

線控四輪轉向系統之車輛穩定控制研究

張舜長 林裕翔 蘇育斌
大葉大學機械與自動化工程學系
51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文主要探討線控四輪轉向系統之車輛穩定控制，由於線控四輪轉向系統是由馬達驅動轉向取代傳統轉向柱，因此可在其控制核心內加入車輛穩定控制之策略，使車輛能達到四輪轉向之效果，同時控制車輛之重心側滑角及橫擺率，使車輛在行駛時都能保持在最低的重心側滑角及橫擺率的範圍內，以增加車輛在低速的機動性和高速過彎時的安全性、操控性以及穩定性。本研究利用模擬軟體 CarSim，分析模擬車輛行駛時之穩定性。

本研究運用分散式架構以及 CAN Bus 通訊協定技術，建構線控轉向系統實驗平台。線控四輪轉向控制實現於線控轉向系統實驗平台上，驗證線控前輪轉向與線控後輪轉向，利用閉迴路控制，除了精準控制前輪轉向，依據車速判斷，達到後輪低速逆相位轉向及高速同相位轉向之控制目標。在控制器中，加入主動轉向之可變轉向比功能，依據車速高低、方向盤角度、前輪轉向角度及加減速度道等的訊號，整合辨識判斷後，調整轉向比，因應車輛動態狀況進行適度調整。

關鍵詞：線控轉向系統，四輪轉向，車輛穩定控制，重心側滑角，CarSim

Development of Four-wheel-steering for a Vehicle with a Steer-by-wire System

SHUN-CHANG CHANG, YU-SHIANG LIN and YU-BIN SU
Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University
168 University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

This study focuses on the stability control of a vehicle by a four-wheel steer-by-wire system. Vehicles with this type of steering are not subject to the limitations of traditional steering systems. The stability control of a vehicle commands the front and rear steering angles with the objective of referencing the sideslip angle and yaw-rate signals corresponding to the desired handling behavior. Under this control system, the vehicle can be stably handled at high or low speeds in cornering. In this study, CarSim software is used to verify the proposed method for stability control.

The construction of the distributed steer-by-wire system experimental platform is based on the CAN (controller area network) bus technique, which uses this platform to verify the system. Use of closed-loop control is studied, wherein the rear-wheel steering direction depends on the speed of the

vehicle. At slow speeds, the rear wheels move in the opposite direction from the front wheels; whereas, at high speeds, the four wheels all move in the same direction. The controller features an active steering function aimed toward optimal control of the front-wheel steering angle via a variable steering-gear ratio.

Key Words: steer-by-wire system, four-wheel-steering, stability control, sideslip angle, CarSim

一、前言

車輛轉向性能是評價車輛的主要性能之一，而轉向系統的性能直接影響到車輛的操縱穩定性，在1990年Ackermann [8] 提到，車輛在行駛並且轉彎下產生的側向力視同一可變的質量，而這可變的質量力量將可以產生強大的力量來影響車身的橫擺度，進而在結構方面會加入防傾裝置等設施，來抑制車輛的行駛不穩定，而各車廠也開始發展以電子設施來控制車輛穩定性的設備裝置研究。轉向系統對於確保車輛的安全行駛、減少交通事故以及保護駕駛員的人身安全、改善駕駛員的工作條件有著重要的作用。

未來先進車輛之轉向系統發展是朝向能改善行車動態控制、提升駕駛舒適性及增加行車安全等方向，2001年Abe等人 [7] 等學者提出直接以控制器的方式來控制車輛橫擺力矩的方法，來穩定車輛在側滑度方面的控制，減少車輛行駛時側向力的產生。其中線控四輪轉向系統（four-wheel steer-by-wire, 4WSBW），由於減少轉向機柱與一些機械機構又能改善上述特性，完全擺脫了傳統轉向系統各種限制，在設計轉向系統上更富彈性。因此，先進的主動底盤控制技術是現代車輛發展的重要方向，車輛之主動底盤控制技術需要控制車輛在三維空間裡的六種運動（縱向，側向，垂直方向以及側傾，橫擺和俯仰），進而改善汽車的操縱穩定性、平順性以及動力性和制動性。

二、線控四輪轉向系統車輛穩定控制之設計

（一）線控四輪轉向系統架構

線控四輪轉向系統設計概念，如圖1所示。此系統可將之區分成三個子系統：

- 子系統（一）—控制系統方面：可根據路況及駕駛者需求來控制整車行車穩定性。
- 子系統（二）—駕駛者與轉向系統之人機介面方面：此子系統提供回饋扭力給駕駛者及車輪轉向角位置資訊給控制器，以便作回饋修正。此子系統包含位置感知器、扭力感知器及機構以便將扭力回饋給駕駛者。

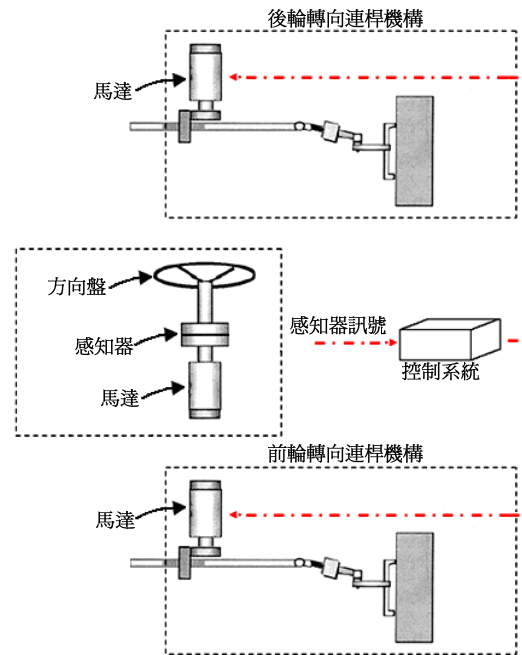


圖 1. 線控四輪轉向系統設計概念

- 子系統（三）—車輪與轉向連桿機構：此子系統是根據駕駛者操作之資訊及控制器所下達之命令來控制車輪轉向角位置。而且藉由此子系統也可以將路況反應給控制器。

（二）四輪轉向車輛之轉向原理

四輪轉向的車輛的特性及功用包括：轉彎時的動作過程及時間縮短，可省去車輛因方向改變後，使後輪胎產生橫向力之遲延時間的修正動作，而完成轉彎的動作，故過小彎時，方向盤不需轉太多圈。轉彎時的穩定性高，因輪胎滑動減少，故變換車道時操作容易，車身擺動減少，轉向時輕巧靈活。直線行駛時安定性高，如遇不良路面或橫風吹襲時，安定性較二輪轉向的車輛為高，且輪胎的跳動及擺動不致使方向盤自轉，減少駕駛者的疲勞。有較小的迴轉半徑，在小路或巷道中有較好的迴轉性，且可適應較小的停車空間。後輪轉向時的相位，低速逆相位轉向及高速同相位轉向，如圖2及圖3所示 [2]，為四輪轉向車輛二自由度的自行車動

