



國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

基於指數分佈模型的車輛碰撞風險評估改進與應用

Improvement and Application of Vehicle Crash Risk Assessment

Based on Exponential Distribution Model

柯琮祐

Tsung-You Ke

指導教授：詹魁元博士

Advisor: Kuei-Yuan Chan, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July, 2024



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

基於指數分佈模型的車輛碰撞風險評估
改進與應用

Improvement and Application of Vehicle Crash Risk Assessment

Based on Exponential Distribution Model

本論文係 柯琮祐(R11522637) 在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 113 年 07 月 29 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Mechanical Engineering on 29 July 2024 have examined a Master's thesis entitled above presented by Tsung-You Ke (R11522637) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

(指導教授 Advisor)

洪詠軒

吳文方

系主任/所長 Director:

林嘉揚





誌謝

兩年的碩士生涯轉眼間就要結束，過程中需要感謝的人太多，首先特別感謝指導教授詹魁元老師，在研究過程中給予我的寶貴建議，讓我每次在研究卡關時都能找到解決的方法，感謝老師願意讓我加入 SOLab 大家庭，讓我兩年間學到許多，感謝老師一路以來的包容與鼓勵，感謝洪翊軒教授以及吳文方教授撥空擔任我的口試委員，給予研究及論文中的寶貴建議完善了論文不足之處。感謝冠成學長、彥智學長在我剛入學時教導我許多研究領域相關的基礎知識，感謝柏賢學長處理實驗室大大小小的事物，感謝昱霖學長在我報告時給的寶貴建議。感謝易玄學長在剛入學及工綜時的照顧，感謝重叡學長、啟瑞學長、怡萱學姊、若瑄學姊在修課及研究上的建議。感謝同屆一同努力的好夥伴們，從碩零的輪椅到碩一二的修課及研究上的幫忙，感謝最差設計群組的好夥伴敬亭、鐘毅不論是在修課時或各種活動的互相幫忙以及最後論文上的互相比建議，感謝冠賢在 Ubuntu 及其他程式上的建議，感謝永齡好夥伴珮甄總是認真做實驗砥礪我繼續努力，感謝問藻及怡蔓總是凱瑞團咪報告當我們的最佳範例，感謝學弟妹們邑安、家安、京睿、定群、蘇瑄這一年來的幫忙祝你們能順利畢業。感謝我的家人始終給予我支持與鼓勵，沒有各位的幫助我一定無法順利完成論文，祝各位皆能事事順心。最後感謝沒有放棄的自己，在最後完成了實驗並完成了論文及口試報告，希望未來工作及生活上都能一切順利。

柯琮祐 謹識於
國立臺灣大學 機械工程學系
中華民國一百一十三年八月





中文摘要

自駕車被期望能解決道路安全上的問題，然而在目前的實際道路測試中自駕車過於保守的駕駛行為，反而導致與人類駕駛發生碰撞機率上升，若無法解決自駕車與人類駕駛行為上的差異，將會影響自駕車發展過程中與人類共同行駛的時期的交通安全，駕駛在道路中會因為環境及其他用路人行為有不同的駕駛決策，評估交通風險的方法眾多其中機率風險透過機率分佈計算車輛發生碰撞的可能性被廣泛使用，指數分佈模型透過駕駛與障礙物距離與碰撞風險呈指數關係來評估碰撞機率風險，且影響駕駛風格的因素中駕駛對於風險的承受程度為最容易量化且直觀的因素，本研究基於指數分佈模型分析駕駛碰撞風險後，並以最佳化模擬駕駛基於碰撞風險進行決策的行為，並改變不同駕駛可接受的風險應用於三種不同駕駛行為包括跟車、超車及無保護左轉彎進行不同駕駛風格的分析。

關鍵字：駕駛風格、指數分佈模型、碰撞風險評估、駕駛行為分析





Abstract

Autonomous vehicles are expected to be the solution to the traffic accident problem. However, during actual road tests, the overly cautious driving behavior of autonomous vehicles has led to an increased probability of collisions with human drivers. If the differences in driving behaviors between autonomous vehicles and human drivers cannot be resolved, it will affect traffic safety during the period when autonomous vehicles and humans are sharing the road. Drivers make different driving decisions based on the environment and the behavior of other road users. There are many methods to assess collision risk, with probabilistic risk assessment being widely used. This method calculates the likelihood of vehicle collisions through probability distributions. The exponential distribution model assesses collision risk by exponential relationship between driver-obstacle distance and crash risk. Among the factors influencing driving style, the driver's tolerance for risk is the easiest to quantify and most intuitive. This study analyzes collision risk based on the exponential distribution model and uses optimization to simulate driver behavior decisions based on collision risk. It then changes the acceptable risk levels for different driving behaviors, including car-following, overtaking, and unprotected left turns, to analyze different driving styles.

Keywords: Driving style, Exponential distribution model, Crash risk assessment, Driving behavior analysis





目次

口試委員會審定書	i
誌謝	iii
中文摘要	v
Abstract	vii
目次	ix
圖目次	xiii
表目次	xvii
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機及研究目的	2
1.3 論文架構	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 碰撞風險分析	5
2.1.1 運動學指標風險	5
2.1.2 力場風險	7
2.1.3 機率風險	7
2.2 自動駕駛技術	8



2.3 自動駕駛挑戰	9
2.3.1 駕駛風格	9
2.3.2 社會行為	10
2.4 小結	11
第三章 研究方法	13
3.1 研究假設與流程	13
3.2 模擬環境架構	15
3.2.1 跟車模擬環境	15
3.2.2 超車模擬環境	16
3.2.3 無保護轉彎模擬環境	17
3.3 駕駛行為	17
3.3.1 車輛模型	18
3.4 碰撞風險分析	19
3.4.1 指數機率碰撞風險分析	19
3.4.2 駕駛風險感知	21
3.5 最佳化碰撞迴避	22
3.5.1 參數影響	23
3.6 模擬方法	24
第四章 常見駕駛行為分析	29
4.1 跟車行為分析	29
4.1.1 前車定速行為	29
4.1.2 前車變速行為	33
4.1.3 三車跟車行為	36



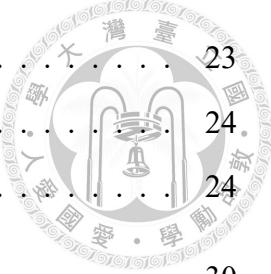
4.1.4 跟車行為分析小結	36
4.2 超車行為分析	37
4.2.1 快車道車速 55km/h	37
4.2.2 快車道車速 60km/h	41
4.2.3 超車行為分析小結	45
4.3 無保護路口轉彎分析	45
4.3.1 轉彎車速 30km/h	45
4.3.2 轉彎車速 40km/h	49
4.4 小結	52
第五章 結論與未來展望	53
5.1 結論	53
5.2 未來展望	54
參考文獻	55



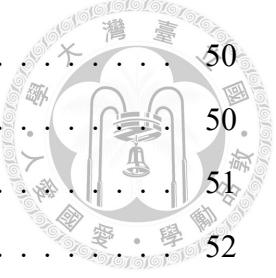


圖目次

1.1	台灣近年道路交通事故概況	1
1.2	SAE 駕駛自動化程度分級	2
1.3	自駕車與一般駕駛碰撞情況比較	3
2.1	TTC 示意圖	6
2.2	BTN 及 STN 示意圖	6
2.3	力場風險示意圖	7
2.4	機率風險示意圖	8
2.5	自駕車用感測器示意圖	8
2.6	自動駕駛技術流程圖	9
2.7	影響駕駛風格因素	10
2.8	考慮 SVO 影響駕駛示意圖	11
3.1	研究流程圖	14
3.2	跟車模擬環境	15
3.3	超車模擬環境	16
3.4	無保護左轉模擬環境	17
3.5	預測車輛行為	18
3.6	腳踏車模型	19
3.7	車輛碰撞邊界	20
3.8	指數分佈模型	20
3.9	根據敏感度變更指數分佈	22



3.10 最佳化碰撞迴避	23
3.11 側向風險影響(超車)	24
3.12 轉向限制原因	24
4.1 後車偏好速度 50km/h 實驗結果	30
4.2 後車偏好速度 60km/h 實驗結果	31
4.3 後車偏好速度 70km/h 實驗結果	32
4.4 前車週期 T 為 36s 實驗結果	33
4.5 前車週期 T 為 24s 實驗結果	34
4.6 前車週期 T 為 12s 實驗結果	35
4.7 三車跟車行為實驗結果	36
4.8 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果(速度)	38
4.9 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果(轉角)	38
4.10 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果(速度)	39
4.11 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果(轉角)	39
4.12 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果(速度)	40
4.13 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果(轉角)	41
4.14 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果(速度)	42
4.15 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果(轉角)	42
4.16 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果(速度)	43
4.17 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果(轉角)	43
4.18 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果(速度)	44
4.19 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果(轉角)	44
4.20 轉彎車速 30km/h、直行車距 20m 實驗結果(速度)	46
4.21 轉彎車速 30km/h、直行車距 20m 實驗結果(轉角)	46
4.22 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果(速度)	47
4.23 轉彎車速 30km/h、直行車距 15m 實驗結果(轉角)	47
4.24 轉彎車速 30km/h、直行車距 10m 實驗結果(轉角)	48
4.25 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果(速度)	49
4.26 可接受風險問題	49



