

大華科技大學

電機與電子工程系碩士班

碩士論文

未知信號估測技術應用在車輛狀態估測與
控制

Application of Unknown Input Filtering to
Vehicle State Estimation and Control

研究生：康森

指導教授：謝劍書博士

中華民國一〇七年七月二十五日

未知信號估測技術應用在車輛狀態估測與控制
Application of Unknown Input Filtering to Vehicle State
Estimation and Control

研究生：康森

Student: Kang-Sen

指導教授：謝劍書 博士

Advisor: Dr. Chien-Shu Hsieh

大華科技大學

電機與電子工程系碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electrical and Electronic Engineering

College of Engineering and Design

Ta Hwa University of Science and Technology

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Electrical and Electronic Engineering

July 2018

Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中 華 民 國 一 〇 七 年 七 月

大華科技大學

論文口試委員會審定書

本校 電機與電子工程系 碩士班 蕭森 君

所提論文 未知信號估測技術應用在車輛狀態估測與控制

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：謝劍書 張佩宏

鄭時龍

指導教授：謝劍書

系主任：鄭時龍

中華民國一〇七年 七月 二十五 日

摘要

車輛控制需要估測系統來提供精確之車輛動態資訊，其估測效果往往會因為實際車輛和車輛模型間的差異，而產生不同之結果。車輛系統模型包含了許多未知的系統參數或信號，如輪胎對地面的摩擦剛度變化、致動器或感測器失效模式及道路坡度等，此皆會造成系統狀態估測或車輛控制之困難度。若採用忽略此些重要系統參數之策略，則其引發之估測效果或控制結果，將會大打折扣，甚而影響車輛行車之安全性。

本論文研究目的即在建立一套未知信號估測方法，藉以解決車輛系統所面臨之各種未知信號的影響，以期建立一最佳車輛強健觀測器和控制器設計方法，用以解決日益複雜之車輛控制器設計問題。本論文研究方法首先推導具道路坡度之車輛運動學模型，藉以了解車輛系統所內含之未知信號。其次，探討具量測失效模式之車輛狀態估測問題，並將其轉換為一等效未知信號估測問題。然後，嘗試應用現有未知信號估測技術，來建構一套有效車輛強健觀測器和控制器設計方法。最後，透過廣泛之模擬結果來驗證研究成果之有效性。

本論文研究成果包含有：

- (1) 提出一最佳車輛強健觀測器和控制器設計方法，以解決具未知信號之車輛系統狀態估測問題。
- (2) 針對具未知信號之車輛系統模型，提出一整合式系統建模技巧，以同時解決車輛系統之狀態及未知信號估測問題。
- (3) 針對車輛在道路具有坡度所產生之未知信號干擾現象，提出一有效之未知信號估測技術，以同時解決車輛系統之狀態及坡度估測問題。
- (4) 針對車輛系統可能存在之量測失效模式，提出一有效之未知信號估測技術，以解決車輛系統之狀態及量測失效值估測問題。
- (5) 提出利用線性平方調節器設計方法，來穩定車輛在受到外在環境干擾時所產生之運動作用，以減少車輛傾覆之機會。

關鍵字：未知信號估測、強健觀測器設計、車輛強健控制。

Abstract

Vehicle control requires an estimation system to provide accurate vehicle state information, which may have different results due to modeling errors. The vehicle system contains many unknown system parameters or signals, such as tire-to-ground frictional stiffness changes, actuator or sensor faults and road bank angle, which can cause system state estimation or vehicle control difficulties. If these unknown parameters are ignored, the performance of obtained estimation or control may be degraded, which may even affect the safety of vehicle driving.

The purpose of this thesis is to apply unknown input filtering method to solve the state estimation problem of a vehicle system with unknown inputs, and hence to develop an optimal vehicle robust observer and controller design method to achieve increasingly complex vehicle designs. First, the thesis presents a vehicle system model with road bank angle, which clearly shows the unknown inputs existed in a vehicle system. Second, the vehicle state estimation problem with measurement fault is addressed, which then is converted into an equivalent unknown input filtering problem. Next, using the existing unknown input filtering method, an effective vehicle robust observer and controller design method is developed. Finally, the effectiveness of the research results is validated through extensive simulations.

The research results of this thesis include:

- (1) to propose an optimal vehicle robust observer and controller design method to solve the state estimation problem of a vehicle system with unknown inputs.
- (2) to propose an integrated system modeling technique to simultaneously solve the state and unknown inputs estimation problem of a vehicle system.
- (3) to propose an effective unknown input filtering method to compensate for the unknown interference phenomenon caused by the bank angle of the road, and hence to solve the simultaneous vehicle state and road bank angle estimation problem.
- (4) to propose an effective unknown input filtering method to solve the state and

measurement fault estimation problem of a vehicle system and.

- (5) to propose a LQR regulator design to stabilize the motion of a vehicle system when it is disturbed by the external environment.



Keywords: Unknown input filtering, Robust observer design, Vehicle robust control.

誌 謝

兩年的研究生生活中，在大華科技大學電機與電子工程系的教授們精心的課程安排下學到了很多在業界能發光發熱的學識，在校生活的點點滴滴真讓人又喜又恨的，喜的是學生的身份是無憂無慮的，而恨的是時間怎那樣冗長很想能立馬畢業離開學校，想到念讀碩士班從似懂非懂的學著有關電機與電子相關的學識到完成碩士論文，感謝指導教授謝劍書博士，課堂指導專業學識並給予優良學習環境，能讓我的學識得到很多的獲益，在人生的學程旅途中最重要的莫過於您的耳提面命、時時提攜，希望我在職涯中能如翔龍在天，有一顆著附很多學識的金頭腦和高人一等的技能旋盤在職場上，先予在此論文致上最高的敬意。

能屆時的完成本論文，真的要萬分感謝教授謝劍書博士順依適合著我學習的程度時常導引給予我研究的方向，在資源上、專業上的領域時常提攜我很多很多，也時常不斷的給予鼓勵在我研究的過程中遇到貧頸時，學生的我深深的感激暨敬佩。各科指導教授在教學上極盡的用心在研究上給予專業的指導和啟發。在口試的期間，於各領域有著相當頂尖學識的老師們在忙碌中前來對學生的指正提意，讓我深深感到要繼續更加深入的研究許多不足的地方，使我能在研究的領域中得到正向的助力，讓我在學識的領域無懈可擊。

首先感謝我的父母，謝謝總是在我遇到貧頸難過的候能適時的給予力量、關懷和無私的溺愛。這一切的資源及無怨的支持與鼓勵，給予我無後顧之憂能專心完成學業，勇挑人生築我自己想要的夢，我們可利用這份榮耀、成就獻給你們，爸媽我愛你們。

謝謝這努力一起求學同學們：正發、憲政、及文曲在旁給予了很多協助，一起研究並肩討論，在研究的過程中我們互相有提點、也因這樣更給予了我的更多在研究生生活中知道了更多我已前不為知的事、而因為有了你們的提點，讓研究時有了更多的想法能置入研究項目裡，這也是在研究過程中一種意外的收穫也使得在作研究時不會無聊，哈哈，當然這份成就也與你一起喲。

還有還有我親愛的老婆，在這我拼讀研究所的兩年伴我陪我一起成就一個

學程的里程碑，謝謝妳也相同的在工作和家庭需同時兼顧的生活裡，能在極為忙碌的生活環境裡，盡為所能的排除萬難陪我築夢圓夢能讓我在無後顧之憂下完成我的學程追求且完成學程中另一個哩程的最高成就。

你們是我最大的輔進動力能量，給我能得到我在學程中一個致高的學識成就，圓一個夢、成一個夢想。能屆時實現我的學識哩程目標，心無任何掛礙的完成學業。這完成論文獻給你們，與你們分享我的榮耀成就。

後予，在這研究過成一直在我身旁幫助的你們和沒有一一登寫入文內的你們和他們，也一起在這與我共享這無比光榮成就新的學識哩程杯，我會永遠刻記在我的內心，無比的感恩你們、謝謝你們。



目 錄

摘 要	4
誌 謝	7
第一章 緒論	13
1.1 研究動機與背景	13
1.2 文獻回顧	13
1.3 研究目的與方法	14
1.4 論文架構	15
第二章 未知信號估測技術	16
第三章 車輛系統模型	19
3.1 車輛運動方程式	19
3.2 具道路坡度之車輛動態模型	21
3.3 車輛系統量測模型	24
第四章 具未知信號之車輛狀態估測及控制問題	26
4.1 量測失效模式	26
4.2 具未知信號之車輛狀態估測問題	26
4.3 具未知信號之車輛控制問題	28
第五章 最佳車輛強健觀測器和控制器設計	29
5.1 最佳車輛強健觀測器設計	29
5.2 最佳車輛強健控制器設計	30
第六章 模擬結果	32
6.1 模擬參數設定	32
6.2 忽略未知信號之系統參數估測結果	34
6.3 應用未知信號估測技術之系統參數估測結果	39
6.4 模擬結果討論與分析	47
第七章 結論與未來研究方向	48
7.1 結論	48

7.2 未來研究方向 48

參考文獻 49



圖目錄

圖 1	SAE 車輛座標軸系統〔1〕	19
圖 2	車輛雙輪運動模型〔2〕	20
圖 3	車輛側傾模型〔2〕	22
圖 4	忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側滑角估測值	35
圖 5	忽略未知信號及不考慮控制器輸出之偏航角速度估測值	35
圖 6	忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側傾角估測值	36
圖 7	忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側傾角速度估測值	36
圖 8	忽略未知信號及考慮控制器輸出之側滑角估測值	37
圖 9	忽略未知信號及考慮控制器輸出之偏航角速度估測值	37
圖 10	忽略未知信號及考慮控制器輸出之側傾角估測值	38
圖 11	忽略未知信號及考慮控制器輸出之側傾角速度估測值	38
圖 12	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側滑角估測值	39
圖 13	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之偏航角速度估測值	40
圖 14	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側傾角估測值	40
圖 15	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側傾角速度估測值	41
圖 16	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側滑角估測值	41
圖 17	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之偏航角速度估測值	42
圖 18	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側傾角估測值	42
圖 19	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側傾角速度估測值	43
圖 20	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之 CG 側傾加速度估測值	43
圖 21	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之道路坡度估測值	44
圖 22	應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之量測錯誤訊號估測值	44
圖 23	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之 CG 側傾加速度估測值	45
圖 24	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之道路坡度估測值	45
圖 25	應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之量測錯誤訊號估測值	46
圖 26	應用未知信號估測技術之控制器輸出值	46

表格目錄

表格 1 模擬參數設定.....32



第一章 緒論

1.1 研究動機與背景

近年來，交通重大意外頻傳，造成民眾重大之財產損失及生命安全威脅。特別是當車輛進入彎道行駛時，由於道路坡度造成輪胎側受離心力產生的壓伸力，因而產生車輛側傾角 (*Roll angle*)，此將會造成車輛本體傾斜。若控制不當，將會產生過大之側傾角，以致造成車輛傾覆 (*Rollover*)。防止車輛翻覆已被視為交通事故中最為重要的安全議題，常見的事故中影響最大的莫過於路面的狀況和參雜著一些人為不當的操作，使得車輛在不穩定的狀態下行使而打滑產生追撞事故。為了避車輛在不穩定的狀態下作動，電子式車輛控制系統需既精準又快速的計算出車側加速度和側滑角 (*sideslip angle*)，來致動行駛中的車輛。由於車輛在行駛中路面絕非水平，不同的道路相對的也有不同的坡度 (*road bank angle*)，此將會造成車輛本體的架構傾覆。現今的感測器只能量測計算出車輛本體的架構傾覆角度及路面角度和，難以精確算出側滑角度，因此如何計算出精確之車輛側滑角度，是目前學術界研究車輛控制之一重要課題。

另外，車輛系統模型中包含了許多未知的系統參數或信號，如輪胎對地面的摩擦剛度變化、致動器或感測器失效模式及道路坡度等，此皆會造成系統狀態估測或車輛控制之困難度。若採用忽略這些重要系統參數之策略，則其引發之估測效果或控制結果，將會大打折扣。

本論文基於上面車輛系統難以精準建模之困境背景及複雜環境，希望能開發出一套精確且實際之未知信估測技術，利用此一技術來提高車輛系統面臨未知環境之應變力，進而使得車輛系統在面對現今複雜的交通環境更能增加操控性，以期達到提升車輛駕駛的安全性及舒適性。

1.2 文獻回顧

車輛精確控制一般皆需估測系統來提供車輛動態資訊，且估測效果會因為實際車輛和簡單的車輛模型間的誤差有所影響。目前大部份學者採用以車輛動態模型所產生的數據作為估測系統的參考數據，過去一般皆利用較簡單的車輛

模型來做為車輛動態的估測系統，例如車輛側傾/俯仰模型〔2〕、四分之一車輛模型（*Quarter Vehicle Model*）學者亦提出〔2〕可直接用控制方法控制車輛橫擺力矩，以期穩定車輛在側滑角方面的控制，降低車輛行駛時側向力的產生。或是車輛側傾模型〔8〕、單軌模型（*Single Track Model*）〔11〕-〔12〕、Ackermann〔15〕在1990年提出，車輛在動態中於轉彎下造成的側向力為一種可變的質量，這種可變的質量力可用以產生影響車輛運動之偏航角，並在車輛結構上裝置防止傾覆的控制系統，以穩定動態運動中的車輛狀態。

過去有許多研究學者針對車輛估測採用卡曼濾波器設計方法，並建立車輛動態模型，以準確估測出車輛橫擺角及車輛側滑角〔2〕。然而，在相同的車輛駕駛情況下，會因為不同的道路狀況而產生不同的控制效果，進而影響車輛運動的穩定性或是傾覆性〔2〕、〔5〕、〔7〕。此現象肇因於道路狀況（如道路坡度）無法透過車輛感測器立即得知，其原因是道路狀況會耦合其它因素如車輛側向加速度／車輛縱向、俯仰角／車輛側傾（〔9〕、〔10〕-〔12〕），無法獨立預測。另外，卡曼濾波器設計方法僅能適用於未知信號模型能精準掌握情況下，面對完全未知的車輛信號，其估測效果將會大打折扣，甚至於產生無法估測之情況。

針對上面車輛系統面臨建模及卡曼濾波器無法精確估測具未知信號的系統狀態等問題，如何建構一套更精準之車輛建模及未知信號估測技術，將是從事車輛系統設計工作者必須面對的重要課題之一。

1.3 研究目的與方法

本論文研究目的即在建立一套未知信號估測方法，藉以解決車輛系統所面臨之各種未知信號的影響，以期建立一最佳車輛強健觀測器和控制器設計方法，用以解決日益複雜之車輛控制器設計問題。

本論文採用研究方法如下說明。首先，我們利用文獻〔2〕所提出之側傾模型（*vehicle roll model on bank road*），來推導具道路坡度之更實際的車輛運動學模型，藉此了解一車輛系統所內含之未知信號。其次，我們探討具量測失效模式之車輛狀態估測問題，並將其轉換為一未知信號估測問題。接續，我們嘗試

應用文獻〔10〕所提出之未知信號估測技術，來建構一套有效車輛強健觀測器和控制器設計方法。最後，我們透過廣泛之模擬結果，來驗證研究成果之有效性。

1.4 論文架構

本論文架構共分為七個章節，內容略述以下：

- 第一章 緒論：本章述明本論文研究動機與背景、相關參考文獻回顧、研究目的及所採用研究方法說明，最後介紹本論文架構。
- 第二章 未知信號估測技術：介紹本論文所採用未知信號估測技術之設計理念及其詳細設計步驟說明。
- 第三章 車輛動態模型：首先，在 3.1 節我們推導本論文所研究之車輛運動方程式，其次在 3.2 節中我們進一步考量具道路坡度之車輛動態模型推導，最後在 3.3 節中我們述明本論文所採用之車輛系統量測模型。
- 第四章 具未知信號之車輛狀態估測及控制問題：首先，在 4.1 節我們描述本論文所提出之車輛系統量測失效模式，其次在 4.2 節中我們描述本論文所探討之具未知信號之車輛狀態估測問題，最後在 4.3 節中我們描述本論文所探討之具未知信號之車輛控制問題。
- 第五章 最佳車輛強健觀測器和控制器設計：首先，在 5.1 節我們提出最佳車輛強健觀測器設計，其次在 5.2 節中我們提出最佳車輛強健控制器設計。
- 第六章 模擬結果：首先，在 6.1 節我們說明模擬系統參數設定，其次在 6.2 節中我們模擬若忽略未知信號處理，其所產生估測不佳之模擬結果，在 6.3 節我們模擬應用未知信號估測技術所產生之系統參數估測結果，最後在 6.4 節中我們針對 6.2~6.3 節模擬結果作一綜合性評論，並針對估測不佳之結果提出可能之原因說明。
- 第七章 結論與未來研究方向：本章節綜整本論文研究成果之貢獻，並針對部分研究方法未周全或是模擬結果不佳之情形，提出未來可行之研究議題。

