

[illegible]

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

計畫主持人：游文雄	教授	大同大學電機工程學系
計畫參與人員：吳棻菘		大同大學電機研究所
翁健智		大同大學電機研究所
陳和生		大同大學電機研究所
李彥勳		大同大學電機研究所

☐赴國外出差或研習心得報告一份

☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份

☒出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

中 華 民 國 98 年 5 月 28 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

力覺回饋與遙控自主平衡智電車運動控制之研究

The Research of Haptic Feedback and Remote Balance Motion Control of an Intelligent E-Bike

計畫編號：NSC97-2221-E-036-028-MY2

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

計畫主持人：游文雄 教授 大同大學電機工程學系

e-mail:wsyu@ttu.edu.tw

計畫參與人員：	吳案菴	大同大學電機研究所
	翁健智	大同大學電機研究所
	陳和生	大同大學電機研究所
	李彥勳	大同大學電機研究所

一、中文摘要

本研究的重點在於人機介面對智電車的自主平衡運動控制，介面主要由無線遙控、陀螺儀、觸覺裝置及視覺裝置所組成，而自主運動控制包含動態模擬與兩組並行式機器人控制系統。實作部分利用三軸觸覺並聯平台與智電車當作動感回饋裝置，以分析驗證人機介面之控制架構與性能。本計畫分二年執行：第一年建構無線遙控、陀螺儀、動感回饋觸覺裝置介面，及智電車系統，使操控者騎乘控制智電車時，由操控把手感受應有的動感，此動感包括與上下坡、避開凸起物及凹陷地的互動感受。第二年建構視覺裝置、擬真系統、及三軸觸覺並聯平台，擬真系統實現虛擬智電車及重構環境現場，使操控者於遠控時可藉觸覺並聯平台擁有身歷其境的擬真感受，接著再推導智電車、力迴饋並聯平台、操控者間具不確定參數及時間延遲閉迴路控制系統的數學模式，配合橢圓軌跡最短過彎轉進演算法，建構多節段之模糊觀測器及自適應控制演算法，使智電車完成遠端自主平衡控制及追蹤誤差快速補償，以達成智電車上下坡、避開凸起物及凹陷地的最佳動感平衡控制。

關鍵詞：人機介面、動感回饋裝置、動態模擬、智電車、橢圓軌跡演算法、擬真系統、多節段之模糊觀測器及自適應控制演算法

Abstract

This project is focusing on research in

intelligent motion control of an e-bike with human-machine interface. Human-machine interface is composed of devices of the remote control, gyroscopic system, sense of touch, and vision. The intelligent motion control is composed of dynamic simulation and two parallel robotic systems. We use a 3-dof parallel platform and an e-bike to look on as haptic devices in experiments to discuss the control architecture and performance. This project is divided into three-year executions: The first year wants to construct an e-bike consisting of gyroscopes, force sensors, a vision system, and a handler with haptic interface, so that the operator can have sense of touch when he/she rides the e-bike climbing or descending the hillsides, and avoiding the bulge and hollow obstacles. The second year constructs a 3-dof parallel platform, a virtual reality (VR) system, and wireless remote control. The virtual environment and virtual e-bike in VR system are formed using DirectDraw technologies so that when the operator moves the platform, the “virtual e-bike” moves back and forth simultaneously and the remote “real e-bike” mimicks the motion consistently. The third year infers a closed-loop system mathematical model with uncertainties and output time-delays constituted by real and virtual e-bikes, 3-dof-parallel platform, and human haptic interface. Then, a novel fast distance error compensation method is developed for

achieving trajectory tracking using multi-layer fuzzy observer-based adaptive control technology and the elliptical path scheme when the e-bike climbs or descends the hillsides, and avoids the bulge and hollow obstacles in VR and real world.

