

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 計畫名稱：智慧型車輛自動駕駛與轉向控制之研究

### Study of Automatic Steering Control for Intelligent Vehicles

計畫編號：NSC-88-2212-E-009-037

執行期限：87年12月1日至88年7月31日

主持人：陳傑 交通大學機械系 助理教授

#### 一、中文摘要

為了增進車輛乘坐的舒適性，改進車輛行駛的安全操控性與穩定性，並期望能進一步降低肇因於人為駕駛操作疏失所引起的車禍發生率，車輛自動駕駛與控制已成為科技時代日益重要且有趣的研究課題。又因近年來交通阻塞的問題日益嚴重，全球許多的科技研究人員已深入地思考如何將車輛自動駕駛與控制技術應用於智慧型車輛與自動化高速公路上。

在文獻記載之眾多的自動駕駛與控制方法中，一種常用的控制方法是用感測器量測車輛旋轉速率(yaw rate)並將其訊號迴授至自動駕駛控制器。自動駕駛控制器則根據量測得的車輛旋轉速率發出自動駕駛控制訊號，此控制方法的主要目的是使車輛旋轉動態(yaw dynamics)與車輛橫向動態(lateral dynamics)互相解耦(de-coupling)，此控制法被稱為旋轉速率迴授控制法(yaw rate feedback)。然而，根據作者最近分析車輛運動數學模式所得之研究結果顯示，若將車輛駕駛系統的控制輸，重新定義於車前特定之動態距離(dynamic distance)，車輛的旋轉動態也會與車輛的橫向動態互相解耦。此分析結果同時顯示解耦後的系統增益並不隨著車速的增加而增加，這一重要的系統性質將使得設計一全車速自動駕駛控制器更為容易，此種控制方法被作者稱之為動態前望導引式(dynamic look-ahead)車輛轉向控制法。雖然從系統輸入一輸出的觀點來看，此動態前望導引式的設計方

法與旋轉速率迴授法得到類似的輸出入轉移函數，可是這二種設計方法所產生的不可觀測部分之系統動態卻有著根本上的不同。根據數學模式分析之研究結果顯示，動態前望導引法可得到較佳的系統阻尼，反之，旋轉速率迴授法卻會造成因系統阻尼不足所產生之旋轉震動(yaw oscillations)現象，這會影響車輛乘坐的舒適性，並可能進一步誘發系統潛在之不穩定性。

本研究計畫將運用以前所收集的車輛運動數據，來驗證此控制方法的可行性。研究所需要的實驗數據包括1.從駕駛方向盤到車體橫向加速度的頻率響應，與2.從駕駛方向盤到車體旋轉速率的頻率響應。在此研究計畫中，我們首先將分析這些實驗數據，並找出實際的系統參數，例如車輛的質量，車輛的慣性距質量，輪胎在地面所產生的側向力係數等。這些實際系統參數，將被用來校正電腦模擬的數學車輛模型，此模型可被進一步用來模擬驗證動態前望導引式控制方法的可行性與有效性。最後，我們將運用動態前望導引法直接處理車輛運動所得之頻率響應數據，並驗證車輛旋轉動態與車輛的橫向動態是否產生如數學模式分析所預測的互相解耦現象。

**關鍵詞：**車輛控制，自動駕駛，轉向控制，迴轉運動解耦，系統輸出重新定義，系統零點動態。

## Abstract

To enhance passenger ride comfort, improve vehicle safety and stability, and possibly reduce potential accidents due to driver mis-operations, automatic steering control has been a fascinating research topic in the area of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS). More recently, due to deteriorated traffic congestion on highways, steering control of automated vehicles has been studied extensively in the context of Automated Highway Systems (AHS) among researchers throughout the world in the past several years.

