前進；(5)當機器人前端保桿碰撞牆壁，觸發了極限開關，則機器人原地停止退後20cm至指定位置時，由攀爬上下樓外腳降下一層樓梯，(7)採用攀爬下樓機制下一層樓梯，以上為梯間左側下樓如圖6所示，整體流程如圖7所示。

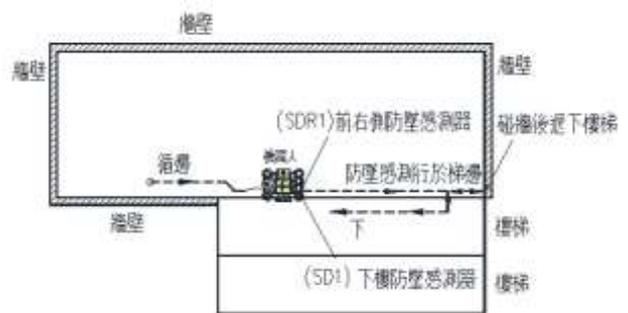


圖 6 循下樓模態(左側下樓)示意圖

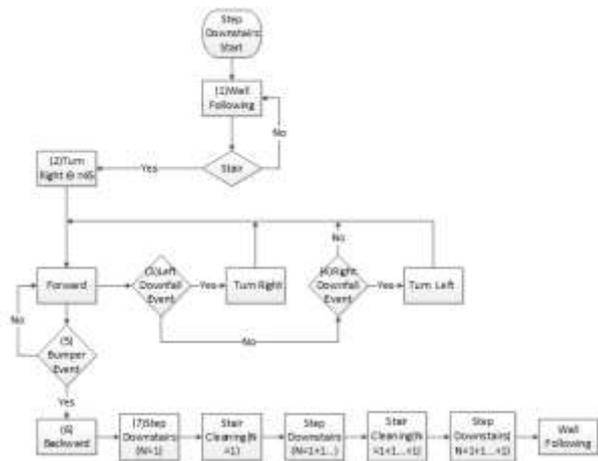


圖 7 下樓(左側)模態流程圖

(1) 梯面(內側)清掃

當機器人攀爬下一層樓梯後，也往上收回了外腳，則改使用左輪與右輪作平面移動，其動作為往後行進，利用機器人本身的紅外線左下循邊感測器(WFL1)與樓梯垂直面做循邊模態，循至梯垂直面終點，當機器人後端後右側防墜感測器(SDR2)、後左側防墜感測器(SDL2)或後防撞桿等偵測到樓梯側邊而觸發，則後退動作停止改為前進於梯邊，做循梯邊清掃。如圖8所示。

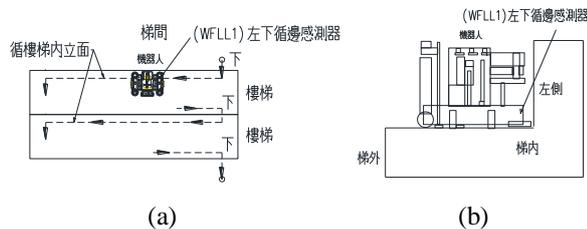


圖 8 下樓梯面清掃循邊示意(a)上視圖(b)側視圖

(2) 梯面(外側)循梯邊

當機器人處於梯面做梯邊清掃時，它以右側前端的前右防墜感測器(SDR1)與下樓防墜感測器(SD1)去循梯邊清掃，亦如上循下樓梯模態，觸動防墜落感測器，機器人轉出、轉入梯邊緣，如此反覆至直線前進，直到機器人前端防撞桿碰撞牆壁，原地停止再退後20cm至設定之位置時下樓梯，由右側攀爬上下樓外腳降下一層樓梯，採用攀爬下樓機制下一層樓梯；此上為一階的清掃模態。如圖9所示。

