

# 先進停車導引系統之實現與研究

許駱謙、劉景富、許家興、陳旻瑾、柯明寬  
財團法人車輛研究測試中心

## 摘要

本研究提出完整的先進停車導引系統開發程序與實車驗證結果，系統架構可分成幾個部分，包含環境地圖、路徑規劃與循跡控制。停車空間則採用超音波感知器偵測，駕駛者可經由使用者介面加以修正或調整停車位置，經過此程序後，方向盤將依據路徑規劃與車輛位置估測法而運作，以達到路徑循跡之效果。本文所提出的系統模擬與實驗結果在平行停車模式與倒車入庫模式皆有相當良好的成效，且根據 Two Turns mode 的模式，可以計算出倒車最短路徑，僅需車長的 1.5 倍，相當適合台灣狹小的停車空間，且經由循跡控制策略的實現將使停車更佳安全與舒適。

關鍵詞：先進停車導引系統(Advanced Parking Guidance System, APGS)；電動輔助轉向系統(Electric Power Steering System, EPS)；路徑規劃(Path Planning)；循跡控制(Tracking Control)。

## 1. 前言

隨著科技日新月異，社會大眾對停車安全之期待與需求日益增加，因此近年來先進停車導引的主題也相對被重視，市區停車受限於停車空間，有效的提高停車安全，避免人員或車輛的碰撞是有其必要性。就目前而言，世界各大車廠與研究機構，紛紛投入發展先進停車導引系統，INRLA 團隊在自主車上建立一套完整感測系統，其路徑規劃係以 model-based 加以估測，且利用超音波感知器偵測停車空間。2004 年 Toyota 推出商用的先進停車導引系統，將此系統安裝於 Prius 車款上，2007 年 Lexus 車廠也相繼推出先進停車導引系統。

本研究以 model-based 的技術來實現先進停車導引，且利用 Two Turns model 規劃出最短停車路徑與循跡控制策略。系統的架構包含有環境地圖建置、路徑規劃與循跡控制。圖 1 為本文系統架構。

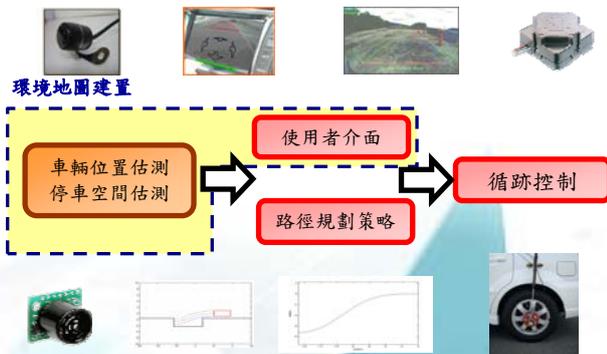


圖 1 系統架構圖

## 2. 研究方法

先進停車導引系統的實現必須仰賴良好的感測技術，感測技術將用於辨識週遭環境及障礙物，提供行車電腦決策資訊，作為障礙物閃避與行進路徑規劃之參考。環境地圖建置(Environment Mapping)構成元件有車輛位置估測、停車空間估測與使用者介面等，而環境地圖建置即是將距離與影像感知器獲得資料進行處理後，建立以車輛為中心座標之週遭環境地圖，並獲得本車與目標停車空間(停車格)之相對位置關係，系統再結合本身車輛之速度、陀螺儀與 GPS 等訊號，將可精確的估算出車輛本身與週遭物體之相對位置關係；以進行倒車、平行停車之路徑規劃，並結合路徑循跡方法使車輛循著規劃軌跡來進行移動，同時藉由車上的感測數據比對車輛動態是否有依循規劃路徑行駛。

先進停車導引系統整合超音波感知器、攝影機、陀螺儀與增量式輪速計等裝置，圖 2 為本文所使用的實驗平台，同時進行資料處理與比對，以增進車輛週遭地圖資料精確性。然而，市售車輛考慮成本與實際需要，無法使用昂貴的感知器或整合多個感知器提升 Mapping 的強健性。以先進停車導引系統的觀點來看，只需要在車輛的側方及後方裝設距離感知器與影像感知器，即可以完成車輛側邊的停車空間及障礙物偵測。目前 Lexus、Audi 及 BMW 均運用此方法作為先進停車導引系統的停車空間感測判斷。本系統之研究方法須瞭解先進停車導引系統之整體操作程序，以下將分別針對影像調教方法、停車空間估測法、車輛位置估測法、電動輔助轉向系統、路徑規劃與循跡控制作說明。



