

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100008
參展科別 工程學
作品名稱 車輛預防翻覆系統
得獎獎項

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學
指導教師 陳智勝、鄭榮和
作者姓名 吳毅恩

關鍵詞 翻車、自動減速、主動安全

作者簡介



我是來自師大附中的吳毅恩，我對物理以及工程這兩個領域非常有興趣，平常也喜歡踢足球和騎腳踏車。在高二的時候我到了機械系進行我為期一年的專題研究，很慶幸自己能進行自己喜愛領域的研究，也很榮幸能有機會參加 2022 台灣國際科展。期許未來的自己能繼續保持對科學的熱忱，朝向自己興趣所在邁進。

感謝台灣大學機械系鄭榮和教授、李成之學長，以及實驗室裡的所有學長姐們，在研究的這條路上給予我許多幫助與鼓勵，讓我得以有今日的研究成果。

摘要

人們每天依靠著車輛往來各地，在帶來各種便利的同時，卻也伴隨著各種安全隱憂。本研究想要預防因駕駛轉向過於劇烈所導致的車輛翻覆行為，因此設計自動控制系統以避免車輛因轉向過於劇烈所導致的車輛翻覆行為。本研究利用車輛模型模擬轉向時車輛側向加速度的變化，根據模擬結果設計控制策略。控制目標為希望能降低車輛轉向時的側向加速度，進而避免翻車。控制策略分為門檻式控制策略與連續控制策略。控制系統輸入訊號為車輛側向加速度，而輸出訊號為車輛左右兩後輪馬達的扭矩訊號。控制系統只需要偵測車輛的側向加速度即可推得車輛轉向的時間點，並在車輛有較高可能翻覆時，根據控制策略予以車輛馬達扭矩輸出訊號的限制，避免轉向時側向加速度過高導致翻車。

Abstract

People rely on vehicles to travel to and from various places every day, which brings all kinds of conveniences, but also comes with all kinds of security concerns. This study intends to prevent the overturning behavior of the vehicle caused by the excessive steering of the driving, so the automatic control system is designed to avoid the overturning behavior of the vehicle caused by the excessive steering of the vehicle. In this study, the vehicle model is used to simulate the change of the vehicle's lateral acceleration during steering, and the control strategy is designed according to the simulation results. The control objective is to reduce the lateral acceleration of the vehicle when turning, and to avoid the overturning. Control strategies are divided into threshold control strategies and continuous control strategies. The input signal of the control system is the lateral acceleration of the vehicle, and the output signal is the torque signal of the left and right rear wheel motors of the vehicle. The control system only needs to detect the lateral acceleration of the vehicle to determine the time when the vehicle is turning, and when the vehicle is likely to overturn, the vehicle motor torque output signal is limited according to the control strategy to avoid excessive lateral acceleration during turning which might cause the car to roll over.

壹、研究動機

車輛作為生活中不可或缺的交通工具，每天依賴它前往各地，在帶給我們便利移動的同時，卻也成為了許多傷亡事故的肇因。除了他人的疏忽所造成的傷害以外，有時卻是自己駕駛的不注意導致不可回復的情況產生。若是發生翻車，輕則擦傷骨折，重則危及生命。若是在車輛行駛過程中發生翻車意外，可能會造成難以復原的後果。車輛翻覆的原因除了因為地形、車輛本身設計不良外，在平面行駛的情況下翻車，幾乎都是源自於轉向過於劇烈，進而產生側向力導致車輛側傾而翻覆。當駕駛在駕駛過程中，若路面突然出現障礙物，這時駕駛的第一反應無非是繞過此障礙物而劇烈轉動方向盤。這時就很有可能發生車輛翻覆的事故。因此我想要了解究竟是甚麼原因導致車輛翻覆，並想要設計一套制系統有辦法有效的預防因轉向過於劇烈而翻覆的行為。讓駕駛在遭遇突發狀況即將面臨翻覆時，安全能有多一層的保障。

貳、研究目的

- 一、了解車輛行駛過程中側向加速度對翻車情況的影響。
- 二、設計控制系統可以自動偵測翻車前的動態特徵並調整車身動態以避免翻車發生。
- 三、比較不同控制系統間對於翻車控制成效的差異。

參、研究設備及器材

硬體設備：

1. 卡丁車

名稱	圖片	用途/功能
卡丁車3D 圖	 <p>圖一 卡丁車3D 圖</p>	實驗平台
卡丁車(側視圖)	 <p>圖二 卡丁車側視圖</p>	後輪為兩個獨立控制的輪殼馬達(實心胎)，負責加速與煞車功能(煞車為電磁煞車)。前輪則為充氣胎(固定20psi)，無加速與煞車功能。
卡丁車(俯視圖)	 <p>圖三 卡丁車俯視圖</p>	左圖中紅色方框為控制器(Arduino)放置位置。負責控制兩後輪加速、減速訊號。

2. Arduino Mega 2560

3. Arduino accelerometer

4. Arduino SD model

5. 16GB micro SD card

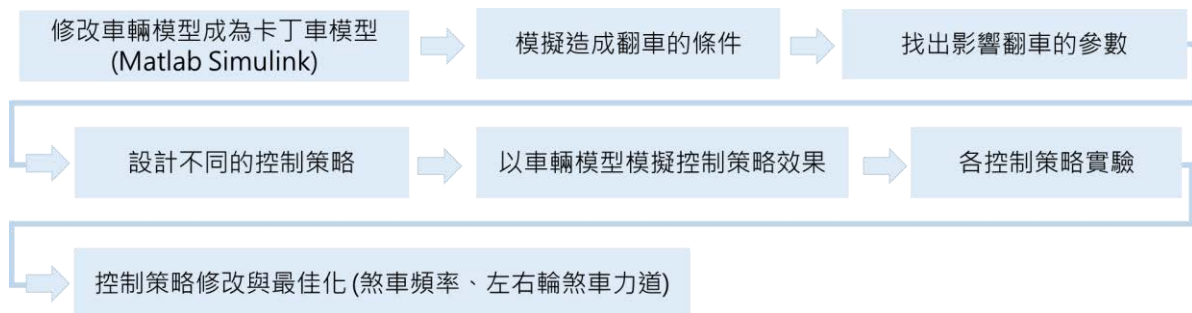
6. 霍爾感應器(兩後輪，偵測車輪轉速)

軟體設備：

1. 車輛模型平台：Matlab 2018b - Simulink
2. Arduino 控制程式撰寫：C++
3. 資料分析工具：Matlab 2018b & Excel 2016
4. 文書處理軟體：Word 2016
5. 電腦作業系統：Win 10

肆、研究過程或方法

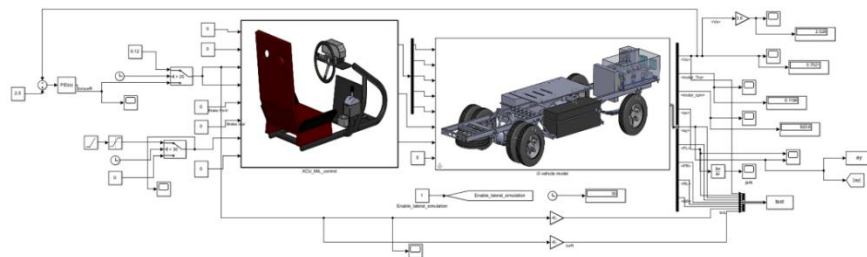
一、研究流程



圖四 研究流程圖

二、車輛模型 (Matlab Simulink)

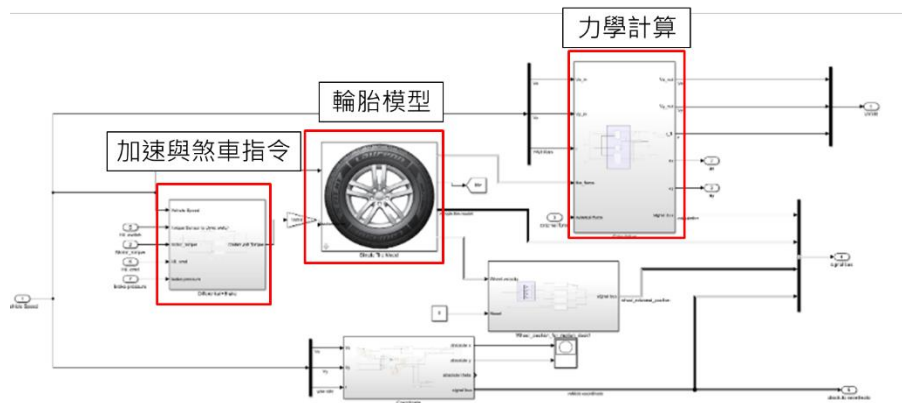
【車量模型簡介】



圖五 車輛模型介面

以 Matlab Simulink 作為介面，模型根據「Two Track Model」編寫而成。Two Track Model 是一種透過分別獨立分析四輪的受力情形，計算車輛行駛時的動態的模型。模型的架構大致可區分為三個運算階段，依序為以下：