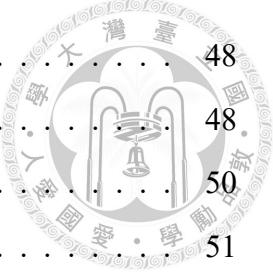
4.27 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.001 實驗結果(速度)	50
4.28 轉彎車速 40km/h、可接受風險 0.001 實驗結果(轉角)	50
4.29 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果(速度)	51
4.30 轉彎車速 40km/h、可接受風險 0.05 實驗結果(轉角)	52





表目次

4.1 後車偏好速度 50km/h 實驗結果	30
4.2 後車偏好速度 60km/h 實驗結果	31
4.3 後車偏好速度 70km/h 實驗結果 (碰撞)	32
4.4 後車偏好速度 70km/h 實驗結果 (無碰撞)	32
4.5 前車週期 T 為 36s 實驗結果	33
4.6 前車週期 T 為 24s 實驗結果	34
4.7 前車週期 T 為 12s 實驗結果 (碰撞)	35
4.8 前車週期 T 為 12s 實驗結果 (無碰撞)	35
4.9 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果	37
4.10 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (碰撞)	38
4.11 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (無碰撞)	39
4.12 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (碰撞)	40
4.13 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (無碰撞)	40
4.14 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (碰撞)	41
4.15 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (無碰撞)	41
4.16 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (碰撞)	42
4.17 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (碰撞)	43
4.18 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (無碰撞)	44
4.19 轉彎車速 30km/h、快車道車距 20m 實驗結果	45
4.20 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果 (碰撞)	46
4.21 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果 (無碰撞)	47



4.22 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果 (碰撞)	48
4.23 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果 (無碰撞)	48
4.24 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.001 實驗結果	50
4.25 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果 (碰撞)	51
4.26 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果 (無碰撞)	51



第一章

緒論

1.1 前言

事故傷害常年位居於台灣十大死因之中其中運輸事故導致的死亡約佔了事故傷害的一半，根據內政部警政署及交通部道路交通安全督導委員會的近 5 年道路交通事故概況，如下圖 1.1 所示統計了民國 106 年至 110 年度台灣道路交通事故之肇事件數與造成死亡或受傷人數，可以看到 106 至 110 年間因交通事故造成之總死亡人數皆有兩千接近三千且有三、四十萬人因此受傷，且有逐年上升的趨勢 [1]，交通事故的發生除了帶來人類的死傷及殘疾的影響外，也導致了大量因為財產賠償及人員損失的經濟問題 [2]，因此為了減少交通事故之產生及降低交通事故發生時帶來的影響越來越多的駕駛輔助系統及自動駕駛技術被開發及實裝。

年別	肇事件數 (件)	死傷人數		平均每日		每萬輛機動車輛交通事故		
		死亡 (人)	受傷 (人)	肇事件數 (件)	死傷人數 (人)	肇事率 (件/萬輛)	死亡率 (人/萬輛)	受傷率 (人/萬輛)
106 年	296,826	395,743	2,697	393,046	813	1,084	137.37	1.25
107 年	320,315	429,579	2,780	426,799	878	1,177	147.02	1.28
108 年	341,972	458,265	2,865	455,400	937	1,256	155.50	1.30
109 年	362,393	485,305	2,972	482,333	990	1,326	163.21	1.34
110 年	358,221	479,231	2,990	476,241	981	1,313	159.58	1.33
較上年	增減數 (百分點)	-4,172	-6,074	18	-6,092	-9	-13	-3.62
	增減%	-1.15	-1.25	0.61	-1.26	-0.88	-0.98	-0.01
110 年 較 106 年	增減數 (百分點)	61,395	83,488	293	83,195	168	229	22.21
	增減%	20.68	21.10	10.86	21.17	20.68	21.10	0.08
								30.26

圖 1.1：台灣近年道路交通事故概況 [1]

為了幫助理解及區分不同層級自動駕駛技術，國際汽車工程師協會(Society of Automotive Engineers, SAE)訂定了 SAE J3016 標準，將駕駛自動化程度分為 Level 0 到 Level 5 共六個等級，等級越高代表駕駛自動化程度越高如圖1.2所示[3]，圖中從上至下依序解釋了不同等級時人類駕駛應該做什麼及該等級之特徵及範例，藍色部份代表為輔助駕駛功能，綠色則為自動駕駛功能，Level 0 僅提供警示功能駕駛須全程操控，Level 1~Level 2 屬於駕駛輔助系統只在特定情況下才會干涉駕駛，Level 3~Level 4 在特定條件下以可以完成車輛自動駕駛，而 Level 5 則真正達到全自動駕駛，近年來各車廠對於駕駛自動化程度 Level 2 及 Level 3 技術已經有許多開發與實裝，許多國家因應技術發展也加速了對於自動駕駛車輛相關法律的制定，因此可以預期未來十年對於自動駕駛車輛在實際道路中使用將會大幅增加[4]。

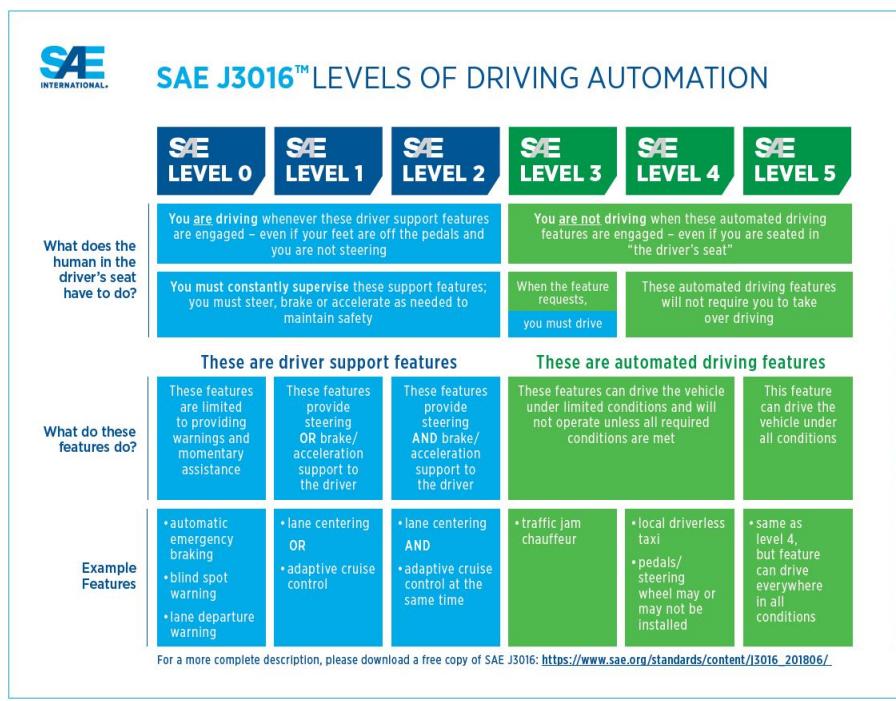


圖 1.2: SAE 駕駛自動化程度分級 [3]

1.2 研究動機及研究目的

自動駕駛車輛被期望能減少人類駕駛的不當行為以提高燃料效率、減少行駛所需時間及降低交通事故的發生[5]，在其開發的過程中與人類駕駛共同行駛的適應階段不可避免，Petovic[6]分析了2015至2017年間美國加州中有發生自駕車參



與之交通事故地點之所有交通事故，根據統計結果自駕車在相同行駛距離的情況下發生碰撞事故為一般駕駛的 8 倍，針對事故發生原因分析其如下圖 1.3 所示，將交通事故之原因分為六種分別為擦撞、追撞、撞擊車輛側面、撞擊物品、撞擊行人及其他，其中黑色長條為只有傳統人類駕駛參與的交通事故，白色長條為有自駕車參與的交通事故，透過此圖可以看到自駕車及傳統人類駕駛交通事故佔比，人類駕駛與自駕車在擦撞、撞擊物品及其他撞擊原因事故佔比差距不大，自駕車在車輛間擦撞及撞擊行人造成交通事故遠遠低於人類駕駛，而在車輛間追撞的部份自駕車遠遠高於人類駕駛，由此可見自駕車目前與人類駕駛有很大的差距。

