

31. 可彈奏鍵盤音樂機械人

林鈞昌副教授¹、黃信行副教授¹、戴任詔副教授¹、劉禮維黎燕芳 副教授²

¹明新科技大學 機械工程系

²明新科技大學 電機工程系

摘要

近年來，服務娛樂型機器人成長潛力被大多數的機器人研究與市場機構所看好，有別於工業機器人市場的成長趨緩。為順應時代潮流與脈動，考量製造成本及市場需求量，教育、休閒、娛樂型機器人將是未來廠商投資之首選。本文主要研究為發展電子琴演奏機器人，讓電子琴演奏機器人可以依照音符與節奏來控制線性馬達與氣壓元件，帶動機械手指機構至適當位置來壓觸琴鍵產生音樂。將電子琴演奏機器人以擬人化方式彈奏電子琴。利用工業所使用元件，進而達到娛樂型機器人之目的，了解機械不只帶給人類工業上的用途，也可帶給人類教育、休閒、娛樂上的滿足，期望藉此研究對娛樂型音樂演奏機器人之發展，有所貢獻。

關鍵字：RFID、接收訊號強度、灰預測法、導航系統

一、前言

研究機器人之風氣近年來日漸普遍，國內外各類型機器人產品不斷出現在各媒體上，應用領域從教育娛樂、醫療照護到居家服務等等，可看出機器人應用範疇之研究早已走出工廠，進入與我們息息相關日常生活及各種領域中。

本世紀以來人口分佈逐老年化，加上開發中國家出生率的逐年降低，高齡化的社會及可創造生產力的老中輕之人口結構產生極劇變化，可以預知未來世界想像的機器人時代，將會順應這股趨勢，迅速的在人類科技世界中逐漸展開與實現。服務娛樂型機器人的成長潛力被大多數的機器人研究與市場機構所看好，有別於工業機器人市場的成長趨緩。為順應時代潮流與脈動，考量製造成本及市場需求量，教育、休閒、娛樂型機器人將是未來廠商投資之首選。本研究決定針對娛樂型的鍵盤樂器演奏機械人進行研發。

鍵盤樂器包含大鍵琴、風琴、鋼琴與電子琴等，都是以手指敲擊琴鍵，使其發出特定頻率的樂音。鍵盤樂器適於獨奏或伴奏，廣受大眾喜愛，隨著我國生活水準提升，鋼琴與電子琴已成為許多家庭鼓勵孩子學習的重要樂器。有鑑於鍵盤樂器的普及性，同時考量機械人科技技術的進步性，本計畫擬發展能演奏鍵盤樂器的機械人。各國已發展出許多音樂演奏機器人，日本Toyota Motor Corporation

(TMC)[1]在2004年為了日本2005愛知世界博覽會，開發出Partner Robot伙伴機器人，所設計Partner Robot，專攻樂器演奏等手部動作；第一代可吹奏小號喇叭，以達到寓教於樂的效果。在2007年12月所發表的新型Partner Robot [2]，運用了precise control和coordination技術來強化手掌和手臂的靈活度，更增加了拉小提琴的功能。日本早稻田大學，在1984年發表了WABOT-2 [3]，為一台能夠按音樂標準演奏管風琴的機器人。隔年又發表了WASUBOT [4]，增加了看樂譜的功能並能彈奏16種曲調的鍵盤樂器，其他還有許多音樂機器人研究，如吉他、長笛、鼓、小號等等[5-10]。以上種種的音樂機械人，雖然都可創造出不同的音樂，但都僅限於機械手指動作，或是小行程的音域作演奏，使用樂器皆局限於機構，無法發揮樂器所有音域，此次彈奏鍵盤音樂機械人發展，希望有別於其他鍵盤樂器機械人，成為彈奏更快速，並且不受機構所限制之音樂機器人，希望能充分發揮本校已有的機械人設計能力，發展出具備市場潛力的產品。