(a) 微控制器



(b) RTK-GPS



(c) 增量式輪速計



(d) 實驗平台

圖 2 實驗平台

## 2.1 影像調教方法

由於倒車攝影機的廣角特性，因此會有魚眼效應與扭曲失真的產生。其中鏡頭相機扭曲失真(Distortion)校正較為困難，一般的矯正作法為使用快速的二維非線性模型去模擬扭曲失真，但是影像邊緣的部分，由於影像過度的失真，與實際值的誤差對比較為明顯；而平行停車與倒車入庫正好都使用到畫面邊緣的部分，因此在先進停車導引的應用上，有需要再使用更為精確的非線性模型來消除這些誤差。本文是使用 MATLAB 及外掛的 Camera Calibration Toolbox 程式，來獲得相機鏡頭的各項參數，儘量消除因扭曲所產生的影像誤差。其程序可參考圖 3 與圖 4 的操作介面得知：經過不同的角度圖像比對後，該程式即會產生相機校正參數表(如表 1 所示)，我們只要在本機影像處理程式作修改後，即由原扭曲變形的影像得到平坦真實尺寸的圖像，以利計算相對的距離及方向供系統 Mapping 使用。

表 1 相機校正係數

Coefficient	Symbol	Value	Error
Focal Length	Fc	[388.56187 376.04445]	[6.34058 5.31317]
Principal Point	Cc	[345.80255 166.98228]	[2.53375 5.77377]
Skew	Alpha_c	[ 0.00000 ] [ 0.00000 ]	X
Distortion	Kc	[-0.27557	[ 0.00870
		0.03128	0.00217
		0.03964	0.00332
		-0.00987	0.00107
		0.00000 ]	0.00000 ]
Pixel error	Err	[7.61602 7.28579]	X

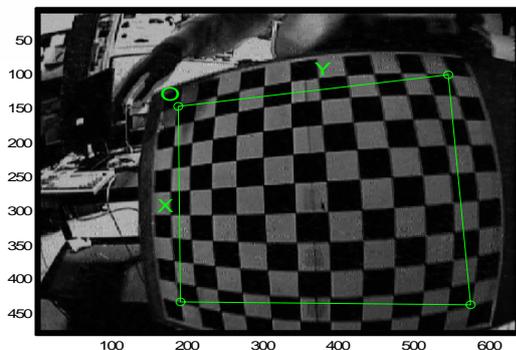


圖 3 在圖像上選擇邊界點

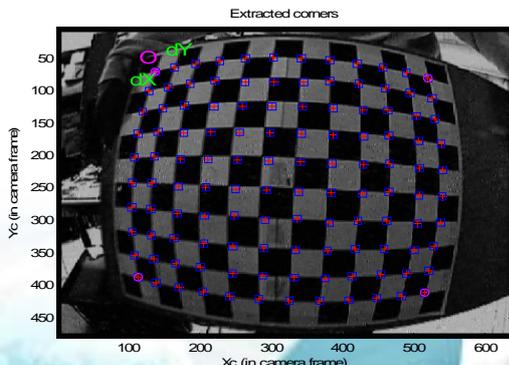


圖 4 扭曲失真校正完成(十字點均對齊格點的交接處)

## 2.2 停車空間估測法

目前台灣市售車輛大多於後保險桿裝配超音波感知器，主要作為倒車輔助系統後方障礙物之距離感測用途。超音波對於短距離具有良好的感測性，而且具有訊號容易解析、不受光線影響及成本低廉等優勢，較毫米波雷達與雷射等高價位感知器易於商品化，本文亦使用此元件。

先進停車導引系統的停車空間偵測，需要準確判斷道路兩旁車輛之位置，以計算停車空間是否足夠，並預估停車格的二維座標。然而，超音波感知器之特性如圖 5 所示，其訊號發射的角度範圍廣，不像雷達或者雷射具有高指向性，使用一組超音波感知器只能確定感測範圍內有物體存在，而對於凹凸的表面或空間，僅能獲得如圖 6 之結果，無法符合自動停車導引系統停車空間偵測的準確度需求。