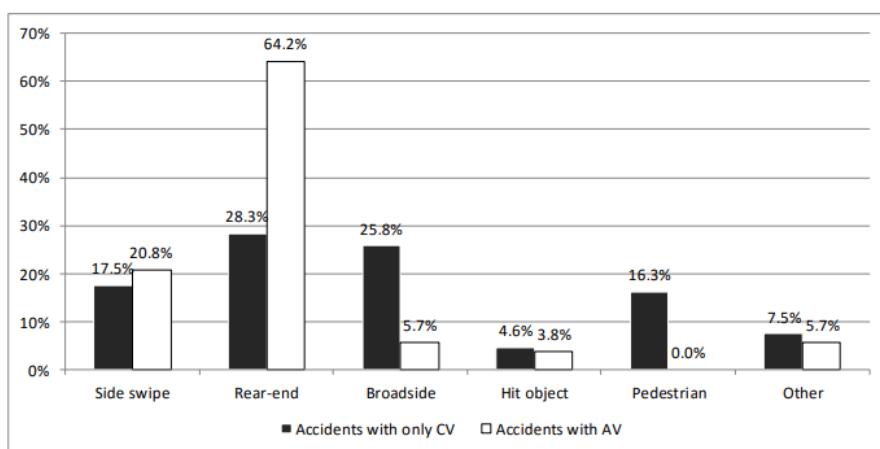


圖 1.3：自駕車與一般駕駛碰撞情況比較 [6]

Petovic 認為造成自駕車追撞佔比過高的原因推測為自動駕駛車輛駕駛行為傾向讓乘客舒適會有較低的加速度，導致較保守的駕駛行為與而人類駕駛被認為有較激進的駕駛風格，人類駕駛與自駕車駕駛行為差距導致人類駕駛對自動駕駛車輛行為難以預測導致速度控制不當產生大量追撞。

由此可見駕駛風格對於交通事故之發生具有舉足輕重的影響，保守駕駛對於避免撞擊行人及轉彎時撞擊其他車輛側面之幫助相當顯著，但駕駛間認知有落差時與之發生追撞的可能性會變高，因此為了達到減少交通事故發生之願景，對於不同交通情況應該進行駕駛風格上調整，避免不同類型之交通事故發生。

駕駛風格駕駛行為很大程度上受到駕駛對於風險的感知影響 [7]。因此本研究的目的為基於對車輛碰撞風險分析以模擬不同風格駕駛的駕駛行為，評估在不同駕駛行為下駕駛對於風險的處理風格不同對於車輛間安全的影響及碰撞風險認知之重要性。



1.3 論文架構

本論文一共分為六章，內容架構如下：

- **第一章：緒論**

說明本研究背景、研究動機及研究目的、論文架構。

- **第二章：文獻回顧**

對現有之常用碰撞風險分析方法及目前自駕車問題相關文獻整理。

- **第三章：研究方法**

介紹本研究使用風險評估及駕駛模擬方法，並介紹本研究探討之駕駛行為及環境。

- **第四章：常見駕駛行為分析**

基於碰撞風險評估及駕駛行為模型在道路中常見駕駛行為進行分析。

- **第五章：結論與未來展望**

總結本研究貢獻並探討未來可改善及延伸之研究方向。



第二章

文獻回顧

如同第一章所示駕駛風格對於駕駛行為及交通安全有很大的影響，因此將針對駕駛間如何感知風險並根據風險決策做出的駕駛行為對交通安全之影響進行探討，因此本節首先將回顧常用之碰撞風險方法及自動駕駛車輛如何處理交通中風險及其與人類駕駛思維上不同之困境。

2.1 碰撞風險分析

駕駛行為受到駕駛對於風險的感知影響，為了分析駕駛行為本節將回顧常用來評估交通中碰撞風險的方法，碰撞風險評估通常會先對所有場景內移動物體進行軌跡預測，從可能發生碰撞的軌跡進行發生碰撞可能性的評估 [8]。

2.1.1 運動學指標風險

在假設能完美感測其他車輛狀態且假設車輛在短時間內會保持相同行為的情況下，可以使用一些簡單運動學指標評估風險如時間、速度、加速度等等來評估車輛發生碰撞的風險 [9]。

TTC(Time-To-Collision) 為被大量使用的碰撞風險評估的時間指標之一，當車輛間預測軌跡中會發生碰撞就能計算出 TTC 且根據碰撞種類算法會有所不同，如下圖 2.1(a) 車輛前進方向不同時須先預測將發生碰撞之空間並透過與此空間距離除以自身速度計算出 TTC，如果為下圖 2.1(b) 或 (c) 車輛為追撞或對撞則透過當前狀態下兩車輛相對距離除以相對速度來計算出當下到發生碰撞的時間 TTC，缺點為需要有碰撞的可能性才能計算 TTC，此外有許多根據 TTC 衍生更多時間



風險指標，IVT(Inter Vehicular Time) 由兩車輛相對距離除以車輛自身速度，以避免有兩車相對距離很近但相對速度很小導致 TTC 很大但其實很危險的情況 [10]，TTR(Time-To-React) 將駕駛反應考慮進去，得到剩餘時間可以操作車輛(煞車、轉向、加速等等) 以避免車輛發生碰撞 [11]。

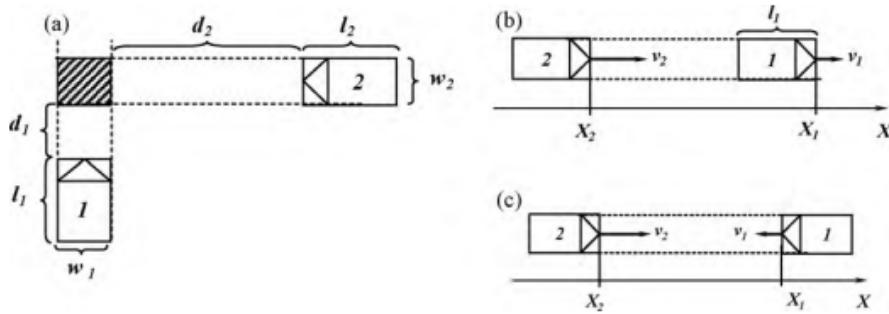


圖 2.1: TTC 示意圖 [12]

加速度指標中 Brake Threat Number(BTN) 及 Steering Threat Number(STN) 最常被使用，如下圖2.2所示車輛為了躲避眼前之紅色障礙物，可以選擇改變縱向加速度進行煞車也可以透過方向盤改變橫向加速度進行躲避，因此 BTN 為避免與其他車輛碰撞所需要施加縱向加速度除以車輛最大可施加縱向加速度，STN 為避免與其他車輛碰撞所需要施加橫向加速度除以車輛最大可施加橫向加速度 [13]，此比值大於 1 代表無法避免之碰撞，透過加速度指標可以得知躲避碰撞須改變之加速度情況以推論危險程度。

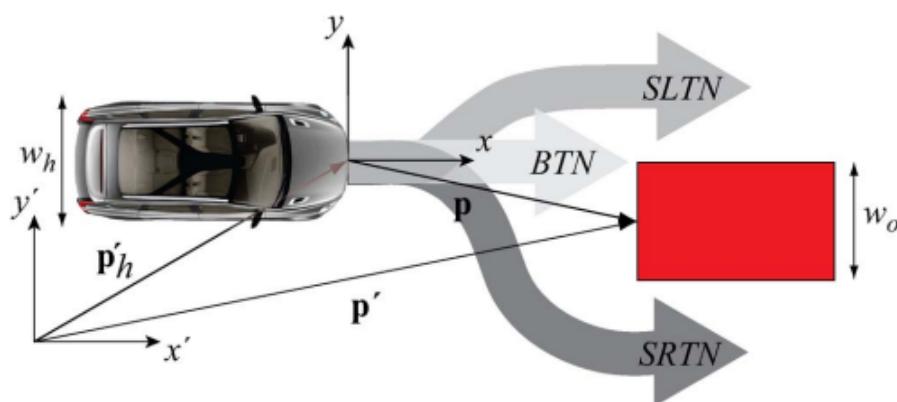


圖 2.2: BTN 及 STN 示意圖 [13]



2.1.2 力場風險

在力場風險中駕駛欲前往之目標點會產生吸引力場、障礙物給予排斥力場，透過計算得到合力場大小評估風險，力越大代表越危險，力越小代表越安全。如圖2.3所示，透過其顏色從藍色到紅色代表力場由小到大，可以看到越接近障礙物及移動或靜止車輛中心其斥力越大越遠越小，駕駛會傾向前往力場較小之位置因此可以透過總力場圖決定最後車輛前往位置，但其力的值實際並無確切代表多危險的意義，且容易有陷入區域最小值之問題。