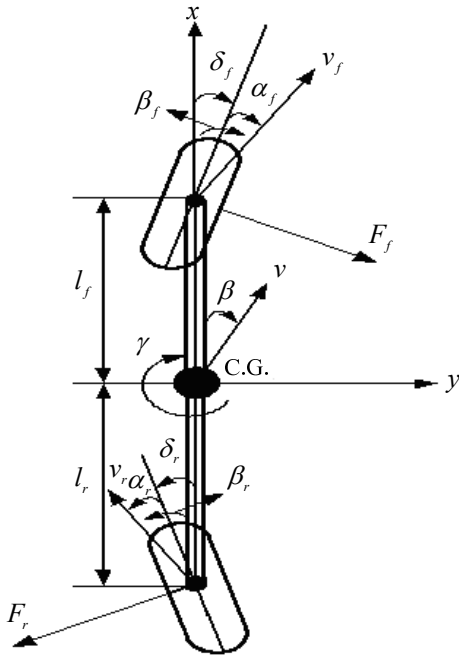


圖 2. 四輪轉向車輛在低速過彎之運動分析 [2]

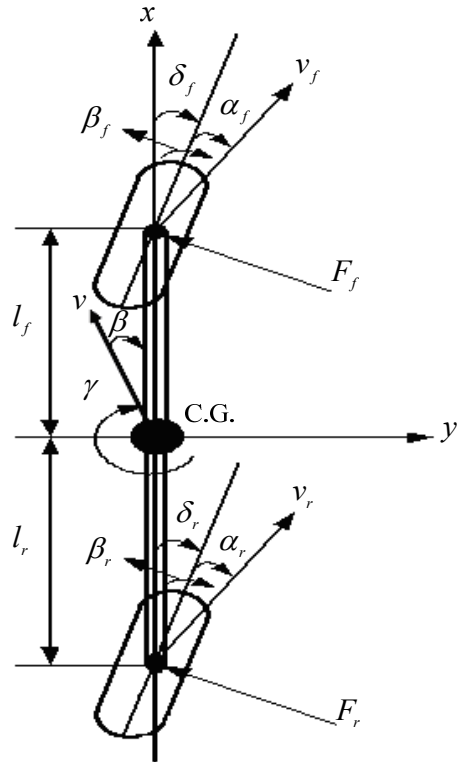


圖 3. 四輪轉向車輛在高速過彎時之情形 [2]

態模型架構，其代表二自由度的自行車轉向動態模型。當車輛轉彎時，根據牛頓第二定律，車輛的側向運動方程式 (lateral motion) 可表示如下：

$$ma_y = F_f + F_r \quad (1)$$

車輛在一定行駛速度下轉向時，其中車輛之側向加速度為 [2]：

$$a_y = v(\beta + \gamma) \quad (2)$$

將 (2) 式代入 (1) 式表示為：

$$mv(\beta + \gamma) = F_f + F_r \quad (3)$$

其中 m 為車輛的重量 (kg)， β 為車身重心側滑角 (deg)， v 為車輛前進速度 (km/hr)， γ 為車輛重心橫擺率 (rad/sec)， a_y 為車輛的側向加速度 (km/sec²)， F_f 和 F_r 為前後輪胎之側向力 (N)， I 為車輛慣性矩 (kg-m²)， l_f 和 l_r 為車輛重心與前後車軸之間的距離 (m)， α_f 和 α_r 為前後車輪的側滑角 (rad)， δ_f 和 δ_r 為前後輪轉向角度 (rad)。車輛的橫擺運動方程式 (yaw motion)，可表示如下：

$$I\dot{\gamma} = F_f l_f - F_r l_r \quad (4)$$

前後車輪重心側滑角 β_f 、 β_r ，可表示如式 (5a, b) [3]：

$$\tan \beta_f = \frac{v \sin \beta + l_f \gamma}{v \cos \beta} \quad (5a)$$

$$\tan \beta_r = \frac{v \sin \beta - l_r \gamma}{v \cos \beta} \quad (5b)$$

當 $\sin \beta$ 趨近於 1 時，可求得新的前後輪重心側滑角 β_f 、 β_r ：

$$\therefore \beta_f \approx \beta + \frac{l_f \gamma}{v} \quad (6a)$$

$$\therefore \beta_r \approx \beta - \frac{l_r \gamma}{v} \quad (6b)$$

前後車輪側滑角 α_f 、 α_r ，表示如式 (7a, b)：

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f \gamma}{v} - \delta_f \quad (7a)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{l_r \gamma}{v} - \delta_r \quad (7b)$$

假設前後車輪的轉向剛性 (cornering stiffness) 分別為 C_f 、 C_r ，當重心側滑角 β 很小且趨近於零，則作用在 y 方向之作用力可表示如式 (8a, b)：

$$F_f = C_f \alpha_f \quad (8a)$$

$$F_r = C_r \alpha_r \quad (8b)$$

將 (7a)、(7b)、(8a)、(8b) 式代入 (3)、(4) 式，可表示如下。

側向運動方程式 (lateral motion)：

$$m v (\dot{\beta} + \dot{\gamma}) = C_f \left(\beta + \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \delta_f \right) + C_r \left(\beta - \frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \delta_r \right) \quad (9)$$