- 加速與減速：計算動力單元(馬達)傳遞到輪胎轉軸上的力。
- 輪胎模型：動力結構傳遞到輪胎轉軸上的力經過輪胎本體的作用力(滾動阻力(F_R)、正向力(N)、偏滑角(α)、側向力(F_y)...等)後，最終輪胎傳遞至路面上的力。
- 力學計算：透過輪胎傳遞至路面上的力與空氣阻力分別計算出車輛的縱向以及側向動態結果。包含縱向速度(v_x)、縱向加速度(a_x)、側向速度(v_y)、側向加速度(a_y)、整車轉速(ω_z)...等。

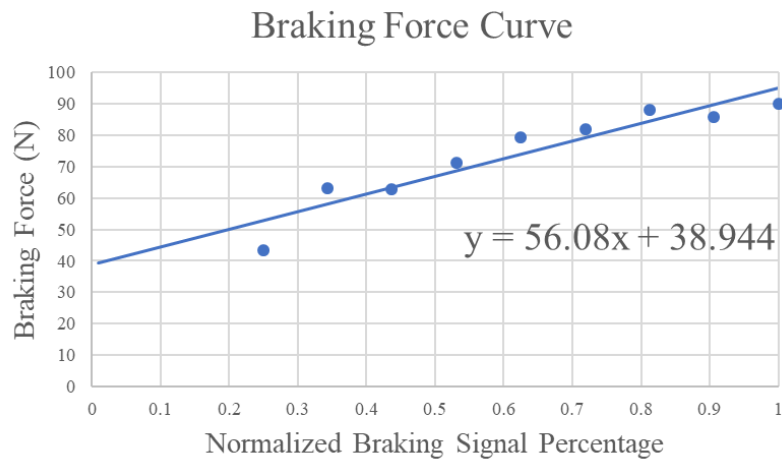


「Two Track Model」模型

圖六 車輛模型計算區

【車輛模型煞車模塊修改】

為了提升車輛模型的準確性，必須修改模型參數(車輛規格、質心位置...)以吻合真實情況，另外因本研究為車輛預防翻覆系統，因此煞車力道的準確性會直接影響模擬的結果。於是透過實驗測量不同減速訊號百分比所對應的煞車力道，得出輪殼馬達電磁煞車的出力曲線與減速訊號比例呈線性，橫軸為減速訊號的標準化比例，縱軸為馬達電磁煞車給出的減速力。



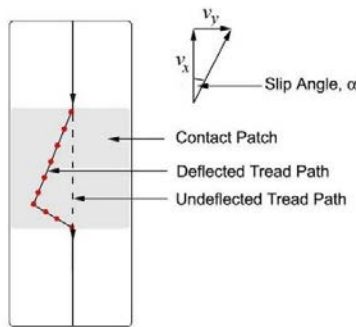
圖七 煞車力道曲線圖

【偏滑角(slip angle)】

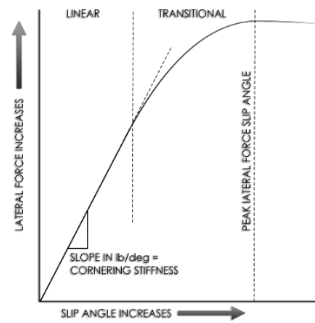
偏滑角是指車輛行駛時，輪胎軸線方向和輪胎行進方向之間的夾角(如下左圖所示)。發生於車輛轉向時，車輛的行進方向不會與輪胎軸線平行。偏滑角的定義為：

$$\alpha \equiv -\arctan \frac{v_y}{|v_x|} \quad (v_x \text{ 為車輛縱向速度, } v_y \text{ 為車輛測向速度})$$

而隨著偏滑角的增加，車輛會因輪胎形變而產生側向力，在偏滑角不大的情況下，偏滑角與側向力為線性關係(如右下圖)，隨著偏滑角繼續增大，偏滑角與側向力呈非線性，在某一處會達到側向力的峰值後，若偏滑角再增大，側向力則會稍微下降(通常車輛不會超過此角度，而此圖與輪胎性質有關係，故無放置座標軸數值。)



圖八 偏滑角示意圖



圖九 偏滑角與車輛側向力關係

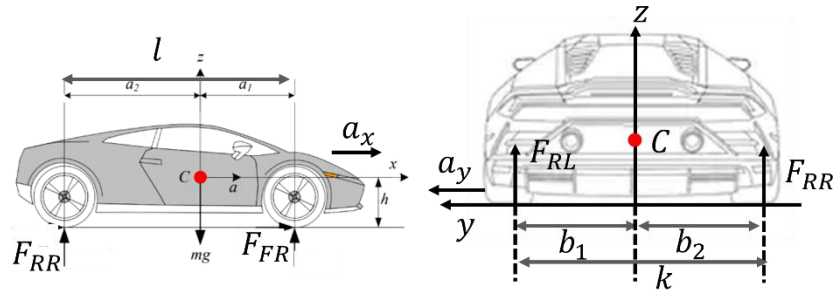
【車輛模型側向加速度修正】

因為考慮車輛在轉向時有角速度 ω_z ，因此車輛在轉向時得側向加速度不可以直接以側向速度微分視之，應加入縱向速度乘上車輛之 ω_z 。

$$\Rightarrow a_y = \text{der}(v_y) + v_x \cdot \omega_z$$

【模擬車輛翻覆前情況】

當車輛發生翻車時，即代表有一輪以上的正向力為0。以下為車輛四輪正向力公式



圖十 車輛參數示意圖

推導過程假設四輪仍接觸地面，因此 M_x 、 M_y 皆會等於零。

$$\Sigma F_z = F_{FL} + F_{FR} + F_{RL} + F_{RR} - mg = 0$$

$$\Sigma M_x = (F_{FR} + F_{RR}) \cdot k + ma_y \cdot h - mg \cdot b_1 = 0$$

$$\Sigma M_y = (F_{RL} + F_{RR}) \cdot l + ma_x \cdot h - mg \cdot a_1 = 0$$

$$F_{FL} = mg \frac{a_2 b_2}{lk} - m \frac{b_2 a_x h}{lk} - m \frac{a_2 a_y h}{lk}$$

$$F_{FR} = mg \frac{a_2 b_1}{lk} - m \frac{b_1 a_x h}{lk} + m \frac{a_2 a_y h}{lk}$$

$$F_{RL} = mg \frac{a_1 b_2}{lk} + m \frac{b_2 a_x h}{lk} - m \frac{a_1 a_y h}{lk}$$

$$F_{RR} = mg \frac{a_1 b_1}{lk} + m \frac{b_1 a_x h}{lk} + m \frac{a_1 a_y h}{lk}$$