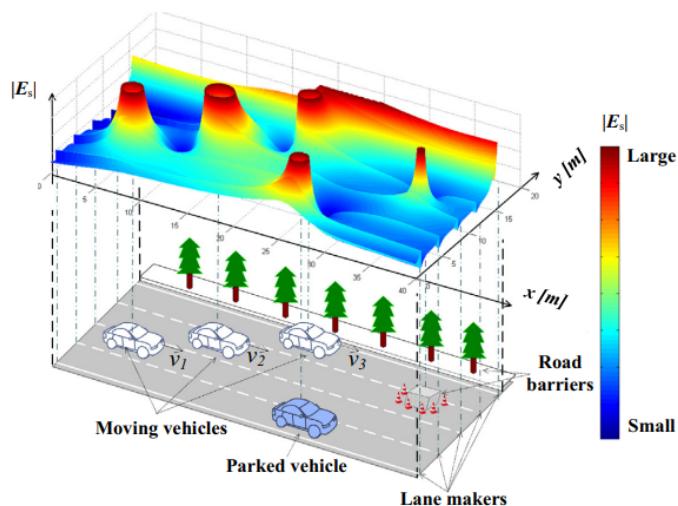


圖 2.3: 力場風險示意圖 [14]

2.1.3 機率風險

由於其他車輛行為的不確定性，駕駛很難準確預測其行為，因此常透過特定機率分佈來預測其他車輛未來軌跡後（通常使用蒙地卡羅法或高斯過程），檢測會與自身發生碰撞的軌跡後透過積分來計算出與其他車輛發生碰撞的機率，進行碰撞迴避 [14]，如下圖2.4所示，紅色車輛為自身駕駛，藍色為其他駕駛透過機率分不進行越來軌跡預測後，進到中間分析重疊導致碰撞的機率，並根據機率決定煞車與否避免碰撞發生，基於機率的碰撞風險分析能很好的考慮不確定性，但必須耗費較大的計算量導致即時性較差問題。

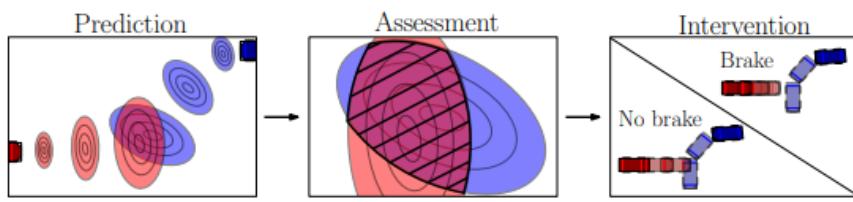
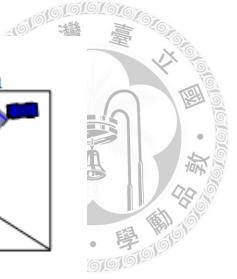


圖 2.4: 機率風險示意圖 [14]

2.2 自動駕駛技術

本小節對自動駕駛車輛如何運作進行回顧，觀察與一般駕駛思維上有沒有差異，自動駕駛技術主要由幾大部份組成 [15] 如下

- 狀態感測

車輛感測資訊可分為兩大類，自我感測及環境感測，自我感測透過預先安裝之里程計、慣性測量單元 (IMU)，陀螺儀及車輛控制器資訊得到車輛自身速度、加速度、轉向角等等資訊並使用相機、雷達、光達及聲納等等感測器對環境連續進行掃描及監測環境及其他車輛狀態，光達及聲納可以提供車輛距離相關資訊，雷達能提供距離及速度資訊。

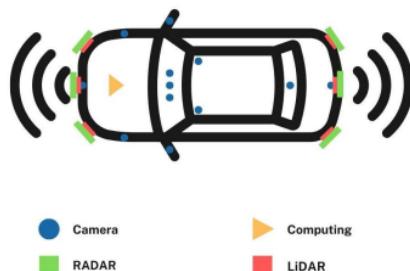


圖 2.5: 自駕車用感測器示意圖 [16]

- 定位及地圖繪製

基於感測器數據計算車輛位置並繪製環境地圖，自動駕駛車輛必須從全球範圍進行定位及從相對於其他障礙物之局部定位進行地圖繪製，全球定位通過 GPS 及 IMU 技術完成，而局部定位通常使用先驗 (priori) 或 SLAM 完成地圖繪製。

- 路徑規劃及決策

根據感測資訊及地圖定位計算車輛到目標點可能之唯一或最佳安全路徑，常



使用的有基於採樣的快速搜索隨機樹法 (RRT)，基於啟發式的 A* 演算法等等，並根據計算出的路徑、車輛當前狀態及環境資訊等等決策出最後車輛的最佳路徑。

- 車輛控制

基於最佳路徑決策計算給予車輛控制命令 (加速度、轉角、扭矩等等)，在低速時可以使用汽車運動學模型透過 PID 控制、回授線性化、模型預測控制完成車輛控制，而在較高速則需要完整動態模型包含輪胎、非線性控制、模型預測控制、前饋及反饋轉向控制器等等才能完成車輛控制 [17]。

最後自動駕駛之完整流程如圖2.6所示，透過狀態感測蒐集之環境及自身資訊進行全域及局部定位後繪製地圖，透過繪製得到之地圖進行車輛之路徑規劃及決策，最後在根據決策結果計算出給予車輛之控制命令完成自動駕駛行為，與一般駕駛思維基本上相同。

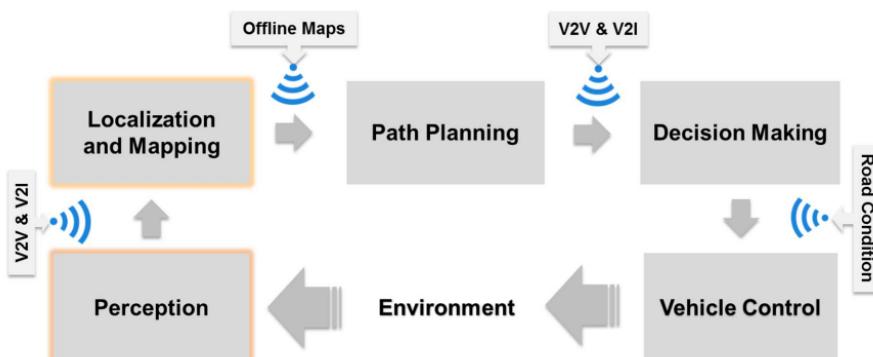


圖 2.6: 自動駕駛技術流程圖 [15]

2.3 自動駕駛挑戰

除了技術層面外，自動駕駛在交通在為了達到無道路事故之願景還須考慮許多因素及需要面臨的挑戰，因此本節將回顧自動駕駛目前面臨的挑戰。

2.3.1 駕駛風格

自駕車與人類駕駛的互動中過於保守或過於激進都會擾亂交通導致安全問題 [18]，根據 2015 至 2017 之美國加州自駕車事故結果分析中，一般駕駛追撞自駕車發生率高，原因為自動駕駛車輛偏好緩慢的加速及減速以增加乘客之舒適



度，但一般駕駛風格較為激進導致追撞發生 [6]，根據 [19] 實驗結果顯示有百分之八十的駕駛希望自駕車與自己駕駛風格相同。

駕駛風格在車輛能源管理及駕駛安全中扮演重要角色，且駕駛風格受到大量因素影響是一個複雜的概念 [20]，如圖2.7所示影響駕駛風格之因素分為環境及人類因素，環境因素包括了交通、天氣、道路狀況等，而人類因則有年齡、性別、承受風險等等，影響駕駛風格因素繁多，因此對於駕駛風格的分類以安全性或燃料經濟性進行簡單分類難以對其進行量化。

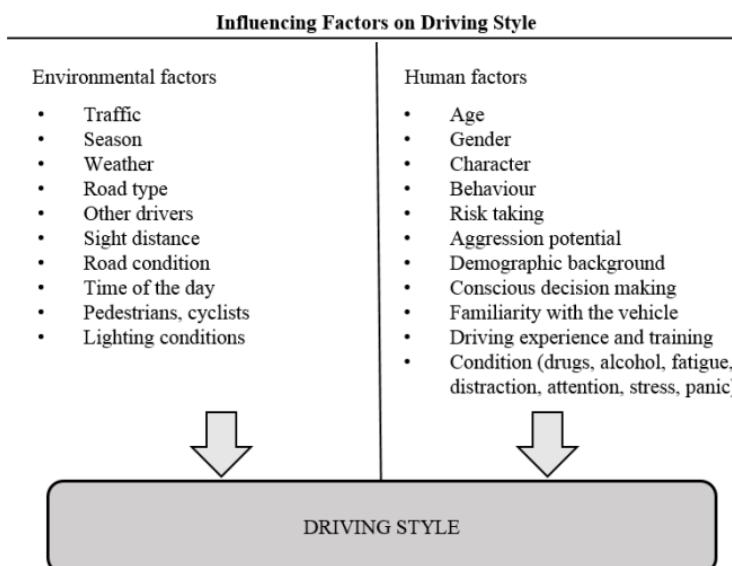


圖 2.7: 影響駕駛風格因素 [20]

