

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



智能型舞伴機器人舞步規劃系統之研究與實作  
The Research and Construction of Compliant Gait  
Planning System of Dance Partner Robot

研究生：黃仲緣

指導教授：鄭璧瑩 博士

中華民國九十八年六月

智能型舞伴機器人舞步規劃系統之研究與實作

The Research and Construction of Compliant Gait Planning System of Dance  
Partner Robot

研究生：黃仲緣

Student : Chung-Yuan Huang

指導教授：鄭璧瑩 博士

Advisor : Dr. Pi-Ying Cheng



A Thesis  
Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Mechanical Engineering

June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

# 智能型舞伴機器人舞步規劃系統之研究與實作

研究生：黃仲緣

指導教授：鄭璧瑩博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘 要

本文研究重點是發展能夠伴隨人類一起跳舞的跳舞機器人”NCiDPR09”；因為人類跳舞時，不同的人舞步大小與速度都不一樣，就算是同一個人也沒有每次都跳一樣，因此機器人必須要有容許舞步的誤差與判斷舞步順序是否正確的能力。目前市面上的機器人大部分已經發展成娛樂型機器人或是幫人類治療精神病的機器人，所以在這種狀態下，機器人與人類的互動會變得非常的重要。

本文提出一個具備即時人機互動與舞步協調模組的全方位移動平台控制技術，建構於具有紅外線感知及全向輪的 FESTO 公司開發之羅勃提諾（Robotino）機器人平台，搭配圖控程式軟體 Robotino View 編寫程式，使之達到可與人類搭配一起跳舞。

本研究選用舞步優雅的華爾滋舞步做為探討主題項目，研究華爾滋舞步程式轉換時產生誤差的問題，以及人類與舞伴機器人一起跳華爾滋時的舞伴機能模組之建立。當身體互動時，機器人可以伴隨與適應地配合人類的舞步旋律與動作，過程中人類可能會有舞步順序錯誤或是步法韻律不同

的變化，機器人能有效地即時判斷這些錯誤，並立即適當地回應調整舞步，有效地執行舞伴的角色。

本研究所探討的機器人舞伴功能主要可分為兩種：

1. 教學功能：將實際的舞步位置轉換成機器人的舞步程式，把程式轉換過程之誤差作改良，應用舞步程式跳出標準的華爾滋舞步，讓機器人可以教導人類跳標準的華爾滋舞步，並給予評分。
2. 舞伴功能：機器人系統具有標準的舞步程式，由於增加適應型容錯的舞步修正理論與程式模組，能自行配合舞者的腳步移動，跳舞過程中判斷舞者舞步的位置，配合新研發之學習修正功能做為舞步大小的修正。控制系統擴增並採用 8051 晶片作處理器，控制介面電路增加機器人上半身的手部擺動機能與自由度，並與舞曲節奏副程式架構結合，讓機器人能順利地配合舞者一起跳華爾滋。本研究所發展的即時人機互動控制方法與應用成果，也可延伸推廣應用於其他愈來愈頻繁有關人機互動為基礎的家用輔助與職場支援等機器人控制系統之發展與應用參考。

關鍵字：跳舞機器人、華爾滋舞步、羅勃提諾機器人、全方位移動平台、全向輪、人機互動。

# The Research and Construction of Compliant Gait Planning System of Dance Partner Robot

Student : Chung-Yuan Huang

Advisor: Dr. Pi-Ying Cheng

Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

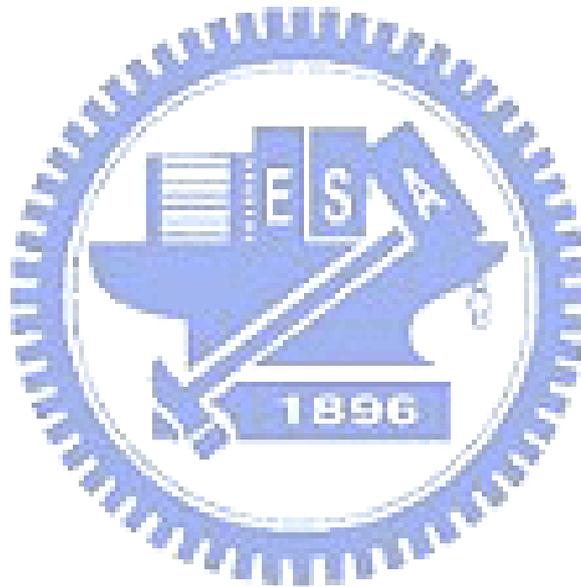
This paper focus on the compliant gait planning of the dance partner robot. The developed dance partner system is named as "NCiDPR09". Most of the time, a human dance with different partner the dance step size and velocity need to be adjusted. The control of the dance robot should be considered and applied for the integrated compliant motion with partner. Currently, many robots have been developed and applied for entertainment and health care etc. It means that the relationship and interaction between the robot and the human is getting closer.

This paper proposes an omnidirectional mobile platform control technique includes human-computer interaction and dance gait planning module, by using infrared sensors and omnidirectional wheel etc. The basic robot platform that adopted in the study is Robotino of FESTO with the command editing software "Robotino View".

The study proposes the "Waltz" as the dance key code, i.e. the music temple, dance gaits are all related to the contents of Waltz. The research topics are divided into two topics "Teaching mode" and "Dance partner mode". The detail of the two research topics are expressed as follows.

1. Teaching mode: Tracking a standard dance step of Waltz and converting the location to robot gait program. Adopting some innovative methods developed from the study to improve the precision of the dance gait data. Then, robot can be used to teach the human how to play standard Waltz dance, and can also issue a performance score to learner for reference.

2. Dance partner mode: Turning to “Dance partner mode”, the robot plays as a role of human dancer partner. The robot can follow the master dancer perform a standard Waltz gait under the standard music temple. While, the master dancer will show much different dance step size or now standard music temple, a robot can easy to push or collide or even hurt the master dancer. For establishing a smarter dance partner system, the study has developed the gait adjusting and temple following techniques etc to improve the performance of the dance partner robot. And the NCiDPR09 has also proved itself successfully to be a good dance partner when dancing in Waltz in the study. The achievement of the study can also be applied to improve the human-robot interaction tasks in many other situations.



**Keywords:** Dance Robot, Waltz dance gait, Robotino Robot, Omnidirectional Mobile Platform, Omnidirectional Wheels, Human-Machine Interaction.

## 誌 謝

首先最要感謝的是我的指導教授 鄭璧瑩博士，在本論文研究的兩年期間給予我許多的指導，無論是指導教授闡述許多研究生應該秉持的學術研究觀念和正確的處事態度，的確讓我獲益良多，我想我學到的不僅是一個解決問題的方法，更是一種做事的堅持及態度。而日常生活上的關懷和細心建議，則是讓異鄉求學的我備感溫馨。老師時時強調並養成我們做事負責與謹慎的態度，相信對我們往後的工作與人生，會是一個很好的典範，真的非常感謝老師。

在這裡要特別感謝我大學時的專題老師陳天輪老師，感謝他教了我許多程式與電路的寶貴知識，讓我可以國內與國際的機器人比賽拿到好名次。這兩年間，感謝交大電腦整合設計與製造實驗室中的所有成員，同學亮瑜、俊融、家宏及志元，及學弟軒丞、詩漢、漢嘉及瑞昌，謝謝你們在生活與研究上都給我眾多的幫忙與協助。另外，非常感謝論文口試委員所提出的建議與指教，讓本研究內容能夠更加充實、完善。

當然要感謝我的家人這兩年來在背後默默的支持我，讓我能夠無後顧之憂的完成這份學業，你們的辛苦我都知道，謝謝你們。

最後，要感謝的人實在太多了，謹於此，謝謝所有關懷我的人。

黃仲緣 謹致

# 目 錄

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
誌 謝 .....	V
目 錄 .....	VI
表目錄 .....	IX
圖目錄 .....	II
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景與動機 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.3 研究流程 .....	7
1.4 論文架構 .....	8
<b>第二章 研究方法 .....</b>	<b>10</b>
2.1 基礎理論 .....	10
2.1.1 機器人學座標系轉換 .....	10
2.1.2 全向輪的正向運動學方程式推導 .....	13
2.2 利用座標轉換環境邊界判斷之概念 .....	16
2.3 控制軟體介紹 .....	18

<b>第三章 實驗架構與研究流程 .....</b>	<b>22</b>
3.1 實驗硬體介紹.....	22
3.2 全向輪應用簡介與系統驗證說明.....	25
3.3 程式規劃：華爾滋舞步規劃.....	28
3.3.1 第一種舞步：斜進步 .....	31
3.3.2 第二種舞步：曲進步 .....	32
3.3.3 第三種舞步：斜左轉步.....	33
3.3.4 第四種舞步：斜右轉複合步法 .....	34
3.4 系統執行的流程 .....	36
<b>第四章 舞伴機器人舞步產生原理 1：教學功能 .....</b>	<b>39</b>
4.1 華爾滋舞步程式設計與實驗.....	39
4.1.1 斜進步之程式設計與實驗.....	40
4.1.2 曲進步之程式設計與實驗.....	44
4.1.3 斜左轉步之程式設計與實驗.....	48
4.1.4 斜右轉複合步之程式設計與實驗.....	52
4.2 舞步誤差改良.....	57
4.2.1 馬達回饋訊號修正輸入速度.....	57
4.2.2 非固定時差之積分方法.....	58
4.2.3 積分法與修正馬達 PID 控制一起使用.....	59

4.2.4 最佳訓練軌跡資料庫建立.....	64
4.3 舞步教學功能應用於評分系統.....	65
<b>第五章 舞伴機器人舞步產生原理 2：伴舞功能 .....</b>	<b>66</b>
5.1 無預設舞步之從動機器人程式設計與實驗.....	66
5.2 有預設舞步具避障修正之主動機器人程式設計與實驗.....	72
5.3 舞步學習修正方法 .....	74
5.4 設計副程式架構的功能.....	77
5.5 設計 8051 電路與程式加強羅勃提諾的功能.....	79
<b>第六章 結論與未來研究方向 .....</b>	<b>81</b>
6.1 結論.....	81
6.2 未來研究方向.....	84
<b>參考文獻.....</b>	<b>85</b>



## 表 目 錄

表 2.1 Robotino View 操作介面解釋.....	21
表 3.1 羅勃提諾移動與馬達轉速對應關係.....	27
表 4.1 斜進步之機器人座標與角度參數.....	41
表 4.2 曲進步之機器人座標與角度參數.....	45
表 4.3 斜左轉步之機器人座標與角度參數.....	49
表 4.4 斜右轉複合步之機器人座標與角度參數.....	53
表 5.1 有無副程式功能之比較.....	78



## 圖目錄

圖 1.1 步法轉換的控制架構.....	2
圖 1.2 舞伴機器人-MS Dance R.....	3
圖 1.3 全向輪中主動輪與從動輪的關係.....	4
圖 1.4 三軸全向平台 .....	5
圖 1.5 足球機器人.....	6
圖 1.6 研究流程圖 .....	7
圖 2.1 球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖.....	10
圖 2.2 一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係.....	12
圖 2.3 全向平台的運動力學圖 .....	13
圖 2.4 座標轉換環境邊界判斷之程式流程圖.....	18
圖 2.5 Robotino View 操作介面 .....	20
圖 2.6 Lab VIEW 控制羅勃提諾馬達前置面板操作介面.....	20
圖 2.7 Lab VIEW 控制羅勃提諾馬達程式方塊圖視窗.....	20
圖 3.1 羅勃提諾機器人之底部架構圖 .....	23
圖 3.2 羅勃提諾機器人之架構圖.....	24
圖 3.3 極座標轉卡氏座標馬達控制程式.....	25
圖 3.4 馬達控制的程式流程圖 .....	26

圖 3.5 羅勃提諾移動方向與馬達轉速對應關係.....	28
圖 3.6 華爾滋連續組合步之腳步順序位置圖[22].....	30
圖 3.7 (a) 斜進步之腳步圖            (b) 斜進步之腳步方向與位置圖.....	31
圖 3.8 (a) 曲進步之腳步圖            (b) 曲進步之腳步方向與位置圖.....	32
圖 3.9 (a) 斜左轉步之腳步圖.....	33
圖 3.9 (b) 斜左轉步之腳步方向與位置圖.....	33
圖 3.10 (a) 斜右轉複合步之腳步圖.....	34
圖 3.10 (b) 斜右轉複合步之腳步方向與位置圖.....	34
圖 3.11 智能型舞伴機器人 NCiDPR09 之實體圖 [6].....	36
圖 3.12 智能型舞伴機器人 NCiDPR09 的系統執行流程[6].....	38
圖 4.1 機器人跳斜進步之位置方向圖.....	41
圖 4.2 斜進步之機器人座標與角度.....	42
圖 4.3 斜進步程式控制流程圖.....	43
圖 4.4 斜進步實驗之機器人位置變化圖.....	43
圖 4.5 斜進步第一次測試結果比較.....	44
圖 4.6 機器人跳曲進步之位置方向圖.....	45
圖 4.7 曲進步之機器人座標與角度.....	46
圖 4.8 曲進步程式控制流程圖.....	47
圖 4.9 曲進步實驗之機器人位置變化圖.....	47

圖 4.10 曲進步第一次測試結果比較.....	48
圖 4.11 機器人跳斜左轉步之位置方向圖.....	49
圖 4.12 斜左轉步之機器人座標與角度.....	50
圖 4.13 斜左轉步程式控制流程圖.....	51
圖 4.14 斜左轉步實驗之機器人位置變化圖.....	51
圖 4.15 斜左轉步第一次測試結果比較.....	52
圖 4.16 機器人跳斜右轉複合步之位置方向圖.....	53
圖 4.17 斜右轉複合步之機器人座標與角度.....	54
圖 4.18 斜右轉複合步程式控制流程圖.....	55
圖 4.19 斜右轉複合步實驗之機器人位置變化圖.....	56
圖 4.20 斜右轉複合步第一次測試結果比較.....	56
圖 4.21 馬達回饋訊號修正輸入速度之示意圖.....	58
圖 4.22 非固定時差之積分方法之示意圖.....	59
圖 4.23 調整 PID 參數之結果示意圖.....	61
圖 4.24 斜進步修正結果比較.....	62
圖 4.25 曲進步修正結果比較.....	62
圖 4.26 斜左轉步修正結果比較.....	63
圖 4.27 斜右轉複合步修正結果比較.....	63
圖 4.28 最佳訓練軌跡資料庫建立程式.....	64

圖 4.29 評分系統之程式流程圖.....	65
圖 5.1 從動機器人跟隨舞者之程式流程.....	68
圖 5.2 從動機器人實驗之示意圖.....	69
圖 5.3 從動機器人跟隨舞者之第一次測試 $V_x = -250(S1 - 0.6)$ .....	69
圖 5.4 從動機器人跟隨舞者之修正完成測試 $V_x = -300(S1 - 0.8)$ .....	70
圖 5.5 前兩次測試中舞伴與機器人之距離.....	70
圖 5.6 (a) 修正速度 $V_x = a(S1 - b)$ 參數 a、b 測試 1.....	71
圖 5.6 (b) 修正速度 $V_x = a(S1 - b)$ 參數 a、b 測試 2.....	71
圖 5.7 機器人跟隨舞者的程式流程.....	73
圖 5.8 (a) 預設舞步無避障功能之位置變化圖.....	73
圖 5.8 (b) 預設舞步有避障功能之位置變化圖.....	73
圖 5.9 避障功能之測試結果.....	74
圖 5.10 斜進步舞伴與機器人之總距離.....	75
圖 5.11 舞步學習修正方法之程式架構.....	75
圖 5.12 舞步學習修正方法之程式流程圖.....	76
圖 5.13 副程式功能的架構圖.....	77
圖 5.14 副程式功能的程式流程.....	78
圖 5.15 伺服馬達控制副程式流程圖 [23].....	80
圖 5.16 伺服馬達裝於機器人手部之實驗動作圖.....	80

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

自從 18 世紀末工業革命以來，工業的發展便與人類的生活息息相關，其中機器人的高度發展更成為不可忽視的力量，工業界因為機器人的幫助而使得生產速率大為提升，近年來，機器人已不只是應用於工業界，有更多的機器人與我們生活息息相關，如機器狗、照顧老人生活起居的機器人、輪型機器人與四足機器人等。而輪型機器人的應用範疇非常廣泛，舉凡軍事、工業、娛樂以及甚至行星探測都是輪型機器人應用的領域部份，此外也因應日漸頻繁的恐怖攻擊事件，輪型機器人更可以應用至拆除爆裂物，人員搜救等工作。這些機器人大部分已經發展成娛樂型機器人或是幫人類治療精神病的機器人，所以在這些情況下，機器人與人類的互動會變得非常重要，也就是人工智慧的發展。

在這篇論文中，將研究人類與舞伴機器人一起跳華爾滋的身體交互作用，要讓機器人協調性的配合人類跳舞，過程中人類可能會有步法順序錯誤或是步法大小不同的誤差，如果機器人能有效的判斷這些錯誤與誤差，那將可以有效的執行和機器人的身體互動為基礎的各種不同的工作。在華爾滋跳舞過程中，一個人至少要跟一個舞伴互動，除此之外，每個人都要評估舞伴的意圖和判斷環境的擺設等等，才可以優美的跳舞，所以華爾滋

舞步是人類與機器人身體互動調性的一個很好的例子。

本實驗室[NCTU CIDM Lab]發展出華爾滋舞伴機器人，以圖形化程式軟體 Robotino View 來控制羅勃提諾，先從華爾滋的幾種代表性舞步先做起，討論其理論與測試上的誤差造成原因，並設法改進。最後，舞伴機器人與舞者進行各種舞步的實驗，可以順利跳完一首華爾滋。

## 1.2 文獻回顧

2003 年 K. Kosuge [1]等人的論文中提到關於交際舞舞伴機器人-*Ms Dance R*，如圖 1.1 所示，提出步法轉換的控制架構基礎(CAST)，論文中討論跳舞機器人與人的交互作用的發展平台，跳舞機器人身上有全向平台，且在機器人的移動平台和身體之間安裝的一個力量／力矩感測器，依照交際舞的舞步與人一起跳舞。

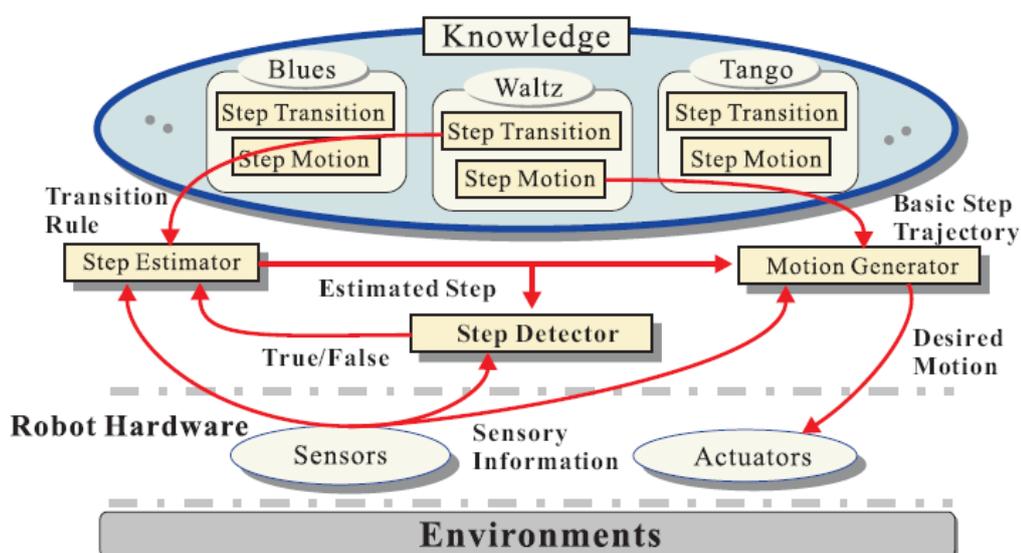


圖 1.1 步法轉換的控制架構

2005 年 T. Takeda [2] 等人的論文中提到關於舞伴機器人對於下一個舞步改善的判斷制度。在跳舞過程中，如圖 1.2 所示，利用機器人腰部的力量/力矩感測器對時間的變化量取得資料，對每一個舞步重複的實驗，因為一個人不可能總是對機器人使用相同的力量或力矩，為了要處理這些不確定的資料，所以使用了隱馬爾可夫模型 (Hidden Markov model) 來作舞步判斷的方法，簡稱 HMM 法，與先前所使用的類神經網路法作比較，改良了步伐判斷制度而且設計出使用 HMM 的主要模組，機器人可以成功的評估出人的下一個舞步。

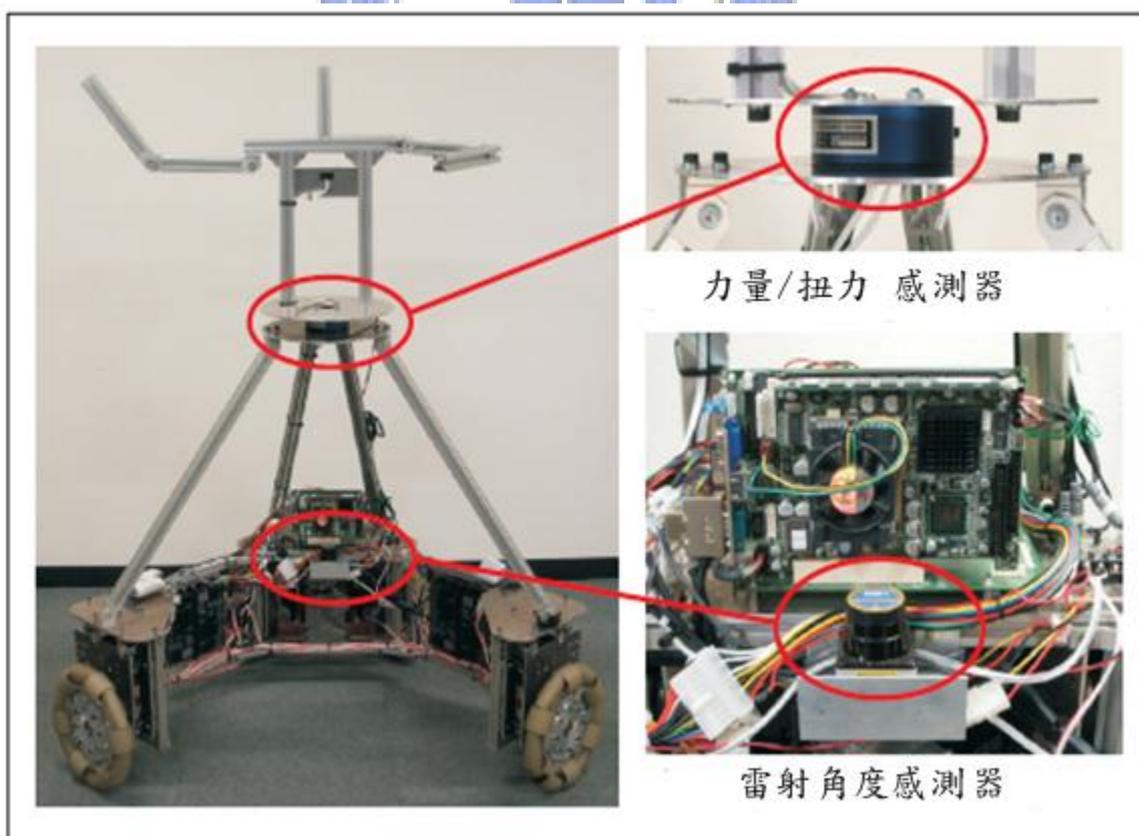


圖 1.2 舞伴機器人-MS Dance R

2007 年 Y. Hirata [3]的論文中提到關於發現舞步選擇出現一個很大的問題，跳舞中機器人選擇錯誤舞步時的情形沒有考慮到，這種情形關係到機器人與人類的協調問題，發現舞步錯誤的選擇使用隱式馬爾可夫模型來設計，實驗的結果說明了此方法的可行性，但是缺點為判斷時間稍長，將來可以再改進。

2007 年王國賓[4]的論文中提到全方位之移動平台的設計為利用全向輪 (Omni-directional Wheel)當作主要運動的機構。參考圖 1.3 為全向輪中主動輪與從動輪的關係，全向輪是由一主要動力輪和輪外圍的幾個從動輪所組成，靠馬達轉動讓整個平台可以在同一平面上任意移動。



圖 1.3 全向輪中主動輪與從動輪的關係

全向平台之全向輪排列方式也分為 3 軸或 4 軸，差別在於整個平台使用全向輪驅動的數量，參考圖 1.4 為三軸全向平台，每個輪子夾角為 120 度。

全向平台透過每個全向輪提供之轉速的組合，決定平台的移動方向，其驅動步驟簡述如下：

1. 決定平台要移動之 X、Y 方向速度。
2. 決定平台需旋轉之速度。
3. 根據全向輪正向運動學之分析，計算各輪需提供的角速度。
4. 透過馬達驅動平台移動。

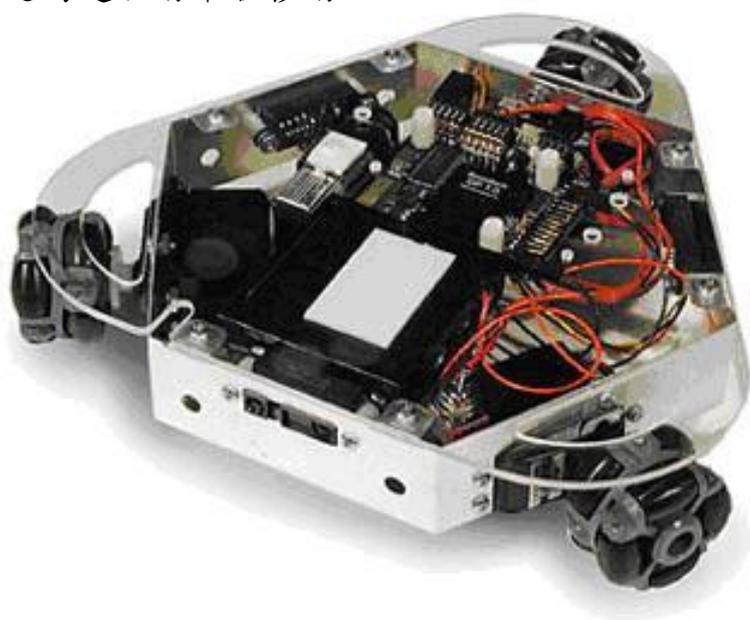


圖 1.4 三軸全向平台

由於全方位之移動平台之機動性高，可沿著側向移動而不需改變平台之轉向，所以，目前已廣泛的被各國應用在國際中型足球機器人比賽 (Middle Size League of RoboCup ) 之中，參考圖 1.5，讓足球機器人可以快速且順暢的追逐比賽中的球，增加比賽的複雜度與可看性。因此，全方位移動平台，未來勢必成為高機動性機器人需選用的平台之一。

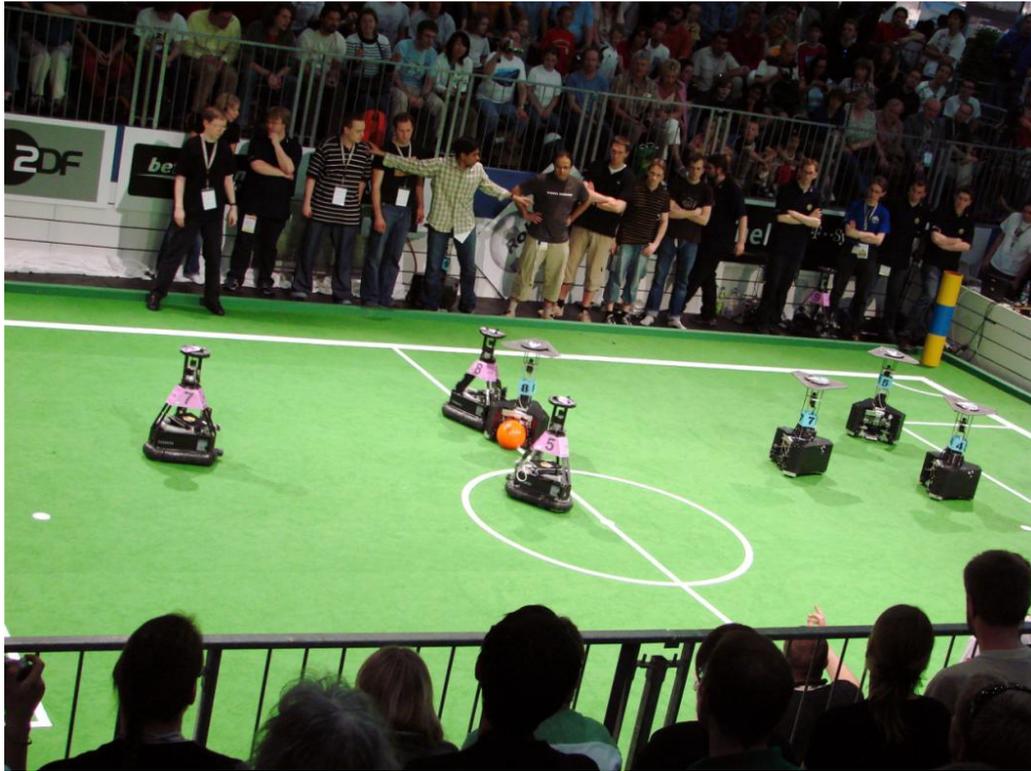


圖 1.5 足球機器人

2005年韓孟儒[5]等人的論文中提到，因為全向輪有固定的排列方式才使得全向移動平台具有機動性和可操作性，而且可高度配合使用者所需的各種運動軌跡，也因此比較容易規劃出複雜多變或具有障礙的路徑。相較於一般的移動平台，全向平台擁有不需迴轉半徑就能夠原地旋轉、可直接360度全方位移動且不用改變輪軸方向，另外還可以同時獨立控制平台的轉動與移動等優點。其中三個全向輪的夾角均為120度，從平台中心到輪的距離等長，形成正三角形，且全向輪與驅動馬達垂直，三個馬達再同時指向平台的中心部份。這樣的設計安排將使得三個全向輪具有對稱性，使得無論是在機構重心上的考量或是馬達運轉控制上都較為穩定與容易。

### 1.3 研究流程

本文研究重點是發展能夠伴隨人類一起跳舞的跳舞機器人，本研究分為兩個方向發展其功能；即 1. 教學功能：將實際的舞步位置轉換成機器人的舞步程式，把程式轉換過程之誤差作改良，應用舞步程式跳出標準的華爾滋舞步，讓機器人可以教導人類跳標準的華爾滋，並給予評分。2. 舞伴功能：機器人系統具有標準的舞步程式，由於增加舞步修正理論與程式模組，跳舞過程中判斷舞者舞步的位置，配合自行研發之學習修正功能作為舞步大小的修正，並與副程式架構結合，讓機器人能順利的配合人一起跳華爾滋。圖 1.6 是研究架構的流程。

