

國立交通大學

電控工程研究所

碩士論文

基於距離資訊之行動輔助機器人
動態避障

Dynamic Obstacle Avoidance for Robot
Walking Helper Based on Distance
Information

研究生:高毓廷

指導教授:楊谷洋教授

中華民國一百零一年七月

基於距離資訊之行動輔助機器人動態避障

Dynamic Obstacle Avoidance for Robot Walking Helper Based on Distance Information

研究生：高毓廷

Student: Yi-Ting Gau

指導教授：楊谷洋 博士

Advisor: Dr. Kuu-Young Young



A Thesis

Submitted to Institute of Electrical Control Engineering
College of Electrical

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

of the Degree of

Master

in

Electrical Control Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一百零一年 七月

基於距離資訊之行動輔助機器人 動態避障

研究生：高毓廷

指導教授：楊谷洋教授

國立交通大學電控工程研究所



近年來，人口老化問題日益嚴重，照顧銀髮族的生活起居成為一個重要的課題，而在老人常見的問題中，以行動不便的問題最常發生。隨著機器人科技的進步，各式各樣的行動輔助機器人之發展越趨成熟，本實驗室也開發行動輔助機器人 i-Go，以因應銀髮族生活不便的困擾。為了保障老年人在行走的安全，在本論文中，我們建構一個障礙物偵測系統，分析環境中障礙物與機器人的距離資訊，以準確地辨識出障礙物的大小、位置及移動速度等資訊。接著，我們結合 Velocity Obstacles 和 Artificial Potential Field 兩種演算法，提出動態避障導引演算法來規畫參考路徑，根據障礙物和目標位置資訊，導引使用者閃避環境中的動態障礙物，並安全抵達指定的位置。此基於距離資訊之動態避障導引系統功能經實驗驗證，確實有其一定的功效。未來希望能夠將 i-Go 送入真實的家庭中，幫助正在復健且視力和行走能力較差的銀髮族，提供一個完善且安全的智慧型行動輔助機器人。

Dynamic Obstacle Avoidance for Robot Walking Helper Based on Distance Information

Student: Yi-Ting Gau

Advisor: Dr. Kuu-Young Young

Institute of Electrical Control Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

The problem of aging population becomes more serious nowadays. With their age growing, the elderly are with the degrading health conditions that may not allow them to walk steadily. Along with the progress of the robot technology, robot walking helpers have been developed. It thus motivates us to develop a robot walking helper, named i-Go for assisting the daily lives of the elderly. To protect the elderly during walking, in this thesis, we first develop an obstacle recognition system which can accurately identify the size, location and speed of the obstacles the distance information between the obstacles and robot. We then propose a dynamic obstacle avoidance and guidance algorithm, which combines velocity obstacles and artificial potential field algorithms, to provide a reference path avoids the obstacles during guidance. Experiments are performed to verify this scheme. In the near future, we expect the i-Go can assist the elderly in their daily lives.

致謝

首先感謝我的指導教授楊谷洋老師，在兩年的指導和鼓勵下，使我的碩士論文得以順利完成。同時，也要感謝口試委員：宋開泰老師、胡竹生老師以及黃育綸老師撥冗參與論文口試，給予許多寶貴的建議與指導，使我獲益良多。除此之外，還要特別感謝柯春旭老師，在實驗上給予我非常多的建議與幫助。也感謝實驗室的學長修任、木政，在我困惑的時候伸出援手，幫助我解決研究上的問題，感謝豪宇學長給我程式方面的建議和電腦知識的教學，也感謝一弘學長在電子電路及研究方法上提供很多獨到又專業的見解，真的讓我學到很多，更特別感謝一哲學長常常要接受我的諸多問題，又耐心地幫我解答，也親自參與實驗的進行，還有我的同窗好友們：嘉文、禹均、長翰、昌翰，感謝有你們一起在實驗室的最後兩年中努力。此外也非常感謝學弟偉忠、順盛、耀澤幫忙做實驗，沒有你們幫忙我也無法順利的完成實驗和影片，更特別感謝硬體高手學弟偉忠常常陪我一起花時間研究硬體及 Debug，彼此教學相長。感謝禪學社的夥伴在我疲累時，可以一起遊玩、禪定，舒展身心，才能有動力持續做研究。感謝畢業學長育傑、權哲柏穎的照顧，也常常陪我打球。最後，我要感謝家人的支持，提供我穩定的經濟使我能心無旁騖的致力於研究上；感謝我的女朋友盈婷在我遇到難題還是挫折時，總是在我身邊給我安慰與支持；還有感謝許許多多我的朋友們，願意傾聽我的抱怨，分享我的快樂，在我失落的時候給予我鼓勵，在我需要幫助的時候扶我一把，讓我得以完成學業。有了你們大家一點一滴的幫助，才有這份研究論文的完成，我會在我的生命中謹記你們的幫助。

目錄

| | |
|----------------------------|------|
| 中文摘要..... | I |
| 英文摘要..... | II |
| 致謝..... | III |
| 目錄..... | IV |
| 表目錄..... | VI |
| 圖目錄..... | VIII |
| | |
| 1. 導論..... | 1 |
| 1.1 引言..... | 1 |
| 1.2 研究動機..... | 2 |
| 1.3 相關研究..... | 3 |
| 1.3.1 主動式行動輔助機器人..... | 3 |
| 1.3.2 被動式行動輔助機器人..... | 5 |
| 1.3.3 動態避障導引演算法..... | 7 |
| 1.4 研究目標..... | 10 |
| 1.5 論文架構..... | 11 |
| 2. 行動輔助機器人動態避障導引系統..... | 12 |
| 2.1 二維空間中行動輔助機器人之動態模型..... | 13 |
| 2.2 障礙物偵測系統..... | 15 |
| 2.3 動態避障導引演算法..... | 22 |
| 2.4 動態避障導引演算法之能力推導..... | 27 |
| 3. 系統實現..... | 31 |
| 3.1 硬體架構..... | 33 |

| | |
|------------------------------|----|
| 3.1.1 周邊控制晶片 PIC18F4520..... | 34 |
| 3.1.2 伺服煞車器 | 36 |
| 3.1.3 兩軸利感應器 | 39 |
| 3.1.4 軸編碼器 | 41 |
| 3.1.5 雷射感測器 | 43 |
| 4.模擬與實驗..... | 44 |
| 4.1 模擬..... | 44 |
| 4.1.1 靜態障礙物動態避障導引模擬 | 46 |
| 4.1.2 平行移動障礙物動態避障導引模擬 | 50 |
| 4.1.3 垂直移動障礙物動態避障導引模擬 | 54 |
| 4.2 實驗..... | 68 |
| 4.2.1 靜態障礙物避障導引實驗 | 69 |
| 4.2.2 平行移動障礙物避障導引實驗 | 73 |
| 4.2.3 平行移動障礙物避障導引實驗 | 77 |
| 5.結論與未來展望..... | 84 |
| 5.1 結論..... | 84 |
| 5.2 未來展望..... | 85 |
| 參考文獻..... | 86 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 2.1 障礙物偵測模擬分析—修正前..... | 21 |
| 表 2.2 障礙物偵測模擬結果分析—修正後(迭代 3 次)..... | 22 |
| 表 4.1 i-Go 模擬參數設定 | 44 |
| 表 4.2 靜態障礙物動態避障導引模擬參數設定..... | 46 |
| 表 4.3 平行移動障礙物動態避障導引模擬參數設定..... | 51 |
| 表 4.4 垂直移動障礙物動態避障導引模擬參數設定..... | 55 |
| 表 4.5 系統可閃避垂直移動障礙物速度範圍(從障礙物前方繞行)..... | 57 |
| 表 4.6 實驗受測者資料..... | 68 |
| 表 4.7 i-Go 實驗參數設定 | 68 |
| 表 4.8 靜態障礙物動態避障導引實驗結果分析..... | 72 |
| 表 4.9 平行移動障礙物動態避障導引實驗參數..... | 73 |
| 表 4.10 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果分析..... | 76 |
| 表 4.11 垂直移動障礙物動態避障導引實驗參數..... | 77 |
| 表 4.12 垂直移動障礙物之動態避障導引實驗結果分析(入射角 30°)..... | 82 |
| 表 4.13 垂直移動障礙物之動態避障導引實驗結果分析(入射角 60°)..... | 82 |

圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 1.1 (a)Care-O-bot I 和(b)Care-O-bot II[7] | 3 |
| 圖 1.2 SmartCane [8] | 4 |
| 圖 1.3 SmartWalker[9]..... | 4 |
| 圖 1.4 VA-PAMAID[10] | 5 |
| 圖 1.5 RT-Walker [12]..... | 6 |
| 圖 1.6 動態避障系統流程圖..... | 7 |
| 圖 1.7 Artificial Potential Field 演算法原理示意圖[32]..... | 8 |
| 圖 1.8 Collision Cone 概念圖[24]..... | 10 |
| 圖 2.1 行動輔助機器人系統控制流程圖..... | 13 |
| 圖 2.2 在卡氏座標下，行動輔助機器人之簡化圖..... | 13 |
| 圖 2.3 雷射掃描示意圖..... | 16 |
| 圖 2.4 障礙物分類流程圖..... | 17 |
| 圖 2.5 障礙圓示意圖..... | 18 |
| 圖 2.6 修正半徑示意圖..... | 20 |
| 圖 2.7 障礙物偵測結果圖：(a)修正前和(b)修正後(迭代 3 次)..... | 21 |
| 圖 2.8 動態避障導引系統控制流程圖..... | 23 |
| 圖 2.9 碰撞狀態分析示意圖..... | 23 |
| 圖 2.10 局部最佳解分析示意圖..... | 25 |
| 圖 2.11 增加施力點控制示意圖：(a)左轉命令和(b)右轉命令 | 26 |
| 圖 2.12 碰撞狀態證明示意圖..... | 28 |
| 圖 3.1 行動輔助機器人 i-Go 外觀..... | 32 |
| 圖 3.2 i-Go 系統架構圖 | 32 |

| | |
|---|----|
| 圖 3.3 i-Go 硬體架構圖 | 33 |
| 圖 3.4 PIC18F4520 單晶片微控制器接腳圖[29] | 34 |
| 圖 3.5 PIC18F4520 外觀 | 34 |
| 圖 3.6 PIC18F4520 微控制器系統架構圖[29] | 35 |
| 圖 3.7 RD-2807-01 伺服煞車器規格圖 [30]..... | 37 |
| 圖 3.8 RD-2807-01 輸入電流與輸出力矩關係[30]..... | 37 |
| 圖 3.9 Wonder Box 裝置控制器[30] | 38 |
| 圖 3.10 Wonder Box 輸入電壓輸出電流關係[30] | 38 |
| 圖 3.11 兩軸力感應器..... | 39 |
| 圖 3.12 兩軸力感應器訊號擷取卡..... | 39 |
| 圖 3.13 兩軸力感應器輸出電壓與施力大小關係和輸出電壓與旋轉力矩關係..... | 40 |
| 圖 3.14 修正電路..... | 41 |
| 圖 3.15 訊號轉換實體電路..... | 41 |
| 圖 3.16 (a)軸編碼器實體圖，(b)軸編碼器加裝於伺服煞車器，和(c)伺服煞車器、 軸編碼器、皮帶輪與後輪配置..... | 42 |
| 圖 3.17 雷射感測器實體圖..... | 43 |
| 圖 3.18 雷射掃描示意圖[31]..... | 43 |
| 圖 4.1 模擬流程圖..... | 45 |
| 圖 4.2 靜態障礙物之動態避障導引模擬(障礙物半徑：0.3m)：(a)起始狀態，(b)避 障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 48 |
| 圖 4.3 靜態障礙物之動態避障導引模擬(障礙物半徑：1.2m)：(a)起始狀態，(b)避 障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 49 |

| | |
|---|----|
| 圖 4.4 平行移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.1m/s):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 52 |
| 圖 4.5 平行移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.16m/s):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 53 |
| 圖 4.6 垂直移動障礙物起始位置分布圖..... | 55 |
| 圖 4.7 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:3.16m/s，入射角:0°):(a)起始狀態，(b)障礙物啟動狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 58 |
| 圖 4.8 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:1.16m/s，入射角:15°):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 59 |
| 圖 4.9 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.67m/s，入射角:30°):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 60 |
| 圖 4.10 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.418m/s，入射角:45°):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 61 |
| 圖 4.11 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.278m/s，入射角:60°):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 62 |
| 圖 4.12 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.32m/s，入射角:60°):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 63 |

| | |
|--|----|
| 圖 4.13 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.125m/s，入射角：75°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 64 |
| 圖 4.14 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.17m/s，入射角：75°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 65 |
| 圖 4.15 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.04m/s，入射角：90°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 66 |
| 圖 4.16 垂直移動障礙物之動態避障導引修正模擬(障礙物速度：0.28m/s，入射角：60°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 67 |
| 圖 4.17 靜態障礙物動態避障導引實驗圖：(a)實驗場景和(b)使用者操作狀態 ... | 69 |
| 圖 4.18 靜態障礙物動態避障導引實驗軌跡圖..... | 70 |
| 圖 4.19 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度 | 70 |
| 圖 4.20 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度 | 71 |
| 圖 4.21 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度 | 71 |
| 圖 4.22 平行移動障礙物動態避障導引：(a)實驗場景和(b)動態障礙物 | 73 |
| 圖 4.23 平行移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖..... | 74 |
| 圖 4.24 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 74 |

| | |
|---|----|
| 圖 4.25 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和 (b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 75 |
| 圖 4.26 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和 (b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度..... | 75 |
| 圖 4.27 垂直移動障礙物動態避障導引實驗場景：(a)入射角 30° 和(b)入射角 60° | 77 |
| 圖 4.28 垂直移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖(入射角 30°)..... | 78 |
| 圖 4.29 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 A 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 78 |
| 圖 4.30 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 B 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 79 |
| 圖 4.31 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 C 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 79 |
| 圖 4.32 垂直移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖(入射角 60°)..... | 80 |
| 圖 4.33 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 A 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 80 |
| 圖 4.34 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 B 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 81 |
| 圖 4.35 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 C 之(a)左右 輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度.. | 81 |

第一章

導論

1.1 引言

拜醫療科技進步所賜，人類的平均壽命逐年延長，但因為民眾對於未來婚姻及生育態度的轉變，生育率逐年下降，老年人口比例相對地逐年成長，尤其在先進國家中此現象更為顯著。以台灣為例，據內政部統計我國 99 年出生率下滑至 0.721%，總生育率降為 0.895 人，已成為世界生育率最低之國家[33]；而我國自 82 年起邁入高齡化社會以來，65 歲以上老人所占比例持續攀升，101 年 5 月底已占總人口 10.98%，老化指數（老年人口／幼年人口之百分比）為 73.74%[34]。預估民國 106 年，我國將邁入高齡社會，老年人口比例達 14%。

因應高齡化社會來臨，如何照顧銀髮族將是我們重要的課題和使命。據統計約 16.8% 的高齡人口自理日常起居活動有困難，常發生的狀況是因為骨質疏鬆、肌肉萎縮，造成下肢較無力；加上視力退化、注意力難以集中及平衡能力變差等，導致行走時下肢不穩，甚至容易跌倒受傷。現階段改善的方法普遍是使用輪椅或拐杖等輔助工具幫助行走，而兩者都有各自的問題存在：前者容易造成老年人的過度依賴，加速其下肢肌肉萎縮[3]；後者則可分為兩種，一種是對肌肉的輔助較弱且容易失去平衡的單腳拐杖，另一種則是過於笨重、使用較為不便的四角拐杖，都不是理想的行動輔助工具。

近年來，隨著機器人產業的興起，越來越多學者致力於研究輔助行走不便老

年人的行動輔助機器人。透過機器人上裝設的感測器來擷取環境資訊和使用者的意圖及姿態，分析後產生合宜的輔助策略來輔助老年人行動。行動輔助機器人依其動力來源可分為主動式及被動式兩種，前者以馬達提供主要動力，負重量大，使用者不需費力去推動輔具，但卻可能因控制器設定不當，而導致有操作上的危險；後者的動力來源則完全來自使用者本身，安全性高，機器人因應不同的輔助策略，改變兩輪煞車器的力道，達到轉彎或移動等功能。因服務的族群為銀髮族，安全性為設計之主要考量，我們選擇被動式行動輔助機器人作為研究對象。

1.2 研究動機

為了讓行動輔助機器人實際走入生活，為需要的長輩提供服務，如何處理真實家庭中複雜的動態環境，是我們需要思考的問題。目前各國所開發的行動輔具機器人，雖因設計概念的不同，而有功能上及主被動模式的差異，但都將避障功能納入其核心功能之中，即在輔助老年人行走的同時，也能避免其與環境障礙物發生碰撞而跌倒。

本實驗室過去開發的被動式行動輔助機器人—i-Go，亦具備避障導引功能[36]，可在未知環境中，透過感測器擷取周圍環境資訊，即時規劃路徑，以閃避環境障礙物，並導引使用者抵達目的地。然而，此功能只針對靜止的環境障礙物(如桌、椅及牆壁等)進行閃避。在複雜環境中，家庭成員等不可預期的移動，還是可能讓使用者發生碰撞而跌倒。目前，已有許多學者提出可閃避動態障礙物的演算法，但都只實現於主動式機器人上，若實現在被動式行動輔助機器人上，可能因為硬體的限制及機器人規格的不同，無法達到相同的功效。有鑑於此，我們希望整合現有的動態避障演算法，並以被動式控制的安全概念為基礎，發展出一套可對行進間障礙物進行閃避亦兼具導引功能的動態避障導引系統，進而提升i-Go的避障及導引能力，提供老年人的居間安全上更完善的保障。

1.3 相關研究

因應高齡化社會的來臨，世界各國開發了各種機器人輔助系統來輔助老年人的生活起居。這類的機器人輔助系統，最重要就是要達到使用方便、高效能、以及使用者的安全性與穩定性[4,5]。因此，機器人要能偵測周遭的環境障礙物，並且以安全的控制策略導引使用者進行閃避。目前有許多避障導引系統被應用在主動及被動式行動輔助機器人上，以下針對這些研究進行概略性的介紹。

1.3.1 主動式行動輔助機器人

在1998年，德國 Fraunhofer IPA 工業研究院研發了一台居家輔助機器人，稱為Care-O-bot[7]，如圖1.1(a)所示。在2002年更新為第二代Care-O-botII[7]，如圖1.1(b)所示。身上搭載兩部工業電腦，一部放置在頭部，主要控制身上的機械手臂跟夾爪，而另一部則負責控制機器人的運動及行走姿態，兩部電腦可透過乙太網路溝通。此機器人其中一個主要功能是導引使用者到達指定的目的地，其避障導引系統是以elastic band演算法[6]為基礎，並根據裝置在握把上的力感應器資訊及外在環境的動態資訊進行路徑的即時更正。

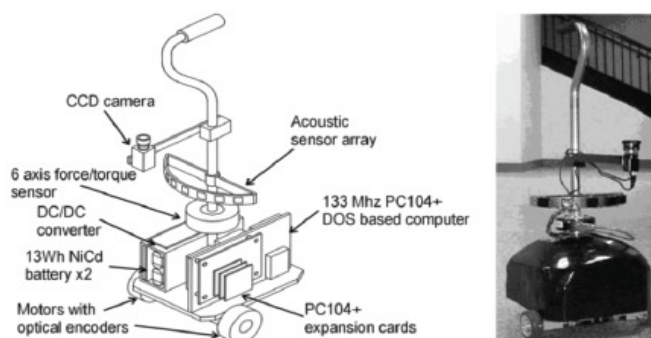


(a) Care-O-bot I

(b) Care-O-bot II

圖 1.1 (a)Care-O-bot I和(b)Care-O-bot II[7]

在2000年，MIT的Dubowsky等學者提出了PAMM(Personal Aid for Mobility and Monitoring)系統[8]，是一種結合行動輔助與遠距照護的居家輔助系統。機器人以拐杖原型來設計，稱為SmartCane，如圖1.2所示。SmartCane利用六軸力感測器和直流馬達來改善拐杖的操縱性及移動速度，以超音波感測器及CCD攝影機來進行避障與定位控制。PAMM搭載一個可以持續監控使用者生命訊號的感測器，且設置了一台電腦，利用無線網路將訊號傳給遠端的醫護人員進行分析，以了解使用者的健康狀態。此外，也將房間內所有設施，如樓梯與障礙物的位置等建成地圖儲存在電腦中。根據環境感測器和已知的地圖，PAMM可導引使用者到達指定的目的地並閃避障礙物。然而，拐杖有其天生的缺點，那就是穩定性不夠，容易讓使用者在崎嶇的路面上失去重心而摔倒。為了解決這個問題，Dubowsky等在2006年將PAMM實現於助行器上，完成了SmartWalker系統[9]，如圖1.3所示。SmartWalker大致上功能皆與SmartCane相仿，提供了更好的移動性與穩定性。



(a) SmartCane內部感應器

(b) SmartCane外觀

圖1.2 SmartCane[8]

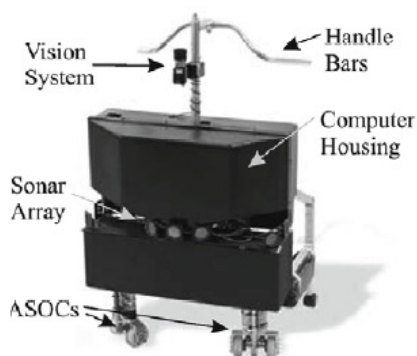


圖1.3 SmartWalker[9]

1.3.2 被動式行動輔助機器人

相較於主動式行動輔助機器人能以馬達提供動力來導引使用者閃避障礙物，被動式行動輔助機器人其動力來源完全由使用者的推力提供，這種以安全性為主的設計，相對而言也限制了機器人的部分能力，僅能夠以煞車器進行減速及轉向的情況下進行導引及避障，面臨一定的限制。因此，能實現於被動式行動輔助機器人上的避障導引演算法相對比較少。

在2003年，愛爾蘭的Lacey提出被動式行動輔助機器人Veterans Affairs Personal Adaptive Mobility Aid (VA-PAMAID)[10]，如圖1.4所示。它的特點是機器人由前兩輪舵輪上的馬達提供轉向力矩，除此之外不提供任何使機器人本身移動的動力，只有當使用者施予機器人力/力矩時，機器人才會移動。VA-PAMAID身上裝置了超音波及雷射感測器，可用來偵測周圍環境資訊及辨認障礙物，一旦發現使用者可能撞到障礙物時，便緩緩地轉動舵輪，逐漸改變機器人行進方向，讓使用者在平順的路徑中閃避障礙物。此機器人雖然是以被動式的概念設計，但仍有使用到主動式的馬達驅動，因此還是有可能因控制器設定不當，而導致使用者有操作上的危險。



(a) VA-PAMAID前視圖 (b) VA-PAMAID側視圖

圖1.4 VA-PAMAID[10]

在2004年，日本東北大學的Kosuge等學者研發出一種新型態的被動式行動輔助機器人RT-Walker[11]，如圖1.5所示。改良了VA-PAMAID使用馬達驅動舵輪提供轉向力矩的設計，RT-Walker僅用伺服煞車器提供煞車力來達到減速及轉向的控制。因為沒有用主動式的馬達驅動，所以只有當使用者施予機器人力/力矩時，機器人才會移動，如此可以避免因馬達控制器設計不當所造成的危險。

RT-Walker可利用雷射感測器來偵測環境資訊，辨識出樓梯及其它環境障礙物，再根據artificial potential field演算法[13]算出虛擬力/力矩，來控制伺服煞車器產生煞車力，達到閃避障礙物與階梯的功能；也可透過傾斜儀偵測機器人與地面的傾斜角度，再利用伺服煞車器預先補償地心引力影響，使得機器人在斜坡的道路上不會下滑，並且利用阻尼改變機器人的運動特性，以增加操控上的穩定性。

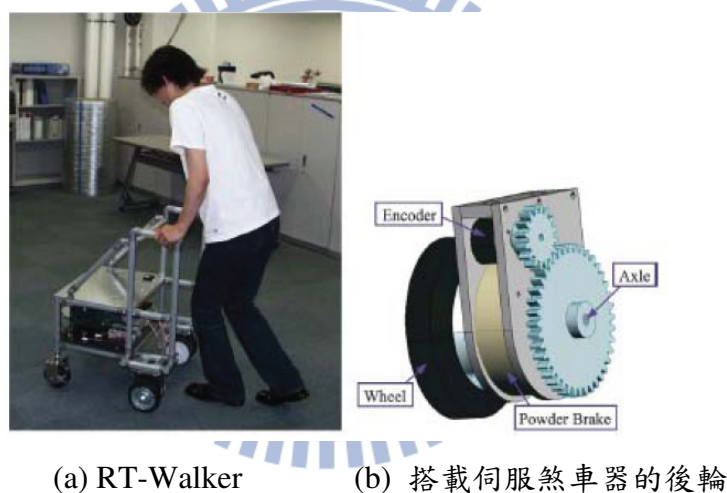


圖 1.5 RT-Walker[12]

基於上述的討論，至今還沒有看到能閃避動態障礙物的被動式行動輔具機器人。VA-PAMAID只能沿著障礙物邊緣進行轉向來閃避，若障礙物本身會移動，則仍有可能發生碰撞；而RT-Walker只針對靜態環境障礙物及階梯進行閃避，兩者皆無法閃避動態障礙物。相較於被動式機器人，動態避障導引技術應用在主動式機器人較為成熟，以下將對於其相關研究做概略性的介紹，進而加以改良，以開發出適合被動式行動輔助機器人的動態避障導引系統。

1.3.3 動態避障導引演算法

動態避障導引系統主要包含感測及致動兩大部分，如圖 1.6 所示。設計者依機器人所面對的環境選用合適的感測器，並開發出對應的訊號處理技術，將感測器所感測到的訊號轉化為有意義的環境資訊，如障礙物的位置及大小等。在分析機器人及障礙物資訊後，透過動態避障導引演算法產生避障導引策略，再依據機器人的致動器，設計控制器驅動機器人來達成任務。

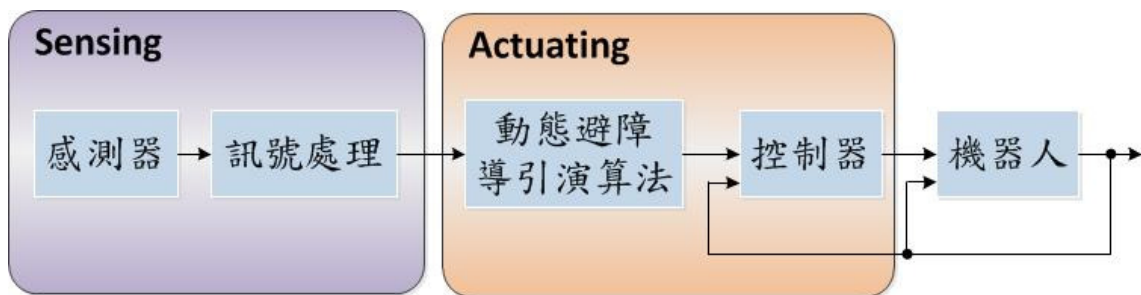


圖1.6 動態避障系統流程圖

目前避障導引策略常以路徑規畫的方式實現，可分為全域式路徑規畫及區域式路徑規畫兩種，前者是在已知的環境中，利用事先建好的地圖資訊，規畫出一條可行的路徑，導引使用者抵達目的地，並閃避已知的環境障礙物，如 PAMM 的避障導引系統；而後者則是在未知的環境中，根據感測器偵測到的環境資訊，即時規畫出可行路徑，再依據外在環境的動態資訊進行路徑的即時更正，如 Care-O-botII 及 RT-Walker 的避障導引系統。而兩者各有其優缺點，全域式路徑規畫因為地圖資訊較為豐富，且沒有運算時間的限制，常可規畫出最短或最快的路徑導引使用者，但缺點是不能因應環境的動態資訊修改路徑，若環境有所變動，則可能與障礙物碰撞而發生危險。而區域式路徑規畫雖然不一定能找到路徑上的最佳解，但對於動態環境有更好的適應性，更能給予使用者安全上的保障，有鑑於此，我們決定選用區域式路徑規畫演算法。

常見的區域式路徑規畫演算法有三種，分別為Artificial Potential Field、Neural Networks以及Genetic Algorithms。Artificial Potential Field演算法的概念是將虛擬力場施加在機器人上，最早在1985年由美國史丹佛大學的Khatib所提出[13]，原理如下圖1.7所示。Khatib將機器人所處的環境建立成一虛擬力場，此力場中目標物(紅色)將施予機器人吸引力，而障礙物(藍色)施予機器人排斥力，計算出所有吸引力及排斥力的合力後，合力的大小及方向將決定機器人下一刻的移動距離及方向，經過多次運算，機器人將沿著規畫好的路徑(黑線)，閃避障礙物同時接近目標物。此方法的優點在於概念簡單且運算時間短，易於即時控制，因此常被使用在機器人動態避障導引系統中[13~16]；然而，此方法有其天生的限制如下：(1)常被困在局部最佳解，(2)無法通過鄰近的障礙物，及(3)障礙物出現時或在狹路中軌跡會發生振盪[14]。其中，第一個限制是此方法最讓人詬病的缺點，也容易讓機器人被困在死角中。

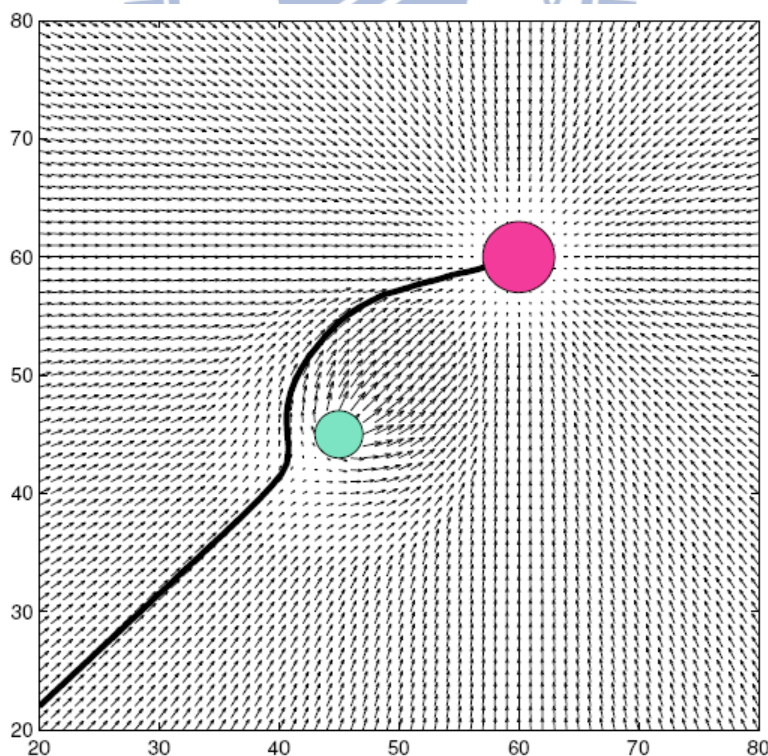


圖 1.7 Artificial Potential Field 演算法原理示意圖[32]

Neural Networks演算法是一種效法生物智慧的演算法，其概念是模擬人類大腦結構而來。演算法是由許多運算子(neurons)架構而成的網路，猶如大腦內神經元彼此連接，經過許多不同的訓練I/O對來建立最合適的演算法架構，也正因為此過程類似人類的學習機制，故亦稱為學習演算法。在未知的動態環境中，環境及系統資訊較不完整，且障礙物可能進行非線性運動，因此，動態避障演算法常需處理複雜的非線性系統。此方法具有對系統不完整性與參數不確定性較不敏感，以及學習完成後運算快等優點，故常被應用在機器人動態避障導引系統的開發上[17~19]。演算法可藉由機器人、障礙物及目標物等動態環境資訊做為輸入項，對障礙物未來的行動進行估測，進而調整控制器輸出合適的控制命令[17]；但在實際應用上，學習空間過大是目前需解決的問題。

Genetic Algorithms是仿效生物基因物競天擇的演化法則而來的搜索演算法，最早在1975年由美國密西根大學的Holland所提出[20]，目前成功地應用在解決許多最佳化問題上，而機器人的動態避障導引問題，也可以被視為是一種在某些限制條件下(如已知部分環境資訊及不可發生碰撞)的最佳化問題(如最短、最快或最省能的路徑)，故也有不少學者將其運用在解決機器人動態避障的問題上[21~23]，其做法如下：先就已知資訊規畫出一條可行的路徑，再將路徑分割成多個半路點(halfway points)並兩兩隨機連接，接著透過遺傳、突變、自然選擇以及雜交等基因運作，經過多次迭代，產生最佳或近似最佳的路徑。此方法的優點在於路徑的最佳化可成功克服局部最佳解的問題，但要付出計算時間長及運算空間大等代價，在動態環境中使用仍有其運算上的問題要克服。

在1999年，美國加州理工大學的Fiorinic等提出在動態環境中針對移動中障礙物進行閃避的Velocity Obstacles演算法，並提出碰撞區(Collision Cone)的概念[24]，如圖1.9所示。根據障礙物B的半徑、與機器人A之間的距離，以及兩者的速度，可畫出機器人與障礙物B之間的碰撞區 VO_B (如圖1.9的灰色區域)，若機器人A的速度落在此碰撞區中，則改變機器人的速度及朝向角逃離碰撞區，避免發