2.3.2 社會行為

自動駕駛與人類駕駛除了在可接受風險的差異外，人機間信任也是一大問題也是影響人機間互動的大問題 [21]，Wagner [22] 認為信任為當信任者置於風險之中，被信任者應該以減輕信任者風險方式動作，Schwarting [23] 則認為人類會根據不同情況而選擇利己或利他主義，考量人類社會行為並使用社會價值取向 (Social Value Orientation,SVO) 分析能減少預測人類軌跡之錯誤，SVO 是透過角度量化人類選擇利己或者利他程度的指標如圖2.8中 B 部份所示。如圖2.8所示圖中 A 部份顯示駕駛想左轉並感測到一直行車輛後，在不同社會偏好下有等直行車通過後再過以及先行轉彎等不同結果，並計算不同社會偏好 SVO 整體的報酬做出最符合社會利益之結果，比起認為所有人皆會利己會更能預測人類行為。

除了道路上與一般駕駛之安全問題外，自動駕駛技術在面對網路安全上



避免駭客入侵，自動駕駛相關法律之訂定及道德問題等等都是自駕車要能達到 Level5 自動駕駛須解決問題 [24]。

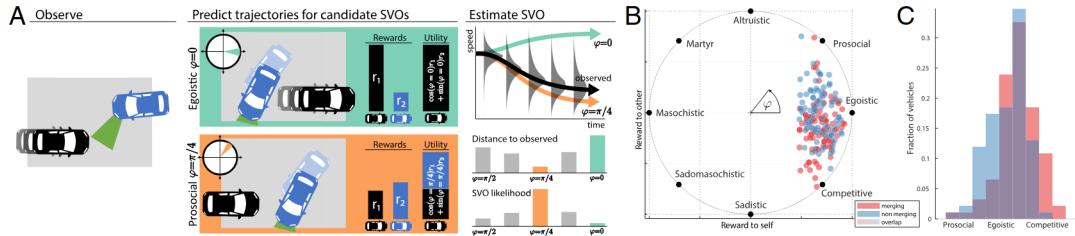


圖 2.8: 考慮 SVO 影響駕駛示意圖 [23]

2.4 小結

本章節首先從回顧了交通中碰撞風險如何以特定指標或者機率表示風險，其中運動學指標較難運用於各種道路狀況，而基於力場之風險評估的力並無實際意義，且此兩種分法對於駕駛行為之隨機性並無處理，而機率風險計算量過大難以即時性較差，各個風險方法間也沒有統一訂定之評量危險程度之標準，都是目前風險分析領域上的問題。

自駕車技術雖然有美好願景，但目前的問題還很多除了需要在感測器精度、更好的軟硬體設備、網路防護法律、及道德方面等等，與人類駕駛在駕駛風格及社會行為的不同也是必須解決的問題，然而影響駕駛風格之要素眾多，且無明確分類駕駛風格之分類難以定義，導致難以有標準量化駕駛風格，可接受風險為其中對駕駛風格最直觀且可以透過機率對風險進行描述。

本研究為了模擬道路上駕駛風格及行為對交通事故之影響，根據 2.2 之流程架設駕駛行為模型，選用了指數機率風險進行碰撞風險評估作為駕駛對於未來碰撞機率之預測，將駕駛對機率風險之可接受程度作為本研究之影響駕駛風格之因素嘗試量化駕駛風格並影響駕駛最後決策結果，分析不同駕駛行為狀況下駕駛風格會對交通帶來什麼影響。





第三章

研究方法

本研究基於駕駛對碰撞風險感知進行常見駕駛行為的分析，以比較駕駛對於不同可接受風險下在常見駕駛行為中的選擇及結果。因此本節將介紹本研究使用之風險評估方法及基於碰撞風險行駛之駕駛行為模型並介紹實驗模擬環境及流程。

3.1 研究假設與流程

駕駛除了根據風險行駛外也會被道路環境所影響，為了將本研究聚焦在車輛是因為自身可接受行為產生之結果，制定了以下假設：

- **駕駛能精準感測其他車輛狀態**

在道路中視野會影響駕駛感測能力，會因為車輛尺寸上阻擋導致無法觀察到危險發生，因此在本實驗上為了聚焦於可接受風險對於駕駛的影響，並不會給予車輛視野上阻擋且能準確感知其他車輛速度及位置。

- **車輛狀態須符合車輛模型**

車輛行為須符合腳踏車模型，車輛性能上給予加減速度及轉向上限制。

- **駕駛根據其他車輛當前狀態進行預測**

駕駛會根據其他車輛狀態進行預測，並不會因為其他車輛進行轉彎或者超車而給予其他改變朝向之預測行為。

- **駕駛碰撞迴避最佳化**

駕駛碰撞迴避最佳化在駕駛過於保守時容易會陷入無解之處境，因此在一般情況下無解之處理為緊急煞車施以最大減速度，而在無保護轉彎實驗中轉彎

車若已經進行轉彎至對向車道範圍則會給予最大加速度以加速離開路口避免危險在超車及無保護左轉實驗中會給予直行車限制不能變換車道。



本研究之流程如圖3.1所示，首先會根據欲模擬之駕駛情境設定環境及駕駛數量，並根據模擬情境給予車輛不同路線規劃及其駕駛可接受風險，完成參數設定後會進入駕駛行為模型，每個駕駛會根據當前車輛狀態後對其他車輛行為進行預測，並對其他車輛狀態進行風險評估後進行最佳化確保車輛下個時間段之風險低於駕駛之可接受風險，確保車輛在整個行駛中之行為皆能保持在可接受風險內，最佳化完成後如果車輛沒有碰撞發生或是完成指定的模擬駕駛行為，會更新所有車輛狀態並開始下個時間段的駕駛反應模型直到車輛完成其模擬行為或者有車輛發生碰撞終止模擬並進行結果分析。

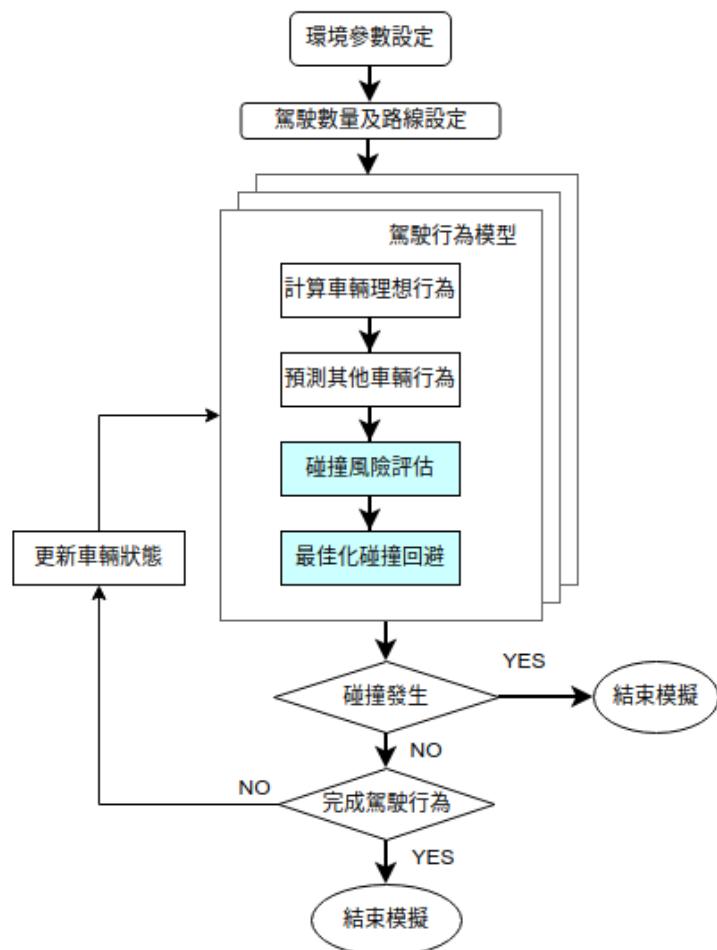


圖 3.1: 研究流程圖



3.2 模擬環境架構

本研究模擬環境為台灣一般道路，將車道寬度設為一般道路最低寬度 3 公尺 [25]，設定道路速度限制為 70 公里每小時，並根據常用來進行風險分析之駕駛行為挑選出三個進行模擬實驗，分別為道路中跟車、超車及無保護左轉三個駕駛情境 [26]，其中跟車行為模擬主要對駕駛追撞事故進行分析，而超車行為可以對車輛之擦撞及追撞行為進行分析，無保護左轉則對車輛撞擊其他車輛側面及車輛間擦撞進行分析，實際模擬環境如下。

3.2.1 跟車模擬環境

在跟車模擬實驗中模擬環境如圖 3.2 所示，使用單一車道並假設兩車輛行駛於車道中央車輛左右兩條黑線代表車道範圍， D 代表兩車輛間車距，前車將給予特定速度 V_f 行駛不會受到後車影響，後車將根據期望速度 V_b 及可接受風險最佳化計算得到後車狀態，對前車進行跟車行為，由此可以模擬後車駕駛在不同可接受風險狀況下其跟車行為及追撞發生與否。

