

電動輪椅運動控制晶片之研製

Realization of a Motion Control IC for Electric Wheelchair

楊智淵 黃秉宏 龔應時

南台科技大學電機工程系

Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University

Tainan County, TAIWAN

kung@mail.stut.edu.tw

摘要

本文主要使用 ALTERA 公司所生產的可程式邏輯陣列元件(Field Programmable Gate Array, FPGA)晶片及嵌入一顆 NiosII 軟核心處理器所建構系統整合型晶片(System on a Programmable Chip, SoPC)環境為基礎來研製兩輪驅動電動輪椅控制晶片。此輪椅使用兩個直流輪圈馬達為致動器,而驅動控制晶片內以數位硬體電路實現,其功能主要執行電動輪椅之兩顆直流輪圈馬達速度控制,包含一組兩軸模糊控制器電路、兩組旋轉式光學編碼器信號偵測電路(Quadrature Encoder Pulse, QEP)及兩組脈波寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)信號輸出等。因此,電動輪椅所需之全數位驅動控制器,全部在一顆 FPGA 晶片以數位方式去實現。最後,本文設置一套實驗系統-包括以 FPGA 為基礎之實習板 DE2 (Cyclone II EP2C35F672C6)、兩組換流器、一組兩輪驅動電動輪椅平台等,並經由實驗結果以證實所提電動輪椅伺服控制晶片之有效性與正確性。

關鍵詞: FPGA 晶片, 電動輪椅, 直流輪圈馬達

Abstract

This work mainly uses an FPGA (Field Programmable Gate Array) chip, which is produced by ALTERA Corporation, and an embedded Nios II soft core processor to construct the environment of system on chip (System on a Programmable Chip, SoPC) and further to develop a motion control chip for electric wheelchair. The electric wheelchair is driven by two DC rim motors, and a proposed control chip based on FPGA technology is used to realize the function of two fuzzy controllers, two PWM (Pulse Width Modulation) generation circuits, two QEP (Quadrature Encoder Pulse) circuits and one motion trajectory computation for electric wheelchair. Except that the function of the motion trajectory computation is implemented by software using Nios II processor; others function are implemented by hardware in FPGA. The FPGA chip employed herein is Altera CycloneII EP2C35F672C6 with 33,216 logic elements (LEs), maximum 475 user I/O pins, 35 embedded multipliers, 483,840 bits of RAM, and a Nios II embedded processor. Finally, an experimental system including an DE2 experimental board with Altera FPGA CycloneII EP2C35, two inverters and an electrically operated wheelchair platform is set up to verify the effectiveness of the proposed system. In addition, some experimental results are confirmed theoretically

Keywords: FPGA, Electric wheelchair, DC rim motor

I. 前言

輪椅為一般肢障者、肌肉病變與無法自主行動者之日常生活輔具,而電動輪椅則可以讓更多嚴重患者來使用,也可以增進使用者的方便性。電動輪椅的使用已相當廣泛,已成為目前醫療復健用品中不可缺少的產品之一。隨著電動輪椅製造技術之進步,電動輪椅的方便性及功能不斷之增強,對肢障者而言,使用上則越來越便利,進而普遍被接受程度也越來越高,即使是對沒碰觸過電動輪椅的肢障者來使用,也可以快速的上手。而目前在國內、外市面上的電動輪椅必須依賴國外廠商所研發的控制器,有成本高、不易修改、微調等缺點,例如:英國的 PG Drives Technology[1]、紐西蘭的 Dynamic controller[2]...等之控制器,價格都相當昂貴,造成製造輪椅的成本大幅提高,對想使用卻無力購買的人來說則望之卻步。目前國內外學者對電動車的研究逐漸興起[3~10],其中直流馬達常用來當作電動車的致動器。但是會有重量重、體積大的缺點,也有將輪椅旁之輔助輪結合無刷馬達之特性,使之更輕巧以及方便攜帶,但是在差速時有可能造成偏心之問題。為改善此問題,本文在電動輪椅致動器部份使用直流輪圈馬達,此相較於傳統馬達,有著體積小、重量輕與扭力大的優點;而在控制器部份,本文所採用 SoPC 技術[11~13]來設計電動輪椅之運動控制器。此技術中運動軌跡計算在 NiosII 處理器以軟體方式實現,而兩軸直流輪圈馬達之速度控制器電路與電流閉迴路電路在 FPGA 內以硬體數位電路來實現。軟硬體共同設計與平行運算,不僅提高系統性能,更增加系統設計上之彈性,並且可使電動輪椅運動控制器系統以一顆 FPGA 晶片來達成。本文所提之電動輪椅伺服控制平台軟硬體架構如圖 1 所示。