生碰撞。2003年，Fraichard等人將其概念延伸而提出Inevitable Collision States觀念，以預防機器人進入無可避免碰撞的狀態[25]，更增加機器人的安全性。此類方法的優點在於概念簡單、運算速度快、易於即時控制，且可以對靜止、線性移動及非線性移動障礙物進行閃避，因此被廣泛應用在機器人動態避障功能的開發上[26~28]。然而，此方法在規畫路徑時以即時避障為第一優先，並未考慮到導引功能，因此在避障後常需要再對機器人的位置及朝向角進行調整。

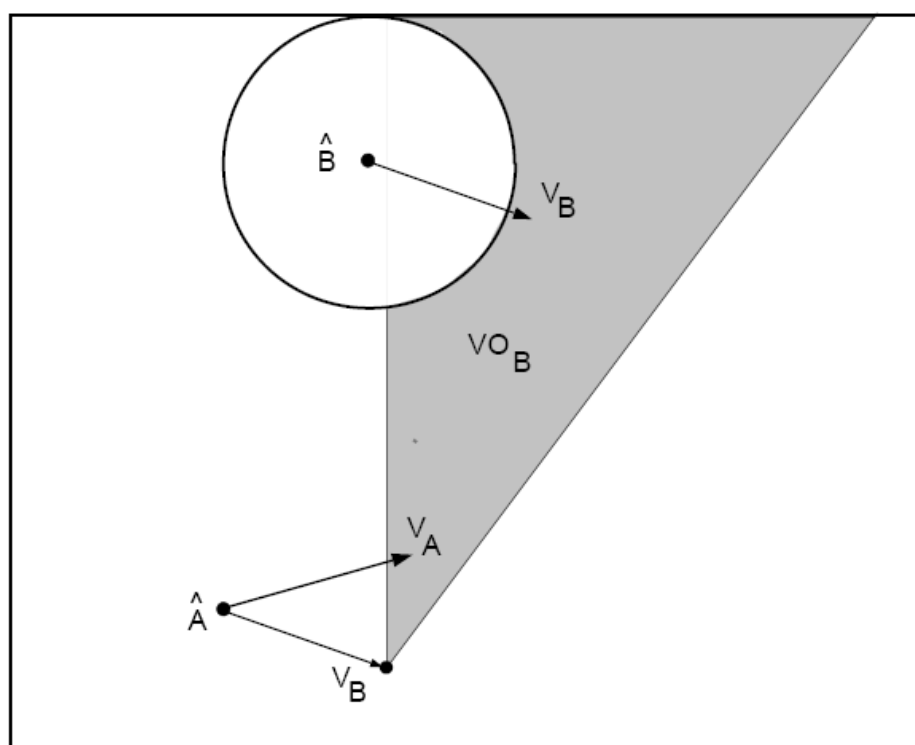


圖 1.8 Collision Cone 概念圖 [24]

1.4 研究目標

在真實的居家環境中，環境及障礙物資訊是未知的，雖然可以透過事先建置好環境地圖或是利用 GPS 得知環境中靜態障礙物的資訊，但家庭成員及寵物不可預期的走動，仍有可能使老年人在行走的過程中發生碰撞。在搜尋並研讀了多篇論文後，至目前為止，還沒看到被動式行動輔助機器人具有閃避動態障礙物的

能力。為了提升老年人在居家行動上的安全保護，我們希望結合一些目前成功應用在主動式機器人上的動態避障導引演算法，取各自的優點並加以改善，以開發出一套適合被動式行動輔助機器人的動態避障導引系統。在機器人系統已知目標與方向情況下，透過環境感測器，進一步了解環境的動態資訊，因應動態障礙物及機器人的狀態，即時給予適當的導引點，使用者只需平穩地往前推，機器人將給予適當的煞車力，讓使用者可以順利閃避障礙物到達目標點。此外，在被動式行動輔助機器人其動力來源完全仰賴使用者推力提供的情況下，機器人系統的避障能力也會有所限制。我們希望找出此動態避障導引系統在避障上的極限，以制定其安全範圍，期望能在安全上提供使用者更全面的保障。

1.5 論文架構

我們將在第二章介紹基於距離資訊之行動輔助機器人動態避障導引系統，先是說明被動式行動輔助機器人 i-Go 的動態模型，接著是描述動態避障導引演算法，其可使 i-Go 安全地閃避動態障礙物並順利到達目的地，最後利用幾何及物理概念，在數學上推導演算法閃避動態障礙物的能力限制；第三章為系統實現，此章節除了有行動輔助機器人之硬體介紹外，還有完整的系統架構說明；第四章為模擬與實驗結果，針對演算法的能力進行模擬分析，並實際地驗證系統的避障能力；第五章提出本論文的結論與未來展望。

第二章

行動輔助機器人動態避障導引系統

在真實的居家環境中，環境及障礙物資訊常隨時間不斷改變，即使可以透過事先建置好環境地圖或是利用 GPS 得知環境中靜態障礙物的資訊，但家庭成員及寵物不可預期的走動，仍有可能使老年人在行走的過程中發生碰撞。在如此變動的環境中，我們所發展的系統可透過感測器的即時偵測，結合動態避障導引系統，即時閃避迎面而來的障礙物，安全地導引使用者到達所設定的目的地。

本章有三個重點，第一是建構障礙物偵測系統來得知前方障礙物的大小、位置及速度等資訊；第二是為了保障使用者的安全所設計的動態避障導引演算法，根據環境及障礙物的動態資訊，結合導引系統，即時閃避動態障礙物，以安全地導引使用者到達目的地；第三為推導系統閃避動態障礙物的能力限制，並制定系統規格及安全範圍，以提供使用者更完善的保障。

本系統的控制流程如圖 2.1 所示，首先建構障礙物偵測系統，並透過此系統將感測器量測到的距離資訊，轉換成障礙物的大小、位置及速度等資訊。接著根據障礙物的動態資訊，開啟動態避障導引演算法，經由障礙物資訊及機器人的狀態決定路徑參考點，再透過本實驗室過去開發的輔助導引策略[35]，結合參考點、機器人狀態及使用者推力等資訊，計算出合宜的煞車力，導引使用者安全地抵達目的地。在介紹整個控制架構前，必須先了解其動態模型，因此，在 2.1 節，先介紹行動輔助機器人的動態模型；接著，在 2.2 節介紹障礙物偵測系統；在 2.3 節介紹動態避障導引演算法及輔助導引控制策略；在 2.4 節推導系統閃避動態障礙物的能力限制。

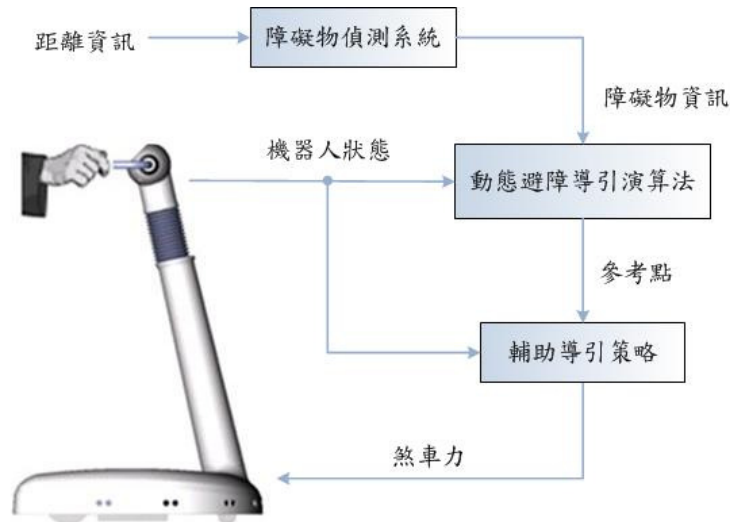


圖 2.1 行動輔助機器人系統控制流程圖

2.1 二維空間中行動輔助機器人之動態模型

在介紹整個控制架構前，我們必須先探討行動輔助機器人本身的動態物理模型，我們採用的是一個簡化過的模型，如圖 2.2 所示。此模型忽略了輪子本身的重量及轉動慣量，在卡氏座標下，用三個變數來表示機器人的狀態，如(2.1)式：

$$q = [x_c \quad y_c \quad \theta]^T \quad (2.1)$$

其中 x_c 為機器人質心的 x 軸位置、 y_c 為質心的 y 軸位置、 θ 為機器人的朝向角。

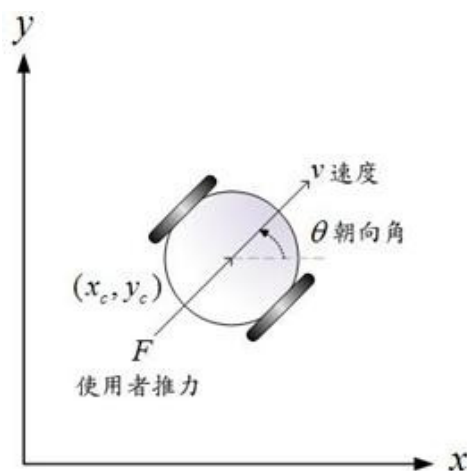


圖 2.2 在卡氏座標下，行動輔助機器人之簡化圖

假設在機器人無左右滑動的情況下，則其質心速度 v 會與其朝向角平行，因此， \dot{q} 可以表示為

$$\dot{q} = S(q)V \quad (2.2)$$

其中

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

v 為機器人之質心速度、 ω 為旋轉角速度。

在受到使用者推力 F 以及無滑動限制力 λ 的情況下，機器人的動態方程式可用 (2.4) 式表示：

$$M(q)\ddot{q} = E(q)\tau + D(q)F - C\lambda \quad (2.4)$$

其中

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad E(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta / r & \cos \theta / r \\ \sin \theta / r & \sin \theta / r \\ b / r & -b / r \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}, \quad D(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C(q) = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

m 為機器人之質量、 I 為其轉動慣量、 r 為其輪子半徑、 b 為兩輪之距離的一半、 τ_r 為右輪煞車力矩、 τ_l 為左輪煞車力矩、 F 為人的推力、 λ 為限制力。

接著，我們對 (2.2) 式微分，得到 $\ddot{q} = \dot{S}V + S\dot{V}$ ，代換 \ddot{q} 到 (2.4) 式中，並且前乘 S^T ，

因此限制力 λ 會被消除，最後併入 (2.2) 式可得

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S\dot{V} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T M S)^{-1} S^T E \end{bmatrix} \tau + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T M S)^{-1} S^T D \end{bmatrix} F \quad (2.6)$$

為了使能以被動的方式控制行動輔助機器人， τ_r 與 τ_l 選定為

$$\tau_r = -K_r \dot{\theta}_r, \quad \tau_l = -K_l \dot{\theta}_l \quad (2.7)$$

其中， $\dot{\theta}_r$ 和 $\dot{\theta}_l$ 代表右輪及左輪的角速度， K_r 和 K_l 是右輪及左輪的非負調整參數。

在機器人不會左右滑動情況下， $\dot{\theta}_r$ 和 $\dot{\theta}_l$ 可以表示為

$$\dot{\theta}_r = (v + b\omega) / r, \quad \dot{\theta}_l = (v - b\omega) / r \quad (2.8)$$

將(2.7)-(2.8)式代入(2.6)式中，可以得到(2.9)-(2.10)式

$$\dot{q} = SV \quad (2.9)$$

$$\dot{V} = AK + BF \quad (2.10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{v+b\omega}{mr^2} & -\frac{v-b\omega}{mr^2} \\ -\frac{b(v+b\omega)}{lr^2} & -\frac{b(v-b\omega)}{lr^2} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_r \\ K_l \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

(2.10)式即是以矩陣的形式代表整個系統的運動狀態。此時，我們可將參數 K 視為整個系統的新控制輸入參數，經由適當地調整左右輪煞車力，改變機器人的運動狀態，進而導引使用者從起始位置到達想要的位置，並即時閃避路徑上的動態障礙物。

2.2 障礙物偵測系統

在障礙物偵測系統方面，我們透過感測器獲得機器人前方 180° 內所有障礙物與機器人之間的距離，再經由障礙物偵測演算法，即時辨識出障礙物的大小、位置及速度等資訊。其中，障礙物偵測演算法是參考 Daisuke 等學者在 2010 年所提出的避障演算法[1]，論文中利用自走車做實驗，藉由分析感測器所擷取到的距離資訊，可判斷出障礙物的間距及可行區域，此方法簡單且能有效的避開障礙物到達目標點。我們將其處理距離資訊的方法擷取出來，並加以改良，以達到辨識並追蹤障礙物的功能。

首先，我們定義感測器的座標系統，如圖 2.3 所示，在機器人的座標系統下，感測器的位置定為(0,0.3)，單位為公尺。如此一來，我們可以透過感測器偵測到所有在機器人前方 180° 內，與機器人距離小於偵測範圍 d 的障礙物，並得到其輪廓點的距離資訊。

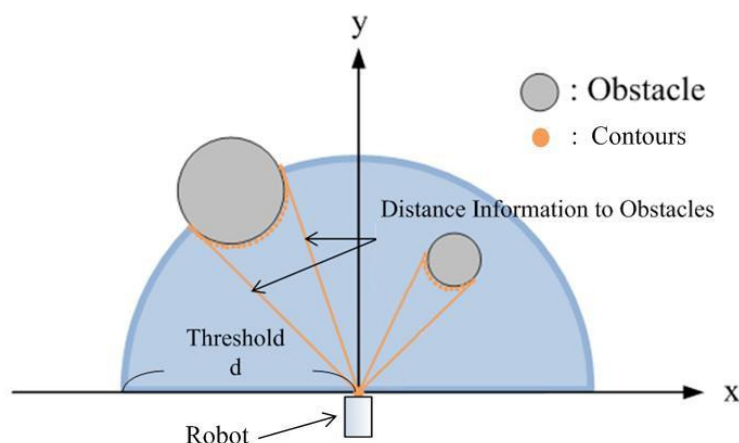


圖 2.3 雷射掃描示意圖

接著，我們區分個別障礙物的輪廓點，透過障礙物分類流程，我們可辨識出屬於相同障礙物的輪廓點以及個別障礙物的寬度範圍，並以步距角的方式記錄其範圍，分類流程如圖 2.4 所示。我們以角度 0° 時所量測到的資料為分類起點， 180° 時所量測到的資料為終點，分別記為第 i_0 和第 i_{180} 筆資料，過程中依序增加分類的角度，直到前方 180° 的資料都分類完後，分類程序才算完成。在進行每次的分類時，系統會讀入該筆與前一筆的距離資訊，並將兩者與偵測範圍 d 進行比較，若偵測到的距離資訊小於偵測範圍 d ，則表示在該角度範圍下有障礙物存在，其分類結果共有四種，分別如下：

1. 若兩者皆小於偵測範圍，則表示偵測到的為同一障礙物，故系統會將兩筆資訊歸類在同一障礙物內，如圖 2.4 中左一的結果。
2. 若當下偵測到障礙物，但前一刻卻沒有障礙物，則表示目前偵測到的資料屬於障礙物的右邊界，如圖 2.4 中左二的結果。

3. 若當下沒有偵測到障礙物，但前一刻有障礙物，則表示之前偵測到的資料屬於障礙物的左邊界，如圖 2.4 中右一的結果。
4. 若兩者皆大於偵測範圍，則表示在該範圍沒有障礙物，故系統會將這兩筆資訊排除，如圖 2.4 中右二的結果。

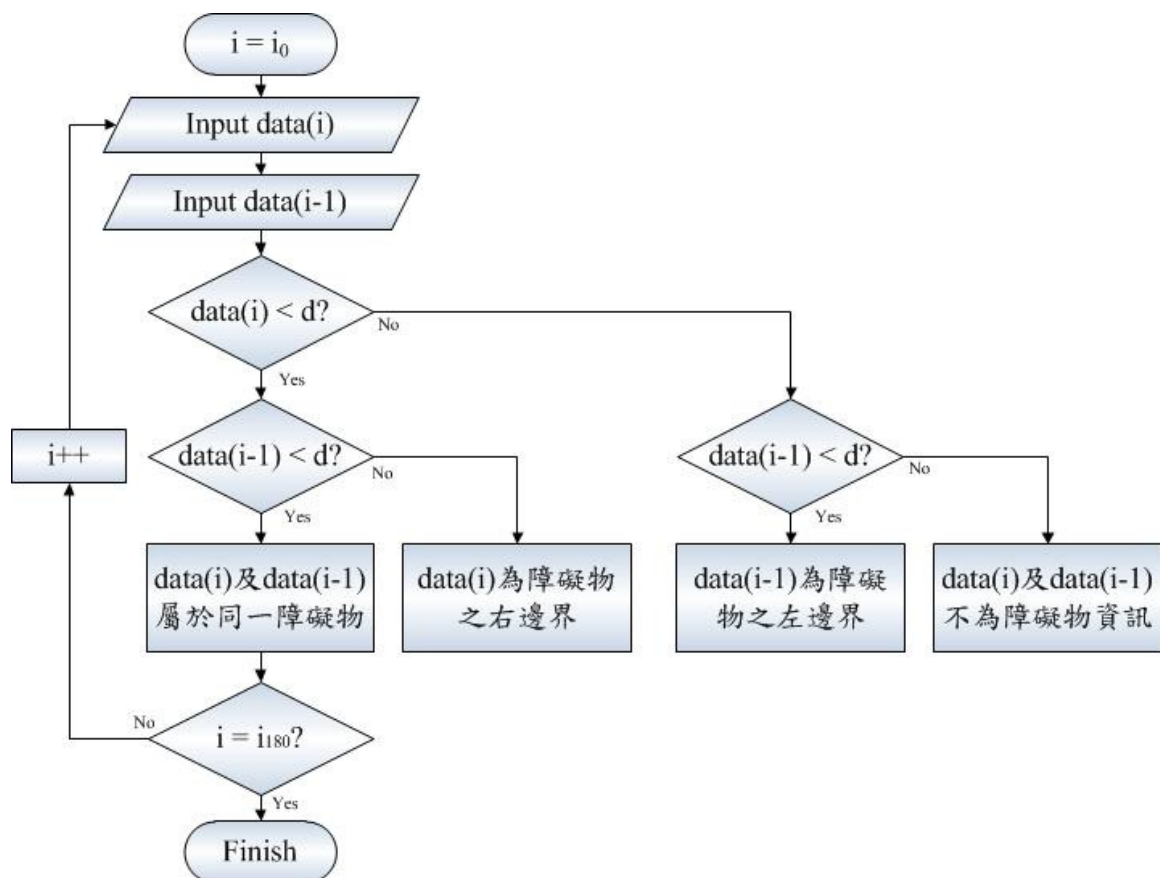


圖 2.4 障礙物分類流程圖

在各輪廓點的距離資訊分類後，我們對每個障礙物假設一個障礙圓，並以障礙圓將障礙物包覆其中，如圖 2.5 所示，再依據各障礙物距離資訊的分群關係，我們可找出每個障礙物距離感測器中心 O_s 最近及最遠的距離(如圖 2.5 中的紫色及紅色線段)，分別記為 mD_j 及 MD_j 。其中， j 為障礙物的編號，隨著障礙圓的位置由右至左遞增。

接著，我們將 $\Delta OsMOC_j$ 近似為一個直角三角形，利用畢氏定理，可將障礙物半徑 r_j 以(2.12)示表示：

$$r_j = \frac{MD_j^2 - mD_j^2}{2mD_j} \quad (2.12)$$

透過座標轉換，可將障礙物中心座標 OC_j 以(2.13)式表示：

$$\begin{bmatrix} OCx_j \\ OCy_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j + mD_j) \cos\left(\frac{i_{m,j} - i_0}{nn} \pi\right) \\ (r_j + mD_j) \sin\left(\frac{i_{m,j} - i_0}{nn} \pi\right) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

其中， $i_{m,j}$ 為第 j 個障礙物與機器人距離最近時的步距角值， i_0 為 0° 時對應的步距角值，而 nn 則為 0° 到 180° 間所有的距離資訊總筆數和。

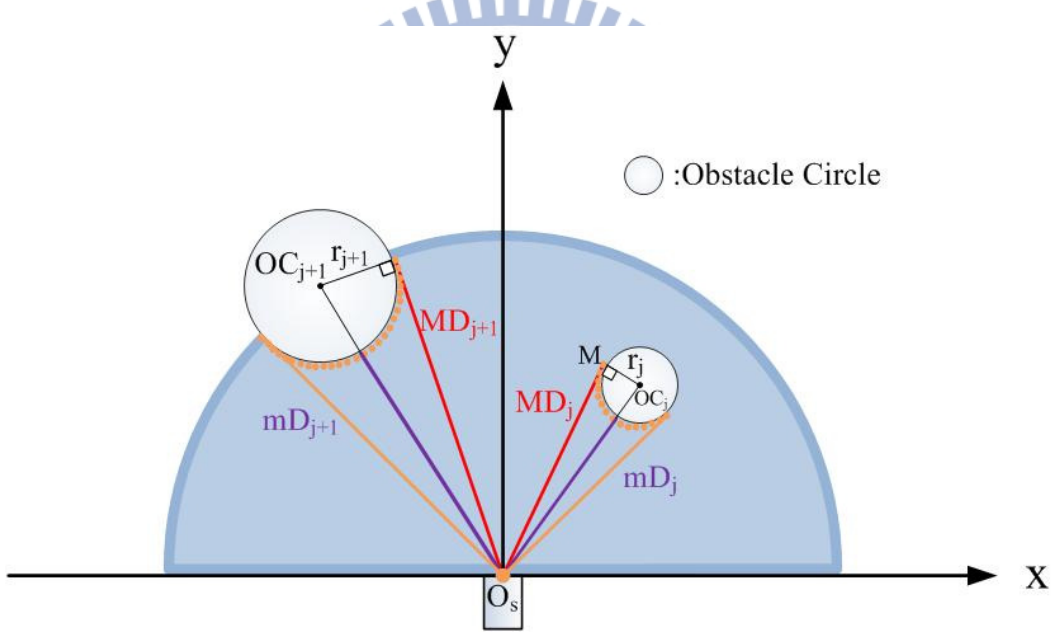


圖 2.5 障礙圓示意圖

因雷射感測器是藉由量測感測光波遇障礙物反射後的物理性質變化，轉換成障礙物與感測器的距離，故 MD_j 亦為經障礙物反射之割線，並非障礙圓切線，即 $\angle OsMOC$ 並不是直角而是鈍角。因此，我們推算出的半徑會較小，中心點也會有所偏誤。然而，基於安全考量，我們寧可推算出較大的半徑，以完整包覆障礙物，並盡早做好閃避的準備，故透過以下步驟進行修正：

1. 以目前的中心點為圓心，找出輪廓點中與其最遠距離作為修正半徑；
2. 將修正後的半徑帶回(2.13)式，重新更正中心點；
3. 重複步驟 1 到 2，直到半徑修正量小於預設的閾值。

透過修正流程，我們可以將障礙物的中心點，固定在離機器人最近的步距角方向上移動，直到找到中心點與所有輪廓點距離均相同的位置，以此距離作為半徑，即可保證所畫出的障礙圓能包含所有輪廓點分布的區域，亦能包覆住整個障礙物的範圍。以下將以數學幾何的方式，搭配圖 2.6 的修正半徑示意圖，來驗證修正半徑的收斂性。

首先，我們將修正前半徑 r_j 帶入(2.13)式，可算出修正前障礙圓（如圖 2.6 中的白色圓球）的中心點 OC_j 以(2.14)式表示：

$$\begin{bmatrix} OCx_j \\ OCy_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j + mD_j) \cos(\theta) \\ (r_j + mD_j) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中

$$\theta = \frac{i_{m,j} - i_0}{nn} \pi \quad (2.15)$$

根據修正步驟 1，我們找出與 OC_j 最遠的輪廓點 $M(x_M, y_M)$ ，並以兩者間距離為修正半徑 r_{new} ，如(2.16)式所示：

$$r_{new} = \sqrt{(OCx_j - x_M)^2 + (OCy_j - y_M)^2} \quad (2.16)$$

根據修正步驟 2，我們將修正半徑 r_{new} 帶入(2.13)式，可算出新障礙圓（如圖 2.6 中的空心圓球）的中心點 OC_{new} 。

接著，我們定義收斂指標 q ，來觀察修正半徑收斂的狀況，如(2.17)式所示：

$$q = \frac{r_{new} - r_j}{r_j} \quad (2.17)$$

將(2.14)、(2.16)式代入(2.17)式後，對半徑 r_j 作微分，可得

$$\frac{dq}{dr_j} = \frac{\frac{r_j}{r_{new}}((r_j + mD_j)\cos(\theta) - x_M)\cos(\theta) + (r_j + mD_j)\sin(\theta) - y_M)\sin(\theta) - r_{new}}{r_j^2} \quad (2.18)$$

其中， $(r_j + mD_j)\cos(\theta) - x_M$ 及 $(r_j + mD_j)\sin(\theta) - y_M$ 分別為原中心點 OC_j 與 M 在 x 方向及 y 方向上的距離，即為 $OCx_j - x_M$ 及 $OCy_j - y_M$ ，根據(2.14)、(2.16)式以及柯西不等式，可知

$$r_{new} \geq (r_j + mD_j)\cos(\theta) - x_M)\cos(\theta) + (r_j + mD_j)\sin(\theta) - y_M)\sin(\theta) \quad (2.19)$$

將(2.19)式代入(2.18)式，整理可得

$$\frac{dq}{dr_j} = \frac{\frac{r_j}{r_{new}}kr_{new} - r_{new}}{r_j^2} < 0 \quad (2.20)$$

其中， k 為一個小於 1 的倍數。由(2.20)式可知半徑的修正量呈現一個遞減的趨勢。我們再在將(2.20)式對半徑 r_j 作微分可得

$$\frac{dq'}{dr_j} = \frac{2}{r_j^3}(r_{new} - kr_j) > 0 \quad (2.21)$$

綜合(2.20)-(2.21)式來看，透過修正流程，我們可使得半徑以漸進遞減的方式修正到正確的大小。

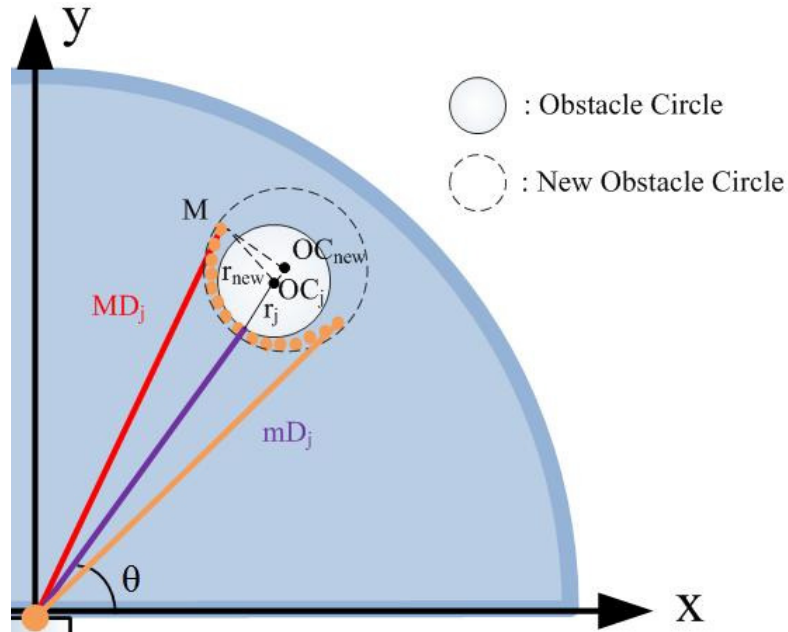


圖 2.6 修正半徑示意圖

我們利用 Matlab 進行障礙物偵測演算法初步驗證與模擬，並比較修正前後差異，結果如圖 2.7(a)-(b)所示。我們在感測器前方設定三個障礙物，分別在(2,2)、(0,3)及(-2,2)的位置，半徑皆為 0.3m，以綠色表示，紅色圓弧為模擬雷射掃描的結果，紅色圓圈則表示障礙物最左邊及最右邊的輪廓點，最後，演算法算出的障礙圓則以藍色表示。我們定義中心位置的判斷指標，如(2.22)式所示：

$$EOP(\text{error of position}) = \frac{\|\text{目標位置} - \text{實際位置}\|}{\|\text{目標位置}\|} * 100\% \quad (2.22)$$

由圖 2.7(a)可以看出因幾何誤差而使得辨識出的障礙物半徑較小，誤差最大可到 25%，而中心距離的估測已十分準確。修正後如圖 2.7(b)所示，半徑誤差縮小到只有 5%，而中心距離只剩下不到 1%的誤差。在能夠準確的辨識出障礙物的半徑及中心點的位置後，透過紀錄前後兩個時刻障礙圓中心點的位移量，我們可以推算出障礙物對機器人移動的相對速度。

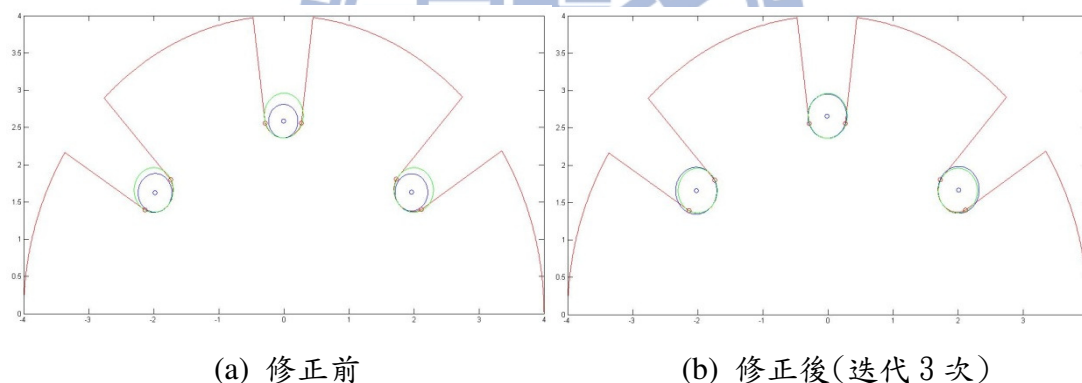


圖 2.7 障礙物偵測結果圖：(a)修正前和(b)修正後(迭代 3 次)

表 2.1 障礙物偵測模擬結果分析—修正前

| 修正前 | 辨識結果 | | | 誤差 | |
|-------|---------|--------|--------|-------|---------|
| | X | y | 半徑 | EOP | 半徑 |
| 障礙物 1 | 1.9627 | 1.9689 | 0.2507 | 1.72% | -16.44% |
| 障礙物 2 | -0.0079 | 2.9252 | 0.2248 | 2.51% | -25.08% |
| 障礙物 3 | -1.9792 | 1.9624 | 0.2594 | 1.52% | -13.52% |

(單位：公尺)

表 2.2 障礙物偵測模擬結果分析—修正後(迭代 3 次)

| 修正後 | 辨識結果 | | | 誤差 | |
|-------|---------|--------|--------|-------|--------|
| | X | y | 半徑 | EOP | 半徑 |
| 障礙物 1 | 2.0122 | 2.0100 | 0.3150 | 0.56% | 4.99% |
| 障礙物 2 | -0.0081 | 2.9975 | 0.2970 | 0.28% | -1.01% |
| 障礙物 3 | -2.0224 | 1.9978 | 0.3152 | 0.80% | 5.08% |

(單位：公尺)

2.3 動態避障導引演算法

在第一章我們介紹了目前常見的動態避障演算法，雖然各有各的優點，但均須克服運算複雜度、局部最佳解及環境適應性等三大困難[21]。因此，在動態避障導引演算法的開發上，我們考量對未知的動態環境的適應性，選擇區域式路徑規畫演算法；而動態避障任務常需要高度的即時反應，故演算法需具有較低的運算複雜度，以在最短時間內，依環境變化對路徑進行動態修正；但演算法若因運算時間短，而無法對路徑做最佳化的話，常會讓使用者困在局部最佳解內動彈不得，以至於來不及閃避迎面而來的危險。

基於以上討論，我們選用概念簡單且運算速度快，易於即時控制的 Velocity Obstacles 演算法[24]作為控制核心，控制流程如圖 2.8 所示。藉由 2.2 節介紹的障礙物偵測系統，我們可準確地辨識出障礙物的半徑、位置及速度等資訊，結合機器人狀態資訊，對機器人進行碰撞狀態分析，以預防無可避免的碰撞發生。接著，根據分析結果產生出對應的避障命令，再利用 Artificial Potential Field 演算法[2]依照避障命令規劃出路徑參考點，並透過輔助導引策略，在已知當下的機器人狀態、人的推力和指定參考點的情況下，每經過一個取樣時間，先利用路徑規劃來模擬出想要機器人的狀態，算出一個合宜的煞車力矩傳到機器人，來達到動態避障導引的效果。