M_x ：以 x 軸為轉軸之力矩

M_y ：以 y 軸為轉軸之力矩

F_{RL} ：左後輪正向力

F_{RR} ：右後輪正向力

F_{FL} ：左前輪正向力

F_{FR} ：右前輪正向力

l (軸距) = $a_1 + a_2$

k (左右輪距) = $b_1 + b_2$

h ：質心高度

m ：整車質量

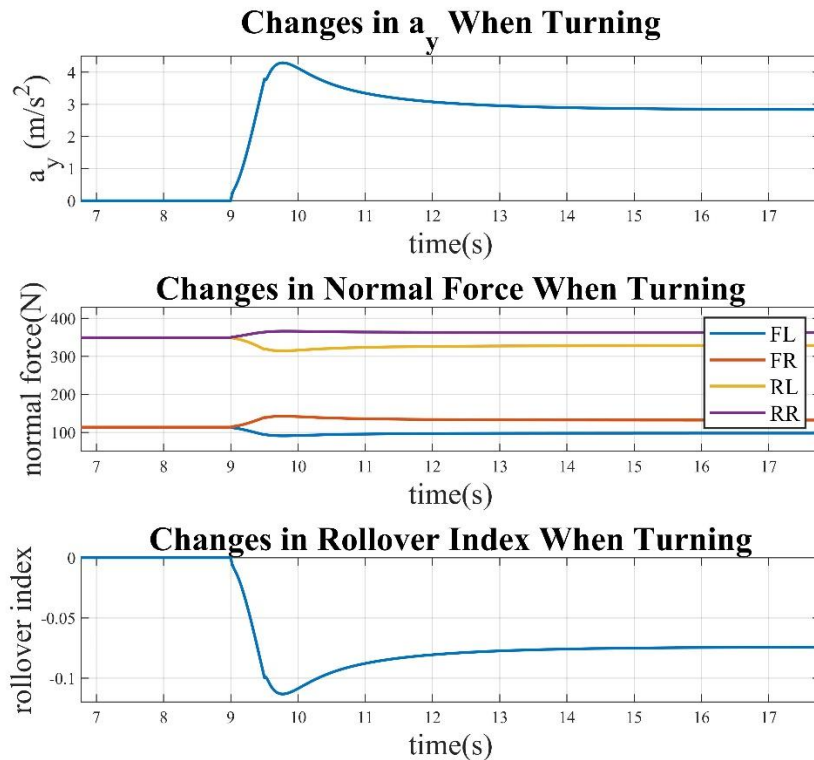
四輪正向力計算中，是變數的只有 a_x 、 a_y ，其餘皆為常數。本研究想要預防車輛行駛途中因轉向太過劇烈而導致的側向翻覆情形，但是若需要每次都觀察四輪正向力的分布後再判斷車輛翻覆的可能性會很不方便，所以想要定義一個變數是可以直接呈現出翻覆的可能性。研究因轉向過度而產生的翻覆(側向傾覆)，所以車輛兩側的正向力分布會影響翻覆的可能性。因此定義 rollover index (翻覆指數) 如下：

$$\text{rollover index} \equiv \frac{\Sigma F_L - \Sigma F_R}{\Sigma F_L + \Sigma F_R} = \frac{(F_{FL} + F_{RL}) - (F_{FR} + F_{RR})}{(F_{FL} + F_{RL}) + (F_{FR} + F_{RR})}$$

此指數將車輛左半側輪正向力與右半側輪正向力作為判斷依據。當即將發生側翻時，其中一側的輪正向力會為 0，當 ΣF_L 、 ΣF_R 其中一個為 0 時，rollover index 即呈現 1 或是 -1。另外，rollover index 也可以間接呈現車輛潛在翻覆的傾向，當其絕

對值愈接近 1 時，代表車輛兩側的正向力分布愈不平均，潛在的翻覆可能愈大也就愈大。

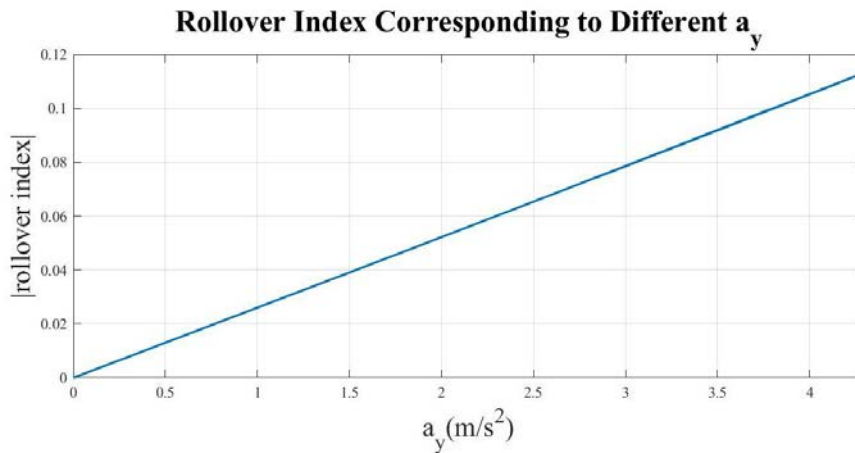
以下模擬馬達以固定加速訊號(固定扭矩)的情況下，直線行駛一段距離後以固定轉角進行轉向時側向加速度、四輪正向力、 rollover index 隨時間的變化。



圖十一 模擬車輛以固定轉角轉向時各參數的變化

由上圖可以發現，車輛在直線行駛階段側向加速度皆為零，在車輛開始轉向以後，側向加速度會急遽上升到峰值後又稍微降低以後維持定值（會到峰值以後再稍微下降的原因是在開始轉向時車輛的偏滑角(slip angle)最大，因而讓車輛有最大的側向力所以側向速度才會有峰值。接著車輛因為已經處於轉向的狀態，所以偏滑角會稍微降低，使的側向力也隨之降低，讓側向加速度在達到峰值後會稍微降低）。因為側向加速度的產生使的四輪正向力分布不均，前後軸正向力不同是因車輛重心偏後方，而右側正向力高於左側正向力是因為側向加速度所導致。此時側向加速度會導致側向力使的車輛產生側傾，進而導致翻覆。Rollover index 會在車輛兩側正向力差距最大時最接近零，此時的潛在翻覆可能最高，若無法即時降低 rollover index，則車輛可能會翻覆（起初可能只是車輛一側準備抬起）。

但由於在車輛行駛過程中較難測量四輪正向力的值，因此嘗試找出另外一個車輛參數可以間接表現 rollover index。而上文提及的正向力計算方式中與側翻有關的參數為 a_y ，所以以下將模擬 rollover index 與 a_y 的相關性。



圖十二 rollover index 與 a_y 關係圖

透過模擬觀察到， a_y 與 rollover index 幾乎呈現線性關係，也就是說潛在的翻覆可能愈高時， a_y 的絕對值也會愈大。所以本研究可以透過量測 a_y 來間接判斷車輛翻覆的可能性。

也因此本研究控制目標為：「抑制轉向中的側向加速度」

三、控制策略設計與模擬 (模擬方式：固定加速訊號行駛一段距離後，固定轉角進行轉向)

控制策略的設計理念都是希望能降低轉向的趨勢，同時降低車速。根據向心力公式， $F_c = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow a_c = a_y = \frac{v^2}{R}$ ，降低轉向趨勢等效於增加轉彎半徑 (R)，而減速則是降低車速 (v)，都可以有抑制側向加速度的效果。因此設計以下幾種控制策略。

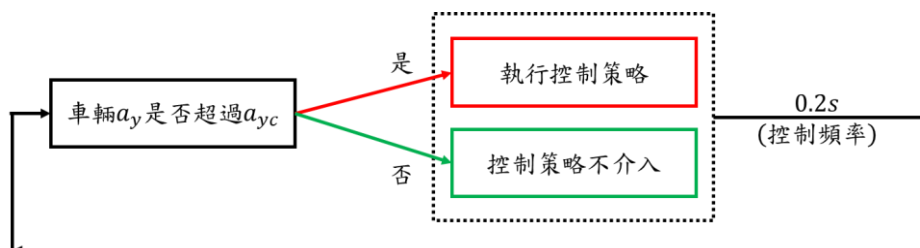
(轉向時有較大半徑的輪為外側輪，較小半徑為內側輪)

(一) **Threshold Control** (門檻式控制)：達到 a_{yc} (臨界側向加速度) 控制系統介入控制

控制策略(一)：兩後輪煞車 (Two Wheel Brake)

控制策略(二)：外側後輪煞車 (Outer Wheel Brake)

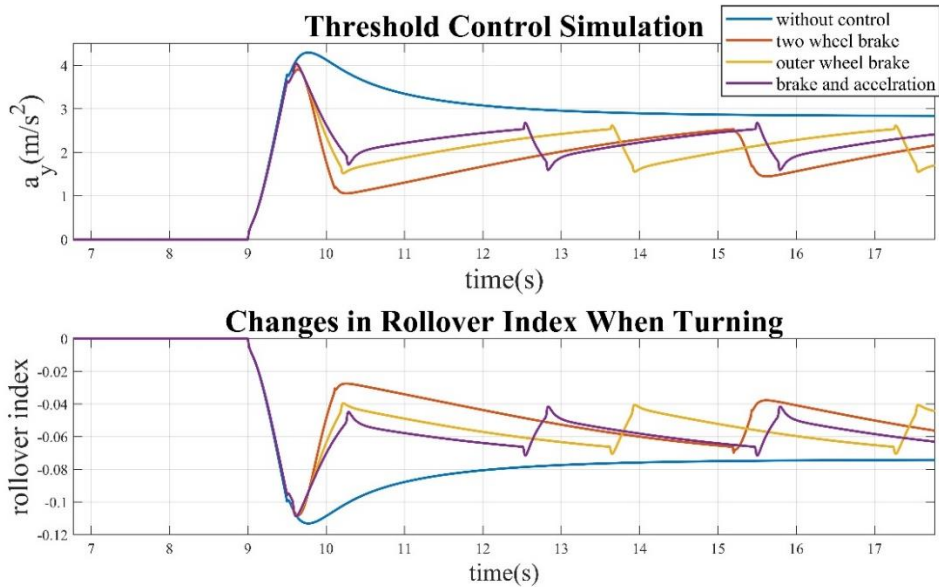
控制策略(三)：外側後輪煞車，內側後輪加速 (Brake and Acceleration)