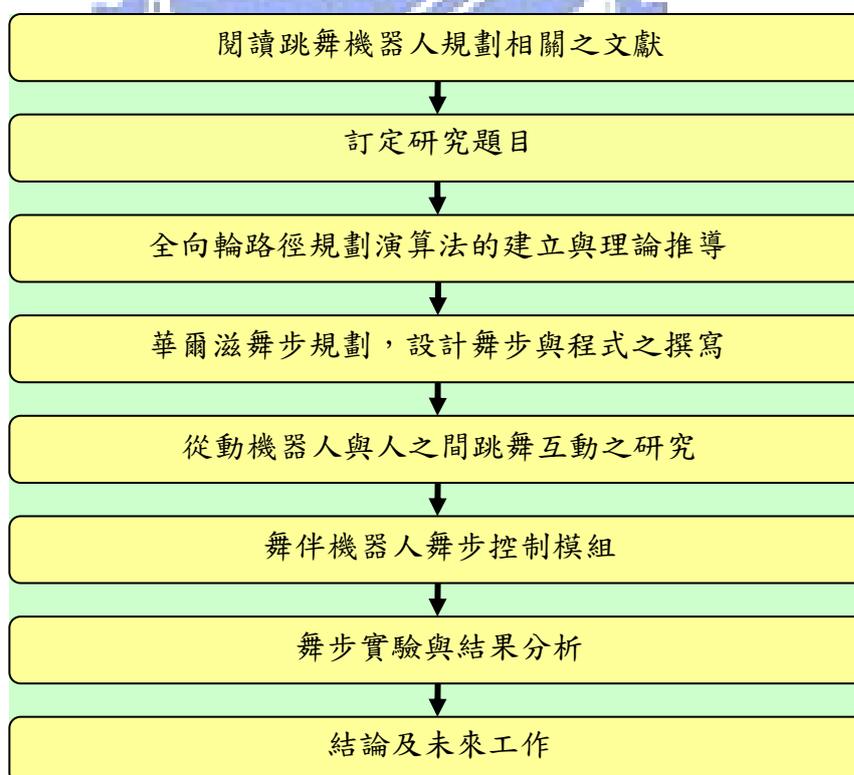


圖 1.6 研究流程圖

## 1.4 論文架構

第一章『緒論』：說明本論文研究之動機與背景、文獻回顧、研究流程與章節架構的介紹。

第二章『研究方法』：闡述有關機器人路徑規劃之基礎理論，如機器人學座標系轉換及全向輪的正向運動學推導，另外提出利用座標轉換環境邊界判斷之概念，為新開發之功能，有待之後的研究，最後是對控制軟體作簡單的介紹。

第三章『實驗架構與研究流程』：首先介紹實驗硬體羅勃提諾，再來是全向輪應用簡介與系統驗證說明，最後是程式規劃的部分，關於華爾滋舞步規劃的設計與程式的規劃與執行的流程。

第四章『舞伴機器人舞步產生原理 1：教學功能』：教學功能主要的研究為華爾滋舞步轉換距離之精確度，主要在 4.1 與 4.2 節討論，4.1 節主要設計四種代表性之華爾滋舞步，直接使用時間與速度的關係來設計出四種華爾滋舞步，此種方式為開迴路控制，所以誤差比較大。4.2 節就此誤差進行研究，利用三種方法逐漸減少誤差，包括馬達回饋訊號修正輸入速度，利用馬達實際速度與程式週期時間積分可得到實際位移量，能有效的修正機器人之位置，加上 PID 控制之後讓精確度更為提高，舞步教學的機器人只需要撰寫華爾滋舞步範例，讓舞伴跟著機器人跳舞，行為比較單純。4.3 節在討論教學功能的應用，利用標準舞步之機器人與人一起跳舞，使用感

測器測量相對距離經過分析比對之後，可以幫舞伴評分，由分數高低可以知道舞步的好壞。

第五章『舞伴機器人舞步產生原理 2：伴舞功能』：伴舞功能的部分就比較多變，5.1 節為無預設舞步之從動機器人程式設計與實驗，讓機器人擔任舞伴的角色來跳舞，沒有預設舞步路徑，裡面包含了許多感測器的判斷措施，因此伴舞功能比教學功能有更多的彈性，如舞步學習修正方法與設計副程式架構的功能等等，最後會將這些功能作結合，讓機器人更具有人工智慧。利用 8051 程式與電路控制伺服馬達，裝於機器人之手部，使舞伴機器人有更多的自由度，讓跳舞過程更為生動。

第六章：『結論與未來研究方向』闡述本研究之特色及未來論文應進行的方向。



## 第二章 研究方法

本章節簡單介紹了機器人相關的應用原理，包含了機器人學座標系轉換與全向輪的正向運動學推導。機器人學座標系轉換可使用在機器人舞步位置的計算，全向輪的正向運動學可使用在機器人輪子的速度控制，並介紹座標轉換環境邊界判斷之概念與控制軟體簡單介紹。

### 2.1 基礎理論

#### 2.1.1 機器人學座標系轉換

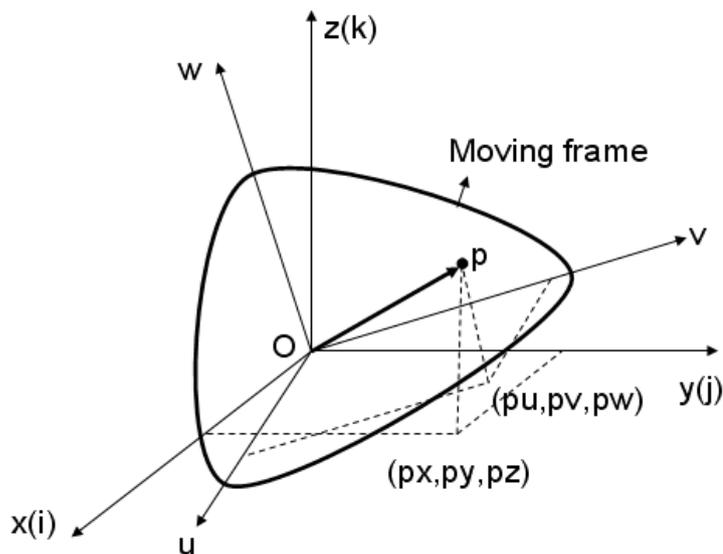


圖 2.1 球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖

圖 2.1 為球面轉動之參考座標系與移動座標系關係圖，令  $i, j, k$  為參考座標系 A 的三軸之單位向量，而  $u, v, w$  為移動座標系 B 的三軸之單位向量，當以參考座標系 A 來描述  $u, v, w$  這三個向量時，可以得到以下結果：

$$\begin{aligned}
{}^A\vec{u} &= u_x\vec{i} + u_y\vec{j} + u_z\vec{k} \\
{}^A\vec{v} &= v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k} \\
{}^A\vec{w} &= w_x\vec{i} + w_y\vec{j} + w_z\vec{k}
\end{aligned} \tag{2-1}$$

該點 P 的位置向量由 A 來表示

$${}^A\vec{p} = p_x\vec{i} + p_y\vec{j} + p_z\vec{k} \tag{2-2}$$

或是以移動座標系 B 表示

$${}^B\vec{p} = p_u\vec{u} + p_v\vec{v} + p_w\vec{w} \tag{2-3}$$

將(2-1)式帶入(2-2)式可以得到以參考座標系 A 所表示的 P 點的位置向量

$$\begin{aligned}
{}^A\vec{p} &= (p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x)\vec{i} + (p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y)\vec{j} \\
&\quad + (p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z)\vec{k}
\end{aligned} \tag{2-4}$$

比較(2-3)式與(2-4)式可得

$$\begin{aligned}
p_x &= p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x \\
p_y &= p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y \\
p_z &= p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z
\end{aligned} \tag{2-5}$$

將(2-4)式以矩陣表示

$${}^A\vec{p} = {}^A R_B {}^B\vec{p} \quad \text{其中} \quad {}^A R_B = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{pmatrix} \tag{2-6}$$

因為為正交矩陣，所以  ${}^B R_A = {}^A R_B^{-1} = {}^A R_B^T$ ，反求  ${}^A\vec{p}$  對  ${}^B\vec{p}$  間的關係，可得

$${}^B\vec{p} = {}^A R_B^T {}^A\vec{p} \tag{2-7}$$

下面考慮一般性空間移動的座標轉換關係：

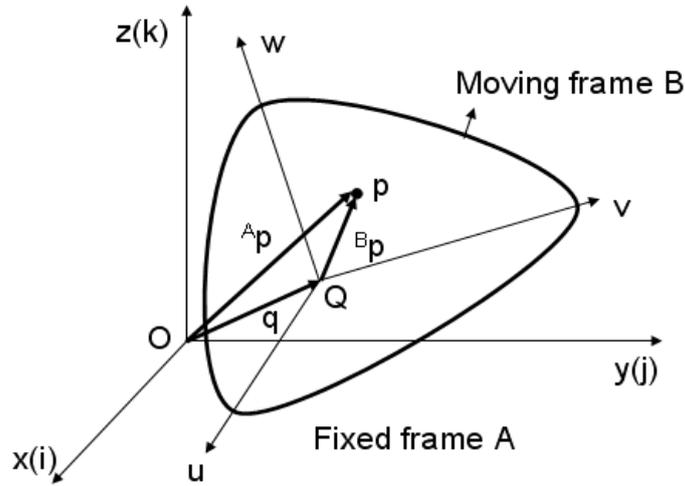


圖 2.2 一般空間移動之參考座標系與移動座標系關係

根據圖 2.2，發現移動座標系除了轉動外還包含了移動  $q$ ，從圖中的向量關係圖可以得到兩座標系之間的關係

$${}^A\vec{p} = {}^A R_B {}^B\vec{p} + {}^A\vec{q} \quad (2-8)$$

將上式整理成均質轉換矩陣 (Homogeneous Transformation Matrix) 可得

$${}^A\vec{p} = {}^A T_B {}^B\vec{p} \quad (2-9)$$

其中

$${}^A T_B = \begin{pmatrix} {}^A R_B & \vdots & {}^A\vec{q} \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots \\ 000 & \vdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

要反求  ${}^A\vec{p}$  對  ${}^B\vec{p}$  間的關係時，因為  ${}^A T_B$  並非正交矩陣 ( ${}^A T_B^{-1} \neq {}^A T_B^T$ )，將 (2-8) 式等號兩邊同乘  ${}^A R_B^{-1}$ ，又  ${}^A R_B^{-1} = {}^A R_B^T$ ，可得

$${}^B\vec{p} = {}^A R_B^T {}^A\vec{p} - {}^A R_B^T {}^A\vec{q} = {}^A T_B^{-1} {}^A\vec{p}$$

其中

$${}^A T_B^{-1} = {}^B T_A = \begin{pmatrix} {}^A R_B^T & \vdots & -{}^A R_B^T {}^A\vec{q} \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ 000 & \vdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

有了上述的關係式，即可輕易的求得兩座標系之間的轉換關係。

## 2.1.2 全向輪的正向運動學方程式推導

為了建立全向平台的運動動態模型，必須先畫出全向平台的運動力學圖。首先自訂三軸式的全向平台運動座標  $[X_m, Y_m]$ ，如圖 2.3 所示，將座標中心放置於平台中心，垂直方向為  $X_m$  軸座標，水平方向則定為  $Y_m$  軸座標。定義平台的正前方為零度，角度由逆時針方向遞增，因此三個全向輪分別位於 60 度、180 度與 240 度位置。三個全向輪各相差 120 度，一樣訂定全向輪的運動方向逆時針為正向。假設全向輪的半徑為  $R$ 、各輪距離平台中心距離為  $L$ 。  $V_x$  為平台運動速度垂直分量、  $V_y$  為平台運動速度水平分量、  $\Omega$  為平台自身旋轉角速度、  $\theta$  則為平台運動方向與  $X_m$  軸之夾角。  $V_1$ 、  $V_2$ 、  $V_3$  為每一個輪子的速度，  $\omega_1$ 、  $\omega_2$ 、  $\omega_3$  為每一個輪子的角速度，用三個箭頭的符號分別去代表三個全向輪所提供的轉動方向。

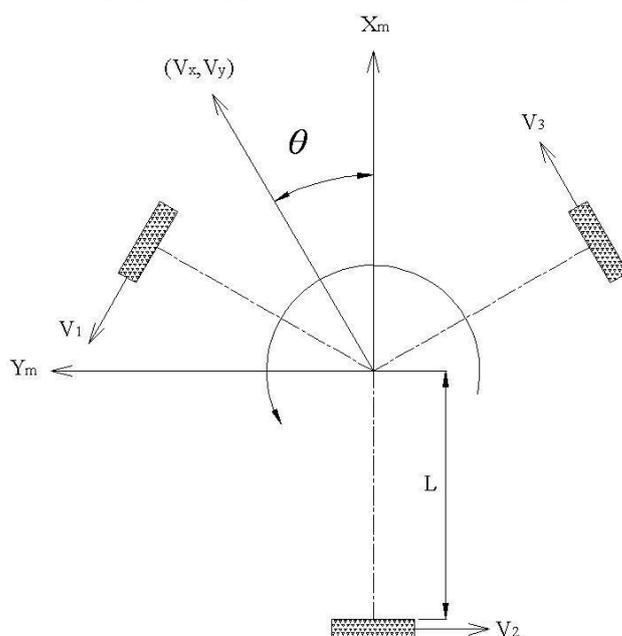


圖 2.3 全向平台的運動力學圖

可以從運動力學圖中得到各輪的轉速和平台運動速度及方向的關係如

(2-12)、(2-13)、(2-14)式所示：

$$V_1 = R\omega_1 = -V_x \sin 60^\circ + V_y \sin 30^\circ + L\Omega \quad (2-12)$$

$$V_2 = R\omega_2 = -V_y + L\Omega \quad (2-13)$$

$$V_3 = R\omega_3 = V_x \sin 60^\circ + V_y \sin 30^\circ + L\Omega \quad (2-14)$$

可以發現各輪的轉速皆和平台的平移與自轉角速度有關係，可以從全向平台的機構得到平台與三個全向輪個別的速度關係式，並將(2-12)(2-13)(2-14)式寫為方程式(2-15)所示的矩陣形式正向運動學，如(2-15)

所示：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

為了得到各個輪子的角速度，利用輪子向前運動時跟地面接觸的切線速度即為輪子本身旋轉角速度與半徑的乘積關係，等式雙邊乘以輪半徑參數 R 的倒數之後，即可得到各輪轉速和平台運動速度及角速度之關係，如(2-16)

所示：

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

推導(2-16)式可再整理得全向輪的正向運動學方程式(2-17)式：

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \Omega \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

可以得到由已知各輪轉速解得平台運動速度向量的關係式。藉由此關係式便能輸入各全向輪轉速加以控制，得到所需的機器人運動方向及速度。將得到的運動學方程式分析之後，可以應用到一些基本的線性移動運動模式的測試分析範例。

當平台沿著垂直方向  $X_m$  軸移動時，三輪的關係式為：

$$\omega_1 = -\omega_3 \quad \omega_2 = 0 \quad (2-18)$$

當平台沿著水平方向  $Y_m$  軸移動時，三輪的關係式為：

$$\omega_1 = \omega_3 \quad \omega_1 + \omega_3 + \omega_2 = 0 \quad (2-19)$$

由(2-18)(2-19)式可得知當全向輪平台另有水平或垂直方向位移時，三輪的關係式為：

$$\omega_1 + \omega_3 + \omega_2 = 0 \quad (2-20)$$

由(2-20)式可以發現此時平台運動是沒有方位轉動變化的角速度，因此假設所需的運動使平台沒有轉動，則將平台的角速度  $\Omega$  設為零，平台將只剩下線性移動而不轉動。並簡化得到的運動方程式，如(2-21)~(2-23)表示：

$$V_1 = R\omega_1 = -V_x \sin 60^\circ + V_y \sin 30^\circ \quad (2-21)$$

$$V_2 = R\omega_2 = -Vy \quad (2-22)$$

$$V_3 = R\omega_3 = Vx \sin 60^\circ + Vy \sin 30^\circ \quad (2-23)$$

再將(2-21)(2-22)(2-23)式寫為矩陣形式以(2-24)、(2-25)所示：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vx \\ Vy \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vx \\ Vy \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

在 3.2 節中，本研究實際利用羅勃提諾作為實驗模擬，給定平台運動狀態的速度與方向並測得各輪轉速值再與(2-25)式相互比較驗證。



## 2.2 利用座標轉換環境邊界判斷之概念

本研究新開發的功能想利用座標轉換取代GPS的硬體達到邊界判斷提出之概念，GPS衛星導航系統的運作原理為衛星回傳資料會告訴使用的接收機三件事情：1. 第幾號衛星，2. 現在的位置，3. 什麼時間發送這訊息。當GPS接收機接收到這些資料後會將資料儲存起來，並修正GPS接收機上的時間，並比較每一衛星訊號接收到的時間與本身的時間差，進而計算出每一

衛星與接收機的距離，再利用三角公式計算出接收機所在位置。三顆衛星可做2D定位(經度及緯度)，四顆以上的衛星可做3D定位(經度、緯度及高度)。接收機會持續不斷地更新所在的位置，所以它可計算出本身的移動方向及速度。

衛星導航之誤差約為三到五公尺，需要經過計算才能得到座標位置，大約會延遲一秒的時間，使用在戶外型機器人或無人飛行載具上綽綽有餘，但是對於室內型機器人需要比較高的精確度，可以使用北極星系統(North Star)，但是此硬體需要另外裝在機器人上與環境中，因為考量到人類身上並沒有類似GPS的系統，而是以學習的方式來判斷出在環境中本身所在的位置，所以希望以機器人自行學習的方式來取代此項裝置。

此研究使用馬達上的編碼器計算出馬達之實際速度，配合積分法的使用與馬達PID控制，算出當時的位移方向與轉向，經過座標轉換得到機器人對於起點的絕對位置座標，利用機器人的九顆紅外線感測器來判斷周圍物體的距離，並將環境的邊界點紀錄下來，讓機器人跳舞時可以避免向邊界點移動，參考圖 2.4 為座標轉換環境邊界判斷之程式流程圖，導航副程式架構為利用馬達回饋訊號經過座標轉換程式之後，配合紅外線感測器訊號作機器人座標位置距離之計算，計算完成之後轉換為環境邊界參數資料，當華爾滋舞步執行時，同時執行環境邊界判斷副程式，假如接近環境邊界，程式就會自動執行閃避的功能，讓機器人不會很接近邊界才反應，使舞步

能順利執行。

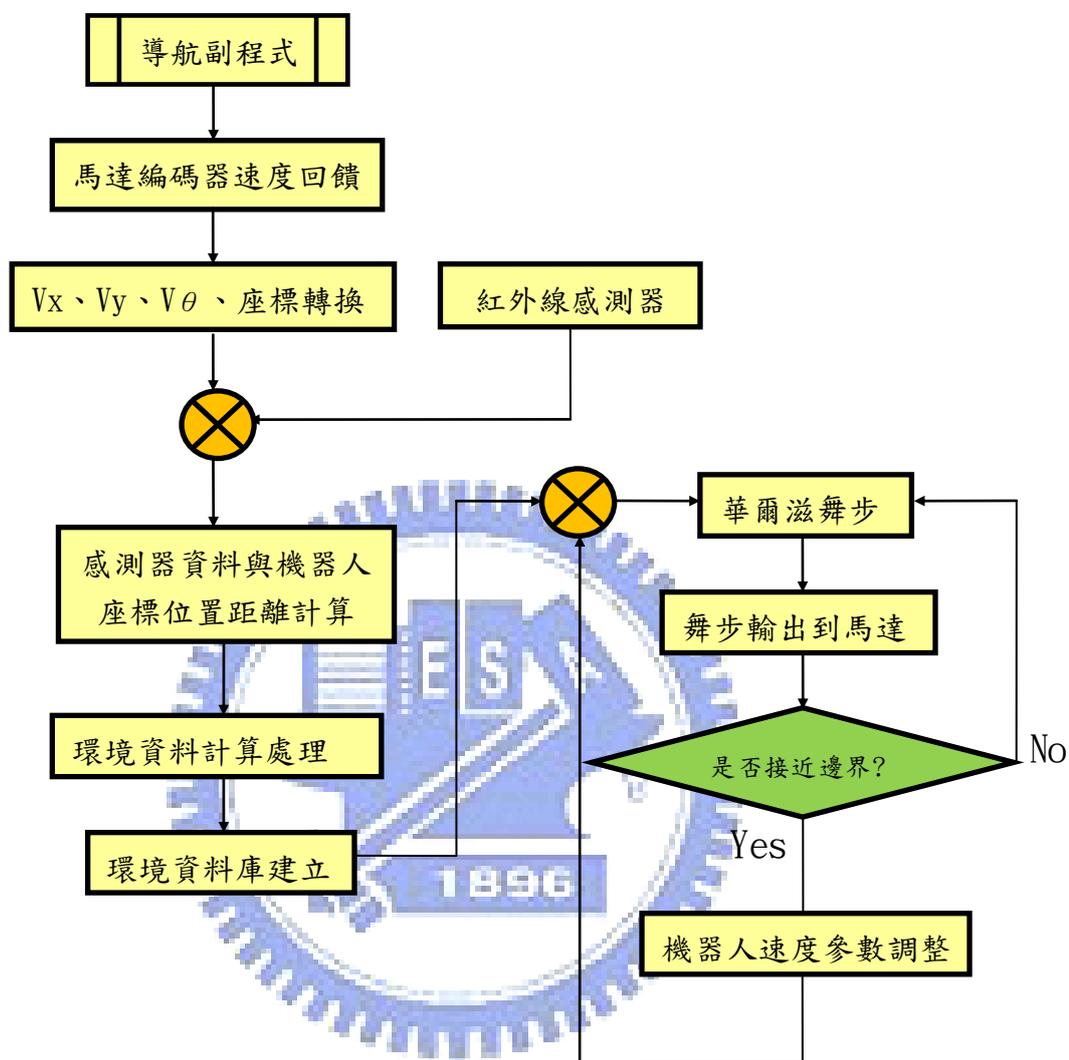


圖 2.4 座標轉換環境邊界判斷之程式流程圖

### 2.3 控制軟體介紹

本研究所使用的機器人控制軟體為Robotino View，類似LabView的圖形化介面，用內建的程式函數方塊來編輯程式，跟傳統的C或C++語言比起

來，程式更為簡單方便，操作容易，只要用滑鼠選取需要的程式函數方塊與方塊間連接的線，透過無線網路與跳舞機器人連線就可以操控機器人，裡面有內建的方程式可以使用，可以輸入所需要的參數，此套軟體是專門為羅勃提諾所設計的。Robotino View有傳送訊號到馬達控制器，顯示與改變感測器數值，羅勃提諾於動作操作中亦可由Robotino View編輯程式。

攝影機透過 Robotino View 的協助，可以顯示所擷取影像顏色的面積大小，物體的位置轉換成座標，經過程式的撰寫加入運算之後，可應用於路徑與物件循跡上。

軟體的程式函數方塊功能包括邏輯、數學運算、向量分析、資料展示、影像處理、訊號產生器、濾波器、羅勃提諾硬體、導航器、輸入裝置、資料轉換、順序控制、程式選擇等等各式各樣應用的模組，參考圖 2.5 與表 2.1 為軟體的操作介面介紹，幾乎囊括了所有機器人運動軌跡的可能方式，功能算是相當地完整。而在本研究所使用的模組，基本上是由上面九顆紅外線感測器配合三個全向輪速度、加速度與旋轉方向的控制所達成。FESTO 公司也已經將羅勃提諾用於 LabView 與 Matlab 的模組寫好，所以除了可以使用 Robotino View 或是 C++控制機器人外，LabView 或是 Matlab 也一樣可以控制，參考圖 2.6、2.7 為使用 LabView 控制 Robotino 馬達，可以使程式的擴充性增加。

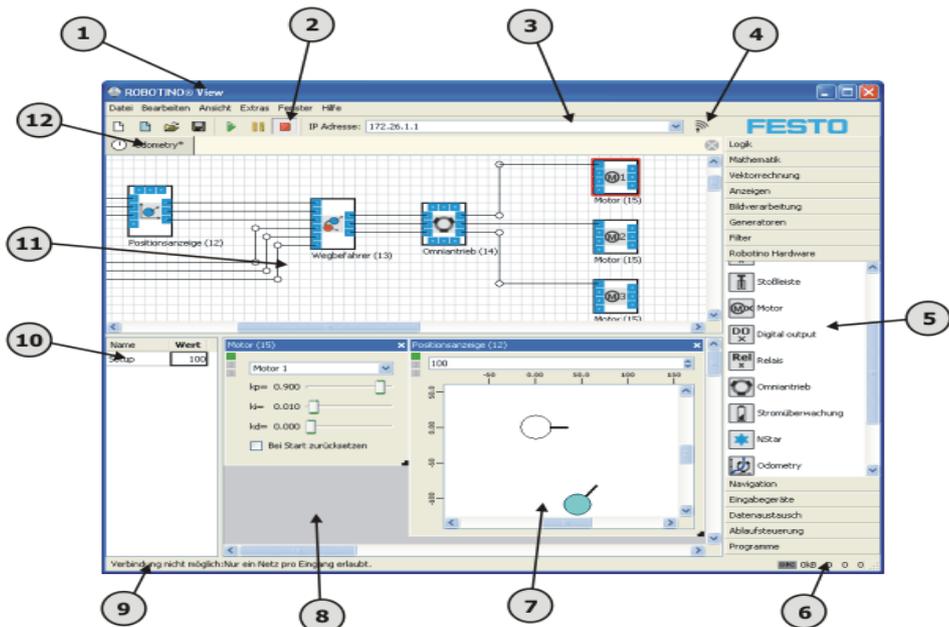


圖 2.5 Robotino View 操作介面

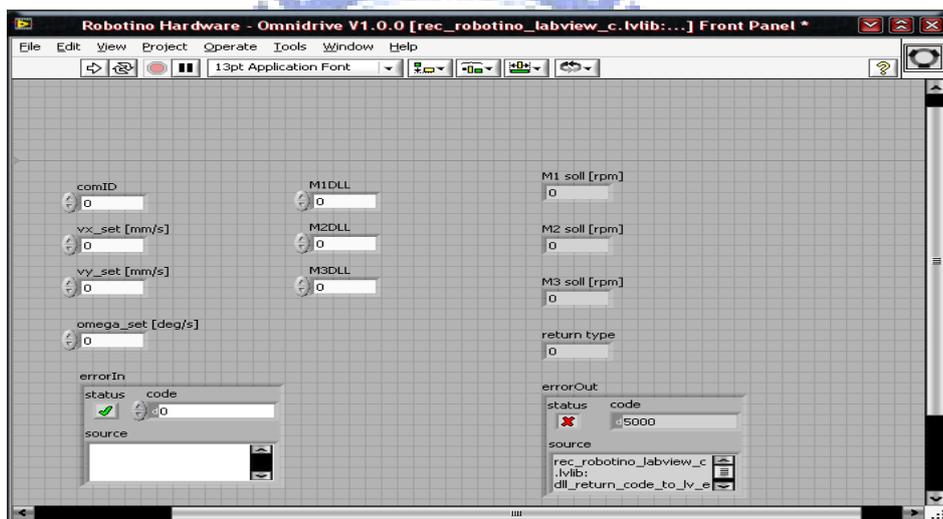


圖 2.6 Lab VIEW 控制羅勃提諾馬達前置面板操作介面

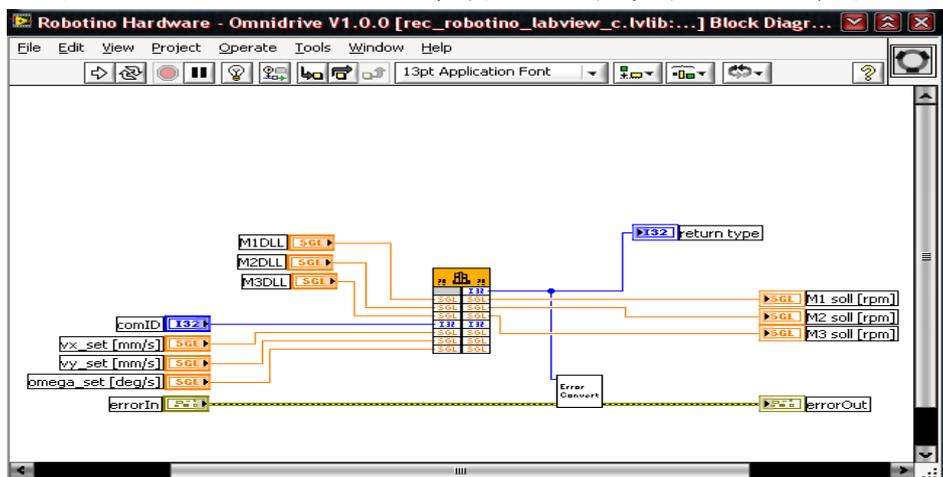


圖 2.7 Lab VIEW 控制羅勃提諾馬達程式方塊圖視窗

表 2.1 Robotino View 操作介面解釋

代號	名稱	說明
1	軟體名稱目錄	顯示軟體名稱，可以最大化、最小化或關閉視窗。
2	工具列	可以建立、打開或關閉程式。 開始、暫停或停止程式執行。 在停止按鈕上快點兩下可強迫所有程式停止執行。
3	IP 住址輸入欄	受控制機器人的 IP 住址輸入。
4	網路連線	開始或結束機器人系統的連線。
5	程式函數方塊區	顯示全部可用的程式函數方塊。
6	顯示績效	在遙遠的控制之間，機器人系統經過程式的顯示績效資料。
7	函數方塊會話	對個別函數方塊的內部參數存取。
8	函數方塊會話區	在程式編輯區中所需修改的函數方塊上快點兩下，對應的內在參數會話區域將在這區域中顯示。
9	狀態列	顯示狀態特性。
10	常數的特性	列出所有在程式裡的常數。修改數值或名稱。
11	程式編輯區	在這區域中，單獨的函數方塊被連線，可以編寫程式，顯示出程式的函數方塊圖線。
12	程式列	在很多開啟的程式裡可以改變顯示所需要的程式。