因此，較為變通的方法為在車輛側方向裝設兩組以上超音波感知器，利用幾何方法推算出物體實際位置，其原理如圖 7 所示，障礙物所在之位置可由兩道以上的圓弧推算出障礙物的座標，若超音波掛載於移動的車輛上，亦可以經由圓弧與橢圓之幾何交點推算出物體的實際位置[1]。

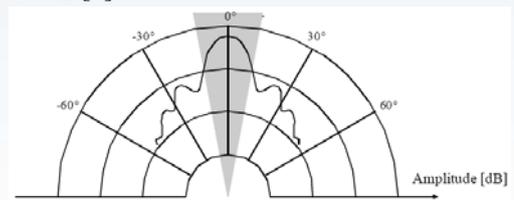


圖 5 超音波特徵曲線圖

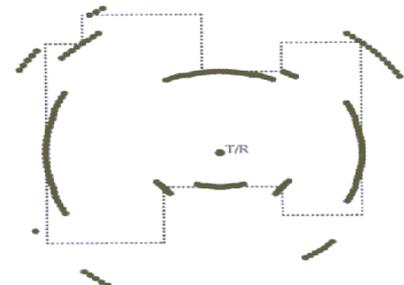


圖 6 掃描凹凸空間之曲線圖

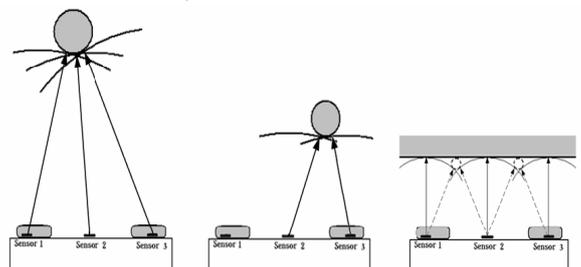


圖 7 多組超音波感知器進行障礙物位置估測

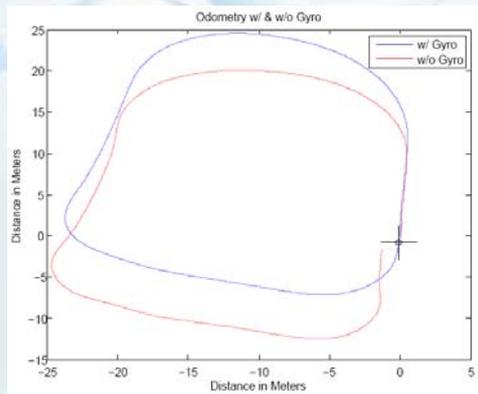


圖 8 陀螺儀與輪速差位置相較圖

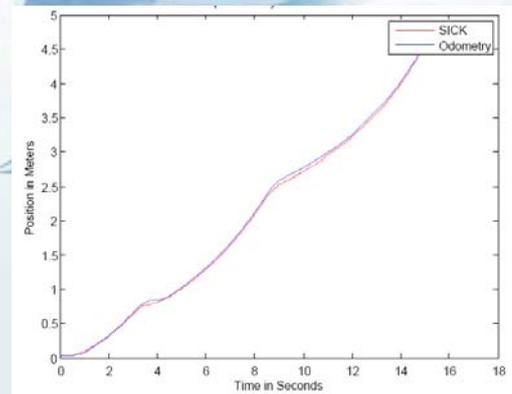


圖 10 低速時輪速差法與感知器之誤差比較圖

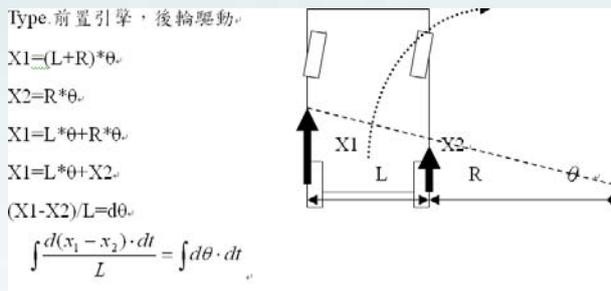


圖 9 利用兩輪轉速差計算其車輛轉向角

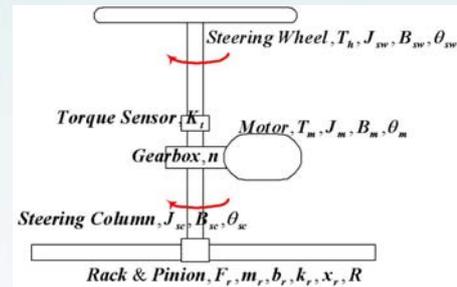


圖 11 電動輔助轉向系統之示意圖

### 2.3 車輛位置估測法

利用車輛上既有的感知器做車輛行駛路徑記錄以獲得車輛位置，將以低成本的方式來回饋控制系統目前位置。圖 8 為使用陀螺儀與後輪轉速差相較之結果，該圖有二個曲線，w/ Gyro 線代表車上所裝置的陀螺儀(Gyro)記錄之車輛向前行走的軌跡線；w/o Gyro 代表兩後輪之輪速訊號計算得來，其原理是因為在車輛轉彎時因後軸內外輪轉速不同，即可利用此特性計算內外輪之輪速差來判斷車輛的轉向軌跡；若兩輪沒有輪速差時，則表示車輛為直線行駛；由於車輛不管在直行或轉向皆可由左右兩輪的輪速差來得知，故車輛當前之位置點獲得可由兩後輪之轉速差計算。以轉向為例，主要是依據車輛轉彎時會有內外輪的速度差，故可由車輪行走之輪速訊號即可得知距離的差異，並求得轉向角與 L 之關係；其幾何相關可參考圖 9 所示的車輛測程推算法[2]，其中  $\theta$  為車輛路徑轉向角度值，利用此值做為路徑循跡參考之用。圖 10 為低速時計算值與感知器回傳值之差異，結果可看出兩者非常接近。可知此測程法於低速行駛之條件下，可以被採用來預估車輛的位置與方向角。此測程法雖然不適用高速行駛之情形(因為輪胎有側滑現象)，然而，倒車系統是屬於非常低速的條件下才會作動，故可以應用此方式進行後續的控制器設計。