本計畫發展之電子琴演奏機器人，希望演奏機器人以擬人化方式彈奏電子琴，利用線性馬達及氣壓缸，進而控制演奏機器人機構，機器人機電系統是利用基於電腦之控制器所組成，利用兩組驅動板之線性馬達來帶動兩支手掌，手掌上各有5個手指頭，每一手指頭有一關節機構與手指機構，由氣壓元件控制，系統使用FPGA控制器來控制氣壓元件及線性馬達。每個音符使用4個階段讓機器人按觸琴鍵，分別為移動手掌、按下手指、壓住手指與放開手指。系統接收到音符節奏資訊後，會依據音符資訊決定下一個目標位置來彈奏音樂，圖1為擬人化方式製成之音樂機器人。

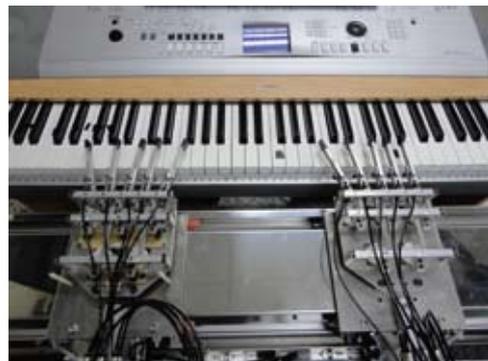


圖1 音樂機械人整體圖

二、整體系統架構

此整體系統架構由電腦給予命令，經由FPGA控制器控制線性馬達作動。線性馬達移動由電腦給與命令傳送至FPGA控制器，由FPGA判別位置後，將PWM訊號傳送至驅動器，驅動器促使線性馬達作動，並且由Encoder作位置回授，達到線性馬達位置移動控制。機械手指動作由電腦給與命令傳送至SSR，SSR接收電腦訊號，輸入DC訊號，輸出AC 110V，使電磁閥激磁，氣壓缸使其作動，即可達到機械手指按下，圖2為整體控制系統方塊圖。

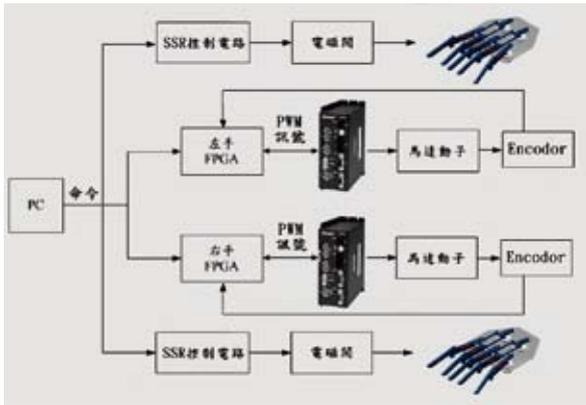


圖2 整體控制系統方塊圖

三、電子琴演奏機器人設計概念

3.1 機械手指與鍵盤之位置關係、移動順序

機械手在不改變手指旋轉情況下，手指可以彈奏的鍵盤範圍無法涵蓋所有琴鍵，如果要彈奏所有琴鍵，必須先移動機械手位置至適當位置，再利用手指彈奏琴鍵，鋼琴音樂家彈奏時，會將一定數量的連續音符當成樂句，決定機械手移動的位置，並決定手指壓按方式；如圖3示，以主旋律右手為例，大拇指(R1)放於D4，食指(R2)放於E4，...，小指(R5)放於A4，若配合樂句的變化，可以移動手往右，讓大拇指(R1)可以放於E4，食指(R2)放於F4，...，小指(R5)放於B4，反之也可以往左移位，如此，可讓手指可以最有效率方式壓按琴鍵。

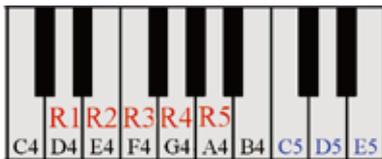


圖3 右手手指與鍵盤關係位置圖

此設計構想為右手主旋律之移動順序，如圖4示，於鋼琴上設定一範圍，為機械手可彈奏之音域，設定可移動位置為音階C5至E6，共14個位置，彈奏音階可彈奏14個音，大部份樂曲適用於此音階