圖十三 門檻式控制系統控制邏輯圖

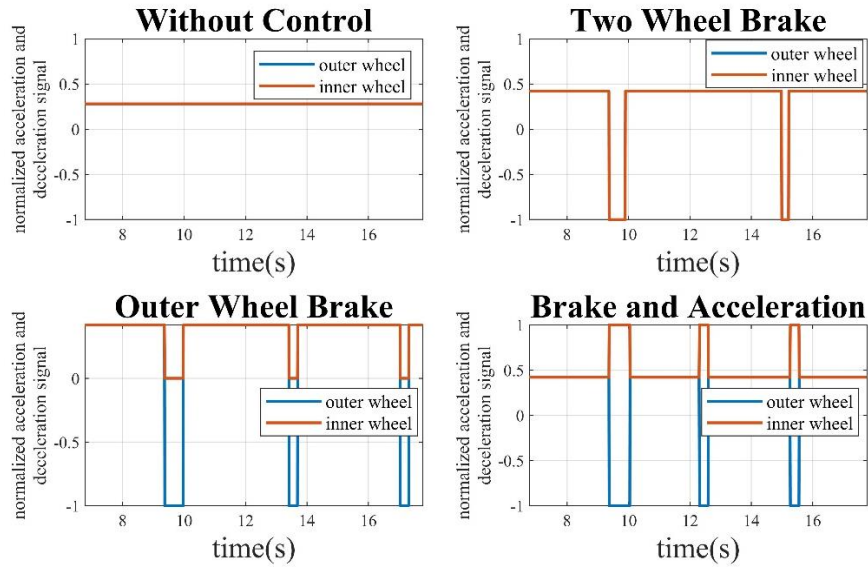
門檻式控制模擬 (a_{yc} (臨界側向加速度) = $2.5m/s^2$)

下圖為透過車輛模型模擬三種門檻式控制策略對於抑制轉向過程中側向加速度的效果。可以發現因為是門檻式控制系統，因此會在側向加速度達到臨界值時開啟系統隨即降低側向加速度後即關閉系統，導致側向加速度在臨界值附近週期性的震盪。三種門檻式控制策略中，有效降低側向加速度最多的是「煞停兩後輪」這一控制策略，推測是因為此控制策略是透過減速進而減低側向加速度，而側向加速度與速度平方成正比，相較於其他兩者主要以增加轉彎半徑而言，側向加速度與半徑一次方成反比，所以總括來看減速對於抑制側向加速度最有效。



圖十四 門檻式控制系統模擬

觀察三種控制策略的加速與煞車訊號，發現每一種都會按照控制策略設計的方式，在側向加速度達到臨界值時介入控制，發出相對應的控制訊號（0~1 為加速 0~100%，0~-1 為煞車 0~100%）。無控制系統的加速訊號始終維持為定值；”Two Wheel Brake“ 控制系統則在側向加速達到 $3.5(m/s^2)$ 時全力減速；”One Wheel Brake“ 控制系統在側向加速度達到 $3.5(m/s^2)$ 時外側輪全力減速，而內側輪則是不輸出訊號；”Brake and Acceleration“ 的控制系統則是在側向加速度達到 $3.5(m/s^2)$ 時外側輪輸出減速訊號，內側輪輸出加速訊號。

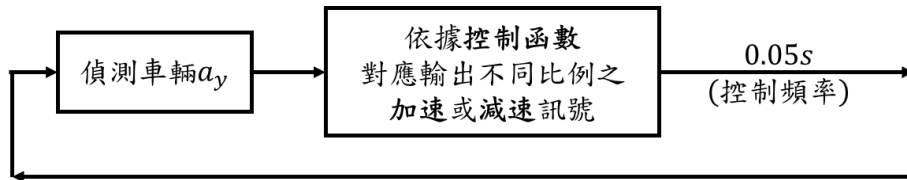


圖十五 門檻式控制策略模擬 (加速與減速訊號)

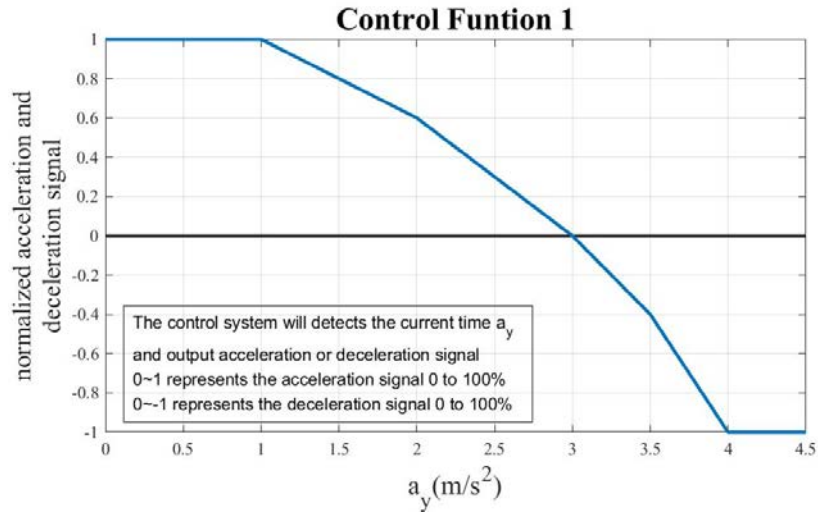
(二) Continuous Control (連續控制)：控制系統隨時都在作用

此控制策略設計系統會隨時偵測車輛當時的側向加速度，對應輸出不同的加速或煞車比例，以下簡稱為控制函數。如下圖，控制函數的橫軸為車輛的側向加速度，縱軸為標準化的加速與減速訊號 (normalized acceleration and deceleration signal)，0~1 為加速訊號(扭矩) 0~100%，0~-1 為減速訊號(扭矩) 0~100% (加速與減速訊號均正比於馬達出力扭矩)。此系統就像是一個檢查哨，會攔截最初駕駛端輸入的訊號，經過系統處理後再輸出新的訊號。而訊號處理方式如下：隨著車輛側向加速度的增加，系統會逐漸限制車輛當下加速訊號輸出的比例。轉向愈劇烈 (a_y 愈大)，加速訊號限制愈多，且當 $a_y > a_{yc}$ 時，減速訊號取代加速訊號開始介入，避免側向加速度過大。因此整個行駛過程中，控制系統隨時都處於啟動狀態並偵測車輛側向加速度對應輸出不同的加速或減速訊號。

共設計了兩種控制函數，以下表示為 "Control Function 1"、"Control Function 2"。Control Function 1 是由數個線性線段所組成，隨著側向加速度的上升，線段斜率愈小，也就是說訊號增加限制的速度愈快。舉例來說，當車輛側向加速度從0增加到1時，加速訊號都維持 100% 輸出；側向加速度從 $1(m/s^2)$ 增加到 $2(m/s^2)$ 時，加速訊號限制為當下加速訊號的 60%；側向加速度從 $2(m/s^2)$ 增加到 $3(m/s^2)$ 時，加速訊號限制為當下的 0%，不再輸出加速訊號；當車輛側向加速度持續增加時，改為減速訊號輸出。此時的 $a_{yc} = 3(m/s^2)$ ，臨界側向加速度前系統只會限制加速訊號的輸出，當超過臨界側向加速度時轉換為減速訊號輸出。隨著側向加速度再增加，減速訊號輸出的比例愈高，直到 $a_y \geq 4(m/s^2)$ 時，減速訊號皆為 100% 輸出。