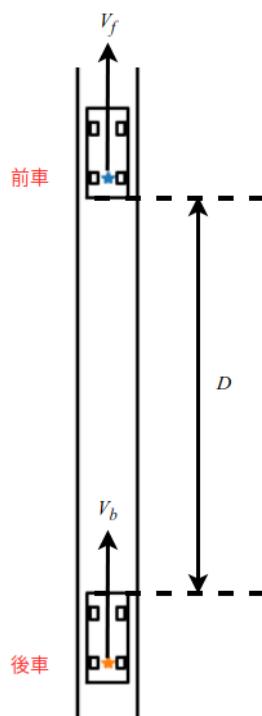


圖 3.2: 跟車模擬環境



3.2.2 超車模擬環境

在超車模擬實驗中將使用同樣行駛方向之雙車道進行如圖3.3所示，因此將其分為快車道及慢車道，中間藍色虛線為車道線，車道線至右邊黑線為慢車道，車道線至左邊黑線為快車道，在慢車道會放置兩車分別為慢車道前車及慢車道後車，慢車道前車會以一較慢固定車速 V_{sf} 行駛不會受到其他車輛影響，與慢車道後車初始之車距 D_s 為 10m，慢車道後車會以期望速度 V_{sb} 行駛，快車道內會放置三台車分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車，分別以期望車速 V_{f1} 、 V_{f2} 、 V_{f3} 行駛，並將快車道 1 車初始與慢車道前車之車頭距離設置為 5m，快車道三台車間初始車距 D_f 、速度相同並根據模擬情況設置，快車道車輛及慢車道後車皆會根據可接受風險行駛，本模擬情境可以看到慢車道後車如何因為可接受風險之影響，比較快車道風險及慢車道前車帶來之風險選擇超車或者降低速度等待快車道車輛通過在進行超車，快車道車輛則可以比較不同可接受風險下會不會有降速讓慢車道後車更安全超車之行為。

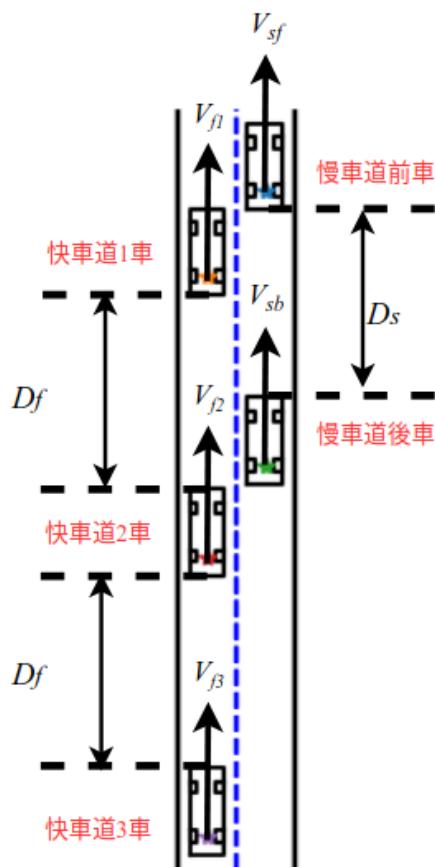


圖 3.3: 超車模擬環境



3.2.3 無保護轉彎模擬環境

在無保護轉彎實驗中將會建立完整十字路口如圖3.4所示，黃色虛線為方向限制線用以區分不同行駛方向，藍色虛線為車道線、黑色實線為車道邊界，在往圖片上方(北方)方向內側車道放置一直行左轉之轉彎車，轉彎車期望速度為 V_t 在往圖片下方(南方)方向之內側車道放置三台直行車輛分別為直行車1車、直行車2車及直行車3車，分別以偏好車速 V_{s1} 、 V_{s2} 、 V_{s3} 行駛快車道1車與轉彎車之初始車頭距離路口為5m，且所有車輛會根據可接受風險行駛，本模擬情境可以看到轉彎車如何根據風險分析直行車車距及車速決定是否轉彎，且直行車是否會因為轉彎車行為進行煞車讓轉彎車順利通過。

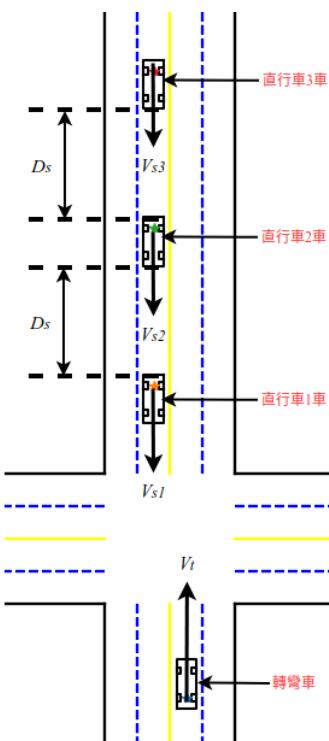


圖 3.4: 無保護左轉模擬環境

3.3 駕駛行為

不同駕駛有不同願意承擔的碰撞風險，並且會根據碰撞風險有不同的駕駛行為，並參考圖2.6之流程建立駕駛行為，駕駛在前往目的地的路徑規劃中會根據期望車速產生車輛行駛的最佳狀態，同時對所有障礙物的移動軌跡進行預測後從有可能發生碰撞障礙物進行碰撞風險的評估，並進行碰撞的迴避後決定最後的駕駛

行為，且駕駛行為也必須符合車輛模型確保符合真實車輛行為。

車輛之最佳行駛狀態及對於其他車輛之預測基本如圖3.5所示，藍色車輛為對自身車輛現在行駛狀態，淺藍色車輛最佳狀態 S_{opt} 為假設車輛在沒車時以行駛速度 V_{opt} 朝目標行駛時下時間段應該之狀態如淺藍色車輛所示，而對其他車輛之預測，是基於其他車輛現在狀態 O_t (粉紅色車輛)假設其會以原來速度 v_o 行駛及原本朝向預測其前進至 O_{t+dt} 狀態(淺粉色)，在根據預測進行風險分析及車輛碰撞迴避。

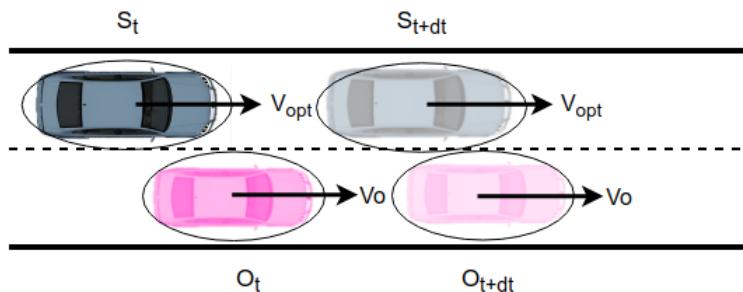


圖 3.5: 預測車輛行為

3.3.1 車輛模型

本研究使用的車輛模型為常用的自行車模型 (Kinematic Bicycle Model)，自行車模型是假設車輛偏滑角 (slip angle) 為零，代表輪胎軸線方向與輪胎前進的方向相同，並將兩前輪及兩後輪分別簡化為一顆輪子且置於車寬中心後根據前後軸距連接如圖3.6所示，將車輛座標 x 、 y 設置在簡化過後的後輪位置，車輛速度及朝向為後輪速度 v 及後輪朝向 θ ，在車輛轉彎時前輪會施加前輪轉角 δ ，透過垂直兩車輪延伸線可以找到車輛瞬時迴轉中心位置 (ICR) 並找到車輛迴轉半徑，且此時兩延伸線夾角與車輛前輪轉角相同，因此透過三角函數可以知道前輪轉角的 δ 及前後輪距 L 情況下，透過 L 除以迴轉半徑 R 為 $\tan \delta$ 推測出迴轉半徑角加速度就可以透過車輛切線速度平方除以轉彎半徑計算得到。

因此透過自行車模型可以將車輛狀態設為矩陣 s_t 如式3.1由車輛座標 x 、 y 及速度 v 、朝向 θ 組成，車輛控制命令設為矩陣 u_t 由前輪轉角 δ 及車輛加速度 a 組成如式3.2，以及對車輛狀態的微分 \dot{s}_t 如式3.3，因此車輛下個時間段的狀態 $s_{t+dt} = s_t + \dot{s}_t dt$ ，透過對當前車輛狀態及車輛控制命令推出下一時間段的車輛狀態。

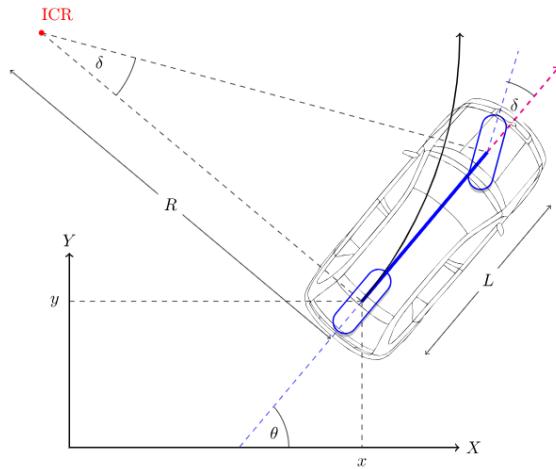


圖 3.6: 腳踏車模型 [27]

$$s_t = \begin{bmatrix} x & y & v & \theta \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

$$u_t = \begin{bmatrix} a & \delta \end{bmatrix}^T \quad (3.2)$$

$$\dot{s}_t = \begin{bmatrix} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{v} = a \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan \delta}{L} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.4 碰撞風險分析

