

路邊停車之非線性模型車運動控制

¹ 林冠宇、² 黃緒哲、² 許裕昇、³ 許(馬宗)謙、³ 劉景富

¹ 國立台灣科技大學機械工程系

² 國立台北科技大學車輛工程系

³ 車輛研究測試中心

摘要

停車可分為倒車入庫和路邊停車兩種不同的情況，而「自動停車」之重點技術分成三部份，第一部份為使用感測器建立車輛與停車空間的相對位置，第二部份為車輛最佳停車路徑的分析與規劃，第三部份為停車時之實際路徑估測與路徑追蹤控制，結合這三部份之技術才能代替駕駛人執行完整之倒車入庫或路邊停車之任務。對於自動停車系統而言，不同的車速、路面摩擦力，會使得規劃的停車路徑與真實路徑有一定的誤差產生，因此在自動停車時，需能準確的估測車輛與全域座標的相對位置，以利方向盤轉角做正確的修正，進而達到精準的自動停車路徑追隨的效果。

本文將針對路邊停車空間進行補助停車系統之停車路徑規劃，並根據人們駕駛經驗，提出智慧型自動停車控制方法，針對路邊停車的情況，設計規劃輸入輸出回饋線性化控制器和 PI 控制器法則，並藉由本研究建立自動停車系統之相關策略分析。

關鍵詞：自動停車、輸入輸出回饋線性化控制器、路徑規劃

1. 前言

隨著科技的進步以及產業型態的轉變，自動化需求的層次更是有增無減，因此這方面的領域仍有相當大的發展空間，目前自動化的重點在於如何整合各項技術來達到不同的需求。近年來由於車輛越來越多，汽車駕駛之安全性能是愈來愈受到重視。世界許多國家和各大車廠也都積極的投入在車輛安全的研究，以提升車輛行駛的安全性能。除了提升安全性能外，也在車輛研究領域中開發許多具有人工智慧系統相關功能。

在城市都會區中，停車位愈來愈難找，相對的停車位空間大小規劃並不大，若要順利停入車位通常都

得依賴駕駛者的技術、經驗和判斷力來完成，但對於停車經驗不多的駕駛者，無論是倒車入庫或是路邊停車必然會花費不少的時間。而自動停車系統之開發是近幾年熱門之研究主題，因此開發方便之停車補助系統或是發展自動停車技術，成為駕駛輔助系統其中一項重要研發目標，同時也為本文研究重點之一。

2. 文獻回顧

現有文獻中，倒車入庫和路邊停車之路徑追蹤控制相關問題已經有很多論文提出。大多數的這些研究都是專注於追蹤和狀態穩定方法。追蹤的方法是設計控制法則使類似汽車移動的自動裝置追隨一條參考軌跡。而狀態穩定方法是從任何最初狀態對一個期望的最後狀態使類似汽車移動的自動裝置穩定。但是大部分皆是採用動態模擬分析之理論性探討或是採用 1/10 模型車配備完整之上方影像空間相對資料【1-4】，較欠缺實車驗證之實際研究成果發表。

Sugeno 和 Murakami【5】最先針對裝有微處理器和兩顆超音波感測器系統可測量相關的距離和方向之模型車，提出使用 Fuzzy garage parking control 的控制實驗研究。利用 Sugeno 型式模糊系統模式與人員停車經驗，進行模型車自動停車之模糊控制規則設計與實驗。Sugeno 等人【6】採用相似的硬體規劃來執行倒車入庫模糊控制規則設計，使用 14 種模糊規則指示。例如：往前、減速、進入車位和加速。

Sampei 和 Furuta【7】提出一個非線性軌跡控制法則，針對模型車輛從任何位置低速運動到指定停車位置之軌跡追蹤進行模擬研究。其非線性控制的模擬結果係根據 Kondo 的駕駛者模型，並與一個 LQ 調節器和 human 模型控制之收斂性相比較。Yasunobu 和 Murai【3】則是依據人員駕駛技術與經驗以規劃設計