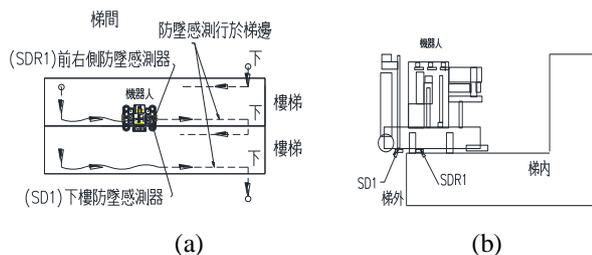


圖 9 下樓梯循梯邊示意圖 (a)上視圖 (b)側視圖

3.4. 上樓梯的運動模態

當機器人完成梯間清掃，將可尋找樓梯上樓；(1)利用紅外線右上循邊感測器(WFRU1)偵測到與設定距離的差異數值，判定到樓梯邊，(2)繼續保持右下循邊感測器(WFRL1)循邊模態直線前進，當機器人前端防撞桿碰觸牆壁而觸動極限開關，則機器人原地停止；(3)退後20cm至設定之位置時，(4)原地旋轉180度，(5)由左下循邊感測器(WFL1)感測左邊樓梯垂直梯面，繼續直線前進當機器人，(6)再次觸動左上循邊感測器(WFLU1)偵測到樓梯邊終止後，則機器人停止並退後20cm之位置，(7)採用攀爬上樓機制上樓梯，如圖10所示，

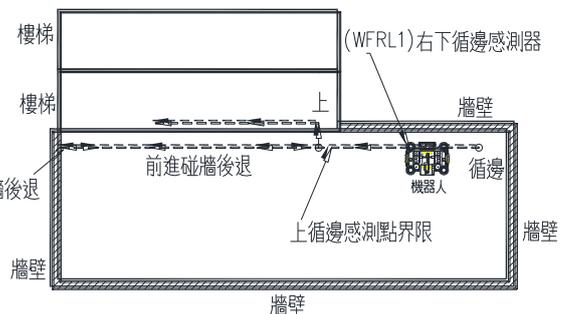


圖 10 循上樓模態(左側上樓)示意圖

4. 環境建置及清掃動態模擬

4.1. 動態模擬

本研究利用動態模擬分析軟體(ADAMS)進行模擬，其模型建立流程如圖11所示，第一階段建立模型3D實體(parts)，並設定其模型真實質量，第二階段設定模型的機構限制接點(joints)，限定其物件的運動方式及自由度，第三階段定義感測器觸發的狀態條件，第四階段給予模型運動的動力(motion)，最後即可進行動態模擬。

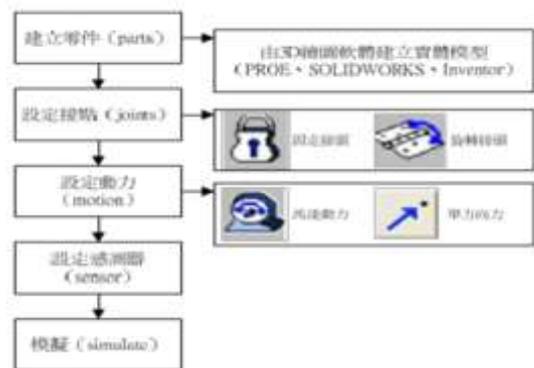


圖 11 ADAMS模擬建立流程

4.2. 參數設定與模擬環境建立

模擬的清掃機器人，須先設定感測器參數與建構虛擬的環境，如圖12所示。樓梯清掃機器人在任何環境行進時，需靠感測器做環境障礙的辨識，由ADAMS提供的感測器模組控制模擬系統行為，過程中可自動依據感測器遇到的障礙物做特定的運動。其設定如圖13、圖14所示。