II. 系統設計及規劃

本章節主要討論直流輪圈馬達機構分析、輪椅控制結構、整體流程設計及規劃,並說明在一顆 FPGA 晶片來實現整個運動控制系統。程式共分為兩部份:軟體與硬體。軟體部分主要以 NIOS 撰寫 C 語言來實現,包含兩軸速度命令、軌跡規劃、流程規劃...等功能。硬體部分主要在 FPGA 晶片以 VHDL 撰寫,包含速度迴路模糊控制器、PWM 訊號產生、光學編碼器訊號讀取、倍頻電路以及接收由搖桿控制器訊號之解碼等功能。

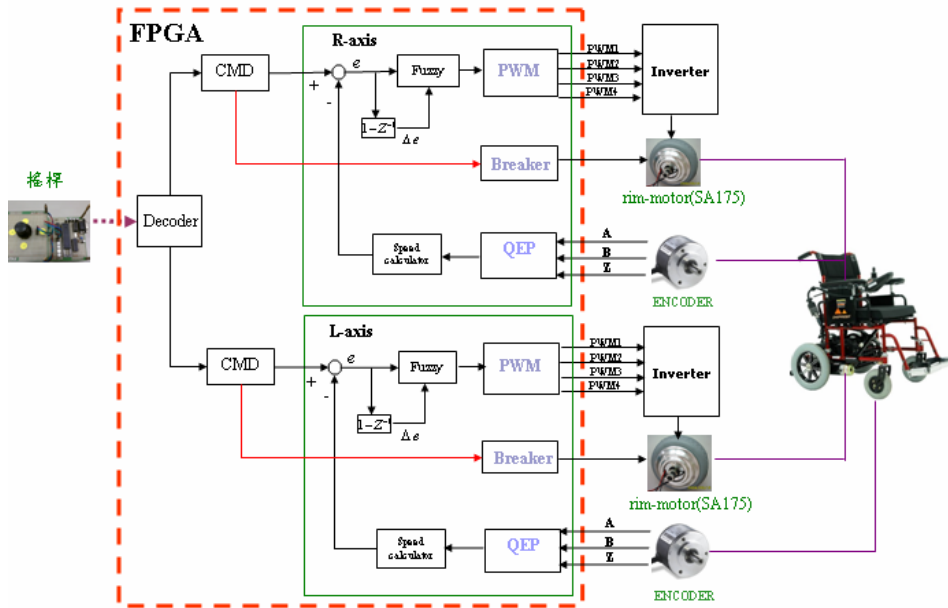


圖1. 電動輪椅伺服控制平台軟硬體架構

2.1 直流輪圈馬達與其數學模型

本文所使用的直流輪圈馬達如圖2所示, 用來驅動電動輪椅的左右軸, 此馬達相較於傳統的馬達使用於電動輪椅上, 左右輪還必須各配置一個變速箱來增加扭力, 輪圈馬達則是將馬達、減速齒輪與電磁煞車皆設置於輪內, 大幅減少體積的優點, 以及輪胎與馬達在同一平面與傳統馬達以延伸的軸心與輪子連結, 在使用時會使輪軸必須承受剪力, 勢必影響電動輪椅的壽命。

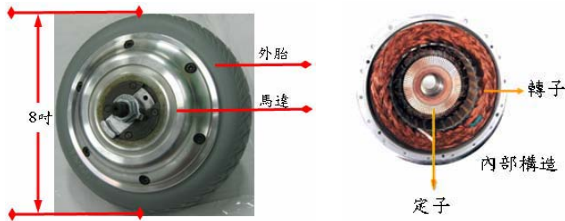


圖2. 直流輪圈馬達

電動輪椅各軸直流輪圈馬達驅動系統之數學模式如下所示,

$$L_{a_i} \frac{di_i}{dt} + R_{a_i} i_i = v_i - K_{b_i} \dot{q}_{M_i} \quad (1)$$

$$\tau_{M_i} = K_{M_i} i_i \quad (2)$$

$$J_{M_i} \ddot{q}_{M_i} + B_{M_i} \dot{q}_{M_i} = \tau_{M_i} - \tau_{L_i} \quad (3)$$