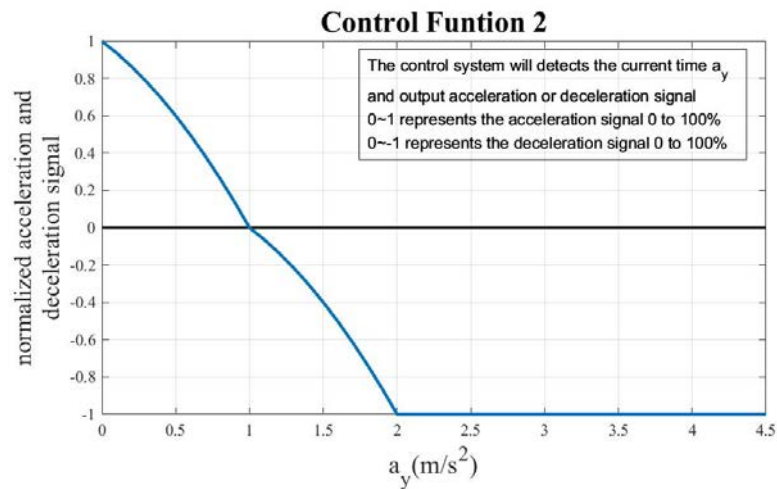


圖十六 連續式控制系統控制邏輯圖



圖十七 Control Function 1

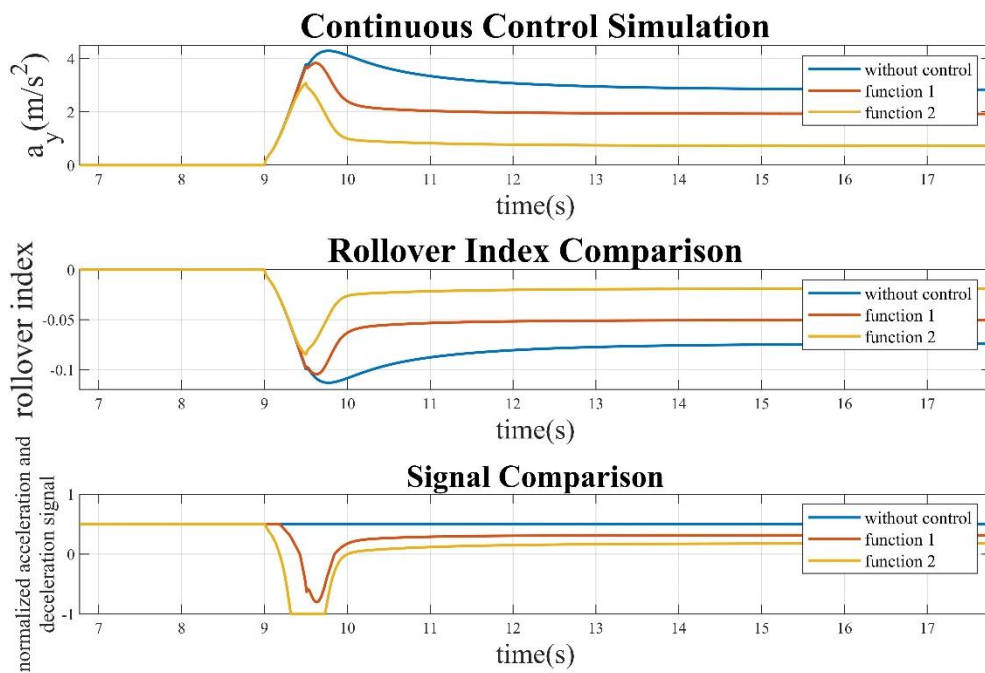
下圖為“Control Function 2”，為兩個二次函數所組成，與上一個控制函數相同處為隨側向加速度增加，斜率遞減。不同之處在於提早開始限制加速訊號輸出， $a_{yc} = 1(m/s^2)$ ，只要側向加速度超過 $1(m/s^2)$ 減速訊號就會介入。若使用此控制函數車輛會更不容易翻覆。



圖十八 Control Function 2

連續控制模擬

連續控制系統在加速度上升期間就開始逐漸限制加速訊號的輸出比例，直到側向加速度達到 a_{yc} 減速訊號開始介入，側向加速度開始急遽下降，在側向加速度降低後，加速訊號會與側向加速度達到平衡，系統會輸出限制過後的加速訊號讓車輛得以在側向加速度較低的情況下轉向，使側向加速度達到新的平衡。兩控制函數相較於沒有控制系統介入都能將側向加速度抑制在較低的狀態。若比較兩控制函數，控制函數二因為 a_{yc} 較小的關係，因此減速訊號介入的更早且維持較長一段時間，最終平衡時側向加速度也比控制函數一的側向加速度低。



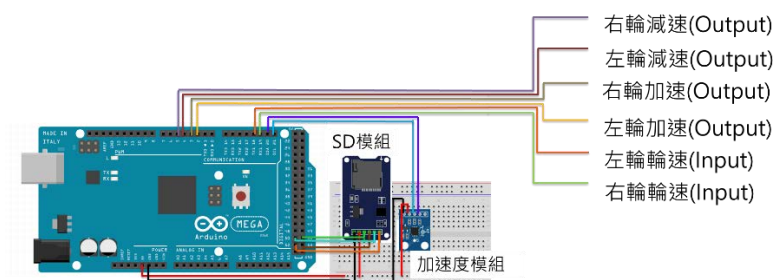
圖十九 連續控制系統模擬

四、車輛訊號溝通與控制

控制系統皆使用 Arduino Mega 2560 開發板作為控制工具。以下為開發版各個接腳對應的功能。其中加速訊號及減速訊號皆由電壓控制，電壓大小與馬達扭矩成正比。

輸入接腳	用途	輸出接腳	用途
GND	Arduino與馬達 共地電壓	5V	提供電源
18	接收左輪輪速 (霍爾感應器訊號)	2(PWM)	左輪加速訊號 0.8-4.2V (與扭矩成正比)
19	接收右輪輪速 (霍爾感應器訊號)	3(PWM)	右輪加速訊號 0.8-4.2V (與扭矩成正比)
SDA/SCL	加速度感測器模組	4(PWM)	左輪減速訊號 0.8-5.0V (與扭矩成正比)
		5(PWM)	右輪減速訊號 0.8-5.0V (與扭矩成正比)
		50/51/52/53	SD讀寫模組

圖二十 Arduino 各接角功能表



圖二十一 Arduino 接線示意圖

因本研究所使用的卡丁車無懸吊系統，因此會因為路面些微不平整導致車架產生碎震，接收到的加速度訊號就會太過於雜亂無法辨識。因此採用移動平均濾波，每 0.2s 濾波一次，即代表有效的側向加速度紀錄週期為 0.2s。

$$\text{移動平均：} a_y' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{yi}$$

(n 表示在 0.2s 內所記錄的數據點數， a_y' 為濾波後的側向加速度， a_y 為未經濾波的數據)

五、Arduino 程式控制

【門檻式控制系統(Threshold Control)】

```
int torqueCommand = 120;
int brakeCommand = 255;
double outputSignalL;
double outputSignalR;
//analogWrite(2,torqueCommand);
//analogWrite(3,torqueCommand);
////-----auto deceleration control-----////
//pin 2 for left acceleration
//pin 3 for right acceleration
//pin 4 for left deceleration
//pin 5 for right deceleration
unsigned long controlTime;

if ((currentTime-controlTime>= 300) && (abs(averaged)>3)) {
    analogWrite(4,255);
    analogWrite(3,190);
    outputSignalL=(-brakeCommand);
    outputSignalR=(torqueCommand);
    controlTime = currentTime;
}
else{
    analogWrite(4,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(2,torqueCommand);
    analogWrite(3,torqueCommand);
    outputSignalL=(torqueCommand);
    outputSignalR=(torqueCommand);
    controlTime = currentTime;
}
```

圖二十二 門檻式控制系統程式碼

【連續控制系統(Continuous Control)】

```
SUM = SUM + accY;

////-----throttle control-----////
int torqueCommand = 120;
int brakeCommand = 255;
double outputSignal;
analogWrite(2,torqueCommand);
analogWrite(3,torqueCommand);
unsigned long controlTime;

if ((currentTime-controlTime>=50) && (abs(averaged)<=1)) {
    analogWrite(2, (-0.4*sq(abs(averaged))-0.6*abs(averaged)+1)*(torqueCommand));
    analogWrite(3, (-0.4*sq(abs(averaged))-0.6*abs(averaged)+1)*(torqueCommand));
    analogWrite(4,0);
    analogWrite(5,0);
    outputSignal=(-0.4*sq(abs(averaged))-0.6*abs(averaged)+1)*(torqueCommand);
    controlTime=currentTime;
}
else if((currentTime-controlTime>=50) && (abs(averaged)<=2)) {
    analogWrite(4, (-0.4*sq(abs(averaged))+0.2*abs(averaged)+0.2)*(brakeCommand));
    analogWrite(5, (-0.4*sq(abs(averaged))+0.2*abs(averaged)+0.2)*(brakeCommand));
    outputSignal=(-0.4*sq(abs(averaged))+0.2*abs(averaged)+0.2)*(-brakeCommand);
    controlTime=currentTime;
}
else{
    analogWrite(4,brakeCommand);
    analogWrite(5,brakeCommand);
    outputSignal=-brakeCommand;
    controlTime=currentTime;
}
```