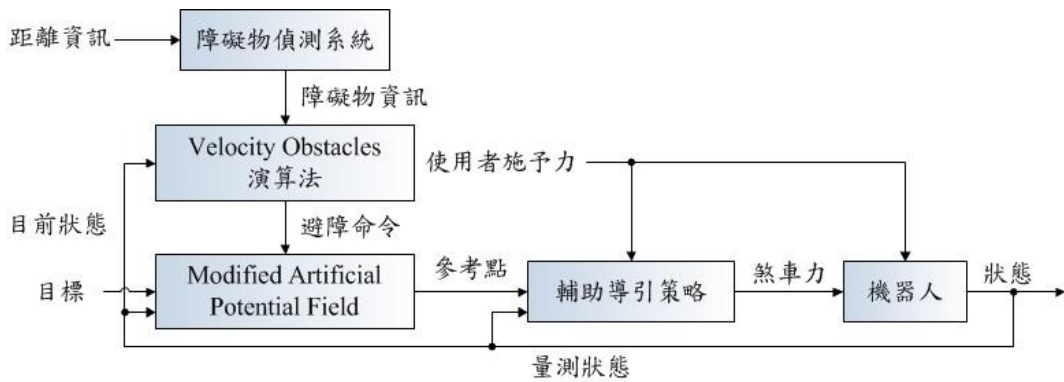


圖 2.8 動態避障導引系統控制流程圖

首先，我們先利用 Velocity Obstacles 演算法，根據已知的動態障礙物與機器人資訊，對機器人進行碰撞狀態分析。我們採用的是一個簡化過的模型，如圖 2.9 所示，我們將機器人視為一質量點，落在其質心 O_r 的位置上，而障礙物則以灰色的障礙圓包覆住，並以障礙圓的中心 OC_j 和半徑 r_o 分別代表其位置及大小。結合機器人與障礙物的半徑，我們定義出新的障礙圓半徑 r_o'

$$r_o' = r_r + r_o + b \quad (2.23)$$

其中， r_r 為機器人半徑， r_o 為障礙物半徑，而 b 為安全空間。

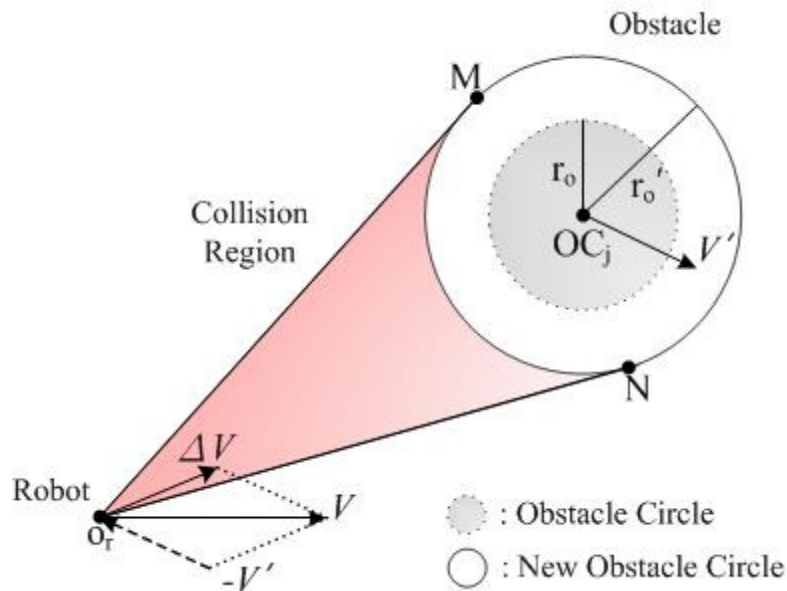


圖 2.9 碰撞狀態分析示意圖

在此模型中，我們假設機器人速度為 V ，障礙物速度為 V' ，而兩者之間的相對速度則以 ΔV 表示。其中，若從機器人質心 O_r 對新障礙圓畫兩條切線，可分別與其相切於 M 、 N 兩點，我們定義 $\angle MO_r N$ 所覆蓋的範圍為碰撞區域，若相對速度 ΔV 的方向，在有限時間內無法逃離此區域的話，機器人必定會與障礙物發生碰撞，即進入無可避免碰撞的狀態(Inevitable Collision States，以下簡稱 ICS)。

為了逃離碰撞區，我們必須改變 ΔV 的方向，但在無法改變障礙物速度 V' 的情況下，只能對機器人速度 V 進行調整。此時，一般的 Velocity Obstacles 演算法透過幾何關係，推導出機器人速度 V 與相對速度 ΔV 的大小及方向之間相依關係，進而調整 V ，使 ΔV 得以在短時間內逃離碰撞區[28]。然而，因為不考慮目標點資訊，閃避障礙物後，常使機器人的朝向角偏離原本的方向。

有鑑於此，我們改利用 Artificial Potential Field 演算法結合目標點資訊來提供機器人轉向的引力，以改善機器人朝向角偏差的問題。在引力斥力的計算方面，我們是參考 Li 等學者在 2010 年所提出的避障演算法[2]，論文中改良傳統以障礙物與機器人最短距離的平方來產生斥力場的方式，而用指數函數的形式來產生斥力，除了可克服過去無法通過鄰近障礙物的情況外，也可解決障礙物出現時或在狹路中軌跡會發生振盪的問題。因此，我們將其改良，並結合碰撞狀態分析的結果，提出新的引力斥力公式，如(2.24)-(2.25)式所示：

$$\bar{F}_{att}(X) = \frac{1}{2} k_t (X - X_t)^2 \quad (2.24)$$

$$\bar{F}_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_o e^{\frac{1-\rho}{\rho_0}} (X - X_t)^2 & \text{if ICS is ture} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2.25)$$

其中， X 為機器人的位置， X_t 為目標物的位置， ρ 為障礙物與機器人的最短距離， ρ_0 為反應距離，即感測器的偵測範圍，而 k_t 、 k_o 則分別為目標物及障礙物對引力及斥力的放大倍率。

此公式的優點在於指數函數相較於二次式，更能在接近碰撞時，提供即時且強大的斥力，避免發生碰撞。同時，為了降低運算複雜度，只有當機器人進入無可避免的碰撞狀態(ICS)時，我們才會對障礙物施予的斥力進行計算。然而，實際應用在閃避動態障礙物的任務時，若障礙物、目標物及機器人的中心點在同一直線上時，則可能會有局部最佳解的現象發生，使演算法無法規劃出下一個參考點。如圖 2.10 所示，此時障礙物中心對機器人中心的斥力與目標物對機器人中心的引力，恰好達成物理學上的「靜力平衡」，使機器人卡在原地動彈不得。

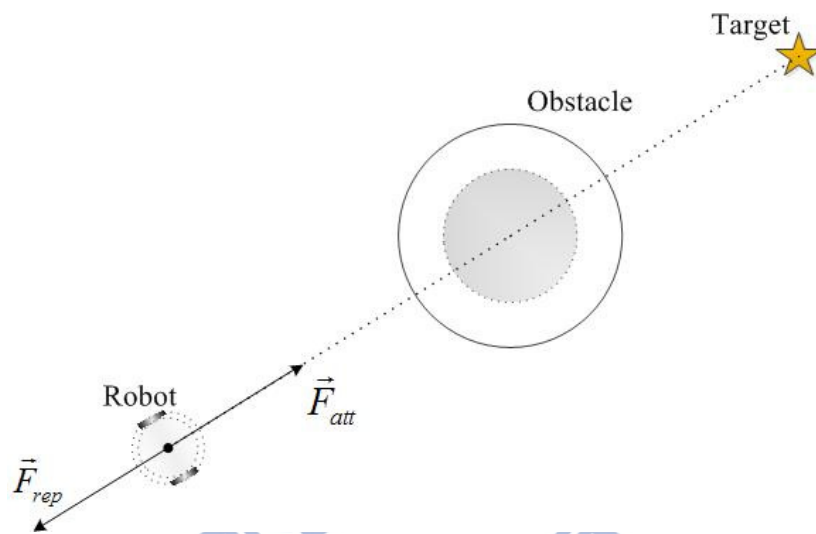
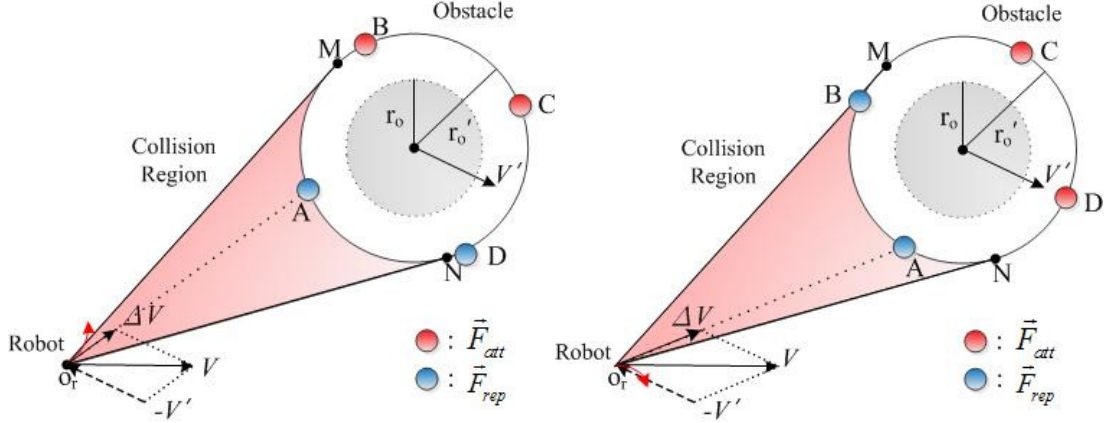


圖 2.10 局部最佳解分析示意圖

因此，我們透過增加障礙物對機器人不共線的施力點，來解決局部最佳解的問題。在施力點個數的取捨上，平面上要形成不共線需有三點以上，但考量對障礙物範圍的描述，我們覺得三點仍顯不足。然而，增加施力點也需付出運算複雜度提升的代價，故我們認為取四點較為恰當。如圖 2.11(a)-(b)所示，我們取相對速度 ΔV 延長至與障礙物半徑相接的點為 A 點，此為機器人與障礙物最快發生碰撞的點，故我們將其固定為斥力點，以避免碰撞發生。接著，為了在有限時間內快速逃離碰撞區域，剩下三點需提供最大的轉向力矩，故我們將 A 點以順時針的方向旋轉 90° 、 180° 及 270° 各取一點，分別為 B 點、C 點及 D 點。其中，B、

D 點可根據碰撞狀態分析後的控制命令來調整施力狀態，選擇往 ΔV 旋轉角度最小的方向轉向，以幫助機器人快速從左邊或右邊閃避障礙物。最後，我們讓 C 點固定施予引力，作為輔助轉向力，以幫助機器人快速通過障礙物的後端，完成閃避任務。



(a) 左轉命令(若 $\angle AO_rM < \angle AO_rN$) (b) 右轉命令(若 $\angle AO_rN < \angle AO_rM$)

圖 2.11 增加施力點控制示意圖：(a)左轉命令和(b)右轉命令

基於上述討論，我們對(2.24)-(2.25)式進行修正，提出新的引力斥力公式，如(2.26)-(2.27)式所示：

$$\vec{F}_{att}(X) = \frac{1}{2}k_t(X - X_t)^2 \quad (2.26)$$

$$\vec{F}_{repO}(X) = -\vec{F}_{attO}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_o e^{\left(\frac{1}{\rho O} - \frac{1}{\rho_0}\right)} (X - X_t)^2 & \text{if } ICS \text{ is true}, O = A, B, C, D \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2.27)$$

其中， \vec{F}_{att} 為目標物對機器人施予的引力， \vec{F}_{repO} 和 \vec{F}_{attO} 則分別為障礙物上各施力點對機器人施予的斥力及引力，其方向在施力點與機器人中心的連線上，有正向或負向的差別，而 ρO 則為障礙圓上各施力點與機器人的最短距離。

因此，根據控制命令以及機器人當下的位置，我們可將其在虛擬力場中的受力狀態以(2.28)式表示：

$$\vec{F}_{apf}(X) = \begin{cases} \vec{F}_{attT}(X) - \vec{F}_{repA}(X) + \vec{F}_{attB}(X) + \vec{F}_{attC}(X) - \vec{F}_{repD}(X) & \text{turn left} \\ \vec{F}_{attT}(X) - \vec{F}_{repA}(X) - \vec{F}_{repB}(X) + \vec{F}_{attC}(X) + \vec{F}_{attD}(X) & \text{turn right} \end{cases} \quad (2.28)$$

其中， $\vec{F}_{apf}(X)$ 為機器人在虛擬力場中所受的合力。

接著，演算法根據機器人當下在虛擬力場中的受力狀態，規劃出下一刻的導引路徑點，如(2.29)-(2.30)式所示：

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{k+1} t_{con} \cos(\theta_{k+1}) \\ v_{k+1} t_{con} \sin(\theta_{k+1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

其中

$$\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|\vec{F}_{apf}\| \cdot t_{con} \\ (\theta_{apf} - \theta_k) \cdot t_{con} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

x_k 、 y_k 為機器人當下在卡氏座標上的位置， θ 為機器人的朝向角， v 為機器人的速度， t_{con} 為系統取樣時間，而 \vec{F}_{apf} 和 θ_{apf} 分別為機器人在虛擬力場中所受的合力向量及其朝向角。

最後，我們根據導引點資訊模擬出想要的機器人狀態，並透過輔助導引策略 [35]，在已知當下的機器人狀態、人的推力和指定參考點的情況下，每經過一個取樣時間，計算出一個合宜的煞車力矩傳到機器人，導引機器人通過每個導引點，以即時閃避動態障礙物，安全地到達所指定的目標點位置。

2.4 動態避障導引演算法之能力推導

在建立被動式動態避障導引系統後，我們希望了解系統所能閃避的動態障礙物的規格範圍，如大小及速度限制等，以制定其安全範圍，讓使用者能更放心地信賴機器人的引導。本節將透過物理和數學幾何等概念，在理論上對系統的能力做推導。

首先，利用碰撞狀態分析的概念，我們可以根據機器人及障礙物的資訊，建構出一個簡化的模型，如圖 2.12 所示。其中，參數的設定大致與 2.3 節中圖 2.9 相同，只多加相對速度 ΔV 與中心連線 $\overline{O_r O_o}$ 的夾角 θ_a 及碰撞區域角度的一半為 θ_c 。故我們可利用 θ_a 及 θ_c 的關係，判斷機器人是否進入無可避免碰撞的狀態，即如果 $\theta_a \leq \theta_c$ ，則 ΔV 在碰撞區內，機器人將與障礙物發生碰撞；反之，如果 $\theta_a \geq \theta_c$ ，則 ΔV 成功離開碰撞區域，避免發生碰撞。

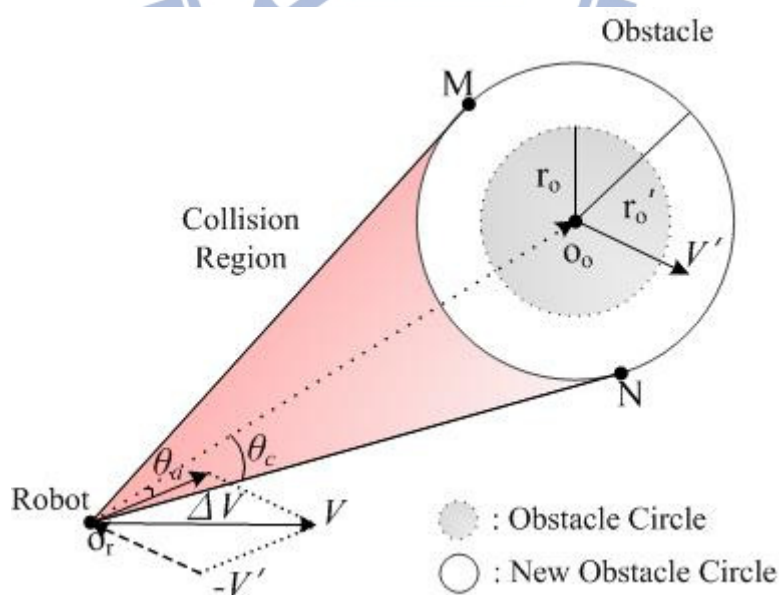


圖 2.12 碰撞狀態證明示意圖

因障礙物在機器人前方 180° 範圍內， θ_a 和 θ_c 的角度皆在 0° 到 90° 的範圍，

若我們對兩者分別取餘弦，並考慮避障條件 $\theta_a \geq \theta_c$ ，可得

$$0 \leq \cos \theta_a = \frac{\Delta V \cdot \overline{O_r O_o}}{\|\Delta V\| \|\overline{O_r O_o}\|} \leq \cos \theta_c = \frac{\sqrt{\|\overline{O_r O_o}\|^2 - r_o'^2}}{\|\overline{O_r O_o}\|} \leq 1 \quad (2.31)$$

將(2.31)式化簡並取平方可得

$$(\Delta V \cdot \overline{O_r O_o})^2 \leq \|\Delta V\|^2 \cdot (\|\overline{O_r O_o}\|^2 - r_o'^2) \quad (2.32)$$

其中， $\|\Delta V\|$ 為相對速度大小， $\|\overline{O_r O_o}\|$ 為中心連線長度，而 r_o' 為新的障礙物半徑。

故我們以(2.32)式為碰撞狀態分析的判別式，即若滿足此式，則 ΔV 可成功離開碰撞區域，避免發生碰撞。

接著，我們須得知系統對閃避動態障礙物的反應時間 t_{oa} ，以判斷機器人能否在反應時間內，改變 ΔV 來滿足(2.32)式，以完成閃避任務。為了簡化模型，本論文先對障礙物及機器人的行為提出幾點假設，如下：

1. 當障礙物中心點進入偵測範圍 $1s$ 時，機器人才開始進行避障；
2. 障礙物維持一定的朝向角，進行速度為 V' 的等速運動；
3. 機器人在避障時，速度大小均保持最高速 V ，而只做朝向角的改變。

基於以上假設，我們可以依照機器人和障礙物的初始狀態，推算出機器人在不對障礙物進行閃避的情況下的反應時間 t_{oa}' ，以(2.33)式表示：

$$t_{oa} \geq t_{oa}' = \frac{\|\overline{O_r O_{o0}}\| - r_o'}{(\Delta V_0 \cdot \overline{O_r O_{o0}}) / \|\overline{O_r O_{o0}}\|} \quad (2.33)$$

其中， t_{oa}' 可視為 t_{oa} 的下界，在機器人轉向後，反應時間可能隨之增加。 ΔV_0 為初始相對速度，而 $\overline{O_r O_{o0}}$ 和 $\|\overline{O_r O_{o0}}\|$ 則分別為初始中心點連線向量及其長度。

在障礙物開始進入偵測範圍時，估測的障礙物半徑會逐漸變化，直到中心點進入偵測範圍時，半徑才趨於穩定，系統才能做最正確的規劃，故訂定 $\|\overline{O_r O_{o0}}\|$ 為

偵測範圍 l_s ，符合第一假設。再考量系統取樣時間 t_{con} ，則在反應時間內，系統可控制機器人的次數 k 可用(2.34)所示：

$$k = \left\lfloor \frac{t_{oa}'}{t_{con}} \right\rfloor \approx \left\lfloor \frac{t_{oa}}{t_{con}} \right\rfloor \quad (2.34)$$

其中，在反應時間很短的情況下， t_{oa} 會近似於 t_{oa}' ，故我們可用 k 來表示實際的避障控制次數。

在進行 k 次控制後，我們利用(2.32)式判斷是否完成避障，如下：

$$(\Delta V_k \cdot \overline{O_r O_{ok}})^2 \leq \|\Delta V_k\|^2 \cdot (\|\overline{O_r O_{ok}}\|^2 - r_o'^2) \quad (2.35)$$

我們將 ΔV_k 和 $\overline{O_r O_{ok}}$ 向量投影到卡氏座標的 x 方向及 y 方向分別討論，可得

$$(\Delta V_{kx} \cdot \overline{O_r O_{okx}} + \Delta V_{ky} \cdot \overline{O_r O_{oky}})^2 \leq (\Delta V_{kx}^2 + \Delta V_{ky}^2) \cdot (\|\overline{O_r O_{okx}}\|^2 + \|\overline{O_r O_{oky}}\|^2 - r_o'^2) \quad (2.36)$$

再將(2.36)式整理後，我們可以將判別式改寫如(2.37)式所示：

$$r_o'^2 (\Delta V_{kx}^2 + \Delta V_{ky}^2) \leq (\Delta V_{kx} \cdot \overline{O_r O_{oky}} - \Delta V_{ky} \cdot \overline{O_r O_{okx}})^2 \quad (2.37)$$

根據我們對於障礙物及機器人行為的第二和第三假設，可將(2.37)式整理如下：

$$\begin{aligned} \Delta V_{kx} &= V \cos(\theta_k) - V' \cos(\theta') \\ \Delta V_{ky} &= V \sin(\theta_k) - V' \sin(\theta') \\ \overline{O_r O_{okx}} &= \overline{O_r O_{o0x}} - \left(\sum_{i=0}^{k-1} [V \cos(\theta_i) - V' \cos(\theta')] t_{con} \right) \\ \overline{O_r O_{oky}} &= \overline{O_r O_{o0y}} - \left(\sum_{i=0}^{k-1} [V \sin(\theta_i) - V' \sin(\theta')] t_{con} \right) \end{aligned} \quad (2.38)$$

其中，為 θ' 障礙物的朝向角， θ_i 為機器人經第 i 次控制後的朝向角。

經由上述推論，在已知障礙物初始狀態(包含半徑，初始位置以及初速)的情況下，我們可以利用(2.37)式及(2.38)式，以 θ_i 為變數，經多次迭代，判斷在 k 次控制內，機器人是否可以離開碰撞區域。

第三章

系統實現

我們利用本實驗室所開發的被動式行動輔助機器人『i-Go』作為實驗平台，其外型如圖3.1所示。i-Go為一多功能智慧行動輔助機器人，具有靜態避障、重力補償、使用者意圖辨識和以被動的方式導引使用者到欲到達的目標位置等功能，其架構如圖3.2所示。本論文將提升其避障能力以閃避動態障礙物，並結合導引功能，發展出一套動態避障導引系統。此系統的計算核心是採用戴爾(Dell) Vostro 筆記型電腦，因其計算速度快，且程式記憶體遠大於一般晶片，此外還可提供與人互動的人機介面，增加使用者操作上的便利性。藉由第二章所規劃的動態避障導引演算法，當作控制器的核心，根據i-Go的位置、速度和前方障礙物的距離及速度資訊，以及使用者的推力資訊，即時計算合宜煞車力矩，達到避障導引的功效。

i-Go的位置及速度的資訊是透過軸編碼器將資料傳到PIC晶片；人的推力資訊則是透過兩軸力感應器，經過放大電路和PIC晶片內建10bits AD轉換得到；前方障礙物的資訊則可透過雷射感測器偵測得知。電腦每經過一個取樣時間，就會透過RS232擷取PIC晶片上的資料，並整合透過USB傳來的雷射感測器資料，算出適當的煞車力矩後，傳送給PIC。PIC晶片根據煞車力矩與電壓關係，輸出PWM電壓訊號，再透過RC充放電，轉換成類比電壓訊號。但因i-Go使用的伺服煞車器是以電流控制，故我們透過Wonder Box Device Controller將電壓訊號轉換成相對應的電流訊號，輸入到伺服煞車器，以控制其輸出的煞車力矩。



圖3.1 行動輔助機器人i-Go外觀

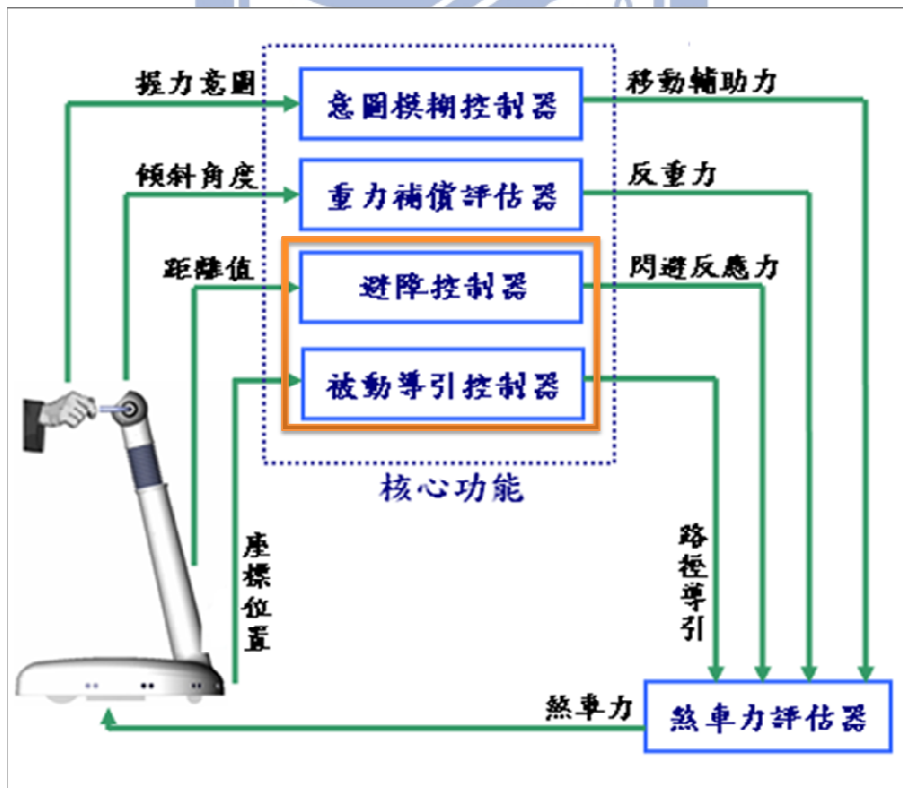


圖 3.2 i-Go 系統架構圖

3.1 硬體架構

i-Go 硬體架構如圖 3.3 所示，計算核心是戴爾(Dell) Vostro 筆記型電腦，主要用來處理演算法和提供與人互動之人機介面。我們用一個兩軸力感應器得到人向前的推力資訊；透過一個雷射感測器取得障礙物與 i-Go 的距離及其速度資訊；並在左右兩輪各裝置一顆軸編碼器，以即時得知 i-Go 的位置及速度資訊。

雷射感測器可直接透過 USB 與電腦進行通訊，以即時得到障礙物距離及其速度資訊。兩軸力感應器和軸編碼器則都是接到同一顆 PIC 晶片進行處理，此外這顆晶片也負責輸出 PWM 電壓訊號到伺服煞車器端，調變煞車力矩。PIC 晶片與電腦間則是透過 RS232 進行通訊。



圖 3.3 i-Go 硬體架構圖

3.1.1 周邊控制晶片 PIC18F4520

在周邊控制晶片方面，我們採用由美國Microchip公司所開發的PIC單晶片，型號是PIC18F4520。其為一款具Harvard架構的8位元單晶片，共有44個接腳，腳位圖如圖3.4所示，採用精簡指令架構(RISC)，共只有75個指令，最高工作時脈可達40MHz。PIC18F4520的外觀如圖3.5所示，系統架構如圖3.6所示。

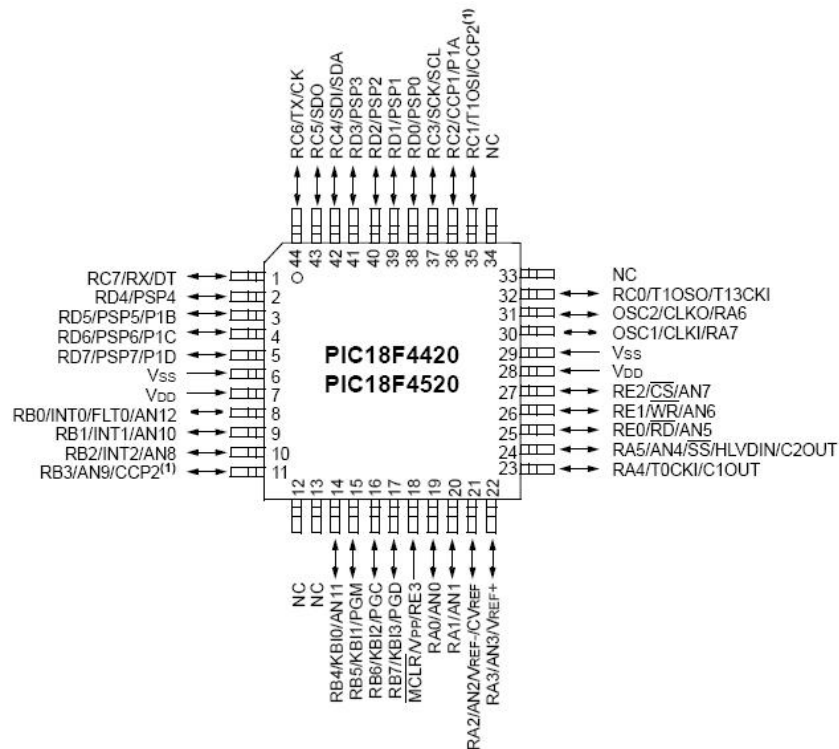


圖3.4 PIC18F4520 單晶片微控制器接腳圖[29]



圖 3.5 PIC18F4520 外觀

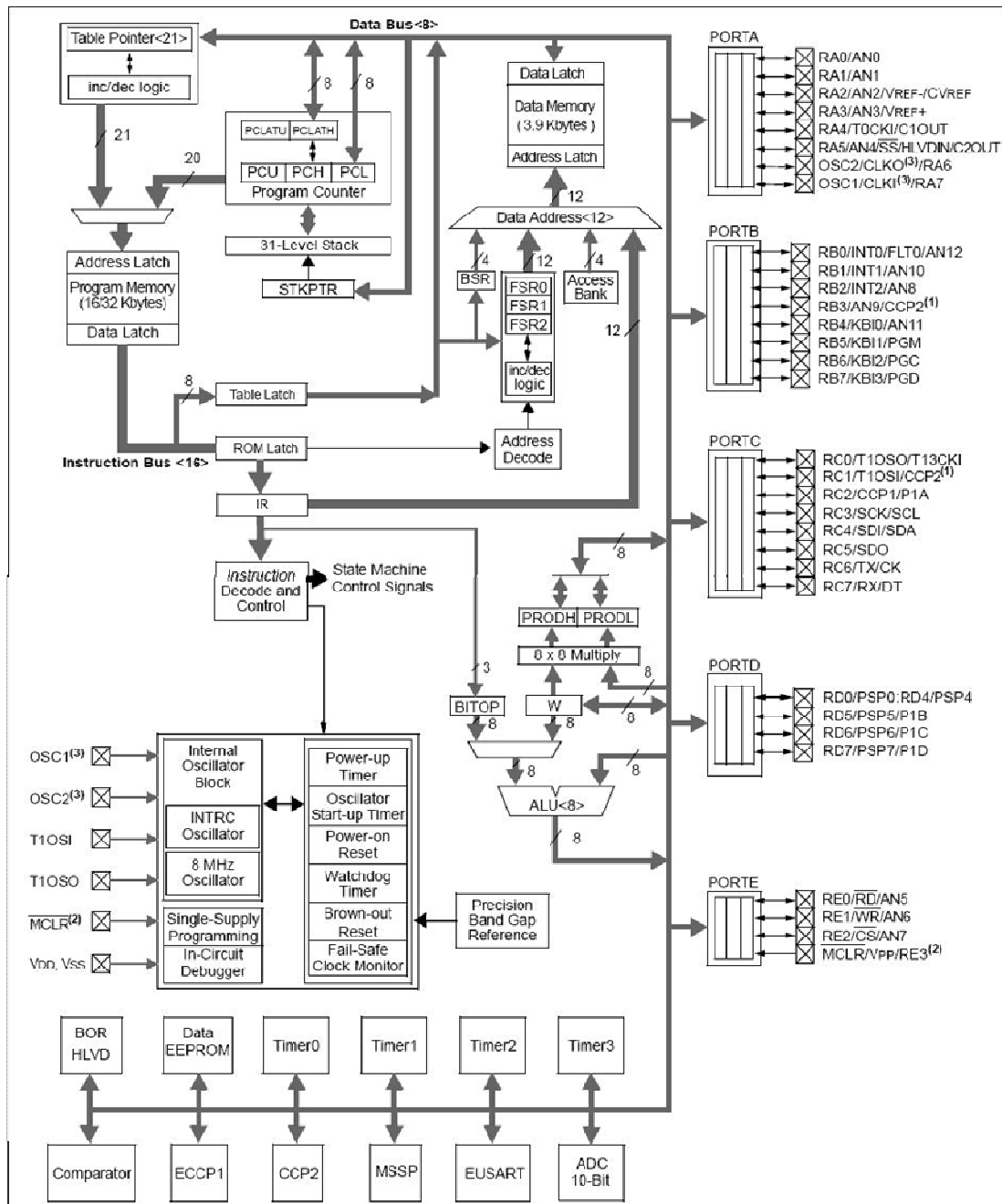


圖3.6 PIC18F4520 微控制器系統架構圖[29]

PIC18F4520單晶片微控制器提供了許多週邊功能，可讓使用者依其目的規劃使用，以下列出PIC18F4520單晶片微控制器所提供的週邊功能：

- (1) 33個中斷源及兩個高低優先權中斷向量；
- (2) 33個數位輸入輸出接腳；
- (3) 具有8/16位元可預先設倍率(Prescaler)的8/16位元計時或計數器(Timer0)；