### 2.4 電動輔助轉向系統

就先進停車導引而言，需有一主動元件來操作方向盤轉動。以利於控制車輛的姿態，本文以車輛中心自行研發的電動輔助轉向系統(Electric Power Steering System, EPS)為平台。電動輔助轉向系統構成元件包含扭力感知器、永磁同步馬達、減速齒輪、機柱、齒條與小齒輪機構所組成，其轉向系統之模型如圖 11 所示。根據牛頓定律可將轉向系統的運動方程式表示如下：

$$T_h - K_t(\theta_{sw} - \theta_{sc}) - B_{sw}\dot{\theta}_{sw} = J_{sw}\ddot{\theta}_{sw} \quad (1)$$

$$T_{mn} + T_f - B_{sc}\dot{\theta}_{sc} + K_t(\theta_{sw} - \theta_{sc}) - k_r(\theta_{sc} - \frac{x_r}{r}) = J_{sc}\ddot{\theta}_{sc} \quad (2)$$

$$\frac{k_r}{r}(\theta_{sc} - \frac{x_r}{r}) - F_r - b_r\dot{x}_r = m_r\ddot{x}_r \quad (3)$$

其中， $T_h$  為駕駛者由方向盤輸入的扭力， $K_t$  為 torsion bar 的剛性常數， $J_{sw}$  與  $B_{sw}$  分別為方向盤的轉動慣量常數與阻尼常數， $\theta_{sw}$  與  $\theta_{sc}$  分別為方向盤的轉角與機柱上的轉角， $T_{mn}$  馬達輸出的扭力， $T_f$  機柱上的摩擦扭力， $J_{sc}$  與  $B_{sc}$  分別為機柱之轉動慣量常數與阻尼常數， $k_r$  為齒條與小齒輪間的剛性常數， $x_r$  齒條的位移， $r$  為 stroke ratio，且小齒輪的角度等同於機柱上的角度。 $F_r$  為來自於路面的回正力 (alignment force)， $m_r$  與  $b_r$  分別代表齒條的質量與阻尼常數。