## 第三章 實驗架構與研究流程

### 3.1 實驗硬體介紹

此次實驗用之機器人名為羅勃提諾，是具備全向移動平台的輪型機器人，由德國 FESTO 公司所研發，為國際技能競賽（World Skills）機器人職類指定使用之機器人，此比賽之參賽選手必須熟練其程式軟體 Robotino View 與此機器人之各部份之裝配與修理，利用此圖形化介面程式軟體來撰寫程式，配合上面之九顆紅外線距離感測器、兩顆數位光電感測器、一顆類比式電感測器與 CCD 視訊攝影機，來達到其所要求之功能，其特色在於專利之全向輪，藉由三顆全向輪之速度與轉向之配合，可讓機器人達成一個平面上之任意方向之移動，配合攝影機之影像處理，靠著無線網路與電腦傳輸資料，經過智慧型程式邏輯之撰寫，可以完成更多困難的動作。羅勃提諾的控制器為 256MB 的 CF 卡之嵌入式 PC，可升級到 1GB，範例程式可直接由控制面板來啟動。驅動單元模組為三組獨立的全向輪，相交安裝角度  $120^\circ$ ，參考圖 3.1 為羅勃提諾機器人之底部架構圖，馬達與全向輪之間為齒型皮帶，馬達內有增量型編碼器，PC 104 處理器，300MHz，Linux 作業系統，SDRAM 64 MB，使用 C++ API 的 CF card 控制羅勃提諾，可另接 8 個類比輸入，8 個數位輸入，8 個數位輸出，2 個繼電器作動器。

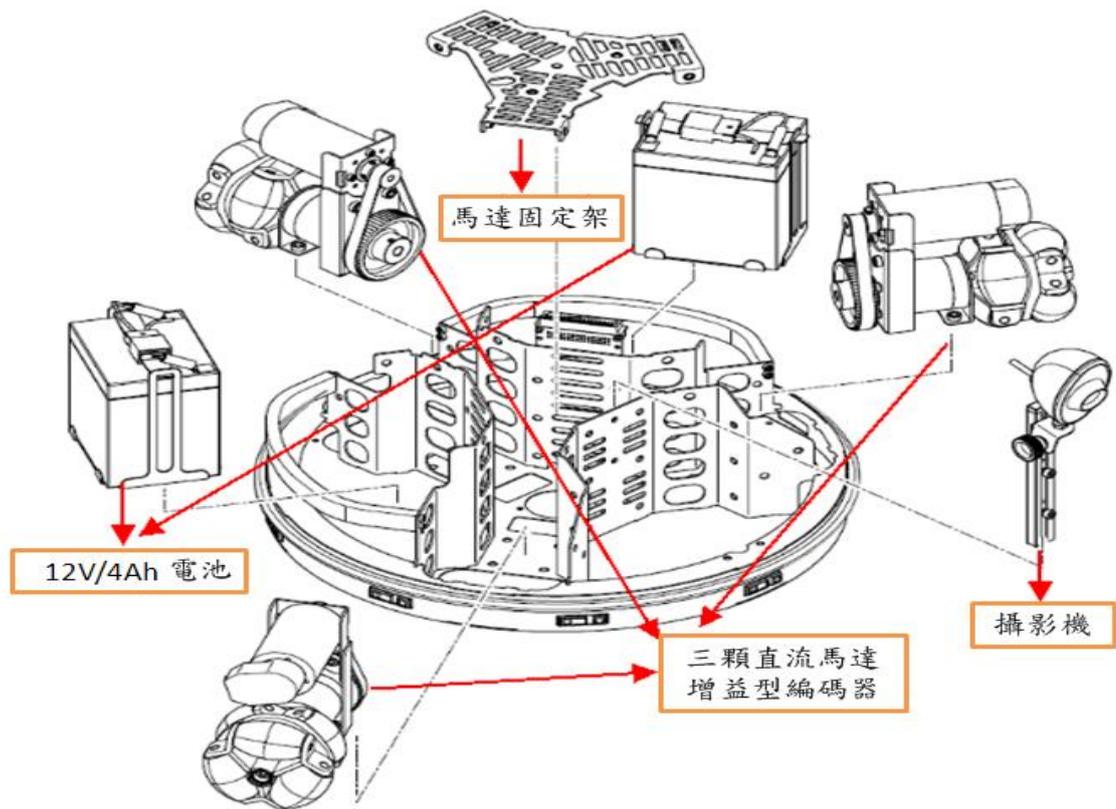


圖 3.1 羅勃提諾機器人之底部架構圖

使用 Robotino View 撰寫完程式後，再透過 Wireless 802.11g 與羅勃提諾連結，Robotino View 能傳送訊號到機器人的馬達控制器，並且能顯示、改變與鑑定感測器數值，藉由此回饋訊號來修正機器人的位置或誤差，讓機器人之控制能與環境互相配合，於動態操作中亦可由 Robotino View 編輯程式，但是較為危險。網路攝影機透過 Robotino View 的協助，可以顯示與鑑定所擷取的影像，可以做顏色位置與大小的分析，回傳值為擷取顏色的形心座標 X、Y 值與顏色的面積大小，一般可以做到的應用例如路徑規劃與物件循跡、環境建構、智慧型人機互動等等，透過 I/O 介面可增加連接額外的感測器與致動器，可從雷射焊接的不鏽鋼底盤外加機構上去增加其應用性，例如機械手臂、外型物件等等，參考圖 3.2。

無線網路裝置的控制器，包含三合一功能，有一個方便調整的開關，預設值存取伺服器(AP)、存取接受器(Client)、無線路由器(WR)，含加密的可靠網路防護功能，需要在 AP 伺服模式下啟動無線網路設備。每個機器人定義其本身無線網路，此網路具有 SSID 特徵。其缺點在於不同的無線網路如果其頻道太接近的話可能發生網路相衝。他只提供 11 個頻道和針對安全性原因建議二個正在執行的通道至少需間隔三個未使用的通道，一般而言只能同時運轉三個機器人才不會發生通訊錯誤。如果您有一個以上機械人，請注意您所擁有的通道數目(SSID 部分)。在 AP Client 模式執行無線網路設備，需要一個額外無線網路伺服器，其優點在於網路中可以控制許多機器人，需要特別注意每一個機器人需要相對的 IP 位置。

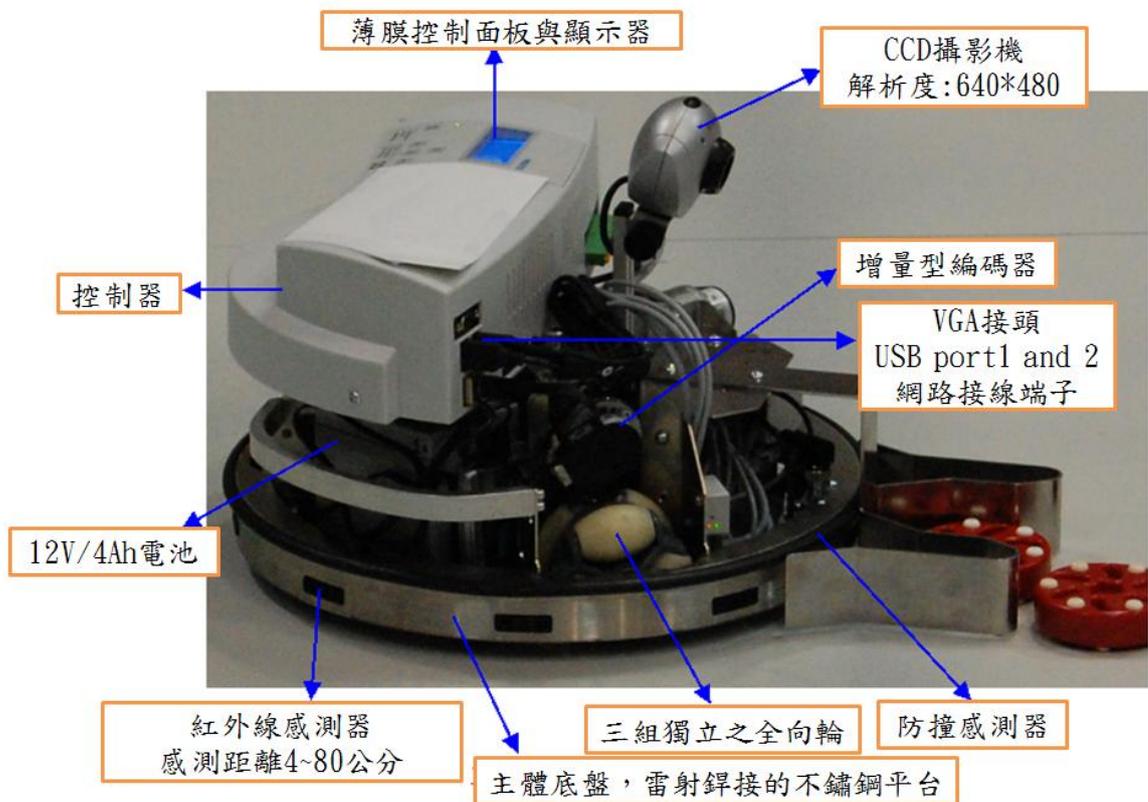


圖 3.2 羅勃提諾機器人之架構圖

### 3.2 全向輪應用簡介與系統驗證說明

利用 Robotino View 控制器與回饋訊號處理作為實驗測試數據，將羅勃提諾放置三腳架上使三個全向輪不與地面接觸，不考慮地面摩擦及材質等環境因素，由軟體輸入訊號給馬達產生動力使輪子空轉，利用回傳的增量型編碼器資訊得到各個輪子變速箱的輸出轉速  $\omega$ ，單位為每分鐘幾轉 (RPM)。根據 FESTO 原廠設定的馬達變速箱齒輪比為 1:16。假設固定平台速度，僅改變運動方向  $\theta$  參數，單位為”度”(degree)。

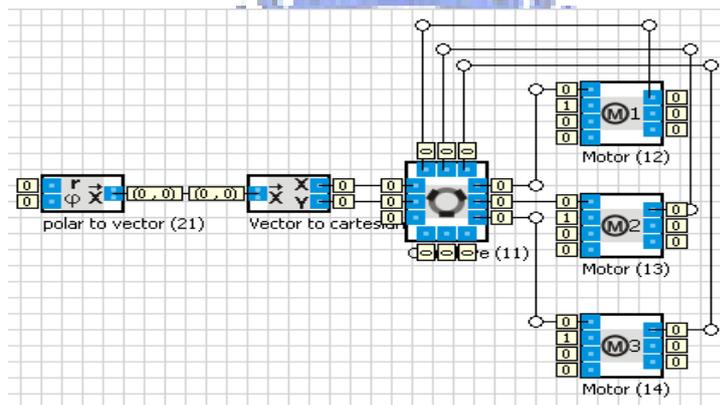


圖 3.3 極座標轉卡氏座標馬達控制程式

利用 Robotino View 作為實驗測試數據，參考圖 3.3，原理為利用極座標可設定速度值  $V_r$  及角度  $\theta$  的參數為輸入，再將極座標向量轉成卡氏座標變成水平分量和垂直分量，即為水平速度  $V_x$  和垂直速度  $V_y$ ，再將  $V_x$  和  $V_y$  輸入至全向輪速度轉換器，轉換器會藉由全向輪的運動方程式，經由參考式 2-21、2-22、2-23，轉換後的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  再傳送到馬達控制器，輸入至全向輪的各馬達控制中，再透過附於各馬達軸的回饋感測器，即增量型編碼器得到輸出各輪的馬達轉速” $\omega$ ”，參考圖 3.4 為全向平台輸入數據馬

達控制的運算實驗程式流程圖。

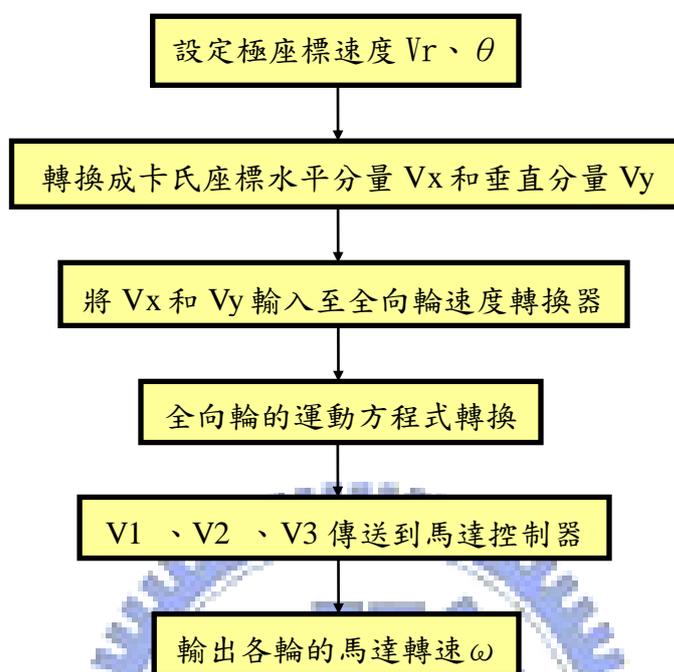


圖 3.4 馬達控制的程式流程圖

當平台朝  $\theta$  方向運動時，平台的垂直方向速度分量  $V_x$  等於  $V\cos\theta$ 、水平方向速度分量  $V_y$  則為  $V\sin\theta$ 。因此以為輸入速度  $V$  為  $100\text{mm/s}$ 、角度  $\theta$  為  $0$  度、輪半徑  $R$  等於  $4$  公分為例：

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{1}{R} \times \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \times V_x + \frac{1}{2} \times V_y \right) \\ &= \frac{1}{0.04} \times \frac{-\sqrt{3}}{2} \times 0.1 \times \cos 0 = -2.165(\text{rad/s})\end{aligned}$$

再將求得的角速度乘上齒輪比以及轉換單位為 RPM

$$\omega_1 = -2.165 \times 16 \times \frac{60}{2\pi} = -330.7973(\text{rpm})$$

固定極座標速度值  $V_r$  為速度 100mm/s，改變角度參數  $\theta$  (degree)，由馬達回饋訊號測得輪子的實際角速度，將實驗所測之數據整理圖表，參考表 3.1 與圖 3.5，對照上列公式之範例所求的參數加以對照：

表 3.1 羅勃提諾移動與馬達轉速對應關係

$V_r$ (mm/s)	$\theta$ (degree)	$\omega_1$ (rpm)	$\omega_2$ (rpm)	$\omega_3$ (rpm)
<b>100</b>	<b>0</b>	<b>-330.8</b>	<b>0</b>	<b>330.8</b>
100	1	-327.41	-6.67	334.08
100	2	-323.93	-13.33	337.26
100	3	-320.35	-19.99	340.34
100	4	-316.67	-26.65	343.31
100	5	-312.89	-33.29	346.18
100	6	-309.02	-39.93	348.95
100	7	-305.06	-46.55	351.01
100	8	-301	-53.16	354.16
100	9	-296.85	-59.75	356.6
100	10	-292.61	-66.33	358.94
100	20	-245.53	-130.64	376.17
100	25	-219.09	-161.43	380.52
100	30	-190.99	-190.99	381.97
100	35	-161.43	-219.09	380.52
100	40	-130.64	-245.53	376.17
100	45	-98.86	-270.09	368.96
100	50	-66.33	-292.61	358.94
100	60	0	-330.8	330.8
100	90	190.99	-381.97	190.99

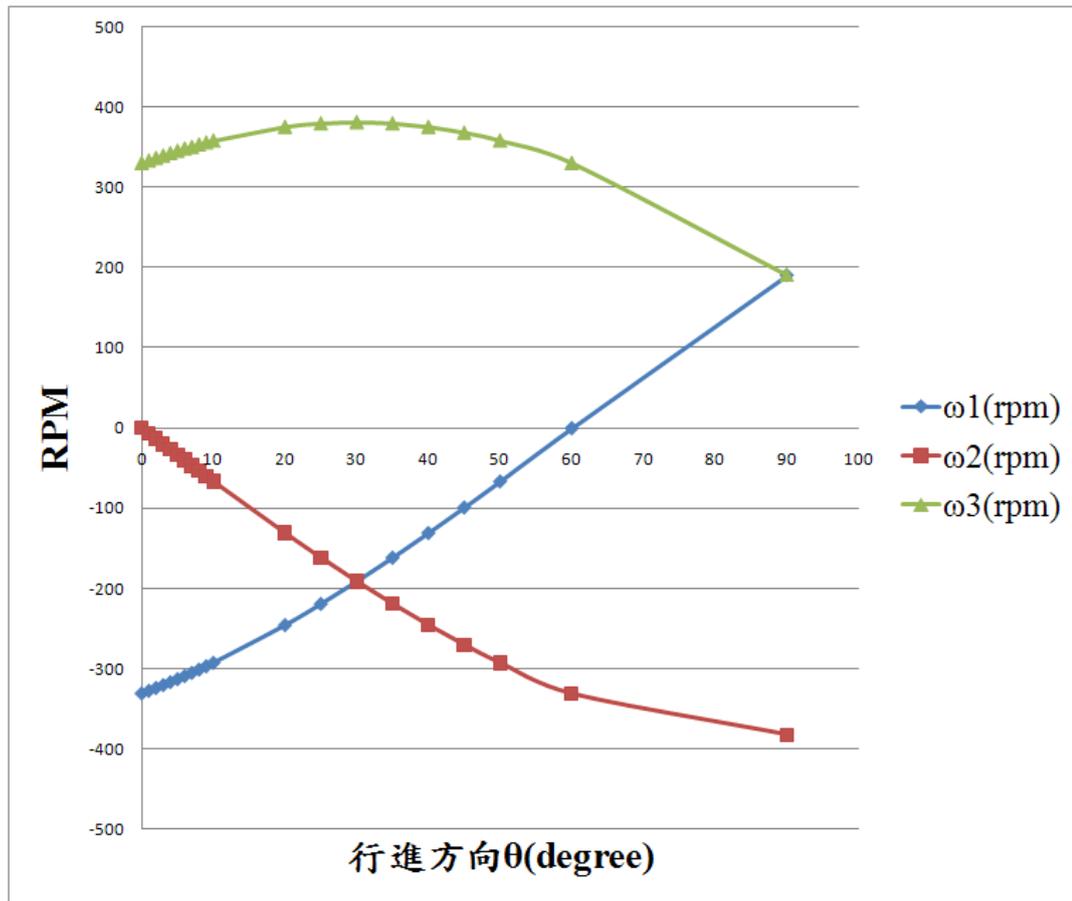


圖 3.5 羅勃提諾移動方向與馬達轉速對應關係

### 3.3 程式規劃：華爾滋舞步規劃

華爾滋起源於十七世紀德國鄉間土風舞，具有優美、柔和的特質，也是歷史悠久，最受人喜愛的舞蹈。現今的華爾滋已經過改良；融合瑞士及奧地利等地的土風舞、維也納華爾滋的特性，並將音樂的速度放慢而成。旋轉是華爾滋的精髓所在，甚至可以說是華爾滋的生命。改良過的華爾滋，約在第一次世界大戰後由英國傳出。由於舞姿優美，加上三拍子的音樂又是那麼動人，抒情中帶有些許的浪漫與哀怨氣息，因此極受歡迎。

華爾滋的舞步可大致分為：1.斜進步 2.轉角步 3.曲進步 4.併換步 5.右轉步 6.左轉步 7.右旋轉步 8.帚形步 9.追步 10.閉式激轉步 11.躊躇換步 12.外側換步 13.左轉截步 14.退帚形步 15.基本迂迴步 16.雙左旋轉步 17.斜進步轉角步 18.斜左轉步 19.退鎖步 20.右直行追步 21.迂迴步 22.閉式滑雪形轉步 23.分式滑雪形轉與交叉躊躇步 24.分式滑雪形轉與翼步 25.分式激轉步與交叉躊躇步 26.分式激轉與翼步 27.外側旋轉步 28.轉鎖步 29.左帚形步 30.反向抑制步 31.閉式翼步 32.右轉鎖步 33.並退左轉步與滑軸轉步 34.盤旋截步，共約 30 多種舞步[22]。

參考圖 3.6 為華爾滋連續組合步之腳步順序位置圖，可見華爾滋是由許多基本步法組合而成，不同的組合可產生不同的舞曲，由於舞步種類很多，所以只先行歸納出四種具有代表性的舞步，分別為斜進步、曲進步、斜左轉步與斜右轉複合步法，此四種步法之間各有相關聯性，可能會與圖 3.6 有少許差別，因為華爾滋並無固定腳步模式，所以用其中一種舞步模式來當標準，須先規劃路徑，然後撰寫程式，再利用理論法先計算出理想參數，然後套入程式裡面做實驗，將理論值做些微修改，將第一種舞步斜進步參數實驗出來後，再把程式作修改，將斜進步的參數套進曲進步裡，將理論值做些微修改，將第二種舞步曲進步參數實驗出來後，循序漸進的做出斜左轉步與斜右轉複合步法。

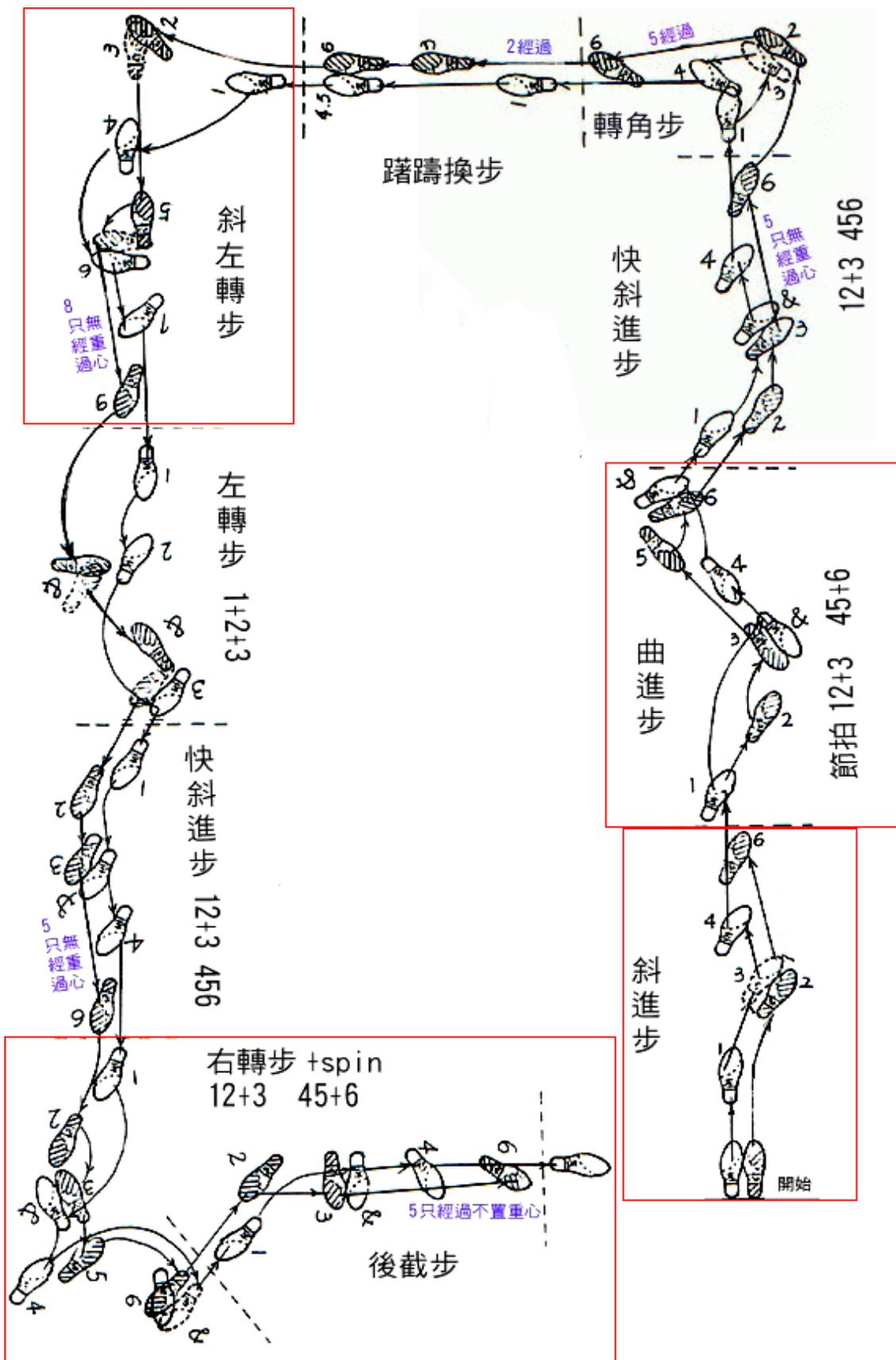


圖 3.6 華爾滋連續組合步之腳步順序位置圖[22]

### 3.3.1 第一種舞步：斜進步

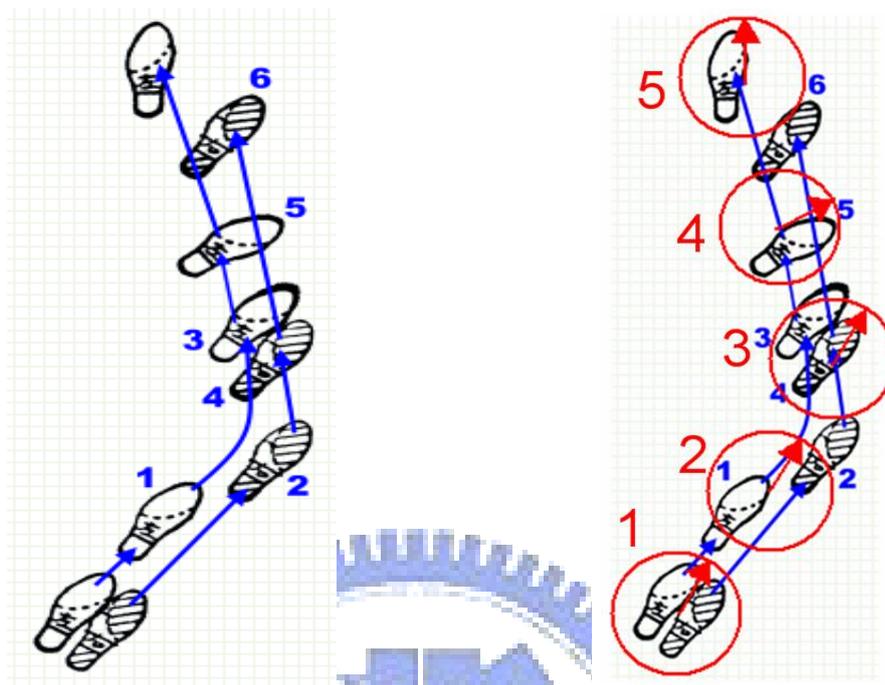


圖 3.7 (a) 斜進步之腳步圖 (b) 斜進步之腳步方向與位置圖

參考圖 3.7 (a) 為斜進步之腳步圖，可區分為五個動作姿態，參考圖 3.7 (b)，分別為 1. 左足前進 2. 身體右轉  $1/8$  圈，右足向斜壁前進 3. 左足虛併至右足，左足向側 4. 右足經過左足旁 5. 右足前交叉，1 到 3 拍為閉式舞姿，4 到 6 拍為半閉式舞姿橫身步，3 拍走二步，左肩引導。為了控制機器人達到此種舞步，需要座標轉換的方式來達成，須要先知道五個姿態中，機器人的座標位置與轉向，並且知道每一個姿態的間隔時間，來控制機器人  $X$ 、 $Y$ 、 $\theta$  座標位置之行進方向的變換，配合各個狀態給予不同的速度，可達到斜進步。

### 3.3.2 第二種舞步：曲進步

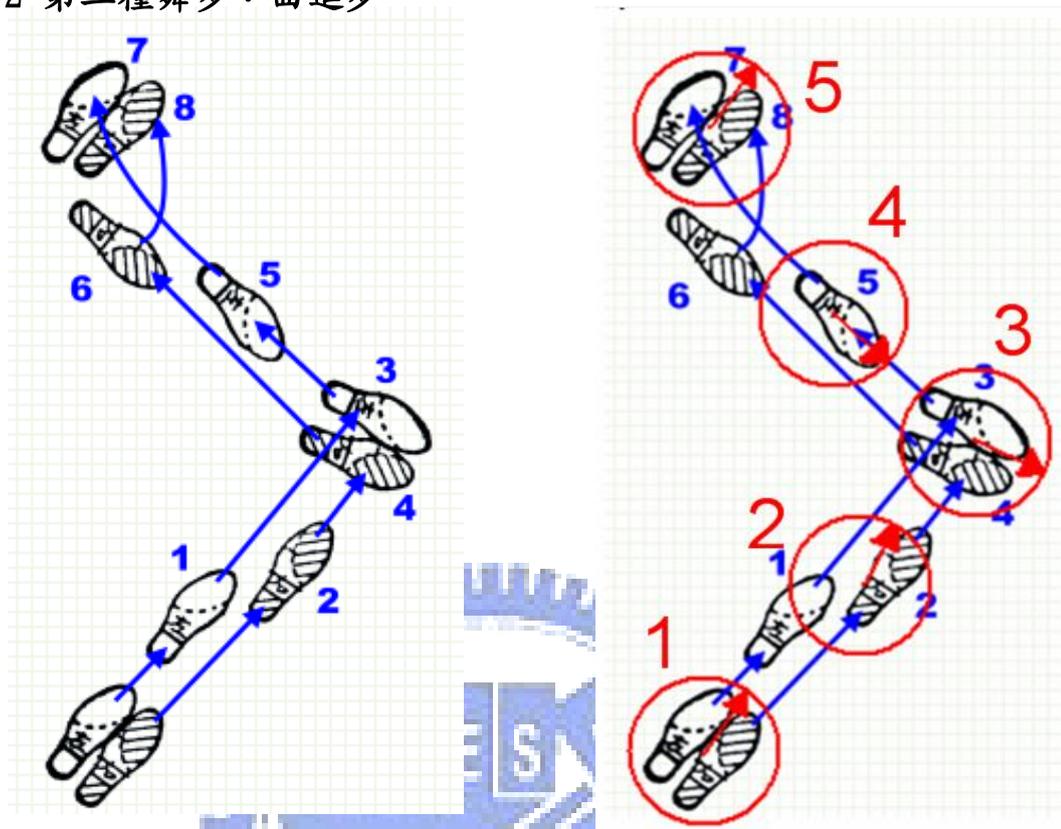


圖 3.8 (a) 曲進步之腳步圖 (b) 曲進步之腳步方向與位置圖

參考圖 3.8 (a) 為曲進步之腳步圖，可區分為五個動作姿態，參考圖 3.8 (b)，分別為 1. 左足向斜壁前進，右足繼續前進 2. 身體右轉，左足向側交叉舞程線 3. 右足併至左足，背向斜中央 4. 左足後退 5. 右足後退，身體左轉，左足小步向側，右足併至左足面向斜壁。比斜進步困難的地方為第三個動作身體右轉，左足向側交叉舞程線與第五個動作身體左轉的部分，為了控制機器人達到此種舞步，需要座標轉換的方式來達成，須要先知道五個姿態機器人的座標位置與轉向，並且知道每一個姿態的間隔時間，來控制機器人  $X$ 、 $Y$ 、 $\theta$  座標位置之行進方向的變換，配合各個狀態給予不同的速度，可達到曲進步。

