

電動輔助轉向系統控制邏輯之設計與模擬

胡聰賢、葉智榮、何世榮
財團法人車輛研究測試中心
elvishu@artc.org.tw

摘要

電動輔助轉向系統相較於傳統液壓輔助轉向系統而言，擁有許多的優勢，例如引擎效率、空間應用以及環保問題。採用電動馬達來取代複雜的液壓系統，馬達只在有需求的情形下才啟動，因此，不僅可以節省能源的損耗，亦可降低轉向系統的重量與成本。除此之外，電動輔助轉向系統可以解決液壓輔助轉向系統所無法克服的問題。本文的主要研究目的在於電動輔助轉向系統控制邏輯之發展，為了滿足各種車輛轉向之操作條件，特別針對駕駛者操作方向盤之手感以及車輛動態，進行電動輔助轉向系統之控制邏輯的設計。本研究應用整合模擬的方式，連結 Matlab/Simulink 與 MSC/Carsim，發展電動輔助轉向系統的控制邏輯，其中包含基本輔助邏輯、回正補償邏輯、阻尼補償邏輯、慣性補償邏輯和衝擊補償邏輯。然而，為了提升補償特性，本研究在各種補償邏輯下，新增了方向盤轉角訊號與車速訊號回授至電子控制單元，即時修正補償增益值，提升補償的效果，優化轉向響應，改善駕駛者操作手感以及車輛動態行為。

關鍵字：電動輔助轉向、基本輔助邏輯、回正補償邏輯、阻尼補償邏輯、慣性補償邏輯、衝擊補償邏輯、整合模擬

Simulation in the Design of Control Logic for Electric Power Steering Systems

Abstract

The electric power steering (EPS) system has obvious advantages over the conventional hydraulic power steering (HPS) system in terms of engine efficiency, space utilization, and environmentally friendly issues. It substitutes an electric motor for a complex hydraulic system. The motor only operates when required. Therefore, this system not only saves energy but also reduces cost and weight. On the other hand, the electric power steering system can solve problems associated with the conventional one. The purpose of this research is to develop of an electric power steering control logic which is composed of base-assist, damping, return, inertia, and impact compensation logic. In addition, this research purposes a new method to improve the compensation performance. It employs steering angle signal and vehicle speed signal into the control logic to tune the compensation gain immediately. As a result, it can increase the effect of compensation, optimize the steering response, and improve the steering feel. For describing the vehicle dynamics and modeling the

steering feel accurately, this research integrates Matlab/Simulink with MSC/CarSim. Co-simulation technique is used to validate the proposed idea

Keyword: electric power steering, base-assist logic, return compensation logic, damping compensation logic, inertia compensation logic, impact compensation logic, and co-simulation.

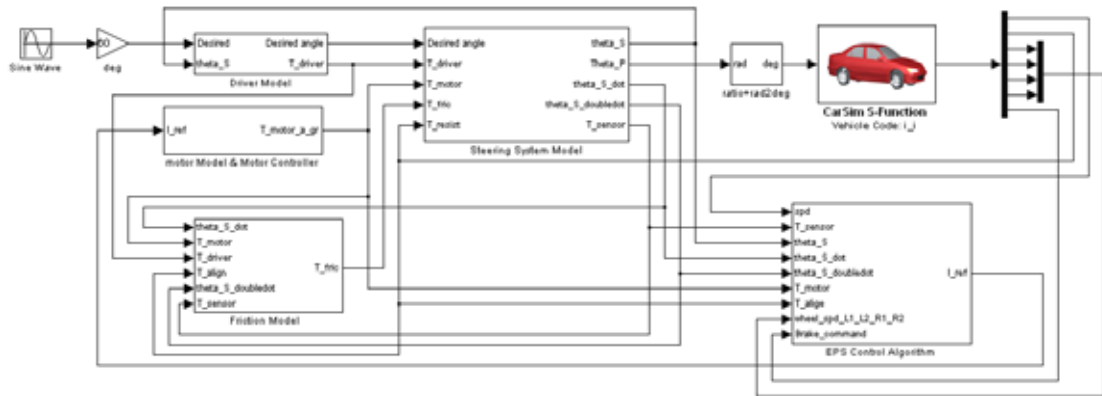
一、前言

轉向系統在車輛的應用上是一個極為重要的次系統。然而，隨著車重的增加和停車時的操作，動力輔助轉向系統則成為不可或缺的工具。現今大部分之動力輔助轉向系統為液壓動力輔助轉向系統(Hydraulic Power Steering, HPS)。該系統需加裝一組複雜的液壓設備於車上，由引擎全時驅動，因此，將對引擎的效率產生影響，換言之，若改採用電動輔助轉向系統(Electric Power Steering, EPS)，則可免去複雜之液壓設備，此外，又可提升引擎的效率與空間的應用，而且，電動輔助轉向系統無需液壓油，對環境無污染，綜觀上述優點，電動輔助轉向系統目前已經廣泛應用於小型車，部分較先進或較豪華之車輛因其可電控的優點，也逐漸採用此系統，不久將來，甚至可能延伸至各式各樣的車輛上應用。