其中 L_{a_i} 、 R_{a_i} 、 i_i 、 v_i 、 K_{b_i} 、 K_{M_i} 各自為左、右輪直流輪圈馬達之電感值、電阻值、電流值、電壓值、電壓常數與電流常數, 而 J_{M_i} 、 B_{M_i} 為各輪直流輪圈馬達之慣性矩與阻尼值, 且 τ_{M_i} 、 τ_{L_i} 為各輪直流輪圈馬達產生之轉矩與輪圈馬達承受之負載轉矩。假設各輪圈馬達之電感值相對小而可忽略, 再加上各輪摩擦阻力 F_i 及將輪圈馬達承受之負載轉矩轉換成各輪對外界之負載轉矩, 也就是 $\tau_{L_i} = r_i \tau_i$, 其中 r_i 為各輪減速齒輪之齒數比, 則(1)~(3)式可整理並簡化成(4)式:

$$J_{M_i} \ddot{q}_{M_i} + (B_{M_i} + \frac{K_{M_i} K_{b_i}}{R_{a_i}}) \dot{q}_{M_i} + F_{M_i} + r_i \tau_i = \frac{K_{M_i}}{R_{a_i}} v_i \quad (4)$$

2.2 模糊控制器

本文所使用之模糊控制器其精神是依照專家的經驗建立語言控制規則, 再透過模糊推論, 把語言規則轉化為各種模糊控制表之依據來設計如圖3。本模糊控制器共分為下列四部份如圖4, 由控制者以控制面板所下達的命令到 FPGA, 經過模糊控制器之後的輸出, 即為所需之控制力:

- 模糊化介面(Fuzzification Interface, FI)。
- 規則庫(Rule Base)。
- 決策推論(Inference Engine)。
- 解模糊化介面(Defuzzification Interface, DFI)。

在輪圈馬達速度迴路之控制器採用上述之模糊控制器如圖3所示。圖1中, 速度命令 ω_r^* 與受控體輸出 ω_r 之誤差 e 與誤差變化量 Δe 輸入模糊控制器, 經過模糊化、推論機制、解模糊化後輸出 u_f , 再經由積分器, 即可得到電流迴路之命令 i_q^* , 而模糊化介面, 本文所採用的是三角歸屬函數。

$$\xi_m(x_i, \bar{x}_i^m, w_i^m) = \begin{cases} 0 & x_i \leq \bar{x}_i^m - w_i^m / 2 \\ \frac{x_i - \bar{x}_i^m + w_i^m / 2}{w_i^m / 2} & \bar{x}_i^m - \frac{w_i^m}{2} < x_i < \bar{x}_i^m \\ \frac{\bar{x}_i^m + w_i^m / 2 - x_i}{w_i^m / 2} & \bar{x}_i^m < x_i < \bar{x}_i^m + \frac{w_i^m}{2} \\ 0 & x_i \geq \bar{x}_i^m + \frac{w_i^m}{2} \end{cases} \quad (5)$$

其中 x_i 為輸入值, $\xi_m(\bullet)$ 為輸出值, \bar{x}_i^m 、 w_i^m 為三角函數之中心值及寬度。歸屬函數代表一個模糊集合, 而模糊集合又可以對應到人類的語言中所包含的不確定的概念, 本文中所採用語言變數共有7個, 分別為: PL: 代表正的大值。PM: 代表正的中值。PS: 代表正的小值。ZE: 代表接近零。NS: 代表負的小值。NM: 代表負的中值。NL: 代表正的大值。在解模糊化介面所使用的為加權平均法, 計算公式如下:

$$u_f(x|\theta) = \frac{\sum_{m=1}^M c_m [\prod_{i=1}^2 \xi_m(x_i, \bar{x}_i^m, w_i^m)]}{\sum_{m=1}^M [\prod_{i=1}^2 \xi_m(x_i, \bar{x}_i^m, w_i^m)]} \triangleq \frac{\sum_{m=1}^M c_m \mu_m}{\sum_{m=1}^M \mu_m} \quad (6)$$