橫擺運動方程式 (yaw motion)：

$$I \dot{\gamma} = l_f C_f \left(\beta + \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \delta_f \right) - l_r C_r \left(\beta - \frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \delta_r \right) \quad (10)$$

(三) 回饋控制之線控四輪轉向穩定控制

由於二輪轉向車輛，只有前輪作轉向，因此在車輛穩定控制上往往有所限制，使車輛穩定控制無法發揮出最有效之功能。反觀四輪轉向車輛，除了前輪會轉向動作外，其後輪亦會做轉向動作，經由 (1)、(2) 式所推導出一般車輛之自行車模式之運動分析後，本研究亦進一步推導出四輪轉向穩定控制的車輛自行車模式之運動分析，由圖 2 與圖 3 可得 (10)、(11) 式：

$$\delta_f = \beta + \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \alpha_f = \beta + \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \frac{m_f v (\dot{\beta} + \dot{\gamma})}{C_f} \quad (10)$$

$$\delta_r = \beta - \frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \alpha_r = \beta - \frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \frac{m_r v (\dot{\beta} + \dot{\gamma})}{C_r} \quad (11)$$

由於四輪轉向車輛利用後輪同轉向來控制重心側滑角為零的範圍，因此可令 $\dot{\beta} = 0$ 代入 (10)、(11) 式，則可簡化為：

$$\delta_f = \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \alpha_f = \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \frac{m_f v (\dot{\beta} + \dot{\gamma})}{C_f} \quad (12)$$

$$\delta_r = -\frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \alpha_r = -\frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \frac{m_r v (\dot{\beta} + \dot{\gamma})}{C_r} \quad (13)$$

將 (12)、(13) 式相除後，可得到前輪與後輪之轉向比：

$$K(v) = \frac{\delta_r}{\delta_f} = \frac{\beta - \frac{l_r \dot{\gamma}}{v} - \alpha_r}{\beta + \frac{l_f \dot{\gamma}}{v} - \alpha_f} = \frac{C_f [C_r (v \beta - l_r \dot{\gamma}) - m_r v^2 (\dot{\gamma} + \dot{\beta})]}{C_r [C_f (v \beta + l_f \dot{\gamma}) - m_f v^2 (\dot{\gamma} + \dot{\beta})]} \\ = \frac{C_f [-C_r l_r \dot{\gamma} - m_r v^2 \dot{\gamma}]}{C_r [C_f l_f \dot{\gamma} - m_f v^2 \dot{\gamma}]} \quad (14)$$

其中， $K(v)$ 為本研究所提出計算的前後輪轉向角比率，透過 CarSim 內部之車輛模型在不同車速模擬，可得到在不同車速轉向時之 $K(v)$ ，如圖 4 所示。當車輛行駛於某一速度 v 之情況下轉向時，後輪會依照當時車速及前輪轉角來轉向至正確的相位及轉角。其中，四輪轉向車輛在低速轉向時，其 $K(v)$ 之值為負，代表後輪為反相位轉向；四輪轉向車輛在高速轉向時，其 $K(v)$ 之值為正，代表後輪為同相位轉向，四輪轉向車輛如果在 $K(v)=0$ 時之車速轉向時，則後輪不轉向。這是因為傳統車輛如在低速轉向時，其重心側滑為正值，代表車頭會朝向迴轉之曲率中心外側，所以必須讓後輪為反相位轉向，才能使重心側滑角減為零；一般車輛如在高速過彎時，其重心側滑角為負值，代表車頭會朝向迴轉之曲率中心內側，所以必須讓後輪為同相位轉向，才能使重心側滑角接近於零 [3]。

四輪轉向穩定控制之車輛於高速轉向時無法有效降低重心側滑角，因此光靠 $K(v)$ 轉向控制是不夠的。為了克服這個缺點，本研究加入重心側滑角回饋控制，並控制車輛後

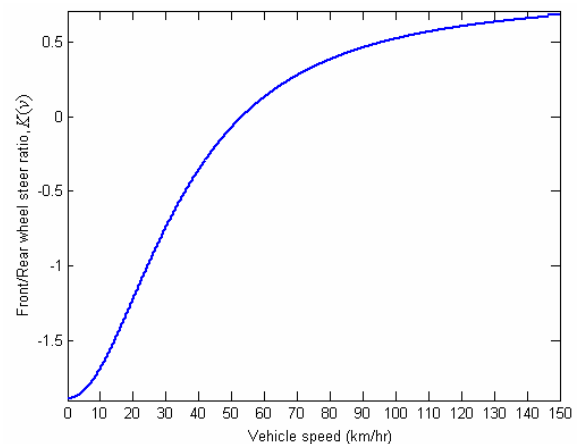


圖 4. 在不同車速下計算的前輪與後輪之轉向比

輪轉向時，會依據車輛之前輪轉向位，判斷後輪轉向之轉向位，使其一輪之轉角將比另一輪之轉角來的大，再透過重心側滑角的回饋，使能在高速時更有效地降低重心側滑角，其具回饋控制的四輪轉向穩定控制架構如圖 5 所示 [2]。

其中 β_{est} 為最低重心側滑角值為零，並與實際 的重心側滑角作判斷，計算出誤差量，將其誤差量轉換成補償量，使車輛在高速時有好的穩定效果，不僅能將車輛的重心側滑角控制好，與單純控制前、後輪轉向比較更能將橫擺率有效降低。

其中後輪轉角對重心側滑角之穩態增益為：

$$\beta_0 = \frac{\delta_r}{\beta}$$

$$= \frac{C_r[l_r m v^2 + l_r(-l_f C_f + l_r C_r) - (l_f C_f^2 + l_r C_r^2)]}{(C_f + C_r)(l_f C_f^2 + l_r C_r^2) - (-l_f C_f + l_r C_r)^2 - m v^2(-l_f C_f + l_r C_r)}$$

(15)

其中的 K_β 主要是加快補償之時間，是透過 MATLAB NCD tool box 所找出的，其 K_β 值為 2.2366。

三、車輛穩定控制模擬結果分析

根據回饋控制之線控四輪轉向穩定控制所探討出的車輛穩定控制法則，接著再透過 CarSim 模擬測試，並將車輛之煞車系統關閉，純粹探討車輛在轉向且無煞車時之車輛動態。表 1 為模擬車輛參數 [1]。