- (4) 具有可預先設倍率的16位元計時或計數器(Timer1及Timer3)、於休眠時(Sleep mode) Timer1及Timer3可以藉由外部的振盪器或時脈進行上數的計數功能；
- (5) 8位元的Timer2計時或計數器，具有一個週期暫存器，具預先可設倍率以及事後可設倍率(Postscaler)功能；
- (6) 兩個捕捉(Capture)、比較(Compare)以及脈波可調變(Plus Width Modulation: PWM)模組：捕捉為16位元，解析度為12.5奈秒；比較為16位元，解析度為200奈秒；脈波可調變的解析度為10位元；
- (7) 13組10位元的多通道類比轉數位(Analog to Digital)轉換器；
- (8) 具有9位元位址偵測之通用同步非同步接收及傳送埠(Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter: USART)；
- (9) 同步的串列埠(MSSP)模組具有列串週邊界面(SPI)主模式(Master Mode)以及I2C的主從模式(Master/Slave)。

3.1.2 伺服煞車器

在煞車系統方面，我們採用RD-2087-01伺服煞車器，為LORD公司所製作的旋轉式煞車器，規格架構如圖3.7所示。其系統架構中有一個置於磁黏滯液體中的轉動鋼盤，環型電磁線圈產生煞車阻尼所需的磁場，磁黏滯液體以剪力方式產生黏滯阻尼力，最大輸入電流為1.5 A，工作電壓為12-24 Volts，最大輸出力矩為4 Nm，經由齒輪比將輸出力矩放大至後輪為8 Nm，其輸入電流與輸出力矩關係如圖3.8所示，反應時間可達10~30 ms。由於伺服煞車器是以電流為輸入控制訊號，而單晶片PIC18F4520輸出為PWM電壓訊號，在伺服煞車器與單晶片PIC之間，需要透過電壓轉換成電流裝置—Wonder Box Device Controller作為轉換的橋梁，其外觀如圖3.9所示，最大輸出電流為2A，輸入電壓與輸出電流關係如圖3.10所示。

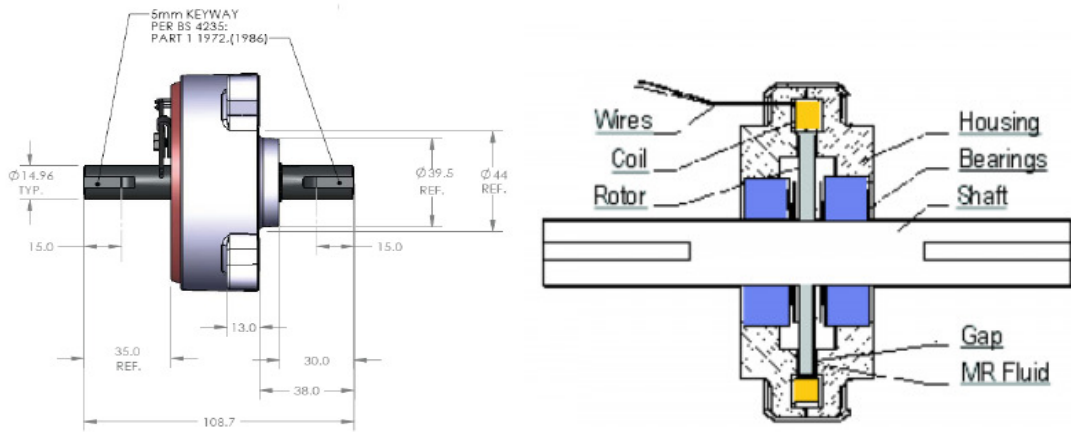


圖 3.7 RD-2087-01 伺服煞車器規格圖[30]

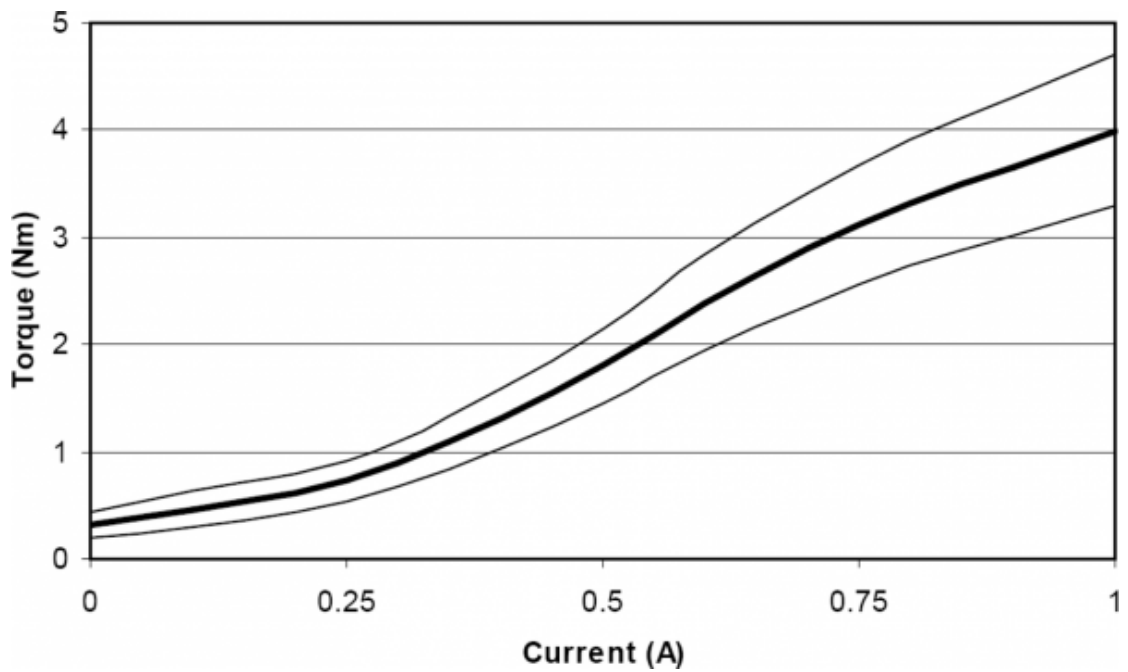


圖 3.8 RD-2087-01 輸入電流與輸出力矩關係[30]



圖 3.9 Wonder Box 裝置控制器

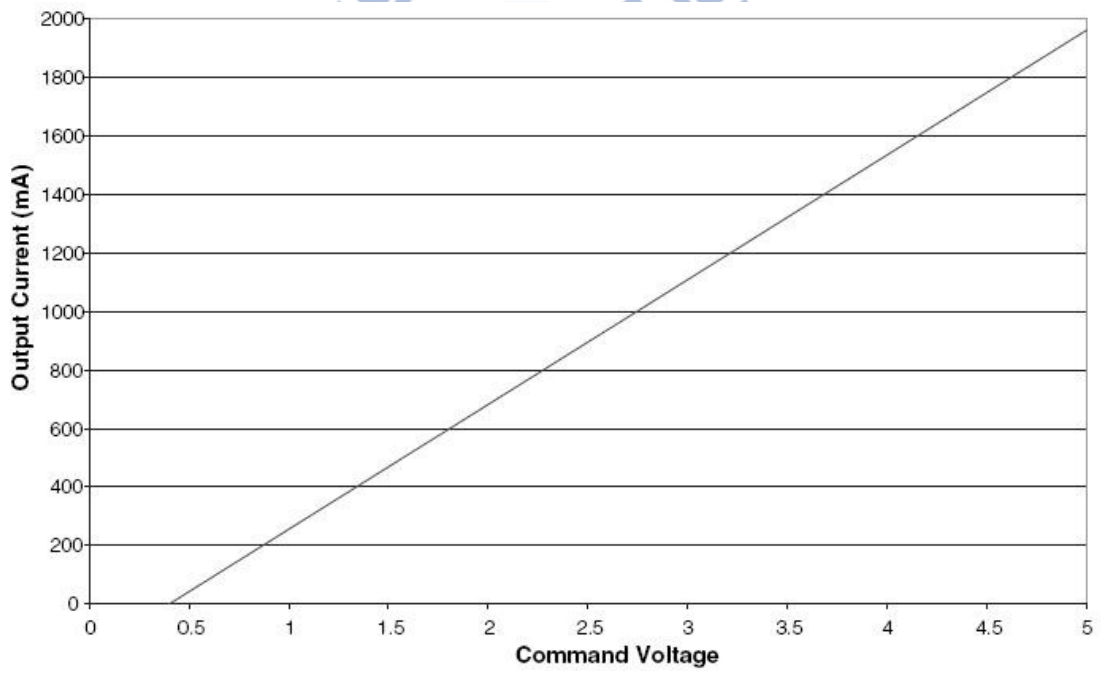


圖 3.10 Wonder Box 輸入電壓與輸出電流關係[30]

3.1.3 兩軸力感應器

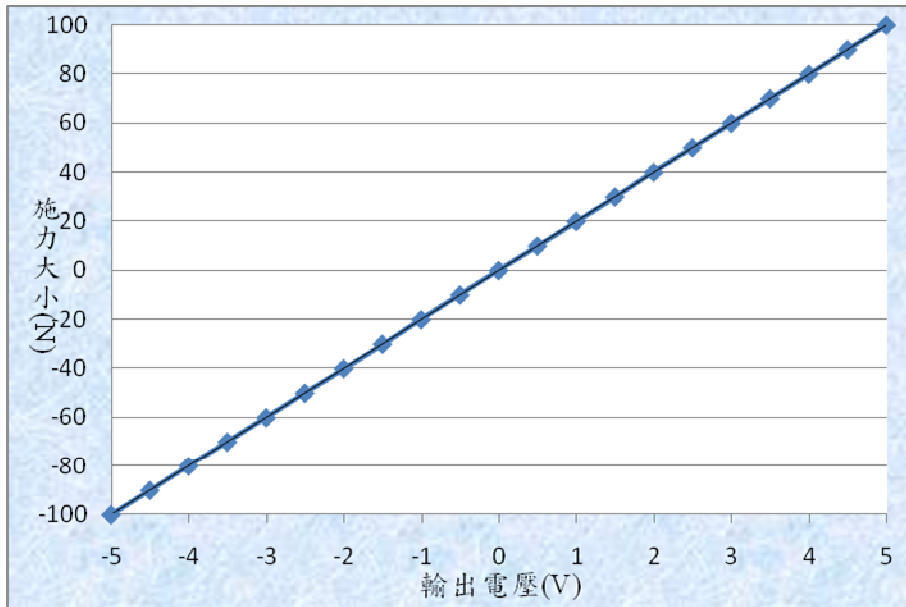
我們利用兩軸力感應器來擷取人的推力資訊，其外觀如圖3.11所示，為一兩軸應變規力感應器。兩軸力感應器可以量測出人施予i-Go往前的推拉力及旋轉力矩，透過訊號擷取卡(如圖3.12所示)，再經PIC晶片AD轉換成電壓訊號。在本實驗是過去的研究中，已證明施予力與力矩對應到電壓訊號的關係皆為線性，如圖3.13(a)-(b)所示，在施力與電壓訊號的對應方面，為 $\pm 100\text{ N}$ 對應到 $\pm 5\text{ V}$ ；而旋轉力矩與電壓訊號的對應方面，則是 $\pm 10\text{ Nm}$ 對應到 $\pm 5\text{ V}$ 。即若施力的電壓訊號為 2.5 V 時，對應到的力就是 50 N 。但值得注意的是，PIC晶片能接收的電壓訊號只能介於 $0\sim 5\text{ V}$ ，故我們必須把訊號都轉換到 $0\sim 5\text{ V}$ 間。經過人為測試，使用者正常使用的最大推力與扭力都介於 $\pm 8\text{ V}$ 之間，除非刻意猛力推拉，不然不會超過此區間，故我們設計一個簡單電路，如圖3.14所示，使得最後輸出的電壓訊號會落在 $0\sim 5\text{ V}$ 間。首先透過加法器，直接加上 8 V ，使訊號介於 $0\sim 16\text{ V}$ 之間，然後再串接上乘法器，乘上 $5/16$ 的倍數，使得訊號落在 $0\sim 5\text{ V}$ ，實體電路如圖3.15所示。



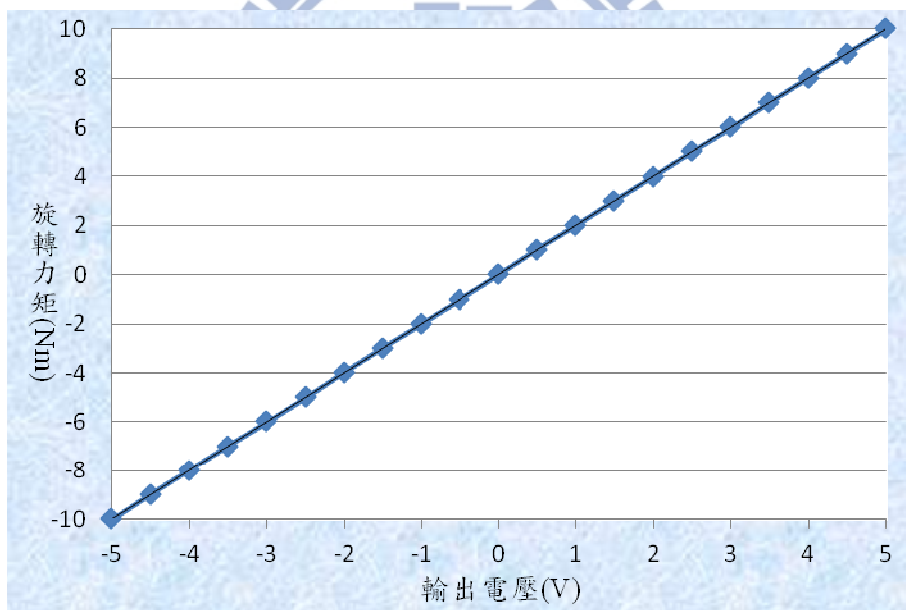
圖 3.11 兩軸力感應器



圖 3.12 兩軸力感應器訊號擷取卡



(a) 輸出電壓與施力大小關係



(b) 輸出電壓與旋轉力矩關係

圖 3.13 兩軸力感應器輸出電壓與施力大小關係和輸出電壓與旋轉力矩關係

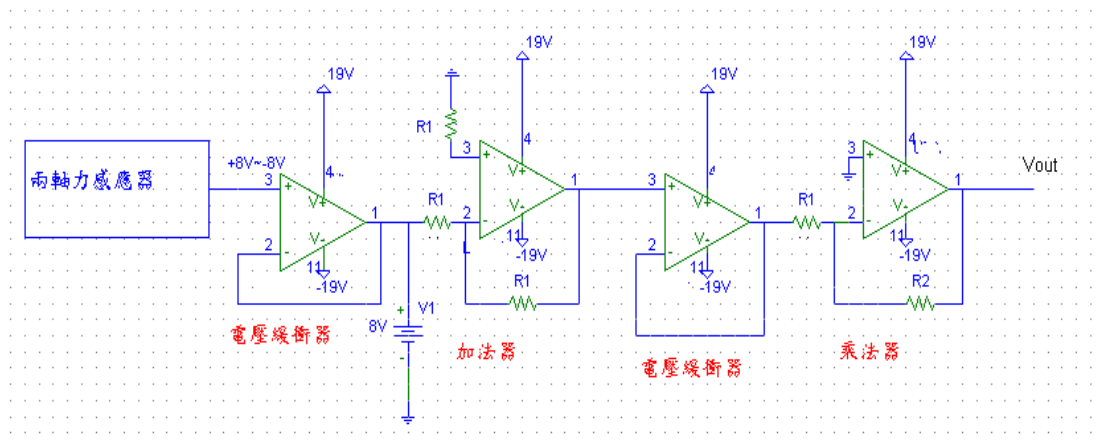


圖 3.14 修正電路

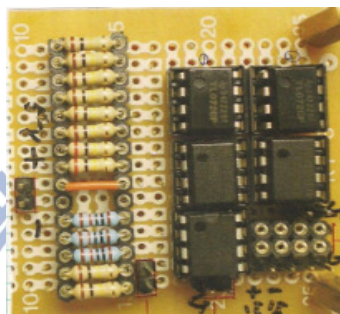


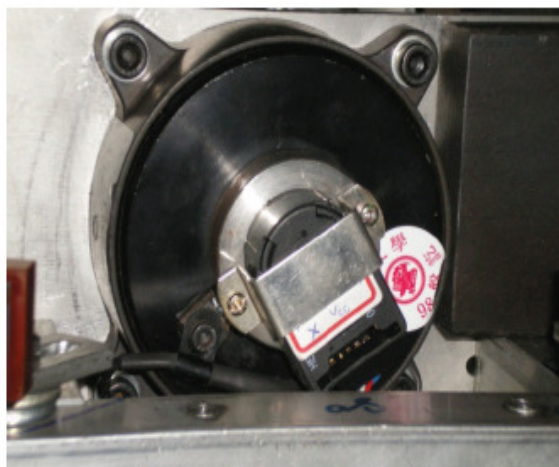
圖 3.15 訊號轉換實體電路

3.1.4 軸編碼器

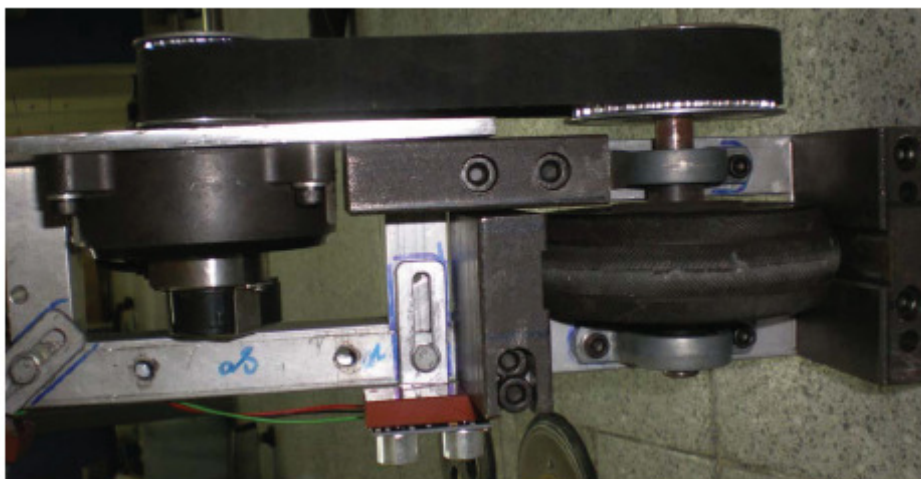
我們需要透過軸編碼器即時得知i-Go的位置及速度資訊，但由於伺服煞車器上並沒有軸編碼器(Encoder)的功能，所以必須另外選用軸編碼器，並且加以改裝，以符合i-Go的架構設計。我們選用Faulhabere公司所生產的軸編碼器，其型號為HEDS5500 A，額定電壓為4.5~5.5 V，解析度500 lpr(lines per revolution)。圖3.16(a)為軸編碼器實體圖，加裝於伺服煞車器上，如圖3.16(b)所示。改裝後軸編碼器和伺服煞車器外側的轉軸相連接，如圖3.16(c)所示，而伺服煞車器內側的轉軸則是由皮帶輪來帶動i-Go的後輪。其中，為了放大煞車力矩，我們設計伺服煞車器的皮帶輪和i-Go後輪的皮帶輪兩齒輪直徑比為1：2，因此i-Go後輪轉一圈，可以達1000 lpr。



(a) 軸編碼器實體



(b) 軸編碼器加裝於伺服煞車器



(c) 伺服煞車器、軸編碼器、皮帶輪與後輪配置

圖 3.16 (a)軸編碼器實體圖，(b)軸編碼器加裝於伺服煞車器，和(c)伺服煞車器、軸編碼器、皮帶輪與後輪配置

3.1.5 雷射感測器

我們透過雷射感測器得知前方障礙物與i-Go的距離及其速度資訊，採用日本Hokuyo公司所生產的Scanning Laser Range Finder，型號為URG-04LX-UG01，外型如圖3.17所示。雷射感測器以波長785 nm的紅外線作為感測光源，當光波與前方障礙物發生作用時，會產生相位變化，雷射感測器可經由光波相位變化的程度，推算出其與前方障礙物的距離，此種感測方式可將障礙物的顏色及反射率的影響降至最低，以獲得更穩定的量測資訊。雷射感測器是透過USB2.0與電腦進行傳輸，並取得5 Vdc±5%的工作電壓，其偵測的角度範圍為前方240°，距離為20mm-4000mm，如圖3.18所示。每次掃描時間為0.1秒，共可接收683筆距離資訊，故角度解析度可達0.36°。

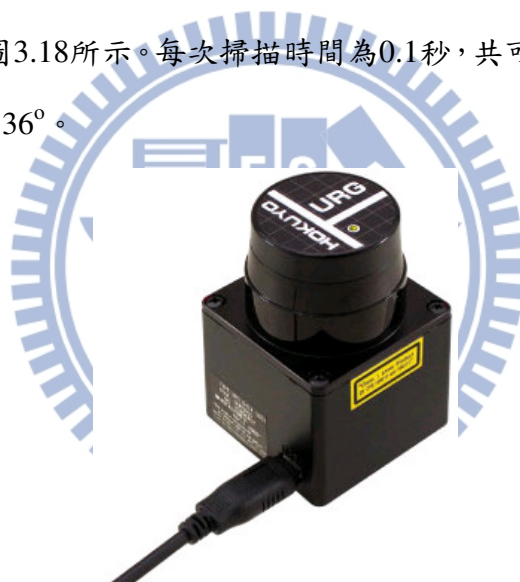


圖3.17雷射感測器實體圖

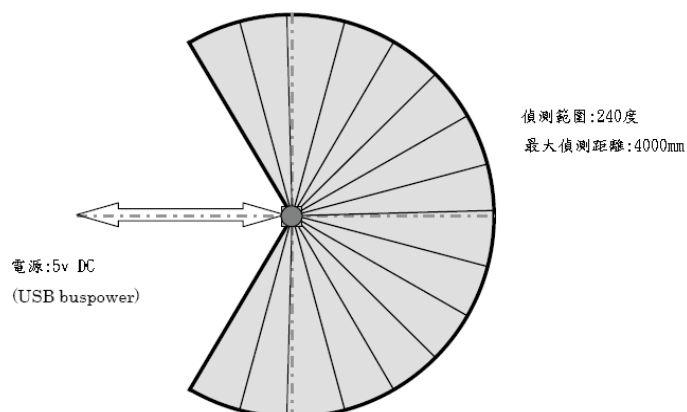


圖 3.18 雷射掃描示意圖[31]

第四章

模擬與實驗

本章將針對論文中提出的被動式動態避障導引演算法進行模擬與實驗，並且對避障的效果進行探討。為了驗證演算法可成功地閃避移動中的障礙物並導引使用者到達目的地，我們先利用 Matlab 軟體對演算法進行模擬，並找出演算法所能閃避的動態障礙物其規格範圍，如大小及速度限制等，模擬結果將呈現在 4.1 節；接著，我們實際將演算法運用在 i-Go 上進行實驗，實驗結果和分析將呈現在 4.2 節。

4.1 模擬

在進行實驗前，必須先確定控制演算法無誤，以下三節將會透過 Matlab 模擬來驗證演算法可針對不同運動模式的障礙物進行閃避，分別為靜態、平行移動和垂直移動等三種，同時針對不同的運動模式，找出可閃避障礙物的規格範圍，以制定系統的安全範圍。在模擬前，我們必須輸入 4 個 i-Go 模擬參數，設定如表 4.1 所示：

表 4.1 i-Go 模擬參數設定

| 兩輪距離一半(b) | 輪子半徑(r) | 質量(m) | 轉動慣量(I) |
|-----------|---------|-------|------------------------|
| 0.34m | 0.0635m | 50kg | 11.56kg-m ² |

接著，我們觀察使用者在推動機器人的施力情形，發現是一個隨時間些微浮動的訊號，因此我們模擬時設定震盪的幅度為平均施力的十分之一，即 $ns = 0.1$ ，因此，在假設等速度情況下，我們將人的施力模擬如(4.1)式所示：

$$F = fm \times (1 + ns \times \sin(\frac{\pi}{2}t)), fm = 16N, ns = 0.1 \quad (4.1)$$

在設定完人的施力作為機器人前進的動力源後，我們進行感測器資訊的模擬，在機器人前方 180° 的範圍內共取 517 個感測點，角度解析度約為 0.35° ，最遠距離設定為 4m，系統取樣時間則設定為 0.25 秒。最後，考量輔助時的安全性以及順應性，我們對機器人的速度及旋轉角度進行限制，最高速設定為 0.5m/s，而最大轉角則定為 $30^\circ/s$ ，希望能以安穩平順的方式，導引使用者閃避動態障礙物並抵達目的地。

模擬流程如圖 4.1 所示，每經過一個取樣時刻，演算法根據目前的 i-Go 狀態及障礙物資訊，先進行碰撞狀態分析，若發生碰撞則提前結束模擬；若沒有發生碰撞，則結合目標點資訊，算出一個合宜的煞車力矩，傳入 i-Go 的動態方程式，模擬出下一時刻 i-Go 的狀態，包含位置、朝向角、速度和角速度等資訊。最後，檢驗 i-Go 是否抵達目標位置，若無，則更新 i-Go 及障礙物資訊，再重複上述流程直到抵達目標位置，即完成一次模擬。以下，我們將針對上述三種障礙物不同的運動模式(靜態、平行移動和垂直移動)，調整對應的障礙物參數作為變數，來檢驗系統能閃避障礙物的規格範圍。

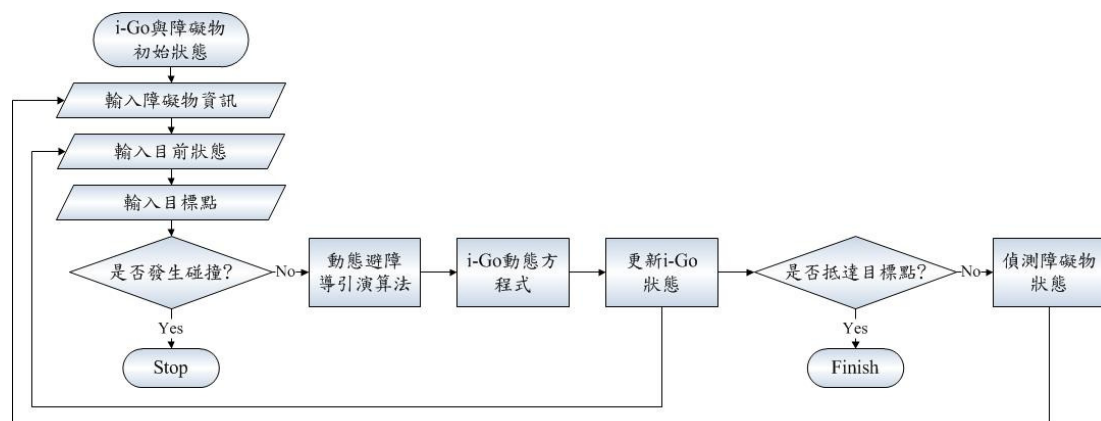


圖 4.1 模擬流程圖

4.1.1 靜態障礙物動態避障導引模擬

本節是模擬使用者在行走時，系統突然偵測到路徑前方有一靜止的障礙物，在不影響使用者的前提下，我們希望保持使用者習慣之速度，只進行朝向角的調整。然而，因為 i-Go 本身機構對轉角有所限制，以及對於順應性的考量，我們將最大轉角定為 30° 來進行模擬，也因此對於能閃避的障礙物大小將有所限制。以下，我們將以障礙物半徑為變數，嘗試模擬家庭中常見的靜態障礙物，經過多次模擬，以找出系統能閃避的靜態障礙物大小規格。

為了減少其他環境障礙物的干擾，我們模擬一個 $19 \times 19 \text{m}^2$ 的廣場，如圖 4.2(a) 所示，欲閃避的障礙物在 (0,7) 的位置以藍色圓形表示，其半徑大小從 0.3m 開始，之後每次模擬逐次增加；而 i-Go 則依照表 4.1 的模擬參數來建立模型，並以藍色「 \square 」字形結構表示，其初始位置為 (0,0)，朝向角為 90° ，開始為靜止狀態，之後速度隨人的施力而逐漸增加，並往目標位置 (0,16) 前進。其中，雷射感測器的偵測半徑為 4m，範圍以 i-Go 前方的紅色圓弧表示，其上的紅色圓點為障礙物開始進入的位置，而障礙物偵測的結果，則會在右上方的紅色圓弧中呈現，如圖 4.2(b) 所示，右上角的藍色圓形為偵測到障礙物的大小及相對 i-Go 的位置。此外，我們在第二章中提到 Artificial Potential Field 演算法的四個施力點，將分佈在障礙物周圍以紅色表示引力，以藍色表示斥力，而演算法算出的導引點，則以 i-Go 前方的黑色圓圈表示。最後，當機器人抵達目標位置即完成模擬，如圖 4.2(c) 所示，我們以綠色線條紀錄其軌跡。模擬參數整理如表 4.2 所示，其中，障礙物半徑為變數 0.3m 開始，之後逐漸放大。

表 4.2 靜態障礙物動態避障導引模擬參數設定

| | 起始位置 | 起始半徑 | 朝向角 | 初速 | 目標位置 |
|------|-------|------|------------|----|--------|
| i-Go | (0,0) | 0.36 | 90° | 0 | (0,16) |
| 障礙物 | (0,7) | 0.3 | 0° | 0 | 無 |

(單位：公尺)

接下來，我們針對模擬結果進行分析，整張圖可分成五個部分，分別為：起始狀態、避障狀態、完成避障導引、左右輪煞車力矩和 i-Go 之狀態變數等，其中，主要觀察重點為避障軌跡。模擬中，我們故意將障礙物設置在 i-Go 與目標位置的連線上，而由圖 4.2(c)和圖 4.3(c)中 i-Go 的避障軌跡可看出，不論障礙物的大小、位置，演算法都可導引使用者在平順的路徑中閃避障礙物，並準確地抵達目標位置，證明我們增加施力點以克服局部最佳解的方法是可行的。接著，我們對 i-Go 的狀態變數進行分析，由圖 4.2(e)和圖 4.3(e)可看出，i-Go 的位置和朝向角的變化都十分平順，速度也可維持在最高速 0.5m/s 上，約為正常人徐步的速度。在角速度方面，整體變化也十分平順，只有在閃避障礙物時有些震盪，可能是因為在閃避過程中，演算法希望以最小的旋轉角度完成閃避，而對朝向角進行逐步修正的關係。

最後對照圖 4.2(d)和圖 4.3(d)的左右煞車力矩圖，除了因圖 4.3 之障礙物半徑較大，使得旋轉角度較大，而須施以較大的煞車力矩外，兩者趨勢十分相似。一開始調整左輪煞車力大於右輪，使得 i-Go 往左邊旋轉，從障礙物的左邊進行閃避。到了約 12 秒時，i-Go 已抵達障礙物的左下方，右輪煞車力矩開始增加大於左輪煞車力，使 i-Go 開始往右沿著障礙物輪廓完成閃避，到了 16 秒左右時，i-Go 到達障礙物的左方頂點，故增加左輪煞車力將朝向角往左回正，直到約 18 秒後，i-Go 完成閃避任務開始導引使用者往目標位置前進。

經上述分析，可證明演算法能順應使用者使用 i-Go 時的行走狀態，如速度和施力等，安全地導引使用者閃避前方的靜態障礙物，並準確地抵達目標位置。而經多次模擬後，我們測量出系統可閃避的靜態障礙物半徑最大為 1.2m，對照家中常見的家具規格發現，除了最大的 L 座沙發(最大寬度約 3m)外，其他如一般四人座沙發(最大寬度約 2.3m)、三人座沙發(最大寬度約 1.9m)、雙人床(最大寬度約 2.1m)等，都可順利閃避，保障使用者的居家安全。