然而，對電動輔助轉向系統而言，其最重要的部分之一為輔助馬達輸出力矩的大小、方向與時機的控制。為了發展電動輔助轉向系統之控制邏輯，則必須建立電動輔助轉向系統之模型，以利於控制邏輯之設計，Chen 和 Chen[1]應用 Newton's Second Law 建立剛體的運動方程式，逐一將轉向系統各元件的模型建立；Parmar 和 Hung[2]則是採用 Lagrange's Equations 建立轉向系統的動態模型。Liao 和 Du[3]試圖結合 Matlab/Simulink 以及 Adams 進行電動輔助轉向系統與車輛動態的整合模擬，主要目的是為了完整的描述電動輔助轉向系統對車輛行為的影響，以利於電動輔助轉向控制邏輯的設計；Choi[4]等，則是結合 SimPowerSystems 和 Matlab/Simulink 來模擬電動輔助轉向系統，以更為詳細的描述電力電子元件特性對電動輔助轉向系統之影響。此外，電動輔助轉向系統的主要力矩輸出來源為電動馬達，為了避免馬達驅動所產生之波動對轉向軸造成影響，Kurishige 等[5]和 Pang 等[6]，分別提出利用馬達控制方法來減少影響駕駛者操作手感的馬達力矩漣波。在控制邏輯的發展方面，文獻[7~11]，分別針對基本輔助邏輯、阻尼控制邏輯、回正控制邏輯和慣性補償邏輯等進行詳盡的探討。

本研究主要目的為電動輔助轉向系統控制邏輯之設計，連結 Matlab/Simulink 和 MSC/CarSim 進行控制邏輯的開發，整合基本輔助邏輯、阻尼補償邏輯、回正補償邏輯和慣性補償邏輯，同時導入了路面衝擊補償邏輯於電動輔助轉向系統中，此外，新增了車速訊號與方向盤轉角訊號的回授，即時地調整補償增益值，使電動輔助轉向之輔助特性更加完善。

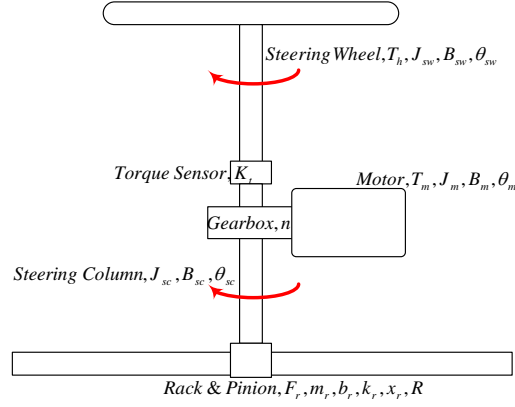
二、系統模型



圖一 電動輔助轉向系統模擬方塊圖

本研究的主要目的為應用整合模擬的方式發展電動輔助轉向系統的控制邏輯。因此，在模擬前，必須建立數學模型以描述系統動態，藉由控制策略的導入，可由系統動態輸出驗證控制邏輯的正確性與可靠性。建模的目的是要描述受控場的動態行為，以利於控制器的設計。本研究將車輛模型分成兩個部分，一為整車模型，另一個為電動輔助轉向系統模型。由於整車模型自由度之數量極大，因此，採用了擅於描述車輛動態的模擬軟體，MSC/CarSim；此外，電動輔助轉向系統模型則建立於控制專長的軟體，Matlab/Simulink，整合兩軟體進行整合模擬，以達成電動輔助轉向系統控制邏輯的設計。圖一所示為電動輔助轉向系統的模擬方塊圖。

本研究所模擬之電動輔助轉向系統為轉向柱型式(column-type)，典型的轉向柱型式電動輔助轉向系統由力矩感知器(torque sensor)、馬達(electric motor)、減速機(reduction gear)以及電子控制單元(electronic control unit)所組成，其機械架構圖如圖二所示。力矩感知器一般安裝於方向盤與轉向軸之間，主要目的是為了量測駕駛者施於方向盤之力矩大小，回饋給電子控制單元，做為控制馬達的參考依據；馬達安裝於轉向機柱上，其主要功能是藉由減速機將馬達產生之力矩放大並傳至轉向軸上，以減少駕駛者出力，輔助駕駛者轉向；電子控制單元則負責接收所有訊號，進而計算出馬達的目標電流。



圖二 電動輔助轉向系統模型

根據牛頓第二運動定律(Newton's Second Law)，合力矩等於轉動慣量與角加速度之乘積，因此，可得方向盤、轉向軸以及齒條的運動方程式，分別如(1)、(2)與(3)所示。然而，(4)式為馬達經減速機放大後之力矩，(5)式為馬達力矩方程式，(6)式與(7)式分別為馬達的電氣方程式與機械方程式，並輸出至馬達進行回授控制。

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

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

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

$$\hat{T}_m = n \cdot T_m \quad (4)$$

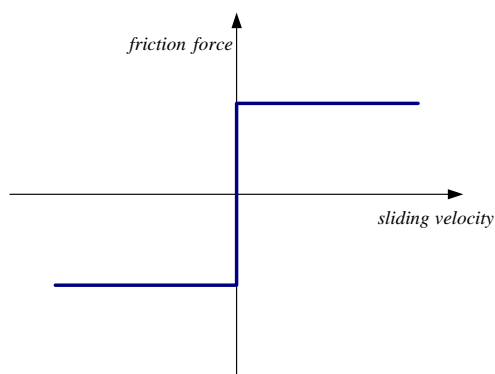
$$T_m = I \cdot k_t \quad (5)$$

$$E = \dot{\theta}_m k_b - IR - \dot{I}L \quad (6)$$

$$T_m - B_m\dot{\theta}_m = J_m\ddot{\theta}_m \quad (7)$$

其中 T_h 為駕駛者之扭力， K_t 為扭力桿之剛度， B_{sw} 為方向盤之阻尼， J_{sw} 為方向盤之轉動慣量， T_f 為轉向系統之摩擦力， B_{sc} 為轉向軸之阻尼， J_{sc} 為轉軸柱之轉動慣量， k_r 為齒條小齒輪間之剛度， F_r 為作用在齒條方向之輪胎回正力， b_r 為齒條之阻尼， m_r 為齒條之質量， r 為小齒輪每轉一圈齒條的位移， T_m 為馬達力矩， k_t 為馬達力矩常數， E 為馬達端電壓， k_b 為馬達反電動勢常數， R 為馬達線圈電阻， L 為馬達線圈電感， B_m 為馬達阻尼， J_m 為馬達轉動慣量。