在車輛穩定控制模擬測試將分為三種路面模式進行，測試路面以柏油路面、積雪路面與積水路面。模擬測試之車輛參數如表 1 所示，在 CarSim 下設定不同的路面狀況，並與傳統轉向系統合起來做觀測與分析比較。本研究為了觀察回饋控制之線控四輪轉向穩定控制以及傳統轉向在轉向時所產生之動態特性，將針對特定路線作測試 [4]，如圖 6 所示。

首先模擬測試路面狀況是要在一般柏油路面下來觀測與分析比較車輛動態。測試路面的摩擦係數為 $\mu=0.8$ [9]，

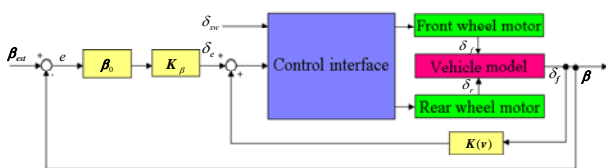


圖 5. 具回饋控制的四輪轉向穩定控制架構 [2]

表 1. 模擬車輛之參數 [1]

車重 (m)	1680 kg
車輛慣性矩 (I)	2980 kg·m ²
重心高度 (h)	0.628 m
重心離前軸之距離 (l_f)	1.196 m
重心離後軸之距離 (l_r)	1.404 m
輪距 (l)	1.5 m
軸距 (d)	2.78 m

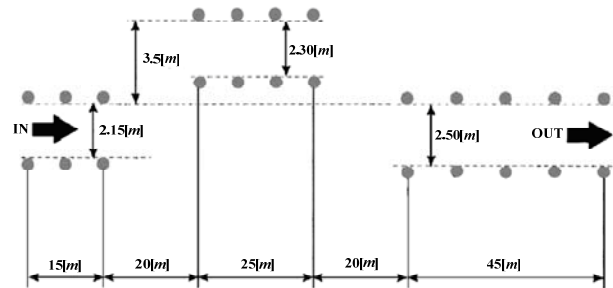


圖 6. 變換車道測試路線 [4]

以車速 100 km/hr (高車速) 定速行駛於柏油路面測試。其中傳統轉向與回饋控制之線控四輪轉向穩定控制之比較如圖 7、圖 8 所示。傳統轉向與回饋控制之線控四輪轉向穩定控制之車輛 100 km/hr 行駛於柏油路面下之路徑比較如圖 9 所示。而藍色虛線表示為傳統轉向車輛，綠色實線為回饋控制之線控四輪轉向穩定控制的車輛。

為了更進一步觀察車輛穩定控制的優劣，本實驗進行第二種路面模擬測試，其測試路線與第一項測試相同如圖 7，不同的地方在於路面狀況是積雪路面，利用積雪使得路面狀況變為高低摩擦切換之路面。車輛之速度固定於 60 km/hr