內彈奏，此構想優點在於機械手彈奏鋼琴音階移動上更快速準確及廣泛，使程式編曲更簡易。

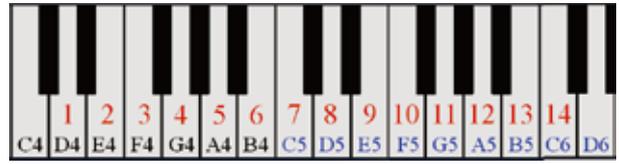


圖4 右手手掌移動位置圖

左手部分作為伴奏，手指放置為和弦指法，如圖5示，小拇指(L1)放於A1，無名指(L2)放於C2，中指(L3)放於E2，食指(L4)放於A2，大拇指(L5)放於C3，若配合和弦的變化，可移動機械手至不同位置，如圖6示，左手和弦將有14個位置，依照樂譜所需使用和弦，設定機械人彈奏和弦音階，即可成為伴奏。

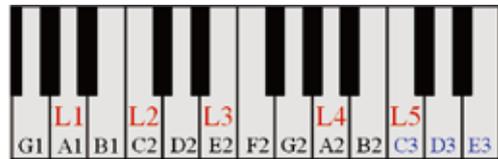


圖5 手指與鍵盤關係位置圖

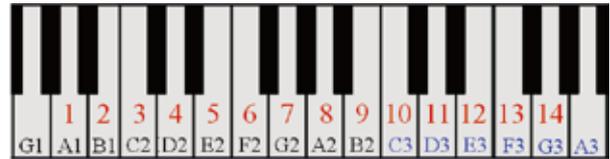


圖6 左手手掌移動位置圖

3.2 機械手指動作流程

機械手部移動速度的因素甚多，目前首先排除重量一因素，在計算速度之前，首先必須了解彈琴的流程，彈琴的動作都必須花費時間，從機械手部的定位開始，手指按下琴鍵，琴鍵按的時間長短，手指向上放開琴鍵，機械手部移動至下一琴鍵，都必須花費時間，這些都是計算機械手部移動之因素。每一音符使用4個階段讓機器人按處琴鍵，分別為移動手掌、按下手指、壓住手指與放開手指，4個階段所需時間必須符合節奏要求，如圖7所示。控制系統接收到音符節奏後，會依據音符資訊決定下一個目標位置，並依據節奏資訊計算4個階段所需時間，來演奏音樂，為了讓機械手指能流暢彈奏電子琴，將會以樂句形式來解析音符，讓電子琴演奏機器人能以擬人化方式彈奏電子琴。

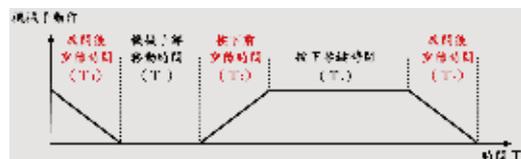


圖7 機械手彈奏步驟

四、電子琴演奏機器人機構設計

4.1 機械手指設計概念

鍵盤音樂機械人演奏時利用線性馬達控制手掌橫移，手掌支架上裝置五支機械手指機構，機械手指利用線控機構來控制手指按下，使電子琴發出旋律。圖8為機械人按鍵系統示意圖。

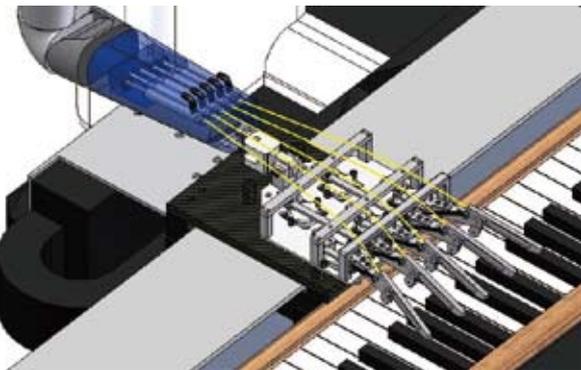


圖8 機械人按鍵系統示意圖

4.2 單支手指設計機構

此單支手指機構設計利用氣壓缸帶動鋼線，鋼線連接至機械手指，如圖9所示，於氣壓缸作動時，可使手指前端按壓鋼琴，將彈簧裝至機構關節，當氣壓缸沒有作動時，彈簧可自動將手指拉回，利用機構方式減少馬達的使用，也具有緩衝之效能，較不會對鋼琴鍵盤施加多於壓力，導致鍵盤壞損，於關節上有小橡皮用來吸震，降低噪音的產生。