狀態評估模糊控制和預測模糊控制器進行停車控制模擬研究。Daxwanger 和 Schmidt【8】使用類神經網路和模糊控制法則發展一個具有視覺系統之模型車側車入庫停車控制器，其控制結構分別為：單獨採用類神經網路控制和模糊與類神經網路混合控制。其主要是用來產生自動停車之轉向角命令，環境資訊則是透過影像感測器來測量，控制結構則是用自主移動機器人來驗證。

Tayebi 和 Rachid【9】透過 Lyapunov 穩定法則來設計時變狀態回饋控制法則，以探討一台輪型模型車之停車模擬控制問題。在微量量測擾動下此項控制法則具有保證系統全域有界之強健性。Yoshino 等人【10】為了在一個不確定的領域上避開障礙物，開發線上路徑規劃演算法，可將自主移動機器人引導到指定目標上。由於此台裝有一架 CCD 照像機的輪型自主移動機器人不能全方向的移動，其路徑規劃演算法主要由 3 種模式構成：直線模式、旋轉模式和避障模式。另外 Ohkita 等人【11】亦針對一台具有 6 顆超音波感測器系統之自主移動機器人提出模糊移動位置控制研究成果。Lian 等人【12】為了路邊停車問題提出一種模糊增益表控制器，模糊滑動模式控制器首先在路邊停車的路徑上追蹤一條典型的路徑軌跡。利用非完整約束和機械約束，來探討規劃多種典型的可行停車路徑，以構成完整的路邊停車步驟。

3. 判斷策略

回饋線性化是普遍用在控制非線性系統的方法，是透過狀態回饋把非線性系統轉換成線性格式。其方法有下列兩種：

輸入狀態回饋線性化 (input state feedback linearization) 及輸入輸出回饋線性化 (input-output feedback linearization)。

本研究使用文獻【13】這篇 paper 所提出的輸入輸出回饋線性化控制法則，其中提到側向控制系統的目的是要確保側向位移誤差及車子方向角都能追到我們所規劃的理想路徑。因此文獻【13】中定義了 x 與 y 的追蹤誤差分別為：

$$e_{1x} = x_d - x \quad (1)$$

$$e_{1y} = y_d - y \quad (2)$$

方向角誤差為：

$$e_2 = \psi_d - \psi \quad (3)$$

其中 x_d 、 y_d 與 ψ_d 代表理想軌跡曲線，首先為了確保 y 能追蹤到 y_d ，定義

$$\dot{y}_d = \left[\frac{d}{dt}(V \sin \psi) \right]_d = V \dot{\psi}_d \cos \psi_d + \dot{V} \sin \psi_d \quad (4)$$

且

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \dot{\psi} V \cos(\psi) + \dot{V} \sin(\psi) \\ &= -\frac{V^2}{L} \tan(\delta) \cos(\psi) + \dot{V} \sin(\psi) \end{aligned} \quad (5)$$

從(4)式減(5)式可得

$$\dot{e}_{1y} = V \dot{\psi}_d \cos \psi_d + \dot{V} \sin \psi_d - \frac{V^2}{L} \tan(\delta) \cos(\psi) + \dot{V} \sin(\psi) \quad (6)$$

假設控制器 δ 為

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{L}{V^2 \cos(\psi)} \left(V \dot{\psi}_d \cos \psi_d - \dot{V} \sin \psi_d - \lambda_1 \dot{e}_{1y} - \lambda_2 e_{1y} \right) \right] \quad (7)$$

將(7)式代入(6)式，可得

$$\dot{e}_{1y} = -\lambda_1 \dot{e}_{1y} - \lambda_2 e_{1y} \quad (8)$$

當確保(8)式 $t \rightarrow \infty$ 、 $e_{1y} \rightarrow 0$ 和 $\dot{e}_{1y} \rightarrow 0$ ，即

$y \rightarrow y_d$ ；若假設(7)式的 V 為常數則(7)式之 y 方向控制法則可簡化為

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{L \cos(\psi_d)}{V \cos(\psi)} \dot{\psi}_d + \frac{L}{V^2 \cos(\psi)} (-\lambda_1 \dot{e}_{1y} - \lambda_2 e_{1y}) \right] \quad (9)$$