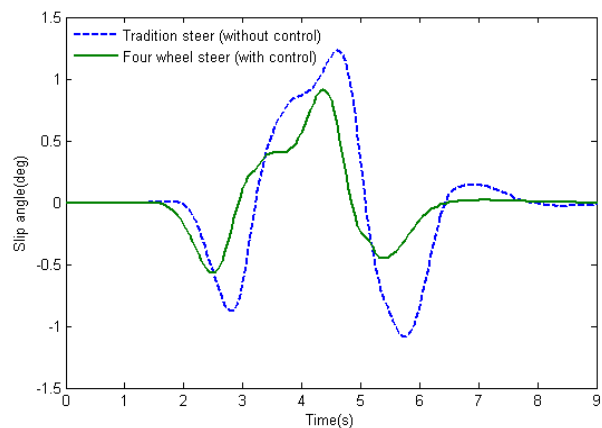


圖 7. 車輛以 100 km/hr 行駛柏油路面之重心側滑角

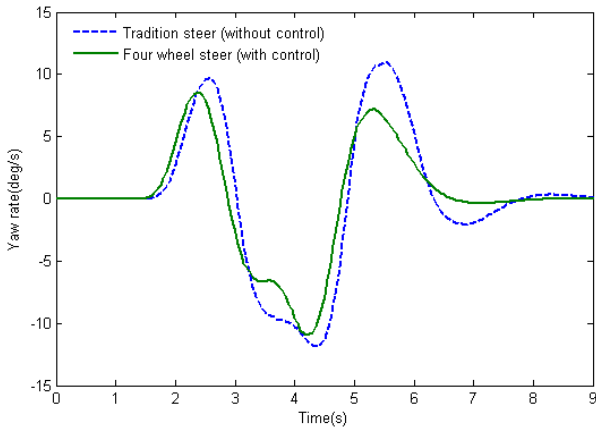


圖 8. 車輛以 100 km/hr 行駛柏油路面之橫擺率

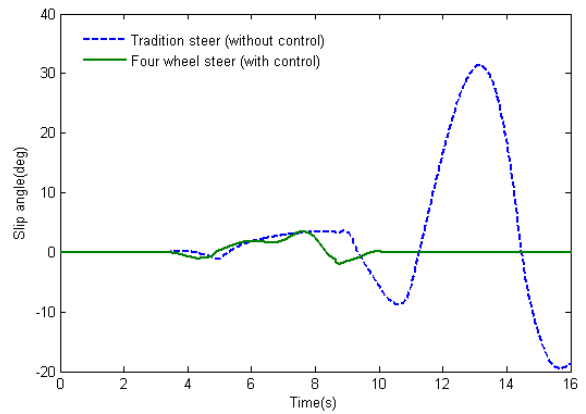


圖 10. 車輛以 60 km/hr 行駛積雪路面之重心側滑角

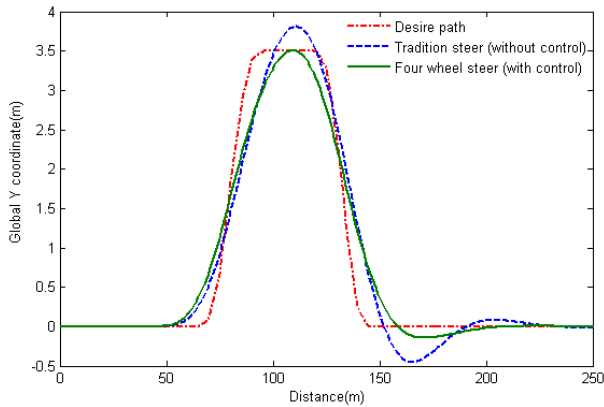


圖 9. 車輛以 100 km/hr 行駛於柏油路面下之路徑圖

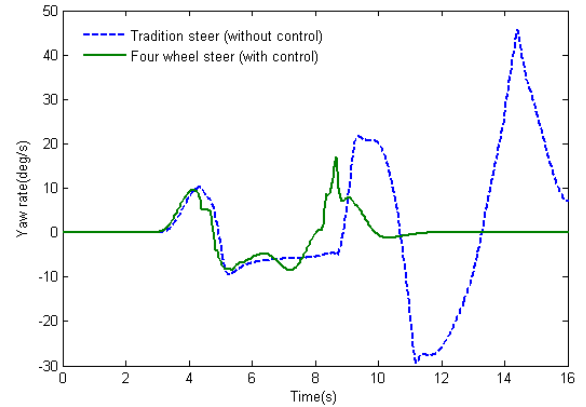


圖 11. 車輛以 60 km/hr 行駛積雪路面之橫擺率

行駛並觀測與分析比較車輛動態。測試左側路面中的積雪，其摩擦係數為 $\mu=0.2$ 右側為平滑路面，摩擦係數為 $\mu=0.5$ 。

積雪路面下車速 60 km/hr 之模擬測試結果。傳統轉向與回饋控制之線控四輪轉向穩定控制之車輛之比較如圖 10、圖 11 所示。傳統轉向與具回饋控制的四輪轉向穩定控制之車輛以 60 km/hr 行駛於積雪路面下的路徑比較如圖 12 所示。

透過以上測試結果，可以初步證實四輪轉向穩定控制可較有效的使車輛行駛穩定，但因為車輛行駛的路況相當多，因此本研究加入第三種測試，模擬車輛轉向時突然遇到路面積水之狀況，當車輛行駛到此時，會因為路面阻力突然降低而造成失控，因而進一步觀察控制器成效，如圖 13 所示為測試路面：積水路面之示意圖。

積水路面下車速 60 km/hr 之模擬測試結果。傳統轉向與回饋控制之線控四輪轉向穩定控制之車輛之比較如圖 14、圖 15 所示。傳統轉向與回饋控制之線控四輪轉向穩

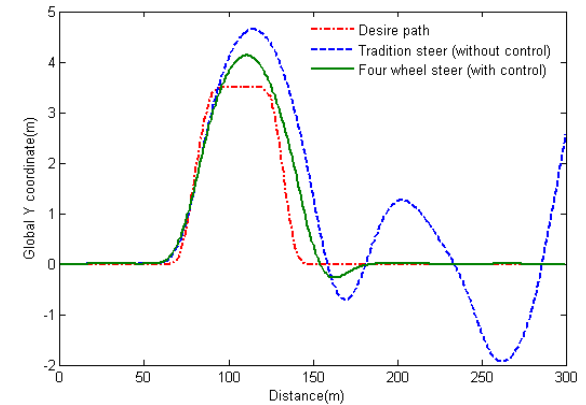


圖 12. 車輛以 60km/hr 行駛於積雪路面下的路徑圖

定控制之車輛以 60 km/hr 行駛於積水路面下的路徑比較如圖 16 所示。經由多次不同車速模擬實驗車輛行駛於積水路面，車速 60 km/hr 時剛開始呈現失控打滑的狀態，因此本次測試實驗將車速固定於 60 km/hr。

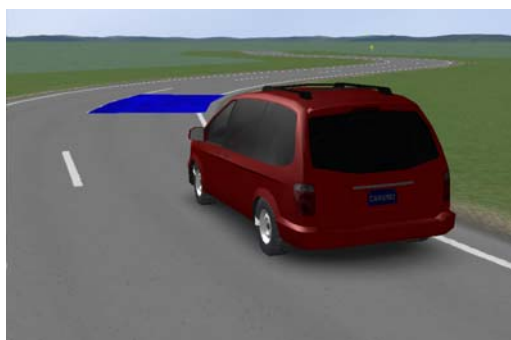


圖 13. 測試路面：積水路面

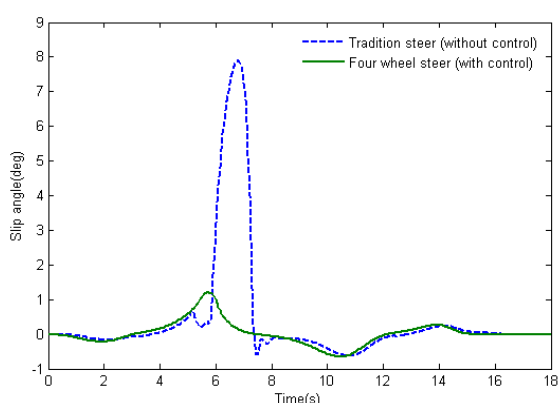


圖 14. 車輛以 60 km/hr 行駛積水路面之重心側滑角

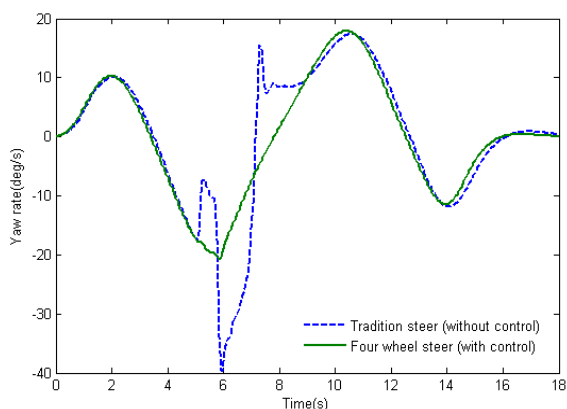


圖 15. 車輛以 60km/hr 行駛積水路面之橫擺率

綜合以上測試結果可歸納出以下結論，傳統轉向系統中，因為受限於機械結構以及無法利用額外的機械輔助力來達到額外的補償或修正轉向角，導致車輛的穩定度無法有效提升。而利用線控轉向的車輛，可以在車輛中加入本研究的控制策略，以及在實際車輛加入感知器等諸多元件配合，而達到車輛透過轉向的過程中，額外提供輔助車輛動態穩定的功能。