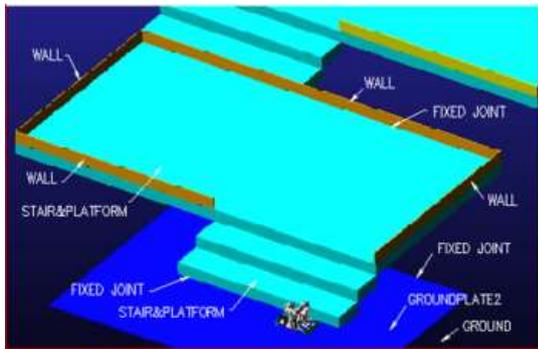


圖 12 障礙物設定

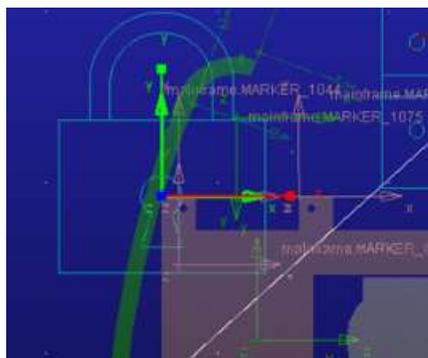


圖 13 機器人上碰撞Marker設定

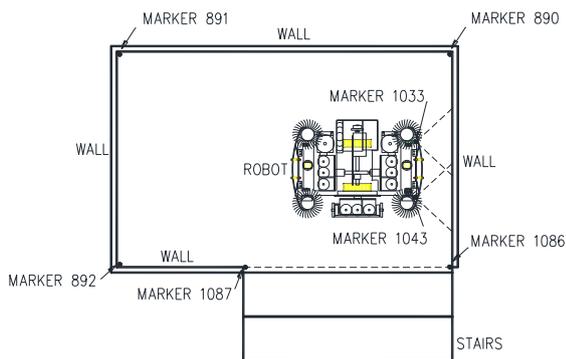


圖 14 梯間碰撞感應Marker設定

4.3. 運動動作模擬

利用Fortran程式設定每次碰牆後退，轉向隨機反應角度以30度基準，共12方位為隨機行走的狀態，八次隨機模擬動作完成的運動模擬，如圖15所示。

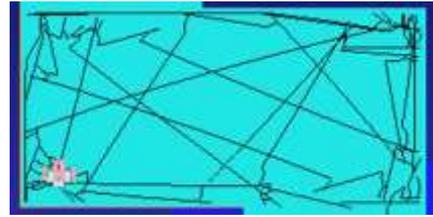


圖 15 隨機碰撞移動模擬狀態

當機器人由隨機路徑模態轉換成平行循邊時，機器人在環境中任一位置，行進時碰到任何一面牆壁，會先觸發碰撞感測器，若碰撞為正前端之(FBP1)前防撞桿，此時機器人將後退再向左旋轉約九十度前進，其餘的角度碰撞將由前右側下循邊感測器(WFRL1)開始執行設定的距離感測條件，修正兩輪速度，以維持與牆之平行前進，示意圖及模擬圖如圖16、圖17所示。

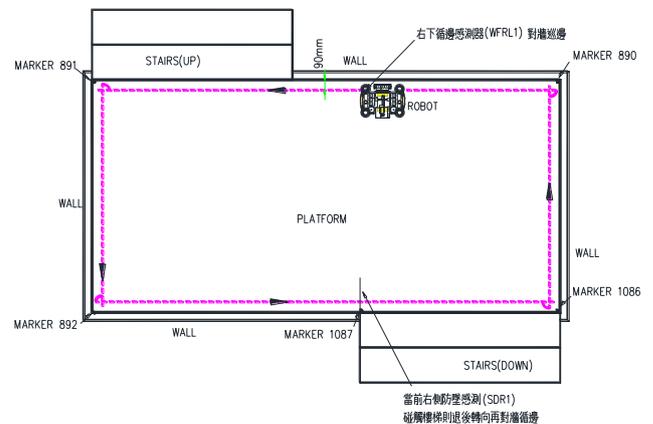


圖 16 平行循邊路徑示意圖



圖 17 平行循邊路徑模擬

循樓梯邊路徑的示意圖及模擬，如圖18、圖19所示，機器人下樓前先以循邊尋找梯邊，當前進至梯邊進而離開了梯邊外觸發了防墜感測器；設定的循梯邊條件是前右防墜感測器(SDR1)，須維持在梯邊上，而下樓防墜感測器(SD1)，須維持在梯邊下，當兩感測器都進入了梯邊外，隨即觸動前右防墜感測器(SDR1)，故須轉回梯邊上；再繼續直線前進，兩感測器都進入了梯邊上，隨即觸動下樓防墜感測器(SD1)，故須轉回梯邊外，繼續直線前進，如此反覆梯邊上及梯邊外轉向，直到兩感測點修正維持約等距於梯邊而直線前進，當前端碰撞牆壁而觸動極限開關，則機器