Keywords: Human-machine haptic interface, e-bike, dynamic simulation, elliptical path scheme, multi-layer fuzzy observer-based adaptive control

二、緣由與目的

台灣在智電車的研發尚屬起步階段。智電車的運作原理可視為「動態穩定」(Dynamic Stabilization)，也就是車體本身需有自我行進平衡能力，故可藉內置精密固態陀螺儀(Solid-State Gyroscopes)來判斷車體姿態，再透過微處理器晶片計算座標值，並產生車體傾斜角度來修正並產生調整行為的控制指令，直接驅動方向把手及輪圈馬達，以達到車體姿態平衡前進。此外，智電車在開放式空間行進時，車體也會受到諸如風阻、坑洞、凸起物等環境的影響，因此，如何利用陀螺儀及多重重力感知器，來消除或降低環境對車體的影響，使智電車於行進間仍能保持平衡。由於電池是供應智電車輪圈馬達、把手轉動、控制電路、陀螺儀、攝影機等電力的主要來源，近年來業界對於電池的充電電量及電池壽命已有大幅度的進展，並且已有如中央大學徐國鎧教授提出以正負脈衝法充電和模糊估測法測電量，以得到準確的電量估測，而本計畫將採階層式模糊法測估測電池電量，並同時控制充電及用電，以荷重高低建構充電及用電階層，希冀以層次分明來提高充電效率，減少能源浪費，而且使用晶片之韌體及軟體為控制核心，可大幅降低測電、充電及用電所需電路，以上為本計畫第一年擬研究的主題之一。無線遙控機器人技術的基礎為“分散數值機器人結構(Distributed Computation Robotic Architecture)”，這是源起於 Dr Robot 的人型機器人(Humanoid Robot, HR)計畫。運用此架構，本地或遠端電腦伺服器可經由安全的無線連結做為主控台，來操控機器人的高階功能，而機器人本身內建的處理器則主控低階功能，由於耗時且複雜的計算皆由電腦伺服器端負責執行，因此，機器人本身可大

幅減重，功率消耗亦可降低，使操作更持久，且任何伺服器端的軟硬體升級，其資源都可與由伺服器操控的機器人共享。另外，也因處理器晶片大都內建串列通信埠及省電模式，輸出入埠數量也夠，並有類 C 語言語法的編輯器，與無線遙控模組搭配當可同時發揮兩者之優點。另外，為使遠端影像深植操控者腦海，亦需重建遠端之智電車及其所處的環境場景於伺服器上，並以力迴饋 3-dof 並聯平台傳達至操控者的手以感受應有的動感，此為本計畫於第二年擬執行的項目之一。另外，智電車及其所處環境的慣性值常因時因地而呈不同的分佈，若單靠陀螺儀及多重重力感知器，再加上簡易放大控制器是無法獲得較精確且較好的響應，因此發展具自我調整控制參數之智慧型控制器當屬必然趨勢，而將模糊推論嵌入智慧型控制器之中，較可處理複雜的動態系統問題，而且成功案例也時有所見。為使智電車能順應不同的環境且仍能保持平衡前進，本計畫擬使用多節段之模糊觀測器及自適應控制器演算法，並輔以陀螺儀及多重重力感知器，藉由分析倒單擺裝置平衡穩定原理來分析智電車車體平衡前進穩定，希冀能使複雜之無線遙控智電車能有極佳之輸出響。

三、結果與討論

本計畫第一年之研究內容包含驅動直流無刷輪轂馬達、設計馬達轉速控制器，接著裝置壓力、震動、碰撞、曲率等感測器，再以陀螺儀建立車體平衡裝置。馬達以驅動腳踏車輪的方式分為鍊條式、皮帶式及輪轂式，現下無刷馬達的價格下降，加上其優良特性，一般腳踏車皆採用無刷馬達，其較於有刷馬達的優勢為不容易積碳且傳導性優良，本計畫採用的無刷輪轂馬達可減少馬達磨損，增加使用壽命，並可降低使用時的噪音。配合選用的馬達，再設計出相對應的控制器，藉由PWM(脈波寬調變)的方式，來達到控制馬達轉速的效果。有了動力來源後，接著使用陀螺儀及感測器來降低環境因素對車體的不利影響：在環境改變的狀況下(諸如風阻，歧路，碰撞等)，造成重心傾斜，必須達到車體仍能保持平衡並繼續行進的目