第二章 未知信號估測技術

未知信號往往存在一個真實動態系統中，其可能代表一個系統中所存在的外擾、建模誤差、致動器誤差或是感測器誤差。若我們將其直接忽略處理，則所得到的估測效果或是控制結果，往往無法獲得一個滿意的結果。在本章中，我們介紹如何利用未知信號估測技術，使得系統中所存在的未知信號，藉由此一轉換技巧能夠消除，變成一個未包含未知信號的等效系統。借助此一等效系統的輔助，我們可利用傳統的估測及控制方法，來解決系統包含未知信號的估測及控制問題。我們考慮一包含未知信號的系統狀態方程式如下：

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gd \quad (2.1)$$

$$y = Cx + Hd \quad (2.2)$$

其中 $X \in \mathbf{R}^n$ 為系統狀態、 $u \in \mathbf{R}^n$ 為控制輸入、 $d \in \mathbf{R}^p$ 為未知信號及 $y \in \mathbf{R}^m$ 為系統量測值。本章所探討之未知信號估測問題即是：如何將系統 (2.1) - (2.2) 式中的 d 未知信號消除，使其產生如下等效未包含未知信號之一新的系統狀態方程式：

$$\dot{\bar{X}} = \bar{A}\bar{X} + \bar{B}u + \bar{D}\dot{y} \quad (2.3)$$

$$y = \bar{C}\bar{X} \quad (2.4)$$

解決上述未知信號估測問題的一個可行方法是，利用系統量測值的微分來估測 d 未知信號，然後將此估測值代回原系統，以產生一個未包含未知信號的等效系統。在下面討論中，我們將介紹文獻 [9] 所提出之未知信號估測技巧。

首先，我們將 (2.2) 式中的 d 分解如下：

$$d = \Phi d + \Pi d, \quad \Phi = H^+ H, \quad \Pi = I - \Phi \quad (2.5)$$

其中 M^+ 代表 M 之虛擬反矩陣 (*pseudo inverse*)。利用滿秩矩陣分解法將矩

陣 H 及 Π 分別分解為 $H = \bar{H}\tilde{H}$ 及 $\Pi = \bar{\Pi}\tilde{\Pi}$ ，其中 \bar{H} 及 $\bar{\Pi}$ 為滿行秩矩陣，而 \tilde{H} 及 $\tilde{\Pi}$ 為滿列秩矩陣。則利用定義新向量如下： $\bar{d} = \tilde{H}d$ 及 $\bar{d} = \tilde{\Pi}d$ ，我們可將 (2.5) 式改寫如下：

$$d = \tilde{H}^+ \bar{d} + \bar{\Pi} \tilde{d} \quad (2.6)$$

將上式代入 (2.1) - (2.2) 式，我們可得如下之一等效之系統狀態方程式：

$$\dot{x} = Ax + Bu + G\tilde{H}^+ \bar{d} + G\bar{\Pi} \tilde{d} \quad (2.7)$$

$$y = Cx + \bar{H} \bar{d} \quad (2.8)$$

為簡化下面討論，我們假設 (2.7) 式中矩陣 $G\tilde{\Pi} = 0$ （本論文所研究之車輛系統滿足此一關係，否則可依據文獻 [9] 所提出之方法加以解決）。

其次，我們定義系統擴增狀態變數 $X = [x^T \ \bar{d}^T]^T$ ，則可將系統狀態方程式 (2.7) - (2.8) 式改寫為如下之描述系統 (*descriptor system*) 表示法：

$$[I \ 0] \dot{X} = [A \ G\tilde{H}^+] X + Bu \quad (2.9)$$

$$y = [C \ \bar{H}] X \quad (2.10)$$

藉由文獻 [8] 的方法，我們可將 (2.9) 式表示為如下之標準系統 (*standard system*) 表示法：

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} A & G\tilde{H}^+ \\ 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \dot{\bar{d}} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.11)$$

將 (2.10) 式微分並利用 (2.11) 式，我們可得下式：

$$\dot{y} = [CA \ CG\tilde{H}^+] X + \bar{H} \dot{\bar{d}} + CBu \quad (2.12)$$

由於矩陣 \bar{H} 為滿行秩矩陣，因此依據 (2.12) 式我們可求得未知信號 $\dot{\bar{d}}$ 如下

:

$$\dot{d} = \bar{H}^+ (\dot{y} - [CA \quad CG\tilde{H}^+]X - CBu) \quad (2.13)$$

將 (2.13) 代入 (2.11) 式，我們可得下式：

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} A & G\tilde{H}^+ \\ -\bar{H}^+CA & -\bar{H}^+CG\tilde{H}^+ \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} B \\ -\bar{H}^+CB \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{H}^+ \end{bmatrix} \dot{y} \quad (2.14)$$

上面 (2.10) 及 (2.14) 式滿足系統 (2.3) 及 (2.4) 式之形式。

最後，本論文所探討具未知信號之車輛狀態估測問題，即可由 (2.3) 及 (2.4) 式來獲得解決。值得一提的是，若系統量測值的微分無法正確得到，則我們可以採用 *Luenberger* 觀測器架構 [7] 來實現此一具量測值微分的系統估測器設計（請參考 5.1 節中詳細 *Luenberger* 觀測器設計過程）。



第三章 車輛系統模型

3.1 車輛運動方程式

為了有利下面車輛運動方程式之推導，我們首先採用美國汽車工程師學會（*Society of Automotive Engineers, SAE*）所定義出之車輛座標軸系統，如圖 1 所示。此座標軸系統我們可利用車輛運動空間分為下面三軸座標：

- (1) x 軸代表車輛前後運動方向
- (2) y 軸代表車輛左右運動方向及
- (3) z 軸代表車輛上下運動方向

圍繞此三軸旋轉之運動則分別定義如下：

- (a) 繞 x 軸旋轉代表在 x 軸之側傾 (*roll*)
- (b) 繞 y 軸旋轉代表在 y 軸之俯仰 (*pitch*)
- (c) 繞 z 軸旋轉代表在 z 軸之偏航 (*yaw*)

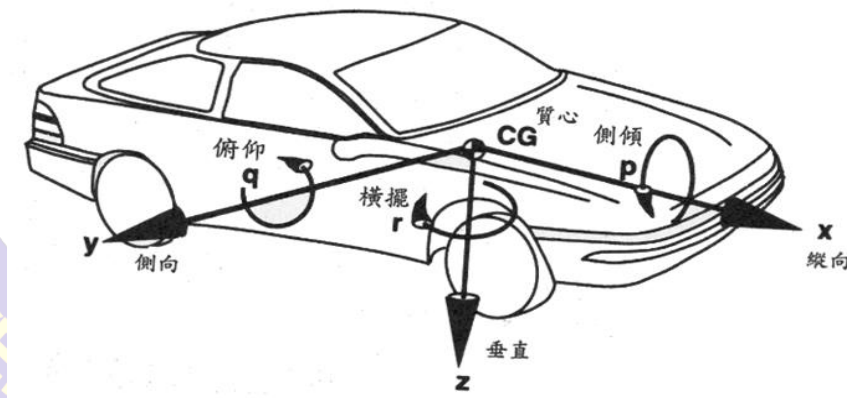


圖 1 SAE 車輛座標軸系統 [1]

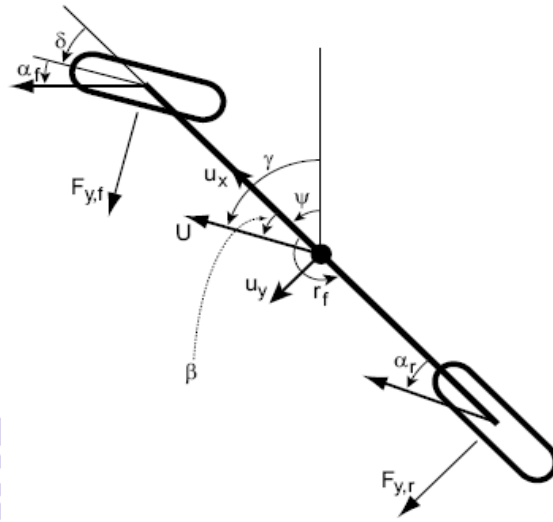


圖 2 車輛雙輪運動模型 [2]

其次，我們思考衡量一線性車輛雙輪運動模型如圖 2 所示，其中 β 和 γ_f 分別為車輛質心 (CG) 的側滑角和偏航速率、 δ 為前輪轉向角度、 l_f 和 l_r 分別為前後輪至 CG 距離、 α_f 和 α_r 分別為前後輪之滑動角度、 u_x 和 u_y 為車輛行駛和橫向速度及 $F_{y,f}$ 和 $F_{y,r}$ 分別為前後輪所受側向力 α_f 、 α_r 、 $F_{y,f}$ 和 $F_{y,r}$ 之值可分別表示如下 [3]：

$$F_{y,f} = -C_f \alpha_f \approx -C_f \left(\frac{u_y}{u_x} + \frac{l_f}{u_x} r_f - \delta \right) \quad (3.1)$$

$$F_{y,r} = -C_r \alpha_r \approx -C_r \left(\frac{u_y}{u_x} - \frac{l_r}{u_x} r_f \right) \quad (3.2)$$

其中 C_f 和 C_r 分別為前後輪之轉向剛度。利用 (1) - (2) 式並依據圖 2 和假設車輛前輪轉向角度很小 ($\delta \approx 0$) 及速度為等速 ($u_x = V$)，我們可獲得車輛所受外力與力矩平衡方程式如下：

$$\begin{aligned} M(\dot{u}_y + u_x r_f) &= F_{y,f} \cos \delta + F_{y,r} \\ &= -C_f \left(\frac{u_y}{V} + \frac{l_f}{V} r_f - \delta \right) - C_r \left(\frac{u_y}{V} - \frac{l_r}{V} r_f \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} I_z \dot{r}_f &= l_f F_{y,f} \cos \delta - l_r F_{y,r} \\ &= -l_f C_f \left(\frac{u_y}{V} + \frac{l_f}{V} r_f - \delta \right) + l_r C_r \left(\frac{u_y}{V} - \frac{l_r}{V} r_f \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

其中 M 為車輛在 CG 之重量及 I_z 為車輛相對於 z 軸之轉動慣量。利用下面關係式 [3]：

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_x}\right) \approx \frac{u_y}{u_x} = \frac{u_y}{V} \quad (3.5)$$

我們可將 (3) - (4) 式改寫如下：

$$\dot{\beta} = -\frac{C_0}{MV}\beta - \left(1 + \frac{C_1}{MV^2}\right)r_f + \frac{C_f}{MV}\delta \quad (3.6)$$

$$\dot{r}_f = -\frac{C_1}{I_z}\beta - \frac{C_2}{I_z V}r_f + \frac{l_f C_f}{I_z}\delta \quad (3.7)$$

其中

$$C_0 = C_f + C_r, \quad C_1 = l_f C_f - l_r C_r, \quad C_2 = l_f^2 C_f + l_r^2 C_r \quad (3.8)$$

3.2 具道路坡度之車輛動態模型

在本節中，我們考慮更實際之車輛行駛狀況。在前一節所推導之車輛運動模型為假設路面在理想水平狀況下，然而若車輛行駛在具坡度之彎道時，則轉彎有可能會造成過大之側傾角 (*roll angle*)，以致造成車輛翻轉 (*rollover*)。在本論文中，我們假設一車輛在具坡度路面之動力學可以圖 3 所示之側傾模型 (*vehicle roll model on bank road*) 來表示，其中 ϕ_v 為車輛相對於車身之側傾角， ϕ_r 為道路坡度 (*road bank angle*) 及 h_s 為 CG 至車輛側傾中心 (*roll center*) 之距離。由圖 3 我們得知，車輛相對於無坡度路面之實際車輛側傾角 ϕ 為 $\phi = \phi_v + \phi_r$ 。

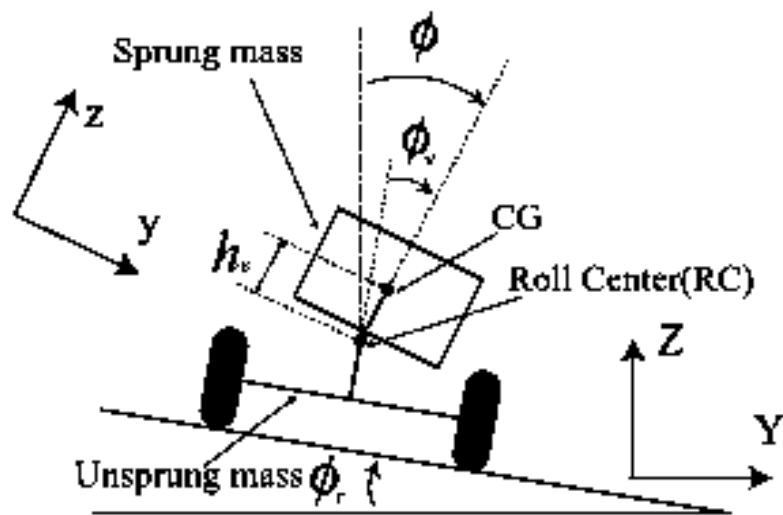


圖 3 車輛側傾模型 [2]

整合前述車輛雙輪運動模型與上面車輛側傾模型，我們可修正前面一節所推導車輛之運動方程式（考量道路坡度 $\phi_r \neq 0$ ）如下。在此情況下，我們必須考量（1）車輛重量在 $\phi_r \neq 0$ 所產生之側傾分力及（2）車輛重量在 $\phi_r \neq 0$ 所產生之重力分力。因此，我們必須修正（3）式如下：

$$M(\ddot{u}_y + u_x r_f - h_s \ddot{\phi}_v + g \phi_r) = F_{y,f} + F_{y,r} \quad (3.9)$$

其中 g 為重力加速度。依據（9）式，我們可獲得（6）式之修正結果如下：

$$\dot{\beta} = -\frac{C_0}{MV} \beta - \left(1 + \frac{C_1}{MV^2}\right) r_f + \frac{C_f}{MV} \delta + \frac{h_s}{V} \ddot{\phi}_v - \frac{g}{V} \phi_r \quad (3.10)$$

接下來，我們還需求得 ϕ_v 之動力學，以期計算（10）式。

假設 ϕ_r 值不大且側傾角 ϕ_v 之動力學可用一個二階彈簧—阻尼—質量系統來描述，則利用（3）式，我們可利用 ϕ_v 之系統模型近似如下：

$$\begin{aligned} I_x \ddot{\phi}_v + b_r \dot{\phi}_v + k_r \phi_v &\approx M(\ddot{u}_y + u_x r_f + g \sin \phi_v) h_s - I_x \ddot{\phi}_r \\ &\approx -C_0 h_s \beta - \frac{C_1 h_s}{V} r_f + C_f h_s \delta + M g h_s \phi_v - I_x \ddot{\phi}_r \end{aligned} \quad (3.11)$$

其中 I_x 為車輛相對於 x 軸之轉動慣量， b_r 為側傾阻尼及 k_r 為側傾剛度。利

用下面關係式 [2]:

$$\dot{\phi}_r = p_f \cos \theta + q_f \sin \phi \sin \theta + r_f \cos \phi \sin \theta \quad (3.12)$$

其中 p_f 和 q_f 分別為 CG 的側傾及俯仰速率及 θ 為 CG 的俯仰角度 (假設其值很小), 則我們可獲得近似關係如下:

$$\dot{\phi}_r \approx p_f \quad (3.13)$$

利用 (13) 式並重新整理 (11) 式, 我們可獲得 ϕ_v 之動力學如下:

$$\ddot{\phi}_v = -\frac{C_0 h_s}{I_x} \beta - \frac{C_1 h_s}{I_x V} r_f + \frac{Mgh_s - k_r}{I_x} \phi_v - \frac{b_r}{I_x} \dot{\phi}_v + \frac{C_f h_s}{I_x} \delta - \dot{p}_f \quad (3.14)$$

另外, 求解 (14) 式之特徵方程式, 我們可獲得下式:

$$\ddot{\phi}_v = \frac{(Mgh_s - k_r)}{I_x} \phi_v - \frac{b_r}{I_x} \dot{\phi}_v \quad (3.15)$$

將 (15) 式代入 (10) 式, 我們可求得

$$\begin{aligned} \dot{\beta} = & -\frac{C_0}{MV} \beta - \left(1 + \frac{C_1}{MV^2}\right) r_f + \frac{C_f}{MV} \delta + \frac{h_s (Mgh_s - k_r)}{I_x V} \phi_v \\ & - \frac{h_s b_r}{I_x V} \dot{\phi}_v - \frac{g}{V} \phi_r \end{aligned} \quad (3.16)$$