### 3.3.3 第三種舞步：斜左轉步

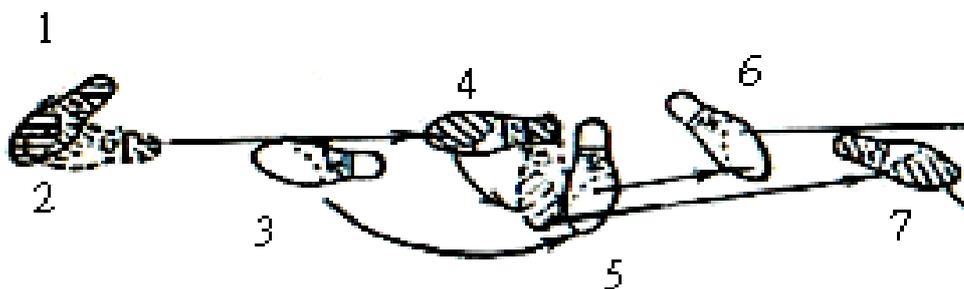


圖 3.9 (a) 斜左轉步之腳步圖

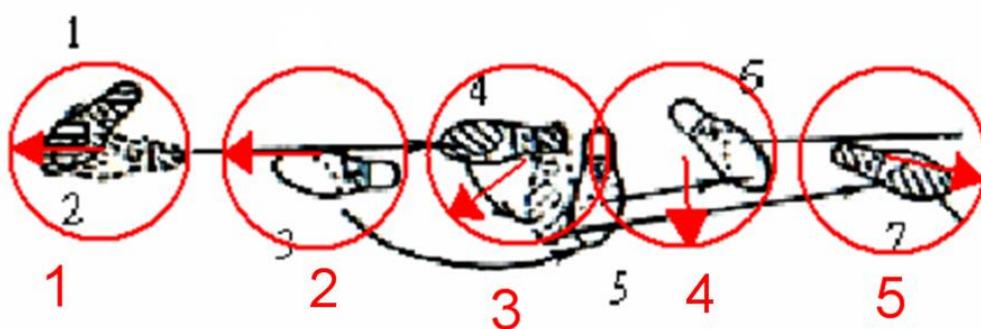


圖 3.9 (b) 斜左轉步之腳步方向與位置圖

參考圖 3.9 (a) 為斜左轉步之腳步圖，可區分為五個動作姿態，參考圖 3.9(b)，分別為 1. 左足前進，開始左轉 2. 右足向側，稍後方背向壁 3. 繼續左轉，左足交叉在右足前，背向斜壁 4. 以右足跟為軸繼續左轉 5. 左足虛併至右足。比曲進步困難的地方為第二個動作繼續左轉，左足交叉在右足前，背向斜壁 與第四個動作以右足跟為軸繼續左轉的部分，為了控制機器人達到此種邊移動邊旋轉的舞步，需要座標轉換的方式來達成，須要先知道五個姿態機器人的座標位置與轉向，並且知道每一個姿態的間隔時間，來控制機器人  $X$ 、 $Y$ 、 $\theta$  座標位置之行進方向的變換，配合各個狀態給予不同的速度，可達到斜左轉步。

### 3.3.4 第四種舞步：斜右轉複合步法

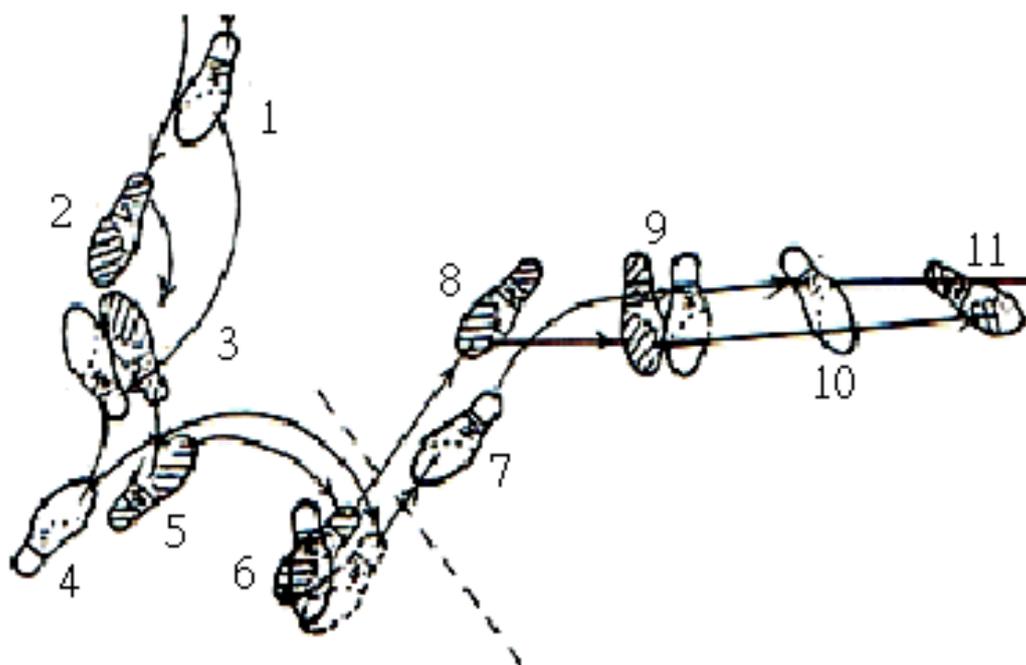


圖 3.10 (a) 斜右轉複合步之腳步圖

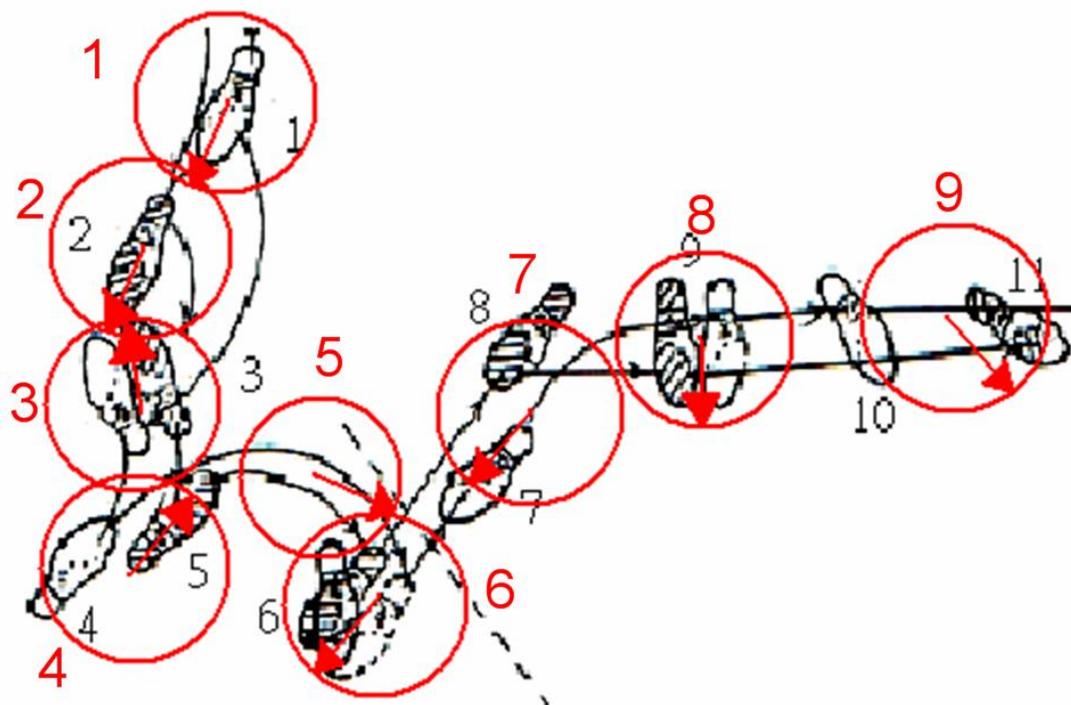


圖 3.10 (b) 斜右轉複合步之腳步方向與位置圖

參考圖 3.10 (a) 為斜右轉複合步之腳步圖，可區分為九個動作姿態，參考圖 3.10 (b)，分別為 1. 左足向斜壁前進 2. 右足繼續前進，身體右轉，左足向側交叉舞程線 3. 右足併至左足，背向斜中央 4. 身體繼續右轉，左足後退並用左足掌向右轉  $3/8$  圈 5. 右足小碎步向前，身體仍繼續右轉，左足向側 6. 右足併至左足，背向斜中央 7. 左足後退，右足後退，身體左轉，左足小步向側 8. 右足併至左足，面向斜壁 9. 左足向側，右足經過左足旁，右足前交叉。比斜左轉步困難的地方為第四個動作身體繼續右轉，左足後退並用左足掌向右轉  $3/8$  圈、第五個動作右足小碎步向前，身體仍繼續右轉，左足向側與第六個動作右足併至左足，背向斜中央，當動作太多時，最重要的就是誤差的累積問題，第九個姿態的位置往往會與理想值差很多，且過程中每個姿態的誤差會隨著姿態的增加而逐漸偏離軌道，為了控制機器人達到此種舞步，需要座標轉換的方式來達成，須要先知道九個姿態機器人的座標位置與轉向，並且知道每一個姿態的間隔時間，並且先將間隔時間拉長，原本需要 7 秒完成此舞步可能要拉長到 15 秒，先把時間拉長速度放慢，來控制機器人  $X$ 、 $Y$ 、 $\theta$  座標位置之行進方向的變換，配合各個狀態給予不同之速度，再慢慢加快到 7 秒，可完成斜右轉複合步。

### 3.4 系統執行的流程

經過前幾個章節的敘述，已大致介紹本研究在路徑程式規劃時的一些方法及原理，在此小節要敘述整個系統執行的詳細流程。在華爾滋的舞蹈中，一個人至少要跟一個舞伴互動，除此之外，每個人都要評估舞伴的意圖和判斷環境的擺設等等，才可以優美的跳舞，所以華爾滋是人類與機器人身體互動調性的一個很好的例子。在這篇論文中，本實驗室[NCTU CIDM Lab]發展出華爾滋舞伴機器人的機器架構與人機互動控制模組[6]，參考圖 3.11 為智能型舞伴機器人 NCiDPR09(NCTU CIDM Intelligent Dance Partner Robot 2009) 之實體圖，在羅勃提諾全向平台之上，用壓克力板經過設計與雷射加工機加工後，可完成機器人上半身之骨架，再利用色紙、塑膠等材料做美工裝飾使其看起來像一個小型華爾滋舞者。



圖 3.11 智能型舞伴機器人 NCiDPR09 之實體圖 [6]

此機器人以圖形化程式軟體 Robotino View 來控制，先從華爾滋的幾種代表性舞步先做起，討論其理論上與實作上的誤差造成原因，先設法改進。最後，舞伴機器人與舞者進行各種步法的實驗，可以順利跳完一首華爾滋。

參考圖 3.12 為智能型舞伴機器人 NCiDPR09 的系統執行流程，首先為教學功能，將每一個舞步的座標位置轉換為程式，將理論的參數用實驗的方式修正，利用馬達回饋訊號修正輸入速度、非固定時差之積分修正方法與改變馬達 PID 控制等方式進行實驗，最後再將最佳訓練軌跡建立成舞步的資料庫，把教學功能應用於舞步評分之功能；另一方面感測器同時量測前方物體的距離，進行判斷分析處理，此訊號為伴舞功能很重要的參考。

伴舞功能首先研究無預設舞步之從動機器人程式設計與實驗，無內建舞步之機器人利用感測器修正位置也能跟舞伴一起跳華爾滋，加入華爾滋標準舞步與避障功能一起使用，可以在跳舞過程中避免撞到其他物體。

透過舞步學習分析方法將感測器的參數作轉換與檢測，評估舞者的腳步位置是否標準，經過舞步分析法會把舞步之修正量計算出，產生參數來對舞步進行修正與調整。另外增加 8051 的程式與電路來擴充舞伴機器人跳舞之效果，使其可以外加更多感測器或致動器，讓機器人的自由度增加，動作更為豐富。利用副程式架構將這些功能組合在一起，如此循環即能達到智慧型舞伴機器人跟人一起跳舞的成果。

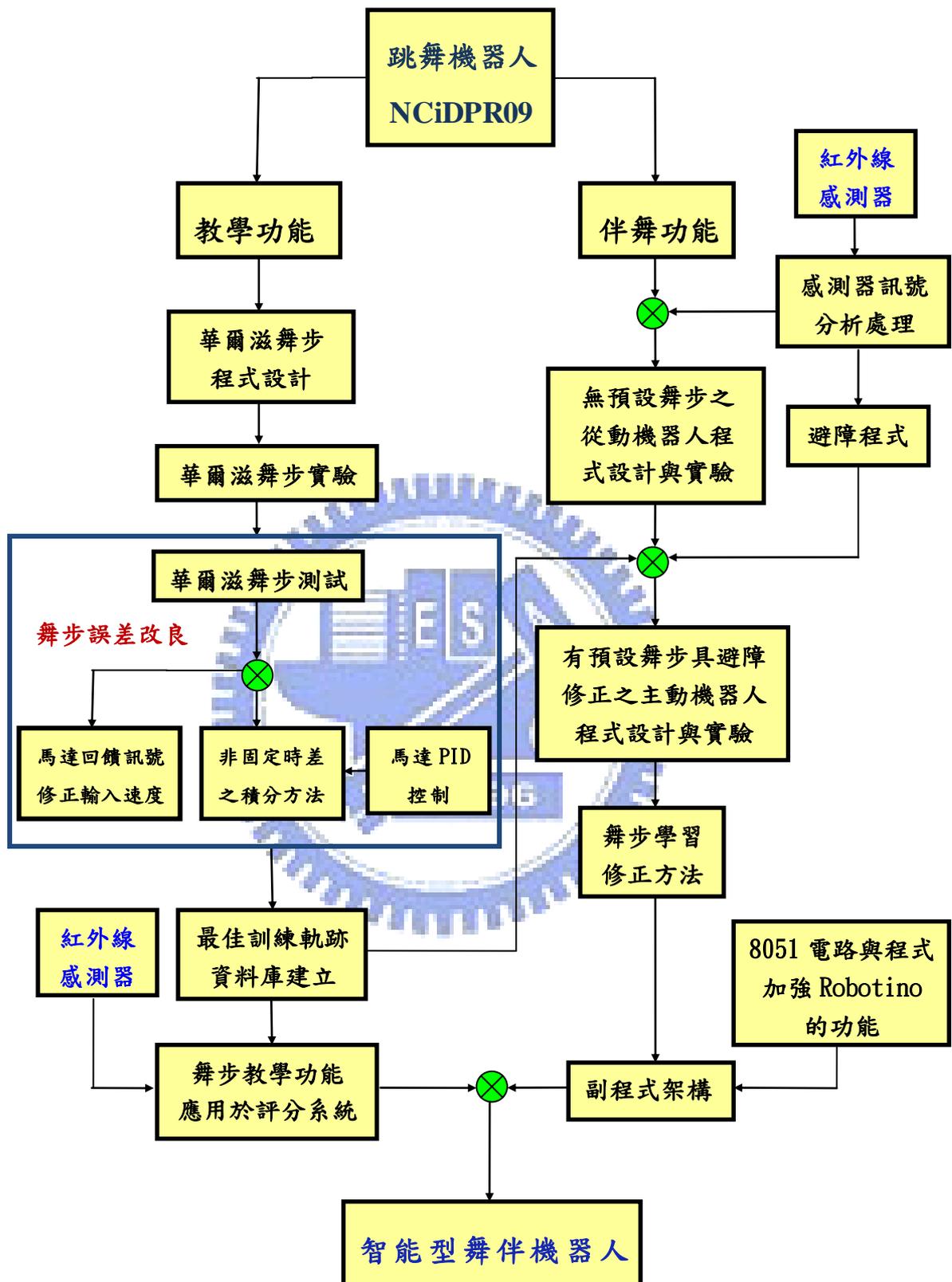


圖 3.12 智能型舞伴機器人 NCiDPR09 的系統執行流程[6]

## 第四章 舞伴機器人舞步產生原理 1：教學功能

本論文舞伴機器人之研究的方向可分為兩種，1. 教學功能：應用舞步程式跳出標準的華爾滋舞步，讓機器人可以教導人類跳標準的華爾滋舞蹈。2. 舞伴功能：配合舞者的舞步，作為舞步的修正，讓機器人能順利的配合人一起跳華爾滋。教學功能主要的研究為華爾滋舞步理論距離轉換為實際距離之精確度，主要在 4.1 與 4.2 節討論，4.1 節主要設計四種代表性之華爾滋舞步，直接使用時間與速度的關係來設計出華爾滋舞步，此種方式為開迴路控制，所以誤差比較大，因此 4.2 節就此誤差進行研究，利用三種方法逐漸減少誤差，包括馬達回饋訊號轉換為速度，利用此速度積分可得到實際位移量，加上馬達 PID 控制之調整，能有效的修正機器人之位置，舞步教學的機器人只需要撰寫華爾滋舞步範例，讓舞伴跟著內建標準舞步程式之教學機器人跳舞，行為較為單純。

4.3 節在討論教學功能的應用，利用標準舞步之機器人與人一起跳舞，讓感測器測量相對距離經過分析比對之後，可以幫舞伴評分，由分數高低可以知道舞步的好壞，並提供學舞者改進的資訊。

### 4.1 華爾滋舞步程式設計與實驗

人在跳舞時，身體與腳步的方向大部份的時間都是不一致的，因為跳舞

時舞者的身體會扭轉，而且人類有兩隻腳，因此教學機器人是要模擬人腳的動作還是身體的動作需要先行考慮。本研究首先考慮到教舞者與擔任舞伴的機器人有大部分的功能為展演舞步的韻律與走位方向等動作，所以採用全向輪平台機器人扮演此階段的舞伴角色。經過測試的結果得知，機器人的座標位置必須要以腰部的位置為參考，但是機器人旋轉方向則不一定，取決於機器人本身的腰部是否可以旋轉，假如腰部可以旋轉，則機器人本體的轉向應該是配合人類上半身的方向加以設定，使機器人的上半身則是跟舞伴面對面，在機器人腰部增加一個自由度後就可以進一步解決上半身與下半身方向不完全同步的進階花式舞步控制規畫問題，此階段先不考慮機器人身體可以扭轉，利用四種舞步之腳步圖計算出腳步平均之方向、位置與規劃出每一個步驟，參考這些資料設計與實驗出每一個舞步的控制程式，再討論實際測試出的舞步與標準舞步位置和方向之誤差。

#### 4.1.1 斜進步之程式設計與實驗

參考圖 4.1 為機器人跳斜進步之位置方向圖，箭頭方向為機器人之正面方向，數字為步驟順序，利用此圖五個步驟之位置與方向來設計程式，藉由比例放大來設計出每一個步驟的座標位置，參考表 4.1 為斜進步之機器人座標與角度參數，理論上機器人需要照著這些位置移動，完成此舞步的時間為三秒。

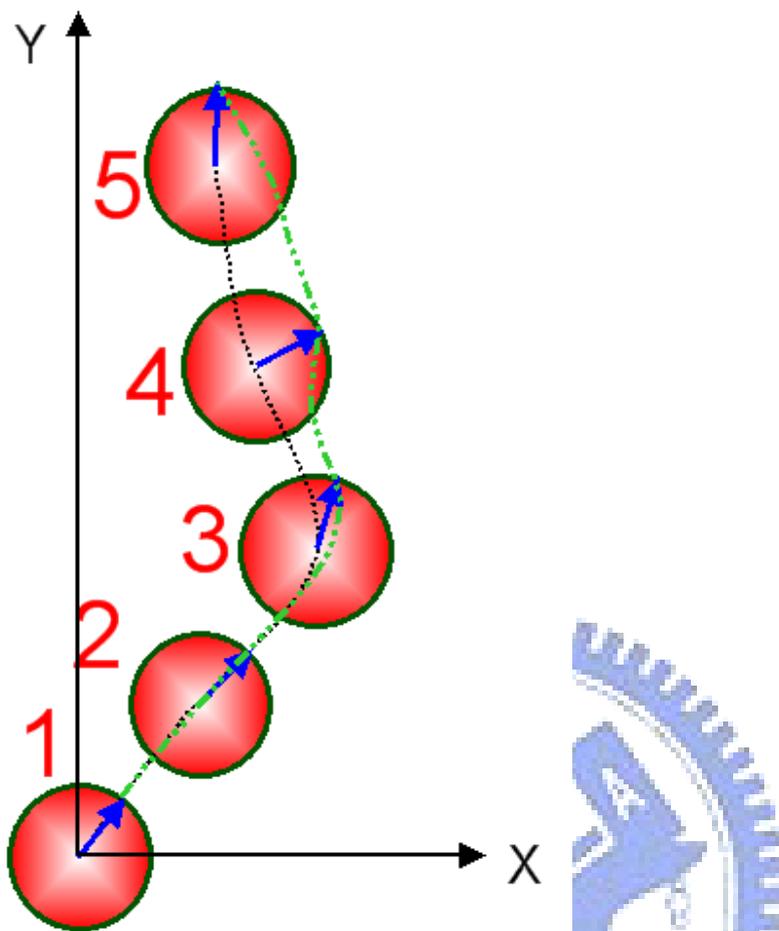


圖 4.1 機器人跳斜進步之位置方向圖

表 4.1 斜進步之機器人座標與角度參數

步驟	X 座標(cm)	Y 座標(cm)	旋轉角度(deg)
1	0	0	52
2	25.3	34.5	48
3	43.7	71.3	61
4	27.6	108.1	23
5	16.1	149.5	85

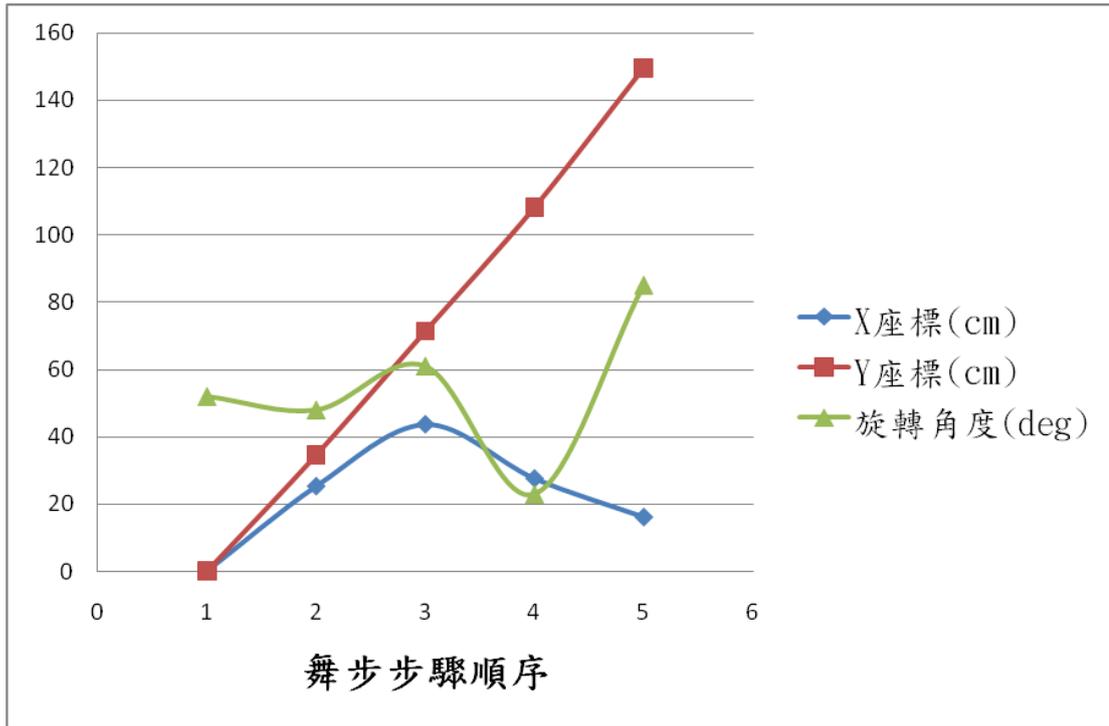


圖 4.2 斜進步之機器人座標與角度

程式設計部分使用時間配合速度的方式，將斜進步的五個狀態平均分配時間，每一個狀態 0.6 秒，參考圖 4.3 為斜進步程式控制流程圖，依照不同的狀態給定不同的配速，將結果之誤差作速度的微調，距離不夠就將速度增加，距離太多就將速度調小，最後的結果為起始狀態速度  $V_x$  為 50，所以開始會緩慢前進，狀態 2 到狀態 3 把  $V_x$  速度加快， $V_y$  與  $\theta$  給小量的速度微調，到了狀態 4 後才加入  $V_y$  的速度，讓機器人可以向左前方移動，最後將數值傳送到馬達控制器後輸出到馬達，此時可以先不要與機器人連線，空跑程式觀察輸出之速度是否正確，圖 4.4 為斜進步實驗之機器人位置變化圖，實驗時將地上標註記號兩條線為機器人標準舞步之起點與終點位置，但是多次實驗均無法順利到達此區域。

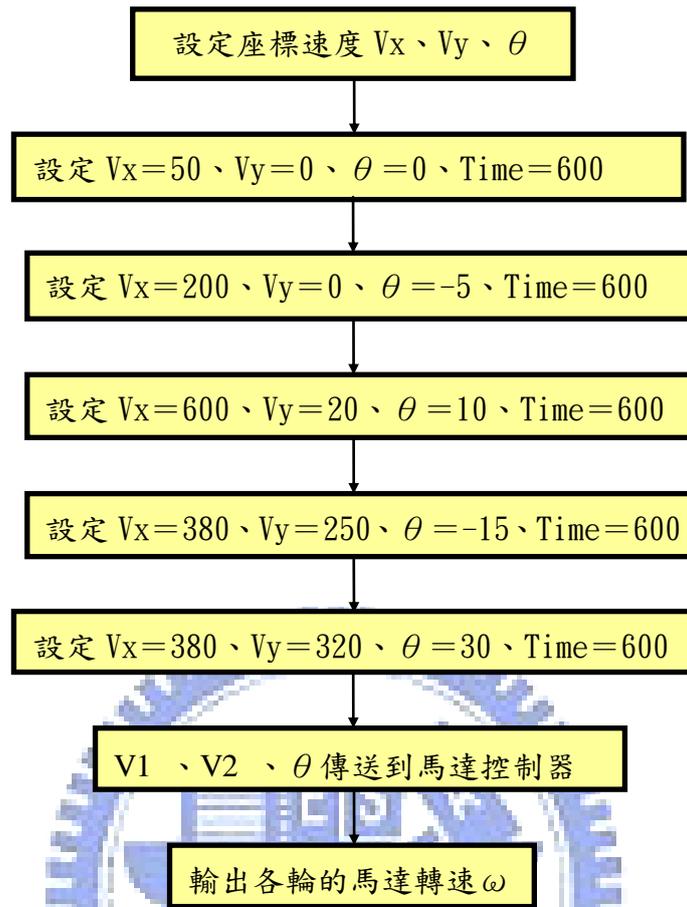


圖 4.3 斜進步程式控制流程圖



圖 4.4 斜進步實驗之機器人位置變化圖

參考圖 4.5 為機器人跳斜進步第一次測試結果比較，可以看出理論路徑與測試路徑誤差約 10%，此為不理想的誤差值，大部分的點都沒有達到理想的位置，因此需想辦法改善此誤差。

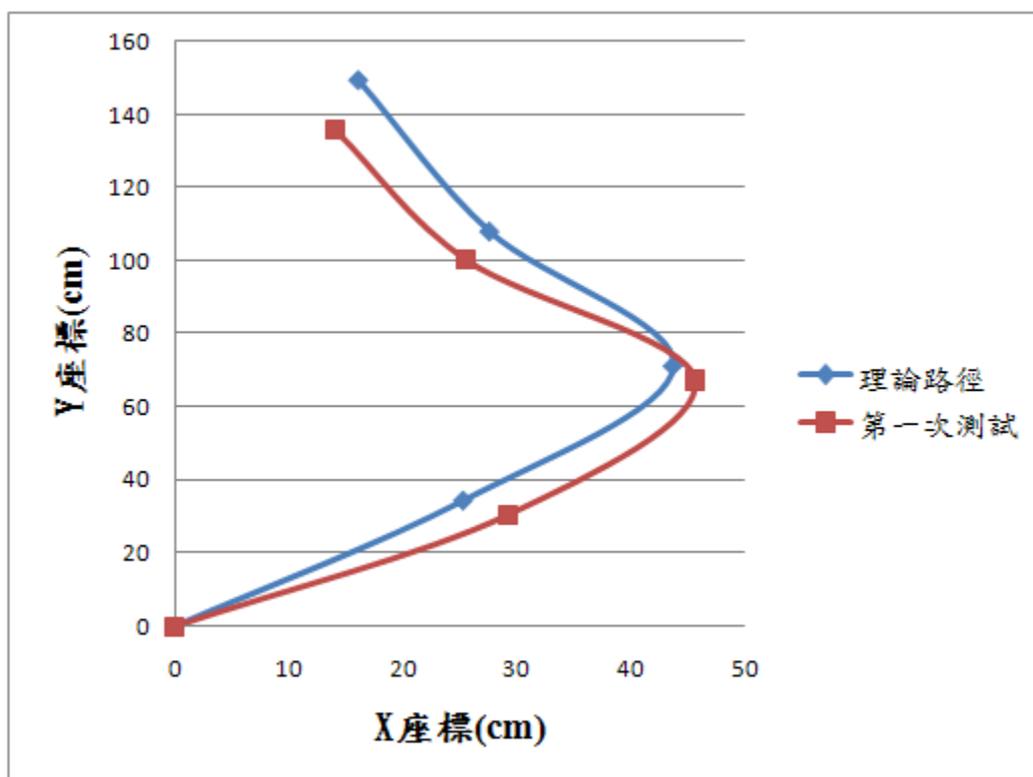


圖 4.5 斜進步第一次測試結果比較

#### 4.1.2 曲進步之程式設計與實驗

參考圖 4.6 為機器人跳曲進步之位置方向圖，箭頭方向為機器人之正面方向，數字為步驟順序，利用此圖五個步驟之位置與方向來設計程式，藉由比例放大來設計出每一個步驟的座標位置，參考表 4.2 為曲進步之機器人座標與角度參數，理論上機器人需要照著這些位置移動與轉動，完成此舞步的時間為四秒。