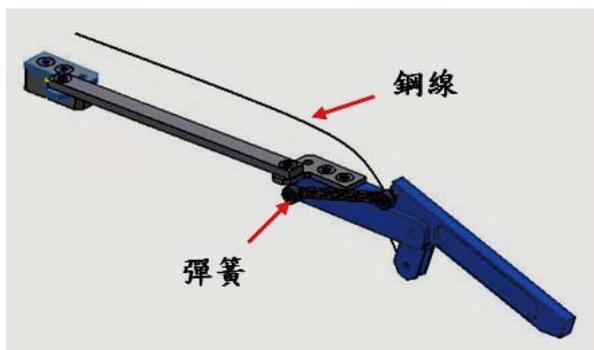
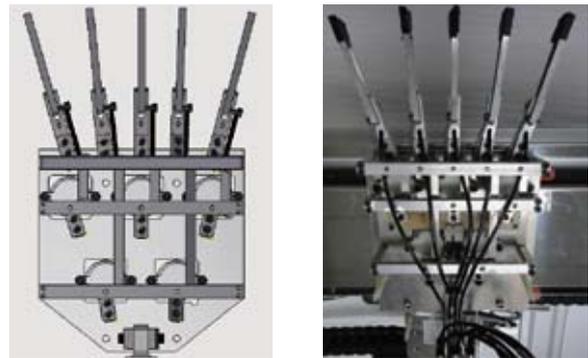


圖9 單支手指機構示意圖

4.3 機械手掌設計機構

機械手掌設計概念，希望以擬人化的形式展出，因此機器人手指排列方式依照真人手掌擺放，並且希望手指間不會互相干涉及碰撞，因此機械手掌設計格外重要，機構設計將五支機械手指固定至機械手部底板，以電腦繪圖模擬方式查看機構是否會互相干涉，如圖10(a)所示，機械手部實際安裝後如電腦繪圖相同，無互相干涉及碰撞發生，如圖10(b)所示，機械手掌若完全張開，單一手掌最遠可橫跨10個白鍵。



(a)電腦模擬機械手機構 (b)實際機械手機構

圖10 機械手掌機構示意圖

4.4 氣壓缸設計概念

此次的鋼琴機器人手指作動，是利用氣壓缸帶動鋼線，並且鋼線連接至機械手指，氣壓缸作動時，促使手指前端按壓鋼琴。此機構設計為機械人手部機構之優點，帶動方式使用氣壓缸及連桿機構帶動，並且將氣壓缸設計至機械人手臂內，手部機構相對簡單、不複雜，如圖11(a)、11(b)所示。



(a)電腦模擬機械手氣壓機構 (b)實際機械手氣壓機構

圖11 手臂與氣壓缸設計示意圖

4.5 線性馬達選用

此次計畫開發鍵盤音樂機械人，在需要以快速且精準的演奏前提下，移動機械手部之機具是相當重要的，選擇線性馬達的原因可由以下敘述得知。線性馬達較滾珠導桿，加減速約可提高10~20倍，速度提高3~4倍，且因線性馬達毫無背隙。此次鍵盤音樂機械人開發所需求之速度及精度，線性馬達皆符合其需求，線性馬達故作為此次鍵盤音樂機械人開發之移動機具。

此計劃使用為大銀股份有限公司所生產之LMX1E-C線性馬達平台，採用無鐵心式馬達，適用於高速以及多軸同步運動的應用。體積小為主要特色，位置回饋使用增量式類比或數位光學尺，LMX1E-C平台具有極佳的動態特性以及長度可達4000mm，最大加速度可達100m/s²，最大速度可達5m/s，是符合於本計劃之線性馬達，如圖12所示。

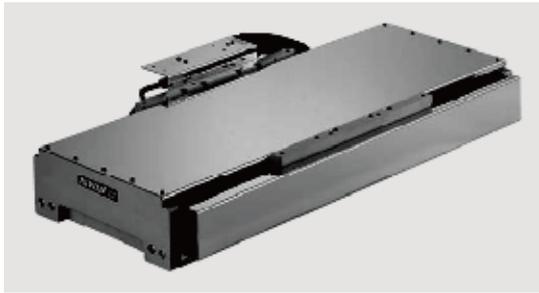


圖12 LMX1E-C線性馬達

五、電子琴演奏機器人機電系統設計

5.1 機電系統硬體選用

(i) FPGA實驗板

實驗板使用的FPGA為Altera Cyclone II EP2C20F484C8的晶片，規格如表1。Altera Cyclone II元件採用台積電 (TSMC) 90nm低K介電質製程的300mm晶圓製造。可編程邏輯，並具有諸多的先進特性，如用於高性能數位信號處理 (DSP) 應用的嵌入式18×18乘法法和支援如DDR2 (高達334Mbps) 和QDR II (高達668Mbps) 的記憶體介面。