最後, 我們考慮更實際的情況: $M = M_s + M_u$, 其中 M_s 為車輛中簧上質量 (*sprung mass*) 及 M_u 為車輛中非簧上質量 (*unsprung mass*)。在此情況下, 前面所考量車輛側傾模型中之質量 M 及其相對於 x 軸之轉動慣量 I_x 亦須分別修正如下 [5]:

$$M \rightarrow M_s, \quad I_x \rightarrow I_{eq} = I_x - \frac{M_s^2 h_s^2}{M} \quad (3.17)$$

利用 (17) 式, 我們可分別修正 (11) 及 (15) 式如下:

$$\begin{aligned} I_{eq} \ddot{\phi}_v + b_r \dot{\phi}_v + k_r \phi_v & \approx M_s (\ddot{u}_y + u_x r_f + g \phi_v) h_s - I_{eq} \dot{p}_f \\ & = -\frac{M_s C_0 h_s}{M} \beta - \frac{M_s C_1 h_s}{MV} r_f + \frac{M_s C_f h_s}{M} \delta + M_s g h_s \phi_v - I_{eq} \dot{p}_f \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\ddot{\phi}_v = \frac{(M_s g h_s - k_r)}{I_x} \phi_v - \frac{b_r}{I_x} \dot{\phi}_v \quad (3.19)$$

另外，車輛所受外力平衡方程式（9）亦須修正如下：

$$M_{eq}(\ddot{u}_y + u_x r_f) - M_s h_s \ddot{\phi}_v + Mg \phi_r = F_{y,f} + F_{y,r} \quad (3.20)$$

其中

$$M_{eq} = M - \frac{M_s^2 h_s^2}{I_x} \quad (3.21)$$

利用（1）、（2）、（5）及（19）式，（20）式可改寫如下：

$$M_{eq} V(\dot{\beta} + r_f) = -C_0 \beta - \frac{C_1}{V} r_f + C_f \delta + \frac{M_s h_s (M_s g h_s - k_r)}{I_x} \phi_v - \frac{M_s h_s b_r}{I_x} \dot{\phi}_v - Mg \phi_r \quad (3.22)$$

重新整理（18）及（22）式，我們可分別得到（14）和（16）式之修正值如下：

$$\ddot{\phi}_v = -\frac{M_s C_0 h_s}{I_{eq} M} \beta - \frac{M_s C_1 h_s}{I_{eq} M V} r_f + \frac{M_s g h_s - k_r}{I_{eq}} \phi_v - \frac{b_r}{I_{eq}} \dot{\phi}_v + \frac{M_s C_f h_s}{I_{eq} M} \delta - \dot{p}_f \quad (3.23)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{C_0}{M_{eq} V} \beta - \left(1 + \frac{C_1}{M_{eq} V^2}\right) r_f + \frac{C_f}{M_{eq} V} \delta + \frac{M_s h_s (M_s g h_s - k_r)}{I_x M_{eq} V} \phi_v - \frac{M_s h_s b_r}{I_x M_{eq} V} \dot{\phi}_v - \frac{Mg}{M_{eq} V} \phi_r \quad (3.24)$$

3.3 車輛系統量測模型

針對前述車輛運動模型，我們考慮下面系統量測值（採用〔4〕中量測值，但刪除其中利用陀螺儀感測器（gyro sensor）量測車輛之側傾速率）：

(1) 陀螺儀感測器 (*gyro sensor*) 可量測車輛之偏航速率如下：

$$y_1 = r_f \quad (3.25)$$

(2) 位於簧上質量 *CG* 之加速度計 (*accelerometer*) 可估測車輛之橫向加速度如下：

$$a_y = \frac{V^2}{R} \cos \phi + g \sin \phi \quad (3.26)$$

其中 *R* 為轉彎半徑。如果 *R* 相當大及 β 相當小，則我們可獲得一近似關係： $Rr_f = V$ 。利用此一關係，(3.26) 式中橫向加速度可近似如下：

$$a_y = a \cos \phi + g \sin \phi = \sqrt{a^2 + g^2} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + g^2}} \cos \phi + \frac{g}{\sqrt{a^2 + g^2}} \sin \phi \right) \quad (3.27)$$

其中 $a = Vr_f$ 。求解 (3.27) 式中 ϕ ，我們可求得

$$y_2 = \phi = \sin^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a^2 + g^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + g^2}} \right) = \phi_v + \phi_r \quad (3.28)$$

(3) 利用加速度計直接量測車輛之橫向加速度 a_y 如下：

$$y_3 = a_y - \frac{C_f}{M} \delta = -\frac{C_0}{M} \beta - \frac{C_1}{MV} r_f \quad (3.29)$$

綜合 (3.25)、(3.28) 和 (3.29) 式，我們可求得系統量測模型如下：

$$y = \begin{bmatrix} r_f \\ \phi \\ a_y - \frac{C_f}{M} \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f \\ \phi_v + \phi_r \\ -\frac{C_0}{M} \beta - \frac{C_1}{MV} r_f \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

第四章 具未知信號之車輛狀態估測及控制問題

4.1 量測失效模式

在本論文研究中，我們進一步考量系統可能存在量測部分失效模式。

假設系統量測模型 (3.30) 包含了一量測錯誤訊號 f_s 如下：

$$y = \begin{bmatrix} r_f \\ \phi_v + \phi_r \\ -\frac{C_0}{M}\beta - \frac{C_1}{MV}r_f \end{bmatrix} + Hf_s \quad (4.1)$$

其中 f_s 之真實數學模型未知且 H 為滿行秩矩陣。

為簡化問題討論，我們假設系統量測模型 (4.1) 式中僅 y_1 包含了量測錯誤訊號 f_s 。因此，(4.1) 式中矩陣 H 可表示如下：

$$H = [1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4.2)$$

因而我們可將 (4.1) 式改寫如下：

$$y = \begin{bmatrix} r_f \\ \phi_v + \phi_r \\ -\frac{C_0}{M}\beta - \frac{C_1}{MV}r_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_s \quad (4.3)$$

4.2 具未知信號之車輛狀態估測問題

首先，利用 (3.7)、(3.23) - (3.24) 和 (4.3) 式，我們可求得車輛系統狀態方程式如下：

$$\dot{x} = Ax + B\delta + G_1\phi_r + G_2\dot{p}_f \quad (4.4)$$

$$y = Cx + H_1\phi_r + H_2f_s \quad (4.5)$$

其中

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ r_f \\ \phi_v \\ \dot{\phi}_v \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{M_{eq}V} \\ \frac{l_f C_f}{I_z} \\ 0 \\ \frac{M_s h_s C_f}{I_{eq}M} \end{bmatrix}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} -\frac{Mg}{M_{eq}V} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_0}{M_{eq}V} & -1 & -\frac{C_1}{M_{eq}V^2} & \frac{M_s h_s (M_s g h_s - k_r)}{I_x M_{eq} V} & -\frac{M_s h_s b_r}{I_x M_{eq} V} \\ \frac{C_1}{I_z} & -\frac{C_2}{I_z V} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_s C_0 h_s}{I_{eq} M} & -\frac{M_s C_1 h_s}{I_{eq} M V} & \frac{M_s g h_s - k_r}{I_{eq}} & -\frac{b_r}{I_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{C_0}{M} & -\frac{C_1}{M V} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad H_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

其次，依據 (4.4) - (4.5) 及 (4.8) 式，我們可得下面關係式： $CG_2=0$ ，此表示 CG 的側傾加速度 \dot{p}_f 無法被估測。為解決此一無法被估測問題，我們進一步假設 $\dot{p}_f=0$ ，其物理意義表示側傾加速度變化不大。依據上面說明，我們定義系統擴增狀態變數 $X = [x^T \quad \dot{p}_f \quad \phi_r \quad f_s]^T$ ，則可將系統狀態方程式 (4.3) 改寫為如下之描述系統(descriptor system)表示法：

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{X} = \begin{bmatrix} A & G_2 & G_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (4.9)$$

藉由文獻 [8] 的方法，我們可將 (4.9) 式表示為如下之標準系統 (standard system) 表示法：

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \begin{bmatrix} A & G_2 & G_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{f}_s \end{bmatrix} \\ &= A^x X + B^x \delta + Gd\end{aligned}\quad (4.10)$$

其次，利用系統擴增狀態變數 X ，我們可將系統部份量測失效模型 (4.5) 式表示如下：

$$y = [C \ 0 \ H_1 \ H_2] X = C^x X \quad (4.11)$$

最後，本論文所探討具未知信號之車輛狀態估測問題為：在常態車輛系統存在未知信號 ϕ_r （數學模型完全未知）及量測錯誤訊號 f_s （數學模型完全未知），如何利用 (4.10) - (4.11) 最佳求得車輛系統狀態值 x 、道路坡度 ϕ_r 值與側傾加速度 \dot{p}_f 值。

4.3 具未知信號之車輛控制問題

首先，利用 (4.4) 式我們可得車輛系統在一特定輸入 δ_e 及外在不確定條件 ϕ_r 及 \dot{p}_f 下之平衡點 x_e 如下：

$$\dot{x}_e = Ax_e + B\delta_e + G_1\phi_r + G_2\dot{p}_f = 0 \quad (4.12)$$

其次，求解 (4.12) 式，我們可求得車輛系統狀態值在一特定輸入 δ_e 及外在不確定條件 ϕ_r 及 \dot{p}_f 下之平衡點如下：

$$x_e = -A^{-1}(B\delta_e + G_1\phi_r + G_2\dot{p}_f) \quad (4.13)$$

最後，本論文所探討具未知信號之車輛控制問題為：在車輛系統存在未知信號 ϕ_r （數學模型完全未知）、量測錯誤訊號 f_s （數學模型完全未知）及一特定輸入 δ_e 下，如何求得 (4.4) 式中之控制值 δ ，使得車輛系統估測狀態 \hat{x} （求解 (4.10) - (4.11) 式）在平衡點附近時，最後會穩定在平衡點 x_e 。

第五章 最佳車輛強健觀測器和控制器設計

5.1 最佳車輛強健觀測器設計

首先，我們利用文獻 [7] 之設計方法（未知信號消去法），將 (4.4) 式微分並代入 (4.9) 式，可求得下式：

$$\dot{y} = C^X A^X X + C^X B^X \delta + C^X G d \quad (5.1)$$

由於 (5.1) 式中矩陣 $C^X G$ 為滿行秩矩陣，因此可求解 (5.1) 式中未知信號 d ($\dot{\phi}_r$ 和 \dot{f}_s) 如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{f}_s \end{bmatrix} = (C^X G)^+ (\dot{y} - C^X A^X X - C^X B^X \delta) \quad (5.2)$$

其次，將 (5.2) 式代入 (4.9) 式，我們可求得 (4.9) 式不含未知信號 d 的等效系統狀態方程式如下：

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (I - DC^X) A^X X + (I - DC^X) B^X \delta + D\dot{y} \\ &= \bar{A}^X X + \bar{B}^X \delta + D\dot{y} \end{aligned} \quad (5.3)$$

其中

$$D = G(C^X G)^+ \quad (5.4)$$

依據 (4.10) 及 (5.3) 式，我們可設計下面估測器來估測 X 之值：

$$\dot{\hat{X}} = \bar{A}^X \hat{X} + \bar{B}^X \delta + D\dot{y} + L(y - C^X \hat{X}) \quad (5.5)$$

其中 L 值則由下面連續時間代數 Riccati 方程式 (CARE) 決定：

$$L = P(C^X)^T R^{-1}, \bar{A}^X P + P(\bar{A}^X)^T + Q - P(C^X)^T R^{-1} C^X P = 0 \quad (5.6)$$

上式中 Q 和 R 為估測器設計參數。

由於估測器 (5.5) 式中含有量測微分值，其值一般很難求得，因此我們採用 Luenberger 觀測器架構 [8] 來執行 (5.5) 式。定義觀測器狀態 z 如下：

$$\hat{X} = z + Ey \quad (5.7)$$

其中 E 值待定。將 (5.7) 式代入 (5.5) 式，我們可求得下式：

$$\begin{aligned} \dot{z} + E\dot{y} &= \bar{A}^x(z + Ey) + \bar{B}^x\delta + D\dot{y} + L(y - C^x z - C^x Ey) \\ &= (\bar{A}^x - LC^x)z + \bar{B}^x\delta + D\dot{y} + (\bar{A}^x E + L - LC^x E)y \end{aligned} \quad (5.8)$$

令 $E=D$ ，則我們可消除 (5.8) 式中量測微分值如下：

$$\dot{z} = A^z z + \bar{B}^x \delta + L^z y \quad (5.9)$$

其中

$$A^z = (\bar{A}^x - LC^x), \quad L^z = L + A^z D \quad (5.10)$$

最後，求解 (5.9) 式並利用 (5.7) 式，我們可求得系統狀態值 x 、道路坡度 ϕ_r 值與側傾加速度 \dot{p}_f 值如下：

$$\hat{x} = [I \quad 0 \quad 0 \quad 0](z + Dy) \quad (5.11)$$

$$\hat{p}_f = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0](z + Dy) \quad (5.12)$$

$$\hat{\phi}_r = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0](z + Dy) \quad (5.13)$$

5.2 最佳車輛強健控制器設計

首先，利用 (4.3)、(4.11) 及 (5.11) - (5.13) 式，我們可得系統狀態估測方程式如下：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\delta + G_1\hat{\phi}_r + G_2\hat{p}_f \quad (6.1)$$

其中 \hat{x} 、 $\hat{\phi}_r$ 及 \hat{p}_f 可由第五章之估測方法求得。

其次，定義 $\tilde{x}_e = \hat{x} - x_e$ 及 $\tilde{u} = \delta - \delta_e$ ，則利用 (4.11) 及 (6.1) 式，我們可得下

面平衡點誤差方程式：

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{x}}_e &= \dot{\hat{x}} - \dot{x}_e \\
 &= A\hat{x} + B\delta + G_1\hat{\phi}_r + G_2\hat{p}_f - (Ax_e + B\delta_e + G_1\phi_r + G_2\dot{p}_f) \\
 &= A(\hat{x} - x_e) + B(\delta - \delta_e) + G_1(\hat{\phi}_r - \phi_r) + G_2(\hat{p}_f - \dot{p}_f) \\
 &= A\tilde{x}_e + B\tilde{u} + w
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

其中

$$w = G_1(\hat{\phi}_r - \phi_r) + G_2(\hat{p}_f - \dot{p}_f) \tag{6.3}$$

利用線性平方調節器(LQR)法則，我們可求得(6.2)式之最佳控制〔8〕如下：

$$\tilde{u}^* = -K\tilde{x}_e, \quad K = F^{-1}B^T S \tag{6.4}$$

其中矩陣 F 為下面最佳性能指標之設計參數：

$$J = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{\infty} (\tilde{x}^T W \tilde{x} + \tilde{u}^T F \tilde{u}) \tag{6.5}$$

而矩陣 S 則滿足下面連續代數 Riccati 方程式：

$$SA + A^T S - SBF^{-1}B^T S + W = 0 \tag{6.6}$$

其中矩陣 W 滿足 $E[ww^T] = W$ 。

最後，利用(6.4)式我們可得下面(4.3)式之最佳控制輸入值：

$$\delta = \delta_e + \tilde{u}^* \tag{6.7}$$

將(6.7)式代入(6.1)式，車輛系統狀態值將會收斂到其穩定的平衡點 x_e 附近。

第六章 模擬結果

6.1 模擬參數設定

在本論文中，車輛參數設定如下。我們設定車輛重量， $M_s=800\text{kg}$ 為車輛中簧上質量 (*sprung mass*)、 $M_u=1200\text{kg}$ 為車輛中非簧質量 (*unsprung mass*)、前輪至軸質心距離為 $l_f=1.402\text{m}$ 、後輪至軸質心距離 $l_r=1.646\text{m}$ 、重力加速度為 $g=9.8\text{m/s}^2$ 、 x 軸的轉動慣量為 $I_x=614\text{ kg/m}^2$ 、 z 軸的轉動慣量為 $I_z=2765\text{ kg/m}^2$ 、前輪轉向剛度為 $C_{af}=34000\text{ N/rad}$ 、後輪轉向剛度為 $C_{ar}=38000\text{ N/rad}$ 、車輛速度 V 為 50m/s 、側傾剛度為 $K_r=34000\text{ N/rad}$ 、質心至側傾中心距離 h_s 為 0.5m 、側傾阻尼為 $b_r=5000\text{ Nms/rad}$ 、車輛轉動慣量為 $I=1112.25\text{ kg/m}^2$ 。