然而，轉向系統中機構之間的連結存在著乾摩擦效應，為了描述該效應，本研究將庫倫摩擦模型(Coulomb friction model)建立於電動輔助轉向系統之中，如圖三所示，摩擦力的大小與正向力成正比，作用方向永遠與物體運動方向相反，而且其大小與接觸面積無關，其數學方程式如(8)式所示。其中 F_{fric} 為摩擦力， μ 為摩擦係數， N 為正向力， v 為滑動速度。



圖三 庫倫摩擦模型

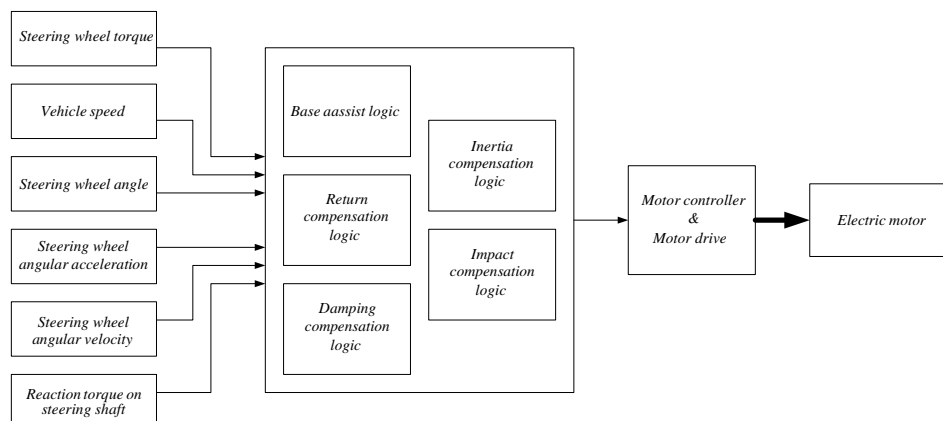
$$F_{fric} = \mu N \cdot \text{sign}(v) \quad (8)$$

三、控制邏輯

電動輔助轉向系統的主要功能是減低駕駛者轉向時所施於方向盤的力量，使得駕駛者可以輕易地改變車輛行進方向，此系統不僅可以有效的改善操作手感，更可提升駕駛樂趣，此外，電動輔助轉向系統更可藉由控制邏輯的設計，使該系統展現優於傳統液壓輔助轉向系統的功能與特性，此外加之功能不僅可以優化駕駛者操作方向盤之手感，更可改善車輛運動之響應。

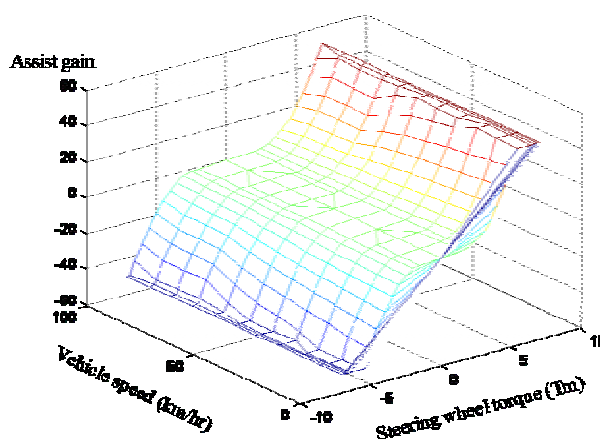
本研究將整合基本輔助控制邏輯(base assist logic)、回正補償邏輯(return compensation logic)、阻尼補償邏輯(damping compensation logic)、慣性補償邏輯(inertia compensation logic)以及衝擊補償邏輯(impact compensation logic)於電動輔助轉向系統之控制系統中，整體控制邏輯架構圖如圖四所示。然而，每一種補償邏輯皆有其必要訊號做為補償功能與補償增益大小的依據，有別於傳統的補償邏輯，本研究在各種補償邏輯的基礎下，導入額外的訊號，如方向盤轉角訊號與