表1 EP2C20F484C8規格

Feature	EP2C20
LEs	18,752
M4K RAM Blocks	52
Total RAM Bits	239,616
Embedded 18x18 Multipliers	26
PPLs	4
Maximum User I/O Pins	315

FPGA實驗板其他資源如下：

1. SDRAM：兩片8MB K4S641632 SDRAM晶片組成32位元共16M BYTE容量。
2. SRAM：兩片512KB的IS61LV25616AL SRAM晶片組成32位元共1M BYTE容量。
3. Flash：8M BYTE 16位JS28F640 FLASH。
4. 配製晶片：EPCS4。
5. 提供配置模式：JTAG和AS。此外配置針腳引出，可設計使用CPLD+Flash的配置模式。
6. 50M Hz的震盪器。
7. 4個LED、一個RESET按鍵。
8. 剩餘I/O以及Avalon匯流排、配置透過3排針腳引出，可靈活使用。
9. (ii) 介面卡選用
10. 為了方便執行系統控制，本計畫採用FPGA及PC介面卡。其優點在於具備更大的彈

性，便於控制機械人進行演奏。本計畫採用的介面卡為PCI-1753 96-ch Digital I/O PCI Card。

5.2 機電控制系統設計

(i) 資料擷取與傳送

機電控制由電腦輸出15bits資料，透過FPGA擷取，再將命令下達給線性馬達。

線性馬達：

- (a) 控制器設計，其包含位置控制器、速度控制器。
- (b) 光學尺位置運算，透過A、B及Z三相訊號計算出馬達位置。
- (c) 緊急停止設計，防止馬達衝撞平台造成設備損壞。

(ii) 資料傳送流程

機電控制系統資料傳送如圖14所示，系統說明如下。

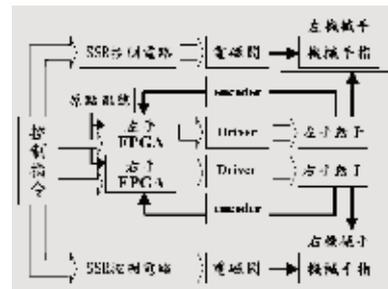


圖14 機電控制系統傳送流程

如圖14所示，為資料傳送流程圖，PC電腦透過資料介面卡將電腦命令輸出，15 bits的資料輸出，其中5 bits為線性馬達位置代碼，分別傳送至左手FPGA及右手FPGA，而剩下10 bits 為手指擊鍵命令，傳送至SSR控制電路。4 bits訊號輸入至左右手FPGA，訊號分別包含啟動命令訊號、歸零命令訊號、左極限歸零觸發訊號及右極限歸零觸發訊號。FPGA與驅動電路間，FPGA經內部程式計算出1 bit的控制線性馬達之PWM訊號輸出至驅動電路，以及3 bits經驅動電路濾波後的u、v、w 線性馬達encoder訊號回傳至FPGA計算位置。線性馬達驅動器共26 bits的資料傳輸。26 bits傳送與驅動電路連接，依驅動器的規格，26 bits非全部功能皆使用，只使用驅動器內的線性馬達訊號(u、 \bar{u} 、v、 \bar{v} 、w、 \bar{w})及PWM控制信號端。SSR電路接收電腦輸出的手指擊鍵命令，SSR輸入DC 5伏特訊號，輸出AC 110伏特，可使電磁閥激磁動作。

(iii) 控制系統編碼設定

線性馬達及氣壓缸編碼如表2所示，線性馬達位置代碼設定，bit 5 為設定左手位置資料或是右手位置資料。Bit 5作為左右手位置資料設定外，也當作資料更新的位準。剩下的bit 4~bit 1 可定義出14個位置。