在模擬程式中，我們設定各參數初始值如下。假設車輛 CG 的側傾速率為 0.1rad/s 、車輛 CG 的側傾加速度為 0.05rad/s^2 、車輛側滑角度為 0.02red 、車輛偏航角速度為 0.02rad/s 、道路坡度為 15red 、前輪轉向角度為 0.01red 、車架側傾角度為 0.01red 及車架側傾初始角速度為 0.01rad/s 及量測錯誤訊號 $f_s=0.5y_l$ 。

表格 1 模擬參數設定

參數名稱	參數代號	數值	單位
車輛重量	M	2000	Kg
車輛中簧上質量	M_s	800	Kg
車輛中非簧質量	M_u	1200	Kg
前輪至軸質心距離	l_f	1.402	m
後輪至軸質心距離	l_r	1.646	m
重力加速度	g	9.8	m/s^2
x 軸的轉動慣量	I_x	614	Kg-m^2

參數名稱	參數代號	數值	單位
z 軸的轉動慣量	I_z	2765	$Kg \cdot m^2$
前輪轉向剛度	C_{af}	34000	N/rad
後輪轉向剛度	C_{ar}	38000	N/rad
車輛速度	V	50	m/s
側傾剛度	K_r	34000	Nm/rad
質心至側傾中心距離	h_s	0.5	m
側傾阻尼	b_r	5000	Nms/rad
車輛轉動慣量	I	1112.25	$Kg \cdot m^2$
CG 的側傾速度	p_f	0.1	rad/s
車輛 CG 的側傾加速度	\dot{p}_f	0.05	rad/s^2
車輛側滑角度	β	0.02	deg
車輛偏航角速度	γ_f	0.02	rad/s
道路坡度	ϕ_r	15	red
前輪轉向角度	u	0.01	deg
車架側傾角度	ϕ_v	0.01	rad
車架側傾角加速度	$\dot{\phi}_v$	0.01	rad/s
量測錯誤訊號	f_s	0.5	y_1

依據上面車輛參數及模擬程式設定，在下面章節中我們將探討以下模擬結果：

- (1) 在 6.2 節中，我們探討將車輛系統所有未知信號忽略後，所產生系統參數估測效果及系統狀態控制結果。
- (2) 在 6.3 節中，我們探討車輛系統僅考慮觀測器但不加入控制器，所產生系統參數估測效果。
- (3) 在 6.4 節中，我們探討車輛系統同時考慮觀測器和控制器，所產生系統參數估測效果及系統狀態控制結果。

在上面所有的模擬結果中，我們將同時顯示車輛系統狀態值（側滑角、偏航角速度、側傾角速度和側傾角加速度）和所有系統未知信號（道路坡度 ϕ_r 、CG 側傾加速度 \dot{p}_f 和量測錯誤訊號 f_s ）。