車速訊號，即時修正補償增益值，此種新補償增益修正之方法，不僅可以有效的改善駕駛者控制方向盤的操作手感，更可快速的改善車輛運動之響應。



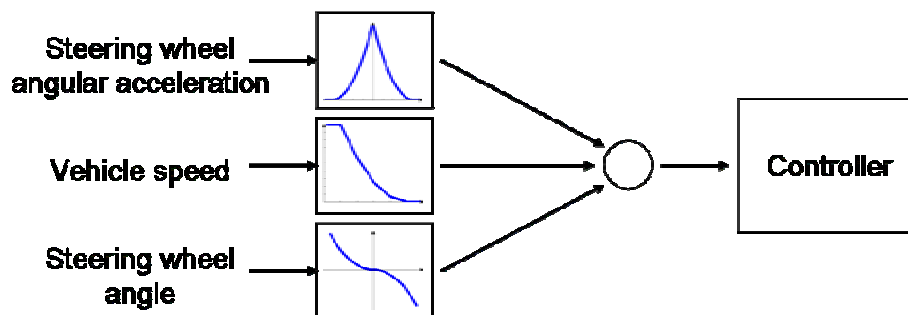
圖四 動力輔助轉向系統整體控制邏輯架構

基本輔助邏輯，此輔助邏輯為電動輔助轉向系統輔助力輸出的主體，主要功能是減少駕駛者操作方向盤之施力，改善操作手感。然而，其他延伸的控制邏輯與補償邏輯皆建立在基本輔助邏輯的基礎上。基本輔助控制邏輯主要是依據駕駛者的扭力做為控制依據，輔助力的輸出隨著駕駛者施於方向盤之力的增大而變大，因此，當駕駛者增加操作方向盤的力量，表示駕駛者需要更多的施力以轉動方向盤，此時輔助力則增大，以符合駕駛者的需求，達到轉向輕便性的目的。然而，隨車速的增加，轉向的過於輕便將可能促使駕駛者過度操作方向盤發生危險，所以，對基本輔助而言，一般會隨速度的增加予以合適的補償，以達成低速高輔助，高速低輔助的目標，圖五所示為根據車速訊號與駕駛者扭力訊號所建立而成的曲面圖，該圖是藉由實際測試之資料，配合電動輔助轉向系統之參數經由調校所建立而成的曲面圖。將該圖輸入電子控制單元，電子控制單元則隨駕駛者的出力與當時的車速，計算出合適之輔助增益，並將參考命令送至馬達控制器，藉由馬達的控制進而產生適當的輔助力矩，輔助駕駛者轉向。



圖五 基本輔助模擬曲線圖

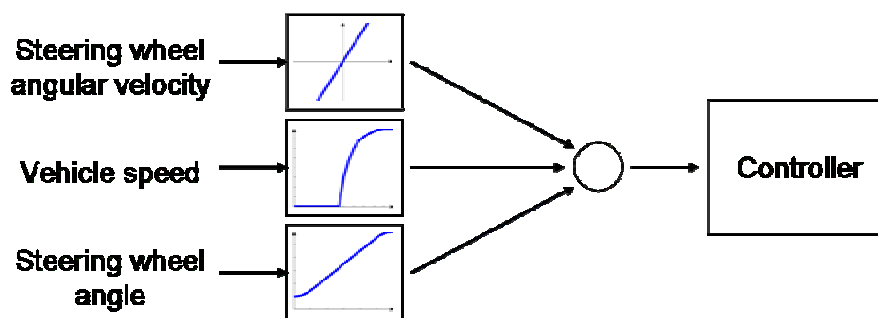
回正補償邏輯，車輛行駛時駕駛者轉動方向盤，自動回正力矩會趨向於將方向盤轉至中央位置，一般而言，方向盤的回正特性可簡單的區分為兩個部分來探討，第一個是車輛高速行駛時，方向盤在回正的過程中產生回正過度(overshoot)現象，使得車輛產生橫擺振盪的效應，該現象是不被期待的車身響應，然而，電動輔助轉向系統可藉由控制輔助馬達的出力來改善此現象。此功能在電動輔助轉向系統的應用上，可稱為阻尼補償，將在稍後進行討論。另一個回正特性則是當將方向盤施以一角度後釋放，在理想情況下，回正力矩足以克服路面和系統中的摩擦力，使方向盤可以回復到中央位置，但是，在車輛低速行駛時，回正力矩的大小不足以克服摩擦力，以致方向盤持續偏向一個角度，無法回復到中央位置。為了使方向盤可以在駕駛者釋放後，仍可順利回復至中央位置，穩定車輛動態，此時可藉由輔助馬達的控制，提供合適的力矩輸出，協助方向盤回正，此功能亦是傳統液壓輔助轉向系統無法達成的特性。在文獻[9]中提出兩種回正控制邏輯，第一種為採用方向盤角度回授控制，另一種則是回授作用於轉向軸之力矩(Reaction Torque on Steering Shaft, RTSS)作為回正控制之依據。本文中則是使用方向盤的角加速度做為主要控制依據，當駕駛者釋放方向盤，若方向盤持續偏向一邊，回正力矩無法使方向盤回復至中央位置，此時，方向盤的角加速度將近趨於零，回正補償增益最大，隨著方向盤的角加速度上升，補償增益隨之減小。此外，本文更同時回授車速訊號與方向盤轉角訊號，即時修正回正補償增益，使方向盤可以更快速平順的回正，穩定車身動態。圖六所示為回正補償邏輯，主要是回授方向盤角加速度、車輛速度與方向盤角度作為控制依據，並以方向盤角加速度為主，車輛速度與方向盤角度為輔，即時調整回正補償增益，達成回正補償之目的。



圖六 回正補償控制邏輯

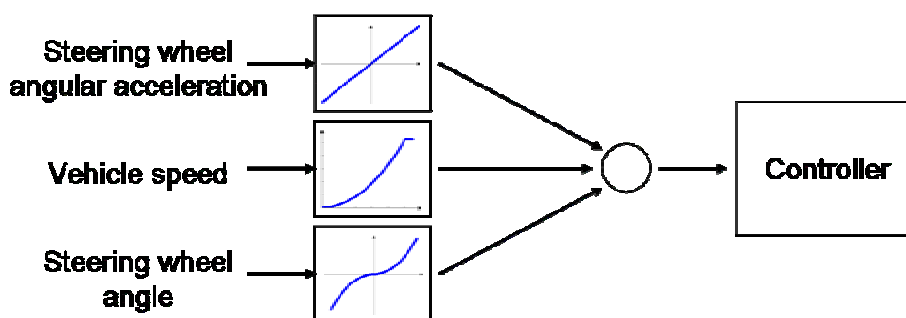
阻尼補償邏輯，車輛底盤設計的主要目標之一為車輛動態的穩定，最佳的情形即為無橫擺響應(free yaw response)，然而，要達成此目標，該車輛需擁有極佳的阻尼特性。為了發展與測試該特性，一般會使用拍擊(flick)輸入來評估車輛的阻尼特性。此評估方式是將車輛行駛於某一特定車速下，駕駛者將突然朝方向盤的某一方向扯一個角度，而後完全釋放方向盤，並記錄下車輛動態行為。此測試