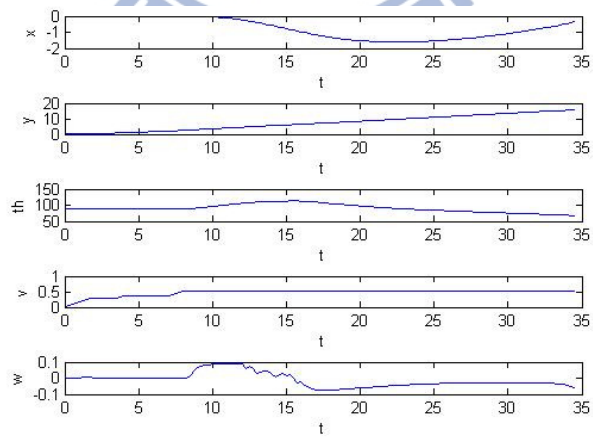
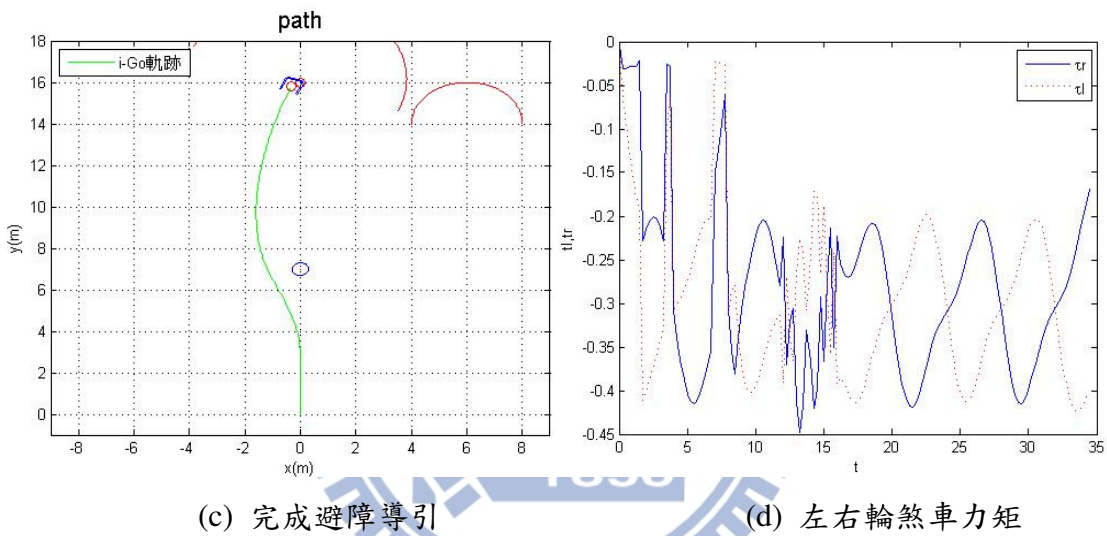
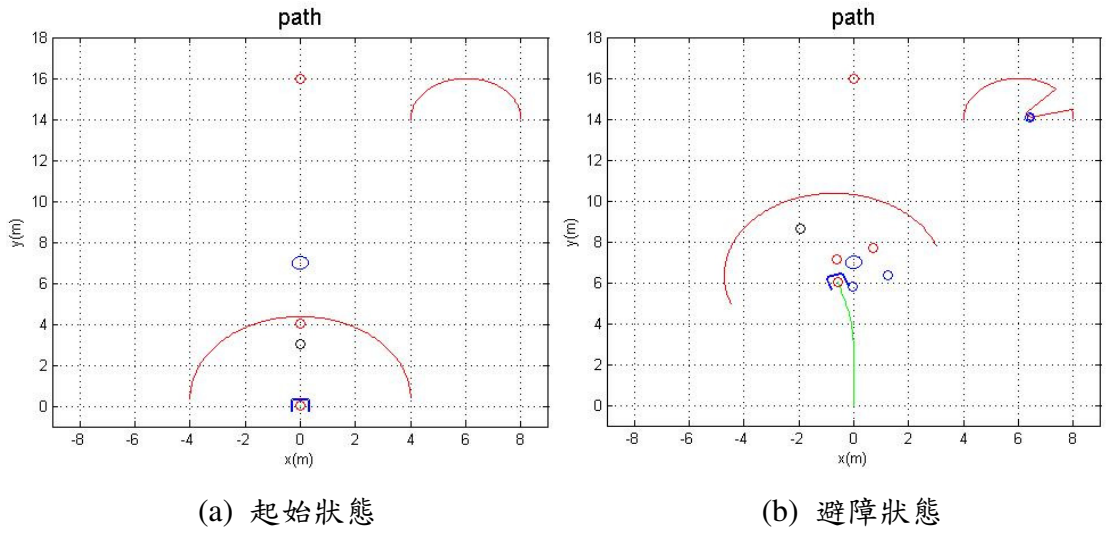


圖 4.2 靜態障礙物之動態避障導引模擬(障礙物半徑：0.3m)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

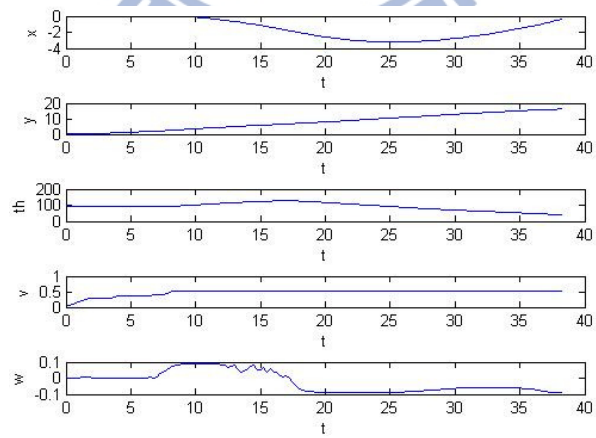
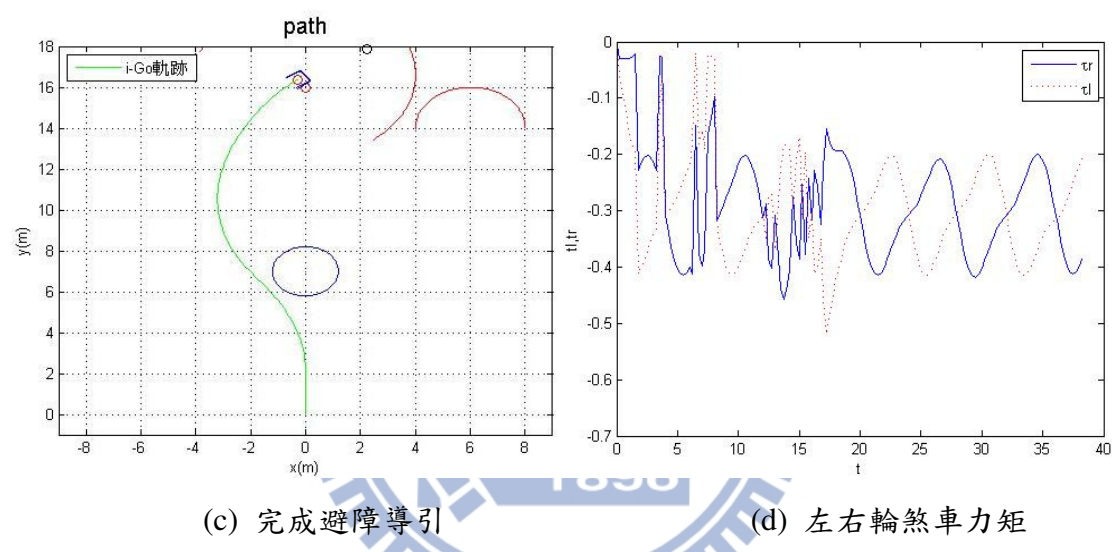
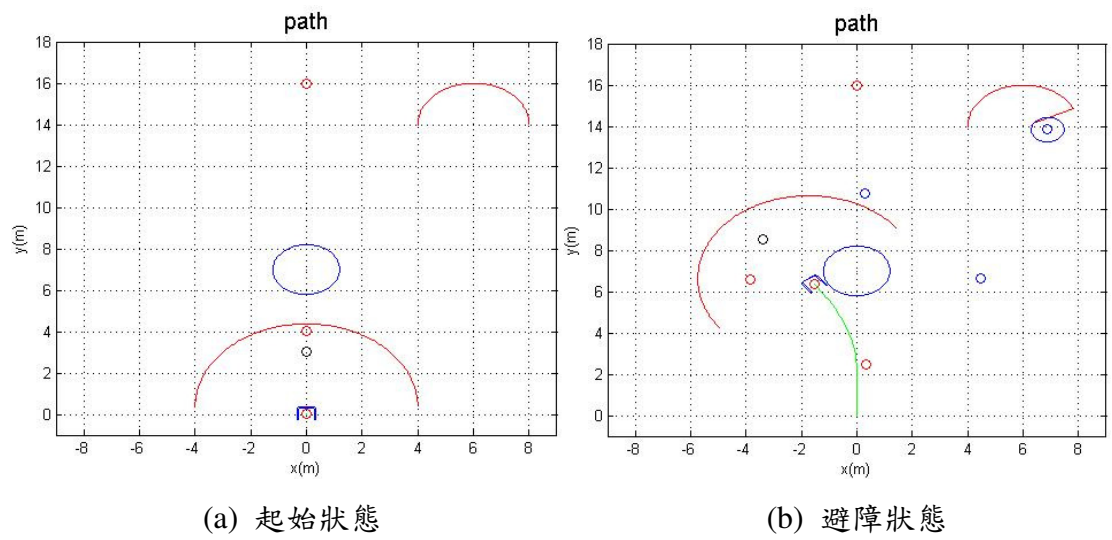


圖 4.3 靜態障礙物之動態避障導引模擬(障礙物半徑：1.2m)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

4.1.2 平行移動障礙物動態避障導引模擬

接下來我們開始針對具有移動能力之動態障礙物，進行系統閃避能力的模擬，我們將常見的移動方式依相對 i-Go 的行進方向分為平行移動和垂直移動兩種，以下分兩節進行模擬。本節是模擬使用者在行走時，系統突然偵測到路徑前方有一平行 i-Go 行進方向移動的動態障礙物，而與前一節的假設相同，我們希望在保持使用者習慣之速度下，只進行朝向角的調整來閃避障礙物。然而，因為最大轉角的限制，再加上 i-Go 本身無法提供動力源來引導使用者進行閃避，使得系統能閃避的障礙物在大小及速度上會有所侷限。

在考量居家環境後，我們認為「人」是家中最常見的動態障礙物，因此設定障礙物大小與人相似，約為寬度 0.6m(即半徑 0.3m)來進行模擬。接著，我們對障礙物的速度方向進行設定，其中，若障礙物速度方向與 i-Go 同向，則可能有兩種情況：若障礙物速度比 i-Go 快，則不會發生碰撞，故不需要進行閃避；而若障礙物速度比 i-Go 慢，則可近似為靜態狀態，而其結果已在前一節討論過，故我們將障礙物的速度方向固定在與 i-Go 行進方向相反的方向上，以速度大小為變數，經過多次模擬，以找出系統能閃避的平行移動障礙物之速度範圍。

模擬環境與前一節相同，只對障礙物狀態進行調整，如圖 4.4(a)所示，我們將欲閃避動態障礙物的初始位置設定為(0,7)，半徑大小為 0.3m，並以藍色圓形表示，其朝向角固定為 -90° 與 i-Go 反向。其中，由於雷射感測器的範圍限制，只有當障礙物進入此範圍時，才能測得障礙物資訊並開始進行閃避，故我們設定障礙物一開始為靜止狀態，而當障礙物進入雷射偵測範圍時(即通過圖 4.4(a)中雷射偵測半徑上的紅點)，才開始進行等速運動，其移動速度從 0.1 m/s 開始模擬，之後每次模擬逐次增加，最後軌跡用紅色線條紀錄，圖 4.4(c)所示。我們將模擬參數整理成表 4.3，其中，設定障礙物初速為變數，由初速 0.1m/s 開始，之後隨模擬逐次加快。

表 4.3 平行移動障礙物動態避障導引模擬參數設定

| | 起始位置 | 半徑 | 朝向角 | 初速 | 目標位置 |
|-------------|-------|------|------|-----|--------|
| i-Go | (0,0) | 0.36 | 90° | 0 | (0,16) |
| 障礙物 | (0,7) | 0.3 | -90° | 0.1 | 無 |

(單位：公尺)

接著，我們針對模擬結果進行分析，呈現方式分成五個部分，分別為：起始狀態、避障狀態、完成避障導引、左右輪煞車力矩和 i-Go 之狀態變數等，其中，主要觀察重點為避障軌跡。由圖 4.4(c)和圖 4.5(c)中 i-Go 的避障軌跡可看出，在一定的速度範圍內，演算法可成功導引使用者在平順的路徑中閃避迎面而來的障礙物，並準確地抵達目標位置，對照圖 4.4(e)和圖 4.5(e)的 i-Go 狀態變數可發現，i-Go 位置和朝向角的變化曲線都十分平滑；速度也可穩定維持在最高速 0.5m/s 上；角速度方面，整體變化與閃避靜態障礙物時相似，只有在接近障礙物時會有些許震盪發生，而震盪情形則隨著障礙物速度的增加而變小，推測可能是因為避障時間縮短使得朝向角修正次數減少的關係。

最後，我們對圖 4.4(d)和圖 4.5(d)的左右煞車力矩進行分析，因兩者避障軌跡皆與圖 4.2(c)中閃避靜態障礙物時相似，故兩者煞車力輸出的趨勢也與圖 4.2(d)十分相似，均符合路徑上各時刻的轉向變化。其中，在障礙物速度較快的情況下進行模擬時，i-Go 靠近障礙物時輸出的煞車力矩震盪也較小，如圖 4.4(d)和圖 4.5(d)中約 12 到 15 秒的範圍所示，推測原因與前述角速度震盪程度降低的原因相同。

經由上述討論，可證明演算法能針對一定速度範圍下迎面而來的動態障礙物進行閃避，同時順應使用者使用 i-Go 時的行走習慣(如速度和施力等)，安全並準確地導引使用者抵達目標位置。經多次模擬後，我們測量出在障礙物半徑固定為 0.3m 的情況下，系統可閃避的平行移動障礙物速度最大為 0.16m/s，約略為行動不方便或中風患者的行走速度。

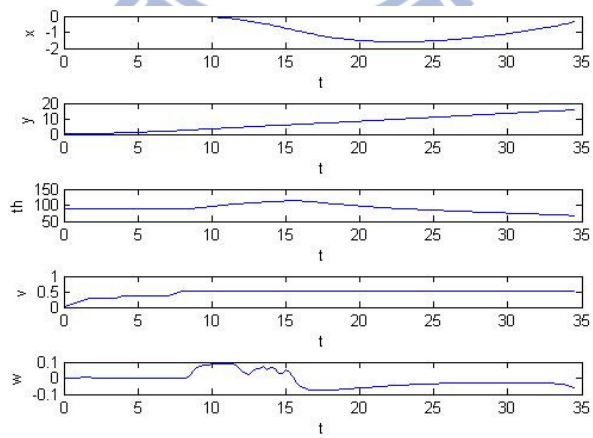
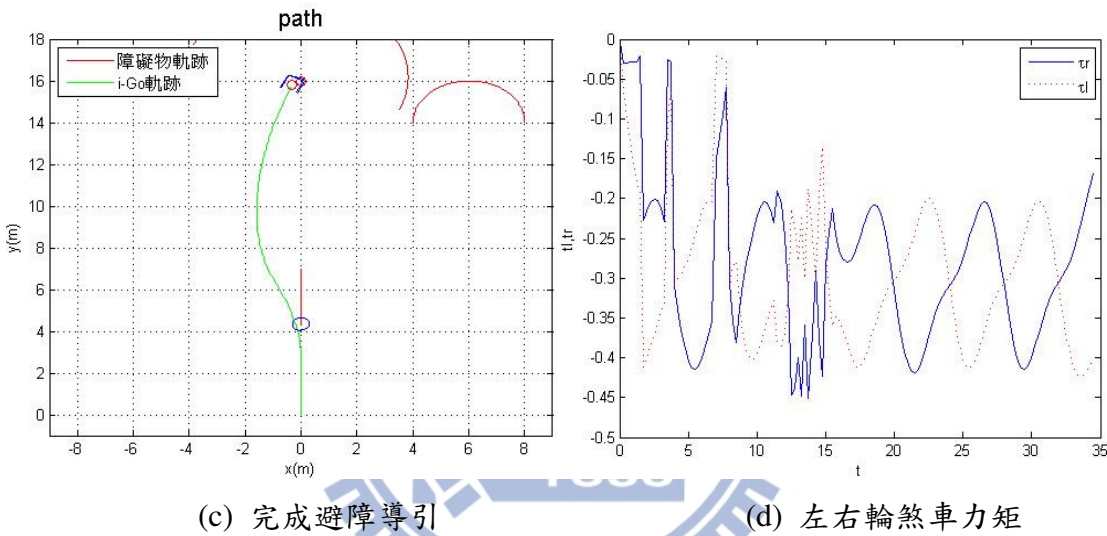
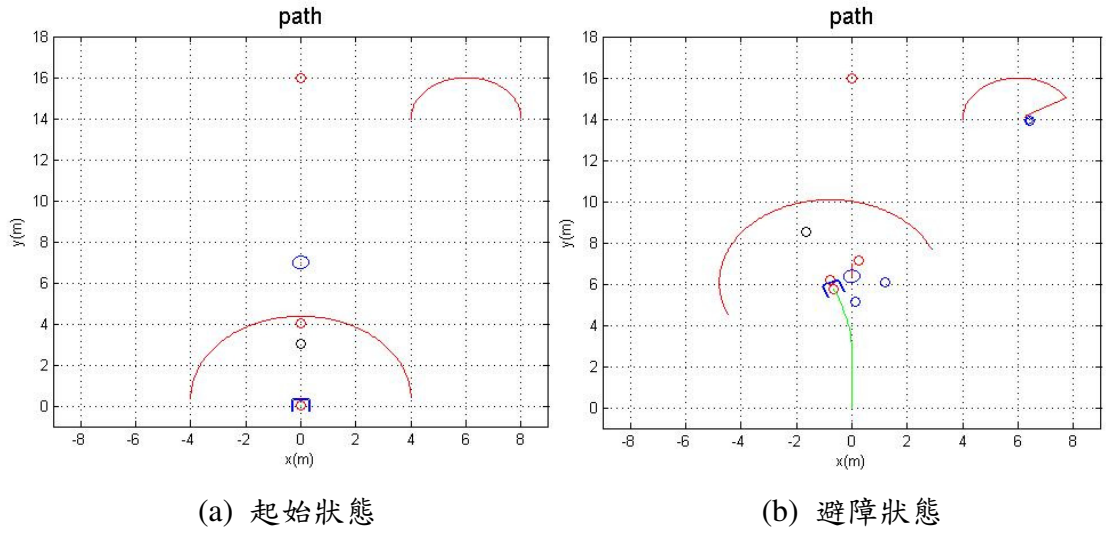


圖 4.4 平行移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.1m/s):(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

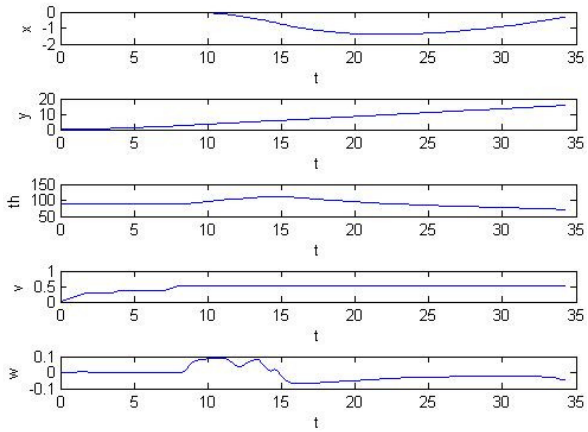
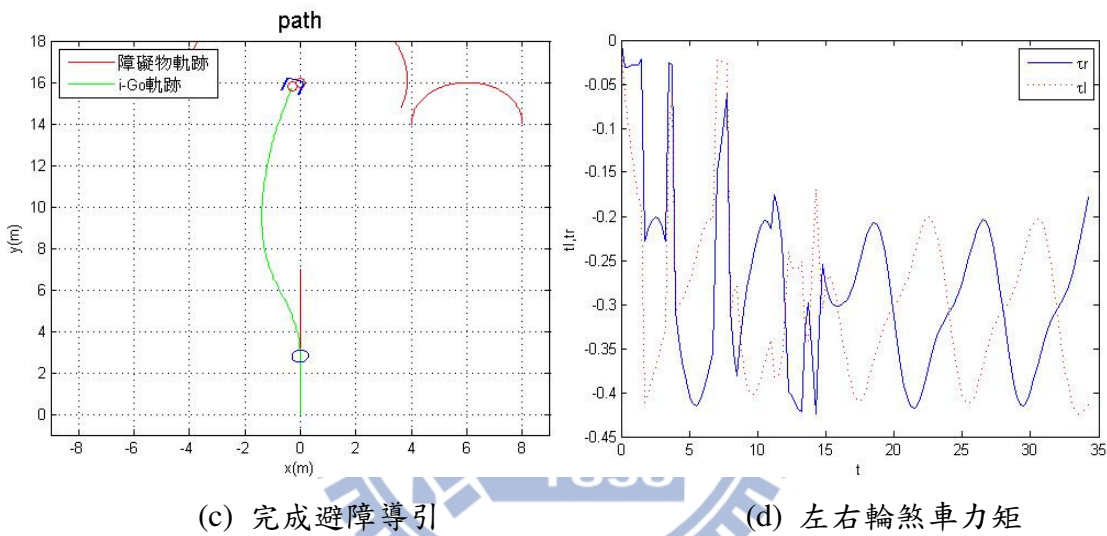
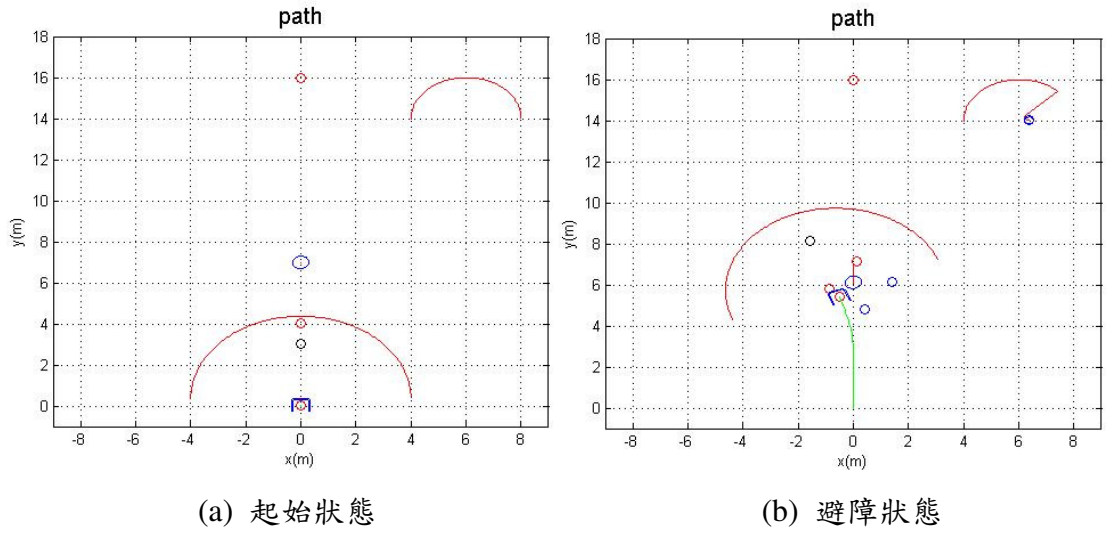


圖 4.5 平行移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.16m/s)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

4.1.3 垂直移動障礙物動態避障導引模擬

最後，我們針對垂直移動障礙物進行系統閃避能力的模擬，當使用者在行走時，系統突然偵測到路徑前方有一垂直 i-Go 行進方向移動的動態障礙物，此時，我們希望只透過調整朝向角來進行避障，並保持使用者原本行走的速度，以順應用戶的行走習慣。同時，因被動式的控制方式以及對最大轉角 30° 的限制，使得系統能閃避的障礙物有其大小及速度的侷限。

我們同樣將障礙物的大小設定為與人相似，即約為寬度 0.6m(即半徑 0.3m) 來進行模擬。接著，我們對障礙物的速度方向進行討論，在垂直 i-Go 行進方向的速度方向可分為兩種，分別為朝向 i-Go 行進方向以及遠離 i-Go 行進方向。其中，若障礙物速度在遠離 i-Go 行進路徑的方向上時，則可能有兩種情況：當障礙物速度較快時，i-Go 抵達障礙物附近後，可導引使用者輕易地從障礙物後方進行閃避，甚至在 i-Go 抵達障礙物附近前，障礙物早已離開雷射的偵測範圍，故均不會發生碰撞；而當障礙物速度較慢時，我們則可將其視為靜態障礙物，其結果已在 4.1.1 節討論過，故本節討論的障礙物速度方向固定在朝向 i-Go 行進路徑方向上。

在垂直移動障礙物的閃避任務中，除了障礙物本身的速度外，障礙物所處的位置也是需要考量的因素，因為初始位置的不同會造成可閃避的時間不同，故我們在進行模擬時，會針對障礙物與 i-Go 不同的相對位置，以速度大小為變數，經過多次模擬，分別找出該位置上系統能閃避的垂直障礙物之速度範圍。

模擬環境與前一節相同，我們只對障礙物狀態進行調整。在障礙物的初始位置方面，我們定義障礙物和 i-Go 的中心點連線與 x 軸的夾角為入射角，並以(0,3) 為中心，以雷射偵測範圍為半徑，可畫出一半圓，如圖 4.7 所示。在半圓上我們每 15° 設定一個點為障礙物的初始位置，其中，由於左右互相對稱的關係，我們只討論左邊的位置，由左至右總共有 7 點，分別表示入射角到 0° 的 90° 位置。

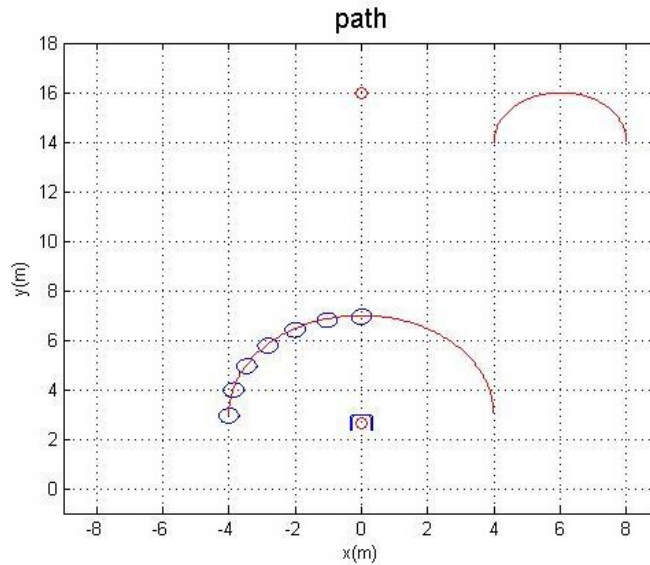


圖 4.6 垂直移動障礙物起始位置分布圖

圖 4.6 中的藍色圓形即為障礙物的位置，障礙物半徑設定為 0.3m，以藍色圓形表示，而朝向角均為 0° ，即朝向 i-Go 行進路徑的方向。其中，障礙物一開始為靜止狀態，只有當進入雷射偵測範圍時(即通過圖 4.7(b)中雷射偵測半徑上的紅點)，才開始進行等速運動。移動速度從 0.1 m/s 開始模擬，之後每次模擬逐次增加，最後軌跡用紅色線條紀錄，如圖 4.7(c)所示。我們將模擬參數整理成表 4.4，其中，設定障礙物初速及起始位置為變數，初速由 0.1m/s 開始模擬，之後逐次加快。

表 4.4 垂直移動障礙物動態避障導引模擬參數設定

| | 起始位置 | 入射角 | 半徑 | 朝向角 | 初速 | 目標位置 |
|-------------|--------------|------------|------|------------|-----|--------|
| i-Go | (0,0) | 無 | 0.36 | 90° | 0 | (0,16) |
| 障礙物 | (-4,3) | 0° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (-3.86,4.04) | 15° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (-3.46,5) | 30° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (-2.83,5.83) | 45° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (-2,6.46) | 60° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (-1.04,6.86) | 75° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |
| 障礙物 | (0,7) | 90° | 0.3 | 0° | 0.1 | 無 |

(單位：公尺)

接下來，我們針對模擬結果進行分析，每張圖可分為五個部分，分別為：起始狀態、避障狀態、完成避障導引、左右輪煞車力矩和 i-Go 之狀態變數等，其中，圖片中所記錄的障礙物速度為系統可閃避的最大或最小速度範圍。首先，我們觀察不同障礙物狀態下 i-Go 的避障軌跡，由圖 4.7(c)-4.15(c)可看出，在一定的速度範圍內，演算法可根據不同的障礙物速度，導引使用者平穩地從障礙物左邊或右邊進行閃避，並準確抵達目標位置，證明我們以四個施力點結合轉向命令的控制方式，可有效地幫助使用者進行轉向進而順利閃避障礙物，若障礙物速度較慢時，演算法可導引使用者從右邊(即障礙物前方)進行閃避；而若障礙物較快時，演算法則可導引使用者從左邊(即障礙物後方)進行避障，然而，因為障礙物起始位置的不同，而產生不同的閃避結果。

由圖 4.7(c)來看，當障礙物在入射角 0° 的位置時，不論其速度大小，都會在下一個取樣時間離開雷射感測器的偵測範圍，故 i-Go 不須對其進行避障，只有在速度太快(大於 3.16m/s)時，才會發生無可避免的追撞現象，此時為障礙物出現在該位置下的避障極限；而若速度在 3.16m/s 以下時，從圖 4.7(d)可看出，煞車力矩只有在一開始啟動加速時會有些許震盪外，一旦速度到達穩定狀態後，力矩輸出也將十分穩定，而圖 4.7(e)中的 i-Go 狀態變化也十分平穩。

若障礙物入射角慢慢從 0° 增加到 75° 時，由圖 4-8(c)-4.11(c)以及圖 4-13(c)可看出，從障礙物前方進行閃避所需的路徑逐漸加長，弧度也越來越大，但可閃避的障礙物速度範圍卻逐漸縮小。其中，若障礙物入射角為 60° 或 75° 時，速度超過一定範圍後，演算法則可成功導引使用者從障礙物後方進行閃避。我們觀察圖 4-8(e)-4.13(e)可發現 i-Go 在進行閃避時，速度均可穩定維持在 0.5m/s 上，而角度及角速度的變化也十分和緩，因此，推測可能是因為當速度在一定範圍內時，演算法都可維持原本使用者行走的速度，導引使用者從障礙物前方繞行閃避。然而，一旦障礙物速度超過此範圍時，則須系統提供動力源幫助使用者從障礙物前方加速閃避追撞，或者改為由障礙物後方進行閃避。此時，由於被動式行

動輔助機器人無法提供動力源，以及我們希望順應使用者的操作習慣，造成系統在速度及角速度的控制上有所限制，而無法完成閃避任務，直到障礙物速度大於一定範圍後，演算法才又可在順應使用者的情況下，導引使用者順利地從障礙物後方進行閃避，因此系統能閃避障礙物的速度範圍產生不連續的現象。

基於安全性的考量，我們對演算法進行以下修正：因無法提供外加動力源加速閃避，我們降低順應使用者的操作習慣，而在必要時進行減速控制，模擬結果如圖 4.16 所示。由圖 4.16(c)的避障軌跡可看出，演算法修正後，可順利導引使用者閃避原先在避障範圍外的障礙物，再對照圖 4.16(e)的 i-Go 狀態圖可發現，位置和朝向角變化曲線均可保持和原本一樣的平順，只有速度方面在避障時因減速控制而有所降低。其中，為了降低對使用者的影響，我們將減速煞車的控制時間縮短，由圖 4.16(d)的左右輪煞車力矩圖來看，避障時力矩的震盪幅度不大而震盪頻率更較原本低，故可證明演算法的修正可有效增加系統的避障範圍。最後，若障礙物在入射角 90° 的位置時，由圖 4.15 的模擬結果來看，不論障礙物速度大小為何，在 i-Go 抵達附近前，障礙物早已遠離雷射的偵測範圍，故 i-Go 不須對其進行閃避，只有在速度極慢時，才需要以閃避靜態障礙物的方式進行閃避。

經由上述討論，可證明演算法能針對一定速度範圍下，朝著 i-Go 行進方向而來的動態障礙物進行閃避，同時順應使用者使用 i-Go 時的行走習慣(如速度和施力等)，安全並準確地導引使用者抵達目標位置。在障礙物半徑固定為 0.3m 的情況下，系統可閃避的垂直移動障礙物速度範圍如表 4.5 所示。其中，當入射角為 60° 或 75° 時，障礙物速度分別超過 0.32m/s 以及 0.17m/s 後，系統均可導引使用者從障礙物後方進行閃避，而對照正常人徐步的速度(約 0.5m/s)，在入射角為 30° 以下時，系統可順利從前方閃避；其他角度下可從後方進行閃避。

表 4.5 系統可閃避垂直移動障礙物速度範圍(從障礙物前方繞行)

| 入射角 | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° |
|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 速度 | 3.16 | 1.16 | 0.67 | 0.418 | 0.278 | 0.125 | all |

(單位：公尺每秒)