6.2 忽略未知信號之系統參數估測結果

在本節中，我們將觀測器中所有相關車輛系統之未知信號去除，因此觀測器中所使用之車輛系統模型可表示如下：

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (6.1)$$

$$y = Cx \quad (6.2)$$

依據 (6.1) 及 (6.2) 及不考慮控制器輸出，車輛系統狀態估測值如下圖 4~7 所顯示。若考慮控制器輸出，則系統狀態估測值如下圖 8~11 所顯示。

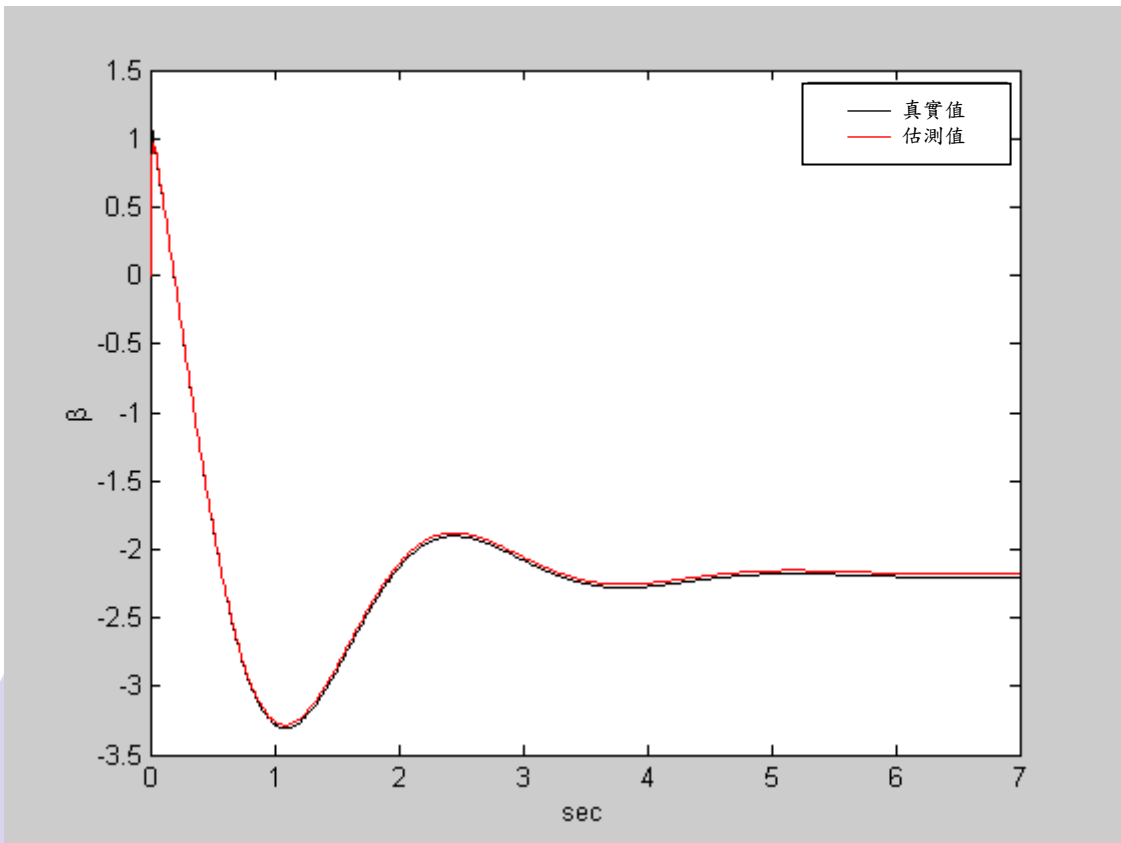


圖 4 忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側滑角估測值

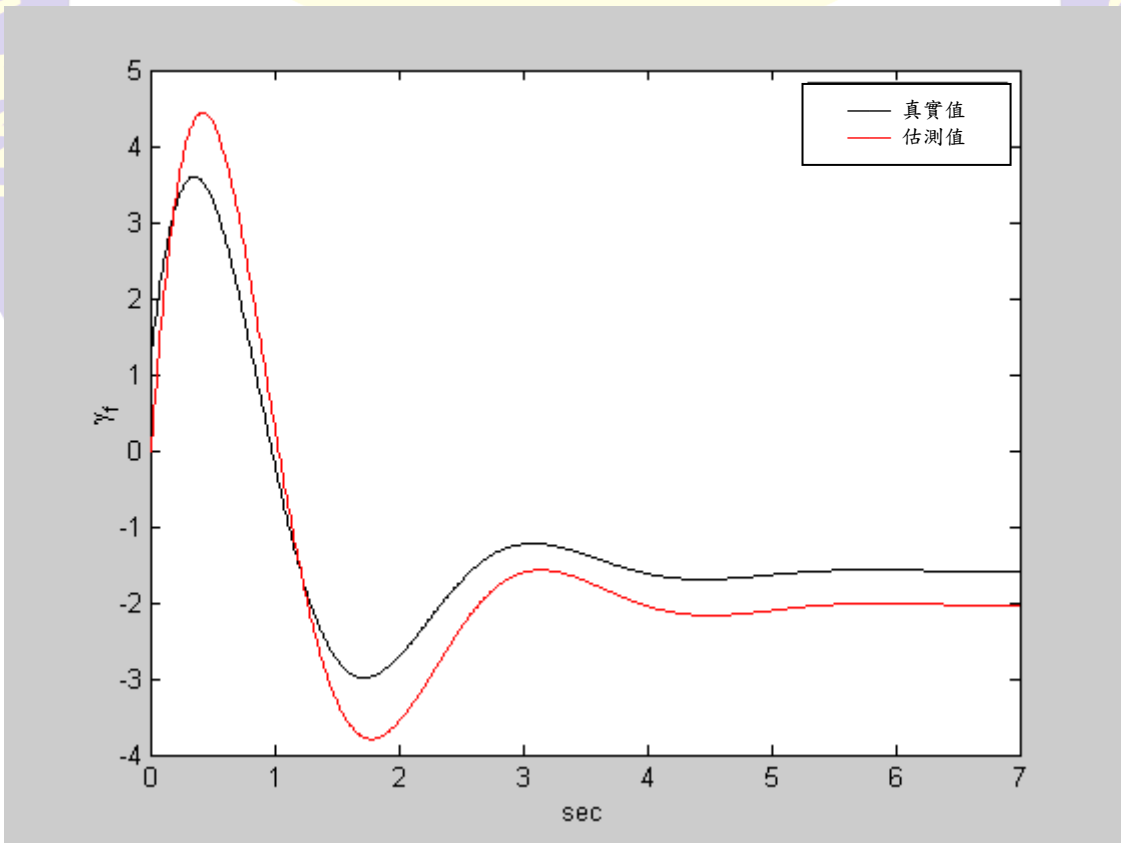


圖 5 忽略未知信號及不考慮控制器輸出之偏航角速度估測值

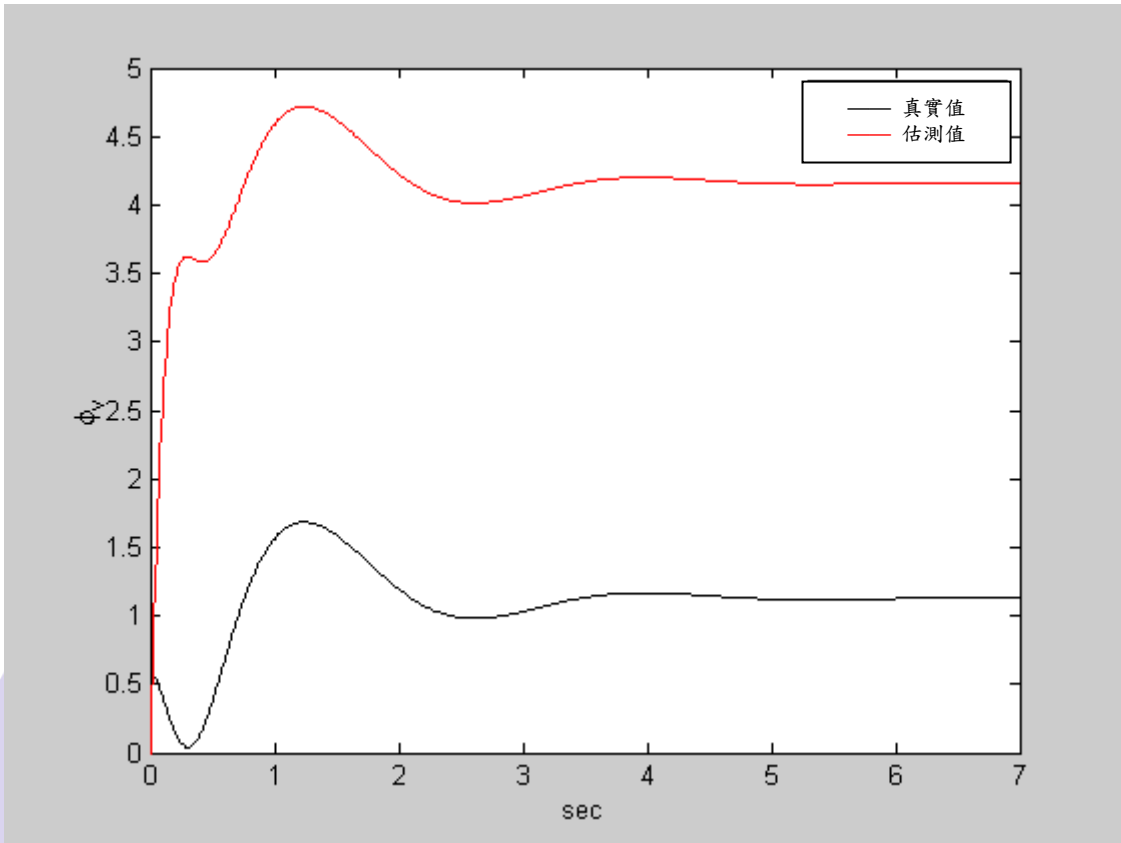


圖 6 忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側傾角估測值

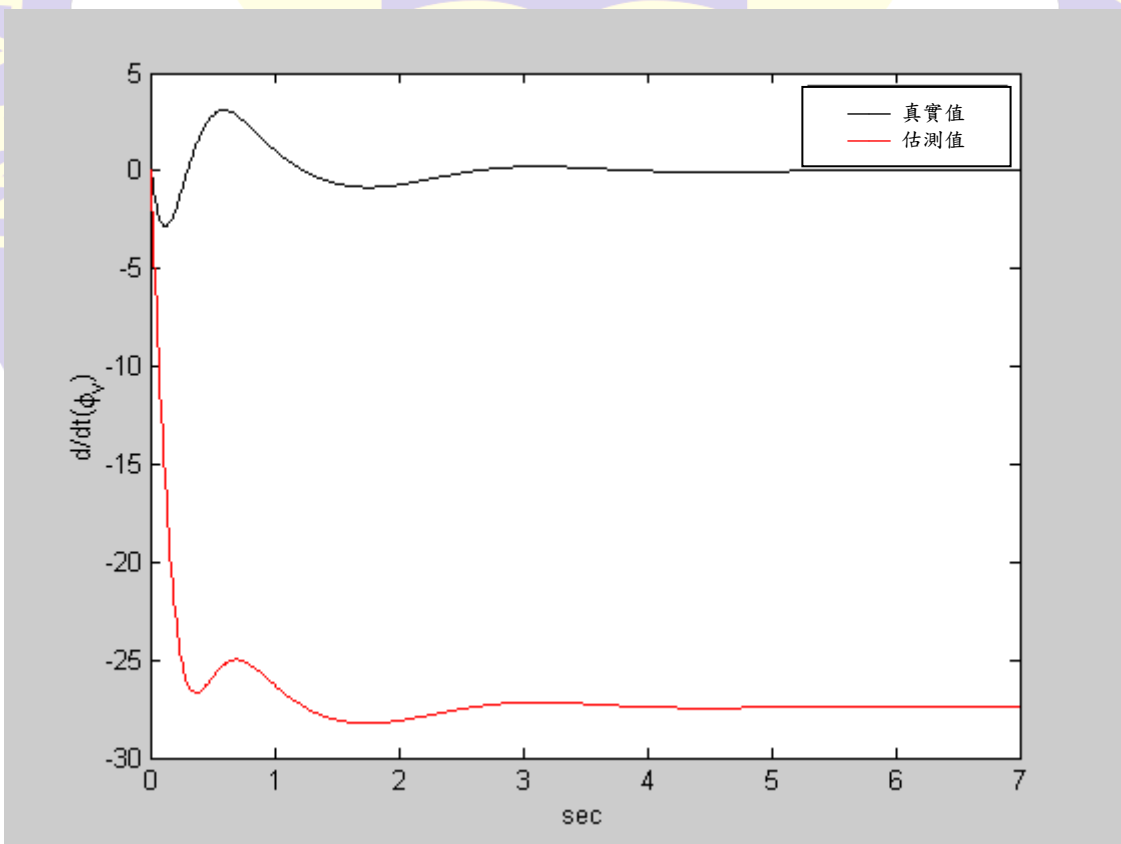


圖 7 忽略未知信號及不考慮控制器輸出之側傾角速度估測值

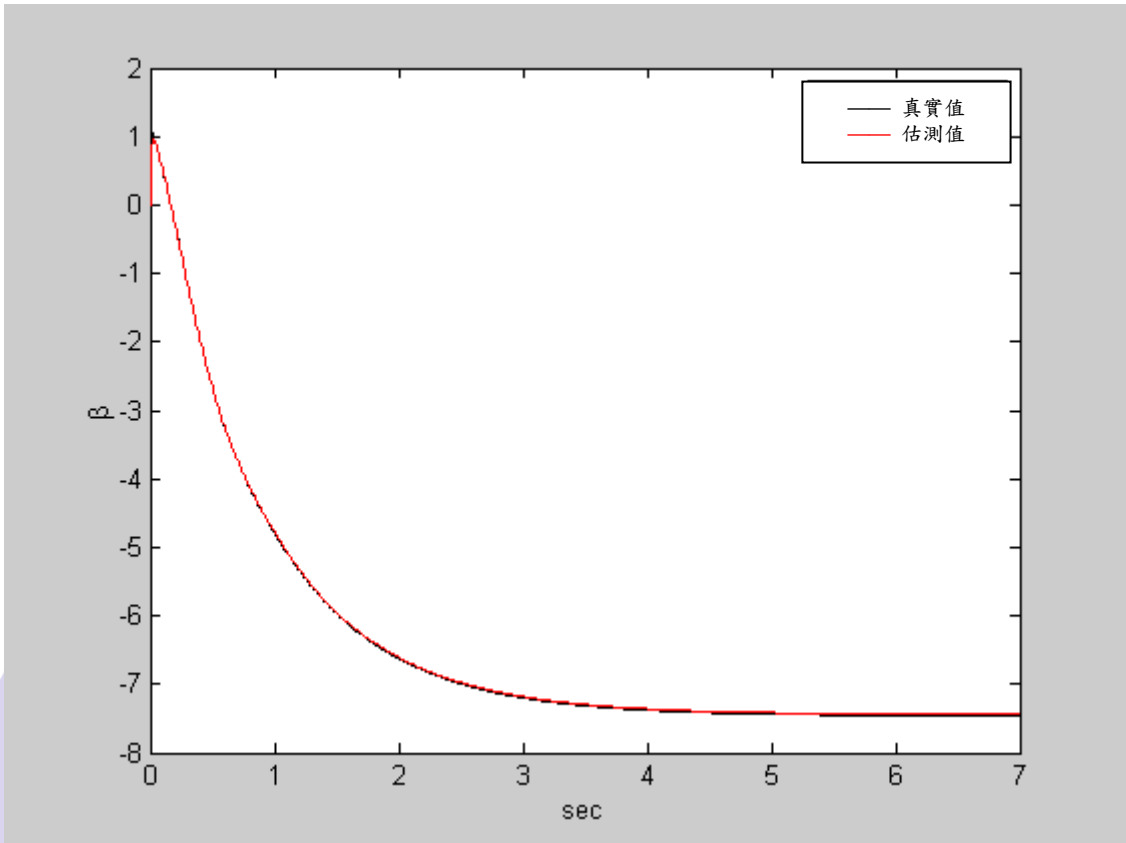


圖 8 忽略未知信號及考慮控制器輸出之側滑角估測值

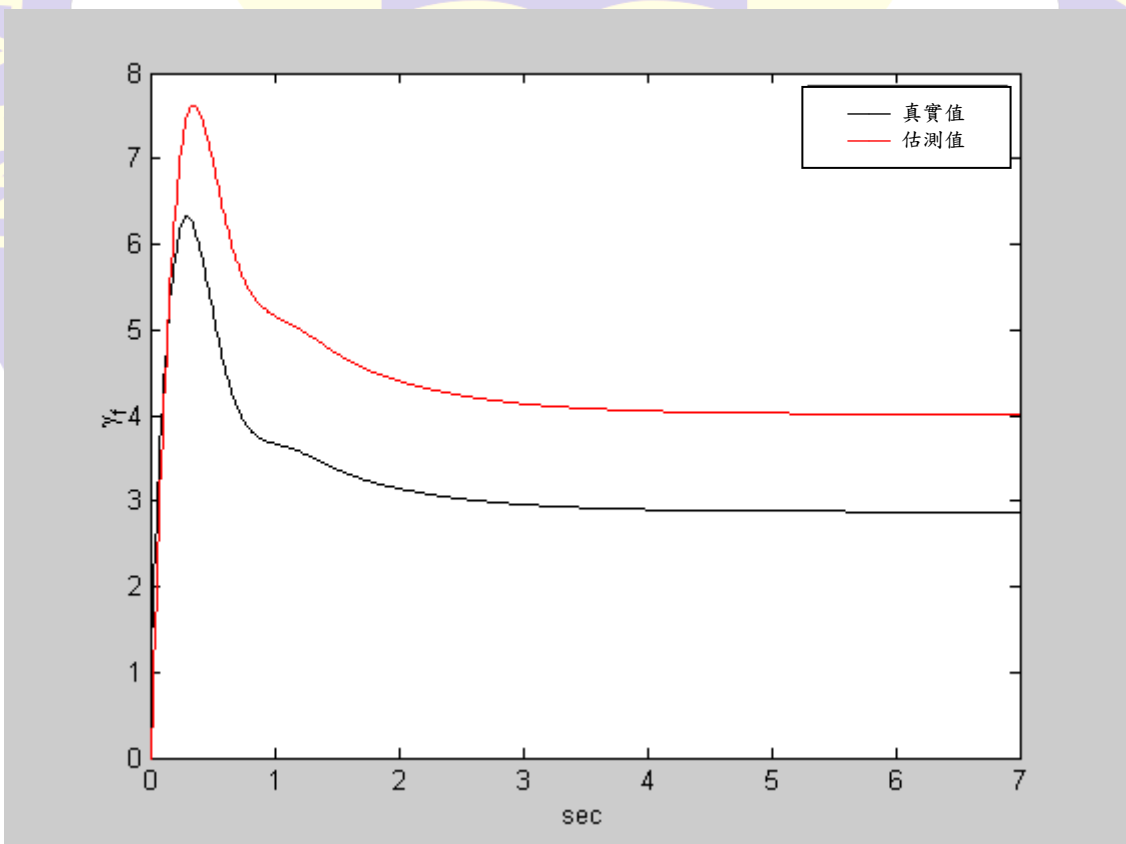


圖 9 忽略未知信號及考慮控制器輸出之偏航角速度估測值

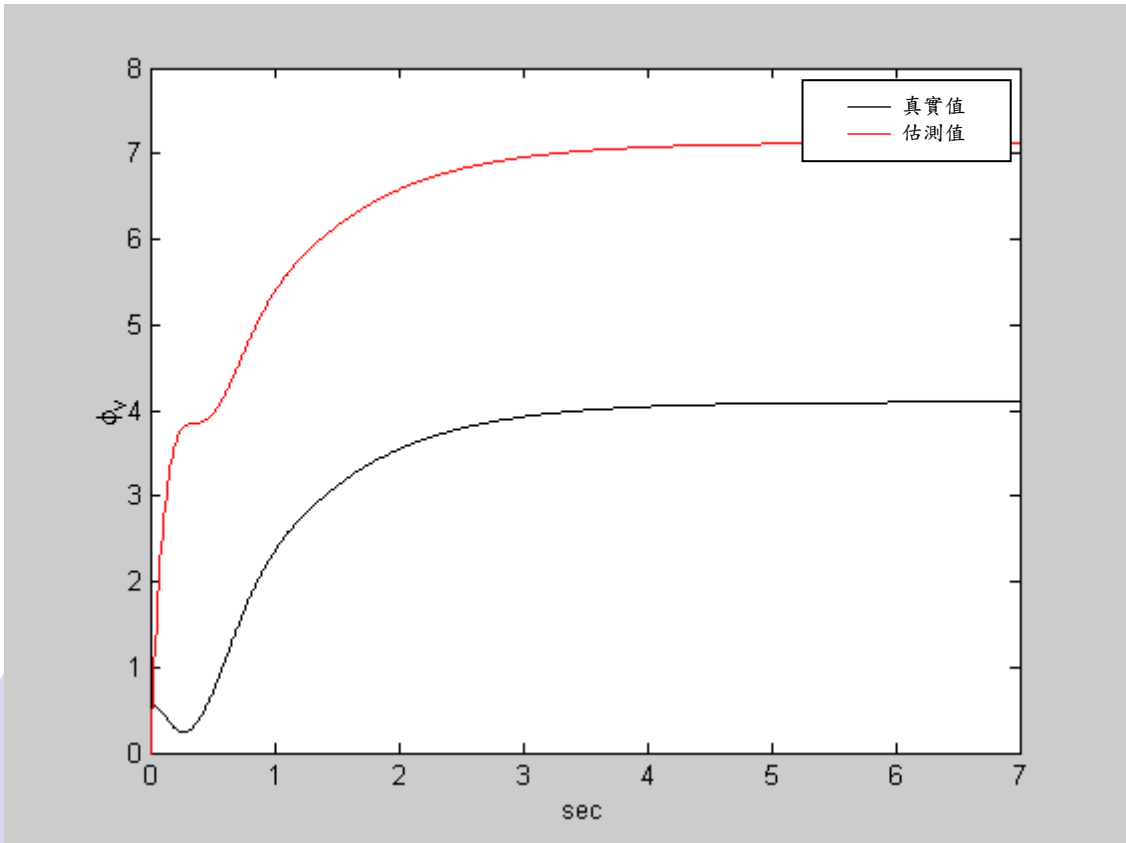


圖 10 忽略未知信號及考慮控制器輸出之側傾角估測值

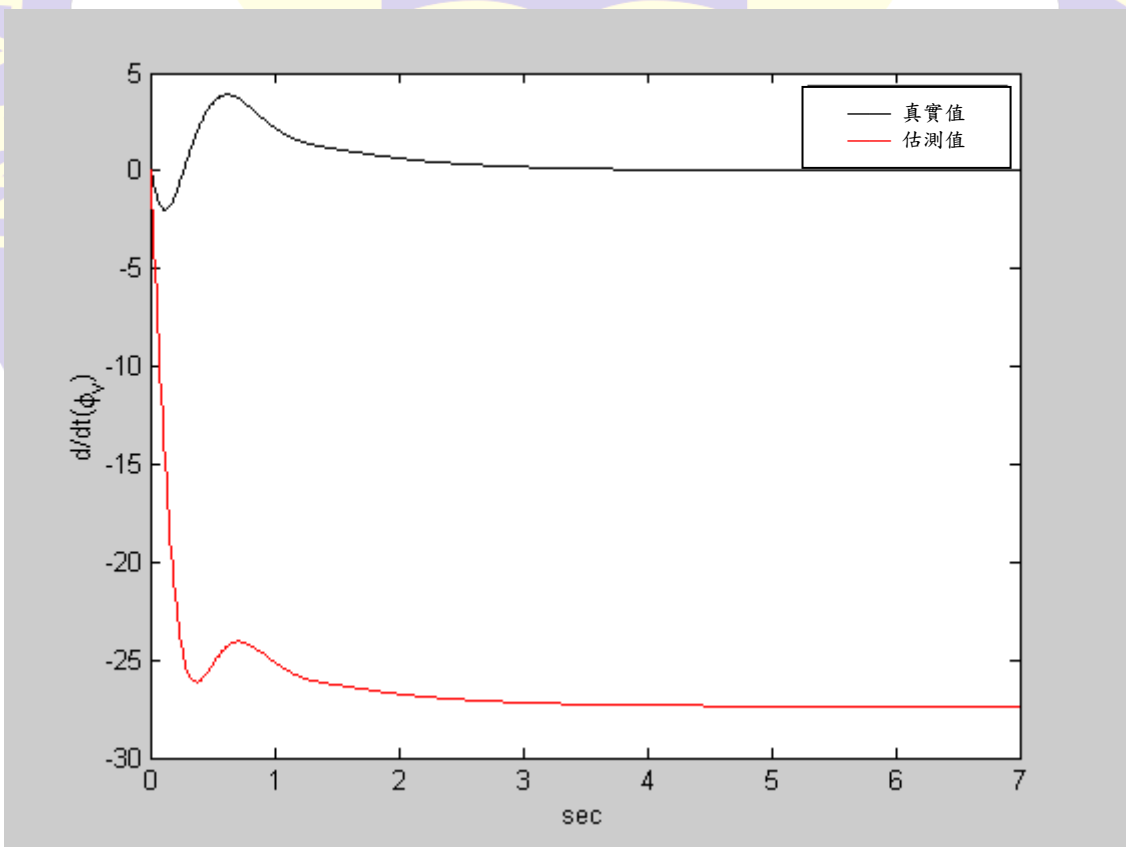


圖 11 忽略未知信號及考慮控制器輸出之側傾角速度估測值

依據上圖 4~11 之模擬結果，我們得知：若直接忽略車輛系統中之未知信號，不論是否有考慮控制器輸出，其系統狀態估測值除側滑角之外，其餘皆估測效果不佳。

6.3 應用未知信號估測技術之系統參數估測結果

在本節中，我們將考慮利用本論文所提出之未知信號估測技術，來改善 6.2 節中車輛系統狀態估測值不佳之情況。依據 (4.11)、(5.3)、(5.7)、(5.9) 及不考慮控制器輸出，車輛系統狀態估測值如下圖 12~15 所顯示。若考慮控制器輸出，則系統狀態估測值如下圖 16~19 所顯示。另外，我們也顯示車輛系統中所有未知信號（道路坡度 ϕ_r 、CG 側傾加速度 \dot{p}_f 和量測錯誤訊號 f_s ）之估測值如下圖 20~25 所示，其中圖 20~22 不考慮控制器輸出，而圖 23~25 考慮控制器輸出，其控制器輸出值如圖 26 所示。