圖二十三 連續控制系統程式碼

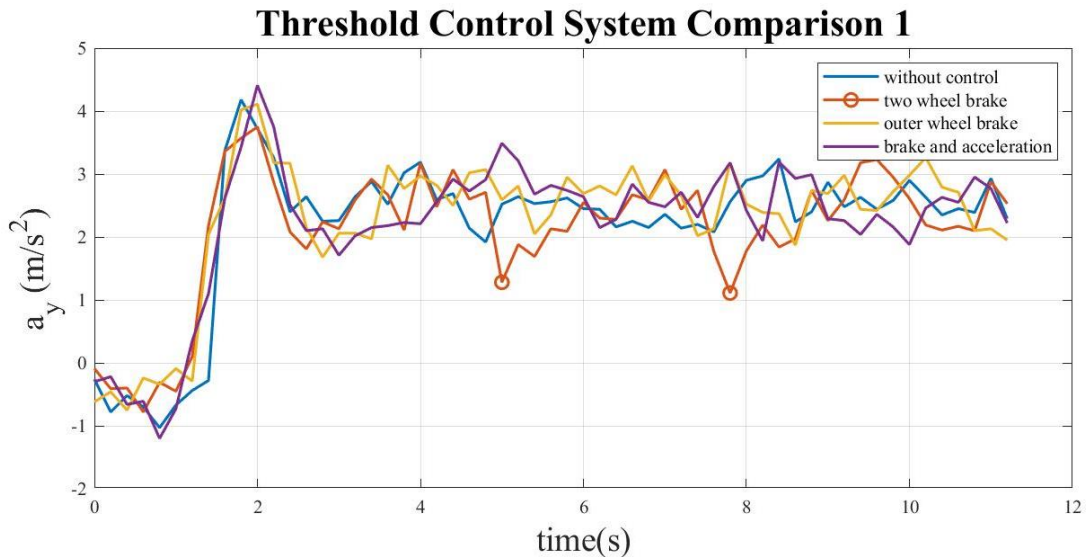
伍、研究結果與討論

【研究結果】

#實驗方式：固定加速電壓訊號行駛一段距(約 5m)離後，以固定轉角進行轉向，並記錄車輛側向加速度

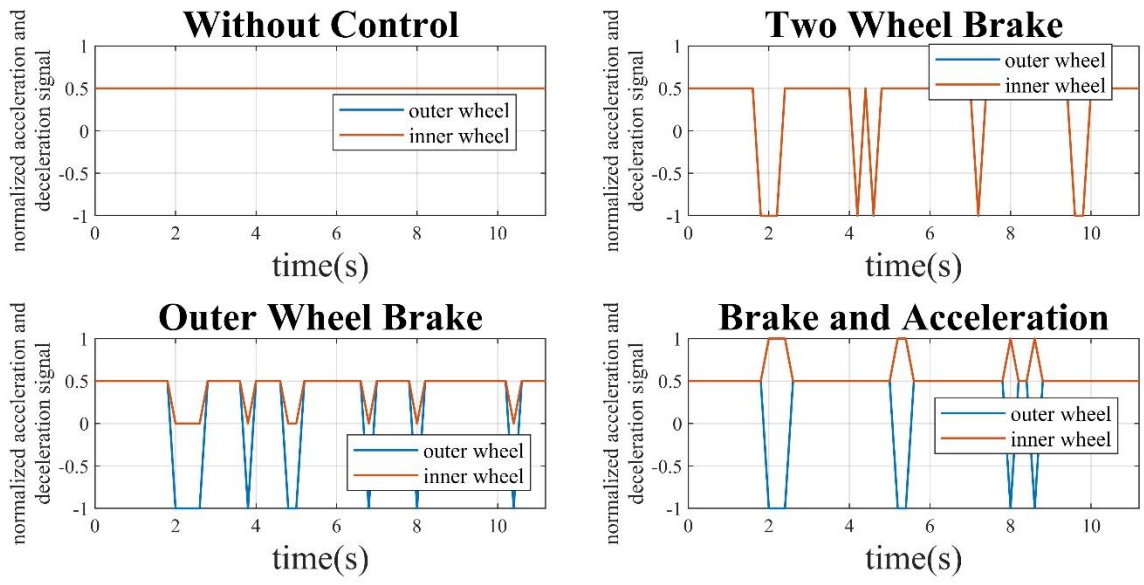
(一) Threshold Control (門檻式控制) ($a_{yc} = 2.5m/s^2$)

透過實驗發現三種門檻式控制策略中，雖然每個控制策略皆有在側向加速度達到臨界側向加速度時介入控制，但僅有“Two Wheel Brake”此控制策略可以較明顯觀察到側向加速度在臨界值附近震盪的情形，且搭配加速與煞車訊號圖表，發現煞車訊號介入時側向加速度確實會明顯下降(下圖中紅圈)。其餘兩種門檻式控制策略與無控制策略介入幾乎無異。



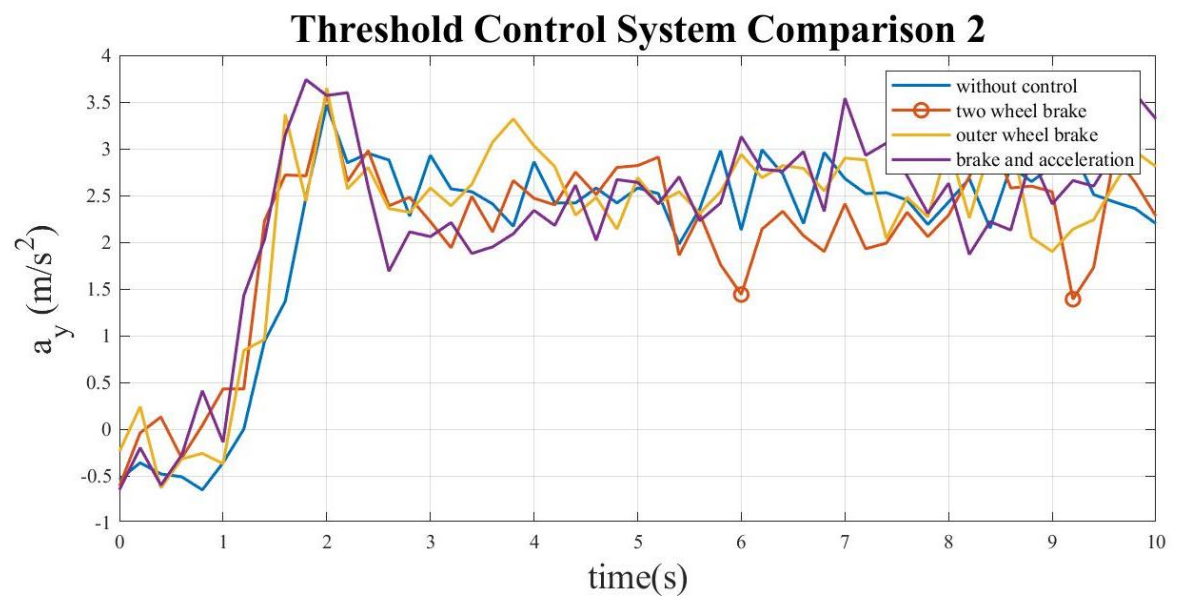
圖二十四 門檻式控制系統實驗 (側向加速度) (1)

以下為各控制策略在轉向過程中所輸出的加速或減速訊號，每個控制策略都有按照設計的方式啟動並輸出訊號，“Two Wheel Brake”在達到 a_{yc} 時全力減速；“Outer Wheel Brake”則是達到 a_{yc} 時全力減速外側輪；“Brake and Acceleration”則是在達到 a_{yc} 時全力減速外側輪且全力加速外側輪。但最後有較明顯抑制側向加速度效果者僅有“Two Wheel Brake”這個控制策略。