表2 線性馬達命令資料表

線性馬達				
Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1
0	左手			
1	右手			
位置代碼				

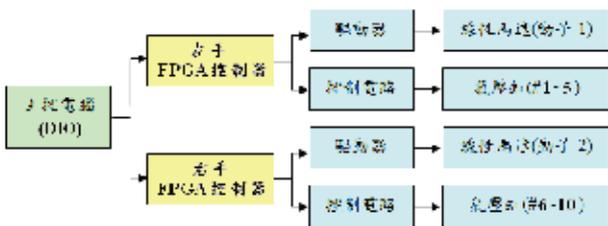
SSR擊鍵命令設定，電腦輸出使用15 bits訊號，5 bits訊號為線性馬達位置訊號，而剩下的10 bits控制10支指頭，當電腦輸出對應的按鍵命令為1(5 伏特)表示擊鍵，輸出為0(0伏特)表示不擊鍵，如表3所示。

表3 SSR命令資料表

SSR				
Bit15	Bit14	Bit13	Bit12	Bit11
指R1	指R2	指R3	指R4	指R5
Bit10	Bit9	Bit8	Bit7	Bit6
指L1	指L2	指L3	指L4	指L5
0：不擊鍵 1：擊鍵				

(vi)控制系統設計

本機械人系統整合多組機構、線性馬達與氣壓缸等元件，必須建立良好的控制系統，方能確保其正常運作。本研究建立的硬體控制架構如圖15所示，以一台主控電腦同時控制左手及右手，分別透過介面卡聯絡遠端模組，以控制線性馬達及氣壓缸的運動。在遠端模組的選用上，本採用自行設計的VHDL程式，將各項運動元件的控制命令燒錄於FPGA晶片中，並製作編碼表，由主控電腦依據編碼格式撰寫順序控制指令，再藉由數位介面傳送到FPGA模



組執行控制工作。如此，將可有效節省主電腦的資源，更有利於達到即時控制的功效。

圖15 控制系統硬體架構

接著，在軟體的發展上，本研究以Delphi語言建立介面控制程式。撰寫控制程式前必須先選定樂曲並分析樂譜，依據曲風決定節奏速度，再依序由音符與節拍決定按鍵的位置與作用時間。由於FPGA已內建位置的指令，因此存檔的格式僅需依據事先約定的編碼方式排定順序控制的指令。如圖16所示，即為樂曲資訊建立的流程。

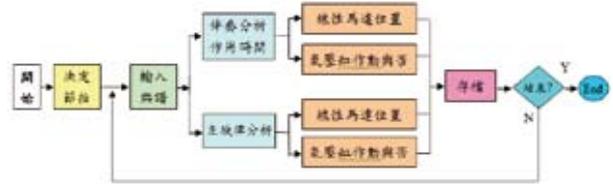


圖16 樂曲資訊建立

為減少研究執行的困難度，本系統目前僅能彈奏爵士類的音樂。因此，本機械人的左手負責彈奏伴奏用的和弦，包括大三和弦的C、D、E、F、G、A、B，及小三和弦的Cm、Dm、Em、Fm、Gm、Am、Bm。由於單一手掌最遠可橫跨10個白鍵，因此，凡是爵士樂中常用的伴奏，例如8 Beat 的8度加10度分解，可輕易地以左手完成彈奏的指令。相對於左手的伴奏，本機械人的右手負責彈奏主旋律，可依照樂曲的難度決定手掌與手指的相對位置。茲以知名的樂曲「月亮代表我的心」為例，如圖17所示，說明順序控制指令的撰寫。



圖17 樂譜：月亮代表我的心

如樂譜所示，樂曲的節奏為60（每分鐘為60拍），故可設定每一拍為一秒鐘。另分析全曲中最小的節拍為1/4拍，故可決定1/4秒為每一個順序動作的間隔。依照此一原則，可將圖17紅色方框內的音符撰寫為如表4控制指令，並依序儲存於檔案中。為了避免因機構延遲而造成樂音中斷的現象，亦可改變順序動作的間隔時間，藉由微調的方式，改善彈奏的效果。