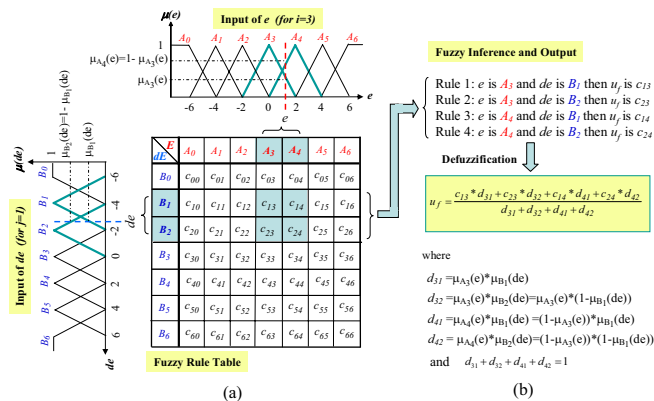


圖 3. 模糊控制器之設計

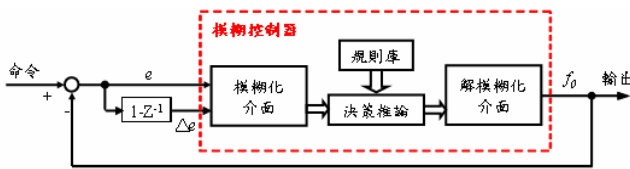


圖 4. 模糊控制器之方塊圖

III. 電動輪椅控制晶片設計

本文所提出之 FPGA 為基礎電動輪椅運動控制晶片內部電路方塊如圖 5 所示。雙車輪的速度控制 IP 內包括模糊控制器電路、方型波編碼器脈波電路、電流控制電路、除頻電路、PWM 電路以及 QEP 電路。FPGA 晶片中嵌入一個 NiosII 處理器來計算電動輪椅之運動軌跡命令。此電動輪椅運動控制控制晶片所使用的資源如表 1 所示，其 ALUTs 使用 7,708 個 LEs 約為總資源之 23.2%、而記憶體使用 75,264 bits 約為總資源之 15.6%。

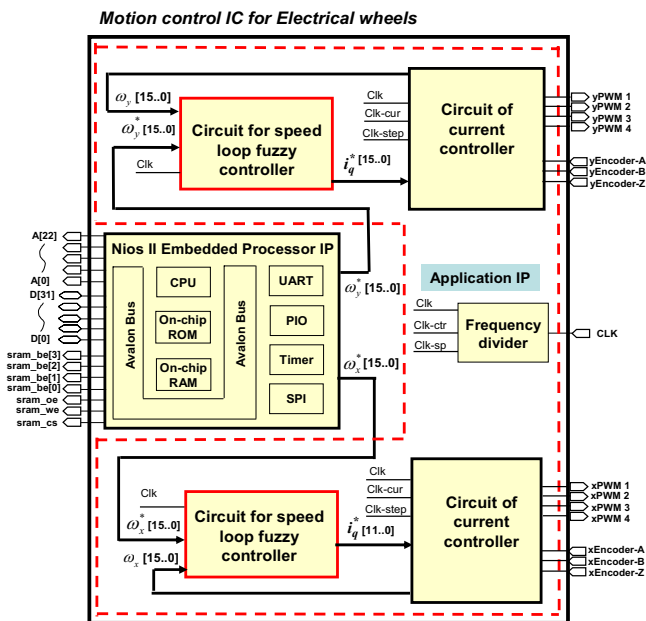


圖 5. 電動輪椅運動控制晶片內部電路方塊圖

表 1. 資源使用表

IP	Module Circuit	Logic Elements	Memory Bits
Nios II Embedded Processor IP		3,531	75,264
Application Speed Control IP	Two Fuzzy Controllers	1,943 x 2	0
	Two PWM Generations	64 x 2	0
	Two QEP Detection and Transformations	32 x 2	0
	Others	49 x 2	0
Total		7,708	75,264

VI. 實驗系統與實驗結果

FPGA-based 電動輪椅伺服控制器系統架構如圖 6 所示。圖中，硬體主要組成有一台電動輪椅、兩組馬達驅動板、一組以 FPGA 晶片控制電板、一組控制面操作控制面板來操控電動輪椅之移動：