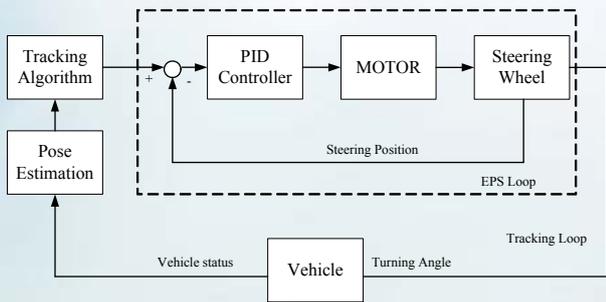


圖 12 PID 控制架構圖

完成電動轉向系統的模型建立，即可對此系統進行控制器設計，目前以 PID 控制器為主，PID 參數利用模擬方式求得，控制架構圖如 12 所示。

### 2.6 路徑規劃

如何將車輛有效率的停入空間可分解三個程序，首先是依據車輛目前的位置，計算出程式初始值以推導出目標空間座標，接續第二個動作是要計算出何處是反轉方向盤之位置，以便後續操作順利進入停車空間，此時的車輛行進方向是往後進行的；最後的動作即操控車輛向前移動至停車空間之中央位置。

在相關文獻中可發現有許多的路徑規劃方式來達成，如圖 13 之 SCC -paths(Simple Continuous Curvature paths)方法[3]，即以 Non-Holonomic 方式推導車輛移動過程皆以連續轉彎之曲線前行，以符合實際車輛的操作方式得到正確的路徑規劃。但由於 SCC 需要的路徑較長，故本文決定使用 Two Turns 方式來規劃最短的路徑以便應用在台灣狹小的停車空間，其路徑軌跡點如圖 14 所示，可以與圖 13 比較得知 Two Turns 缺少直線移動的距離，如果在橫向停車時比 SCC 方式節省空間。

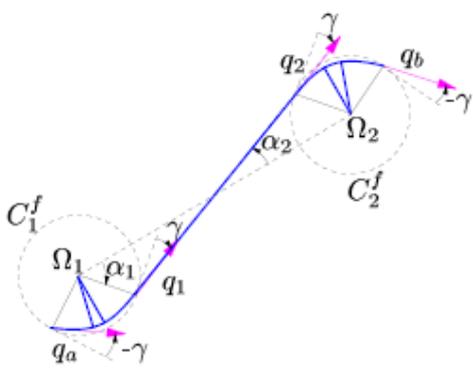


圖 13 Simple Continuous Curvature paths

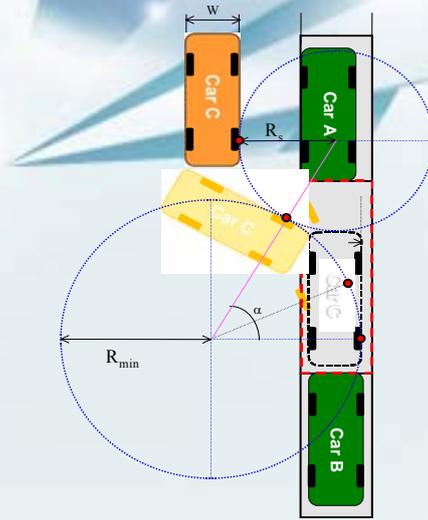


圖 14 Two Turns 路徑

### 2.7 循跡控制

循跡演算法在國外使用已有多歷史，其主要作用為分段控制自走車的轉向曲率，讓自動駕駛車輛行駛於規劃之路徑上，由於車輛的轉向使用阿克曼機構[4]，因此具有 Non-Holonomic 限制，使用循跡策略的優點是在控制上不會有 Overshot 的現象，可以使倒車的轉向更加的穩定平滑。先進停車導引系統之軌跡規劃藉由預視點的座標曲率、弧線的計算，可以將車輛由目前的位置，移動到目標位置上，其原理如同追逐在車輛前方規劃的路徑上某一個點，因此稱循跡追蹤方法。

循跡控制主要考慮在每個時間點下，位置與方向盤轉角的關係，使車輛可以保持在規劃路徑上。圖 15 為循跡控制之原理，圖中圓定義為通過車輛目前位置與目標點位置，經由幾何關係可推算出迴轉半徑，最後，控制方向盤轉角以達到此迴轉半徑。

本文將循跡控制策略實現在平行停車模式與倒車入庫模式，然而，在實現循跡控制策略有一重要因素，即預視點長度，此值將影響到循跡的穩定度與精確度。本文中有探討不同預視點長度對循跡系統之影響程度，將於實驗章節討論。