同理可知 x 方向控制法則為

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{L \sin(\psi_d)}{V \sin(\psi)} \dot{\psi}_d + \frac{L}{V^2 \sin(\psi)} (-\lambda_1 \dot{e}_{1x} - \lambda_2 e_{1x}) \right] \quad (10)$$

因此本研究使用的非線性控制器為文獻【13】提出的控制法則(9)式與(10)式，除了 singularity 問題外，

其中取 \tan^{-1} 的值只能介於 $-\pi/2$ 至 $\pi/2$ 間，超過此值

控制器則不能作動。分段控制策略為圖 1 所示。另外方法會有 internal dynamic 發生，當選擇 x 控制時 y 會有 internal dynamic；當選擇 y 控制時則 x 會有 internal dynamic。

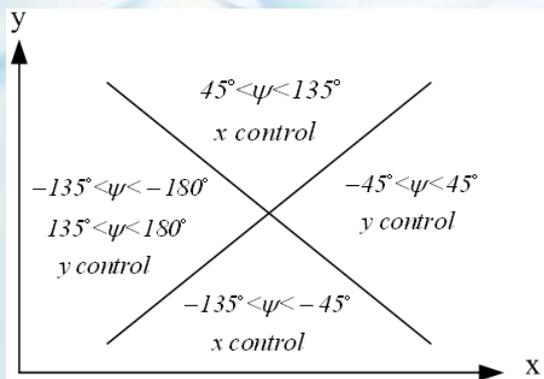
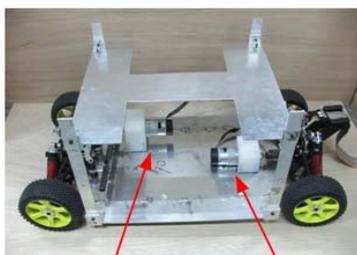


圖 1 控制策略

4. 硬體架構

本研究之重點為利用路邊停車軌跡規劃發展自動停車系統。實驗系統以模型車來建構，主要分成模型車架構和感測器兩大部份。模型車車體如圖 2 所示，是採用市面上販售的遙控模型車，只保留機械傳動結構，並針對車身主體結構加以製作和改裝，其中使用鋁板做為主體結構的優點為輕巧、成本便宜和加工製作簡單。表 1 為模型車車體規格，此外本文所使用的模型車具有下列幾點特性：