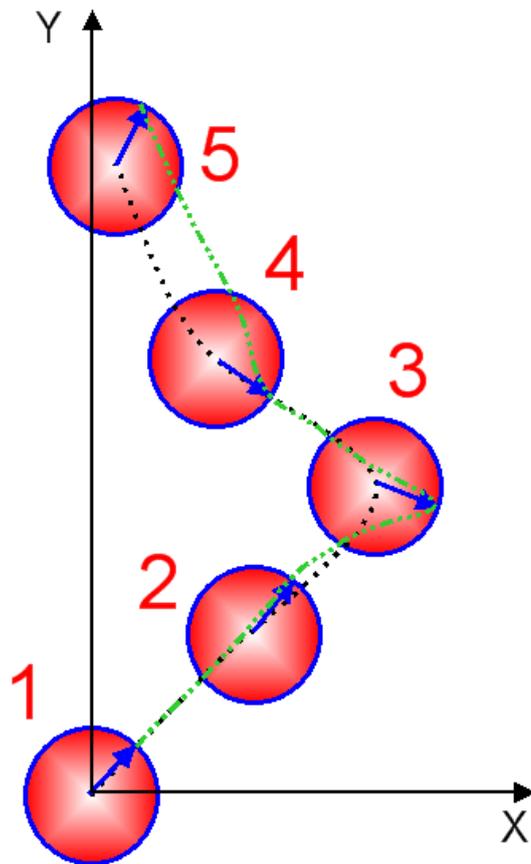


圖 4.6 機器人跳曲進步之位置方向圖

表 4.2 曲進步之機器人座標與角度參數

步驟	X 座標(cm)	Y 座標(cm)	旋轉角度(deg)
1	0	0	52
2	32	34	60
3	56	68	-30
4	28	96	45
5	2	136	58

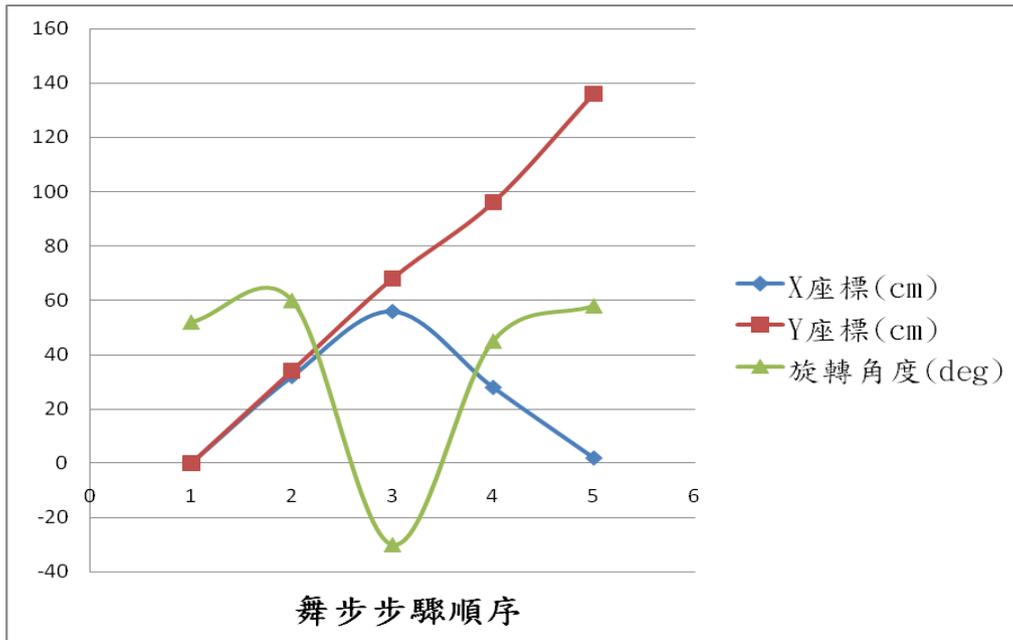


圖 4.7 曲進步之機器人座標與角度

程式設計部分使用時間配合速度的方式，將曲進步的五個狀態平均分配時間，每一個狀態 0.8 秒，參考圖 4.8 為曲進步程式控制流程圖，依照不同的狀態給定不同的配速，將結果之誤差作速度的微調，距離不夠就將速度增加，距離太多就將速度調小，最後的結果為起始狀態速度  $V_x$  為 50，所以開始會緩慢前進，狀態 2 把  $V_x$  速度加快到 600， $V_y$  與  $\theta$  給速度為零，到了狀態 3 後才加入  $\theta$  的速度，讓機器人可以順時針方向轉動，到了狀態 4 旋轉的速度停止，但  $V_x$  速度變為往後走，到了狀態 5 後右加入  $\theta$  的速度，讓機器人可以逆時針方向轉動，最後將數值傳送到馬達控制器後輸出到馬達，此時可以先不要與機器人連線，空跑程式觀察輸出之速度是否正確，圖 4.9 為曲進步實驗之機器人位置變化圖，實驗時將地上標註記號兩條線為機器人標準舞步起點與終點位置，但是多次實驗均無法順利到達此區域。

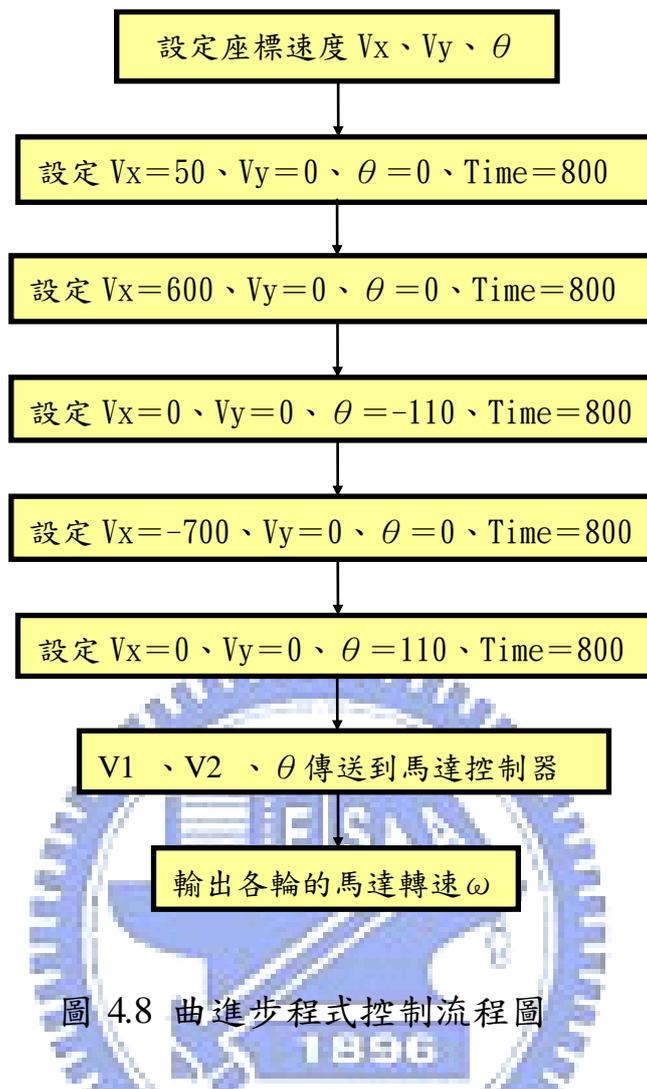


圖 4.8 曲進步程式控制流程圖



圖 4.9 曲進步實驗之機器人位置變化圖

參考圖 4.10 為機器人跳曲進步第一次測試結果比較，可以看出理論路徑與測試路徑誤差約 11%，此為不理想的誤差值，大部分的點都沒有達到理想的距離，因此需想辦法改善此誤差。

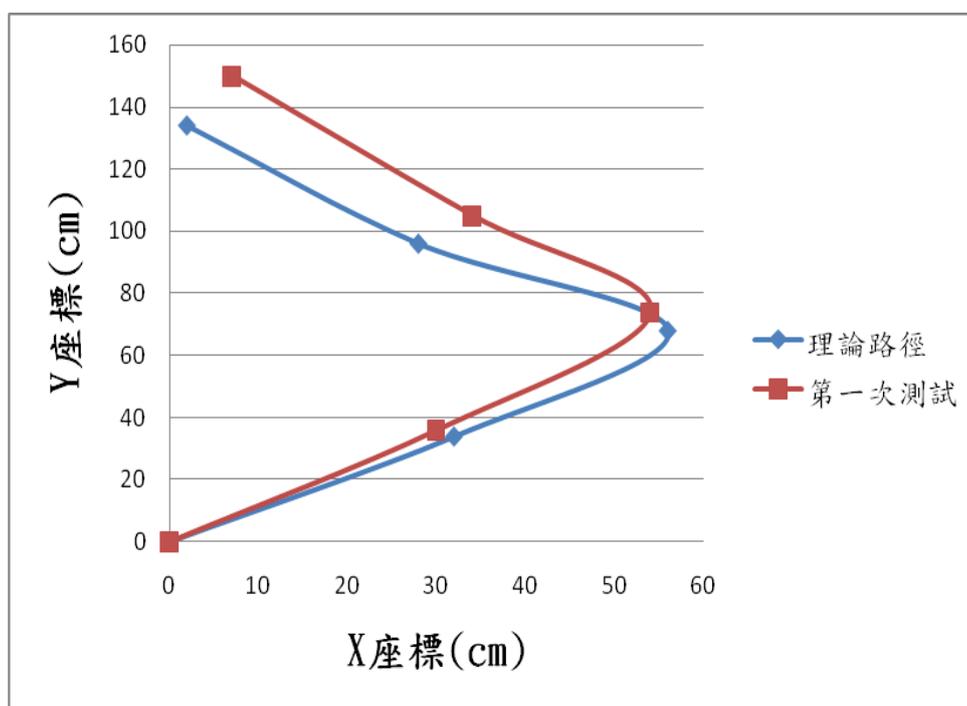


圖 4.10 曲進步第一次測試結果比較

### 4.1.3 斜左轉步之程式設計與實驗

參考圖 4.11 為機器人跳斜左轉步之位置方向圖，箭頭方向為機器人之正面方向，數字為步驟順序，利用此圖五個步驟之位置與方向來設計程式，藉由比例放大來設計出每一個步驟的座標位置，參考表 4.3 為斜左轉步之機器人座標與角度參數，理論上機器人需要照著這些位置移動與轉動，完成此舞步的時間為三秒。

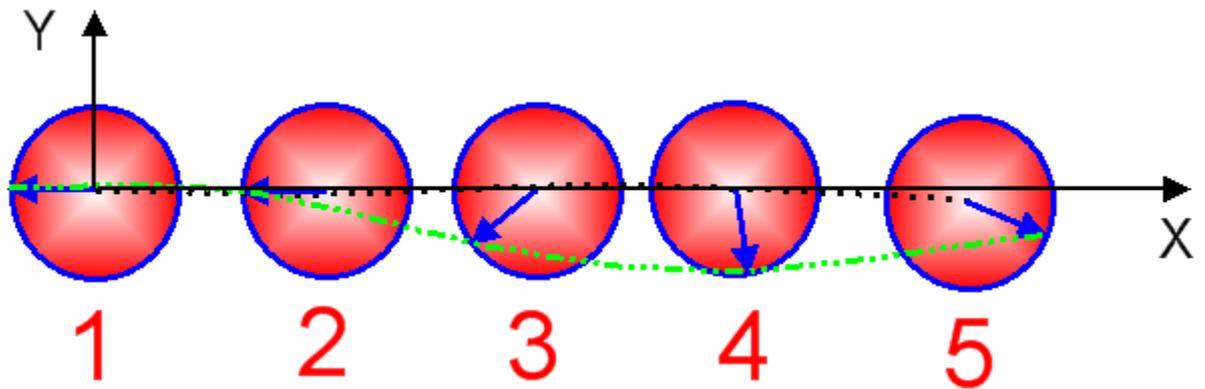


圖 4.11 機器人跳斜左轉步之位置方向圖

表 4.3 斜左轉步之機器人座標與角度參數

步驟	X 座標(cm)	Y 座標(cm)	旋轉角度(deg)
1	0	0	180
2	45.5	2	180
3	87.9	0	-141.4
4	120.9	0	-85
5	161.7	6	-24

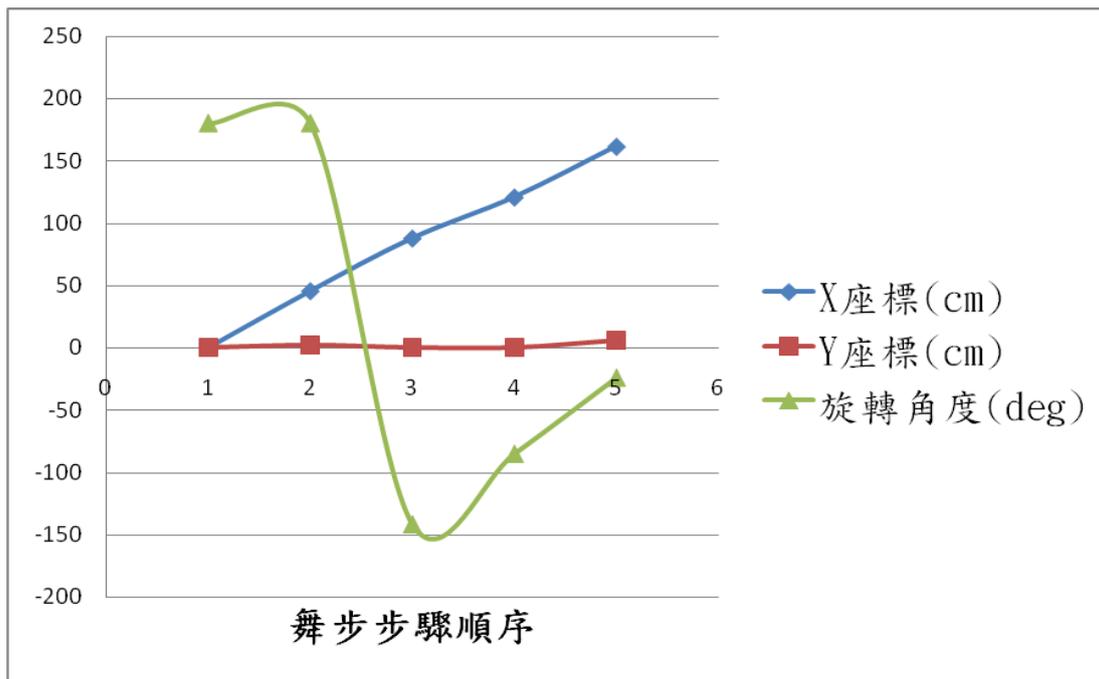


圖 4.12 斜左轉步之機器人座標與角度

程式設計部分使用時間配合速度的方式，將斜左轉步的五個狀態平均分配時間，每個狀態 0.6 秒，參考圖 4.13 為斜左轉步程式控制流程圖，依照不同的狀態給定不同的配速，將結果之誤差作速度的微調，最後的結果為起始狀態速度  $V_x$  為 -50，狀態 2 和狀態 3 相同，把  $V_x$  速度加快到 -600， $V_y$  與  $\theta$  給速度為零，到了狀態 4 的  $V_x$  速度變為 -1200， $V_y$  與  $\theta$  給速度分別為 1100 與 200，讓機器人可以逆時針方向轉動，到了狀態 5 後  $V_x$  速度變為 600 向前， $V_y$  與  $\theta$  給速度分別為 600 與 200，讓機器人可以繼續逆時針方向轉動，最後將數值傳送到馬達控制器後輸出到馬達，此時可以先不要與機器人連線，空跑程式觀察輸出之速度是否正確，圖 4.14 為斜左轉步實驗之機器人位置變化圖，實驗時將地上標註記號兩條線為機器人標準舞步之起點與終點位置，但是多次實驗均無法順利到達此區域。

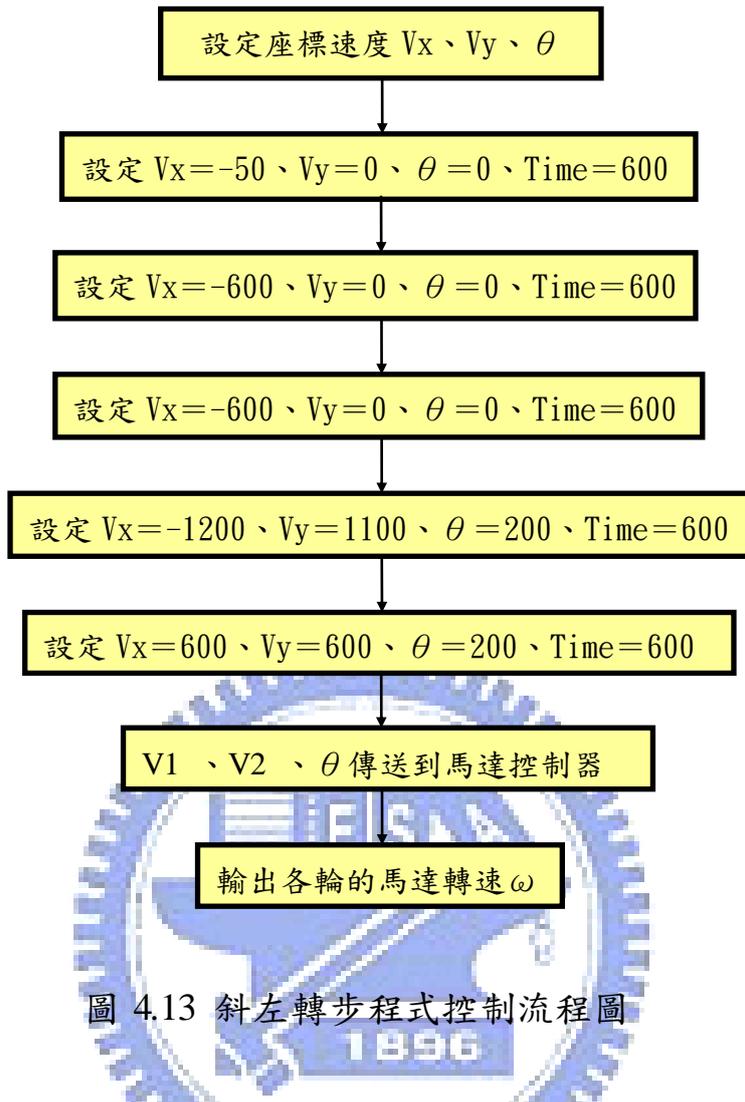


圖 4.13 斜左轉步程式控制流程圖



圖 4.14 斜左轉步實驗之機器人位置變化圖

參考圖 4.15 為機器人跳斜左轉步第一次測試結果比較，可以看出理論路徑與測試路徑誤差約 11.5%，此為不理想的誤差值，大部分的點都沒有達到理想的距離，因此需想辦法改善此誤差。

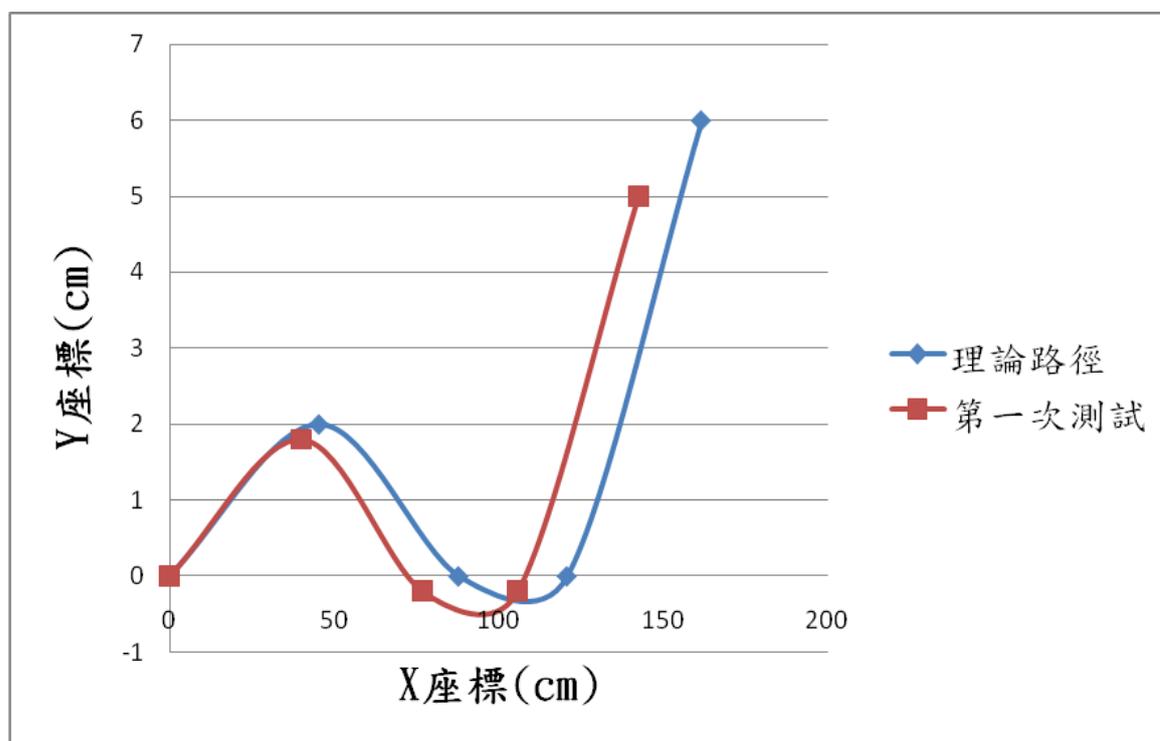


圖 4.15 斜左轉步第一次測試結果比較

#### 4.1.4 斜右轉複合步之程式設計與實驗

參考圖 4.16 為機器人跳斜右轉複合步之位置方向圖，箭頭方向為機器人之正面方向，數字為步驟順序，利用此圖九個步驟之位置與方向來設計程式，藉由比例放大來設計出每一個步驟的座標位置，參考表 4.4 為斜右轉複合步之機器人座標與角度參數，理論上機器人需要照著這些位置移動與轉動，完成此舞步的時間為七秒。

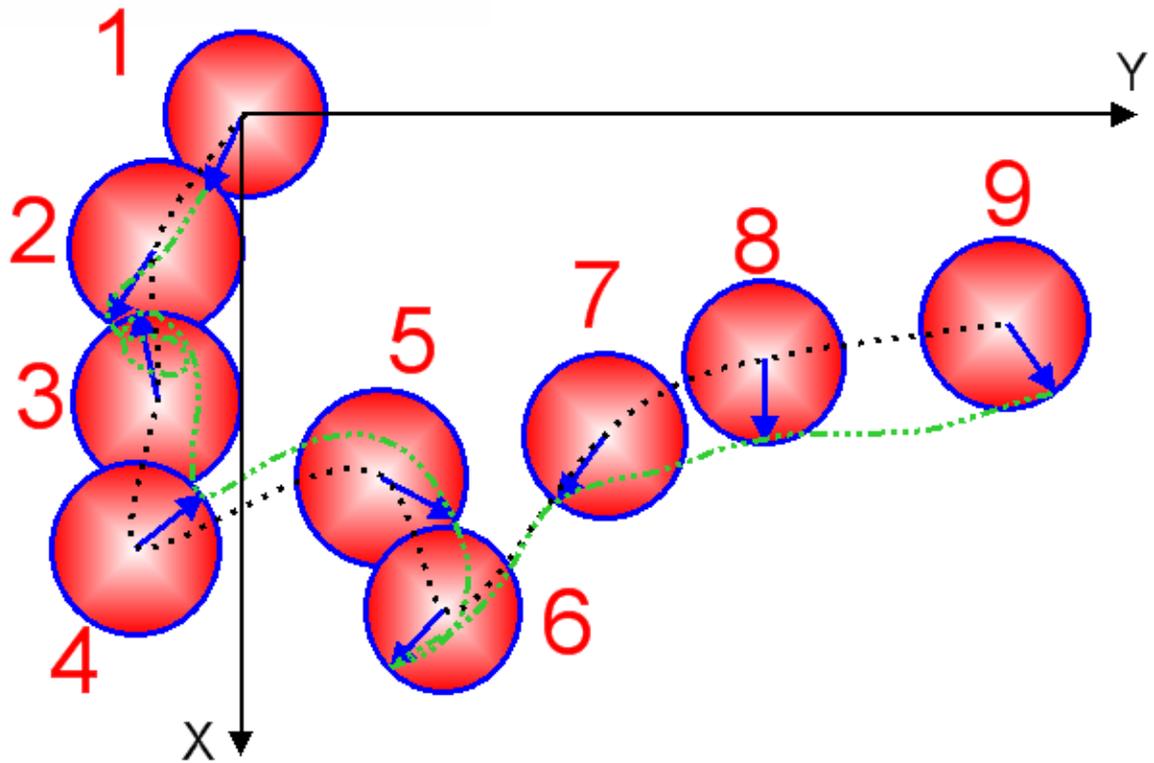


圖 4.16 機器人跳斜右轉複合步之位置方向圖

表 4.4 斜右轉複合步之機器人座標與角度參數

步驟	X 座標(cm)	Y 座標(cm)	旋轉角度(deg)
1	0	0	-25.2
2	21.7	-12.6	-23.9
3	46.9	-14	-85
4	70	-14.7	138.8
5	55.3	12.6	60.9
6	72.8	22.4	-48.4
7	46.2	43.4	-45
8	34.3	68.6	-12
9	31.5	103.6	41.6

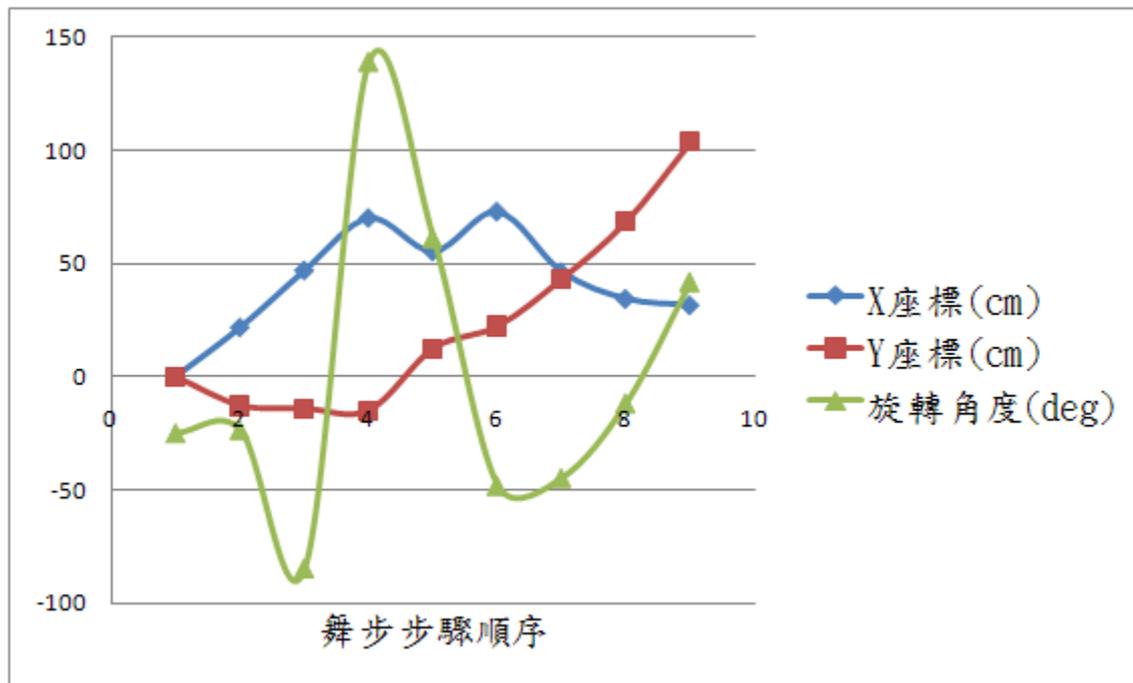


圖 4.17 斜右轉複合步之機器人座標與角度

程式設計部分使用時間配合速度的方式，將斜右轉複合步的九個狀態平均分配時間，每個狀態 0.8 秒，參考圖 4.18 為斜右轉複合步程式控制流程圖，依照不同的狀態給定不同的配速，將結果之誤差作速度的微調，距離不夠就將速度增加，距離太多就將速度調小，最後的結果為起始狀態速度  $V_x=500$ 、 $V_y=-40$ 、 $\theta=0$ ，所以開始會快速前進，狀態 2 和狀態 3 類似，把  $V_x$  速度變成  $V_y$ ， $\theta$  給速度為 -140，到了狀態 4 的  $V_x$  速度變為 -300， $V_y$  與  $\theta$  速度為零，到了狀態 5 後  $V_x$  速度變為 300 向前， $V_y$  與  $\theta$  給速度分別為 -400 與 -140，讓機器人可以順時針方向轉動，剩下的狀態就如同流程圖所示，照著流程圖之步驟將參數設定完畢，最後將數值傳送到馬達控制器後輸出到馬達，此時可以先不要與機器人連線，空跑程式觀察輸出之速度是