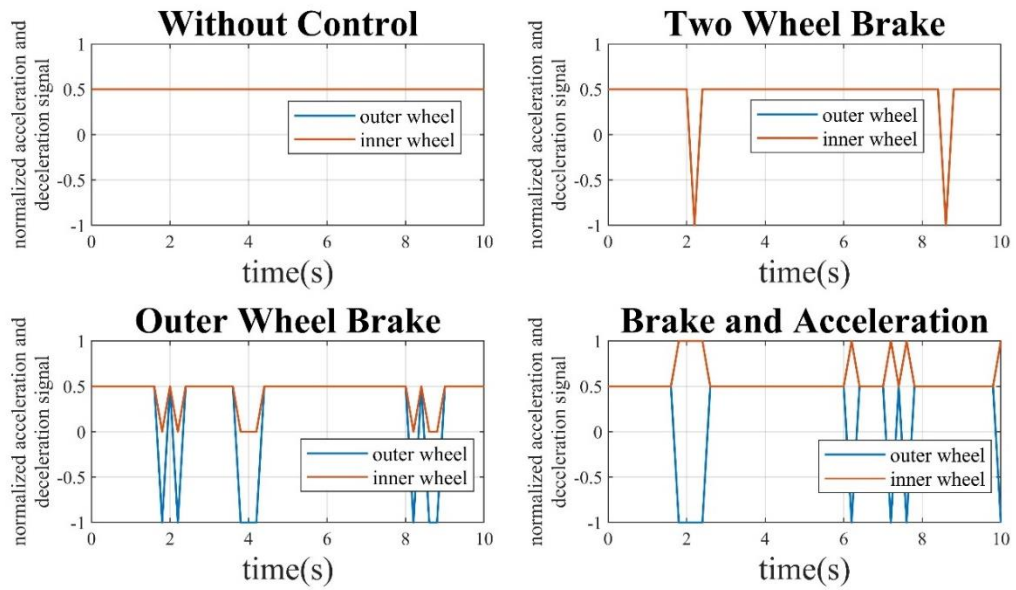


圖二十五 門檻式控制系統加速與減速訊號比較(1)

以下為第二組門檻式控制策略實驗數據，可以發現只有“Two Wheel Brake”這個控制策略有較明顯的抑制效果。



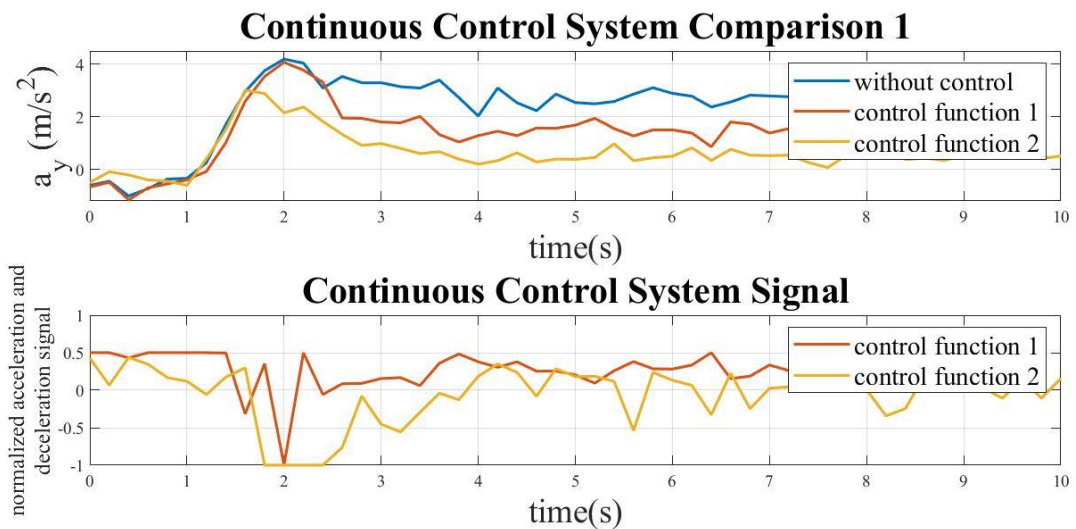
圖二十六 門檻式控制系統實驗 (側向加速度) (2)



圖二十七 門檻式控制系統加速與減速訊號比較(2)

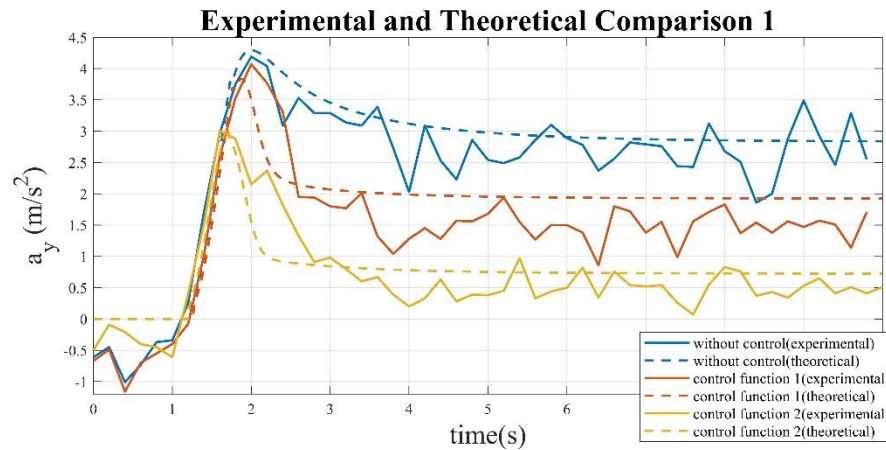
(二) Continuous Control (連續控制)

下圖為連續控制系統的實驗結果，因為“Control Function 2”的 a_{yc} 較低，因此減速訊號在還未 2 秒時就已經介入，且維持了一段時間為減速訊號 100%，直到將側向加速度維持在大約 $1(m/s^2)$ 。因此側向加速度的峰值相較於“Control Function 1”低了許多。而“Control Function 1”則是較晚才介入減速，所以側向加速度的峰值與無控制系統介入相當，但最終仍有將側向加速度抑制下來。最終無論何種控制函數，皆會輸出限制過的加速訊號，讓側向加速度趨於穩定，使得轉向後期加速訊號與側向加速度皆會趨近於定值(“Control Function 2”之訊號波動較大是因為 a_{yc} 很小，因此只要路面稍不平整就會使側向加速度超出 a_{yc} 進而輸出減速訊號)。



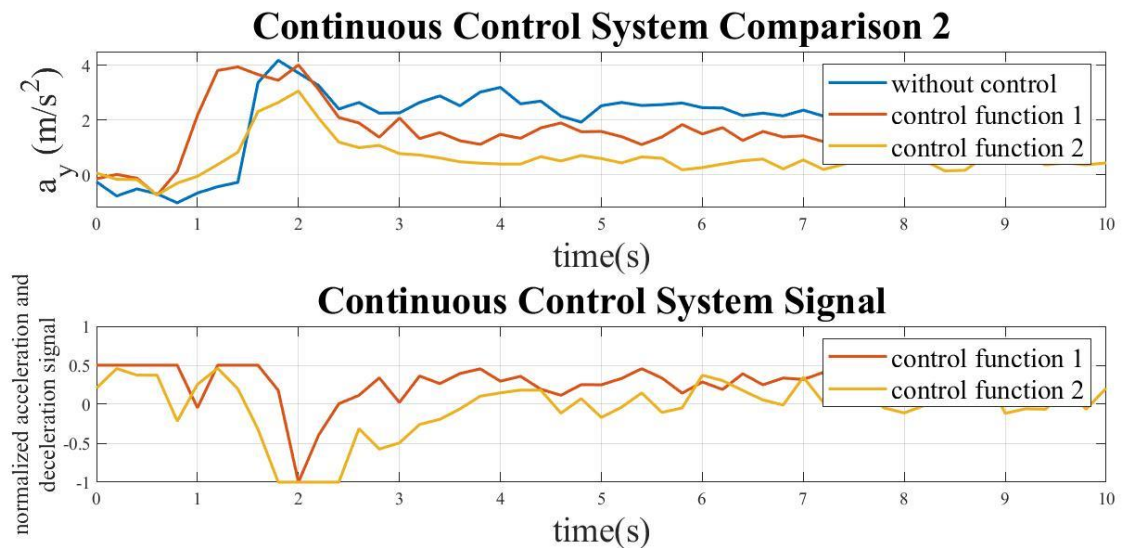
圖二十八 連續控制系統實驗 (側向加速度) (1)