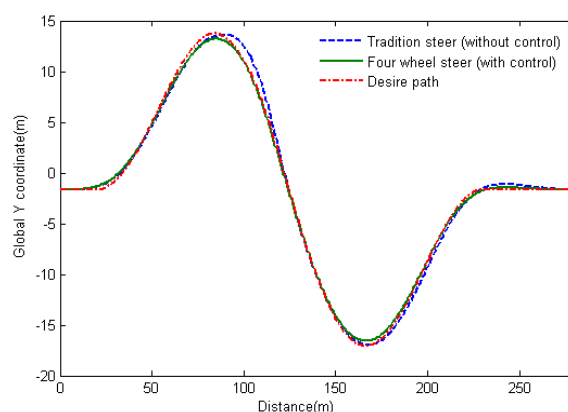


圖 16. 車輛以 60km/hr 行駛積水路面之路徑圖

觀察模擬結果，本研究之車輛穩定控制確實可以同時讓車輛的重心側滑角 β 以及車輛橫擺率 γ 都有明顯的改善，可使車輛在低摩擦係數下所產生的明顯橫擺率增加部份，有相當的減少量，並且也讓車輛在行駛上，能夠確實的保持在規劃路徑上，讓將來的智慧型車輛在遇到其他路面狀況時，能夠有不錯的反應能力。

四、線控轉向實驗平台建構與實驗方法

(一) 線控轉向系統平台

本研究之線控轉向系統實驗平台，如圖 17 所示，可分別驗證線控前輪轉向與線控後輪轉向，本節針對此實驗平台設備的主要功用作簡單的介紹。首先為方向盤，駕駛者主要透過方向盤來輸入所需之轉向角度，再經由轉角感知器將轉角訊號送至控制器。接下來為力回饋馬達及減速機構，力回饋馬達主要就是將傳統方向盤力回饋之特性，呈現在實驗平台上。

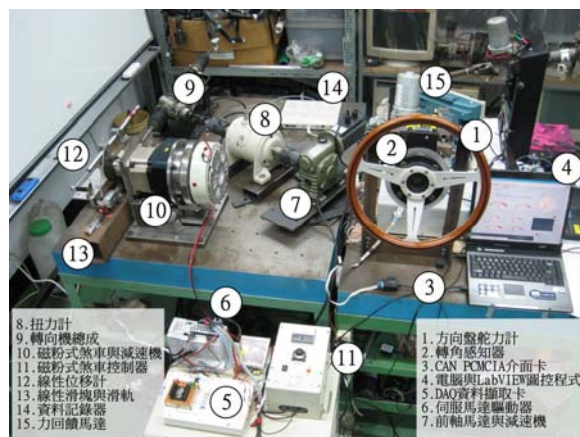


圖 17. 線控轉向實驗平台

而控制器與驅動器，此部分為線控轉向系統之核心，主要是控制與接收轉向馬達的回饋及轉角感測器所送出之訊號，並且在程式中運算，最後送出命令至轉向馬達，使馬達運轉。而轉向馬達與減速機構，線控轉向系統中，轉向馬達是轉向的動力源，在轉向馬達輸出端加入了減速機構，減速機構的比例為 10:1，透過此裝置可降低轉向馬達之阻力。而轉向機總成，這部分是轉向系統中不可或缺的機構，此機構能與車輪連結，轉向馬達需透過轉向機總成使車輪轉向。最後部分則是磁粉式煞車器，由於在實驗平台上沒有路面所產生之負載，所以透過控制磁粉式煞車器，使其產生轉向時所需之阻力。

(二) 線控四輪轉向系統之前輪轉向控制

線控轉向系統實驗平台上，利用線性差分位移計量測實驗平台橫拉桿的位移量，作為車輪轉角對應位置的功能，也可以提供控制器作車輪轉角的補償量控制，將轉角感知器訊號與線性差分位移計訊號提供 LabVIEW 圖控程式作閉迴路控制，讓本系統更加的精準。由實驗車所量測方向盤轉角、前輪轉角與前軸橫拉桿等數據，作為本研究線控轉向系統之定位控制目標，因此於實驗平台將方向盤正反轉 450 度量測方向盤轉角與前輪轉角對應關係，並與實驗車數據驗證，如圖 18 所示，為方向盤轉角與前輪轉角對應關係圖，由圖可發現線控轉向系統實驗平台與實驗車之轉向角對應關係非常近似。

由於線控轉向系統無轉向柱與前軸連接，所以當駕駛者停車後關閉車輛電源，於下次開車之前在無電源下可能轉動方向盤，此時方向盤轉角與前輪轉角的對應關係將會有誤差量，因此本研究於控制器加入自動偵測方向盤轉角與前輪轉角定位功能，當每次啟動車輛電源時，控制器將自動偵測方