否正確，圖 4.19 為斜右轉複合步實驗之機器人位置變化圖，實驗時將地上標註記號兩條線為機器人標準舞步之起點與終點位置，但是多次實驗均無法順利到達此區域。

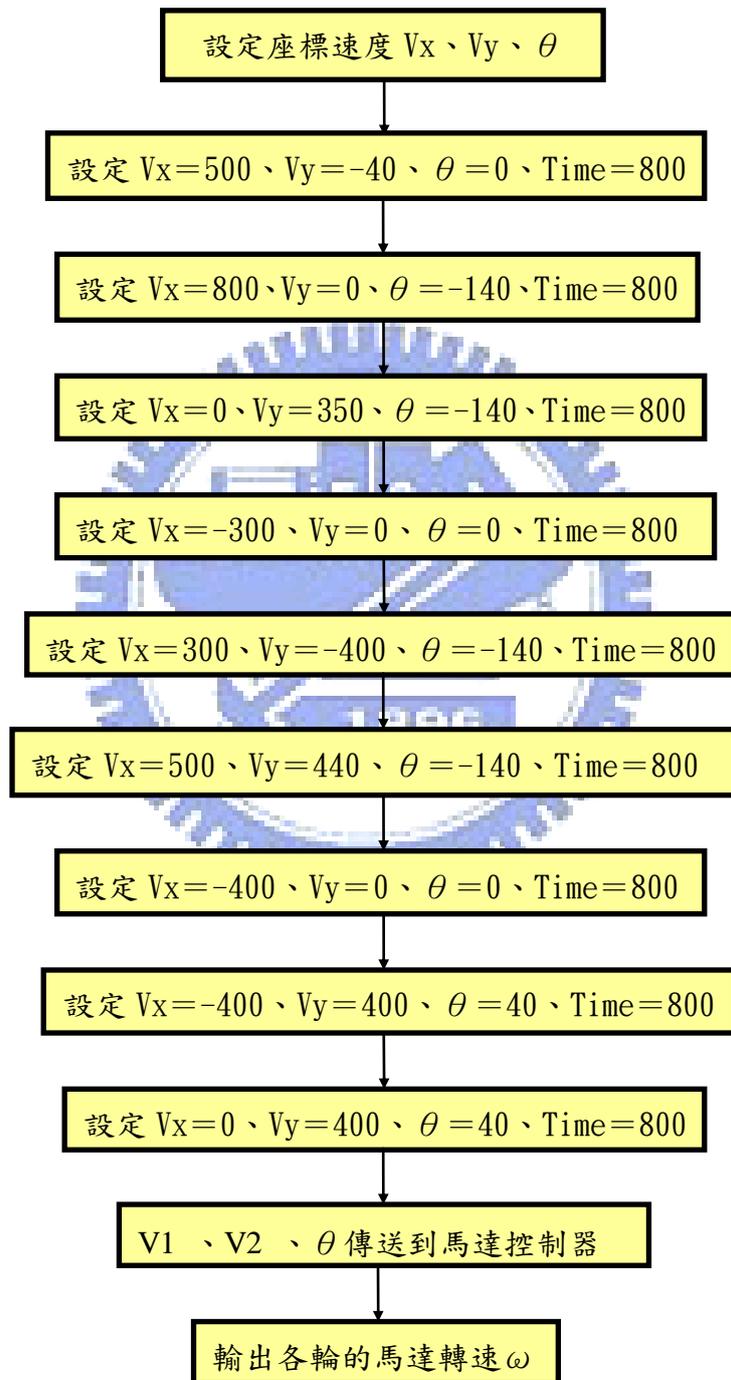


圖 4.18 斜右轉複合步程式控制流程圖

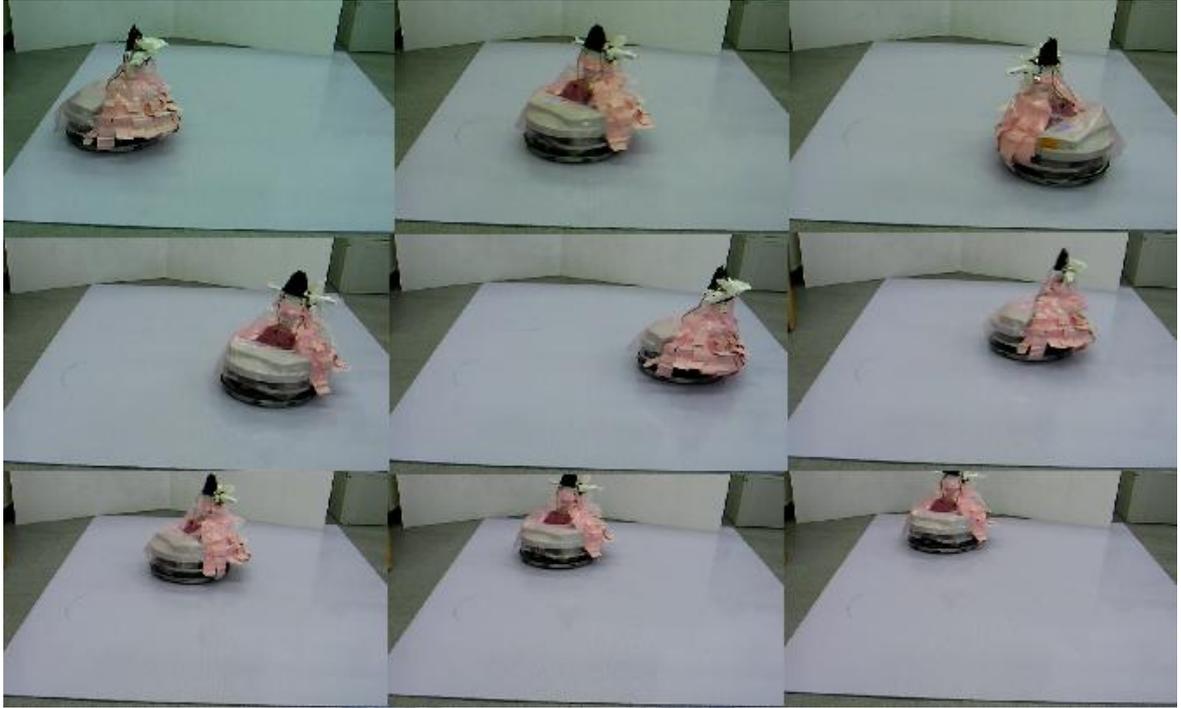


圖 4.19 斜右轉複合步實驗之機器人位置變化圖

參考圖 4.20 為機器人跳斜右轉複合步第一次測試結果比較，可以看出理論路徑與測試路徑誤差約 17%，此為不理想的誤差值，大部分的點都沒有達到理想的距離，因此需要想辦法改善此誤差。

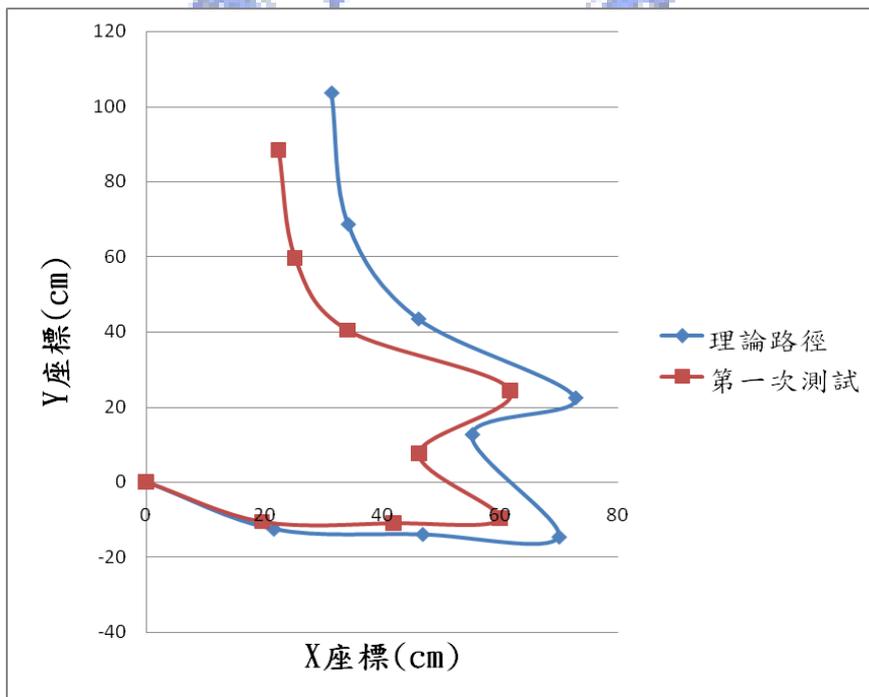


圖 4.20 斜右轉複合步第一次測試結果比較

## 4.2 舞步誤差改良

此四種舞步經過實際測試後，會因為電池電量、場地材質、機器人本身附重、輪子清潔度、打滑等因素，而造成結果與理想值之誤差，尤其是當機器人之行進方式為一邊自轉、一邊朝向某一方向前進時，因為其前進之 X、Y 速度大小隨時在變化，誤差也就更大，程式使用的速度不是馬達真實的轉速，雖然經過速度參數微調之後，會變得比較準確，但是很花時間，準確度大約可以到 5% 左右。因此要使之達到移動路線平滑與精確，需改良目前之方法，所以先研究 X、Y 方向的誤差，忽略旋轉因素，假如 X、Y 方向距離可以準確的話，舞步才有機會準確，因此利用以下三種方法逐漸減少誤差。



### 4.2.1 馬達回饋訊號修正輸入速度

參考圖 4.21 為馬達回饋訊號修正輸入速度法之示意圖，以程式執行時間週期固定為 0.02 秒，利用馬達上面之增量型編碼器的回饋訊號計算出馬達實際轉速，再與馬達預設速度作比較計算，修正輸入之速度參數，使馬達實際轉速可以與輸入速度一樣，讓精確度提升。

測試結果：作直線 100 公分之測試，用尺量起點與終點之距離，經過十次測試之後，距離大約在 98.5~101 公分之間，誤差為 2.5%。

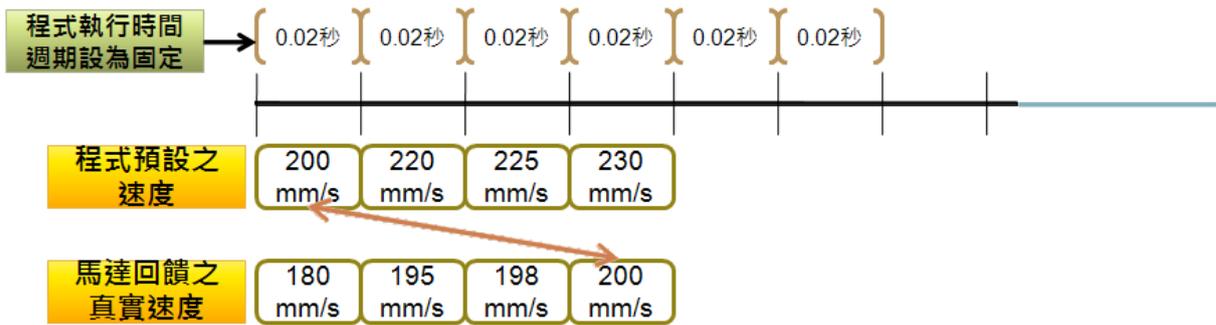


圖 4.21 馬達回饋訊號修正輸入速度之示意圖

#### 4.2.2 非固定時差之積分方法

馬達回饋訊號修正輸入速度之誤差還是有點大，因為回饋之速度經過計算與設定之速度比較後才給馬達，會產生延遲的現象，參考圖 4.22 為非固定時差之積分方法的示意圖，利用積分法改變  $dt$  的方法計算移動距離，與軟體傳送資料之最快單位時間利用程式計算出設為  $dt$ ，來與馬達實際速度做積分運算，此時  $dt$  是程式執行週期，約為 20~23ms 左右，會隨著電腦之處理速度而變換，當程式執行發生延遲的現象時，此時會將積分運算時間拉長，避免錯誤之判斷，利用馬達回饋之真時速度與程式週期時間相乘，可得到週期時間之位移，作積分運算  $S = \int v dt$ ，確認計算出之距離達到預設的距離後才結束程式。

測試結果：作直線 100 公分之測試，用尺量起點與終點之距離，經過五次測試之後，停下來的距離大約在 99.3~100.8 公分之間，誤差大概在 1.5% 左右，精確度有明顯提升。

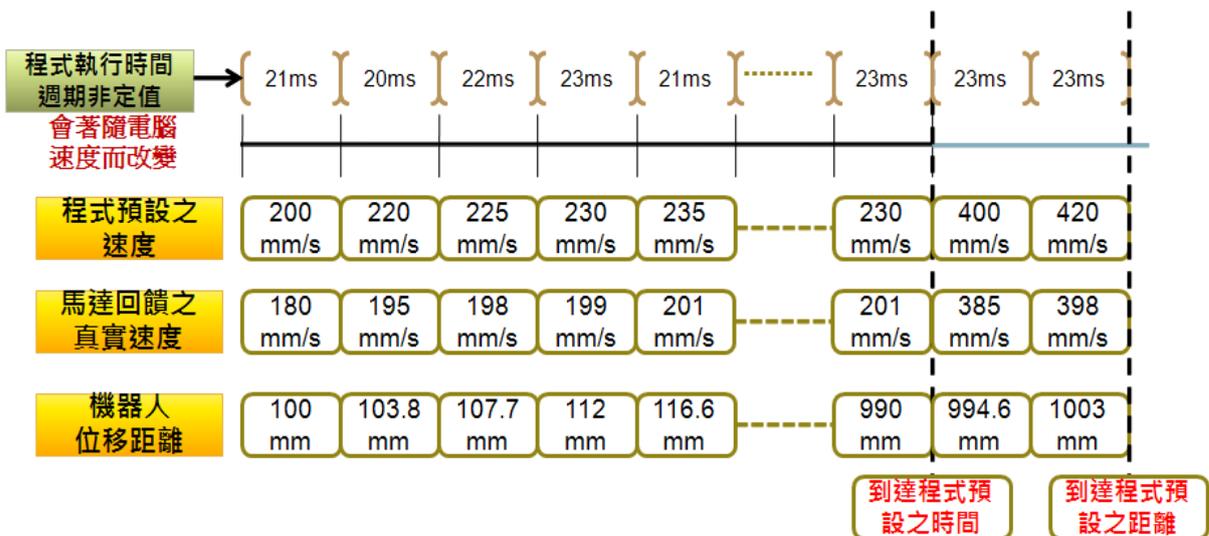


圖 4.22 非固定時差之積分方法之示意圖

誤差之原因：積分本身就會有少許誤差， $dt$  隨電腦當時速度而改變雖然可以使誤差減少，但輪子起速時加速度太大可能造成打滑現象，太小可能造成速度無法跟上時間之變化，所以會存在此誤差。

#### 4.2.3 積分法與修正馬達 PID 控制一起使用

積分法計算位移量之精度並不是最理想的精度，馬達控制之 PID 可能是造成此誤差之原因，P 為比例控制器，依偏差值作比例輸出修正，按比例反應系統的偏差，系統一旦出現偏差，比例調節立即產生作用以減少偏差。比例作用大，可以加快調節，減少誤差，但是過大的比例，會使系統的穩定下降，甚至造成系統的不穩定，所以可以控制放大倍數使系統反應加速，所以  $K_p$  的功能為直覺性正比修正。I 為積分控制器，依偏差值的積分作輸出修正以消除偏差。 $K_i$  可以使系統消除穩態誤差，提高精確度，只要一有

誤差，積分調節器就開始執行，直到無誤差為止，積分作用的強弱取決於積分時間常數  $T_i$ ， $T_i$  越小積分作用就越強。反之  $T_i$  大則積分越弱，加入積分調節可以使系統穩定性下降，動態響應變慢。D 為微分控制器，透過誤差的改變來預測將來的誤差。微分作用反應系統偏差信號的變化率，能看出偏差變化的趨勢，因此可以產生超前的控制作用，在偏差沒有形成之前就已經被微分調節作用消除。可以改善系統穩定度使其不至於因發散而燒毀系統，因此過強的微分調節對系統抗干擾不利，此外，微分反應的是變化率，當輸入沒有變化時，微分作用輸出為零，而微分作用不能單獨使用，要與另外兩種調節器規律的結合，組成 PI 或 PID 控制， $K_d$  的功能為改善暫態響應。調整 PID 的目的在改變暫態響應速度或到達穩態的時間。因此調整前面兩顆馬達 1 跟 3 之  $K_p$  值範圍在 0.7~1 之間， $K_i$  值範圍在 0~0.1 之間， $K_d$  設為零，隨著不同場地材質、電池電量或本身附重有著不同的組合，配合積分法的使用，最佳精度可以達到正負 0.3 公分以內之誤差。

測試結果：參考圖 4.23 為調整 PID 參數之結果示意圖，當參數調為  $K_p = 0.8$ 、 $K_i = 0.07$ 、 $K_d = 0$  時效果最好，停下來的距離大約在 99.7~101.2 公分之間，誤差為 0.5%。

誤差之原因：可能是因為積分的微小誤差、輪子上的灰塵造成打滑、測量上的誤差等，但是此微小誤差是可以容許的。

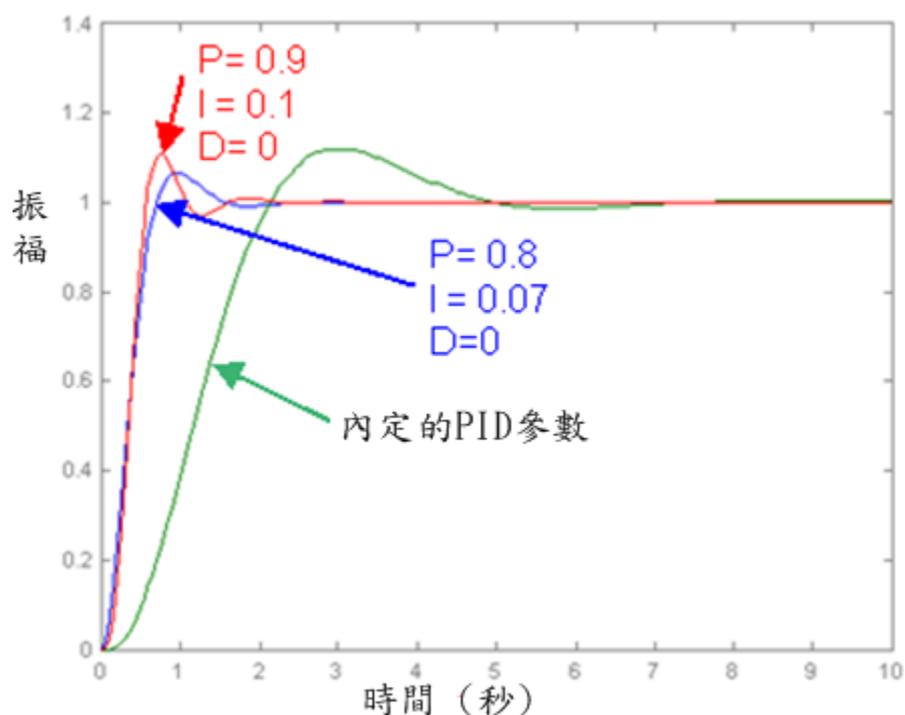


圖 4.23 調整 PID 參數之結果示意圖

假如還想讓誤差更小，可能需使用室內之 GPS 系統，名為北極星(North Star)，利用紅外線發射器裝置在室內之天花板或牆壁上，機器人上放置接收器，利用座標換算方式算出對應位置座標，資料再透過程式去作回饋修正，因為誤差在 0.5%已經在容許範圍內，所以此方面不再繼續作討論。以下為利用前面提到的幾種方法套入華爾滋舞步裡做測試，理論路徑為理想狀態下的路徑，越接近理想路徑表示越精準，參考圖 4.24、4.25、4.26、4.27 分別為四種舞步之測試修正結果，利用前敘述之三種改良誤差之方法作驗證，與理論路徑作比較，第一次修正是使用馬達回饋訊號修正輸入速度算距離，誤差是以終點與起點的距離來做比較，誤差值約在 4~8%之間，第二次修正是使用積分法計算位移量，誤差約在 3~6%之間，第三次修正是積分

法計算位移與改變馬達 PID 控制一起使用，調整 PI 可以使誤差逐漸變小，但是會花比較多的時間，調好 PID 之後，誤差約在 2~4%之間，在沒有使用 GPS 模組的情況下，我們認為此誤差值是可以接受的範圍，因此之後的華爾滋舞步皆是使用此種方式作誤差修正。

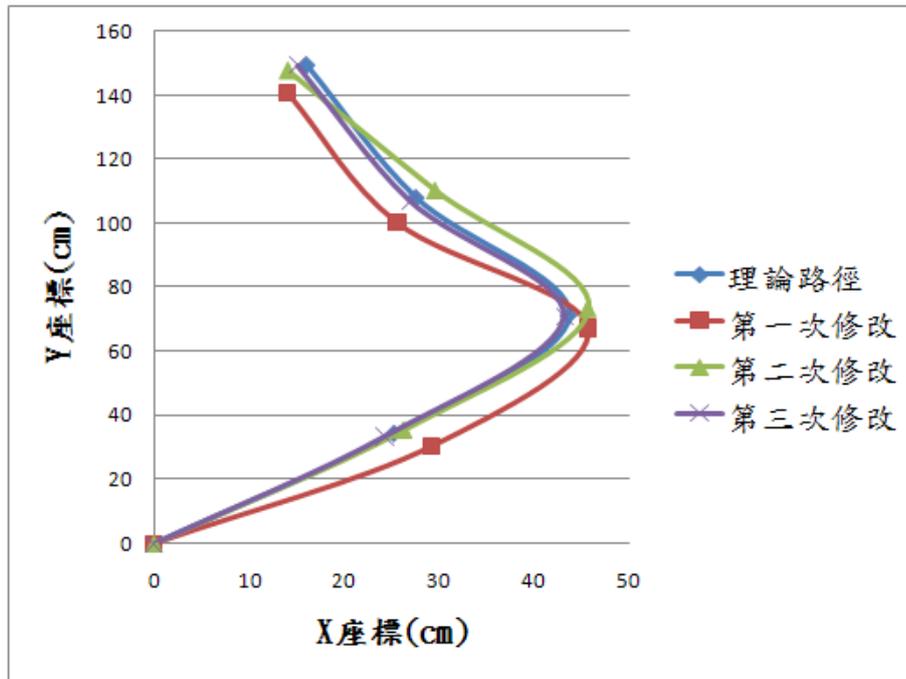


圖 4.24 斜進步修正結果比較

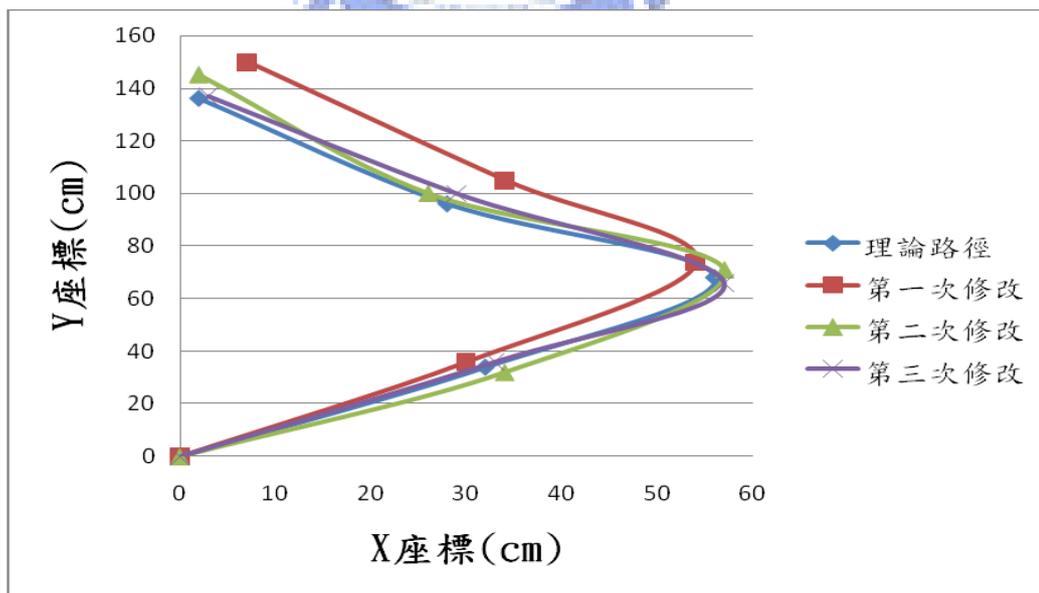


圖 4.25 曲進步修正結果比較

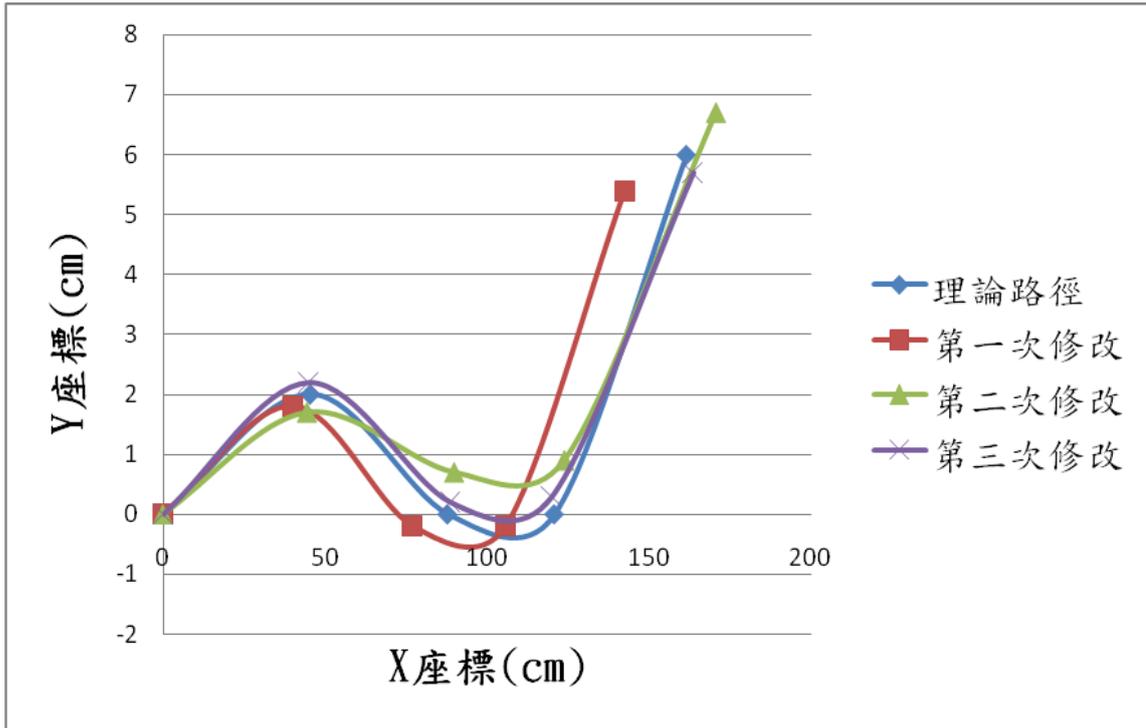


圖 4.26 斜左轉步修正結果比較

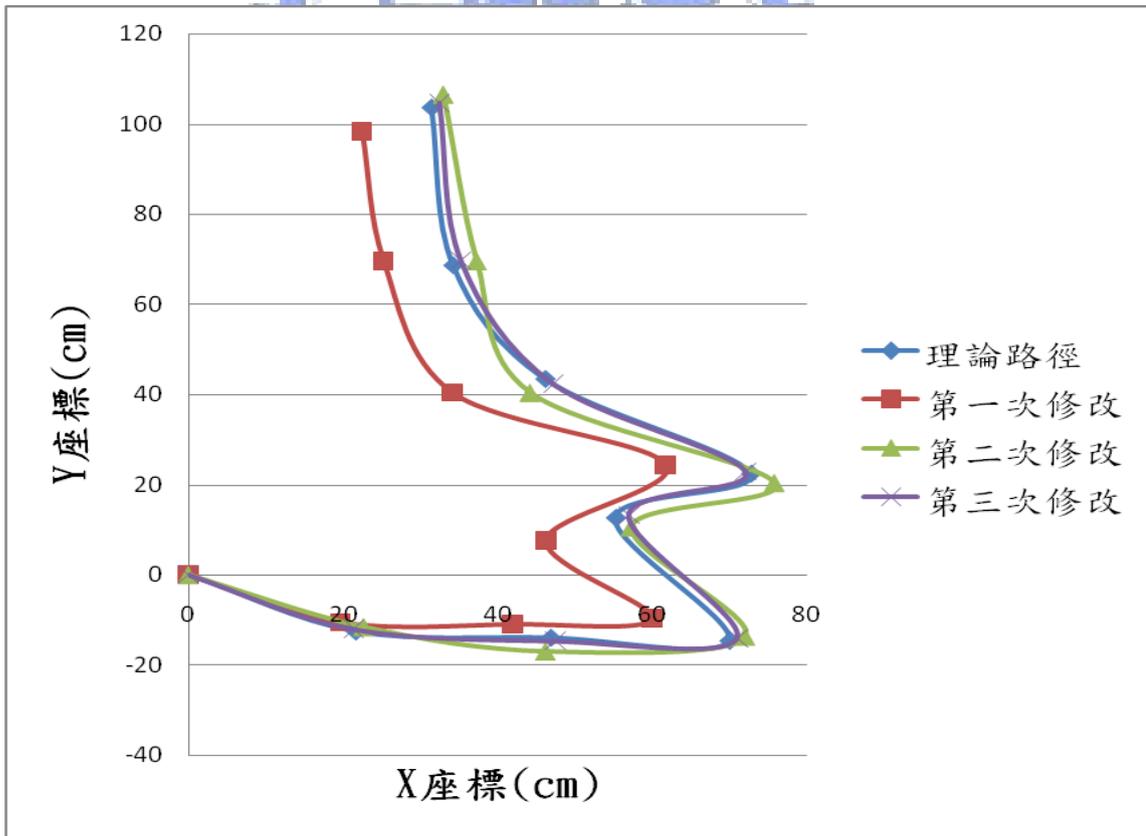


圖 4.27 斜右轉複合步修正結果比較

#### 4.2.4 最佳訓練軌跡資料庫建立

原本程式設計部分使用時間配合速度的方式，將舞步每一個狀態平均分配時間，依照不同的狀態給定不同的配速，將結果之誤差作速度的微調，距離不夠就將速度增加，距離太多就將速度調小，配合各個狀態給予不同之速度，配合馬達 PID 之調整，可達到想要的舞步精確度。但是現在改由使用指令數值寫入 (Value Writer) 的方式，將速度參數存成資料庫，如圖 4.28 為最佳訓練軌跡資料庫建立程式，將舞步建立成舞步資料庫，第二次要使用同一種舞步時，只需要讀取舞步資料即可，直接由資料庫輸出給馬達，完成所設定的舞步，也可以很容易修改舞步的詳細參數，讓舞步更有彈性。