下圖為兩控制函數理論曲線與實驗曲線針對側向加速度變化的比較圖， a_{yc} 愈小，則側向加速度的峰值也會愈低。若像“Control Function 1”的 a_{yc} 訂為 $3(m/s^2)$ ，則會因為減速訊號太晚介入而導致側向加速度的峰值較高，rollover index 也會較高，會有較高的翻覆風險。但相較於無控制系統介入兩控制函數皆能有效抑制轉向後期的側向加速度。而“Control Function 2”因為較早介入減速的關係，所以轉向過程中的側向加速度峰值也比無控制系統介入的情況下低許多，使得 rollover index 降低，進而減低翻覆的風險。

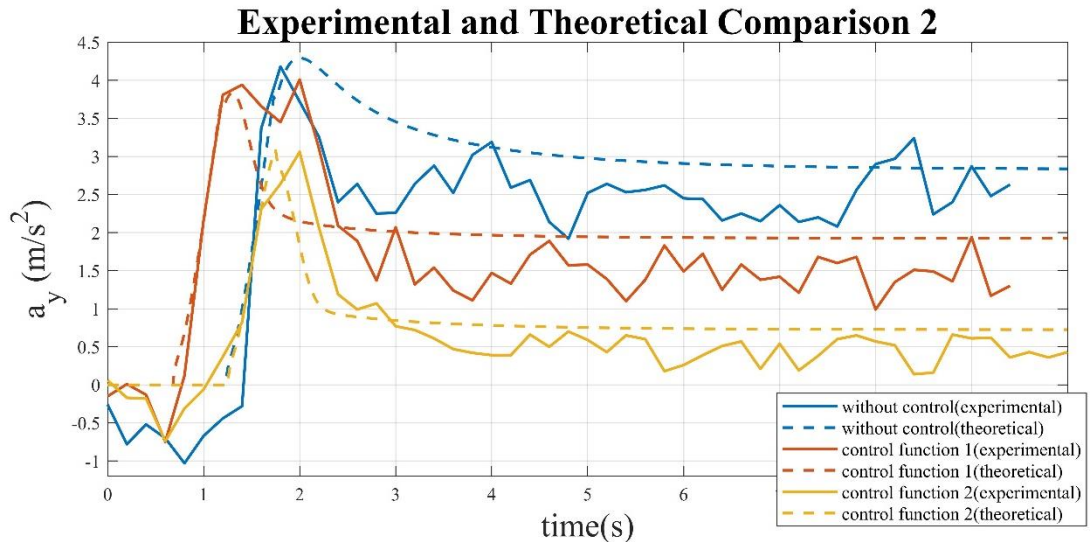


圖二十九 連續控制系統理論與模擬比較(1)

以下為第二組連續控制實驗數據。



圖三十 連續控制系統實驗 (側向加速度) (2)



圖三十一 連續控制系統理論與模擬比較(2)

模擬結果與實驗結果幾乎吻合，但控制函數一的側向加速度峰值與理論模擬仍有差距，且峰值維持時間大約存在 1.5s，長於模擬情況與其他實驗組所呈現的峰值（皆為瞬間），推斷可能因實驗過程中路面不平整所導致。但控制函數一與二的趨勢與模擬符合，控制函數二確實能讓轉向過程中的側向加速度峰值降得更低。

【討論】

(一) 車輛翻覆的因素有許多，其中轉向過於劇烈是原因之一。當轉向太過劇烈時會產生側向力使車輛一側的正向力明顯低於另一側，產生側傾進而導致翻覆。利用 rollover index 可以做為車輛翻覆可能的指標，因為其值正比於車輛兩側的正向力差，當差值愈大時代表愈有可能發生傾覆。

(二) 因實驗過程中無法直接測輛車輛四輪正向力分布，透過模擬發現側向加速度與 rollover index 幾乎呈正比，因此藉由測量車輛側向加速度作為推斷潛在翻覆可能的依據。

(三) 門檻式控制策略藉由偵測側向加速度達到臨界側向加速度時開啟系統讓控制策略介入，但由於是門檻式設計，系統只有開啟和關閉兩種狀態。因此當車輛側向加速度達到臨界值時，系統會開啟，待側向加速度被抑制後，系統再度關閉。不斷重複以上的循環，導致目標控制參數會在臨界值附近不斷震盪，無法根本上解決側向加速度過高的問題。且因系統開啟關閉切換頻繁，因此對於乘坐者的舒適度也會大有影響。

(四) 連續控制系統設計為根據車輛側向加速度而輸出不同比例之加速或減速訊號，意即控制系統隨時都處於啟動狀態，只是輸出的訊號有所差異。透過模擬與實驗皆發現到，在轉向初期側向加速度上升期間，系統就會限制加速訊號輸出的比例，在側向加速

度達到峰值時輸出 100% 的減速訊號，直到側向加速度因減速而降低以後系統才又轉回輸出限制過加速訊號。最終側向加速度相較於沒有控制系統介入來的低，且轉向後期側向加速度與輸出訊號皆會趨近定值。

(五) 連續系統控制下，若控制函數的 a_{yc} 設計得較低，則能讓車輛轉向時的側向加速度的峰值降低，但伴隨的缺點為轉向時的駕駛的控制權被限制的很多，轉向時只要速度稍高或是轉彎半徑縮小，控制系統就很有可能介入減速。若以安全性為考量的話，整個過程中的 rollover index 都會比沒有控制系統的情況下來的小，能有效的降低車輛轉向時翻覆的可能性。

(六) 門檻式控制系統的“Outer Wheel Brake“與“Brake and Acceleration“的目的皆為減小轉向的幅度(增加轉彎半徑)，因此對應到的控制策略可能會造成車輛轉向不足。但連續控制系統因訊號都是同時作用於兩後輪，不會影響原本轉向的半徑，所以不會有轉向不足的問題，僅會在轉向時影響縱向速度。

陸、結論

- 一、藉由測量車輛 a_y 可以間接推得車輛翻覆的可能性。
- 二、門檻式控制策略會讓車輛側向加速度在臨界側向加速度附近震盪。
- 三、“Two Wheel Brake“是成效最好的門檻式控制策略，有效降低轉向過程中側向加速度。
- 四、連續控制系統可以讓整體轉向過程的側向加速度降低，成效較門檻式控制策略佳。且若 a_{yc} 設計的較小，則系統的減速訊號較早介入，使的轉向時側向加速度峰值較低，能降低車輛轉向時翻覆的可能性。
- 五、門檻式控制策略的“Outer Wheel Brake“與“Brake and Acceleration“會有轉向不足之問題，但連續控制系統不會有轉向不足的疑慮。

柒、未來展望

- 一、 可以根據更詳細的控制目標設定控制函數，如考慮車輛當下行駛車速(車速愈高的情況下臨界側向加速度應欲低)。
- 二、 模擬不同速域下最佳臨界側向加速度(不同速域下相同轉角所造成的側向加速度相異)。
- 三、 計算車輛姿態，使得控制系統可以適用於不只平面路面。

捌、參考資料

- 一、 A Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators -CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2012
- 二、 Estimation of Vehicle Lateral Velocity-Pierre Pettersson Department of Automatic Control Lund University November 2008
- 三、 J. Peraire 16.07 Dynamics Fall 2004 Version 1.5 Lecture D12 - Relative Motion using Translating/Rotating Axes
- 四、 Design for Vehicle Rollover Warning System , 2012 SAE International
- 五、 Nikolai Moshchuk, Shih-Ken Chen, VEHICLE ROLLOVER DETECTION INDEX, IMECE2009-10142

【評語】 100008

1. 推論、測試、分析等內容均有涵蓋，為一個完整的科研報告。
2. 動機和背景建議提供更完整的說明和分析。如目前車輛事故中因為高速過彎而翻覆的案例有多少？模型本身是否涵蓋一般導致翻覆的物理機制（如角動量）？若是要預防如 moose test 那種閃避前方障礙物所導致的失控，這似乎可以由方向盤瞬間變化度來作為車輛動態而翻覆前更為前期的應變處理。
3. 車輛四輪受力大小和側向加速度高度相關。若要更精準，地面的傾斜度也為關鍵。
4. 在高速過彎時，除了翻覆外，也有側向打滑的可能，若要完整探討，可評估同步討論側向打滑。
5. 導入行車輔助控制時，勢必和駕駛者的操控會互相影響和牽制，這也是導入輔助駕駛系統所常遇到的難題之一（因每位駕駛者的駕駛習性差異不小），兩者間的交互操作和影響後續建議進一步分析。