人原地停止並退後20cm至設定位置，啟動攀爬下樓梯模組執行下樓。

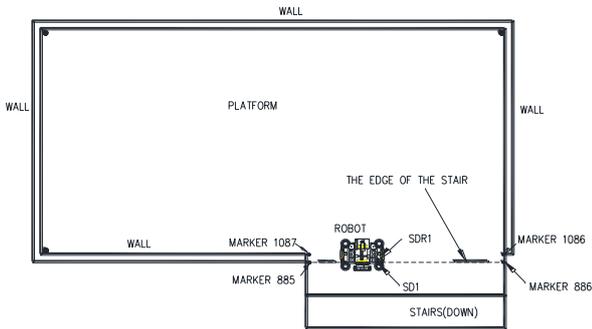


圖 18 下樓梯循樓梯邊示意圖

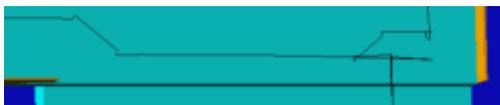


圖 19 尋找下樓梯循樓梯邊模擬

循樓梯牆邊路徑的模擬，如圖20所示，當機器人攀爬下樓梯後，即後退由前左側下循邊感測器 (WFL1) 執行循梯牆邊作清掃梯面，至觸發防墜感測點停止，再前進循梯邊(如前述循梯邊方式)至牆邊，碰牆後啟動攀爬下樓梯模組下樓。如此反覆往下清掃階梯。

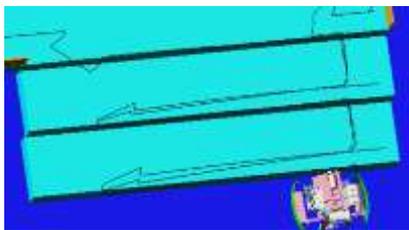


圖 20 循樓梯牆邊(清掃梯面)路徑模擬

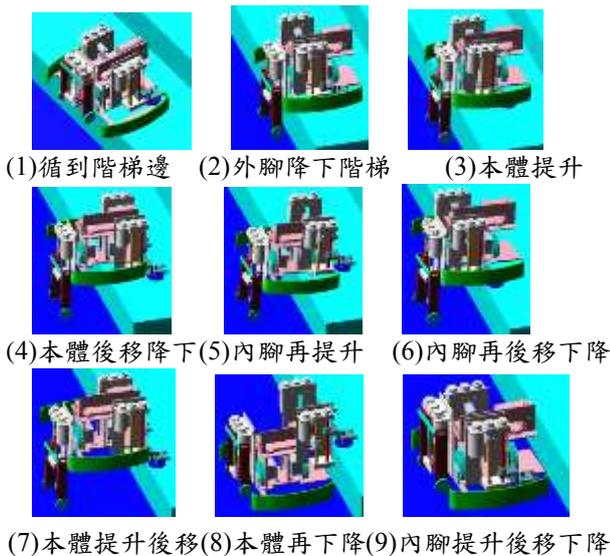


圖 21 樓梯攀爬機構(下樓)分鏡圖

下樓機制為當機器人平移(1)尋找到階梯上層，並前進碰撞階梯邊牆觸發了極限開關，後退至邊沿設定之位置時，(2)“攀爬上下樓外腳”降下階梯，內腳下降支撐梯面，(3)本體提升再後移，(4)本體下收仍支撐於梯面，(5)內腳再上升(6)後移下收支撐於梯面，(7)本體再提升及後移，(8)本體下收，(9)內腳提升後移下收，外腳上升後，上下攀爬動作改為平移機制，也完成一次攀爬下樓動作。如圖21之分鏡圖所示