主要是為了模擬駕駛者操作方向盤的過程中，手滑後車輛的反應。為了達成較佳的阻尼特性，汽車製造廠必須由懸吊系統加以琢磨。然而，電動輔助轉向系統的發展，可以藉由馬達輔助力的控制，貢獻適當的阻尼效應，改善車輛的車身動態，更可以放寬車輛底盤設計的限制。圖七所示為本研究中之阻尼補償邏輯，採用了方向盤角速度、車速和方向盤角度三個訊號做為補償依據，經由查表找出合適的補償增益，傳輸給控制器進行阻尼補償控制。其中三組圖表是經由整合車輛特性與模擬調校兩者所求得。



圖七 阻尼補償控制邏輯

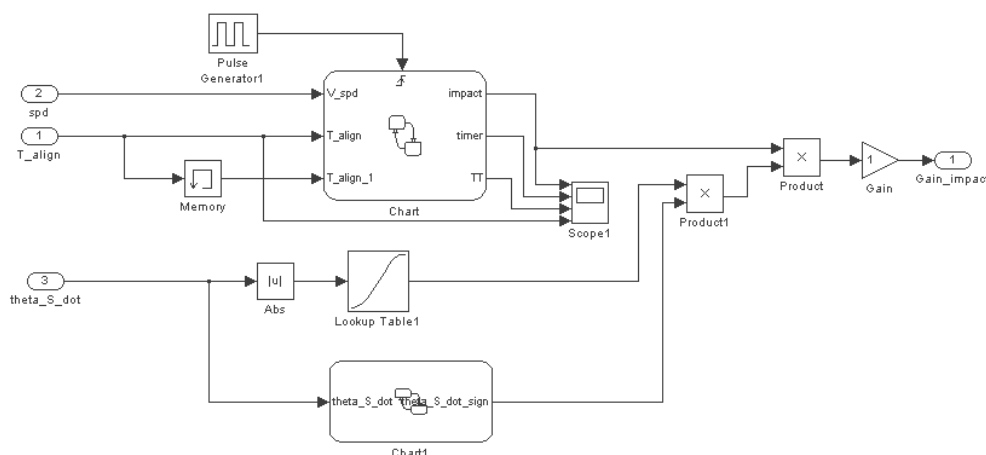
慣性補償邏輯的主要目的是改善駕駛者操作方向盤的手感，當駕駛者操作方向盤時，施力的大小決定了輔助力的多寡，然而，在駕駛者快速轉動方向盤的同時，單憑著方向盤力矩回授顯然已經影響了駕駛者操作方向盤的線性感，使得駕駛者產生操作方向盤重手的感覺。因此，為了改善快速操作方向盤產生之重手感，則控制邏輯中必須加入慣性補償。圖八所示為本研究之慣性補償邏輯，主要是依據方向盤角加速度的大小，產生補償增益。然而，由於車速的高低和方向盤角度的大小皆會影響方向盤的操作力，為了使操作方向盤更加具有線性感，本文納入車輛速度訊號與方向盤角速度，即時修正慣性補償增益。



圖八 慣性補償控制邏輯

衝擊補償邏輯的主要目的是為了改善車輛行駛時，遇上路面突起或凹陷等不佳的路面條件使得輪胎發生過度誤轉向。然而，該誤轉向的行為在低速時尤其會影響駕駛者操作方向盤之感覺，為了改善緩和誤轉向的角度，本文應用電動輔助轉向系統之輔助馬達成為轉向系統之阻尼器，藉由馬達的力矩控制產生阻尼效應，緩和路面衝擊對轉向系統的影響。此外，路面衝擊的判斷會是衝擊補助邏輯

的關鍵，然而，為了估測路面對轉向系統的衝擊，可參考文獻[9]中所提出之作用於轉向軸之力之估測方法。本文將該估測方式所求得力量對時間微分，如此一來，即可得知該力量對時間的變化率，接著在藉由各種條件之模擬，分離出路面衝擊對轉向系統造成的影響，定出門檻值，做為判斷衝擊補償邏輯依據。圖九所示為衝擊補償邏輯於 Matlab/Simulink 之應用。