的。

本研究案第一年已完成之項目如下：

1. 驅動直流無刷輪轂馬達：

本計畫設計之智電車系統如圖一所示、輪圈馬達及車輪架構如圖二所示、車輪電動煞車系統如圖三所示，其中使用之無刷輪轂馬達操作功率在 250W/400W (最低瓦數/最高瓦數) 之間，選用大瓦數馬達有利於車體承載力，對於往後加裝於車體上的機器人、陀螺儀、感測器、攝影機、電池等等可預留較寬鬆的重量限制，此車搭配的電池為鉛酸電池 36V。



圖一、智電車系統。



圖二、輪圈馬達及車輪架構。



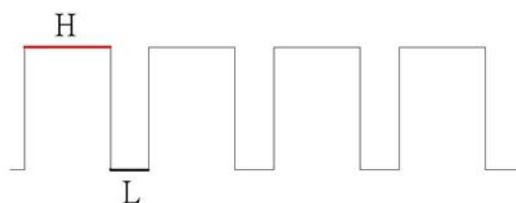
圖三、車輪電動煞車系統。

2. 設計馬達轉速控制器：

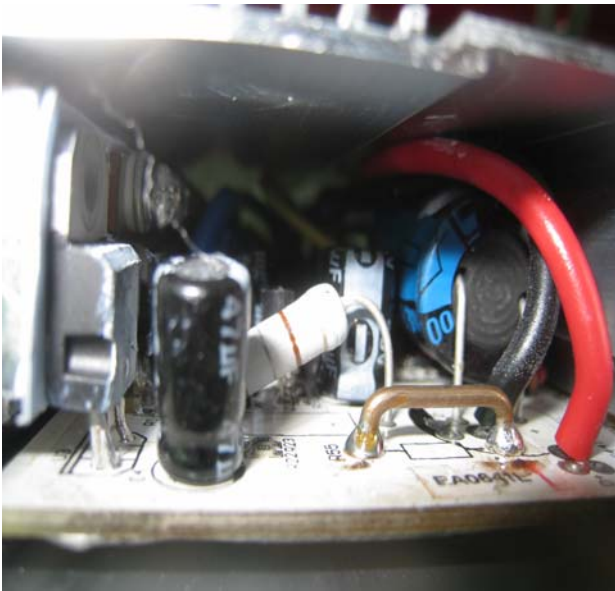
為使智電車系統之輪圈馬達能依 PWM 產生之電壓高低產生不同的轉速，PWM 由高功率 SCR 元件組裝如圖四並產生如圖五所示之信號，此 PWM 信號對應馬達規格，以脈波寬調變方式，來控制馬達轉速快慢。



圖四、車輪速度控制系統。



圖五、PWM 信號。



圖六、輪圈馬達驅動介面系統。

因此，當波峰寬度(H)越寬，則馬達轉速越快；反之，當波谷寬度(L)變寬，則馬達轉速變慢。在馬達運作時，先經由 MOSFET 將訊號取出，再經由回授電路進入 OP 做比較，最後透過改變電阻值來調變輸入電壓，即可控制馬達轉速。當輸入電壓降至 0V 時，馬達處於最高轉速；大於 7.2V 時，馬達停止轉動。另外本計畫也保留手控控制部分如圖七。