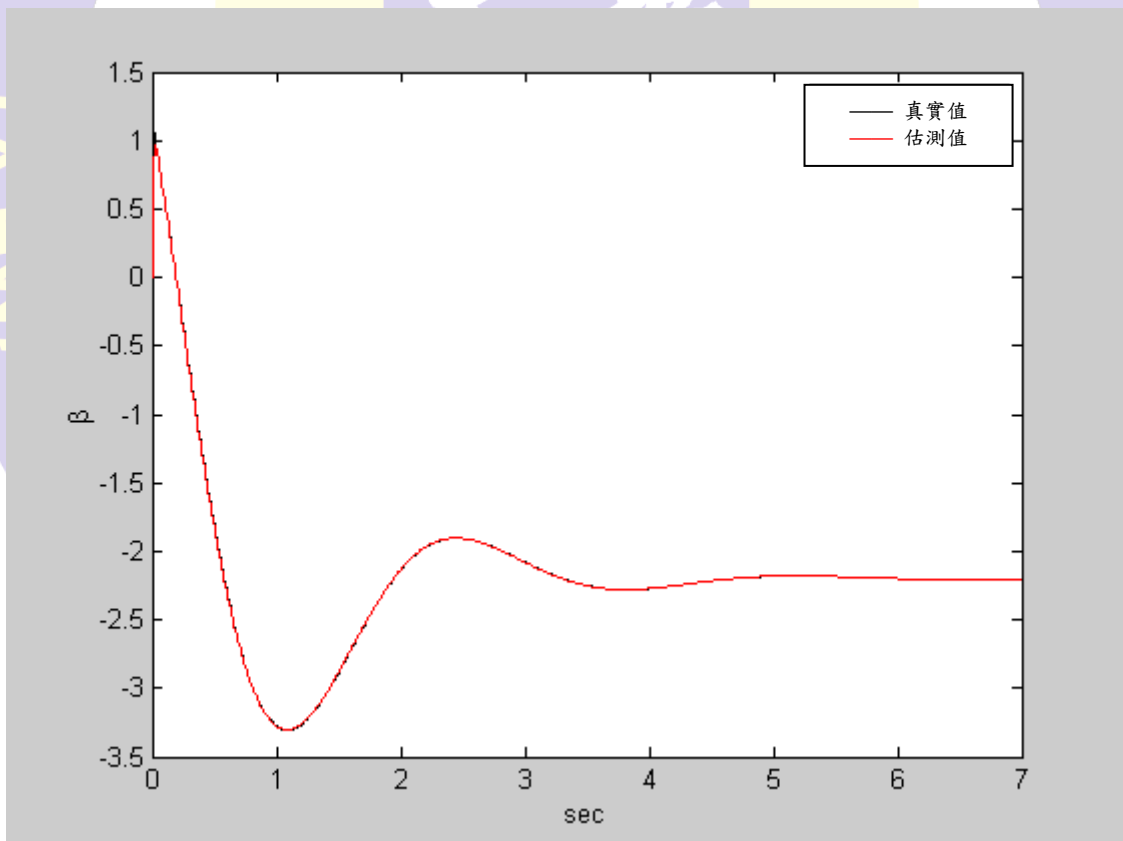


圖 12 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側滑角估測值

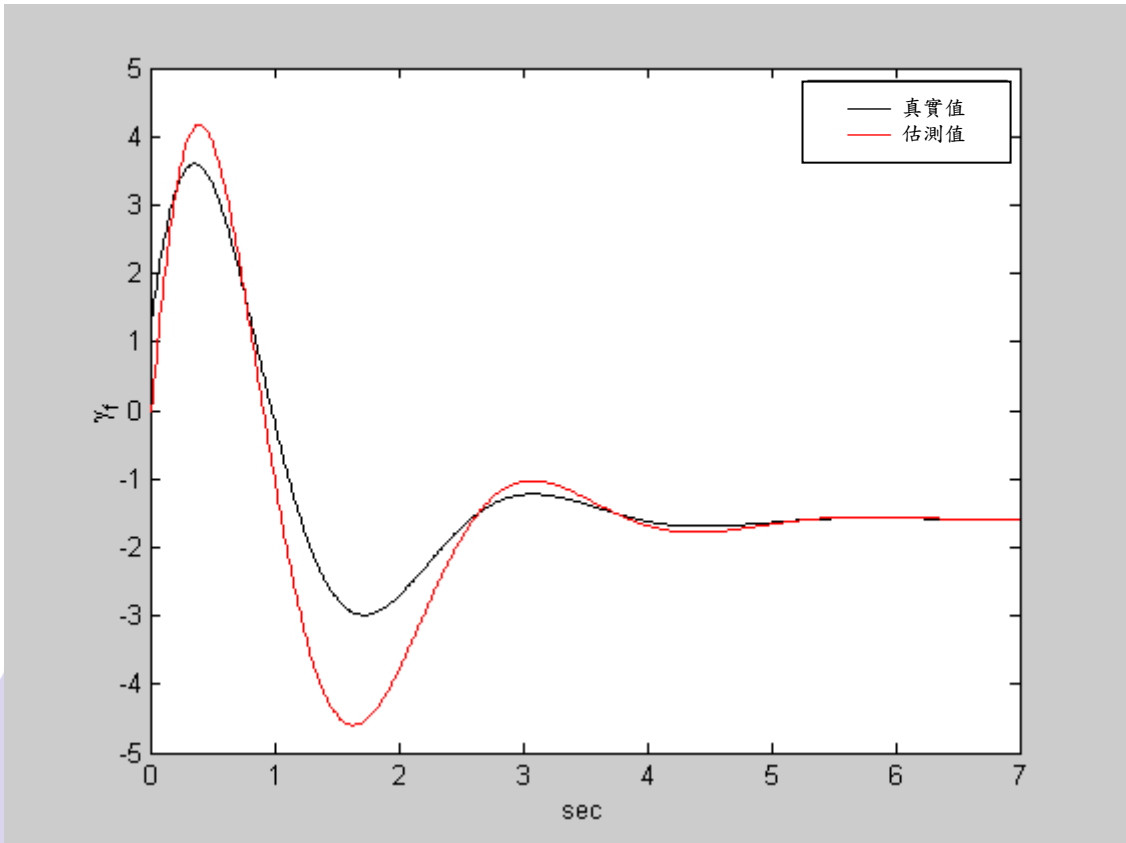


圖 13 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之偏航角速度估測值

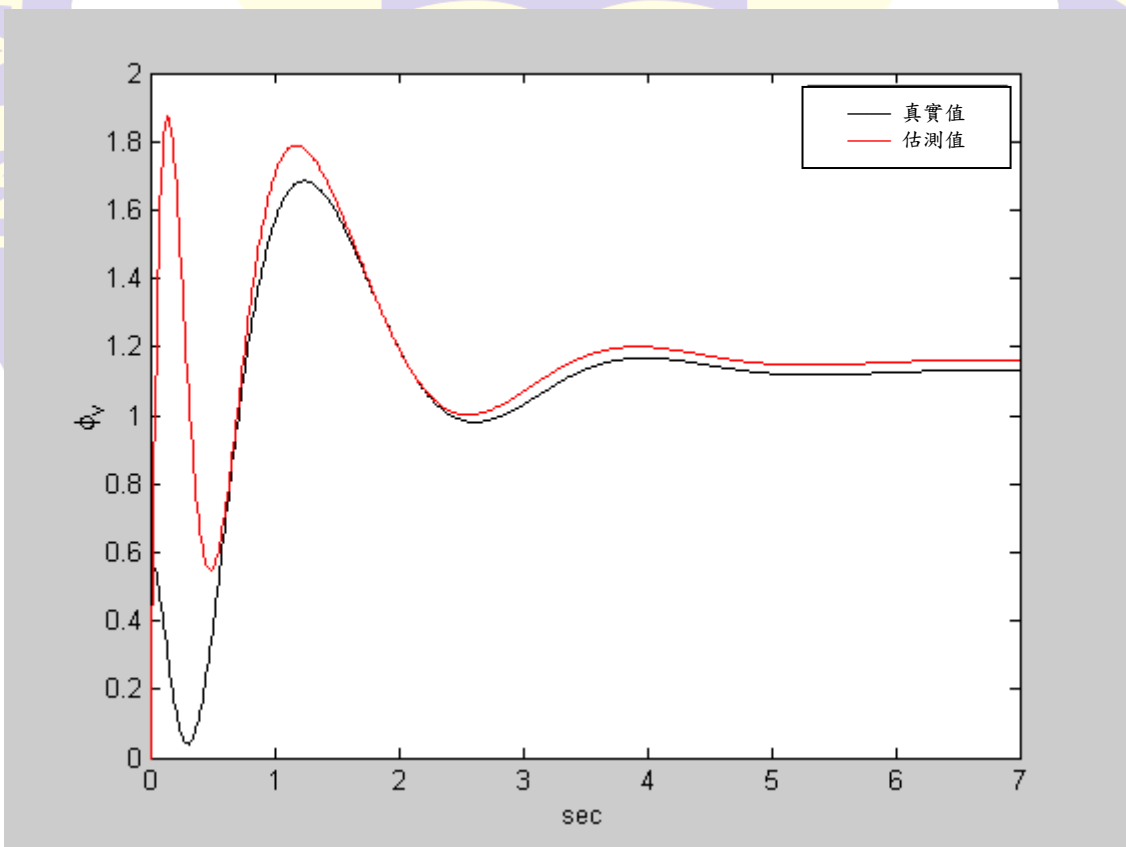


圖 14 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側傾角估測值

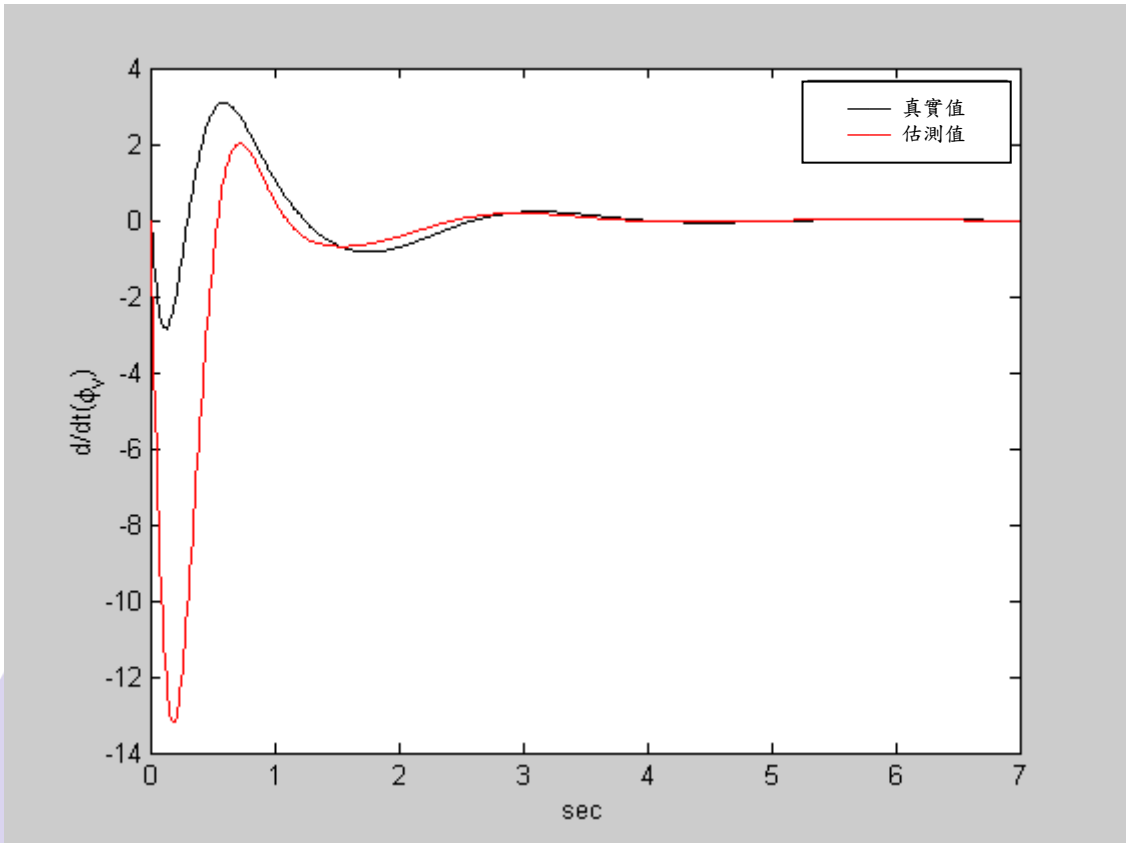


圖 15 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之側傾角速度估測值

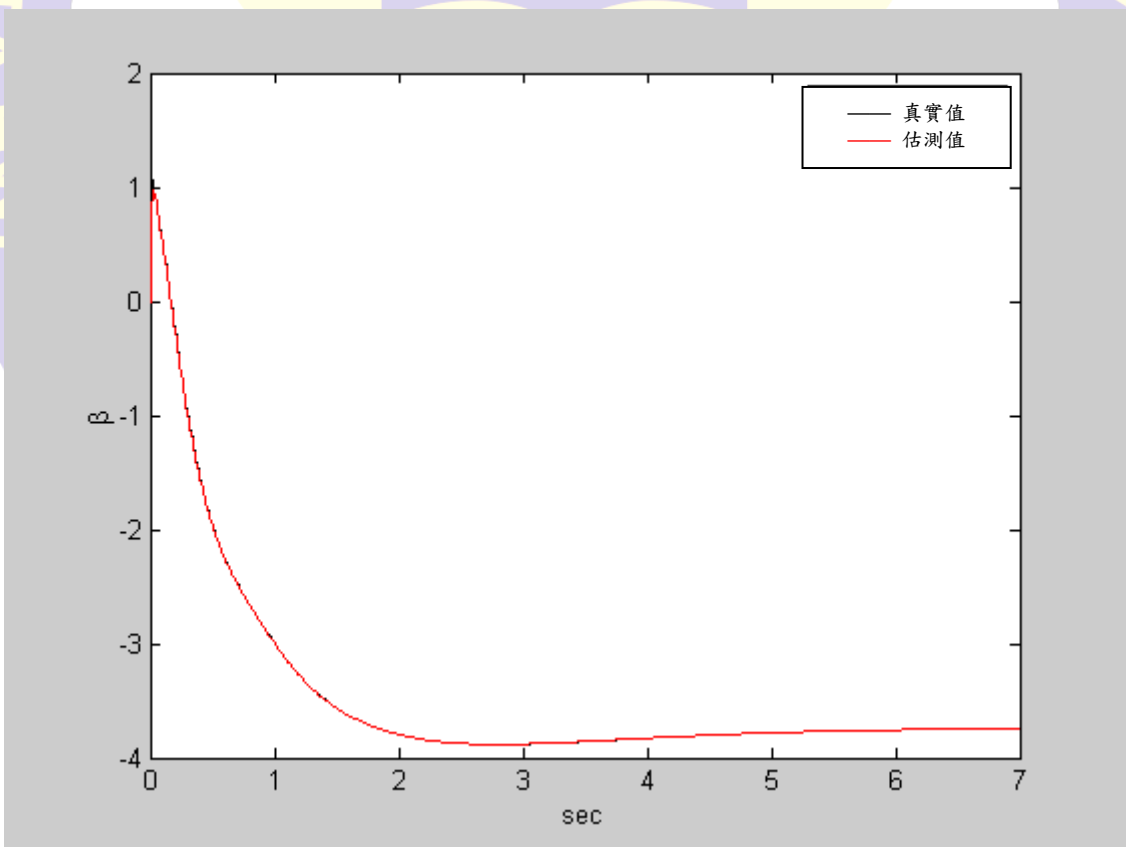


圖 16 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側滑角估測值

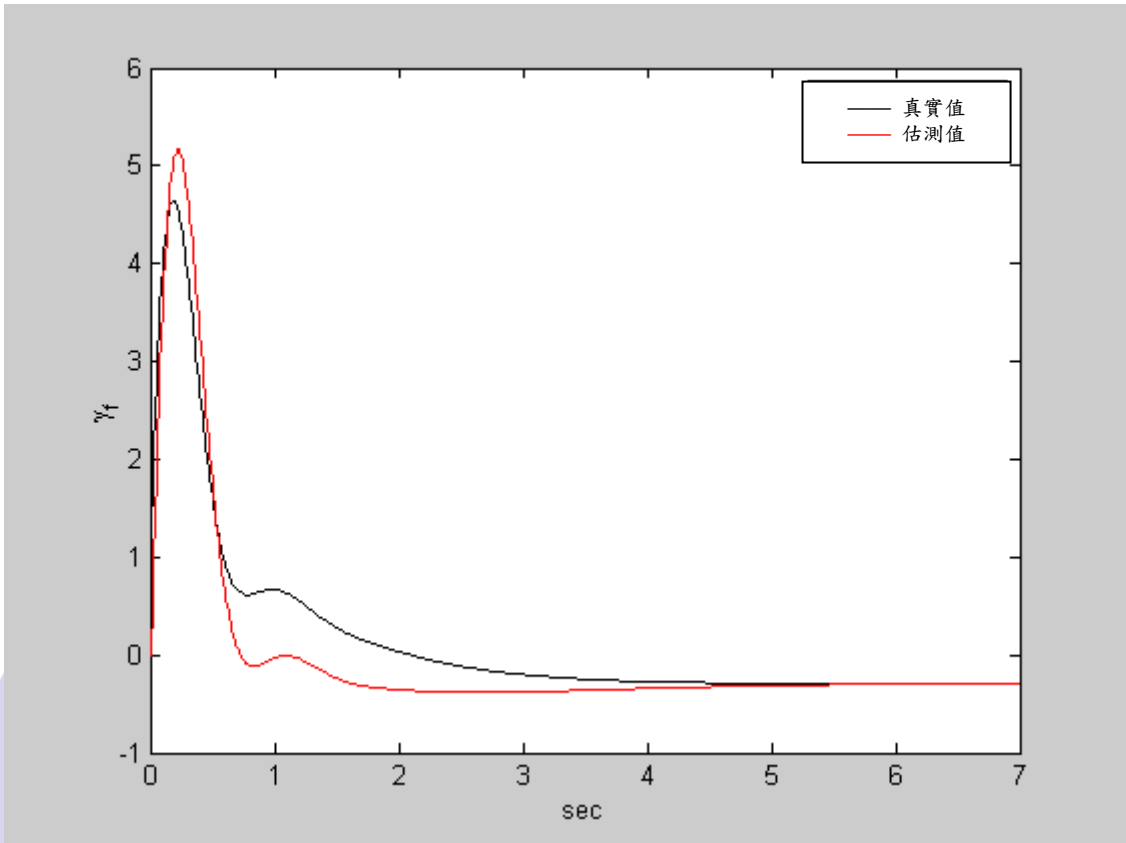


圖 17 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之偏航角速度估測值

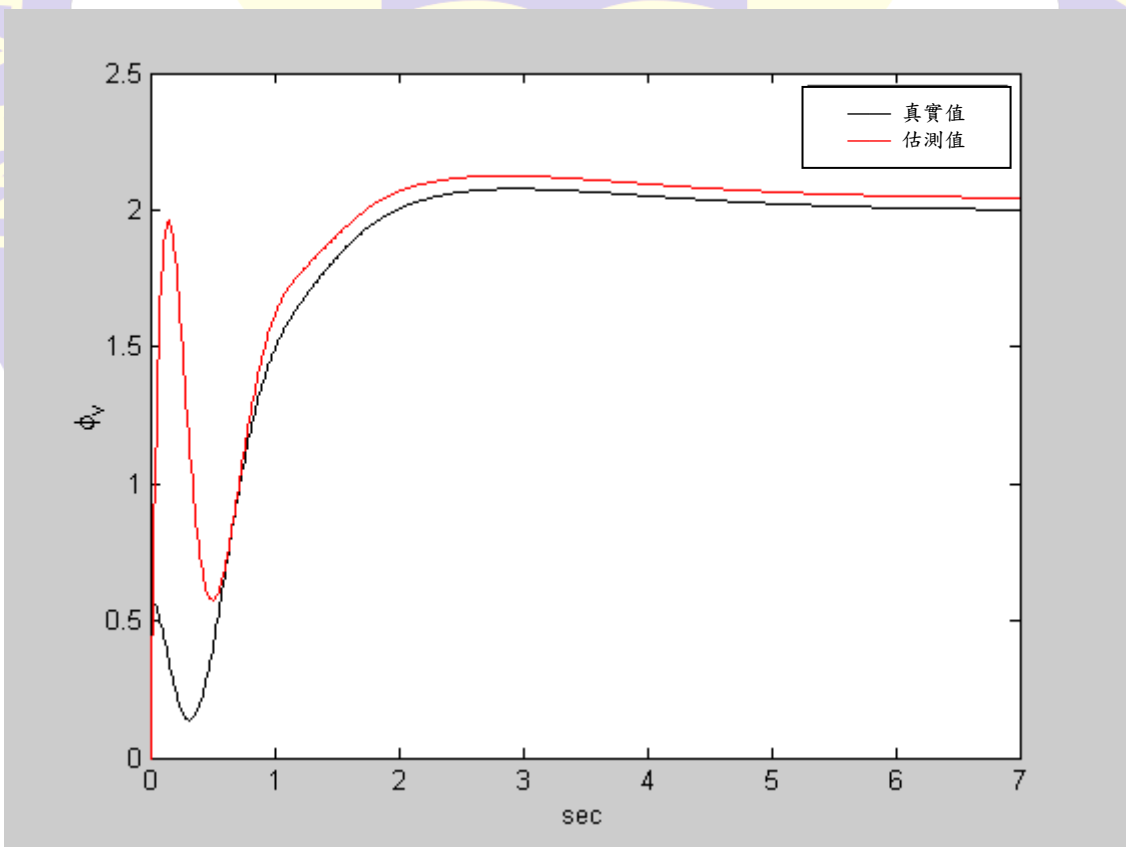


圖 18 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側傾角估測值

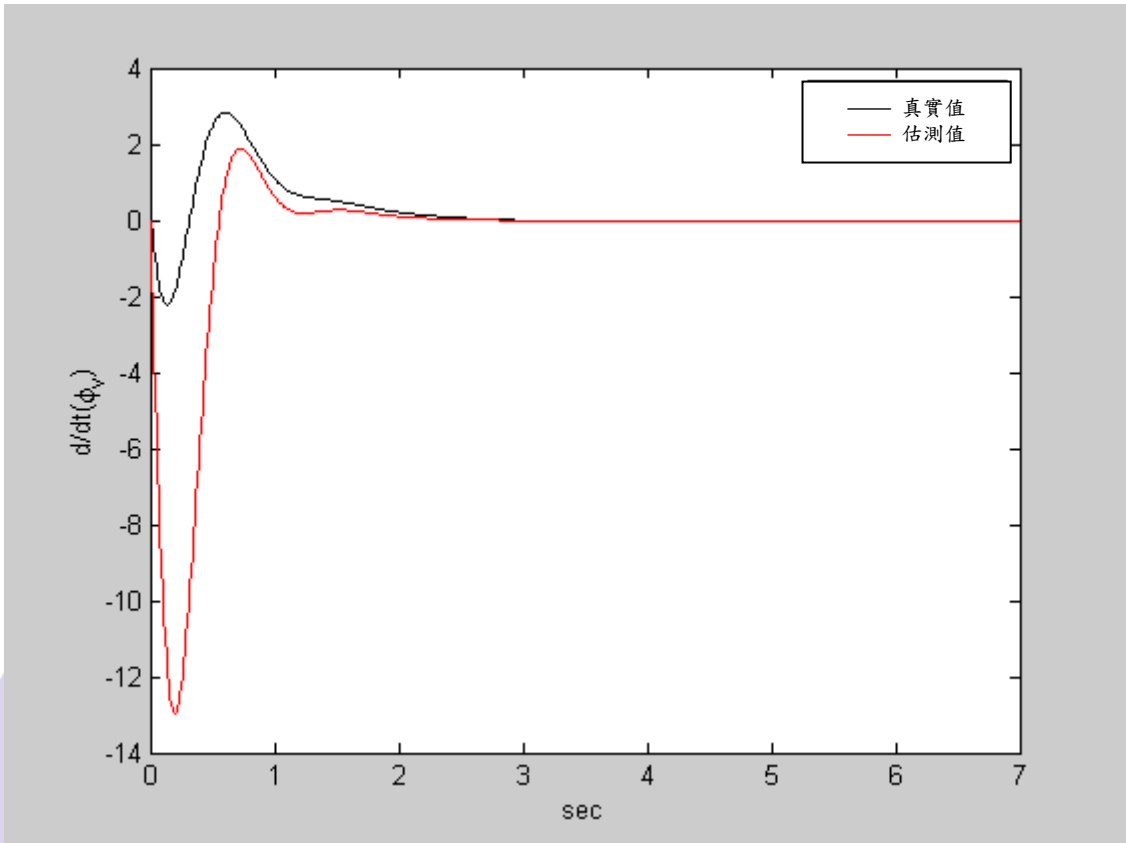


圖 19 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之側傾角速度估測值

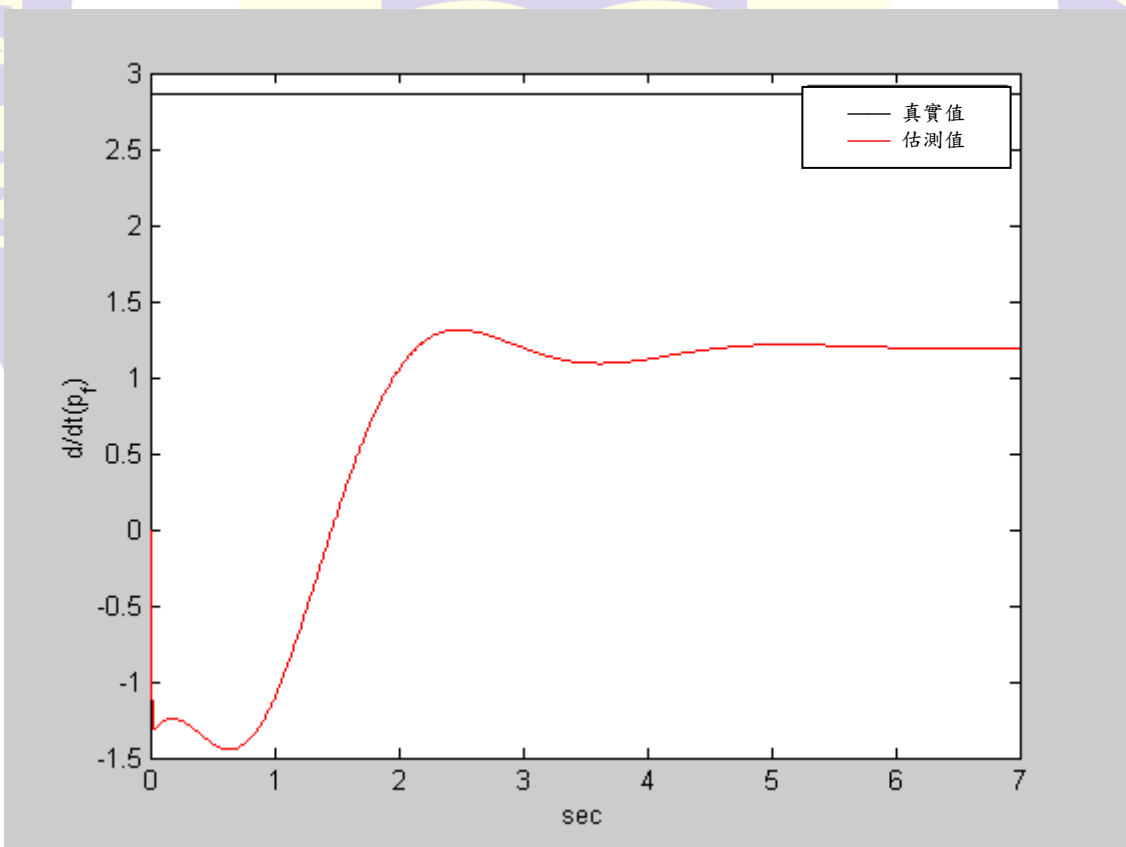


圖 20 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之 CG 側傾加速度估測值

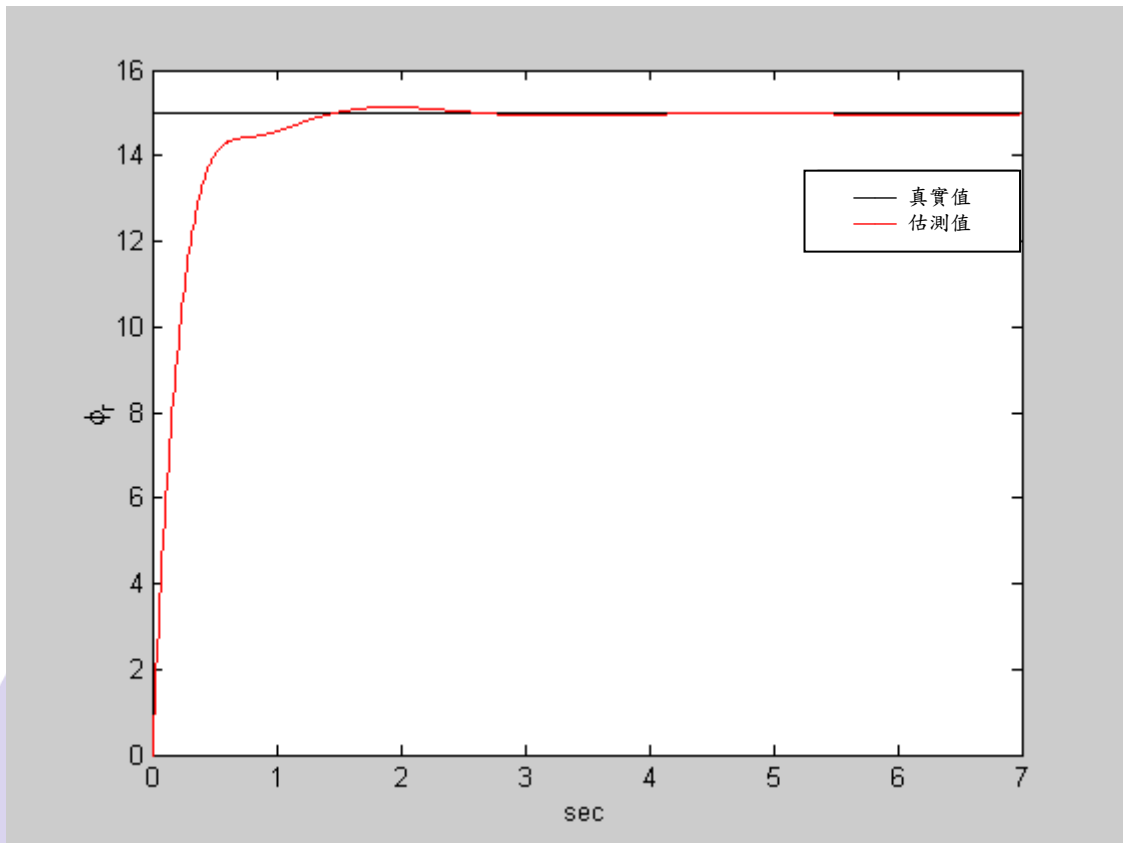


圖 21 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之道路坡度估測值

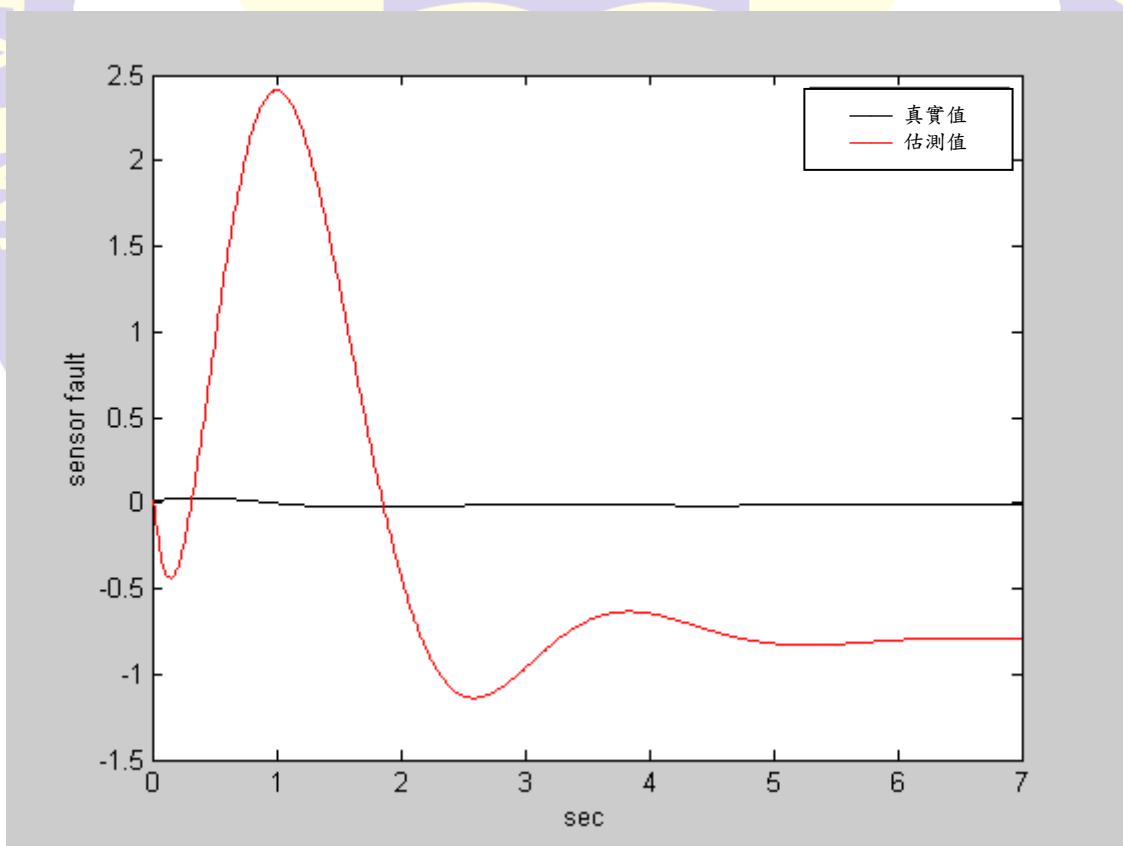


圖 22 應用未知信號估測技術及不考慮控制器輸出之量測錯誤訊號估測值

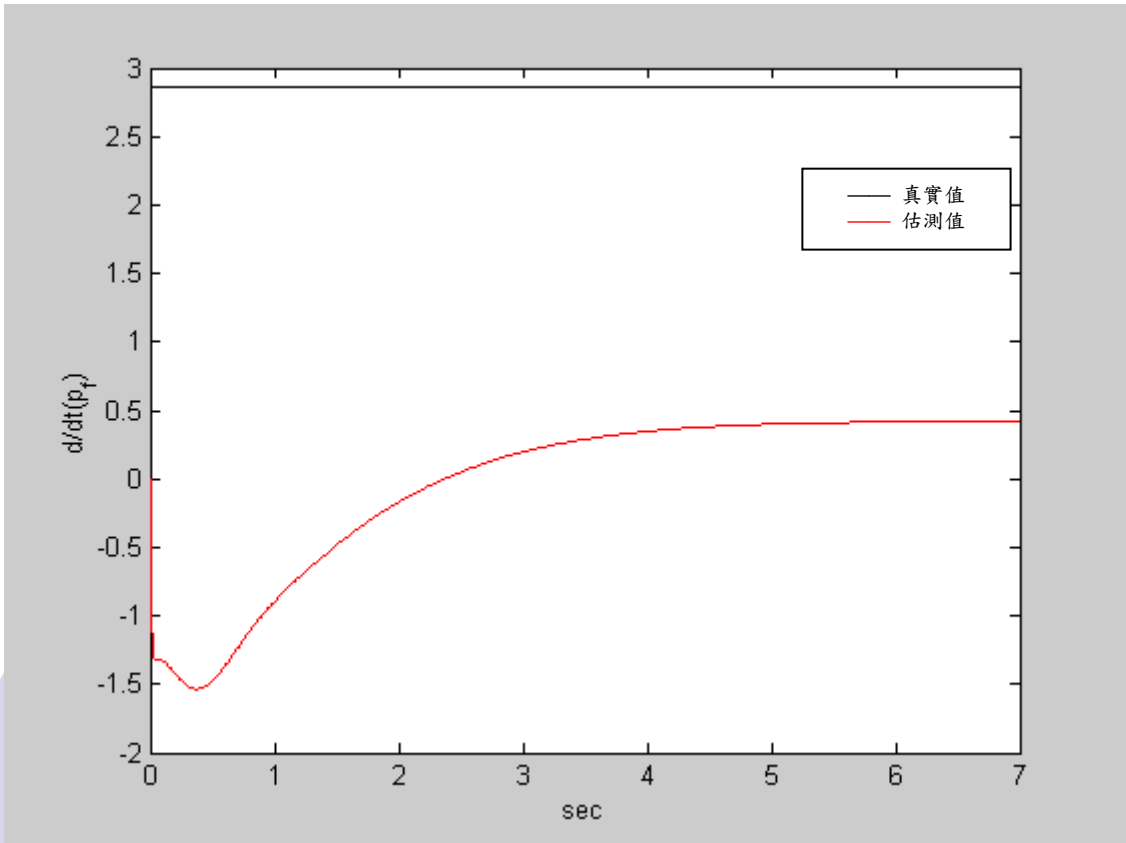


圖 23 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之 CG 側傾加速度估測值

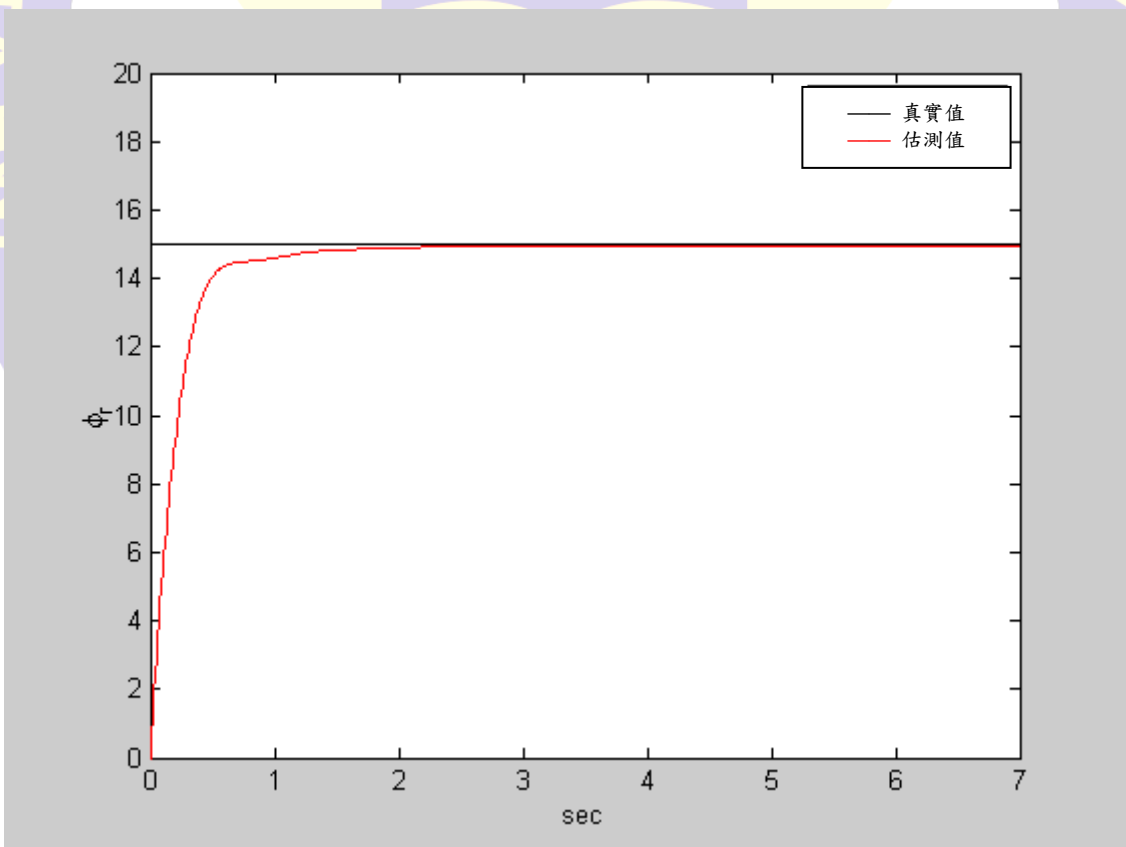


圖 24 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之道路坡度估測值

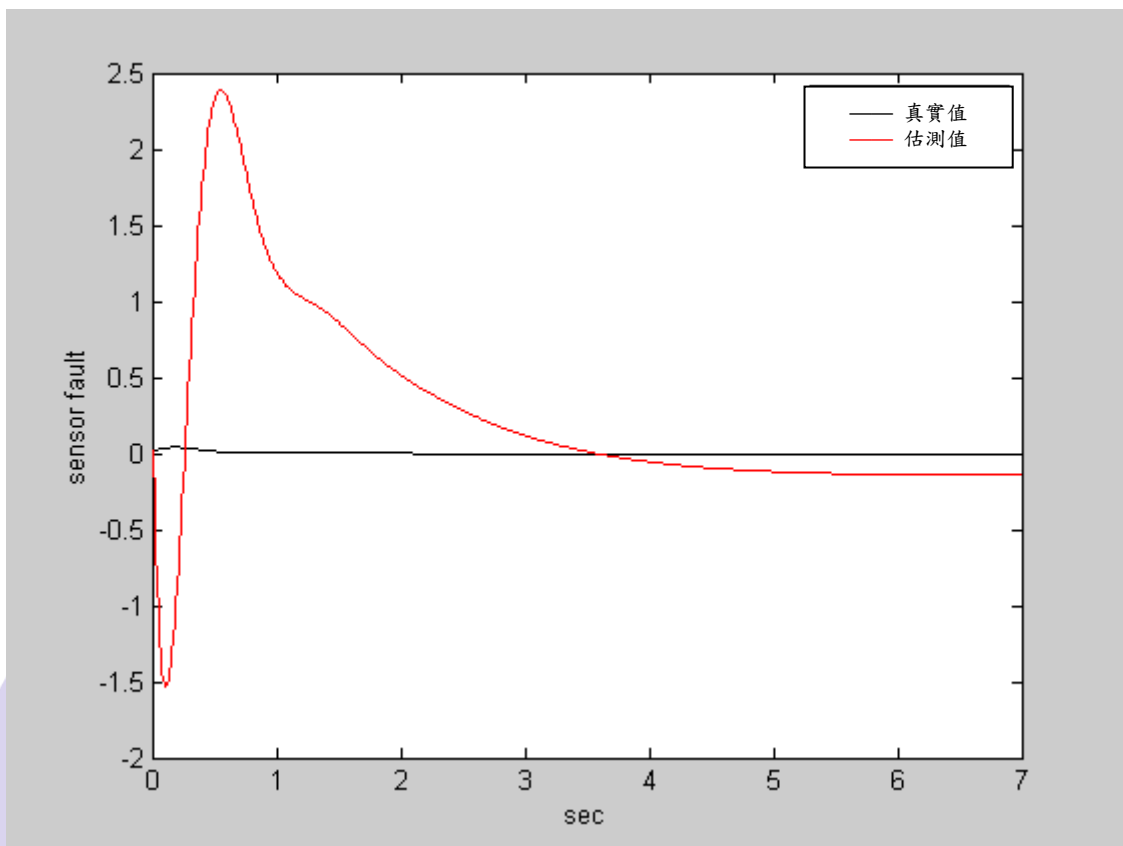


圖 25 應用未知信號估測技術及考慮控制器輸出之量測錯誤訊號估測值

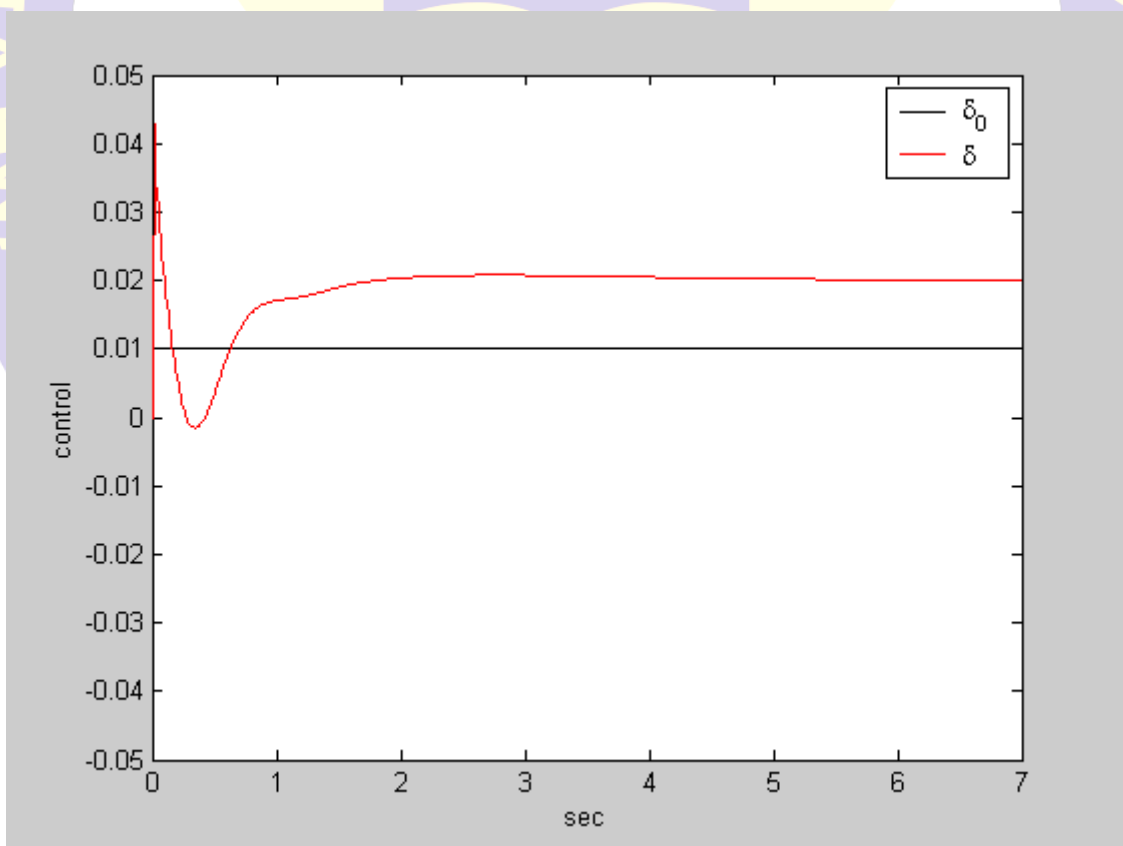


圖 26 應用未知信號估測技術之控制器輸出值

6.4 模擬結果討論與分析

- (1) 比較圖 4、8、12 及 16，我們得知不論是否考慮控制器輸出或是系統中未知信號之處理，車輛系統之側滑角皆可準確被估測。
- (2) 依據圖 5~7 及 9~11，我們得知在忽略未知信號估測技術情況下，車輛系統中偏航角速度、側傾角和側傾角速度之估測值，會與實際值有明顯之偏移量。然而，若依據圖 13~15 及 17~19，我們亦得知在應用未知信號估測技術情況下，除側傾角有些許估測誤差，其餘兩個系統狀態值皆能準確被估測。產生側傾角估測誤差其原因是：在車輛系統模型中，側傾角未受到側傾角速度之限制，而是受到側傾角加速度之限制；因此在估測結果中，我們可得到精確之側傾角速度估測值，而有可能產生具固定偏移量之側傾角估測值，因為常數之微分值等於零。