- (1)模型車為原車體比例縮小為六分之一。
- (2)四輪懸吊、彈簧避震系統。
- (3)模型車為後輪驅動。



前輪直流馬達 後輪直流馬達

圖 2 模型車實體圖

表 1 模型車車體規格表

車身長度	56cm
車身寬度	30cm
車子重量	4kg
電源裝置	電源供應器和介面卡提供
轉向裝置	直流馬達進行轉向角控制
驅動裝置	直流馬達進行速度控制

PCI-1712 介面卡和 PCI-1784 介面卡。

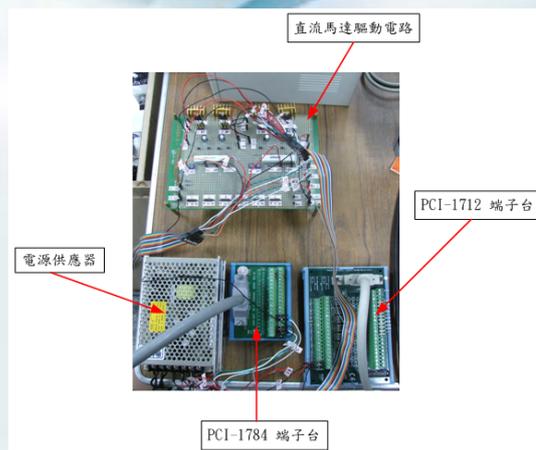


圖 3 硬體介面架構圖

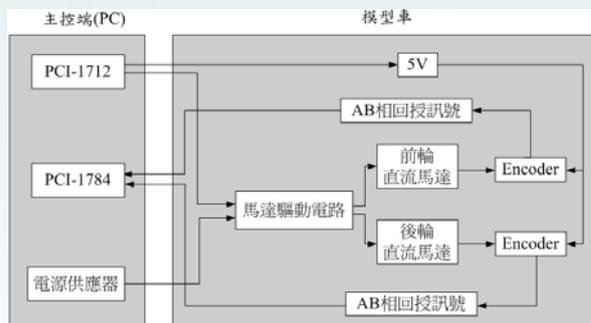


圖 4 系統架構示意圖

本研究使用的 A/D 和 D/A 卡型號為 Advantech 的 PCI-1712，其特性如表 2 所示，主要用來供應直流馬達驅動電路所需要的 DA 電壓，如圖 5 所示；另一張型號為 Advantech 的 PCI-1784，其特性如表 3 所示，負責馬達編碼器的數位信號(A/B 相)之計數，並由電腦將其轉換成位置信號，如圖 6 所示。

表 2 Advantech Co. PCI-1712 規格表

Resolution	12bits
Number of	16SE / 8Diff
Onboard FIFO	1k
Input range	0~10、0~5、 0~2.5、0~1.25
Configurable	Per channels
Sample rate	1 Ms/s

圖 3 為硬體介面架構圖，圖 4 為系統架構示意圖，主要應用元件為：直流馬達驅動電路、電源供應器、

表 3 Advantech Co. PCI-1784 規格表

Resolution	32bits
Number of	4(Independent)
Onboard FIFO memory	1k
Input range	Quadrature, Up/Down, Count/Direction
Configurable	Per channels
Sample Clock	8、4、2、1MHz



圖 5 PCI-1712 實體圖



圖 6 PCI-1784 實體圖

5. 路邊停車之實驗結果

5.1 非線性控制器與 PI 控制器

本實驗中並沒有做系統 Model 的估測，因此 PI 參數的調整只能依據試誤法修正，前輪轉向角控制之 PI 控制器參數設定如表 4，後輪速度之控制 PI 控制器參數設定如表 5，針對模型車進行路邊停車之軌跡追蹤，控制目標位置設定為(1.38m, 0.45m)，分別做三種不同速度的分析，取樣時間為 55ms。

表 4 前輪轉向角控制之 PI 參數設定

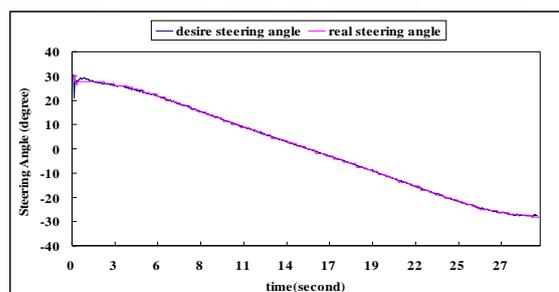
	k_p	k_i
Speed=0.5m/s	0.03695	0.00075
Speed=0.10m/s	0.03695	0.00075
Speed=0.15m/s	0.03695	0.00075

表 5 後輪速度控制之 PI 參數設定

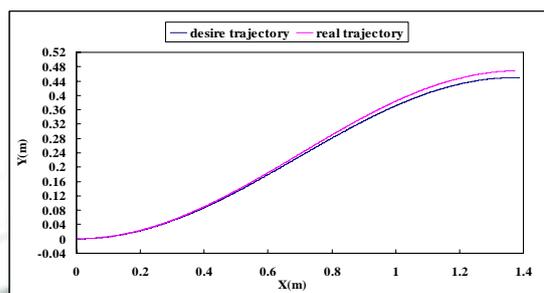
	k_p	k_i
Speed=0.5m/s	3	1
Speed=0.10m/s	3	1
Speed=0.15m/s	3	1

圖 7 為路邊停車非線性控制器與 PI 控制器之速度 0.05m/s 實驗結果，從圖 7(a)中發現理想轉向角在一開始會有突然下降現象，是因為非線性控制器對於速度項的 \dot{e}_{1y} 非常敏感，由於一開始速度並不能快速達到指定目標速度，因此會使理想轉向角在一開始會有突然下降現象，等到速度達到目標速度後，就不會有此現象發生。圖 7(b)為理想軌跡與實際軌跡之追蹤比較。圖 7(c)的軌跡追蹤之 X 軸誤差量約在 0.02m。圖 7(d)的軌跡追蹤之 Y 軸誤差量約在 -0.018m。