A popular automatic steering control approach for passenger cars is to de-couple the yaw motion from lateral motion by using yaw rate feedback. It has recently been shown that by re-defining the control position at a frequency-dependent distance ahead of the vehicle, the yaw dynamics can also be de-coupled. The resulting system dynamics with this dynamic look-ahead scheme can be simplified into a double-integrator type vehicle dynamics with a constant open-loop gain. It has further been shown that the open loop gain of the resulting double-integrator vehicle dynamics is independent of the vehicle longitudinal velocity. This invariant property makes the design of a full-operating-envelope controller much easier. Even though the simplified input-output dynamics obtained from the dynamic look-ahead scheme appears similar to that from the de-coupling approach using yaw rate feedback, the hidden (unobservable) dynamics of the closed control loop using the dynamic look-ahead scheme possesses much better damping properties than that using yaw rate feedback.

In this study, experimental data of open-loop vehicle dynamics at different vehicle speeds will be used to validate the effectiveness of this dynamic look-ahead scheme. Experimental data utilized in this study include both vehicle yaw rate frequency response and lateral acceleration frequency response, which have been

conducted before by applying frequency-sweeping techniques at different vehicle longitudinal velocities. Important vehicle parameters, such as mass, moment of inertia, and tire cornering stiffness, will firstly be estimated/identified in this project by analyzing these experimental data. Secondly, a computer simulation vehicle model, which has been derived by applying Newton's law of motion, will be calibrated by incorporating identified vehicle parameters and possible un-modeled dynamics extracted from the experimental data. This calibrated computer simulation model will be utilized to simulate the vehicle's closed-loop response under automatic steering control using the proposed dynamic look-ahead scheme. Thirdly, notice that the main appeal of this dynamic look-ahead scheme is that it can de-couple vehicle's yaw dynamics from vehicle's lateral dynamics and simplify the input-output dynamics into a double-integrator. This claim will be validated by applying the dynamic look-ahead scheme off-line to the experimental data and examine if the input-output frequency response exhibits double-integrator characteristics.

**Keyword** : Vehicle Control, Automatic Steering, Lateral Control, Yaw De-coupling, Zero Dynamics, Output Re-definition

## 二、緣由與目的

為了增進車輛乘坐的舒適性，改進車輛行駛的安全操控性與穩定性，並期望能進一步降低肇因於人為駕駛操作疏失所引起的車禍發生率，車輛自動駕駛與控制已成為科技時代日益重要且有趣的研究課題。又因近年來交通阻塞的問題日益嚴重，全球許多的科技研究人員已深入地思考如何將車輛自動駕駛與控制技術應用於智慧型車輛與自動化高速公路上。根據空間及時間的規模來考量，此自動化高速公路系統的控制架構可分由五個垂直控制層面來組成：網路層

(network layer)、連結層(link layer)、協調層(coordination layer)、伺服層(regulation layer)以及實體層(physical layer)。在網路層及連結層的控制工作於路肩系統執行，而協調層與伺服層的控制工作則由裝載於車輛上的電腦完成。實體層代表車輛之系統動態，而此受控系統則是由伺服層所控制。在這樣的系統架構中，車輛駕駛控制座落於伺服層，並且是自動化高速公路結構中相當重要的一部份。

在車輛自動駕駛控制領域裡，早先的研究已分別由運用線性控制理論及非線性控制理論導入。縱使車輛駕駛控制已藉由線性及非線性控制理論廣泛地研究，然而，從物理系統動態觀點來看，車輛駕駛控制的主要挑戰之一乃是導因於介於車輛動態側面及旋轉運動的強健耦合。因此，另一個駕駛控制的普遍方法是藉由旋轉速率的回授，對受控車輛前輪軸的側面加速度進行旋轉動態的解耦 [1, 2]。這樣的解耦方法基本上可以使前車軸的旋轉動態，經過極零點對消變的不可觀察，導致一個理想的車輛駕駛動態。一旦旋轉動態經過車輛側面運動後成為不可觀察的狀態，那麼從系統輸入-輸出的觀點來看，車輛將會變得容易控制多了。