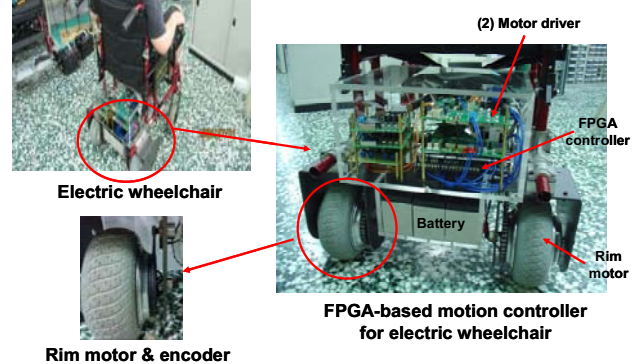


圖 6. 直流輪圈馬達驅動電動輪椅

□ 電動輪椅(Electric wheelchair)：兩個車輪各自由一顆直流輪圈馬達(DC rim motor)驅動。直流輪圈馬達之電力、額定電壓、額定電流、額定速度及減速機減速比各自為 200W、24VDC、6A、3000rpm 及 17.6。直流輪圈馬達輸出軸將連結一顆旋轉型光學編碼器，以偵測馬達之轉動速度。安裝旋轉式光學編碼器(Rotary Optical Encoder)，選用由 NEMICON 生產的 OEW 系列，解析度為 1024PPR，經由 FPGA 倍頻電路後可達到 4096PPR，輪圈馬達則經由傳動皮帶帶動編碼器旋轉如圖 7，而機構解析如圖 8。

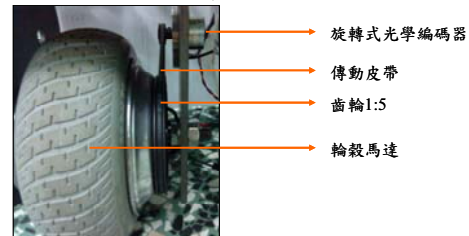


圖 7. 外加光學編碼器

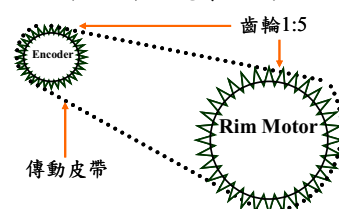


圖 8. 輪圈馬達帶動編碼器示意圖

由於電動輪椅車是給予行動不方便者,故安全性是相當重要的,在行駛於路面若有坡度,而沒有自動電磁煞車,會造成輪椅車的滑動,而造成危險,所以煞車電路可以使安全性增加。內部的煞車電路,若送入電壓則會使煞車 OFF,若無電壓輸入則煞車 ON,所以當使用者若有任何驅動命令則由 FPGA 送出解除煞車命令,經由光耦合保護電路再經過 SSR 送出電壓至電磁煞車來解除煞車如圖 9。

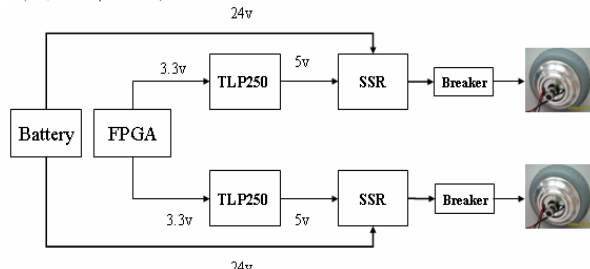


圖 9. 電磁煞車電路示意圖

□ **Altera FPGA 晶片**：乃系統核心，作為發展交流伺服馬達之運動控制晶片；其中交流伺服馬達之運動軌跡在 NiosII 處理器內實現，雙顆馬達之電流與速度控制之計算以數位硬體實現；而控制面板之訊號解讀及雙顆車輪速度命令產生則以軟體(在 Nios II 內)來實現。計畫中所採用之 Altera CycloneII EP2C35 晶片，具有 33,216 LEs、最多約 475 個可用 I/O 腳位、483,840 位元之 RAM 及 35 個嵌入式乘法器。此晶片可以嵌入一顆 Nios 多核心處理器，其具有多顆 32 位元 CPU 且具有核心大小可規劃之功能，可使用之記憶體晶片內有 1 到 16 Mbytes 快閃記憶體、1Mbyte SRAM 及 16 M byte SDRAM，晶片外還有有 4Gbytes 記憶體。