- (3) 依據圖 20~25，我們得知在未知信號估測結果中，CG 側傾加速度估測值，不論是否考慮控制器，皆與實際值有明顯之偏移量。其原因是此 CG 側傾加速度值無法被估測，而是受到一虛擬之 CG 側傾加速度變化量之限制（請參考 4.2 節之說明），因此其估測值會穩定，但是有可能產生固定偏移量。在量測錯誤訊號估測上，不論是否考慮控制器，皆與實際值有些許之偏移量，但若考慮控制器，則此誤差量會明顯減少。其原因是量測錯誤訊號估測值受到其變動量之限制（請參考 (5.2) 式），因此有可能產生固定偏移量。最後，在道路坡度估測值上，不論是否考慮控制器，皆能準確被估測。
- (4) 比較圖 13 和 17，我們得知當車輛系統加上控制器時，其偏航角速度將迅速穩定在-0.3 度角，且不會出現系統未加上控制器時，偏航角速度會產生正負角震盪現象，因此其具有穩定車輛運動之作用，減少車輛傾覆之機會。

第七章 結論與未來研究方向

7.1 結論

- (1) 本論文提出一最佳車輛強健觀測器和控制器設計方法，以解決具未知信號之車輛系統狀態估測問題。
- (2) 本論文針對具未知信號之車輛系統模型，提出一整合式系統建模技巧，以同時解決車輛系統之狀態及未知信號估測問題。
- (3) 本論文針對車輛在道路具有坡度所產生之未知信號干擾現象，提出一有效之未知信號估測技術，以同時解決車輛系統之狀態及坡度估測問題。
- (4) 本論文針對車輛系統可能存在之量測失效模式，提出一有效之未知信號估測技術，以解決車輛系統之狀態及量測失效值估測問題。
- (5) 本論文提出利用線性平方調節器設計方法，來穩定車輛在受到外在環境干擾時所產生之運動作用，以減少車輛傾覆之機會。

7.2 未來研究方向

- (1) 本論文所提出之方法與結果雖經模擬驗證有效，但在部份未知信號估測上，如 CG 側傾加速度與量測錯誤訊號，仍存在明顯估測誤差情況，雖其成因已知，但如何提出一有效之解決方法，將是未來可以再深入研究之方向。
- (2) 本論文探討車輛系統估測問題中，仍存在部份未知信號無法被估測（如 CG 側傾加速度），因此如何針對此一無法估測現象，提出一有效之解決方法，將是未來可以再探討之方向。

參考文獻

- [1] T. D. Gillespie, “Fundamentals of Vehicle Dynamics,” Society of Automotive Engineer, 1992.
- [2] J. Ryu and J. C. Gerdes, “Estimation of Vehicle Roll and Road Bank Angle,” in Proc. American Control Conference, Boston MA, 2004.
- [3] J. Ryu, “State and Parameter Estimation for Vehicle Dynamics Control Using GPS,” Ph.D. Dissertation, Stanford University, 2004.
- [4] P. Yih and J. C. Gerdes, “Steer-By-Wire for Vehicle State Estimation and Control,” in Proc. 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC’04), Netherlands, 2004.
- [5] J. Y. Wong, Theory of Ground Vehicles, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [6] K. Kawashima, Y. Hori, T. Uchida, and S. Oh, “Robust Bank Angle Estimation for Rolling Stability Control on Electric Vehicle,” IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 448–453, Nagaoka, Japan, March, 21-24, 2010.