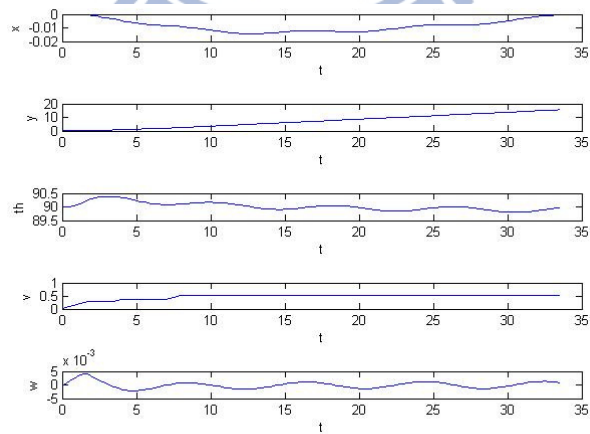
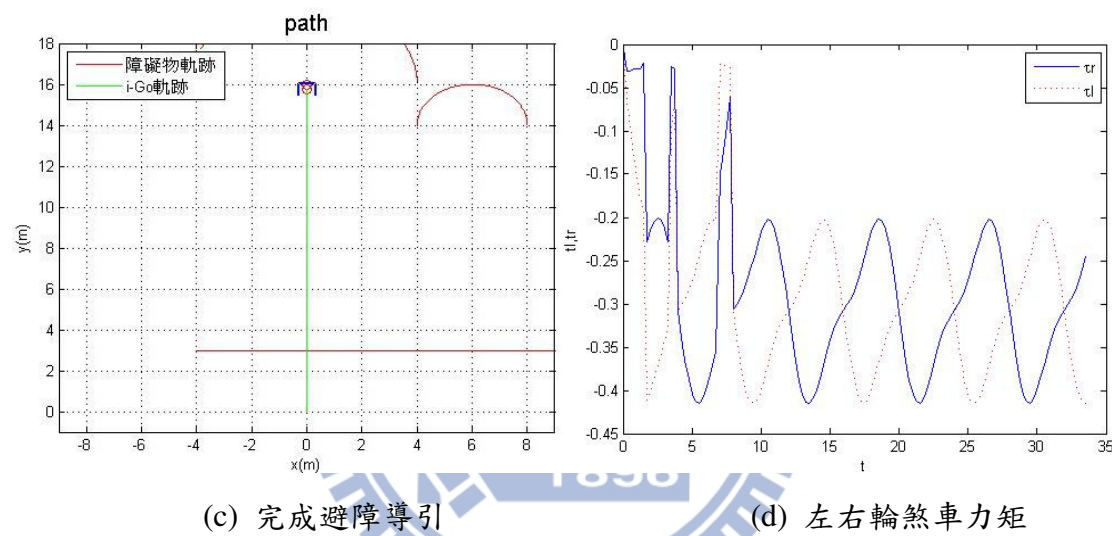
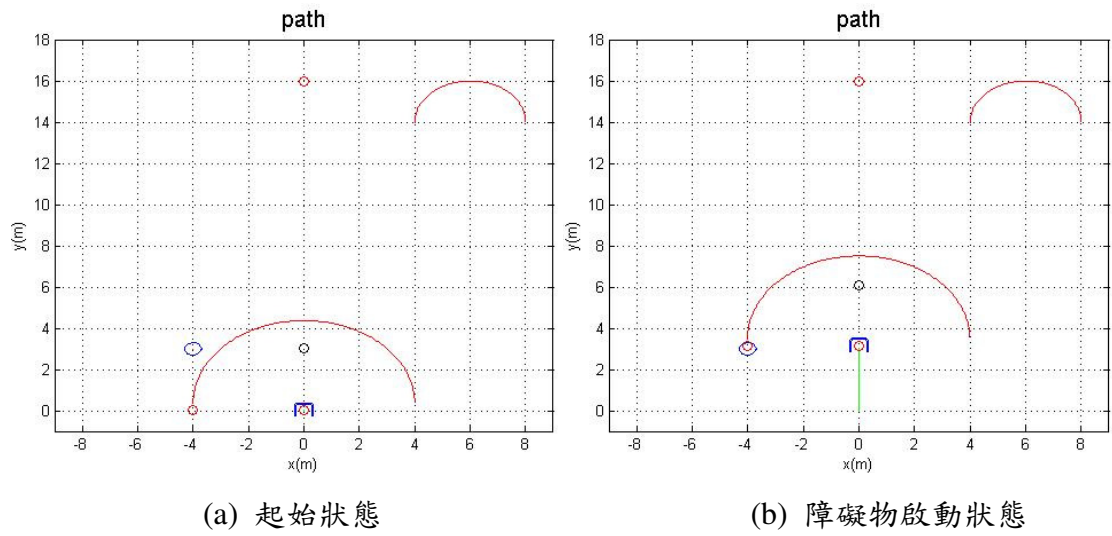


圖 4.7 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：3.16m/s，入射角： 0°)：
a)起始狀態，(b)障礙物啟動狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go
之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

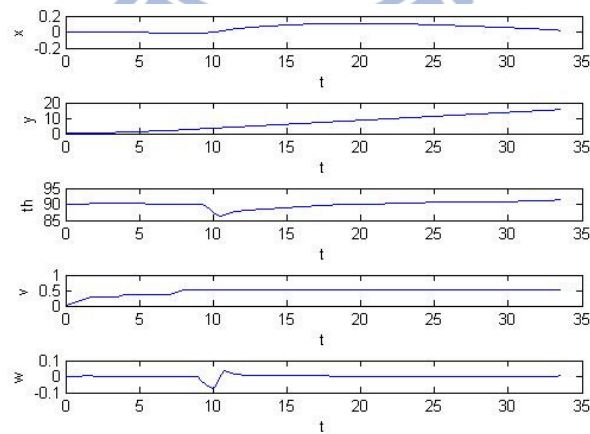
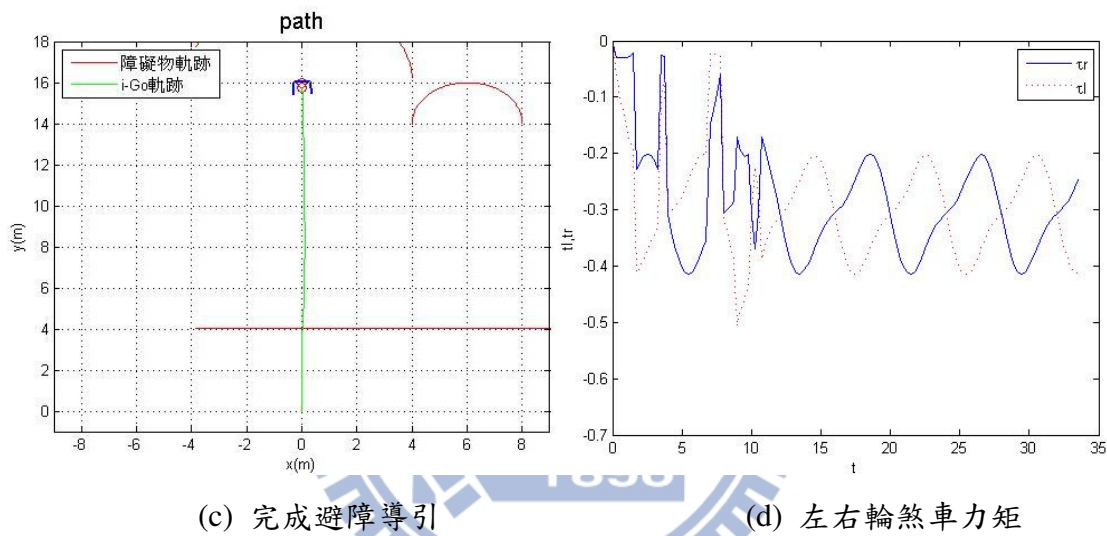
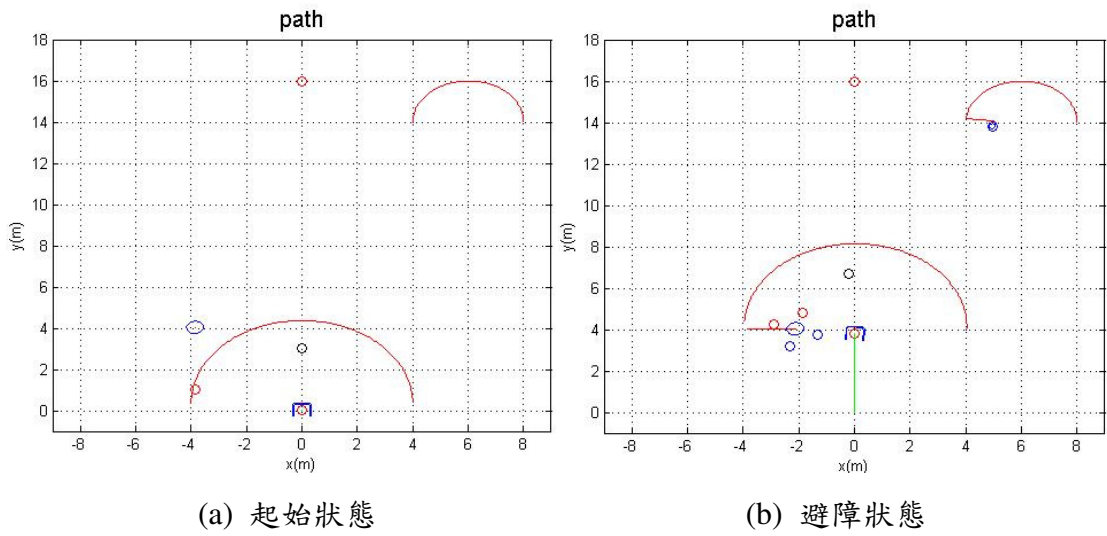
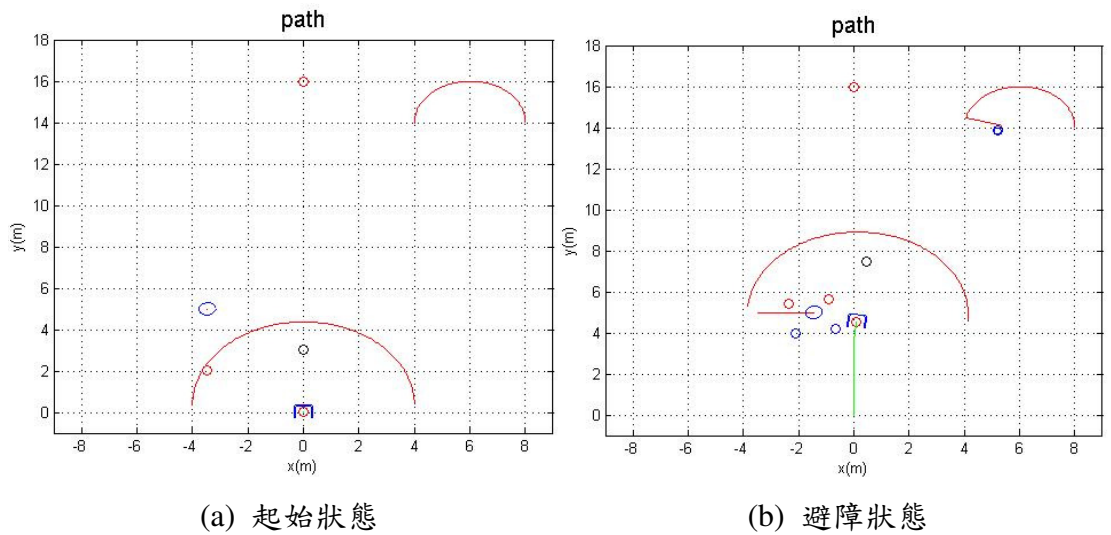
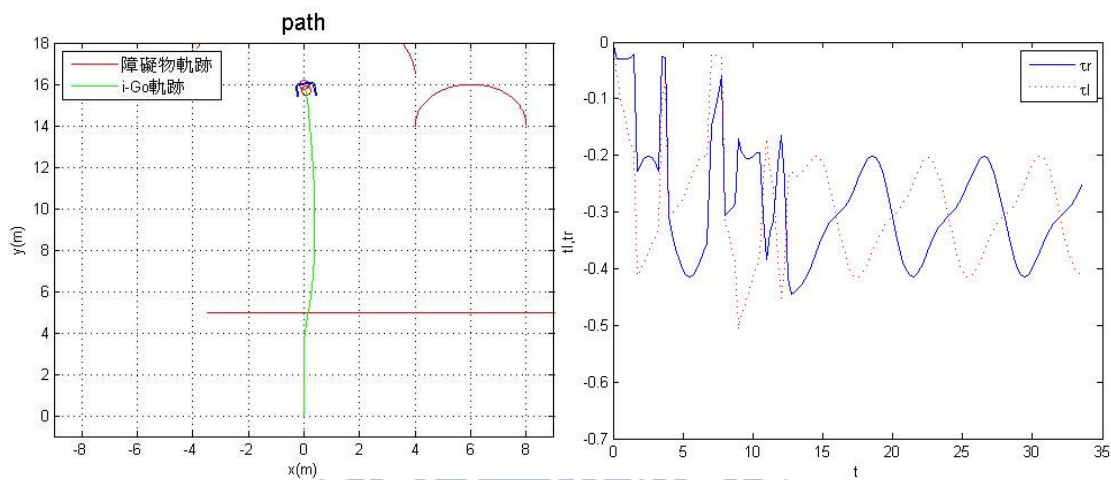


圖 4.8 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:1.16m/s,入射角:15°):
 (a)起始狀態, (b)避障狀態, (c)完成避障導引, (d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



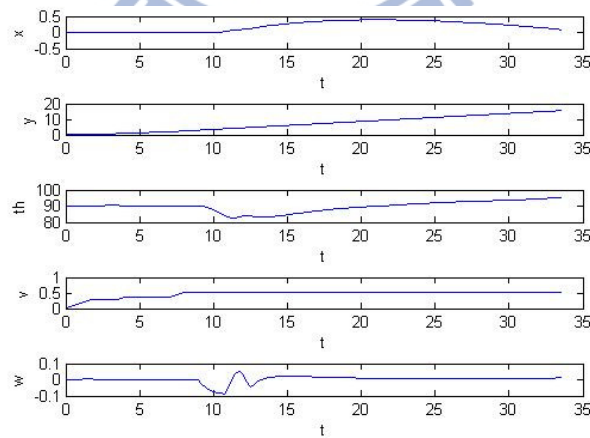
(a) 起始狀態

(b) 避障狀態



(c) 完成避障導引

(d) 左右輪煞車力矩

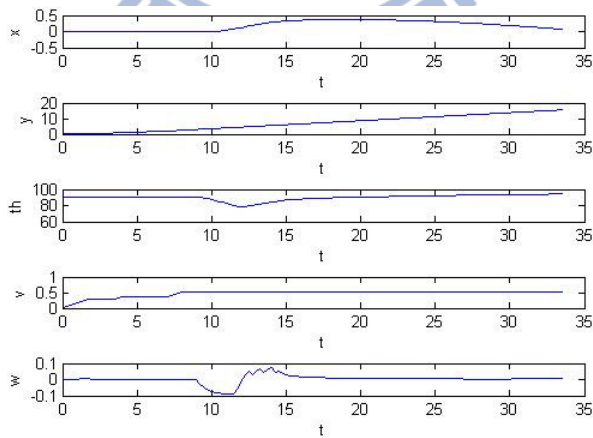
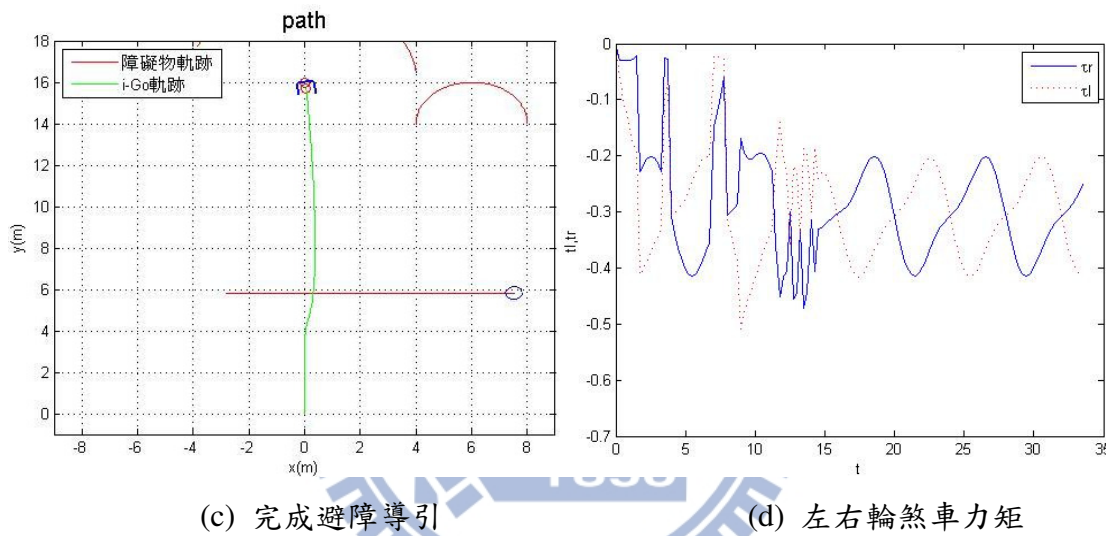
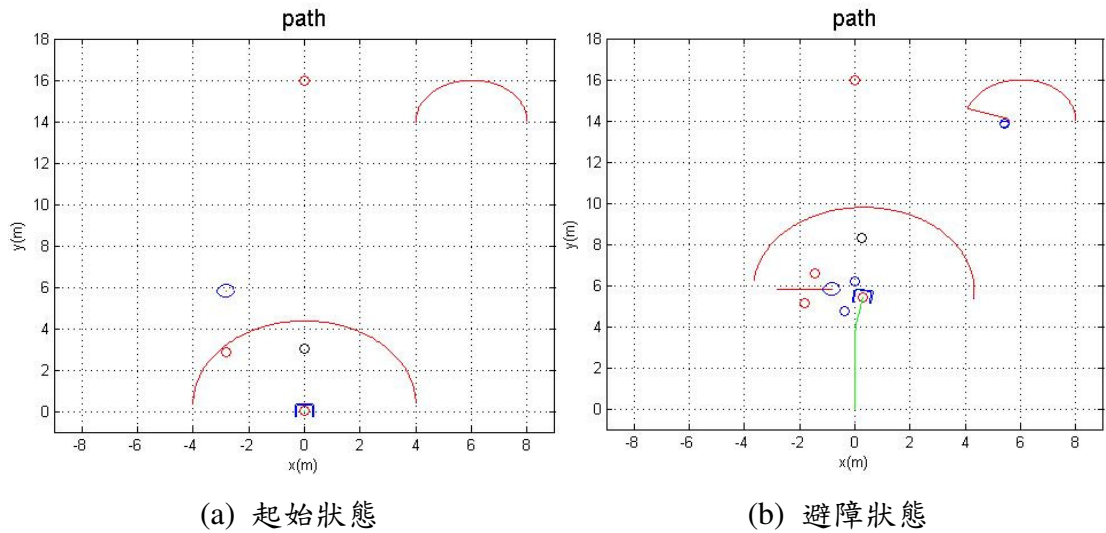


(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

圖 4.9 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度:0.67m/s,入射角:30°):

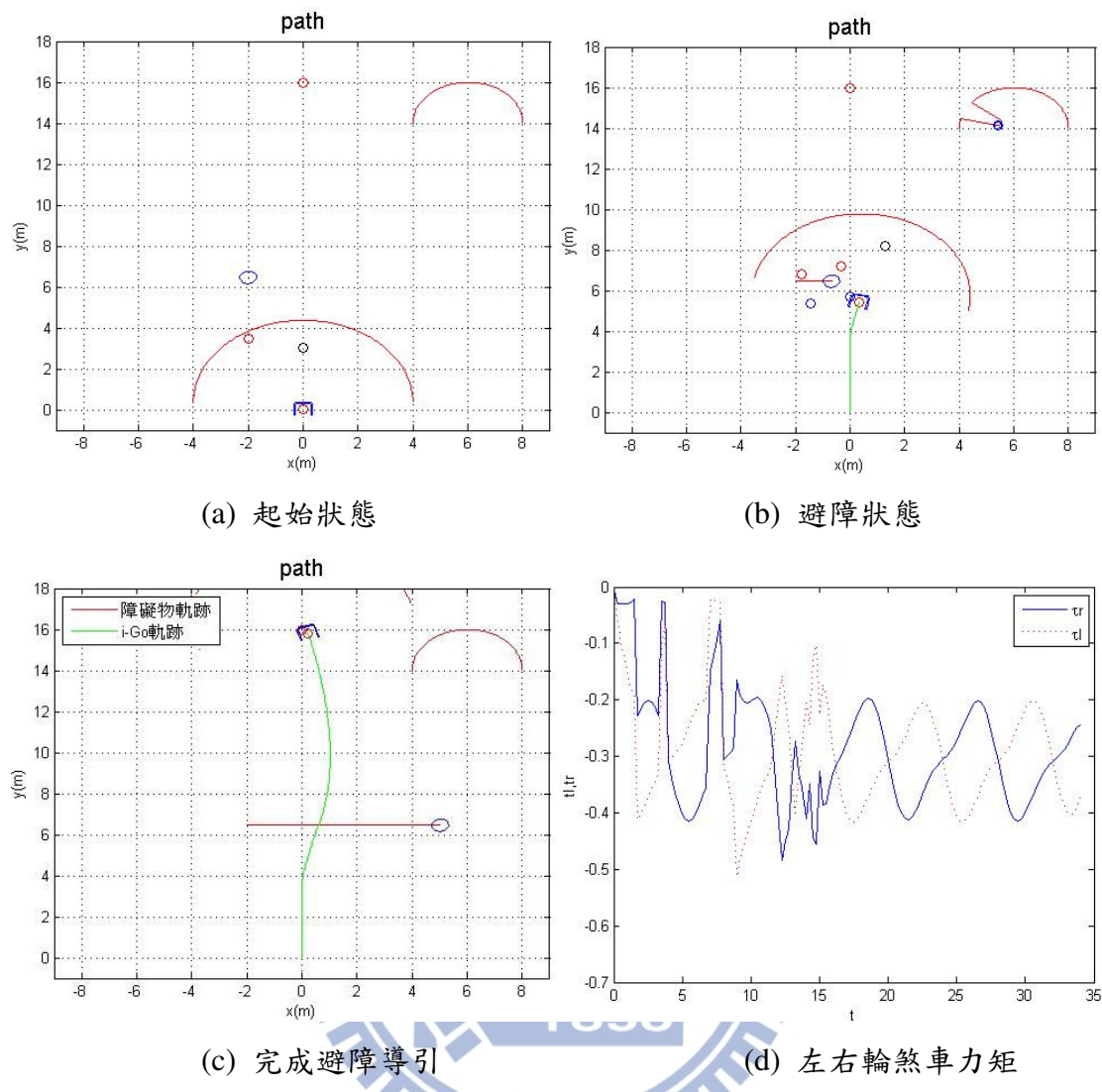
(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀

態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

圖 4.10 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.418m/s，入射角：45°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

圖 4.11 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.278m/s，入射角： 60°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

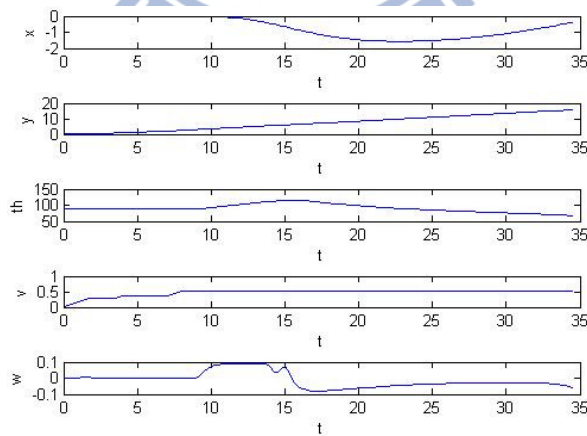
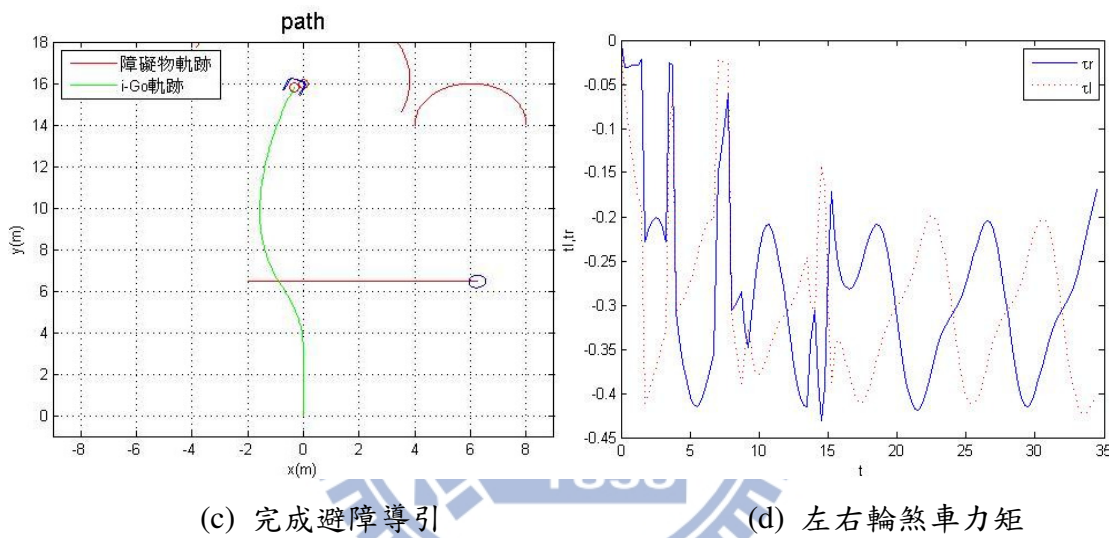
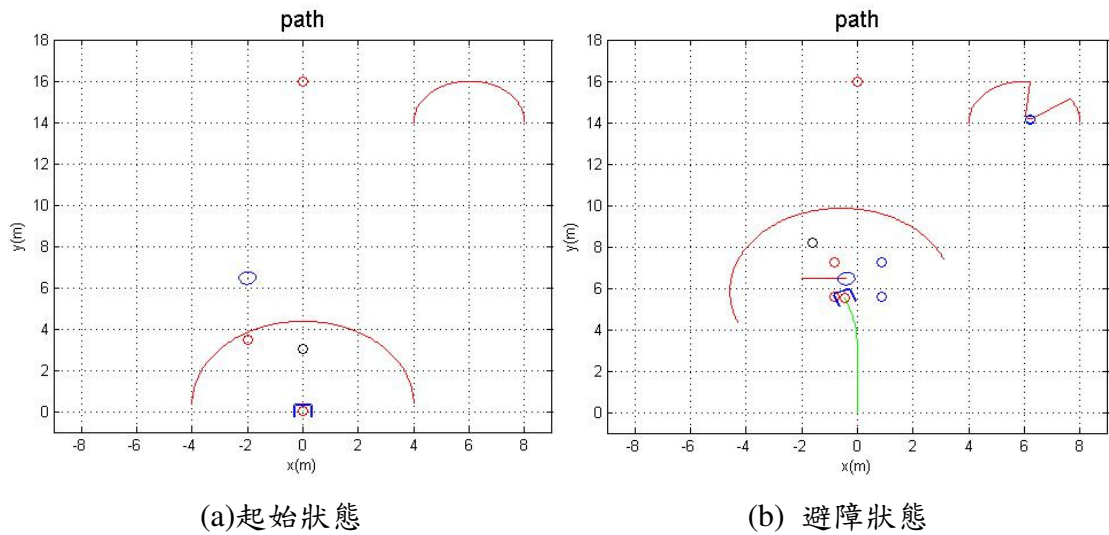


圖 4.12 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.32m/s，入射角： 60°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

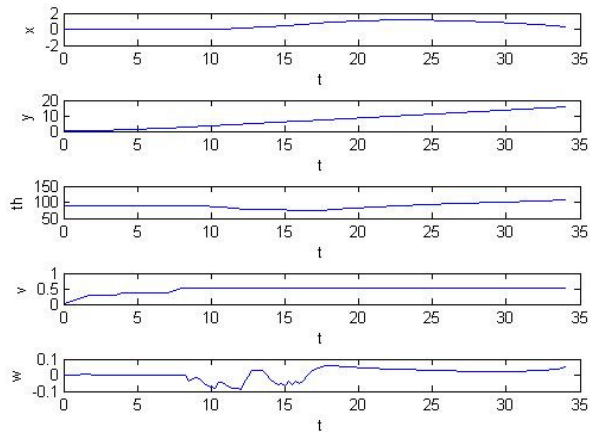
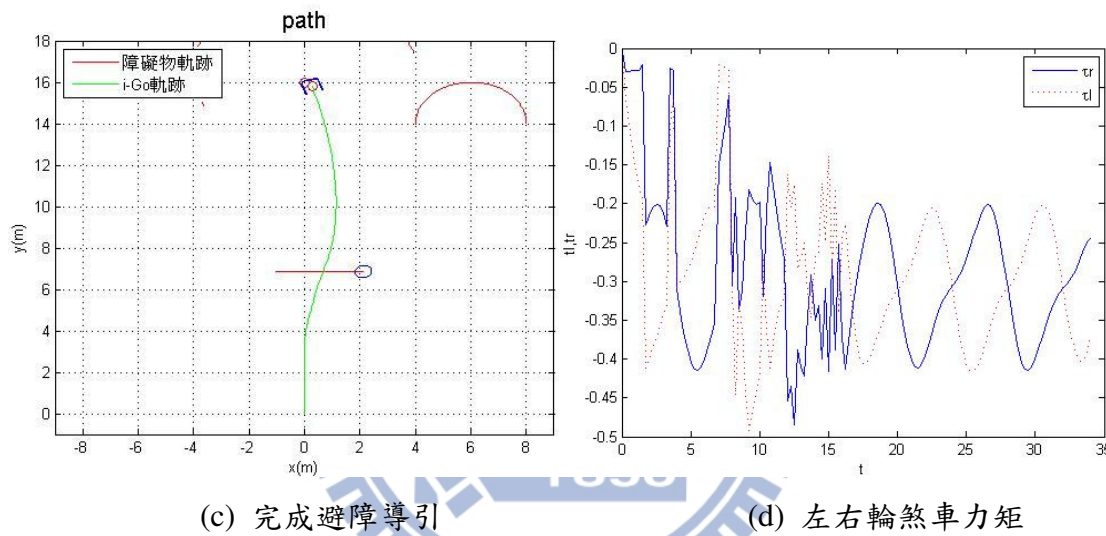
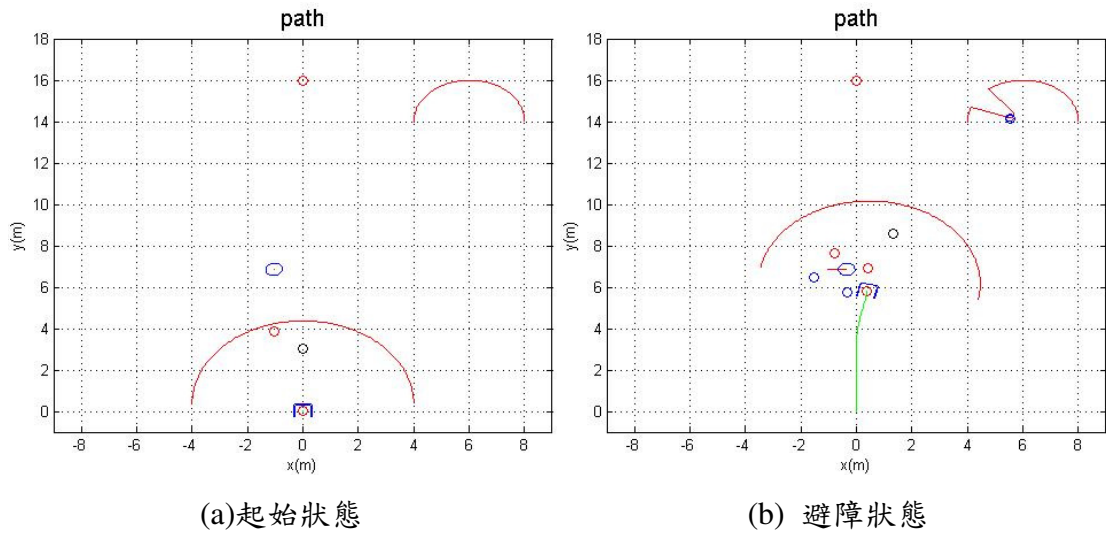


圖 4.13 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.125m/s，入射角：75°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