本研究希望能模擬一般駕駛如何分析碰撞風險，因此選用更符合駕駛心理的指數機率分佈而非事件發生可能性的常態分佈進行碰撞風險分析，本節將介紹指數分佈模型如何透過其他車輛與自身車輛的位置及距離計算碰撞風險及其問題。

3.4.1 指數機率碰撞風險分析

根據行人動力學的社會力模型，可以將影響用路人行為之因素分為三種 [28] 如下：

- 到達目的地的吸引力
用路人會希望用最短路徑到達目的地。



- 其他用路人吸引力

路人可能被其他用路人行為或者其他物件吸引產生吸引力。

- 其他用路人排斥力

用路人會希望與其他用路人保持一定距離而產生排斥力，通常與用路人密度及速度有關。

Cheng [29] 以兩個半橢圓建立車輛碰撞邊界，並把社會力模型中用路人間排斥力的指數假設擴展運用建立車輛指數碰撞風險機率。

車輛碰撞邊界如圖3.7所示，由整台車輛長 l 、寬 w ，假設駕駛位於車寬正中間且與車頭距離與整個車長的比值為 γ ，由 γl 為長軸 $\frac{1}{2}w$ 為短軸產生車頭部份半橢圓及以 $(1 - \gamma)l$ 為長軸 $\frac{1}{2}w$ 為短軸產生車尾部份半橢圓，合併兩個橢圓形成駕駛認為的碰撞邊界。

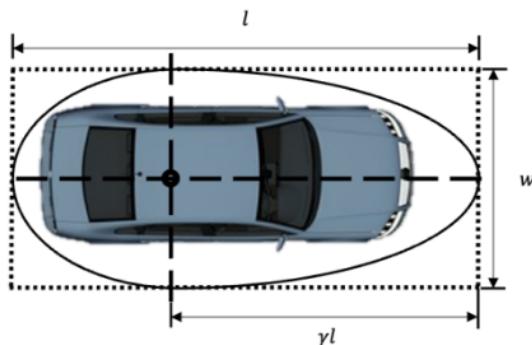


圖 3.7: 車輛碰撞邊界 [29]

鐘 [30] 將 Cheng 的概念從車輛對行人的碰撞延伸至兩車輛間的碰撞風險分析，如圖3.8所示，將兩車輛駕駛中心位置相連後產生距離 d 、與自身車輛朝向夾角 θ_s 、與其他車輛朝向夾角 θ_o ，並透過橢圓座標公式得到車輛在此夾角的半徑長度 r_s 、 r_o 如式3.4所示。

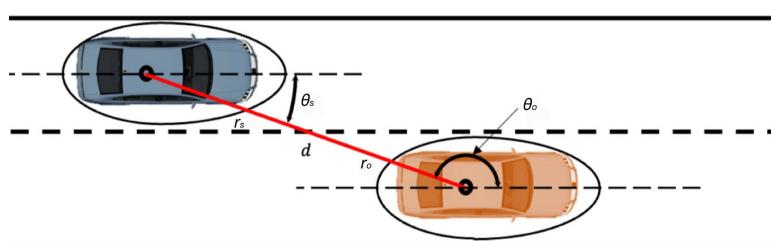
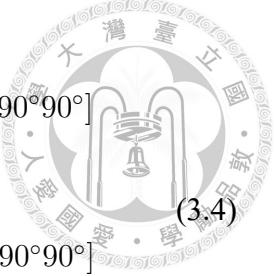


圖 3.8: 指數分佈模型 [30]



$$r_s = \begin{cases} \sqrt{(\gamma * l)^2 (\cos \theta_s)^2 + (\frac{1}{2}w)^2 (\sin \theta_s)^2} & \theta_s \in [-90^\circ, 90^\circ] \\ \sqrt{[(1 - \gamma) * l]^2 (\cos \theta_s)^2 + (\frac{1}{2}w)^2 (\sin \theta_s)^2} & \text{else} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$r_o = \begin{cases} \sqrt{(\gamma * l)^2 (\cos \theta_o)^2 + (\frac{1}{2}w)^2 (\sin \theta_o)^2} & \theta_o \in [-90^\circ, 90^\circ] \\ \sqrt{[(1 - \gamma) * l]^2 (\cos \theta_o)^2 + (\frac{1}{2}w)^2 (\sin \theta_o)^2} & \text{else} \end{cases}$$

以中心連線距離 d 減掉兩車輛碰撞半徑 r_s 、 r_o 後可以得到駕駛觀察的車輛間距，駕駛觀察的車輛間距乘上指數分佈參數 λ 後與碰撞機率風險呈指數關係 [29]，最終可以得到車輛的碰撞機率風險如式3.5所示。

$$p(d) = \begin{cases} e^{-\lambda(d - r_s - r_o)} & \text{if } d - r_s - r_o > 0 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.4.2 駕駛風險感知

透過指數機率的碰撞風險分析在相同的指數分佈參數 λ 中，不論其他車輛位置與車輛朝向夾角，只要車輛間距離相同發生碰撞的機率皆相同，這並不符合一般駕駛的風險感知，駕駛對於車輛前進方向上發生碰撞的機率在相同距離下相較於車輛側邊較高，因此駕駛對於行駛方向的風險感知需要較為敏感，從較遠距離就需要感知到碰撞機率風險。

因此本研究會根據車輛位置設置不同的指數分佈參數 λ ，在車輛朝向設置為 λ_{long} 在車輛側邊設置為車輛側向 λ_{lat} ，以反應駕駛在相同可接受風險的情況下對於車輛不同位置的風險感知，當設定駕駛有一可接受風險 $p_{acceptable}$ 就可以透過方程式3.5反推後得到駕駛對縱向之安全距離 D_{long} 及對橫向之安全距離 D_{lat} 如式3.6及式3.7所示。

$$D_{long} = \ln(p_{acceptable}) / -\lambda_{long} \quad \theta_s = 0 \quad (3.6)$$

$$D_{lat} = \ln(p_{acceptable}) / -\lambda_{lat} \quad \theta_s = 90^\circ \text{ or } -90^\circ \quad (3.7)$$

調整後結果會如圖3.9所示，藍色為 Cheng [29] 的車輛碰撞邊界，橘色為未調整過 λ 為固定為 λ_{lat} 結果，而綠色為將車輛朝向的參數設置為 λ_{long} 後在相同可接受風險下的差異，可以看到駕駛會對車輛速度朝向在較遠距離就感受到風險。

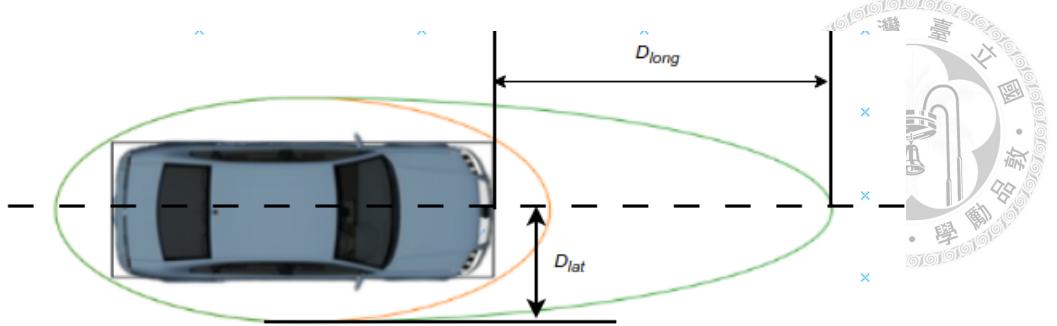


圖 3.9: 根據敏感度變更指數分佈

3.5 最佳化碰撞迴避

駕駛會根據當前車輛狀態並對其他車輛預測後改變當前輸入控制命令，確保下時間段不會與其他車輛發生碰撞且與駕駛想要的路徑相差不會太大，因此本研究將駕駛碰撞迴避行為定為最佳化問題如下：

$$\begin{aligned}
 \min_{u_t} \quad & \sum_{i=1}^4 [s_{t+dt}(i) - s_{opt}(i)]^2 \\
 \text{s.t.} \quad & s_{t+dt} = s_t + \dot{s}_t dt \\
 & p(s_{t+dt}) \leq p_{acceptable} \quad \text{if } 1 > p_{acceptable} > 0 \\
 & v \leq v_{max} \\
 & |a| \leq a_{max} \\
 & |\delta| \leq \delta_{max}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