□ **換流器及信號偵測元件**：可接收單軸控制晶片輸出之 PWM 信號，轉換成三相旋波電壓以控制交流馬達旋轉，而馬達運轉時之電流信號及位置脈波信號經由 A/D 轉換器及光學編碼器(encoder)，可隨時傳回運動控制晶片內。換流器有一組 IPM 智慧型功率模組，IPM 集射極電壓為額定 600V、集極電流為額定 DC 20A、短時間(1ms)為 50A。光耦合 IC 為 Toshiba TLP250，作為 IGBT 之閘極驅動電路。其中脈波寬度調變(PWM)信號，為一個具有可改變脈波寬度之串列脈波。主要利用功率晶體工作於導通和截止之開關區，其導通時間之長短使電源輸出功率得以改變。本文採用以一固定週期之三角波，與另一輸入參考電壓做比較，當三角波大於參考電壓之電壓時，可使功率晶體導通或截止，利用此工作週期(duty cycle)的變化來供給負載，改變平均電壓，而本文脈波寬度調變之工作週期為 12kHz，利用 FPGA 硬體電路產生 PWM 訊號在結合輪圈馬達 H 型驅動架構，如圖 10 所示。

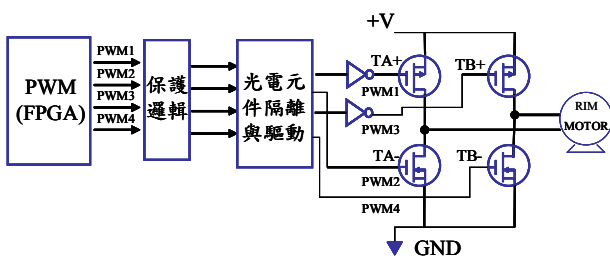


圖 10. FPGA 結合輪圈馬達用 H 型驅動器架構圖

□ **控制面板(control Panel)**：控制面板之功能為將操作訊號傳到 FPGA 晶片內，經過解碼後由 Nios II 處理器讀取，以進一步控制電動車輪運轉，並執行車體前進、後退、左右轉、加減速與停止之功能。由於電動輪椅車必須考量行動不方便者的肢體行動能力，所以在控制上需要容易上手與好操控，故在面板的設計上，以一根類比手把來做各種行動控制，而設置的功能鍵則僅用簡單的速按鈕來做開關與加、減速度的控制，如圖 11 所示。控制面板電路的類比搖桿經由 A/D 轉換電路將傳送至 89S51 單晶片來做訊號的擷取與編碼，再經由 RS-232 與 FPGA 做連結。

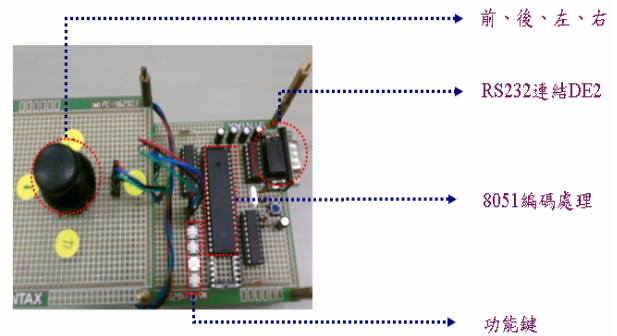


圖 11. 控制面板

為了證實本文所提電動輪椅控制晶片之可行性，分別以不同之速度之步階響應來驗證之。當左右車輪為 30~60rpm 及 50~80rpm 且週期為 2000ms 之方波速度命令時，其響應分別如圖 12 及圖 13 所示。此結果顯示左右車輪速度響應很相似。當方波速度命令變化為 30~60rpm，此時左右車輪速度響應約為 233ms 的上升時間及 5% 的超越量；而當方波速度命令變化為 50~80rpm，此時左右車輪速度響應約為 166ms 的上升時間及 10% 的超越量。此結果顯示本系統設計之控制器具有較佳的跟隨響應性能。