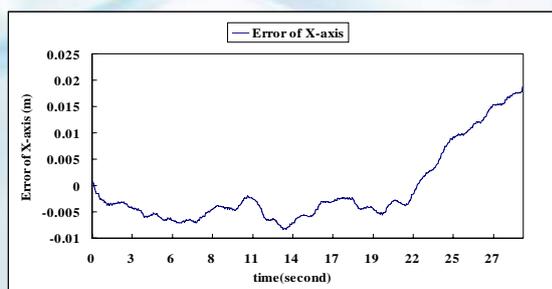
圖 7 (e)的前輪控制電壓約在-0.026V 至-0.564V 之間。圖 7 (f)的前輪轉向角誤差變化約在-0.01 度至-0.56 度之間。圖 7 (g)的後輪控制電壓約在-0.283V 至 -0.315V 之間。圖 7 (h)為後輪速度變化量，其穩態誤差約在 0.0485m/s 至 0.0512m/s 之間，反應時間約為 2 秒。



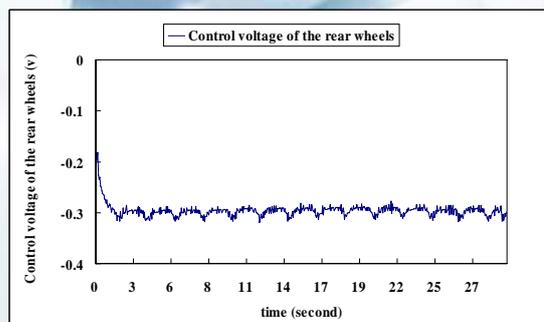
(a)理想轉向角與實際轉向角



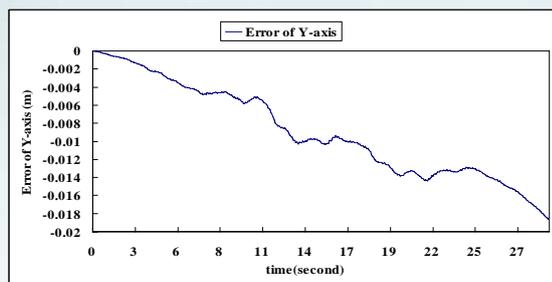
(b)理想軌跡與實際軌跡



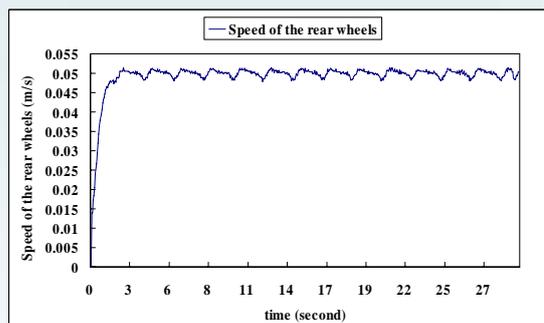
(c) X 軸誤差



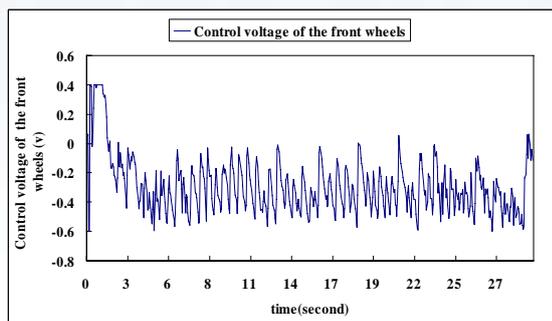
(g) 後輪控制量



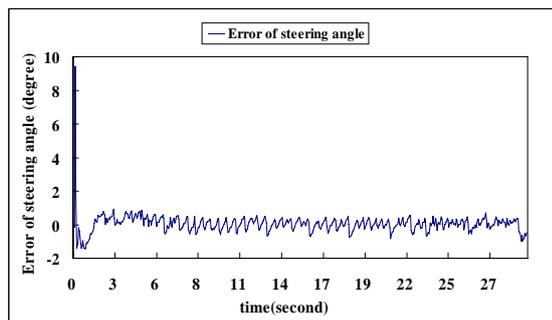
(d) Y 軸誤差



(h) 後輪速度



(e) 前輪控制量



(f) 前輪轉向角誤差

圖 7 路邊停車非線性控制器與 PI 控制器之速度
0.05m/s 實驗結果

6. 結論

實驗過程中，我們利用 PCI-1712 介面卡提供給後輪馬達所需的電壓，PCI-1784 是用來讀取前輪馬達的 count 值，且前輪馬達轉一圈有 26 齒，是 A,B 相，減速比為 21，因此馬達轉一圈共有 1092count，就能換算出輪胎所走的距離，再利用非線性之輸入回饋線性化控制法則進行轉向角之計算，把算出的轉向角用來控制前輪所要轉之角度，因為最大轉向為正負 30 度，所以模型車轉向角有受限制，因此模型車之擺設初始位置很重要。

7. 致謝

本研究承蒙車輛研究測試中心轉委託學界計畫”停車空間與路徑追蹤策略分析研究”予以輔助，特此致謝。

參考文獻

- [1] T.H.S. Li and S. J. Chang, ‘Autonomous fuzzy parking control of a car-like mobile robot,’ IEEE Trans. on System, Man, Cybernetics, vol. 33, No. 4, pp. 451-465, 2003.
- [2] Chan-Hong Chao, et al., ‘Omni-directional vision-based parallel-parking control design for car-like mobile robot,’ Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechnatronics,

Taipei, TAIWAN, pp. 562-567.

- [3] Seiji Yasunobu and Yasuhito Murai, "Predictive fuzzy control and parking control," Proceedings of the American Control Conference, Seattle Washington, June, pp. 2277-2281, 1995.
- [4] Milton Roberto Heinen, Fernando Santos Osorio, Farlei Jose Heinen and Christian Kelber, "SEVA3D: Using artificial neural networks to autonomous vehicle parking control," 2006 International Joint Conference on Neural Networks, Sheraton Nancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, July, pp. 4704-4711, 2006.