最近，Chen 及 Tan [3]已證明了，藉由重新定義受控車輛在車輛前頭的一個適當動態距離自動駕駛輸出，旋轉動態將會變成不可觀察。利用動態前望導引法所得到的車輛模型可以被簡化成一個由前瞻點算起，前輪轉向角度到側相位移的雙重積分動態。換句話說，由前瞻點算起，前輪轉向角度到側相加速度的轉移函數變成是一個常數的增益。此外 Chen 及 Tan 也證明了轉移函數的開回路增益並不隨車輛的縱向速度改變而有所增減。因此，妥善運用車輛橫向動態的開回路增益相對於車輛縱向速度而言是不變的這個性質，可十分容易地設計一個全車速自動駕駛迴授控制駕駛控制器。

儘管所推得結合動態前望導引法的系統動態，看起來相似於藉由旋轉速率迴授的解耦控制所得的結

果，然而其中所隱含的動態行為根本上是不同的。我們也指出，雖然車輛橫向動態系統的零點是穩定的，但是當車速增快時，系統零點的阻尼常數卻顯著地減少。回想系統理論，零點的動態是受控系統一種固有的性質，其受到一個受控系統輸入/輸出的動態所影響，但是並不依賴於特定選擇之迴授控制法則。另外一方面，旋轉動態解耦控制方法[1, 2]，主要藉由將系統的極點移動到只有微量阻尼之系統零點的位置上，利用旋轉速率迴授控制法使旋轉動態不可觀察，因而導出只有微量阻尼之隱藏系統動態。相對於由使用旋轉速率迴授控制法來放置閉迴路系統極點於微量阻尼的位置上，我們的研究結論指出，若重新定義受控系統之輸出(output re-definition)將使得輕微阻尼零點動態被改善。此外，我們注意到在，位於一個與頻率相關的車輛前瞻距離內，將供更多重新定義系統輸出的自由度。在動態前望導引法裡，我們選擇將系統零點位置重新設計至開迴路系統極點的位置，以達到極/零點補償。在這個方法中，當隱藏(不可觀察)的動態不但是穩定而且保有一個較好的阻尼率時，特別是處於更高的車速之下時，位於受控點的旋轉運動同樣是解耦並且不可觀察的。改善後的高阻尼率隱藏動態顯示出較少的旋轉震動，因而導致一個在駕駛控制自動車輛下較好的乘座品質。

### 三、研究方法

這節將描述在車輛駕駛控制的動態前望導引法實驗研究中主要的方法。它們包括

1. 實驗數據的信號處理
2. 車輛系統參數鑑定
3. 運用實驗數據進行電腦模擬車輛模型的校準
4. 動態前望演算法之證實

#### 3.1 實驗數據的信號處理

利用 GM Buick Lesabre's 型車輛開迴路系統頻率響應的實驗數據來驗證這個動態前望導引法的有效

性。實驗車輛的側向加速度以及旋轉速率信號於之前已被取樣及記錄過。我們可使用伴隨著頻率廣泛分佈於 0.1 赫茲到 5 赫茲之間的正弦波操作方式獲得這些實驗數據。上面所指寬廣頻率的界線之所以會選擇在 5 赫茲，是考慮到系統駕駛致動器的頻寬所致。開迴路系統頻率響應實驗所選則之正弦波輸入訊號是位於車前輪之 1 度正弦曲線。這個系統頻率響應之系統輸出實驗數據則是在不同車速之下，如 10 m/s、20 m/s 及 30 m/s，所獲得的。

### 3.2 車輛系統參數鑑定

重要的車輛參數，像是車體的質量、轉動慣量、車輪輪距、車軸軸距以及車輪與地面產生之側向力係數，將在這個工作單元中被測定及估算。利用最小平方方法經由 3.1 節所得到的系統頻率響應數據可擷取出所需要之系統參數。

### 3.3 運用實驗數據進行的車輛電腦模擬模型的校準

在這個工作單元中，將導入多方面的模擬，藉由工作項目 3.2 中所得到的系統參數進行合併，對車輛模擬模型進行校準。車輛模擬模型的校準包括

- 將車輛模擬模型所獲得的波德圖與實驗數據所獲得的波德圖進行比較。
- 將車輛模擬模型所獲得的時域輸出信號與實驗數據所獲得的時域信號進行比較。
- 系統參數的細部調整
- 將未建立模型的系統動態合併
- 對駕駛致動器動態加以鑑別