表4 控制指令

線性馬達動子一(右手)				
指R1	指R2	指R3	指R4	指R5
0	0	0	1	0
線性馬達動子一(左手)				
指L1	指L2	指L3	指L4	指L5
1	0	0	0	0

主控電腦內的程式流程如圖18所示，除了要能控制機械手的歸零動作與移動到起始位置外，當演奏開始時，必須要能依序讀入演奏資訊，並分別傳送到兩個FPGA以進行順序控制。

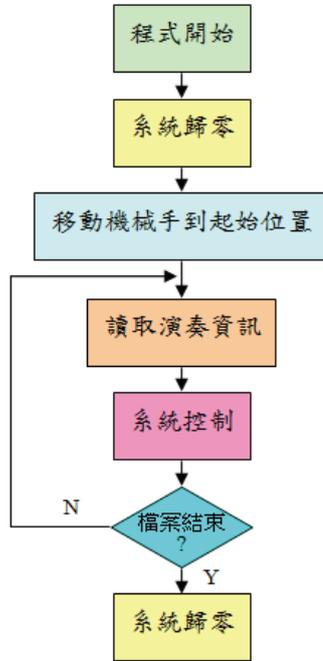


圖18 控制軟體流程方塊圖

目前本計劃可彈奏鍵盤音樂機械人能夠成功彈奏的曲目如表5所示：

表5 演奏曲目

曲目1	月亮代表我的心
曲目2	梁祝
曲目3	但願人長久
曲目4	羅密歐與茱麗葉
曲目5	背叛

六、結論與未來展望

在此次彈奏鍵盤音樂機械人發展中，我們成功應用線性馬達及氣壓缸搭配機電系統，進而控制演奏機器人機構。我們利用兩組驅動板之線性馬達來帶動兩支手掌，手掌上各有5個手指頭，每一手指頭有一關節機構與手指機構，由氣壓元件控制手指按下，系統使用FPGA控制器來控制氣壓元件及線性馬達。系統接收到音符節奏資訊後，依據音符資訊決定下一個目標位置來彈奏音樂，於測試中，系統可依照指令按下琴鍵，並且能夠使機構精準定位，成功彈奏所編輯的曲目。

未來希望對於彈奏鍵盤音樂機械人作改良，在於機械手部機構，手部的前後移動彈奏方式可使擬人

化構想更完整。在未來，彈奏鍵盤音樂機器人可提供教育、休閒、娛樂等作用，並且機構可使用於其他方面，例如：工業加工等，是很好的發展方向。

參考文獻

1. See <http://www.toyota.co.jp/en/news/04/0311.html>, last visited Jun. 7 (2010).
2. See http://www.toyota.co.jp/en/news/07/1206_2.html, last visited Jun. 7 (2010).
3. S. Shigeki, O. Toshio, T. Yoshiharu, and K. Ichiro, "Autonomic limb control of the information processing Robot - movement control system of robot musician WABOT-2," in Journal of the Robotics Society, Tsukuba, Japan, 1985 JRSJ Vol.3, No.4, pp. 81-95.
4. J. Solis, K. Taniguchi, T. Ninomiya, T. Yamamoto, and A. Takanishi, "Development of Waseda flutist Robot WF-4RIV: implementation of auditory feedback system," in International Conference on Robotics and Automation, Japan, 2008, pp. 3654-3659.
5. K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi, "Humanoid robot HRP-2," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Apr. 2004, Vol. 2, pp. 1083-1090.
6. G. Weinberg, S. Driscoll "The interactive Robotic percussionist - new developments in form, mechanics, perception and interaction design," in Proceeding of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, Arlington, VA, 2007, pp. 97-104.
7. G. Weinberg, and S. Driscoll, "The design of a perceptual and improvisational Robotic marimba player," in Proc. of the 16th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication, 2007, pp. 769-774.
8. C.T. Chao, and J.S. Huang, "Implementation of an intelligent automatic guitar accompaniment System," in 3rd Intelligent Living Technology Conference, 2008, pp. 850-857.
9. See http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html, last visited Jun. 7 (2010).
10. J. Solis, M. Bergamasco, S. Isoda, K. Chida, and A. Takanishi, "Learning to play the flute with an anthropomorphic Robot," in International Computer Music Conference (ICMC), Miami, Florida, 2004.