5. 結論

本文使用螺桿進退去作跨越動作的機構模組，還有以兩車輪及萬向輪三點支撐為平面移動的模式；配置了偵測環境的感測裝置，解決碰撞及越障的問題，如牆壁、階梯、防掉落、如何辨識樓梯等。另有吸塵、集塵器、增加清掃面積的毛刷組合的清潔模組；去規劃梯面與梯間的全域清掃路徑、清掃策略、與越障技術。除了攀爬樓梯外，於清掃行進間如何去循梯面與梯邊；在梯間使用隨機與循邊方式交替清掃，並能夠找到樓梯下樓，找到梯邊上樓等，並採用ADAMS模擬軟體做為動態模擬的工具，建構實境模擬系統之合理性，以供未來實作的參照，達成機器人上下樓梯清掃行程等設計開發的方法。

5.參考文獻

- [1] Yu, J. L., J. W.C., Li, M.Y., and Li, S.H., “Design and Motion Simulation of the Autonomous Exploration Vehicle”, Proceedings of the 7th International Conference on Automation Technology, Sept. 12-14 2003, Chia-Yi, Taiwan.
- [2] 余志成、林燁敏, ”自主性具跨障功能之輪型居家清掃機器人的研發”, 國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系, 碩士論文。2007
- [3] 余志成、張書榮, ”清掃機器人在部分已知環境之區域覆蓋規劃與避障控制”, 國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系, 碩士論文。2008
- [4] King, E. G., Shackelord, H. H., Kahl, Jr., L. M. ”Stair climbing robot,” US Patent 4993912 A, 1991
- [5] Sam D. Herbert, Andrew Drenner, and Nikolaos Papanikolopoulos “Loper: A Quadruped-Hybrid Stair Climbing Robot” 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008
- [6] Masayoshi Wada “Studies on 4WD Mobile Robots Climbing Up a Step” Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 17 - 20, 2006, Kunming, China
- [7] Lauria, Pigué and Siegwart, R “Octopus – An Autonomous Wheeled Climbing Robot” Proceedings of the Fifth International Conference

on Climbing and Walking Robots, 2002.

- [8] 余志成、陳明順，”樓梯清掃機器人的設計與製作”，國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系，實務專題報告。2011
- [9] 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。

Design and Kinematic Simulation of Automatic Stair Cleaning Robot

Kao-Shen Tsai, Jyh-Cheng Yu*
Department of Mechanical and Automation Engineering,
National Kaohsiung First University of Science and
Technology

*Corresponding author: jcyu@nkfust.edu.tw

Abstract

The main purpose of this study is to design a robot with the functions to cope with the barriers in its moving path as well as to step up and down stairs to execute the cleaning of stairs. By implying a special linear translation mechanical design and also applying the infrared sensors and limited switch, via the scanning and sensing the robot can walk away from the barriers to prevent any form of colliding. The limited switch will enable the robot to be multifunctional to find and walk along the edge of stairs without falling down to lower level of stairs. Besides those functions, the design also make this stair cleaning robot more smoothly walk along the cleaning path as well as the motions of up and down stairs in an unfamiliar environment. This is a real and practical Stair Cleaning Robot. Considering the simple environment of stair room, the basic cleaning paths of this study include random, parallel along edge and both stairs alone edge and plane of stairs. A Kinematic Simulation software ADAMS is applied for this study. The ADAMS provides commands of modules and settings for sensors and build a virtual environment with sensors, reaction modes of barriers in stairs, and cleaning strategies to realize the simulations of cleaning paths and its corresponding motions or responses. By the outputs from ADAMS which is edited by FORTRAN language, one can analyze the cleaning effectiveness of stairs environment. Adding the physical design and plan, field trial of operations, one can evaluate the final effective of the Stair Cleaning Robot.

Keywords: Cleaning Robot, Stair Cleaning Robot, Cleaning Path, Cleaning Simulations, ADAMS