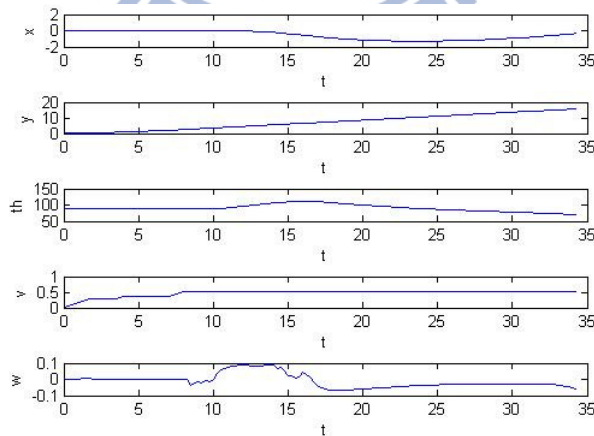
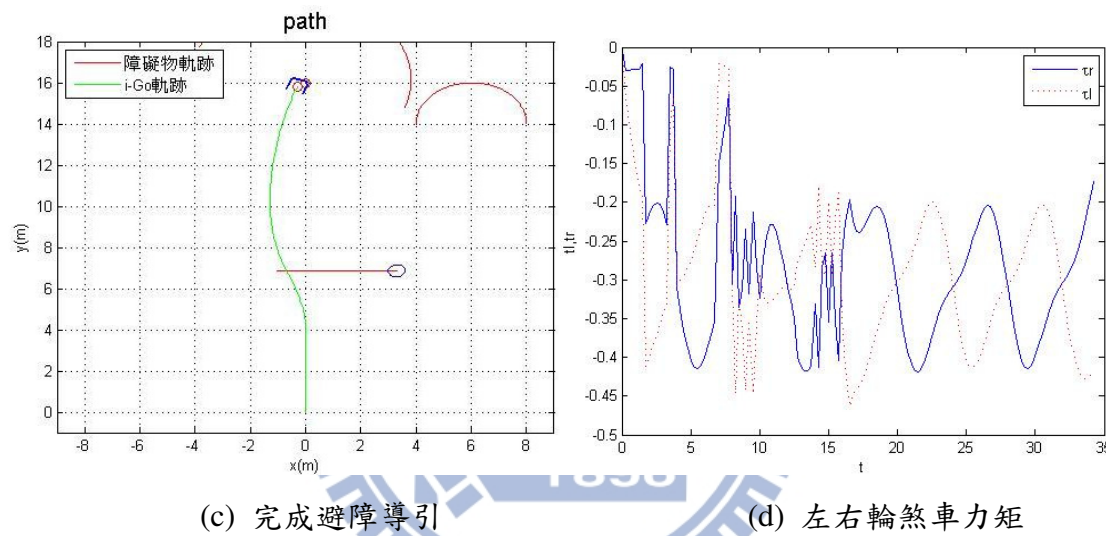
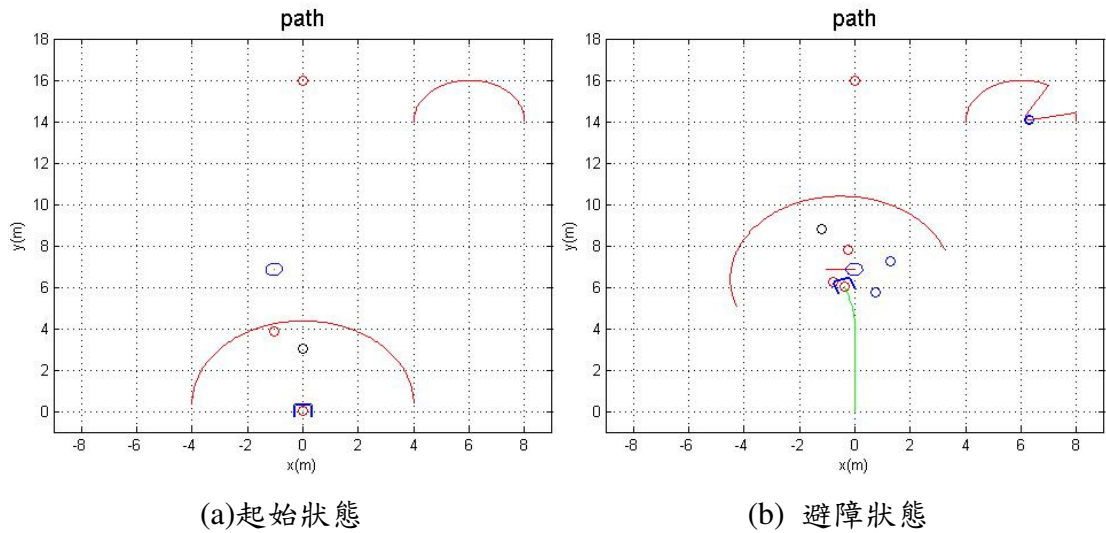
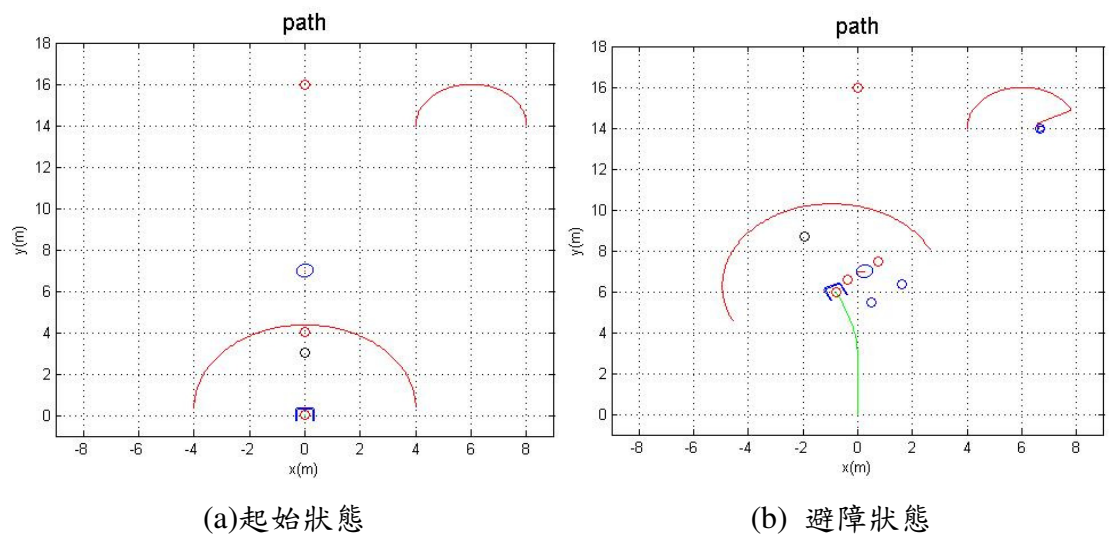
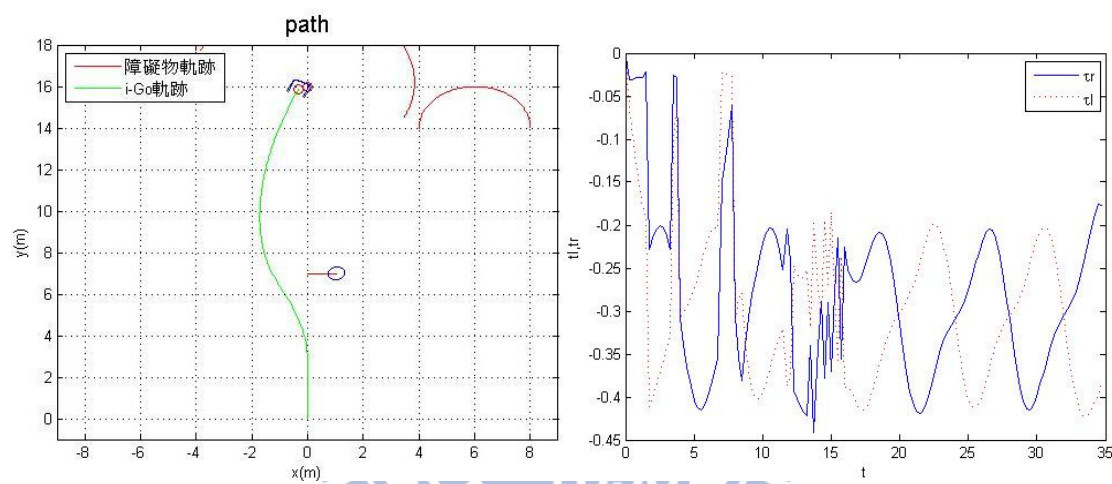


圖 4.14 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.17m/s，入射角： 75°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



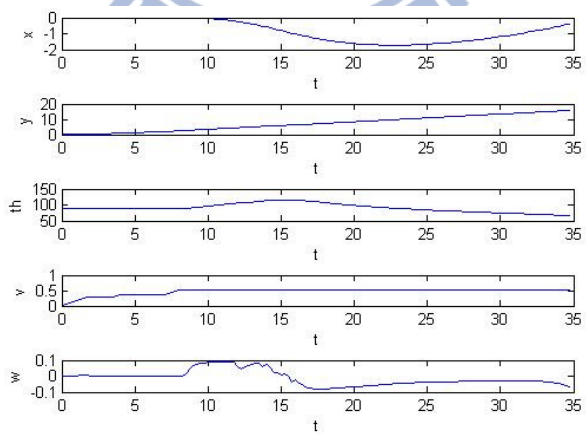
(a) 起始狀態

(b) 避障狀態



(c) 完成避障導引

(d) 左右輪煞車力矩



(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

圖 4.15 垂直移動障礙物之動態避障導引模擬(障礙物速度：0.04m/s，入射角： 90°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

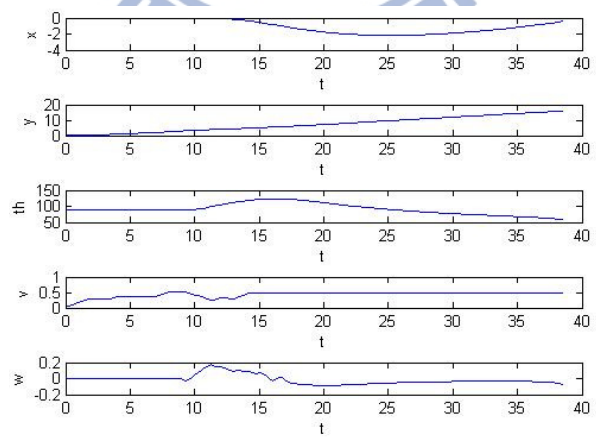
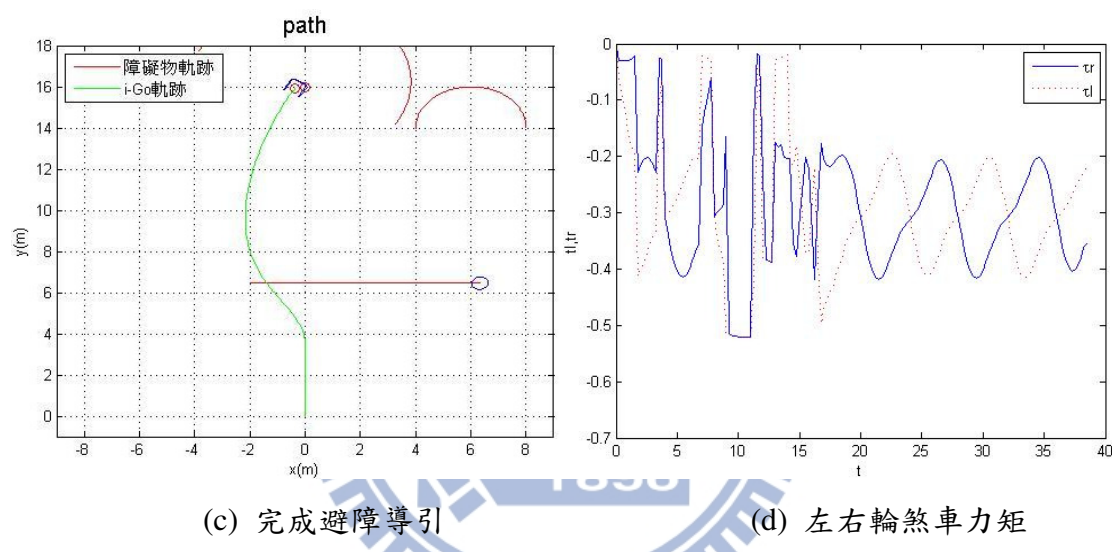
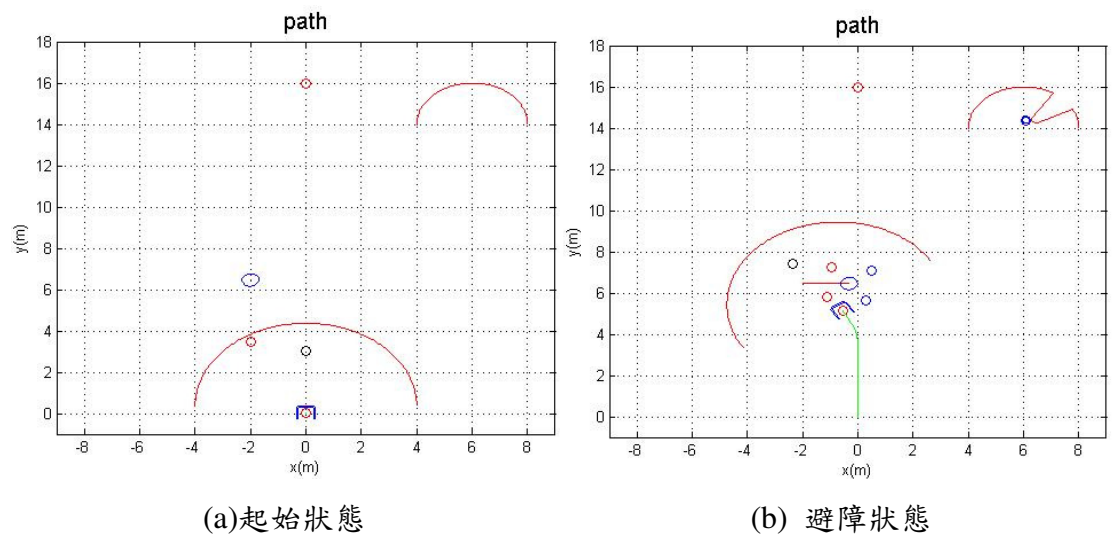


圖 4.16 垂直移動障礙物之動態避障導引修正模擬(障礙物速度：0.28m/s，入射角：60°)：(a)起始狀態，(b)避障狀態，(c)完成避障導引，(d)左右輪煞車力矩和(e) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

4.2 實驗

從以上模擬的結果看來，不論障礙物的運動模式為何，只要速度在一定範圍下，系統都能成功進行閃避，但因實際情況跟模擬會有所不同，其一是人的施力模式不一定與我們假設的相同，其二是簡化的數學模型畢竟和實際 i-Go 有些許落差，故下一步我們將透過實驗驗證實際情況下是否還能如同模擬一樣有效。我們針對模擬中提到的三種障礙物運動狀態進行閃避實驗，為了減少環境障礙物的影響，場景皆設定在廣場中進行，其中，我們擺設三角錐作為靜態障礙物，而以本實驗室開發的主動式行動輔助機器人作為動態障礙物，並對其進行定速控制，最後在終點放置三角錐表示目標位置。實驗中，我們請到三名受測者，年齡介於 22 到 27 歲，其狀態資料如表 4.6 所示，而 i-Go 實驗參數則與模擬時相同，如表 4.7 所示。

表4.6 實驗受測者資料

| 受測者 | 性別 | 年齡 | 身高 | 體重 |
|-----|----|----|-------|------|
| A | 男 | 24 | 170cm | 63kg |
| B | 男 | 27 | 173cm | 70kg |
| C | 男 | 22 | 168cm | 60kg |

表 4.7 i-Go 實驗參數設定

| 兩輪距離一半(b) | 輪子半徑(r) | 質量(m) | 轉動慣量(I) |
|-----------|---------|-------|------------------------|
| 0.34m | 0.0635m | 50kg | 11.56kg-m ² |

4.2.1 靜態障礙物避障導引實驗

首先我們進行靜態障礙物的閃避實驗，場景如圖 4.17(a)所示，我們將目標位置設置在使用者前方 16 公尺處的位置上，以一個三角錐表示，座標紀錄為 (0,16)。其中，為了驗證演算法可克服局部最佳解的限制，我們將障礙物設置在使用者與目標位置之間座標為(0,7)的位置上，並以五個三角錐圍成半徑為 0.45m 的靜態障礙物。在實驗過程中，我們請使用者穿上限制裝備，限制其膝關節的轉動角度，以模擬行動不便者的行走姿態及速度，如圖 4.17(b)所示。穿上裝備後，經實驗測得使用者的行走速度約為 0.3-0.4m/s，相較模擬時的行走速度還低，基於安全考量，實驗時將採取比安全範圍低一點的規格進行驗證。



(a) 實驗場景

(b) 使用者操作狀態

圖 4.17 靜態障礙物動態避障導引實驗圖：(a)實驗場景和(b)使用者操作狀態

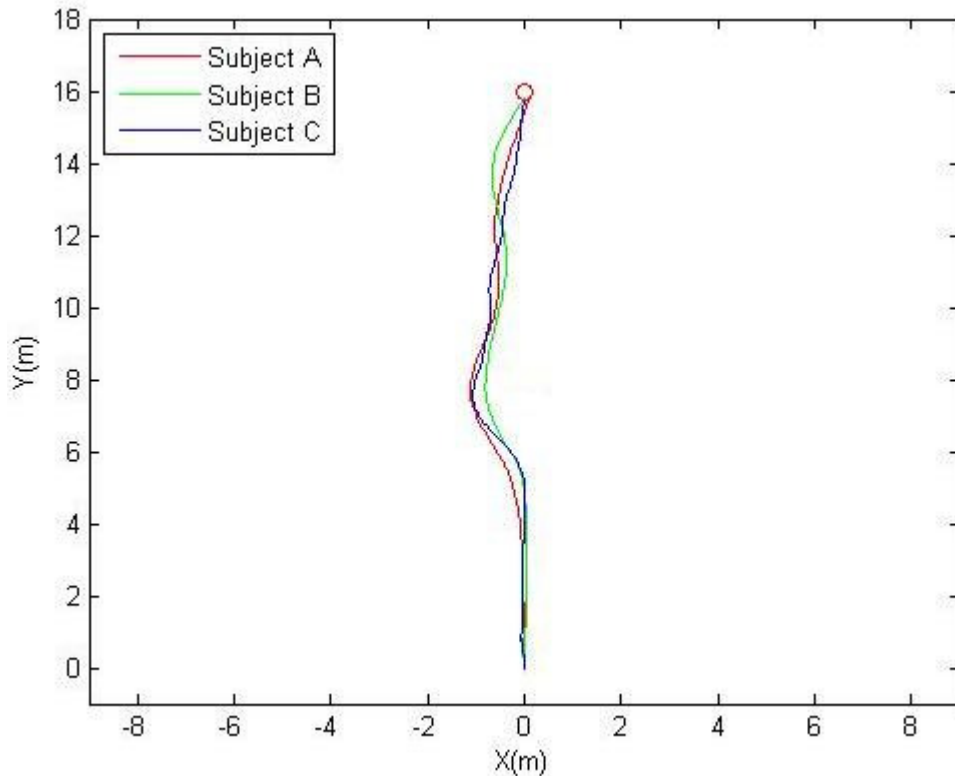
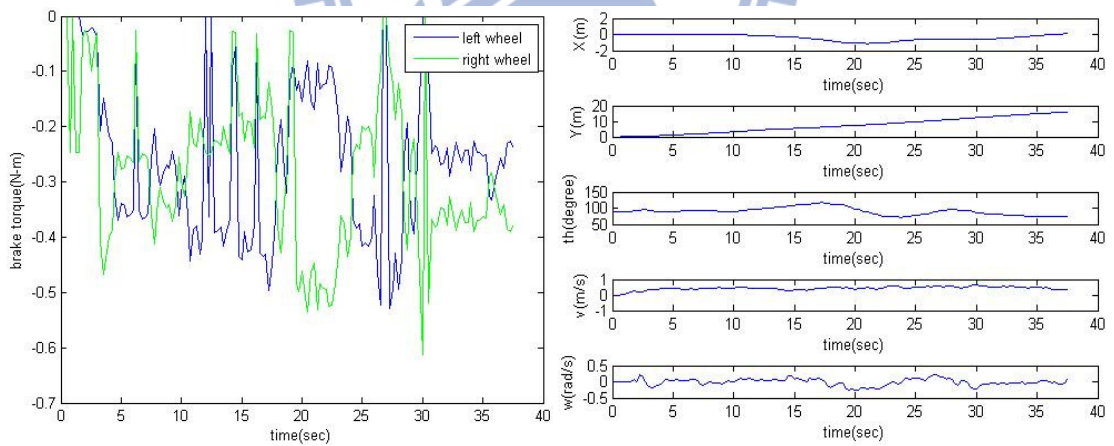


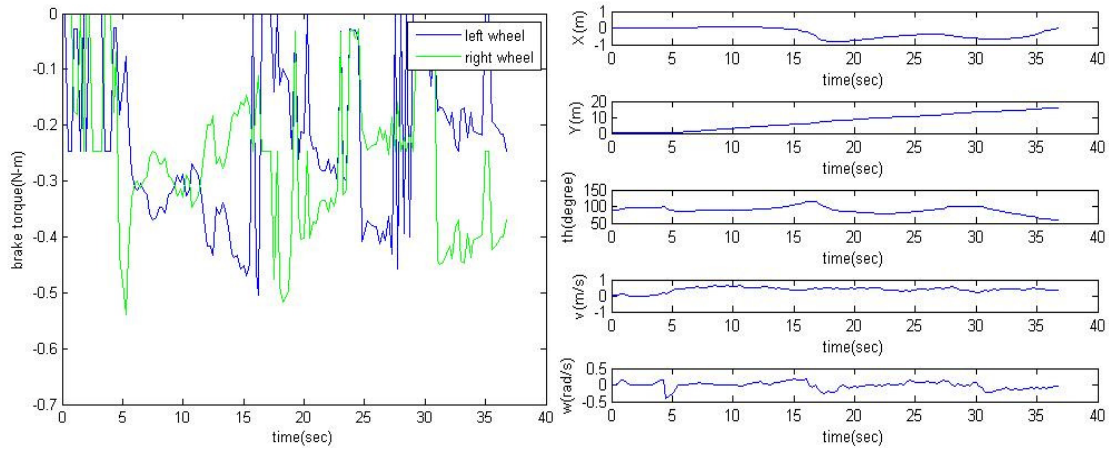
圖 4.18 靜態障礙物動態避障導引實驗軌跡圖



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

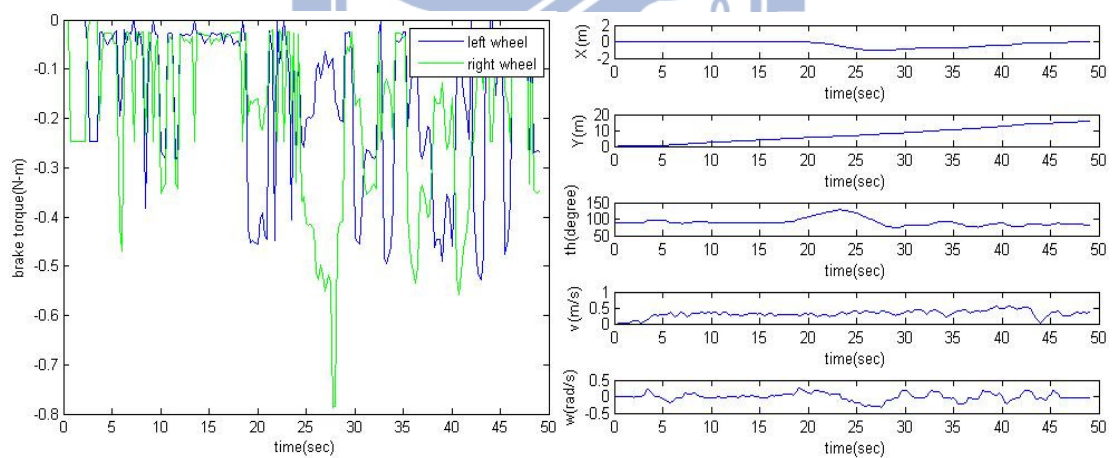
圖 4.19 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b)
i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.20 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.21 靜態障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

針對三個受測者的數據整理如表 4.8，我們自行定義位置的判斷指標，如(4.2)式所示：

$$EOP(\text{error of position}) = \|\text{目標位置} - \text{實際位置}\| \quad (4.2)$$

表 4.8 靜態障礙物之動態避障導引實驗結果分析

| 靜態障礙物 | 目標點 | 受測者 A | 受測者 B | 受測者 C | 平均誤差 |
|-------|-----|--------|--------|--------|-------|
| X 位置 | 0 | 0.103 | 0.03 | -0.002 | 0.044 |
| Y 位置 | 16 | 15.779 | 15.815 | 15.771 | 0.211 |
| EOP | 0 | 0.244 | 0.185 | 0.229 | 0.219 |

(單位：公尺)

由圖 4.18 的實驗軌跡圖可證明演算法可成功導引使用者閃避靜態障礙物，並抵達目標位置，由表 4.8 可看出位置誤差量平均約 0.22 公尺，證明在目標位置的導引十分成功。對照圖 4.19(a)-4.21(a)的左右輪力矩輸出圖，可看出一開始因使用者推動 i-Go 時須施力克服最大靜摩擦力，且使車體發生些微震盪，而系統對應人的施力輸出煞車力矩幫助使用者調整 i-Go 的朝向角，以順利往前方的目標位置移動。當系統偵測到障礙物時，會先將左輪煞車力矩加大，以幫助使用者從左邊進行閃避，直到閃避完成後，再將右輪煞車力矩增大，同時降低左輪煞車力矩，以導引使用者往目標位置前進，並在過程中慢慢對使用者的行進方向進行修正。其中，閃避時間區間因每個人行走速度的不同而有長短的不同，但以煞車力輸出的整體趨勢來看，系統確實可以成功的對靜態障礙物進行閃避。最後，由圖 4.19(b)-4.21(b)的 i-Go 狀態圖，可看出位置和朝向角變化如同模擬時一樣十分平順，速度方面，使用者均可保持在一定的速度上，只有角速度有些微震盪，證明系統可在順應適用者的行走習慣上，幫助使用者調整朝向角，完成閃避及導引的任務。

4.2.2 平行移動障礙物動態避障導引實驗

接下來，我們進行平行移動障礙物的閃避實驗，場景為一個 $12 \times 12 \text{m}^2$ 的大廳如圖 4.22(a)所示，我們將目標位置設置在座標(0,10)的位置，並以一個「田」字記號表示。在動態障礙物方面，我們以本實驗室所開發的主動式行動輔助機器人作為閃避對象，寬度約為 0.68m，並對其進行速度控制，如圖 4.22(b)所示。其中，由於我們對使用者行走狀態有所限制，基於安全性的考量，我們將障礙物速度控制在模擬時的安全範圍內，約在 0.12m/s 左右。實驗時，障礙物起始位置位於 i-Go 正前方距離 4.5 公尺的位置上，直到其進入雷射偵測範圍後，即 i-Go 抵達(0,0.5)的位置時，障礙物才開始以 0.12m/s 左右的速度，面對使用者直線前進。我們將實驗參數整理成表 4.9 如下。

表 4.9 平行移動障礙物動態避障導引實驗參數

| | 起始位置 | 半徑 | 朝向角 | 初速 | 目標位置 |
|------|---------|------|-------------|------|--------|
| i-Go | (0,0) | 0.36 | 90° | 0 | (0,10) |
| 障礙物 | (0,4.5) | 0.34 | -90° | 0.12 | 無 |

(單位：公尺)



(a) 實驗場景



(b) 動態障礙物

圖 4.22 平行移動障礙物動態避障導引：(a)實驗場景和(b)動態障礙物

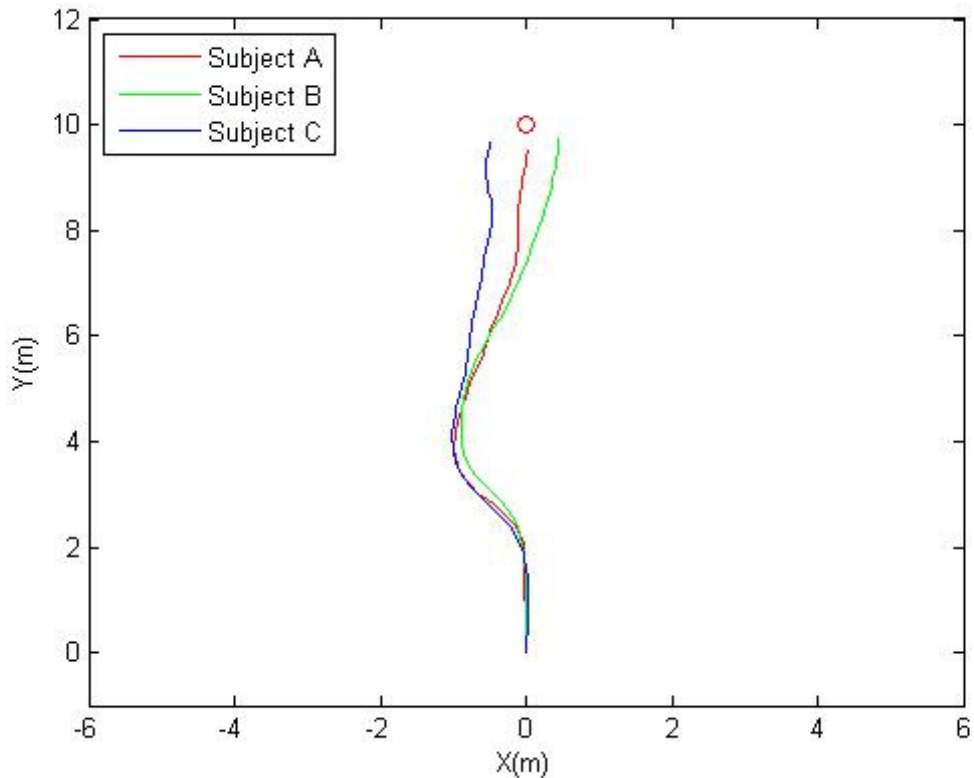
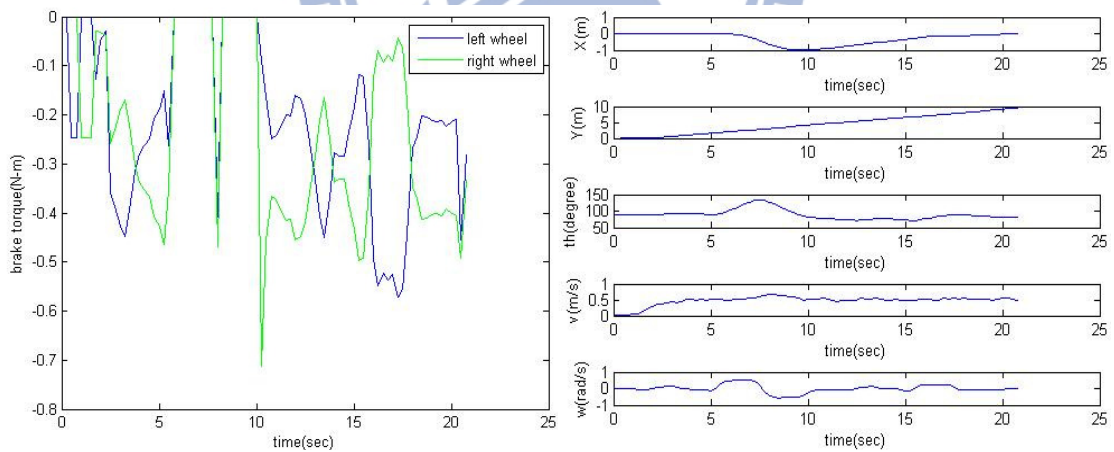


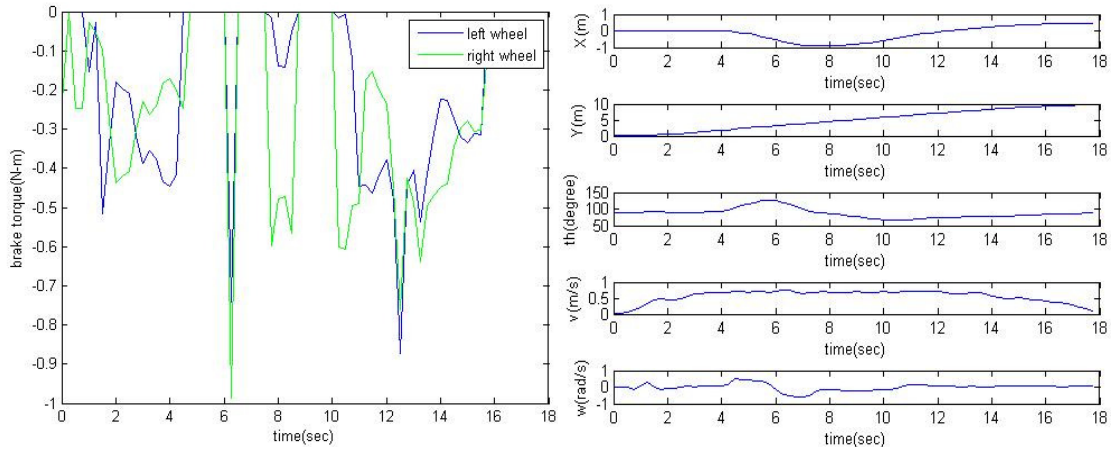
圖 4.23 平行移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

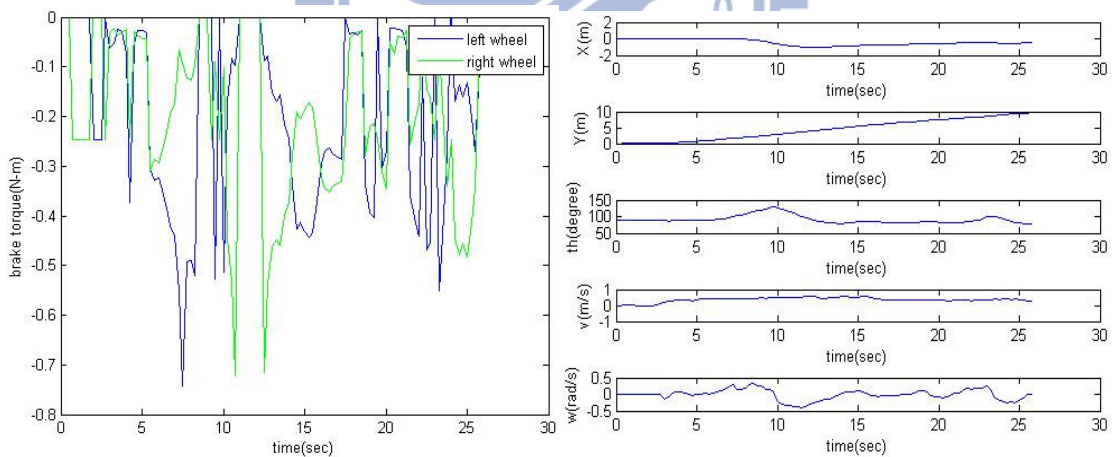
圖 4.24 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.25 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.26 平行移動障礙物動態避障導引實驗結果-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