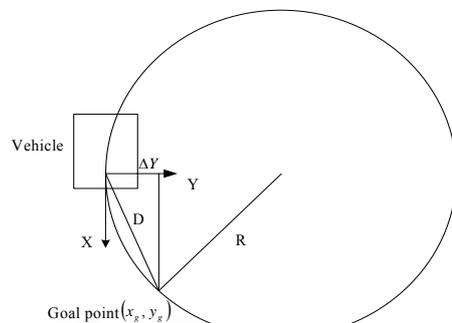
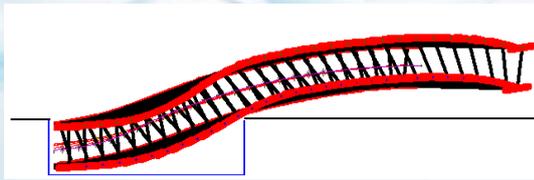
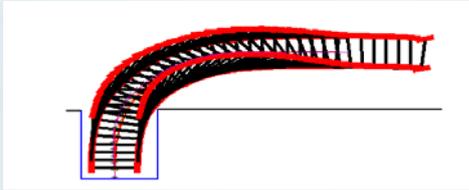


圖 15 循跡控制策略



(a) 平行停車模式



(b) 倒車入庫模式

圖 16 循跡控制模擬

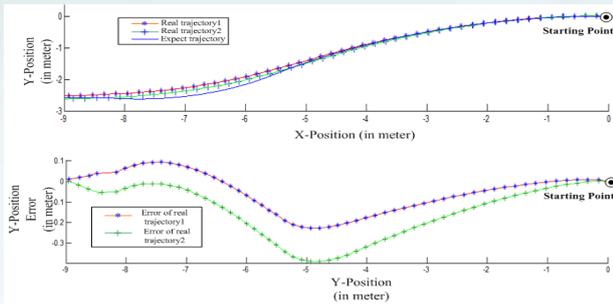
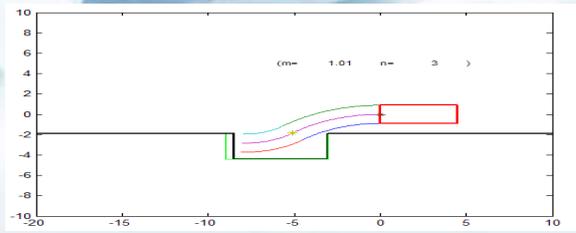
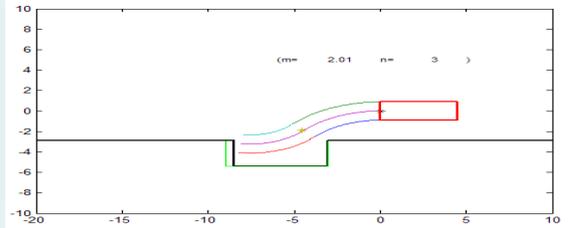


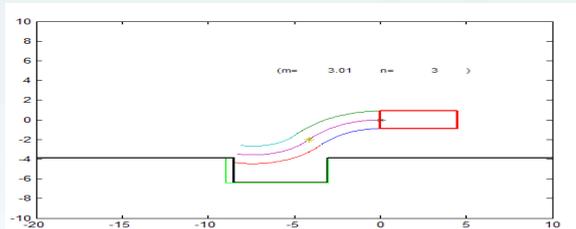
圖 17 平行停車模擬結果



(a)  $m=1.01, n=3$



(b)  $m=2.01, n=3$



(c)  $m=3.01, n=3$

圖 18 不同起始位置之路徑規劃結果

### 3. 研究結果

#### 3.1 系統模擬結果

一般而言，在進行路徑循跡模擬時，有些重要的參數，包含有車輛的寬度與車輛最小迴轉半徑，圖 16 為本文在 MATLAB 環境下所建立的模擬介面。圖中係以 Two Turns 來進行軌跡路徑模擬。