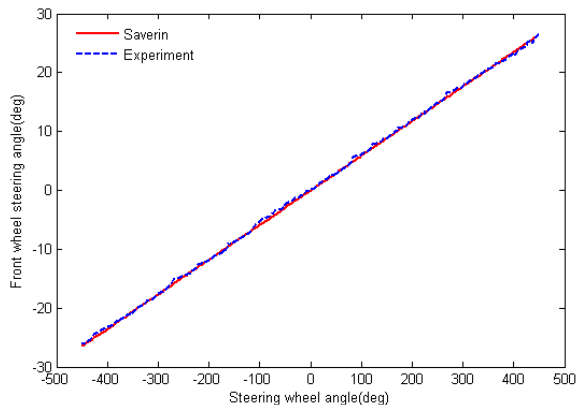


圖 18. 方向盤轉角與前輪轉角對應關係圖

向盤轉角並自動定位前輪，因此於線控轉向系統實驗平台驗證此功能，如圖 19 所示，為啟動電源前輪轉角自動跟隨圖（方向盤 0 度時），可發現方向盤轉角為 0 度，但前輪轉角卻為 30 度時，當啟動電源前輪自動修正轉角至 0 度；而如圖 20 所示，為啟動電源前輪轉角自動跟隨圖（方向盤 450 度時），可發現方向盤轉角為 450 度，但前輪轉角卻為 0 度時，當啟動電源前輪自動修正轉角至 26.5 度來對應方向盤轉角，因此本研究發展的控制器可精準控制前輪轉角位置達到定位功能。

(三) 線控四輪轉向系統之後輪轉向控制

本研究以達到後輪轉向於低車速逆相位轉向與高車速同相位轉向為線控四輪轉向控制之設計目標。為了確認設計之後輪轉向系統所帶來增加車輛操控靈活性與行駛穩定性的效果，將於線控轉向系統實驗平台進行低車速及高車速時，線控後輪轉向實驗，觀察線控後輪轉向系統之效益。使

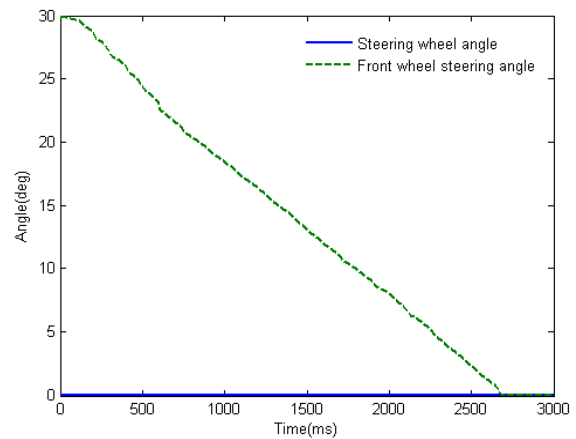


圖 19. 啟動電源前輪轉角自動跟隨圖（方向盤 0 度時）

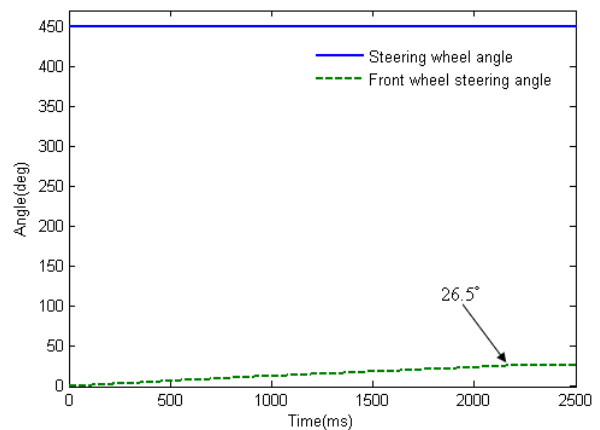


圖 20. 啟動電源前輪轉角自動跟隨圖（方向盤 450 度時）

用 LabVIEW 圖控程式提供不同車速，讓控制器判斷車速訊號，並接收 Bosch LWS3 轉角感知器訊號與線性位移計訊號提供 LabVIEW 圖控程式作閉迴路控制，供應後輪轉角的補償量，實現線控後輪轉向控制。

本研究線控四輪轉向系統之後輪轉向的相位參照馬自達電子式四輪轉向系統 [5]，以車速 0~35 km/hr 時為逆相位轉向；車速 35 km/hr 附近時為中立狀態，等於 2 WS；車速 35 km/hr 以上時為同相位轉向，而最大後輪轉向角為正、負 5 度。於實驗平台量測實驗結果與馬自達電子式四輪轉向系統的方向盤轉角對應後輪轉角作驗證。當車速 0~35 km/hr 時後輪逆相位轉向，如圖 21 所示；而當車速 35 km/hr 以上時後輪同相位轉向，如圖 22 所示。由實驗結果可以發現本研究達到線控後輪轉向於低車速逆相位轉向與高車速同相位轉向控制之設計目標。

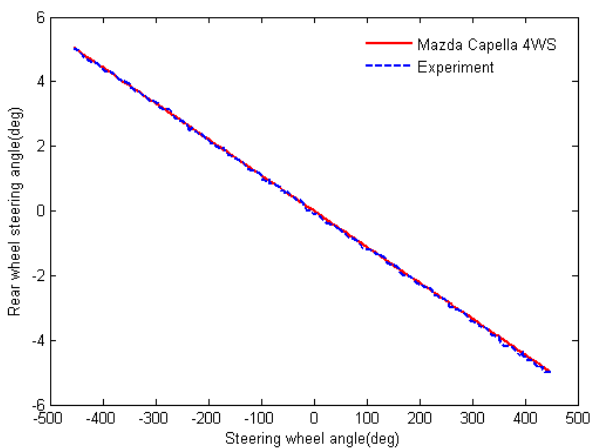


圖 21. 車速 0 ~ 35 km/h 時後輪逆相位轉向

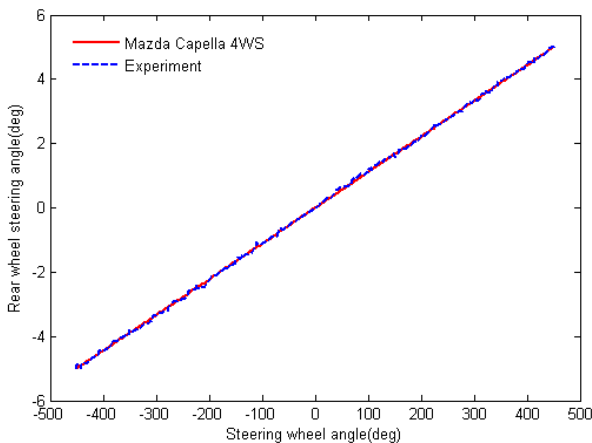


圖 22. 車速 35 km/h 以上時後輪同相位轉向

(四) 線控四輪轉向系統之前輪轉向控制

本研究在控制器中，加入主動轉向控制之可變轉向比功能，依據車速高低、方向盤角度、前輪轉向角度及加減速度道等的訊號，整合辨識判斷後，調整轉向比，轉向比則可在 12 : 1~21 : 1 之間，因應車輛動態狀況進行適度調整。在車速低於 40 km/hr 時讓轉向比減少，例如在市區或停車時，轉彎及迴轉都比較輕鬆簡便。而當車速提昇到 40~80 km/hr 的中速域，控制器不僅會進行前輪的轉向比調整，且還會搭配與前輪同相位轉向的後輪轉向，如此一來，車輛整體的轉向反應會更精準敏捷，在都會街道或山區道路的行駛路況，其反應會較一般車輛來得快且靈敏。