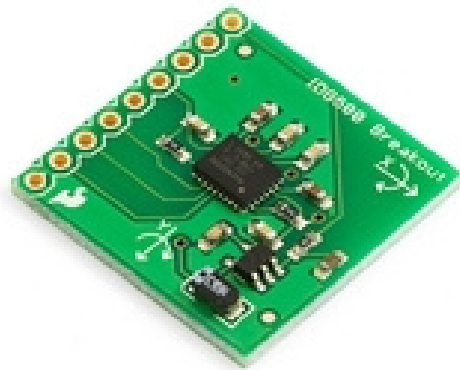
圖七、手控控制介面系統。

3.建構障礙感測與車體平衡裝置：

為使車體能平衡行進，本計畫於車體坐墊上方，裝置一陀螺儀，並分析其與車體扭矩、傾斜角、重心之協調機制如圖八及圖九。

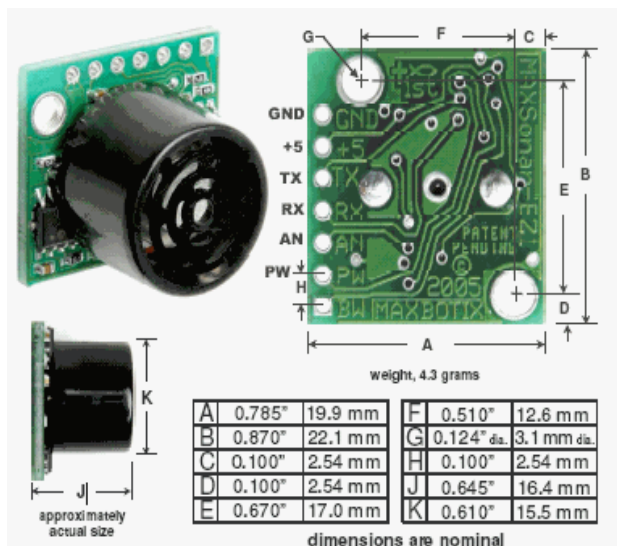


圖八、陀螺儀介面裝置位置。



圖九、雙軸高精度陀螺儀介面系統。

另一方面，為分析車體總重心位置，在此重心位置上裝置一倒單擺，藉由單擺前後擺動改變偏角，使智電車能夠前後加速移動。本陀螺儀選用測量範圍 500 degree/sec 的雙軸高精度陀螺儀。另外本計畫裝置 LV-MaxSonar-EZ1 的檢測器以量測非常短到長距離值如圖十，此元件具有超小尺寸以及超低的電流消耗的特色，介於 15.24cm ~ 6.45 公尺的檢測，超音波可以回傳實際距離，解析度為 2.54cm。物體介於 0 ~ 15.24cm, 超音波只會回傳 15.24cm 的距離值。藉由此裝置，可使智電車在行進時可測出前方 6.45 公尺內的障礙物，使車體提早做出最佳迴避路線的規劃。



圖十、超音波距離感測介面系統。

我們先建立地面與車體傾倒前的平衡扭矩，再納入陀螺儀的兩大角動量守恆特性：定軸性(rigidity)以及逆動性(precession)。智電車左右轉向時以車體的總體重心橫軸作為參考線，定軸性(慣性)使陀螺儀保持指向一個固定的方向，當重心橫軸向右傾斜時，則利用陀螺儀之逆動性，產生相同大小且往左的力量，使車體回復平衡。在智電車前進途中，若遇到環境的不利干擾，導致智電車在前進途中發生傾斜，藉由陀螺儀的平衡調節，可使車體自行調整回穩定狀態，也使得車體可承受的路況更為多樣、實際化。

四、計畫成果自評

綜觀以上之執行結果，本計畫第一年已完成智電車車體架構，藉由運動及動態特性分析以調整最佳之車體長、車體重心、車體重量、輪圈半徑、前後輪阻尼值，再依取得之最佳值，建構智電車機構，安裝輪圈馬達、伺服機、陀螺儀、多重力感測裝置，以完成整體智電車之硬體配置，接著，使用晶片之軟體及軟體為控制核心，建構周邊驅動電路，電池電量估測，以荷重高低建構充電及用電階層。依智電車行走的速度、加速度，建立車體傾斜角與陀螺儀逆動性的最佳協調機制，藉由改變或轉動把手方向，依倒單擺原理，產生車體反傾倒的扭矩，使車體與地面保持平衡穩定靜止關係，並提供**第二年之無線遠端**力迴饋虛擬實境智控車控制及第三年之智