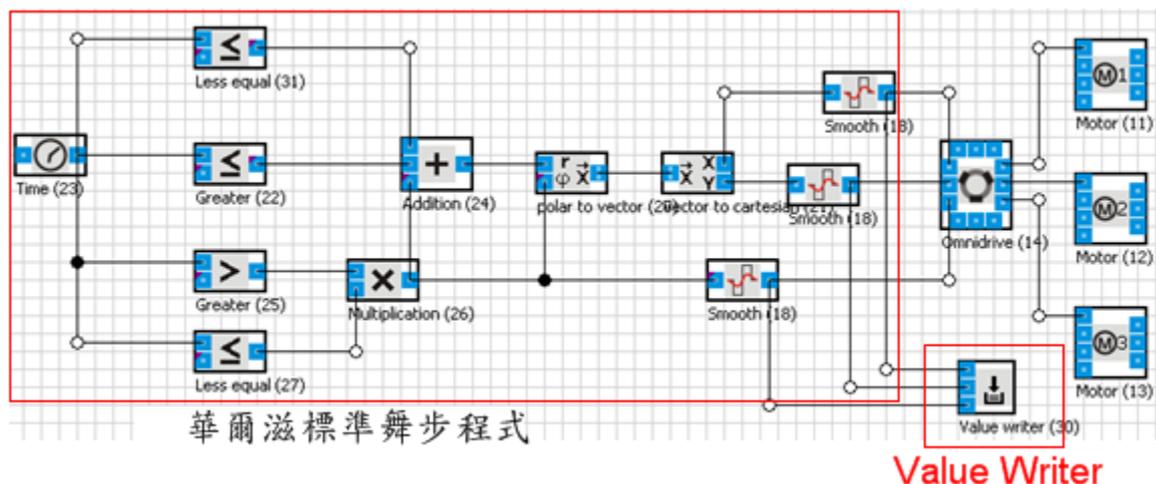


圖 4.28 最佳訓練軌跡資料庫建立程式

### 4.3 舞步教學功能應用於評分系統

前章節利用幾種方法將舞步轉換為程式之誤差變小，本節利用標準舞步之機器人與舞伴一起跳舞的過程中，參考圖 4.29 之程式流程圖，使用感測器測量相對距離，經過分析比對之後，可以幫舞伴打分數，由分數高低可以知道舞步的好壞。由圖 4.29 可看出利用 S1、S2、S9 三個感測器，當執行某一種舞步時，感測器會測量與舞伴的距離，當執行完一種舞步後，將三顆感測器總合與時間作積分，再和舞步分數標準之參數相減，與標準參數比較經過轉換函數後輸出分數在電腦螢幕上，誤差越大分數就越低，但非為線性，此為舞步教學功能之應用。

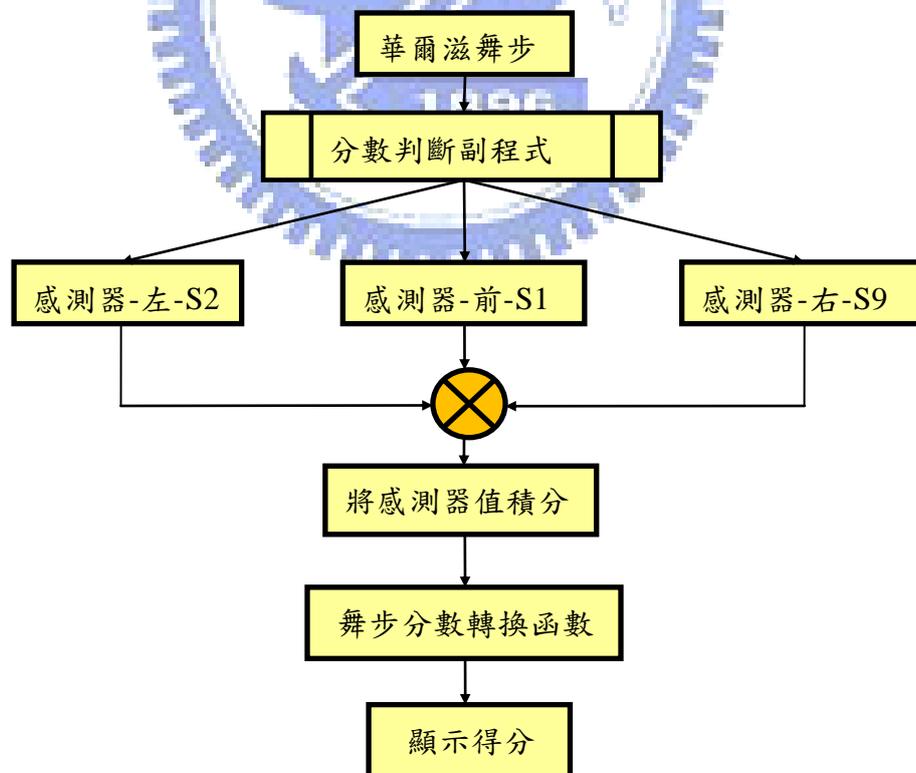


圖 4.29 評分系統之程式流程圖

## 第五章 舞伴機器人舞步產生原理 2：伴舞功能

本章節內容主要研究伴舞功能的部分，需讓機器人配合舞者的舞步，可自行判斷舞者舞步大小或是順序是否正確，作為舞步的修正，讓機器人能順利的配合人一起跳華爾滋。5.1 節為無預設舞步之從動機器人程式設計與實驗，讓機器人擔任舞伴的角色來跳舞，沒有預設舞步路徑，裡面包含了許多判斷措施，因此伴舞功能比教學功能有更多的彈性，之後的研究包括有預設舞步之主動機器人程式設計與實驗、舞步學習修正法與設計副程式架構的功能都是為了加強舞伴的功能而研究出的成果，最後將這些功能作結合，再與 8051 控制電路配合，增加機器人自由度，改進羅勃提諾本身硬體不足的地方，使舞伴機器人更具智慧性。

### 5.1 無預設舞步之從動機器人程式設計與實驗

此實驗之目的為當機器人無任何內建之舞步時，依然可以跟隨人類跳舞，為伴舞功能的前置作業，不使用第四章所研究出之教學功能，目的在於讓機器人很有彈性的適應各種與人類腳部的相互運動，須要注意的是感測器的反應速度是否足夠，參考圖 5.1 為從動機器人跟隨舞者之程式流程，為了讓機器人跟著人類移動，並保持固定的距離，利用機器人前面三顆紅外線感測器，第一顆 (S1) 來做為判斷人的前後距離，第二顆 (S2)

和第三顆 (S9) 做人的左右位置判斷，但是為了避免其他物體干擾第二和第三顆感測器的判斷，所以需要第一顆感測器與其他兩顆來做比較，感測器值與距離成反比，當  $S_2 > S_1$  時，機器人往逆時針方向修正，修正參數為  $V_\theta = 200(S_9 - S_1)$ ；當  $S_9 > S_1$  時，朝順時針方向修正，修正參數為  $V_\theta = -200(S_2 - S_1)$ ，當  $S_2 < S_1$  且  $S_9 < S_1$  時，作前後距離修正，修正參數最後測試結果為  $V_x = -300(S_1 - 0.8)$ ，參考圖 5.6，但是因為感測器本身的特性在 5 公分範圍以內數值會呈現反值，所以當物體距離機器人五公分以內時，所以需要利用轉移函數作反向運算。

圖 5.2 為從動機器人實驗之示意圖，可看出用一箱子代表人的位置來做實驗，圖 5.3 為從動機器人跟隨舞者之第一次測試，圖中顯示機器人與舞伴的相對位置，因為人有兩隻腳比較難表達與機器人之相對距離，因此使用一箱子來代替本身的移動，只作 X 方向之移動，利用積分運算與座標轉換後得到機器人之座標位置，使用機器人 S1 感測器來判斷與舞伴的距離，本次測試感測器判斷參數並沒有調整好，速度方程式為  $V_x = -250(S_1 - 0.6)$ ，S1 為第一顆感測器參數，可以看出路徑差異較大，圖 5.4 為從動機器人跟隨舞者之修正完成測試，經過調整後的速度方程式為  $V_x = -300(S_1 - 0.8)$ ，由圖中可看出路徑差異較第一次測試小，將兩次測試中舞伴與機器人之距離作成圖表顯示，由圖 5.5 可看出前兩次測試中舞伴與機器人之距離，修正完成後之差距最遠距離為 8 公分，比第一次測試之 23

公分少了很多，可看出參數設定在此功能的重要性。

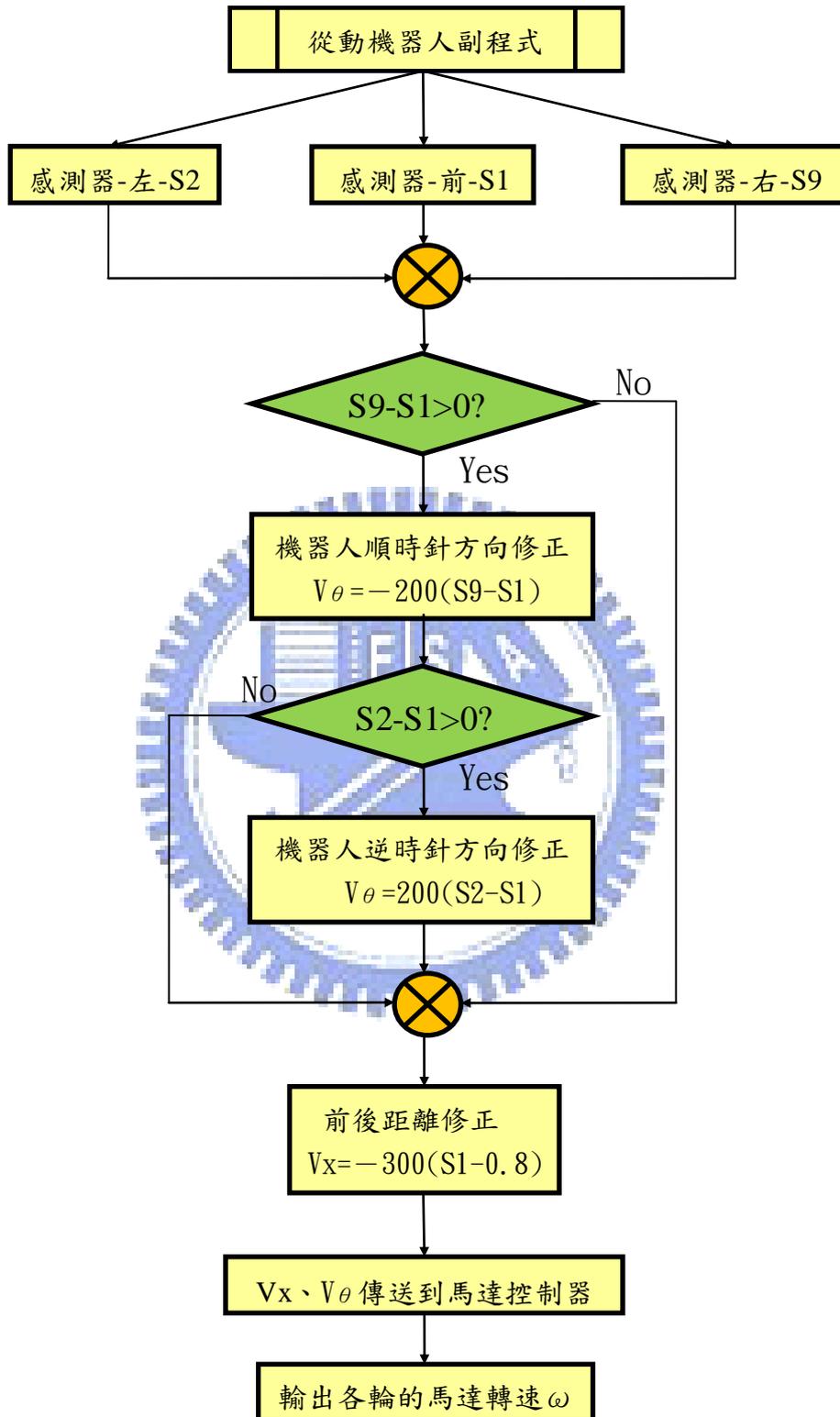


圖 5.1 從動機器人跟隨舞者之程式流程



圖 5.2 從動機器人實驗之示意圖

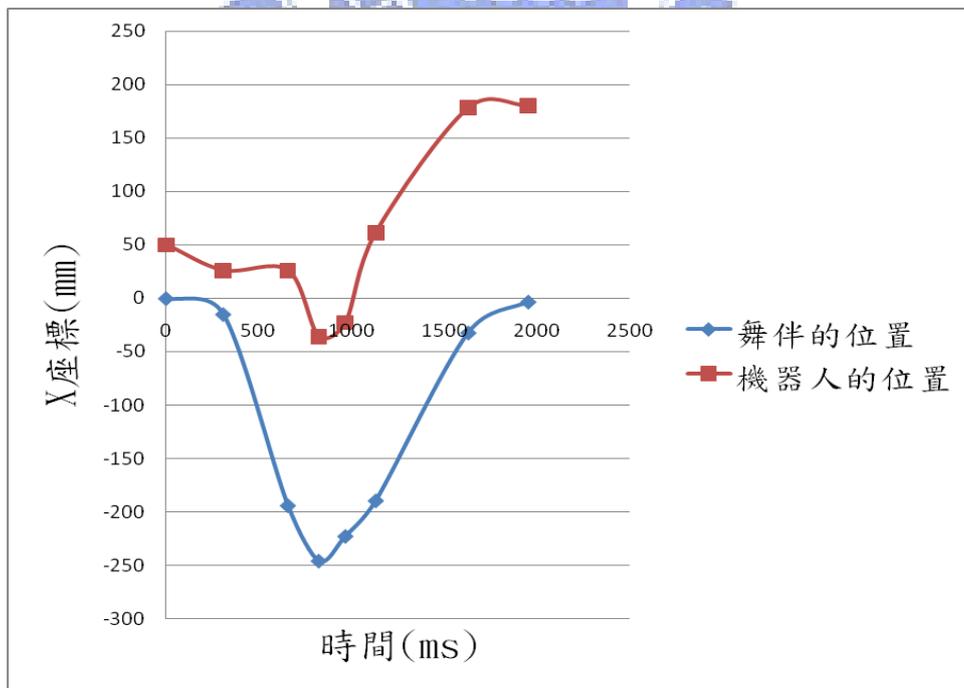


圖 5.3 從動機器人跟隨舞者之第一次測試  $V_x = -250$  (S1-0.6)

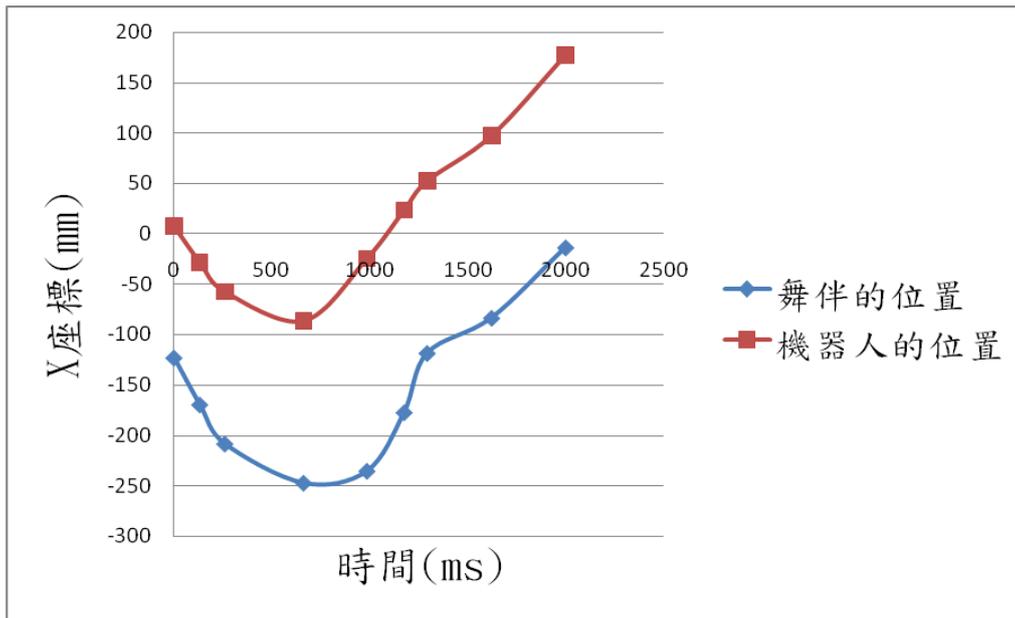


圖 5.4 從動機器人跟隨舞者之修正完成測試  $V_x = -300(S1 - 0.8)$

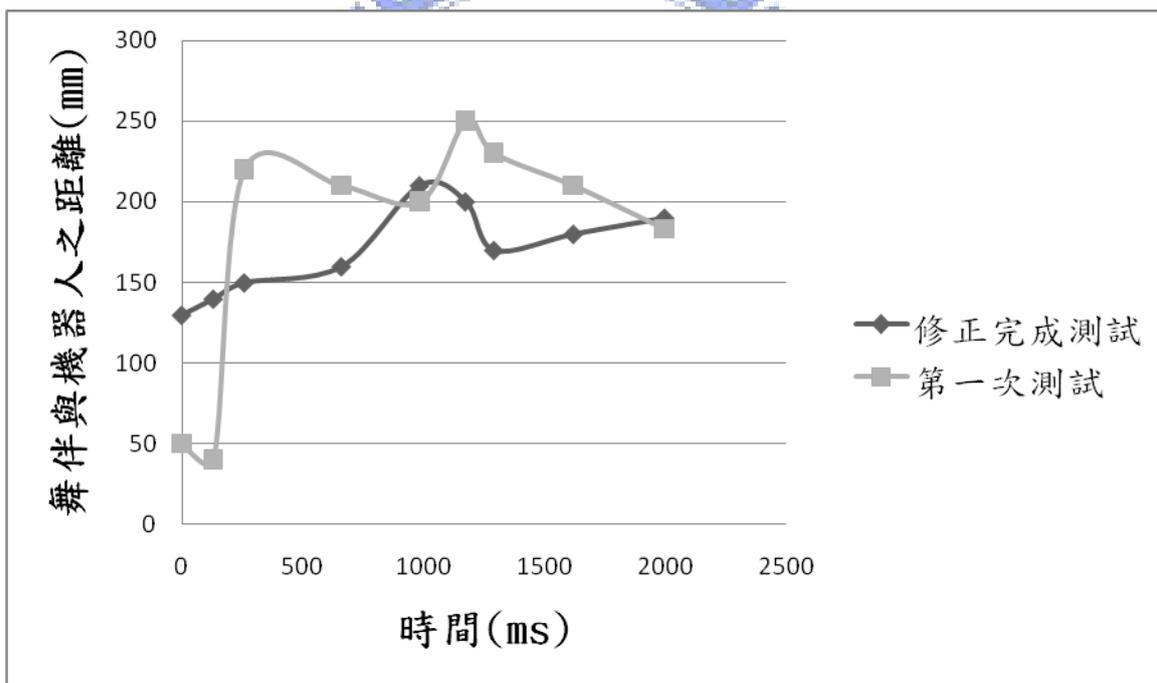


圖 5.5 前兩次測試中舞伴與機器人之距離

至於速度方程式  $V_x = a(S1 - b)$  參數  $a$  與  $b$  之決定可由圖 5.6 (a) 與 (b) 中看出  $a = -300$ ,  $b = 0.8$  為機器人與舞伴距離最小之參數組合，因此將此參數用於從動機器人之前後修正速度上可達到最佳功能。

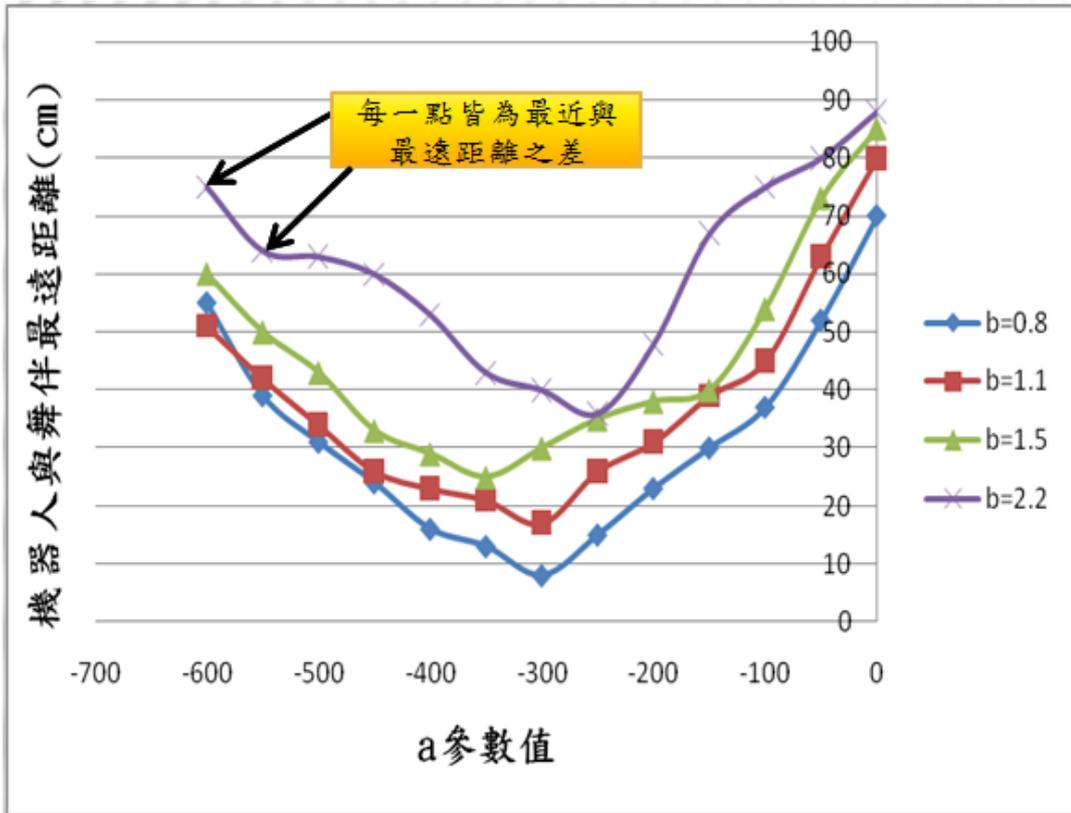


圖 5.6 (a) 修正速度  $V_x=a(S1-b)$  參數  $a$ 、 $b$  測試 1

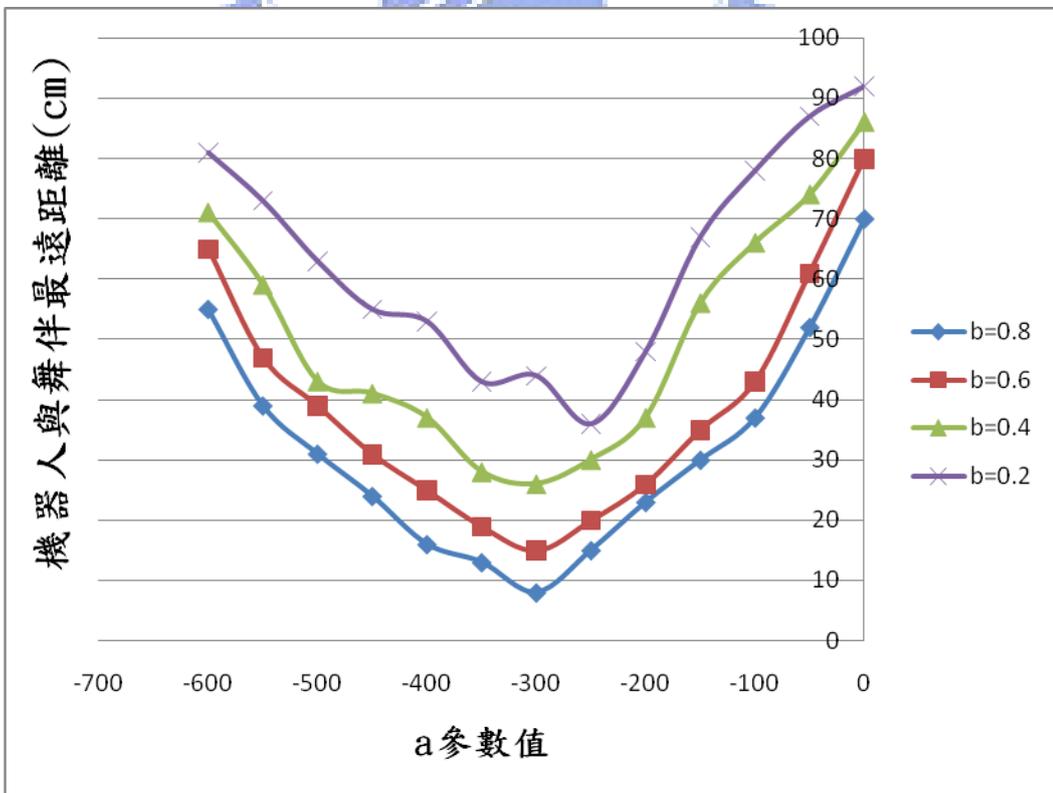


圖 5.6 (b) 修正速度  $V_x=a(S1-b)$  參數  $a$ 、 $b$  測試 2

## 5.2 有預設舞步具避障修正之主動機器人程式設計與實驗

此研究之目的為當機器人有內建之舞步時，是否可以在隨人類跳舞之餘，也希望把避障功能與舞步順利搭配，當機器人快碰到障礙物時，可以很平滑的閃躲並持續跳著華爾滋舞步而不受影響。

也因為每個人跳舞的舞步大小都不一樣，此項功能可以容許對方舞步較大之誤差值，實際跳舞的過程中有機會碰到阻礙物，可能是一起跳舞的人或是周圍環境的牆壁，本研究讓機器人能有效的判斷這些物體，即時進行閃避，並立即適當的回應調整舞步，可以更有效的執行伴舞的角色。

參考圖 5.7 為機器人跟隨舞者的程式流程，為了讓機器人在執行舞步資料庫的舞步時，除了跟著人類一起跳舞以外，還同時利用周圍的六顆紅外線感測器，搭配從動機器人之副程式來使用，參考圖 5.8 之障礙物位置來判斷周圍的物體是否有碰撞的可能性，同時進行閃躲的動作，主要的程式架構是避障的程式、從動機器人之副程式與舞步的程式同時執行，因此要考慮舞步與閃躲兩者之間速度搭配的問題，假如舞步速度大於閃躲速度參數時，那將得到比較完整的舞步路徑，但是遇到障礙物的反應就變得較小；假如閃躲的速度參數要大於舞步速度的參數時，遇到障礙物會閃躲的比較完整，但此時舞步路徑會有較大的改變，所以避障功能速度參數要調整到最佳值，讓舞步與避障功能可以兼顧，實驗結果可參考圖 5.9 有避障功能之路徑與標準斜進步位置比較，可看出有障礙物時，舞步依然可以順

利完成，但是軌跡會有所改變，以機器人與障礙物的距離不會小於六公分為前提，作為程式參數設計的基準。

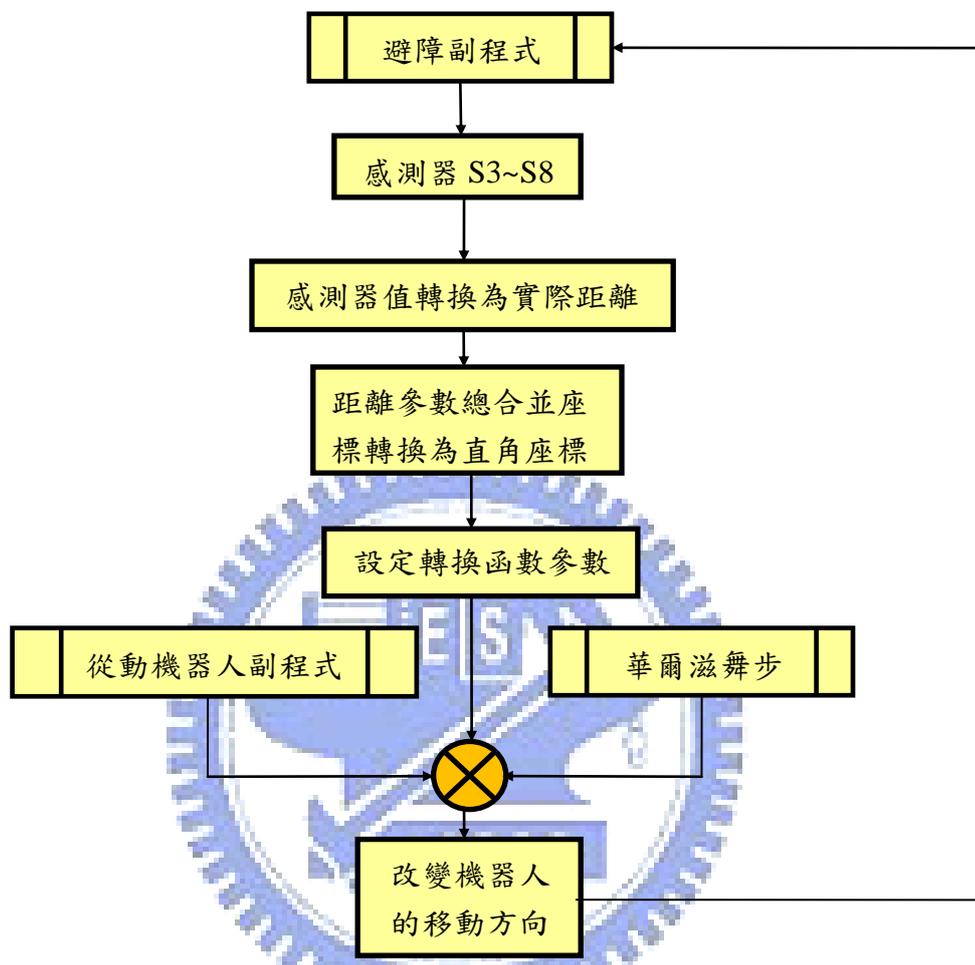


圖 5.7 機器人跟隨舞者的程式流程



圖 5.8 (a) 預設舞步無避障功能之位置變化圖



圖 5.8 (b) 預設舞步有避障功能之位置變化圖

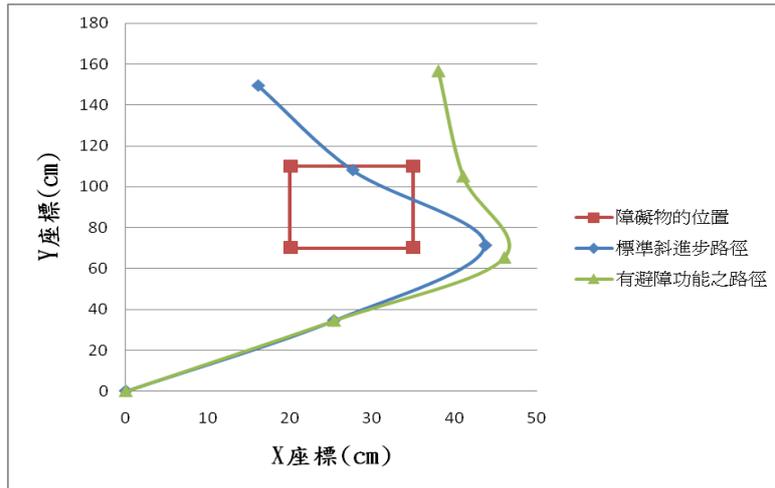


圖 5.9 避障功能之測試結果

### 5.3 舞步學習修正方法

本研究之目的為利用測試法寫出經驗轉移函數，來修正標準舞步參數之學習功能，使用 S1、S2、S9 三個感測器，當執行某一種舞步時，感測器會感測舞伴的距離，當執行完一種舞步後，把感測器得到的參數對時間作積分，經過轉換後可得到舞伴機器人與舞伴在斜進步過程中之距離總和，積分出來的值落在約 95 到 355 之間，假如舞伴的舞步比標準舞步還大的話，積分值就會比較大；舞伴的舞步比標準舞步還小的話，積分值就會比較小，圖 5.10 為斜進步測試時舞伴與機器人之距離經過 60 次實驗取出 27 次而繪製成的圖表，可得到舞步太小與標準舞步的界線為 163~169 公分，舞步太大與標準舞步的界線為 240~245 公分，將這些參數轉換為參考之經驗轉移函數，透過圖 5.11 舞步學習修正方法之程式架構撰寫程式，使之可以達成舞步學習修正之功能。