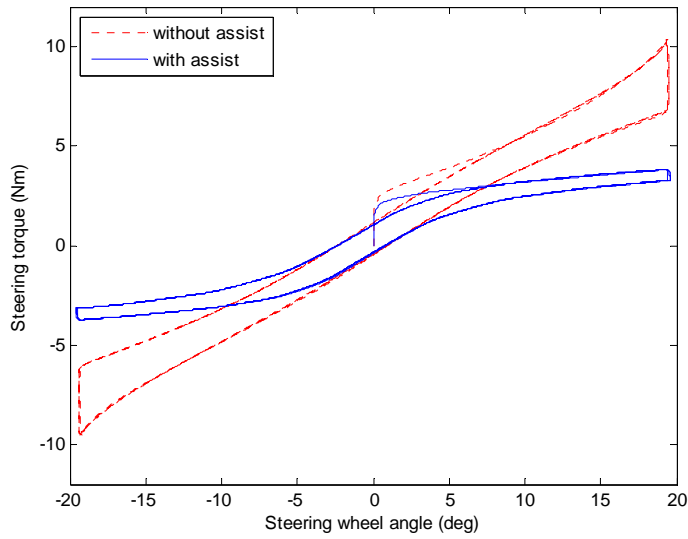


圖九 衝擊補償控制邏輯

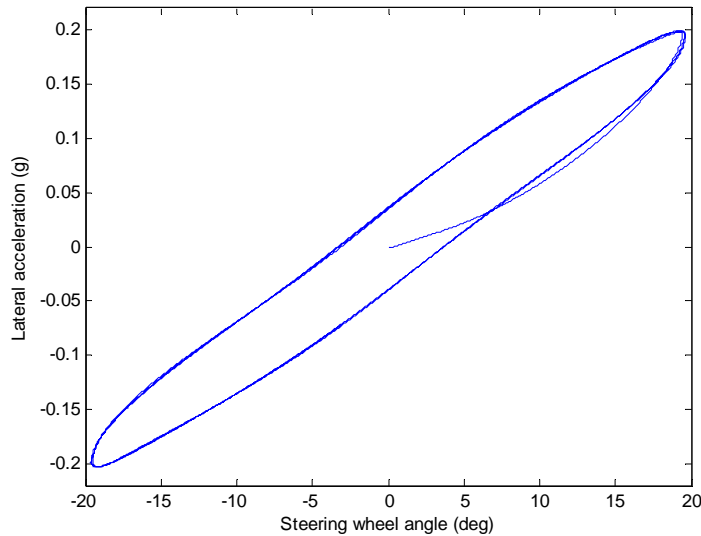
四、模擬結果與討論

本研究的主要目的為電動輔助轉向系統之控制邏輯設計，然而，為了達成此目的，本文使用 MSC/CarSim 來描述整車動態，並使用 Matlab/Simulink 建立電動輔助轉向系統的數學模型，利用軟體整合模擬(integrated simulation)的方式，進行電動輔助轉向系統控制邏輯的設計。以下將針對各種模擬結果進行比較。

中性點操作手感測試(on-center handling test)模擬，由 ISO 13674-1[12]得知，該測試需將車速固定在時速 100km/hr，接著將方向盤施以 0.2Hz 的正弦波輸入，然而，正弦波之振幅大小則需滿足側向加速度為 0.2g。圖十所示為上述條件之模擬結果，由圖中可得知，有動力輔助和沒有動力輔助的差異僅在於方向盤扭力之斜率的不同，無動力輔助之曲線，斜率高，代表駕駛者需輸出較大的力量，中性點操作手感差；然而，有動力輔助之曲線之斜率較小，中性點操作手感較佳。圖十一所示為側向加速度對應方向盤轉角之圖形。

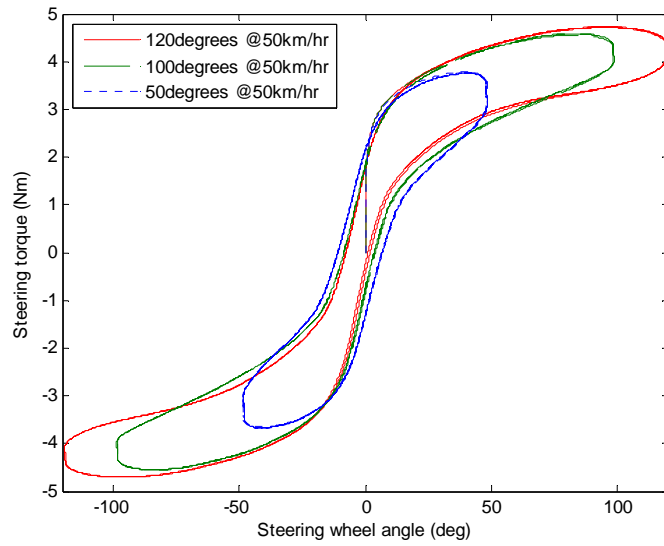


圖十 中性點操作手感(on-center handling)模擬力矩對應角度圖

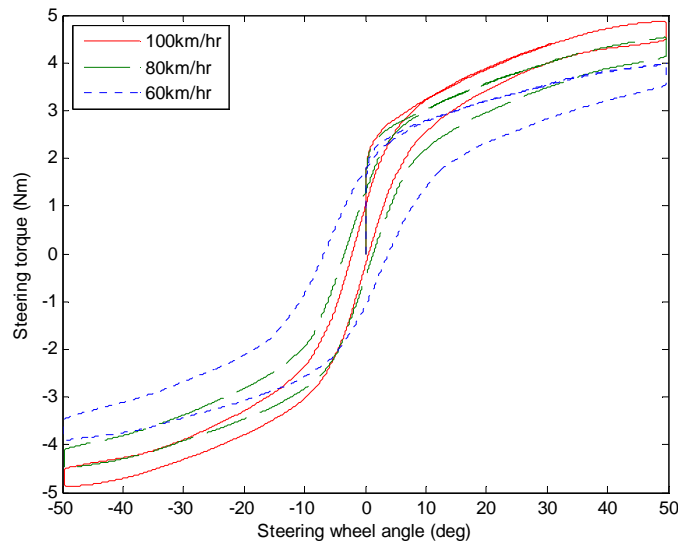


圖十一 中性點操作手感(on-center handling)模擬側向加速度對應角度圖

中性點操作手感測試之外，本文更針對不同的方向盤轉角與不同的車速進行電動輔助轉向系統輔助特性之模擬。圖十二所示為車速 50km/hr 時，方向盤角度以正弦波輸入，不同振幅的模擬結果，由圖中可得知，不同的方向盤轉角皆能滿足動力輔助之需求。圖十三所示為固定方向盤正弦輸入之振幅為 30 度，在不同車速條件下，動力輔助系統輔助特性的模擬結果。圖中顯示，車輛高速時的駕駛者操作力會高於車速較低的操作條件，表示該控制邏輯滿足了高速低輔助，低速高輔助的訴求。