此外，循跡控制在 MATLAB 環境下模擬，亦有相當良好的性能，由圖 17 中可觀察出在平行停車模式下，最大 y 軸向的誤差僅有 30 公分，然此結果仍在使用的合理範圍內，因其最大的誤差量產生於 Two Turns 的連接處，此誤差量並不影響最終停車位置。圖 18(a)~(c) 是根據 Two Turns 公式計算所產生的路徑軌跡線，預計將結合影像選定停車空間的功能，並結合循跡策略方式所得到的模擬結果。圖中即模擬車輛停在距離停車格旁 1 公尺處( $m=1$ )及距離停車格前方 1 至 3 公尺處( $n=1,3$ )，該倒車路徑的軌跡線長度及反轉點位置為何，可方便系統設計者判斷是否可以停入該停車格。

#### 3.2 實車驗證結果

不管模擬的結果是否成功，以實車進行系統的驗證是有其必要性；主因在於模擬的模型可能會忽略一些車輛動態特性，以致於在實車驗證與模擬結果有些差異。

先進停車導引系統的第一步驟為利用超音波感知器偵測出停車空間，然在此偵測狀態下車輛的車速必須

低於 10 km/hr。由圖 19 可觀察出，系統偵測出兩輛車間的距離為可停車空間，且其在橫向與縱向的距離誤差量相當小。圖 20 為針對不同的預視點長度所進行的試驗，由圖中可以觀察出較長的預視點長度將有較長的收斂時間且較少震動，反之，若預視點長度太短會有較短的收斂時間，但會造成系統過度震盪，然而，選擇一個適當的預視點長度是重要的。本文中預視點長度為 200 公分。