電車遠端操控追蹤誤差快速補償使用。

五、參考文獻

- [1] K. Hofer, "Electric vehicle on one wheel," in *Proc. of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*, pp. 517-521, Sep. 2005.
- [2] Hofer, Klaus, "Observer-Based Drive-Control for Self-Balanced Vehicles," *IEEE Conference on Industrial Electronics*, pp.3951- 3956, Nov. 2006.
- [3] G. Yasuda and H. Takai, "Sensor-Based Path Planning and Intelligent Steering Control of Nonholonomic Mobile Robots," *IEEE Proc. Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 317-322, 2001.
- [4] X.S. Wang, G.Z. Peng, and J.F. Hao, "An evidential approach to environment sensing for autonomous robot," *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, pp. 210-215, 2003.
- [5] Ming-Guo Her, Kuei-Shu Hsu, and Wen-Shyong Yu, "Analysis and design of a haptic control System: virtual reality approach," *Int. J. Advance Manufacturing Technology*, 19:743-751, 2002. (SCI)
- [6] F. Asano, Z.-W. Luo, and M. Yamakita, "Biped gait generation and control based on a unified property of passive dynamic walking," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 4, pp. 754 – 762, Aug. 2005.
- [7] G.S. Dordevic, M. Rasic, and R. Shadmehr, "Parametric models for motion planning and control in biomimetic robotics," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 1, pp. 80-92, Feb. 2005.
- [8] P. C. Carrozza, E. Guglielmelli, C. Laschi, A. Menciassi, S. Micera, and F. Vecchi, "Robotics as a future and emerging technology: biomimetics, cybernetics, and neuro-robotics in European projects," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 29-45, June 2005.

- [9] H.R. Choi; K. Jung, S. Ryew, J.-D. Nam, J. Jeon; J.C. Koo, and K. Tanie,"Biomimetic soft actuator: design, modeling, control, and applications," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 5, pp. 581-593, Oct. 2005.
- [10] K. Vlachos, E. Papadopoulos, and D.N. Mitropoulos,"Design and implementation of a haptic device for training in urological operations," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, pp. 801-809, Oct. 2003.
- [11] M. Sitti and H Hashimoto,"Teleoperated touch feedback from the surfaces at the nanoscale: modeling and experiments," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, pp. 287-298, June 2003.
- [12] B. Hannaford and J.-H. Ryu,"Time-domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, pp. 1-10, Feb. 2002.
- [13] A. Frisoli and M. Bergamasco,"Experimental identification and evaluation of performance of a 2DOF haptic display," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3260-3265, Sept.14-19, 2003.
- [14] Chih-Lyang Hwang; Hsiu-Ming Wu; Ching-Long Shih; "Fuzzy Sliding-Mode Underactuated Control for Autonomous Dynamic Balance of an Electrical Bicycle," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, Issue 3, May 2009 pp. :658 – 670.
- [15] Bouton, N.; Lenain, R.; Thuilot, B.; Martinet, P.; "A rollover indicator based on a tire stiffness backstepping observer: Application to an All-Terrain Vehicle," *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS. IEEE/RSJ International Conference.* pp. 2726 – 2731, 2008.
- [16] Ermes, M.; Parkka, J.; Mantyjarvi, J.; Korhonen, I.; "Detection of Daily Activities and Sports With Wearable Sensors in Controlled and Uncontrolled Conditions," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 12, no. 1, pp. 20 – 26, 2008.
- [17] Chih-Lyang Hwang; Hsiu-Ming Wu; Ching-Long Shih; "Fuzzy sliding-mode under-actuated control for autonomous dynamic balance of an electrical bicycle," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 251 – 257, 2008.
- [18] Jain, M.; Singh, P.; Saxena, P.K.; "An Optimizing Algorithm for Multiple Objective Fractional Time Transportation Problem," *IEEE International Advance Computing Conference*, pp. 266 – 271, 2009.