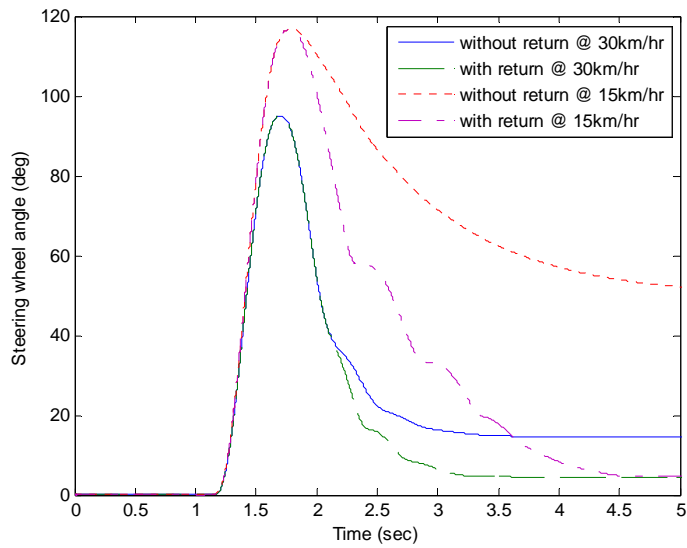


圖十二 不同方向盤轉角條件之轉向力矩對應角度圖



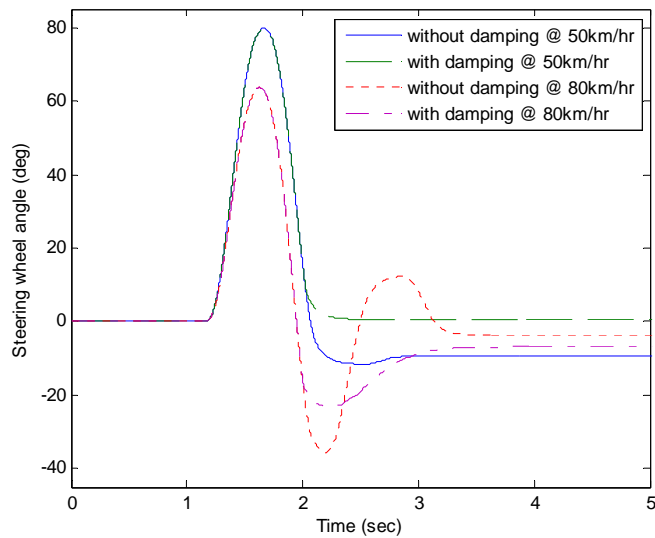
圖十三 不同車速條件之轉向力矩對應角度圖

回正補償邏輯模擬，圖十四所示為回正補償之模擬結果，該項模擬分別以車速 15km/hr 和 30km/hr 兩種速度進行回正補償邏輯的模擬測試，由圖十四中可以發現，車輛在低車速行駛時，車身底盤設計的回正力並無法使車輛的方向盤回復至接近原點，然而，此現象在低摩擦力的路面上，無法回正的現象會更加明顯。此模擬是模擬駕駛者瞬間對方向盤施以一力矩，並釋放方向盤。由模擬結果可得知，車速越低，未經回正補償之方向盤位置的偏角越大，然而，藉由電動輔助轉向系統馬達的控制，可順利的將方向盤回復至接近中點的位置，達成方向盤回正之目的，改善駕駛者的主觀感受。



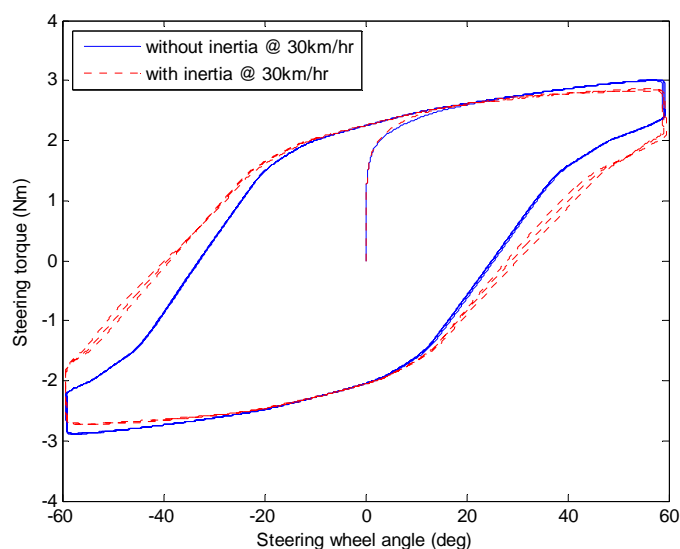
圖十四 回正補償邏輯模擬

阻尼補償邏輯模擬，此模擬是將車輛保持在一個固定車速下，對方向盤施以一力矩後釋放，觀察方向盤角度的變化，圖十五所示為電動輔助轉向系統加入阻尼補償邏輯之模擬結果，該模擬分別針對 50km/hr 和 80km/hr 兩種車速下進行模擬。由模擬結果可以得知，在車速較高的條件下，方向盤的回正過度較為劇烈，且振盪次數較多；然而，加入阻尼補償後，明顯的緩和回正過度的現象，有效改善車輛的動態響應。



圖十五 阻尼補償邏輯模擬

慣性補償邏輯模擬，此邏輯主要目的是針對駕駛者操作方向盤的手感進行補償，由於轉向系統傳動機構的轉動慣量和駕駛者快速的轉動方向盤，都會使駕駛者感到操作重手感。此模擬是對方向盤施以 60 度的正弦輸入，藉由力矩對角度圖，比較慣性補償之效果，圖十六所示為慣性補償邏輯的模擬結果，由模擬結果可得知，有慣性補償邏輯的加入，方向盤不論在正方向或逆方向的位置，駕駛者的出力皆比較小，有效的減低了駕駛者操作方向盤的重手感。