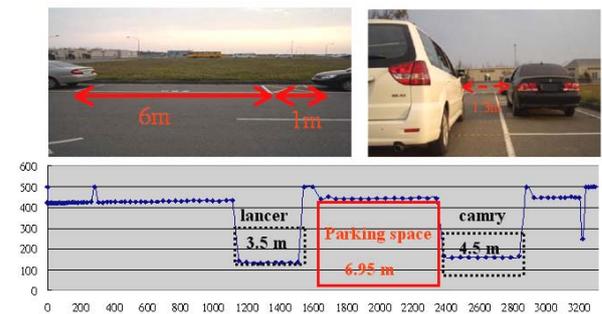


圖 19 超音波掃描停車空間

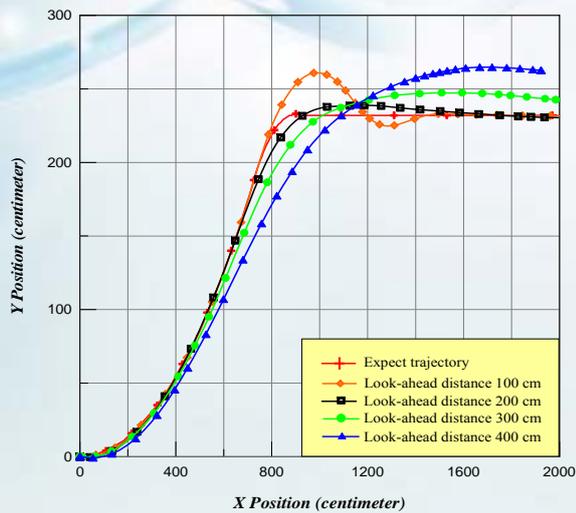


圖 20 不同預視點實驗結果

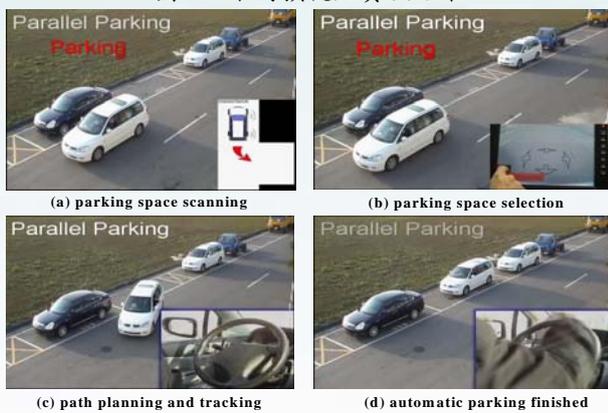


圖 21 平行停車模式

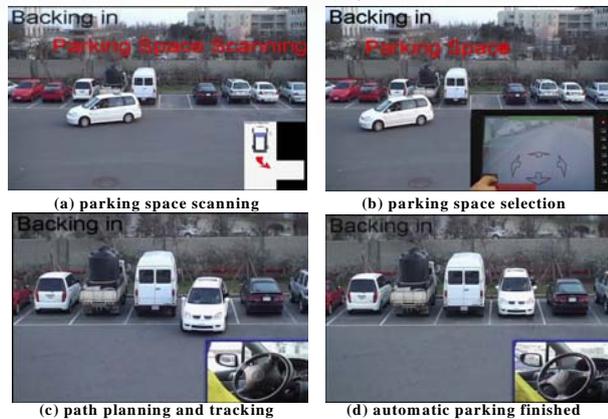


圖 22 倒車入庫模式

圖 21 與圖 22 為先進停車導引系統的實際流程圖，由圖中可以更詳細看出系統的作動程序。圖 23 為在進行平行停車之實驗結果，圖中有兩組曲線分別代表路徑與方向盤轉角，由圖上可知在迴轉點有較大的誤差與模擬結果一致。圖 24 為比較車輛位置估測法與高精度 GPS 的差異，由圖中可知在倒車入庫模式下兩者的差異並不大，仍在可接受的範圍內，然此結果亦有改善空間使先進停車導引系統在路徑循跡上更佳完善。

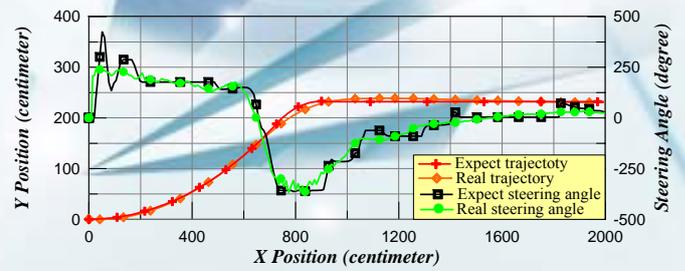


圖 23 平行停車實驗結果

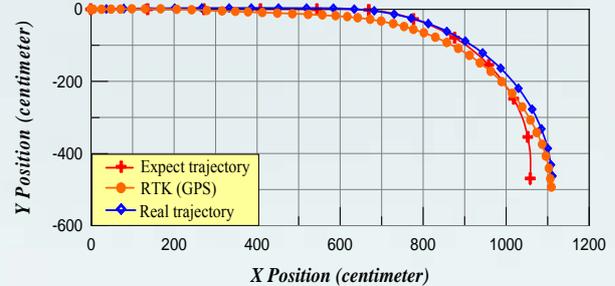


圖 24 實際路徑與 GPS 比較圖

#### 4. 結論

完整的停車系統必須包含有整合式的使用者介面、路徑規劃與循跡控制。本文所發展出的系統具有兩優勢：停車空間僅需該車長的 1.5 倍與橫向距離在 0.5 到 2 公尺範圍內皆可有效停入預設空間。本研究利用 Two Turns model 規劃出最短路徑，相當適合台灣狹小的停車空間，且藉由循跡策略使車輛跟隨預設路徑行走，以達到完成自動化之停車。本研究發展快速安裝介面，且不需做任何複雜的安裝與調校。

因為輪胎並非是均勻的圓柱體，輪胎受負載後，造成輪胎變形，若依固定的圓周長度推算距離將造成誤差，且此值會隨著行走距離增加而放大，雖然高解析度的 GPS 可以解決此問題，然對市售系統而言其價格太過昂貴，未來將尋求以整合式的感測系統，利用距離估測資料融合的方式，藉以提昇先進停車導引循跡控制之準確性。

#### 5. 致謝

研究承蒙經濟部計畫支持（計畫編號：97-EC-17-A-16-R7-0789），才足以順利完成，在此獻上誠摯的謝意。

#### 6. 參考文獻

- [1] K. Jiang and L. D. Seneviratne, "A sensor guided autonomous parking system for nonholonomic mobile robots," IEEE International Conference on Robotics & Automation 1999.
- [2] Kooktae Lee, Dalhyung Kim, Woojin Chung, Hyo Whan Chang, PalJoo Yoon, "Car parking control using a trajectory tracking controller," SICE-ICASE International Joint Conference 2006.
- [3] R. Craig Coulter, "Implementation of the pure pursuit tracking algorithm", CMU-RI-TR-92-01.

[4] R C. Coulter; Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January, 1992.