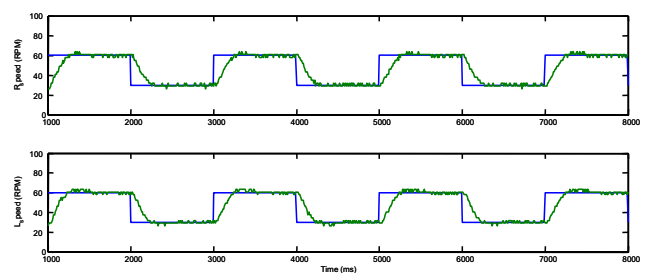


圖 12. 電動輪椅左右輪在速度命令為 30~60rpm 時之步階響應

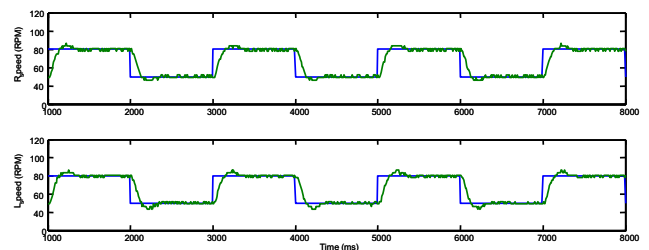


圖 13. 電動輪椅左右輪在速度命令為 50~80rpm 時之步階響應

V. 結論

將輪圈馬達使用在兩輪驅動電動輪椅上，相較於目前市面傳統直流馬達搭配減速齒輪，可以較為減少電動輪椅之重量、體積與成本。除外，在控制器部份，本文完成應用 SoPC 技術來設計電動輪椅之運動控制器，此軟硬體共同設計與平行運算，不僅提高系統性能，更增加系統設計上之彈性，並且可使電動輪椅運動控制器系統以一顆 FPGA 晶片來達成。最後，在製造成本上，市面上的電動輪椅控制器，皆為使用國外的控制器模組，所以電動輪椅之成本居高不下，本文提出之方法可以大幅減少製造成本，使電動輪椅更物美價廉。

VI. 誌謝

本文為國科會計畫之成果。國科會計畫編號為：
NSC 97-3114-E-006 -004.

參考文獻

- [1] <http://www.pgdt.com/default.html>
- [2] <http://www.dynamiccontrols.com/>
- [3] Nilssen, R.; Skaar, S.E.; Lund, R.; Skjellnes, T.; Ovrebø, S.; Lovli, E.; "Design of a permanent magnet synchronous motor integrated in the wheel rim on wheelchairs" Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on 0-0 0 Page(s):8 pp. - P.8 Digital Object Identifier 10.1109/EPE.2005.219584.
- [4] Poplawski, M.; Bialko, M.; "Implementation of parallel fuzzy logic controller in FPGA circuit for guiding electric wheelchair" Human System Interactions, 2008 Conference on 25-27 May 2008 Page(s):405 – 408 Digital Object Identifier 10.1109/HSI.2008.4581473.
- [5] Rwei-Xi Chen; Liang-Gee Chen; Lilin Chen; "System design consideration for digital wheelchair controller" Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 47, Issue 4, Aug. 2000 Page(s):898 - 907 Digital Object Identifier 10.1109/41.857970
- [6] Yee-Pien Yang.; Zhou-Han Lee.; "A novel wheelchair powered by dual rim motors" 3-6 May 2009 Page(s):1284 - 1289 Digital Object Identifier 10.1109/IEMDC.2009.5075368.
- [7] Bertocci, G.E.; Szobota, S.; Hobson, D.A.; Digges, K.; "Computer simulation and sled test validation of a powerbase wheelchair and occupant subjected to frontal crash conditions" Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation]. Volume 7, Issue 2, June 1999 Page(s):234 - 244 Digital Object Identifier 10.1109/86.769414.
- [8] Oh, S.; Hata, N.; Hori, Y.; "Control developments for wheelchairs in slope environments" American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005 8-10 June 2005 Page(s):739 - 744 vol. 2, Digital Object Identifier 10.1109/ACC.2005.1470047.
- [9] Singh, H.R.; Mobin, A.; Kumar, S.; Chauhan, S.; Agrawal, S.S.; "Design and development of voice/joystick operated microcontroller based intelligent motorised wheelchair" TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference Volume 2, 15-17 Sept. 1999 Page(s):1573 - 1576 vol.2 Digital Object Identifier 10.1109/TENCON.1999.818738.
- [10] Chung-Hsien Kuo; Hung-Wen Yeh; Chin-En Wu; Ko-Ming Hsiao;"

Development of Autonomous Robotic Wheelchair Controller Using Embedded Systems" Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE 5-8 Nov. 2007 Page(s):3001 - 3006 Digital Object Identifier 10.1109/IECON.2007.4460343.

- [11] <http://www.altera.com>.
- [12] SOPC World, ALTERA Corporation, 2004.
- [13] Nios II datasheet, Version 1. 2, ALTERA Corporation, 2003.