- [7] C.-S. Hsieh, “State Estimation for Descriptor Systems Via The Unknown Input Filtering Method,” Automatica, vol. 49, no. 5, pp. 1281-1286, 2013.
- [8] T. Bessaoudi, F. B. Hmida, and C.-S. Hsieh, “Robust State and Fault Estimation for Linear Descriptor Stochastic Systems with Disturbances: A Direct Current Motor Application,” IET Control Theory Appl. vol. 11, Iss. 5, pp. 601--610, 2017.
- [9] C.-S. Hsieh, “Simultaneous Input and State Estimation for Linear Continuous-Time Systems: A System Augmentation Approach,” in Proceedings of 2016 International Conference on Mechatronics, Control and Automation Engineering, Bangkok, Thailand, pp. 132-136, July 24-25 2016.
- [10] C.-S. Hsieh, “Multi-Step Delayed Input and State Estimation: A System Augmentation Approach,” in Proceedings of 2017 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls, Budapest, Hungary, pp. 63-68, Oct. 20-22 2017.
- [11] C.-S. Hsieh, “Implementation Issues of Robust State Estimation: Nominal System Reformation Approach,” in Proceedings of 2013 CACS International Automatic Control Conference, Nantou, Taiwan, pp. 288-293, Dec. 2-4 2013.
- [12] C.-S. Hsieh and D.-C. Liaw, “Continuous- and discrete-time fixed-gain controller designs for the control of vehicle lateral dynamics,” Asian Journal of Control, vol. 14,

no.2, pp.359--372, 2012.

[13]C. C. MacAdam, "Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving," Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 11, 1981, pp. 393-399.

[14]H. Zhang, Y. Shi, and A. S. Mehr, "Robust non-fragile dynamic vibration absorbers with uncertain factors," J. Sound Vibrat., vol. 330, no. 4, pp. 559–566, Feb. 2011.

[15]Ackermann, J. (1990) Robust car steering by yaw rate control. Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control