一旦車速超過 80 km/hr 以上，因加速慣性使然，這時無論多麼輕微的轉向角度都會讓車身重心的橫擺量相對放大。因此控制器會讓前輪轉向比增加並同時搭配後輪轉向，透過後輪轉向以減少方向盤轉向的角度，並減少橫向加速度，讓車輛在變換車道時可像平行移動一樣前進，減輕變換車道後的車身搖晃與側滑情況發生。

本研究參考了 BMW、INFINITI 及 HONDA 等大廠的主動轉向科技 [6]，目的是希望讓駕駛者在低車速的時候，能有絕佳的靈活性以及操縱性能，而高車速時，也希望擁有高速穩定性，因為當駕駛者可能高車速行駛時因前方有障礙物，產生緊張而造成快速打方向盤使車輛產生失控，所以加入了這項功能，並於線控轉實驗平台上面呈現其效果，如圖 23 所示，為實驗平台在不同車速時方向盤轉角與前輪轉角之特性。

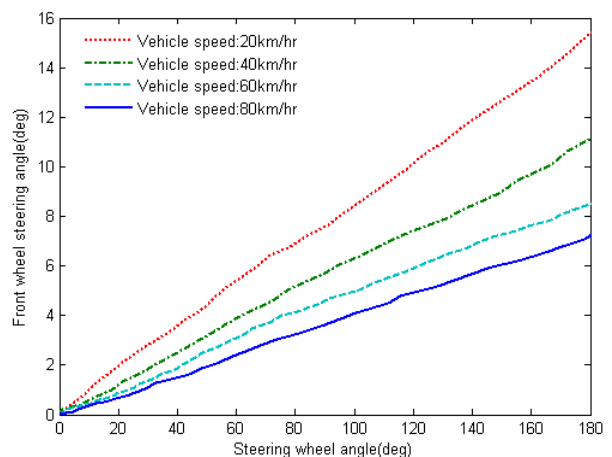


圖 23. 在不同車速時方向盤轉角與前輪轉角之特性

五、結論

線控四輪轉向系統是一種全新概念的轉向系統架構，由於它是透過感知器的回饋以及控制器去驅動轉向馬達完成四輪轉向，因此力回饋方向盤與轉向馬達為相互運行的系統，力回饋方向盤需要送出適當的方向盤角度給控制器，在控制器內判斷及運算驅動轉向馬達，最後結合車輛穩定控制，使車輛達到車輛穩定。對於線控四輪轉向系統之車輛穩定控制方面得到以下之結論：

1. 依車輛動態模擬分析的基礎，建立出車輛穩定控制，利用回饋控制之線控四輪轉向穩定控制，其主要是利用計算所得的後輪與前輪轉向比率，控制後輪轉向，再配合對應前輪轉角方向，來加強後輪的轉向控制，以及加入重心側滑角 β 的回饋控制，達到降低車輛重心側滑角 β 之效果。最後透過各種路面的模擬測試，可驗證本研究設計之車輛穩定控制可有效地降低車輛之重心側滑角 β 及車輛橫擺率 γ ，使車輛提升穩定性。
2. 線控四輪轉向控制實現於目前建構的線控轉向系統實驗平台，可驗證線控前輪轉向與線控後輪轉向，利用線性位移計訊號作閉迴路控制，除了精準控制前輪轉向，依據車速判斷，達成後輪低車速逆相位轉向與高車速同相位轉向之控制目標。並且在控制器中，加入主動轉向控制之可變轉向比功能，依據車速高低、方向盤角度、前輪轉向角度及加減速力道等的訊號，整合辨識判斷後，調整轉向比，因應車輛動態狀況進行適度調整。在低車速時，控制器會讓前輪轉向比減少，如在市區或停車時，轉彎及迴轉都比較輕鬆簡便。當車速提高時，控制器會讓前輪轉向比增加，並同時搭配後輪轉向，透過後輪轉向以減少方向盤轉向的角度，減輕變換車道後的車身搖晃與側滑情況發生。

參考文獻

1. 中華汽車工業股份有限公司(民 98)，Mitsubishi Savrin 規格配備表，中華汽車，台北。
2. 張竣凱(民 95)，線控轉向系統動態分析之研究，大葉大學車輛工程研究所碩士論文。
3. 陳佳鑫(民 92)，四輪轉向車輛重心側滑角控制系統之設計與分析，第六屆全國機構與機器設計學術研討會，虎尾。
4. 梁晉豪(民 96)，線控轉向系統車輛穩定控制之研究，私立大葉大學車輛工程研究所碩士班。
5. 黃靖雄(民 92)，現代汽車底盤，全華科友圖書公司，台北。
6. 2009 Infiniti G37 Sedan, Technical Specifications (2009). *Features and Options, Source of Production*, Nissan Motor Co., Ltd, Kanagawa, Japan.
7. Abe, M., Y. Kano, K. Suzuki, Y. Shibahata and Y. Furukawa (2001) Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment. *SAE Review*, 22, 413-419.
8. Ackermann, J. (1990) Robust car steering by yaw rate control. Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, Honolulu, Hawaii.
9. Rivers, R. W. (2006) *Evidence in Traffic Crash Investigation and Reconstruction*, Charles C. Thomas Publisher Ltd, Springfield, IL.

收件：98.09.15 修正：98.11.18 接受：99.03.18