### 3.4 動態前望演算法之證實

上面所提出的動態前望引導式演算法之證實將引入兩個階段。

#### 階段一：開迴路驗證

回想這個演算法主要訴諸的地方，是對受控系統之輸出重新定義於車輛前與頻率相依的投影點，如此，車輛旋轉動態將與車輛側向動態解耦。這個解耦性質可以運用開迴路系統頻率響應所得之實驗數據證實，也就是說，將我們提出的動態前望引導式演算法應用於實驗的頻率響應數據以及檢查實驗結果的轉移函數是否為雙重積分器後證實。

#### 階段二：閉迴路驗證

基於 3.3 小節中所得到的模擬模型，經由多方面的電腦模擬，其可表現出真實車輛動態，藉由將所提出的動態前望演算法合併，用以驗證迴授駕駛控制器的效用。這項研究將會以這個工作所得到的結果為基礎引出最後的結論。

## 四、結果與討論

我們已由實驗證明了所提出的動態前望導引法之有效性。對開路控制車輛進行測試可得到其頻率響應數據。在 1996 年的時候，Buick LeSabre 將此模組裝上了感測器、制動器及電腦介面，在測試平台上做了此實驗。測試車輛的縱向被裝上一個頻寬為 5 赫茲的駕駛致動器。旋轉速率感測器及加速器則裝在靠近車輛重心的地方，用來蒐集車輛旋轉速率以及側向加速資料，並使用 Pentium 的 PC 作為取得數據及控制用的電腦。

由於車輛的橫向動態與車輛的縱向速度有很大的關係，為了要得到車輛橫向動態的頻率響應，因此車子的前進速度必須被固定，每個速度均需做一組頻率響應的量測。在每組的量測當中，頻率的變化範圍是從 0.1 赫茲變化到 5 赫茲，並在此之中，經由駕駛方向盤、車子旋轉量及側向加速量得頻率響應。必須注意的是，當車輛的速度變快後，它的橫向動態也會變的非線性。為了得到車輛橫向動態線性化部分的頻

率響應，所以測試時必須使用較小的控制輸入。換句話說，在測試的階段，駕駛制動器必須採用小的正弦曲線前輪操控角。車輛側向加速度及旋轉速率頻率響應的實驗結果，在 20m/s(45MPH)及 30m/s(67MPH)分別如圖 1 及圖 2 所示。

一個從駕駛方向盤到重新定義動態前望點的側向加速度，其綜合頻率響應，可以經由側向加速(圖 1)及旋轉速率的頻率響應(圖 2)中的資料處理後得到。圖 3 表示了綜合的頻率響應波德圖。在圖 3 可以看出，在不同車速下(20 m/s 與 30 m/s)所得之轉移函數的頻率響應，其差異只有 1db 的變化量，並且不受車輛縱向速度所影響。更進一步的說，標準化後的轉移函數其低頻增益為 38db，這與理論上的計算及預期恰好相同。

圖 1：駕駛方向盤至側向加速度轉移函數的波德圖

圖 2：駕駛方向盤至旋轉速率轉移函數的波德圖

圖 3：駕駛方向盤至動態前望點之側向加速度的轉移函數波德圖

## 伍、參考文獻

1. Ackermann, J., "Robust Decoupling, Ideal Steering Dynamics and Yaw Stabilization Of 4WS Cars", *Automatica*, vol.~30, no.~11, pp.~1761—1768, 1994.
2. Ackermann, J., "Robust Decoupling of Car Steering Dynamics with Arbitrary Mass Distribution", *Proceedings of the 1994 American Control Conference*, pp.~1964--1968, Baltimore, 1994.
3. Chen, C., and H.S. Tan, "Steering Control of High Speed Vehicles: Dynamic Look Ahead and Yaw Rate Feedback", *Proceedings of 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida, December, 1998.
4. Guldner, J., H. Tan, and S. Patwardhan, "Analysis of Automatic Steering Control for Highway Vehicles with Look-down Lateral Reference Systems", *Vehicle System Dynamics*, vol. 26, pp. 243-269, 1996.