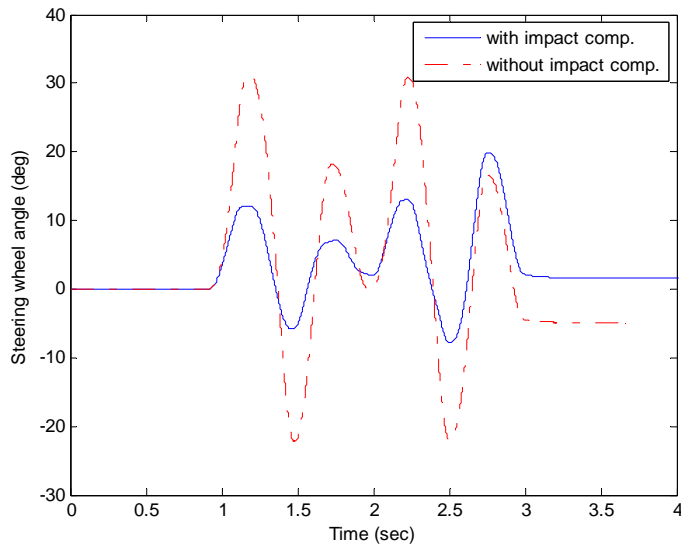


圖十六 慣性補償邏輯模擬

衝擊補償邏輯主要是針對路面的顛簸所造成的方向盤誤轉向進行補償，此項模擬首先假設車輛在直線行駛，行駛路徑上有一個突起物，高約 0.1 公尺，當車輪通過該突起物時，觀察方向盤發生之變化。圖十七所示為 MSC/CarSim 內，路面條件設定完成後，模擬的畫面；圖十八所示為加入衝擊補償邏輯前後，方向盤的響應，由模擬結果可得知，加入衝擊補償邏輯後，方向盤受路面衝擊的響應有明顯的改善。



圖十七 衝擊補償邏輯於 MSC CarSim 之模擬畫面



圖十八 衝擊補償邏輯模擬

五、結論

本研究之主要目的為設計發展完整的電動輔助轉向系統之控制邏輯，針對可能發生的情形提供合適的轉向補償。為了驗證補償邏輯的設計，本文應用整合模擬的方式，將電動輔助轉向系統的模型建立於 Matlab/Simulink 以模擬轉向系統的響應；另外，整車模型的部分則利用 MSC/CarSim 套裝軟體來模擬車輛的行駛動態，藉由整合模擬，達成電動輔助轉向系統輔助邏輯的設計。在各種補償邏輯的部分，本研究於基本的需求訊號外，更新增了轉角訊號與車速訊號回授至電子控制單元，以提供即時修正補償增益值，以提升補償的效果，優化轉向響應。此外，本研究在補償邏輯中，加入路面衝擊補償，以改善路面不佳所造成的方向盤誤轉向效應。綜合上述結果，本研究提供了一套完善的電動輔助轉向控制邏輯，包含基本輔助邏輯、回正補償邏輯、阻尼補償邏輯、慣性補償邏輯和衝擊補償邏輯，整合以上控制邏輯，可滿足車輛行駛時各種駕駛條件的需求，有效改善轉向時車輛的動態行為以及駕駛者操作方向盤的感覺。

六、參考文獻

- [1] Xiang Chen and Xiaoqun Chen, "Control-Oriented Model for Power Steering System," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 2006-01-0938.
- [2] Manu Parmar and John Y. Hung, "Modeling and Sensorless Optimal Controller Design for an Electric Power Assist Steering System," *Industrial Electronics*, Volume 3, Nov 2002, pp.1784-1789.
- [3] Y. Gene Liao and H. Isaac Du, "Modeling and analysis of electric power steering system and its effect on vehicle dynamic behaviour," *Int. J. of Vehicle Autonomous Systems*, Volume 1, No. 2, 2003.
- [4] Chinchul Choi, Wootaik Lee, Jung-Pyo Hong, SeongJoo Kim, JaeGoo Kim, JunGyu Song and JunNam Oh, "Multi-domain modeling of Electric Power Steering with PMSM Drive System," *Electric Machines & Drives Conference*, Volume 2, May 2007, pp.1355-1360.
- [5] Masahiko Kurishige, Kouji Fukusumi, Noriyuki Inoue, Takayuki Kiguku and Shigeki Otagaki, "A New Electric Current Control Strategy for EPS Motors," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 2001-01-0484.
- [6] Du-Yeol Pang, Bong-Choon Jang and Seong-Cheol Lee, "Steering Wheel Torque Control of Electric Power Steering by PD-Control," *ICCAS2005*, Jun 2005.
- [7] Masahiko Kurishige, Takayuki Kifuku, Noriyuki Inoue, Susumu Zeniya and Shigeki Otagaki, "A Control Strategy to Reduce Steering Torque for Stationary Vehicles Equipped with EPS," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 1999-01-0403.
- [8] Ji-Hoon Kim and Jae-Bok Song, "Control logic for an electric power steering system using assist motor," *Mechatronics*, Volume 12, Apr 2002, pp. 447-459.
- [9] Masahiko Kurishige, Hideyuki Tanaka, Noriyuki Inoue, Kazumichi Tsutsumi and Takayuki Kifuku, "An EPS Control Strategy to Improve Steering Maneuverability on Slippery Roads," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 2002-01-0618.
- [10] 徐偉峰, 陳柏全, 丁滄斯, 蔡國隆, 林啟琛及簡明溫, "電動輔助轉向控制策略之研發," *中華民國力學學會第三十屆全國力學會議*, 95年12月.
- [11] Yasuo Shimizu and Yashihiro Oniwa, "Control for Moment of Motor Inertia on EPS," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 2006-01-1179.
- [12] International Standard Organization, *Road vehicle – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test*, ISO 13674-1:2003