- [5] M. Sugeno and K. Murakami, "An experimental study on fuzzy parking control using a model car," in Industrial Applications of Fuzzy Control, North-Holland, The Netherlands, 1985, pp. 105-124.
- [6] M. Sugeno, T. Murofushi, T. Mori, T. Tatematsu, and J. Tanaka, "Fuzzy algorithmic control of a model car by oral instructions," Fuzzy Sets Syst., vol. 32, pp. 207-219, 1989.
- [7] A. Ohata and M. Mio, "Parking control based on nonlinear trajectory control for low speed vehicles," in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, 1991, pp. 107-112.
- [8] W. A. Daxwanger and G. K. Schmidt, "Skill-based visual parking control using neural and fuzzy networks," in Proc. IEEE Int. Conf. System, Man, Cybernetics, vol. 2, 1995, pp. 1659-1664.
- [9] A. Tayebi and A. Rachid, "A time-varying-based robust control for the parking problem of a wheeled mobile robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1996, pp. 3099-3104.
- [10] H. An, T. Yoshino, D. Kashimoto, M. Okubo, Y. Sakai, and T. Hamamoto, "Improvement of convergence to goal for wheeled mobile robot using parking motion," in Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots Systems, 1999, pp. 1693-1698.
- [11] M. Ohkita, H. Mitita, M. Miura, and H. Kuono, "Traveling experiment of an autonomous mobile robot for a flush parking," in Proc. 2nd IEEE Conf. Fuzzy System, vol. 2, Francisco, CA, 1993, pp. 327-332.
- [12] K.Y. Lian, C. S. Chin, and T. S. Chiang, "Parallel parking a car-like robot using fuzzy gain scheduling," in Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Control Applications, vol. 2, 1999, pp. 1686-1691.
- [13] Zhu C. and Rajamani R., "Global positioning system-based vehicle control for automated parking", IMechE 2006 Vol.220 Part D:J. Automobile Engineering.