針對三個受測者的數據整理如表 4.10 所示。

表 4.10 平行移動障礙物之動態避障導引實驗結果分析

| 平行移動 障礙物 | 目標點 | 受測者 A | 受測者 B | 受測者 C | 平均誤差 |
|-------------|-----|-------|-------|--------|--------|
| X 位置 | 0 | 0.022 | 0.455 | -0.489 | -0.004 |
| Y 位置 | 10 | 9.504 | 9.739 | 9.66 | 9.634 |
| EOP | 0 | 0.496 | 0.525 | 0.596 | 0.539 |

(單位：公尺)

剛開始實驗時，由於障礙物朝著使用者迎面而來，使用者皆表示有不小的心理壓力，因此在行走時較不能自在，結果反應在速度及施力的不穩定上，造成平均約 0.9 公尺的誤差。經多次實驗後，使用者較能適應實驗設定而真實自在地行走，則可排除因行走速度及施力不穩定所造成的誤差。由圖 4.23 的實驗軌跡圖證明演算法可成功導引使用者閃避平行 i-Go 行進方向的障礙物，並抵達目標位置，由表 4.9 可看出位置誤差量平均約 0.54 公尺，證明在目標位置的導引上有一定的功效。對照圖 4.24(a)-4.26(a)的左右輪力矩輸出圖，可看出趨勢與靜態障礙物實驗中相同，一開始使用者須克服最大靜摩擦力才可以推動 i-Go，過程中使車體發生些微震盪，而系統對應人的施力輸出煞車力矩幫助使用者調整 i-Go 的朝向角，以順利往前方的目標位置移動。當系統偵測到障礙物時，調變左輪煞車力矩大於右輪，以幫助使用者從左邊進行閃避，直到閃避完成後，再將右輪煞車力矩增大，同時降低左輪煞車力矩，以導引使用者往目標位置前進，並在過程中慢慢對使用者的朝向角進行修正。其中，閃避時間區間因每個人行走速度的不同而有長短的不同，但以煞車力輸出的整體趨勢來看，系統確實可以成功對一定速度下平行移動的障礙物進行閃避。最後，由圖 4.24(b)-4.26(b)的 i-Go 狀態圖，可看出位置和朝向角變化如同模擬時一樣十分平順，速度及角速度方面也震盪不大，因此，在排除使用者心理緊張造成操作不穩定的因素後，系統可導引使用者閃避前方的障礙物，並準確抵達目標位置。

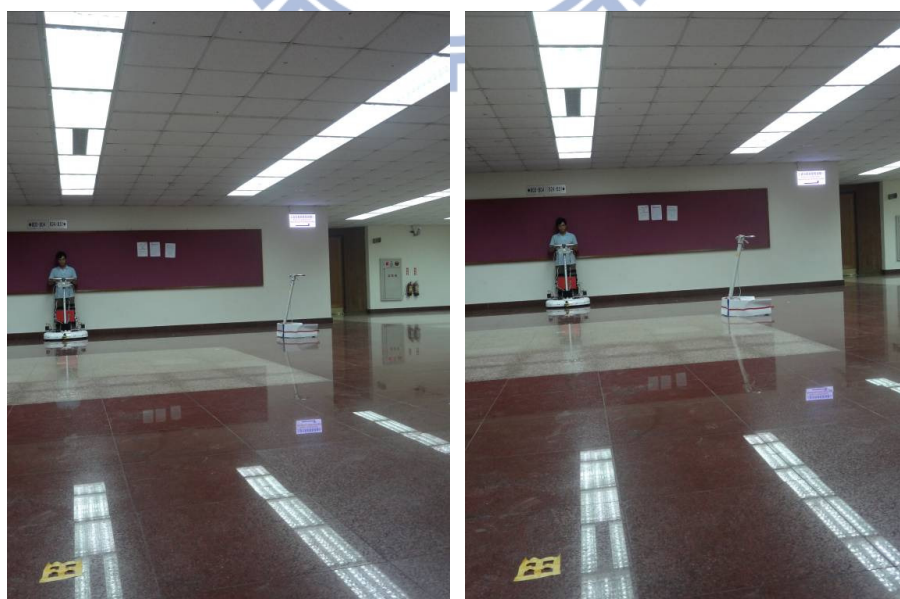
4.2.3 垂直移動障礙物動態避障導引實驗

接下來，我們進行垂直移動障礙物的閃避實驗，場景與平行移動障礙物動態避障導引實驗時相同，如圖 4.27 所示，目標位置為座標(0,10)的位置，並以一個「田」字記號表示，動態障礙物則以寬度約為 0.68m 的主動式行動輔助機器人作為 i-Go 的閃避對象。本實驗主要探討障礙物在不同入射角時系統的避障能力，實驗中我們針對 30° 和 60° 進行驗證，並將障礙物速度分別限制在 0.5m/s 和 0.28m/s 的範圍內，起始位置則分別為(-3.46,2.5)和(-2,3.96)。障礙物開始為靜止狀態，直到其進入雷射偵測範圍後，即 i-Go 抵達(0,0.5)的位置時，障礙物才開始以設定好的速度朝著使用者的行徑路徑前進。我們將參數整理成表 4.11 如下。

表 4.11 垂直移動障礙物動態避障導引實驗參數

| | 起始位置 | 入射角 | 半徑 | 朝向角 | 初速 | 目標位置 |
|------|-------------|------------|------|------------|------|--------|
| i-Go | (0,0) | 無 | 0.36 | 90° | 0 | (0,10) |
| 障礙物 | (-3.46,2.5) | 30° | 0.34 | 0° | 0.6 | 無 |
| 障礙物 | (-2,3.96) | 60° | 0.34 | 0° | 0.25 | 無 |

(單位：公尺)



(a) 入射角 30°

(b) 入射角 60°

圖 4.27 垂直移動障礙物動態避障導引實驗場景：(a)入射角 30° 和(b)入射角 60°

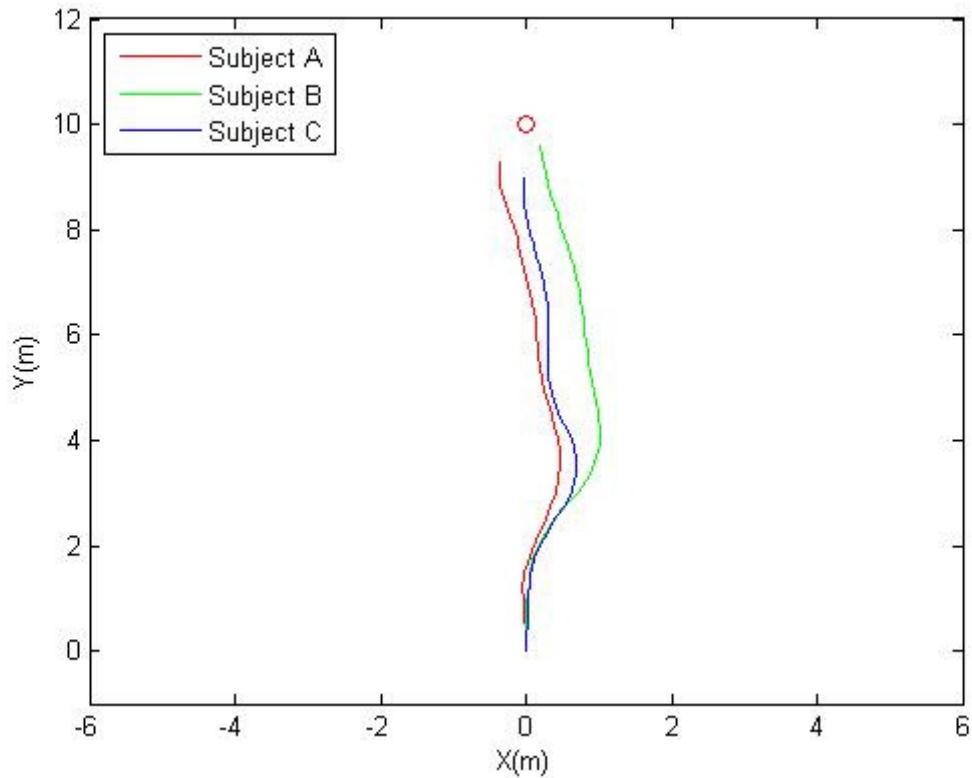
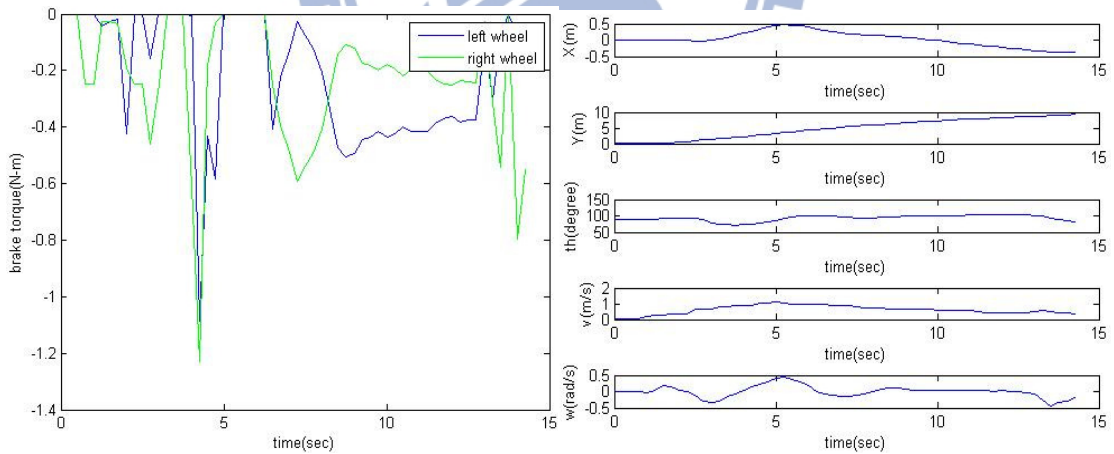


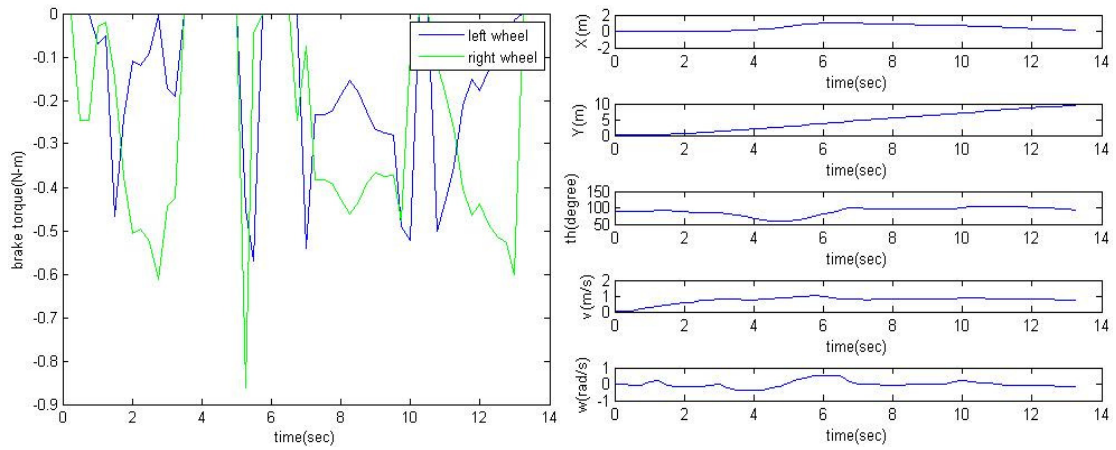
圖 4.28 垂直移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖(入射角 30°)



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數: x 位置, y 位置, 朝向角, 速度和角速度

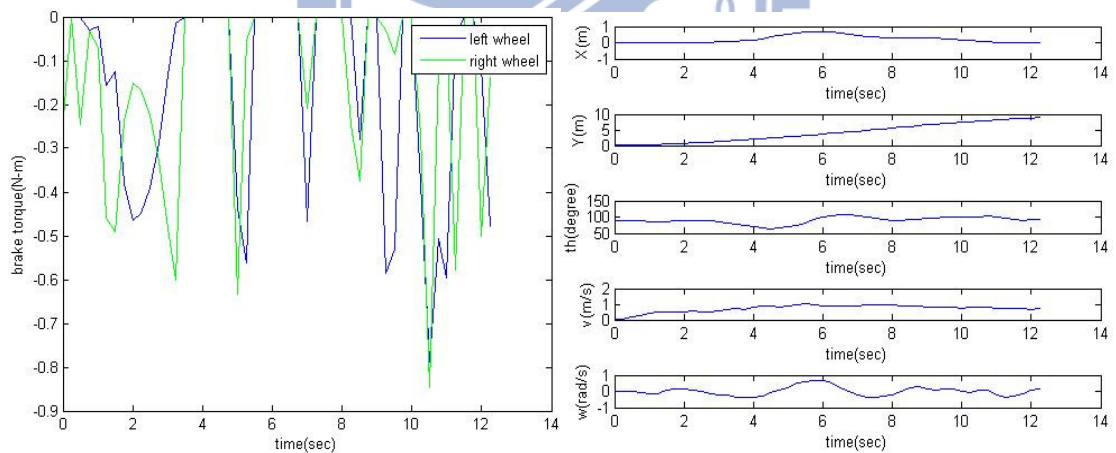
圖 4.29 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數: x 位置, y 位置, 朝向角, 速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.30 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.31 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 30°)-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

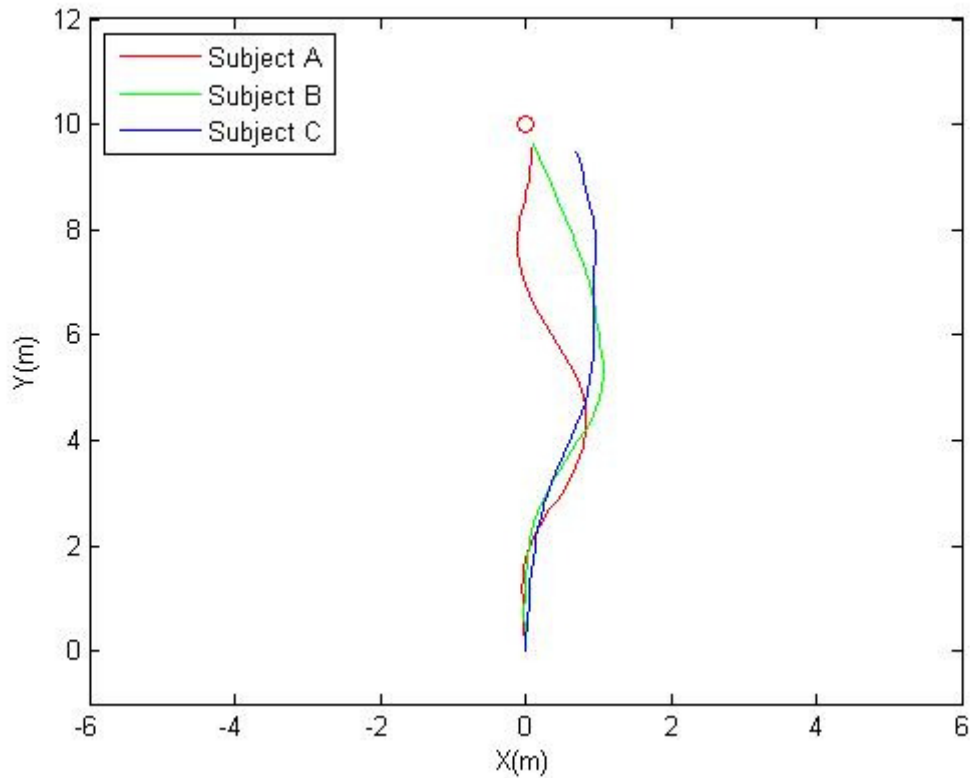
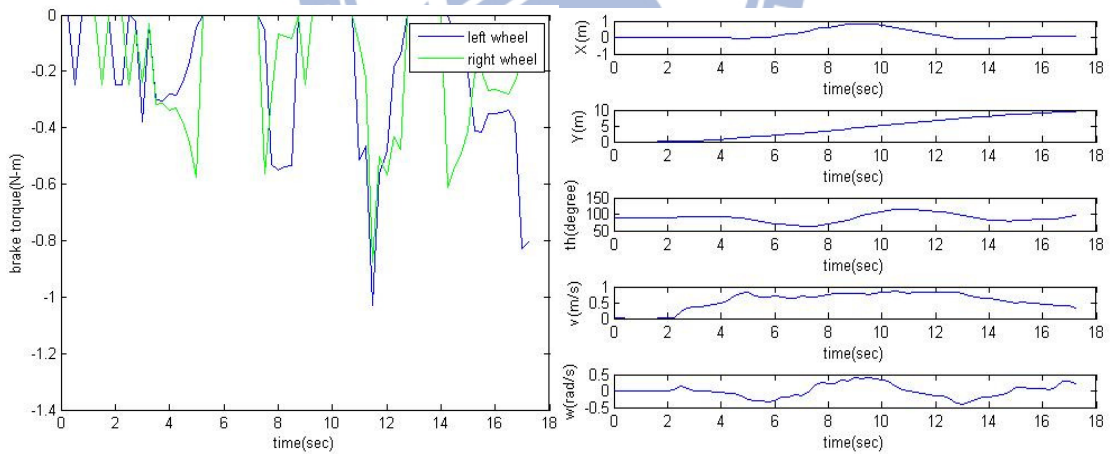


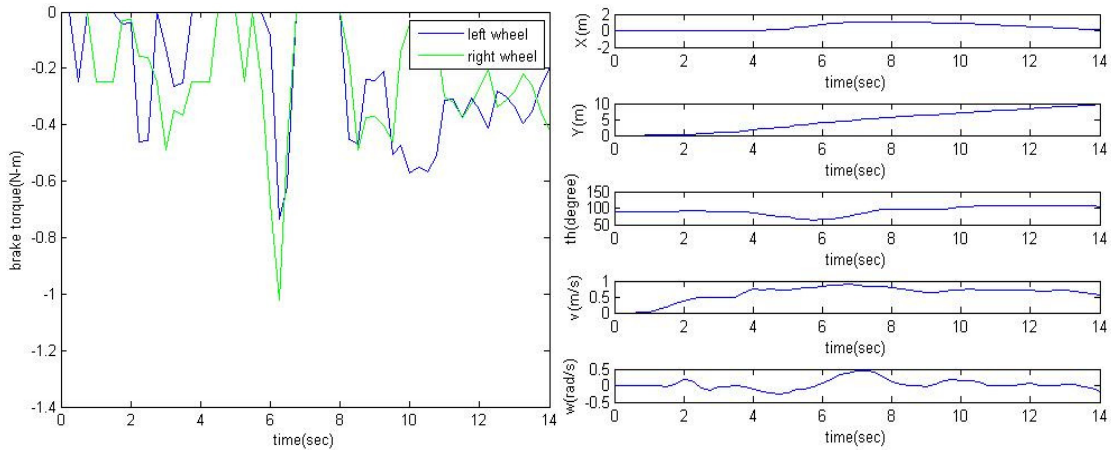
圖 4.32 垂直移動障礙物動態避障導引實驗軌跡圖(入射角 60°)



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數: x 位置, y 位置, 朝向角, 速度和角速度

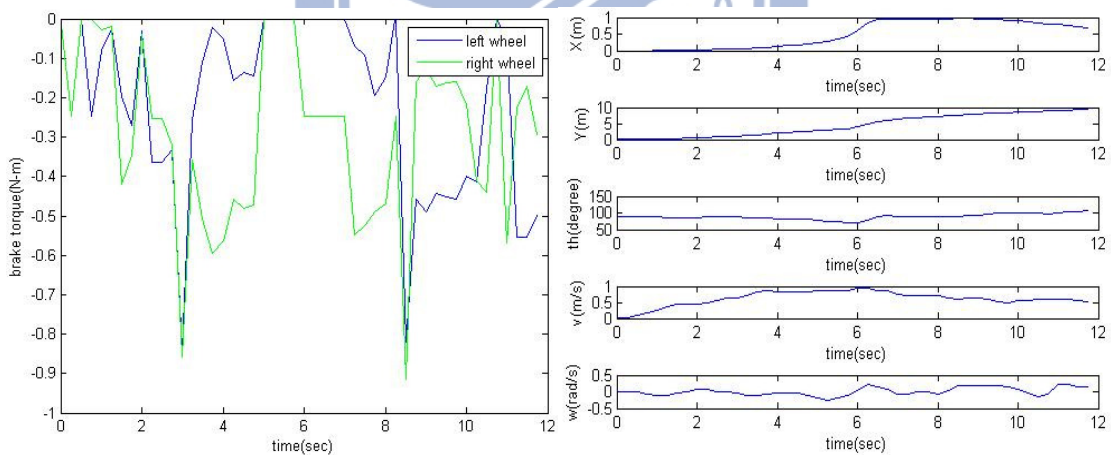
圖 4.33 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 A 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數: x 位置, y 位置, 朝向角, 速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.34 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 B 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度



(a) 左右輪煞車力矩

(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，
朝向角，速度和角速度

圖 4.35 垂直移動障礙物動態避障導引實驗結果(入射角 60°)-受測者 C 之(a)左右輪煞車力矩和(b) i-Go 之狀態變數：x 位置，y 位置，朝向角，速度和角速度

針對三個受測者的數據整理如表 4.12 和表 4.13 所示。

表 4.12 垂直移動障礙物之動態避障導引實驗結果分析(入射角 30°)

| 垂直移動 障礙物 (入射角 30°) | 目標點 | 受測者 A | 受測者 B | 受測者 C | 平均 |
|--------------------------|-----|--------|-------|-------|--------|
| X 位置 | 0 | -0.365 | 0.203 | 0.034 | -0.043 |
| Y 位置 | 10 | 9.275 | 9.58 | 8.892 | 0.751 |
| EOP | 0 | 0.812 | 0.466 | 1.108 | 0.796 |

(單位：公尺)

表 4.13 垂直移動障礙物之動態避障導引實驗結果分析(入射角 60°)

| 垂直移動 障礙物 (入射角 60°) | 目標點 | 受測者 A | 受測者 B | 受測者 C | 平均 |
|--------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| X 位置 | 0 | 0.077 | 0.118 | 0.701 | 0.299 |
| Y 位置 | 10 | 9.546 | 9.627 | 9.478 | 0.450 |
| EOP | 0 | 0.460 | 0.391 | 0.874 | 0.575 |

(單位：公尺)

由圖 4.28 和圖 4.32 的實驗軌跡圖可證明不論障礙物的起始位置為何，在一定速度範圍下，演算法可成功導引使用者閃避垂直 i-Go 行徑方向的障礙物，並抵達目標位置附近，由表 4.12 和表 4.13 可看出位置誤差量平均分別為 0.796 和 0.575 公尺，證明在目標位置的導引有一定的功效。接著，我們觀察圖 4.29(a)-4.31(a)的左右輪力矩輸出圖，發現平均煞車力矩均大於模擬時的煞車力矩，再對照圖 4.29(b)-4.31(b)的 i-Go 狀態圖，發現行走速度均比模擬時的速度還快，實驗後我們詢問使用者操作時的感受，皆表示障礙物速度較快，擔心自己會被撞到，故推測可能是因為起始位置在入射角 30° 的障礙物在 y 座標上與 i-Go 原點十分接近，且障礙物移動速度上更較平行移動障礙物實驗時快，故造成使用者緊張的心理，不自覺的加快行走速度。分析力矩輸出趨勢可發現開始後 1 到 2 秒時，系統即開始增大右輪煞車力矩，幫助使用者右轉進行閃避，而

待閃避完成後，系統開始加大左輪煞車力矩，同時降低右輪煞車力矩，以導引使用者往目標位置前進，並在過程中慢慢修正使用者的行進方向。對照圖 4.32(a)-4.34(a)的左右輪力矩輸出圖，發現兩實驗的力矩輸出趨勢相似，只有閃避時間區間因每個人行走速度和障礙物距離的不同而有所不同，大致上均符合演算法的控制法則。最後，由圖 4.29(b)-4.31(b)和由圖 4.32(b)-4.34(b)的 i-Go 狀態，可看出位置和朝向角變化如同模擬時一樣十分平順，速度方面，使用者均可保持在一定的速度上，只有角速度的變化較大，證明系統可在順應適用者的行走習慣上，幫助使用者調整朝向角，完成閃避動態障礙物及導引的任務。



第五章

結論與未來展望

5.1 結論

由於醫療科技的進步人類平均壽命逐年增加，照顧銀髮族成為一個刻不容緩的重要議題；智慧型行動輔助機器人可兩手攙扶且使用時銀髮族必須站立行走，不但幫助銀髮族行走較為穩定，更可達到復健的效果。本實驗室的行動輔助機器人 i-Go 即是以輔助銀髮族順利行走為目的所開發而成的，而在真實的家庭環境中，複雜的家具擺設以及家庭成員不可預測的走動，都可能使得老年人在行走中發生碰撞而跌倒。因此，我們加入動態避障導引系統來保護使用者行走時的安全。系統可透過雷射感測器偵測周圍環境中障礙物與機器人的距離資訊，並經由障礙物偵測系統，準確地辨識出障礙物的大小、位置以及速度等資訊，再配合動態避障導引演算法，以被動式控制的方式，調整 i-Go 左右輪煞車力矩輸出，輔助使用者閃避前方的動態障礙物，同時導引使用者順利抵達目標位置。此外，為了更了解系統的閃避能力，我們對系統進行學理上、模擬上的分析，並制定系統的安全範圍。從實驗結果可以發現我們提出的動態避障導引系統確實能發揮其功能，在順應使用者行走習慣的同時，導引使用者閃避前方靜止或者移動中的障礙物，幫助使用者安全地抵達目標位置，其中，位置偏差量約在 0.79 公尺以內。行動不便的銀髮族將因為這些優點，能更安心地走出家門與社會互動。

5.2 未來展望

本論文中設計的被動式行動輔助機器人動態避障導引系統，可順利針對一定速度範圍下的障礙物進行閃避，並導引使用者抵達預定的目標位置，但仍有許多可以加以改進的地方，茲討論如下：

1. 如何在複雜環境進行避障：本論文中，只針對單一障礙物的各種狀態進行閃避驗證，並制定出對應的安全範圍，然而在真實的家庭中，環境資訊是複雜且動態的，夾雜靜止與移動中的障礙物資訊，因此，須將系統設計成能同時針對多個障礙物進行閃避規劃，則可在日後進入家庭時，為需要的老年人提供更完善的保護。

2. 可結合影像資訊提升障礙物偵測能力：單以雷射感測器所測得的距離資訊進行障礙物偵測的效果有限，若在避障過程中，障礙物高於感測平面或者兩障礙物位置過於接近甚至重疊時，系統則無法正確辨識出障礙物的狀態。此時，若結合影像資訊則可以較大的視野進行全面性的偵測，同時輔以影像處理技術，將相近的障礙物進行切割以及個別追蹤。

3. 縮短硬體取樣時間：目前系統透過 PIC 晶片，得知 i-Go 當下的狀態，並產生 PWM 訊號控制煞車器，而 PIC 取樣時間為 0.25 秒，若再加上通訊傳輸的時間，則演算法運算時間勢必超過 0.25 秒。因此，若能縮短運算及通訊時間，則可更即時對 i-Go 路徑進行修正，幫助使用者更快速且平順地閃避前方障礙物。

参考文献

- [1] D. Nagahara and S. Takahashi, "Mobile Robot Control Based on Information of the Scanning Laser Range Sensor," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 258-261, 2010.
- [2] C. Li, G. Cui, and H. Lu, "The Design of an Obstacle Avoiding Trajectory in Unknown Environment Using Potential Fields," *IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 2050-2054, 2010.
- [3] D. Chugo, W. Mastuoka, S. Jia, and K. Takase, "The Wheel Control of a Robotic Walker for Standing and Walking Assistance with Stability," *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 297-302, 2008.
- [4] O. Chuy, Y. Hirata, and K. Kosuge, "A New Control Approach for a Robotic Walking Support System in Adapting User Characteristics," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C*, vol. 36, no. 6, pp. 725-733, 2006.
- [5] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, "Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 981-990, 2007.
- [6] J. Manuel, H. Wandosell, and B. Graf, "Non-Holonomic Navigation System of a Walking-Aid Robot", *IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 518-523, 2002.
- [7] M. Hans, B. Graf, and R. Schraft, "Robotic Home Assistant Care-o-bot: Past-present-future," *IEEE International Workshop Robot Human Interactive Communication*, pp. 380-385, 2002.

- [8] S. Dubowsky, F. Genot, S. Godding, H. Kozono, A. Skwersky, H. Yu, and L. S. Yu, "PAMM - A Robotic Aid to the Elderly for Mobility Assistance and Monitoring: A "Helping-Hand" for the Elderly," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 570-576, 2000.
- [9] M. Spenko, H. Yu, and S. Dubowsky, "Robotic Personal Aids for Mobility and Monitoring for the Elderly," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 14, no.3, pp. 344-351, 2006.
- [10] A. Rentschler, "Engineering and Clinical Evaluation of the VA-PAMAID Robotic Walker", Ph.D. dissertation, University of Pittsburgh, PA, 2004.
- [11] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, "Passive-type Intelligent Walking Support System "RT Walker", " *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3871-3876, 2004.
- [12] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, "Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp.981-990, 2007.
- [13] O.Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 500-505, 1985.
- [14] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1398-1404, 1991.
- [15] Z. Yu, M. Gao, X. Deng, L. Du, C. He, J. Di, Y. Yang, Y. Shi, and L. Hu, "APF Obstacle Avoidance in Polar Coordinates for Mobile Robot Based on Laser Radar", *International Conference on Advanced Computer Control*, pp. 549-552, 2010.
- [16] Y. S. Nam, B. H. Lee, and N. Y. Ko, "An Analytic Approach to Moving

- Obstacle Avoidance Using an Artificial Potential Field”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'*, pp. 482-487, 1995.
- [17] S. G. Tzafestas, “Neural Networks in Robotics: State of the Art”. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 12-20, 1995.
- [18] X. Yang and M. Meng, “Neural Network Application in Robot Motion Planning,” *IEEE Pacific Rim Conference on Communications Computers and Signal Processing*, pp. 611-614, 1999.
- [19] X. Yang and M. Meng, “Real-Time Collision-Free Motion Planning of a Mobile Robot Using a Neural Dynamics-Based Approach,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, pp. 1541-1552, 2003.
- [20] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975.
- [21] Y. Hu and X. Yang, “A Knowledge Based Genetic Algorithm for Path Planning of a Mobile Robot,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4350-4355, 2004.
- [22] H. Mahjoubi, F. Bahrami, and C. Lucas, “Path Planning in an Environment with Static and Dynamic Obstacles Using Genetic Algorithm: a Simplified Search Space Approach,” *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2483-2489, 2006.
- [23] W. G. Han, S. M. Baek, and T. Y. Kuc, “Genetic Algorithm Based Path Planning and Dynamic Obstacle Avoidance of Mobile Robots,” *IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation*, pp. 2747-2751, 1997.
- [24] P. Fiorini and Z. Shiller, “Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 17, No. 7, pp. 760-772, 1998.

- [25] T. Fraichard and H. Asama, "Inevitable Collision States : a Step Towards Safer Robots?" *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 388-393, 2003.
- [26] L. Martinez-Gomez and T. Fraichard, "Collision Avoidance in Dynamic Environments: an ICS-Based Solution and Its Comparative Evaluation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 100-105, 2009.
- [27] F. Zhang, D. Tan, and Y. Wei, "Obstacle Avoidance for Mobile Robots Based on Relative Coordinates," *IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, pp. 616-621, 2003.
- [28] Z. Yu, M. Gao, H. Liu, X. Deng, J. Liu, Q. Wu, and Y. Liu, "Dynamic Obstacle Avoidance in Polar Coordinates for Mobile Robot Based on Laser Radar," *Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*, pp. 334-338, 2008.
- [29] Microchip Corporation, <http://www.microchip.com/> [Accessed: June. 19, 2012].
- [30] Lord Corporation, <http://www.lord.com/> [Accessed: June. 19, 2012].
- [31] Hokuyo Corporation, <http://www.hokuyo-aut.jp/> [Accessed: June. 19, 2012].
- [32] M. A. Goodrich. (2002). *Potential Fields Tutorial* [Online]. Available : <http://students.cs.byu.edu/~cs470ta/goodrich/fall2004/lectures/Pfields.pdf>
- [33] 人口政策白皮書 99-100 年上半年度執行檢討報告---少子女化、高齡化及移民，2011。
- [34] 內政部戶政司全球資訊網，民國 101 年 5 月戶口統計資料分析，2012.06。
- [35] 饒方翔，被動式行動輔具之主動導引，國立交通大學電機與控制工程所碩士論文，2010。
- [36] 吳權哲，基於環境偵測之行動輔具主被動式導引，國立交通大學電機與控制工程所碩士論文，2011。