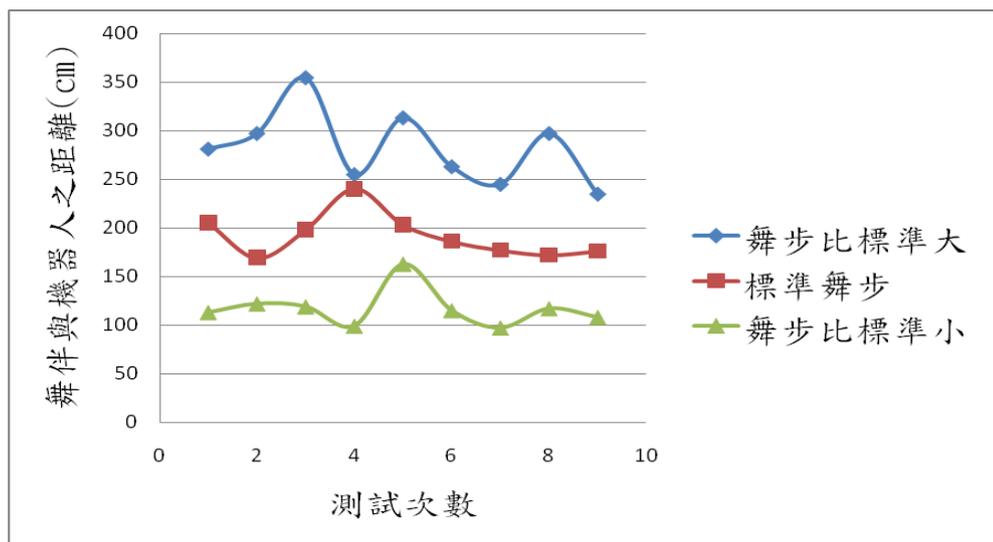


圖 5.10 斜進步舞伴與機器人之總距離

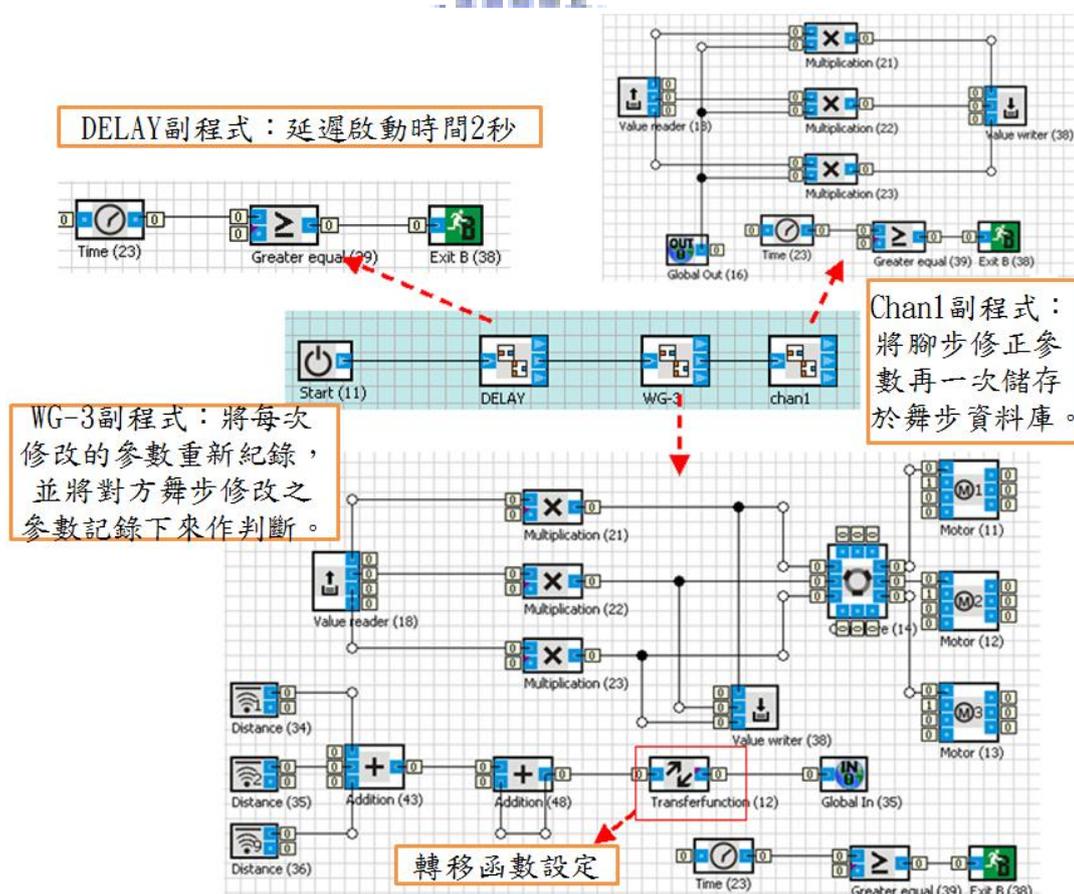


圖 5.11 舞步學習修正方法之程式架構

舞步學習修正功能之程式架構如圖 5.11 所示，DELAY 副程式的功能為延遲啟動時間 2 秒。WG-3 副程式功能為斜進步的執行，執行過程中會讀取感

測器 1、2、9 的值並將其作積分運算，在轉換函數的地方有一個自行設定的轉換函數，此轉換函數是由之前的 60 次斜進步實驗而來的，當執行斜進步之後會將修正舞步參數儲存在暫存器裡。chan1 副程式的功能則是將腳步修正量再一次儲存於資料庫裡。參考圖 5.12 為舞步學習修正方法之程式流程圖，將每次修改之參數重新紀錄，利用類比參數方式將舞步資料庫之舞步參數修正。

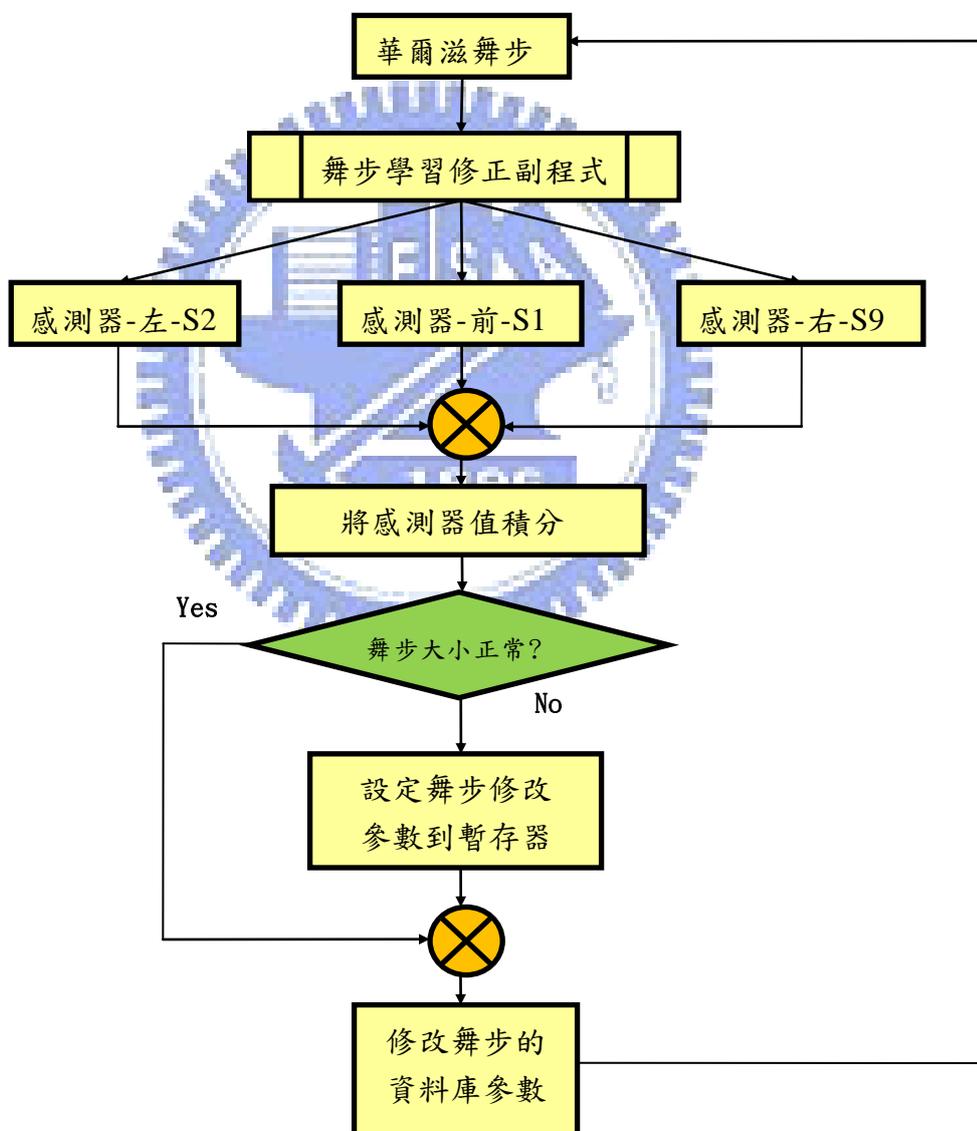


圖 5.12 舞步學習修正方法之程式流程圖

## 5.4 設計副程式架構的功能

因為此軟體沒有支援副程式的功能，當舞步程式的量變多時，程式數量會隨著跳舞時間而增加，但經由實驗發現舞步時間多於兩分鐘後，會因為程式量太大而時常發生軟體延遲或當機問題，造成機器人跳舞動作不正常，因此這項研究之目的為有效減少主程式的數量，讓主程式執行更為順暢，此程式用了許多變數來設計迴圈，參考圖 5.13 為副程式功能的架構圖，主程式 main1 的部分可藉由輸入程式編號順序以及程式執行時間來執行副程式，接著 che 副程式利用三進位的方式篩選程式的走向，使其順利進入所選的舞步編號，流程順序如圖 5.14 所示。

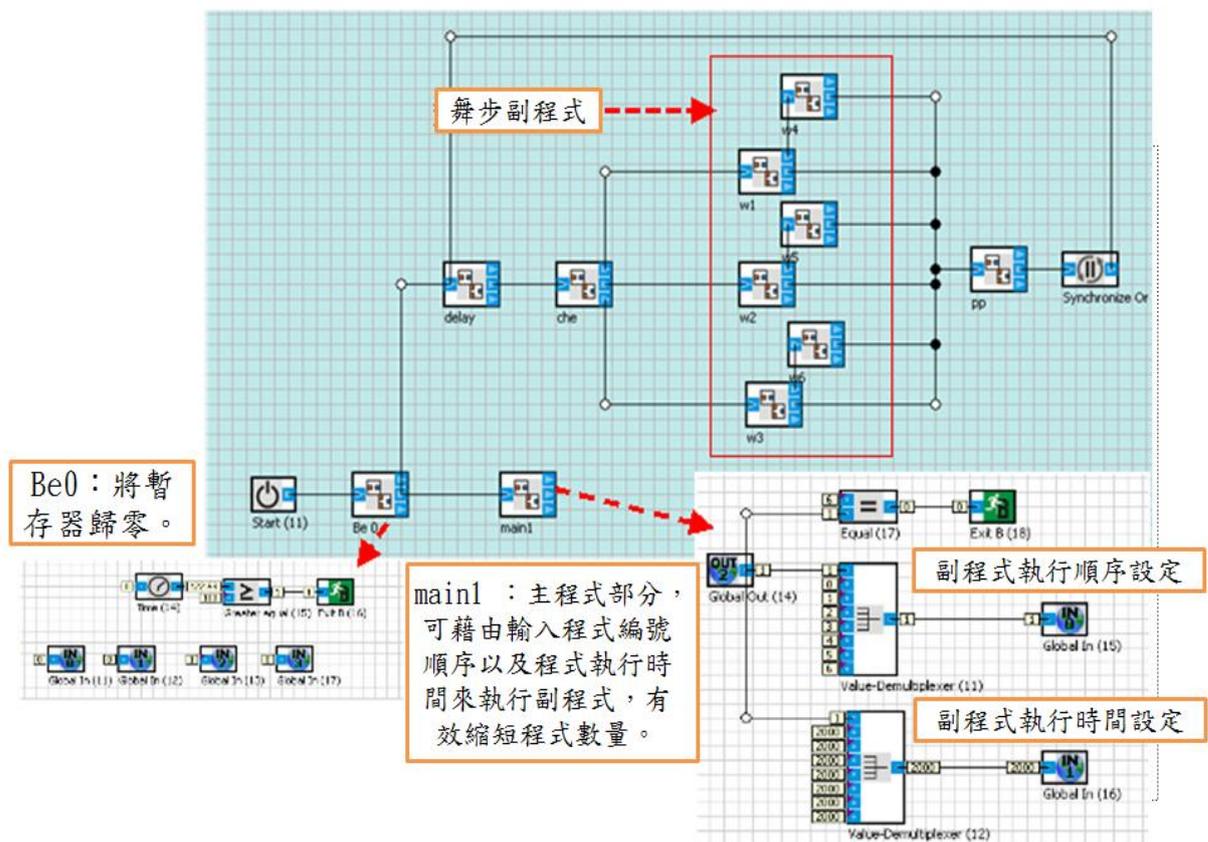


圖 5.13 副程式功能的架構圖

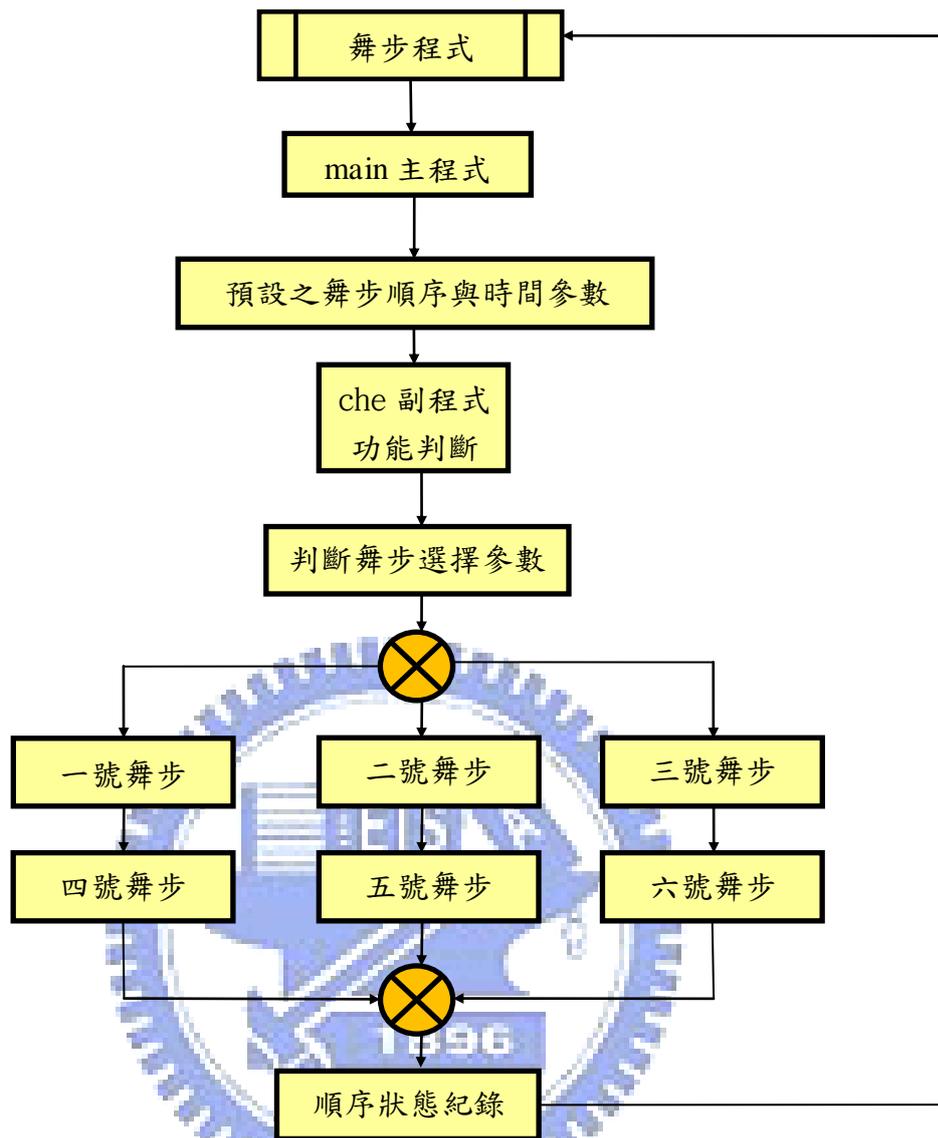


圖 5.14 副程式功能的程式流程

表 5.1 有無副程式功能之比較

功能比較	無副程式功能	有副程式功能
跳一分鐘華爾滋舞步的程式數量	15	10
跳一分鐘華爾滋舞步的程式大小	142kb	84.9kb
跳十分鐘華爾滋舞步的程式數量	101	12
跳十分鐘華爾滋舞步的程式大小	973kb	93kb
程式執行順暢度	不良	良好

## 5.5 設計 8051 電路與程式加強羅勃提諾的功能

因為羅勃提諾本身只有三個自由度，因此對華爾滋舞蹈的動作表達不明顯，所以本研究特別增加8051程式和電路與之搭配，希望藉由增加自由度讓機器人的動作更生動，如圖5.15所示為伺服馬達控制副程式的流程圖。利用脈衝寬度變調(PWM:Pulse Width Modulation)原理，以8051組合語言程式產生出不同頻寬之方波，而控制伺服機轉動到所需之角度。脈衝寬度變調電路除了可以監控功率電路的輸出狀態之外，同時還提供功率元件控制信號，因此廣泛應用各種高功率電路。

目前已經將8051電路板測試完成，可以用Robotino View透過8051電路來控制至少三顆以上之伺服馬達，增加跳舞過程中上半身的動作，讓舞步有更多元的變化性，圖5.16為伺服馬達裝於機器人手部之實驗動作圖，依照機器人本身前後左右之移動可以搭配不同手部的動作，讓華爾滋舞步的感覺更明顯。單晶片8051能幫助羅勃提諾做更多種類的控制或是更複雜的訊號處理，也許是感測器的輸入訊號分析，或是各種致動器的控制等等，希望可以補足羅勃提諾軟體與硬體功能缺乏的部分。

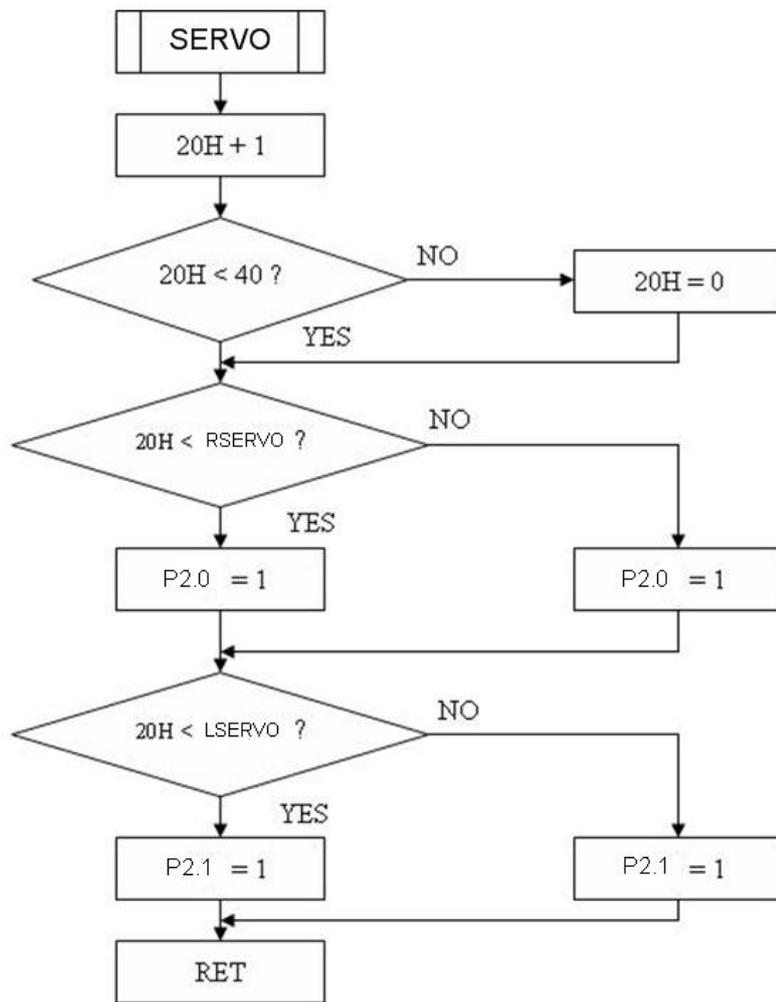


圖 5.15 伺服馬達控制副程式流程圖 [23]



圖 5.16 伺服馬達裝於機器人手部之實驗動作圖

## 第六章 結論與未來研究方向

### 6.1 結論

本研究採用全方位移動平台發展跳舞機器人，除了希望機器人本身要有教學功能外，還能達到伴舞的功能，利用感測器判斷舞伴的步伐大小做舞步的修正與調整，證實具有可行的成效。本研究使用 CIDM 實驗室自行開發之智能型舞伴機器人 NCiDPR09[6]，希望能讓機器人與人類一起跳華爾滋，經過實驗與分析的結果，得到下列結論：

- (1) 利用全向輪在同一平面上可以任意方向移動之特性，過程中首先要研究機器人各輪的控制軌跡程式，使用機器人學裡座標轉換的方式輔助，把直線、水平與旋轉運動組合在一起，經過全向輪運動方程式轉換為三個馬達的角速度後，與特定的時間搭配，使全向平台達到一般平台無法做到的特殊軌跡，並設計出四種代表性的華爾滋舞步，此時為開迴路的控制，存在著很大的誤差。
- (2) 為了解決此誤差，利用 1. 馬達回饋訊號修正輸入訊號，即時調整馬達速度，使馬達之真實速度接近設定的速度，2. 積分法計算位移量，利用回饋訊號轉換為速度後對時間積分得到移動距離，讓機器人確定走到設定的距離才停止，3. 改變 PID 控制調整速度曲線等方法逐漸減少位移誤差，實驗後發現方法 2 與方法 3 一起使用時，誤差值會最小，利用調整

後的標準舞步參數建成資料庫，便可達到標準華爾滋舞步的教學功能，並可對舞伴舞步的好壞做出評分，經由本章的研究成果可知，經過適當控制參數誤差校正與程式的發展，全方向移動平台將可應用到許多需要人機互動與靈巧動作的實際工作項目，能具體發揮可行的成效。

- (3) 本論文也研究當跳舞機器人的功能為伴舞的時候，機器人可以是沒有任何預設舞步的，此時配合紅外線感測器的使用，可以感測機器人本身與舞伴的距離，利用程式分析處理舞者舞步位置的資料，及速度方程式等參數的適當調校，能使機器人與人類保持適當距離而不碰撞，讓機器人協調性提高，此外，機器人能對周遭環境狀態的感應認知能力加強與快速化，實際可以達到配合人類跳舞或互動工作的目標。
- (4) 跳舞過程中人類可能會有舞步大小的不同，讓機器人藉由感測器能有效地即時判斷距離，經由本實驗室研發的舞步分析方法可以有效地判斷舞步大小，給與適當的學習參數，經由幾次學習之後，機器人能更協調搭配舞伴的舞步大小。
- (5) 實際跳舞的過程中有機會碰到阻礙物，可能是一起跳舞的人或是周圍環境的牆壁，本研究讓機器人能有效的即時判斷這些物體並即時進行閃避，立即適當的回應調整舞步，可以更有效的執行伴舞的角色。本研究成果將可應用於其他有關人機互動為基礎的各種不同機器人工作的控制系統。

(6) 利用程式邏輯設計出副程式架構的新功能，有效減少舞步程式數量，使跳舞過程更為順暢。

(7) 設計8051電路與程式加強羅勃提諾的功能，利用脈衝寬度變調原理以程式產生出不同頻寬之方波，進而控制伺服機轉動，安裝在機器人上，增加機器人上半身的自由度讓跳舞過程更為生動，使機器人能有效應用在不同的場合。



## 6.2 未來研究方向

目前已初步完成智能型舞伴機器人舞步規劃系統之功能的程式模組，本實驗室未來仍有許多將持續進行的研究方向，茲簡述說明。

- (1) 適度提升智能型舞伴機器人的自由度，以提供更多種類舞步設計時的彈性選擇，藉由本論文華爾滋舞步設計為基礎，進階發展能跳各種舞步的機器人。
- (2) 研究舞步配合音樂的問題，可大約分為三個方向：
  - a. 解讀舞曲：機器人上裝一顆能辨識聲音的感測器，能夠自行判斷舞曲的時間點與節奏。
  - b. 數位舞曲：舞曲與程式在同一台電腦，利用程式舞步與舞曲同步執行來彼此配合。
  - c. 舞伴調整：以本論文所完成的部分接下去研究分析更細微的舞者本身的正確節奏，來調整機器人的舞步。
- (3) 將本論文之人與機器人互動成果，延伸推廣應用於其他有關人機互動為基礎的各種不同機器人工作之控制系統。
- (4) 為了加強智慧型舞步分析方法，將來也許可以使用類神經、ANFIS、基因法等方法增加機器人之學習智能。

## 參考文獻

- [1] K. Kosuge, T. Hayashi, Y. Hirata and R. Tobiyama, “Dance Partner Robot -Ms Dance R ”, In IEEE/VRSI Las Vegas, Nevada. October 2003
- [2] T. Takeda, K. Kosuge and Y. Hirata, ”HMM-based Dance Step Estimation for Dance Partner Robot -MS Dance R”, PREST, Japan Science and Technology Agency (JST),2005
- [3] Y. Sakai, T. Takeda, Y. Hirata and K. Kosuge, “Collision Avoidance based on Estimated Step of Other Dance Couples for Male-type Dance Partner Robot” , IEEE/RSJ, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007
- [4] 王國賓，「兼具平移與旋轉的舞台-全向平台」，機器人世界情報網， 2007
- [5] 韓孟儒、李彥慶、陳豪宇，「具升降式攝影機之移動平台技術報告」，電腦視覺監控產學研聯盟經濟部學界專科，以視覺為基礎之智慧型環境的建構四年計畫， 交大電控所、交大資工所，2005
- [6] 鄭璧瑩，「智能型舞伴機器人系統之研究與實作備忘錄 2008-2009」，交通大學 CIDM Lab， 2009。
- [7] T. Takeda, Y. Hirata, Z. Wang and K. Kosuge, ” HMM-based Error Detection of Dance Step ”, Selection for Dance Partner Robot -MS Dance R”, Beijing, China, IEEE/RSJ, October 9 - 15, 2006
- [8] 許博爾，「遠端臨場機器人之 OMNI 行走平台組裝與測試」，元智大學，2007

- [9] T. Takeda, Y. Hirata and K. Kosuge, “Dance Partner Robot Cooperative Motion Generation with Adjustable Length of Dance Step Stride based on Physical Interaction” , IEEE/RSJ, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007
- [10] T. Takeda, Y. Hirata and K. Kosuge, “Dance Step Estimation Method Based on HMM for Dance Partner Robot”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 2, APRIL 2007
- [11] T. Takeda, Y. Hirata and K. Kosuge, “HMM-based Error Recovery of Dance Step Selection for Dance Partner Robot ” ,IEEE, Roma, Italy, 10-14 April 2007
- [12] Z. Liu, Y. Koike, T. Takeda, Y. Hirata, K. Chen and K. Kosuge, “Development of A Passive Type Dance Partner Robot” , IEEE/ASME, Xi'an, China, July 2 - 5, 2008
- [13] C. Grand, “Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot” , University Pierre et Marie Curie, CNRS FRE2507, 2004
- [14] K. Byun, S. Kim, J. Song, ” Design of a Four-wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Variable Wheel Arrangement Mechanism” , Department of Mechanical Engineering, Korea University, Anam-dong Sungbuk-gu, Seoul, 136-701, May 2002
- [15] X. Li ,A. Zell, ” Motion control of an omni directional mobile robot ” , Wilhelm-Schickard-Institute, Department of Computer Architecture, University of Tübingen, 72076 Tübingen, Germany,2007
- [16] 蘇耘德·王國賓，「人型與輪型機器人核心技術」，工業技術研究院，2007
- [17] K. Jo , J. Lee ,”Multi-robot Cooperative Localization with Optimally Fused Information of Odometer and GPS” , Mechatronics Group at Chungnam National University, Korea, 2007

[18] M. Hamid, A. Adom, "Navigation of Mobile Robot Using Global Positioning System (GPS) and Obstacle Avoidance System with Commanded Loop Daisy Chaining Application Method", School of Mechatronics Engineering, Perlis, Malaysia, 2009

[19] F. Cui, M. Zhang, L. Sun, "Design of GPS/MM/GPRS Integrated Location System for the Mobile Robot", School of Mechanical Engineering Hebei University of Technology, Tianjin, China, June 2009

[20] H. Choi, O. Park, H. Kim, "Autonomous Mobile Robot Using GPS", International Conference on Control and Automation, June 2005

[21] H. Chang, J. Choi, M. Kim, "Probabilistic Localization of Service Robot by Sensor Fusion", Intelligent Robotics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea, SICE-ICASE International Joint Conference, Oct 2006

[22] [http://dance.sb.clara.tw/ehiang/waltz\\_c.htm](http://dance.sb.clara.tw/ehiang/waltz_c.htm)

[23] 陳天輪、黃仲緣, 「2006 義隆盃微控制器應用暨人工智慧製作競賽」, 台北科技大學, 2006