其中 s_{opt} 為車輛在一般無其他車輛情況下最佳的行駛路徑狀態， s_{t+dt} 為車輛下時間段狀態，透過將每一個狀態矩陣內的元素相減平方後找到與最佳狀態相差最小的車輛下時間段狀態， s_t 及 \dot{s}_t 為車輛當前狀態及微分，透過此限制確保車輛行為符合腳踏車模型， $p(s_{t+dt})$ 為車輛下時間段的碰撞機率， $p_{acceptable}$ 為此駕駛的可接受碰撞風險，確保車輛下個時間段之風險低於駕駛之可接受風險， v_{max} 為車速限制、 a_{max} 為車輛加減速度限制、 δ_{max} 為前輪轉角限制，這幾項會給予車輛性能上的限制。

結果如下圖3.8所示，若最佳化狀態 s_{opt} 與其他車輛會依照當前速度及朝向行駛預測其下時間段位置 O_{t+1} 發生碰撞或超出可接受風險時，透過最佳化能確保車輛會在符合自行車模型情況下滿足車輛前輪轉角、速度及加速度性能上的限制，根據指數分佈模型的公式確保下時間段車輛受到的風險低於駕駛的可接受風險，



得到與最佳駕駛行為相差最小的車輛狀態如下圖之 s_{t+1} ，就能看根據最佳化不同可接受風險自己決定要超車或轉彎之時機。

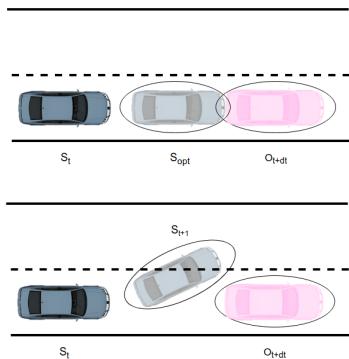


圖 3.10: 最佳化碰撞迴避

3.5.1 參數影響

側向風險

指數分佈模型之最安全位置為車輛側邊，但超車時由於有車道限制的存在，在不同可接受風險的超車路徑為下圖3.11所示，藍色為可接受風險 0.01、橘色為 0.03、綠色為 0.05 可以看到黃色線為車道邊界，在可接受風險為 0.01 時車身會落在車道外面，未防止這種狀況車輛會給予車道限制，但會導致過保守之風險會無解，而無解時會施加最大減速度導致車輛不會超過去擋住路口，為避免此狀況超車時不會選擇過低可接受風險。

直行車轉角

由於指數分佈基於障礙物位置與朝向夾角 θ_o 感受風險，透過圖3.9及公式3.4都能看到朝向對風險分析影響，所以為了避免下圖3.12之狀況發生，此圖描述了由於慢車道超車使快車道車輛風險過大，而最佳化可接受風險時透過改變朝向 θ_o 使得車輛距離因此能增加，所以在直行超車實驗之工況時會給予快車道車輛夾角限制在 85 到 95 度之間，防止不選擇降低速度而過度左右擺盪躲避風險的非一般駕駛行為出現。

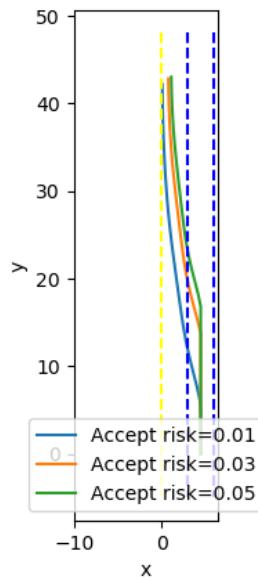


圖 3.11: 側向風險影響 (超車)

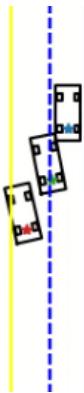


圖 3.12: 轉向限制原因

3.6 模擬方法

本研究於 python 環境中進行模擬，並使用 python 之 `scipy.optimize` 套件完成最優化，預設使用的最優化演算法為序列最小二次規劃法 (Sequential Least Squares Programming ,SLSQP)，優點為可以處理非線性目標函數及約束，缺點為計算成本較高且可能有陷入局部最優解的問題，將車輛的指數分佈參數 λ_{long} 設定為 0.75、 λ_{lat} 設定為 6，車輛的最大加減速度 a_{max} 設定為 $\pm 4(m/s^2)$ ，最大車輛前輪轉角 δ_{max} 設定為 ± 30 度，並以 0.1s 為設定一時間段，在完成指定駕駛行為或者車輛間產生碰撞會終止程式運行，若還未達到終止條件則會持續運行。

整個研究之程式邏輯類似但會根據駕駛行為不同有些許不同，如以下跟車行為虛擬碼如 Algorithm1 所示，跟車行為的模擬終止條件 *End Time* 為車輛間發生碰撞或者達到設定的終止時間，在前車定速工況為 10s、前車變速工況為一個週期 $T(s)$ ，當未達到終止條件則繼續進入迴圈，迴圈內每一台車輛首先會計算根據車輛當前狀態 S_t^i 計算自身車輛的最佳行駛狀態 S_{opt}^i ，如果為前車則最佳行駛狀態 S_{opt}^i 即為下時間段狀態 $S_{t+0.1}^i$ ，如果為後方車輛會對其他車輛狀態 O_t 進行下時間段預測 $O_{t+0.1}$ 如 3.3 節一開始所介紹， O_t 在程式內為刪除狀態矩陣內自身車輛部份為其他車輛狀態，之後透過 3.4 節的指數機率模型進行車輛風險之評估 $Risk_{t+0.1}^i$ ，最後根據 3.5 的最佳化碰撞迴避計算出車輛下時間段狀態確保風險小於可接受風險並與最佳狀態相差最小，在跟車的工況中後車最佳化會加入 x constraint 限制車輛只能行駛在車道中間不能進行超車只能控制加減速度進行跟車，如果未達終止條件進入下個時間段並更新車輛動態。

Algorithm 1 Pseudocode of car following

```

End Time ← Setting time or Vehicles collision
t ← Simulation Time , initial is 0
N ← Vehicles Number
St ← Vehicles State
Sopt ← Vehicles optimal State
Ot ← Other cars State
Riskt ← Exponential collision risk

while t ≠ End Time do
  for i = 1 to N do
    Sopti ← Calcualte By Sti
    if i = The car in front then
      St+0.1i ← Sopti
    else
      Ot ← Calcualte By St delete ith car
      Ot+0.1 ← Calcualte By Predict Ot
      Riskt+0.1i ← Calcualte By Obstaclet+0.1
      St+0.1i ← Calcualte By Riskt+0.1i and Sopti optimization with x constraint
    end if
  end for
  t ← t + 0.1
  St ← St+0.1
end while
  
```

超車行為虛擬碼如 Algorithm2 所示，模擬的終止條件 *End Time* 為發生碰撞或者慢車道後車超過慢車道前車頭 5 公尺終止模擬，一樣會先計算自身車輛的最佳行駛狀態 S_{opt}^i ，如果是慢車道前車（第一個 if）則最佳行駛狀態 S_{opt} 即為下時間段狀態 $S_{t+0.1}$ ，慢車道後車及快車道車輛一樣會先對其他車輛當前狀態 O_t 進行下時間段預測 $O_{t+0.1}$ ，之後透過指數機率模型進行車輛風險之評估 $Risk_{t+0.1}$ ，最後根據最佳化碰撞迴避計算出車輛下時間段狀態，如果為快車道車輛（第二個 if）最佳化時會多加入車道限制 *lane constraint* 如 3.5.1 小節所提到，給予快車道車輛座標必須位於快車道內且朝向為 85 至 95 度，以避免直行車不降低速度而左右搖擺，如果未達終止條件進入下個時間段並更新車輛動態。

Algorithm 2 Pseudocode of car passing

```

End Time ← Vehicles collision or passing slow lane's front car
t ← Simulation Time , initial is 0
N ← Vehicles Number
St ← Vehicles State
Sopt ← Vehicles optimal State
Ot ← Other cars State
Riskt ← Exponential collision risk

while t ≠ End Time do
  for i = 1 to N do
    if i = The car in front in the slow lane then
       $S_{t+0.1}^i \leftarrow S_{opt}^i$ 
    else
       $S_{opt}^i \leftarrow Calcualte\ By\ S_t^i$ 
       $O_t \leftarrow Calcualte\ By\ S_t\ delete\ ith\ car$ 
       $O_{t+0.1} \leftarrow Calcualte\ By\ Predict\ O_t$ 
       $Risk_{t+0.1}^i \leftarrow Calcualte\ By\ Obstacle_{t+0.1}$ 
      if i = The car started in the passing lane then
         $S_{t+0.1}^i \leftarrow Calcualte\ By\ Risk_{t+0.1}^i\ and\ S_{opt}^i\ optimization\ add\ lane\ constraint$ 
      else
         $S_{t+0.1}^i \leftarrow Calcualte\ By\ Risk_{t+0.1}^i\ and\ S_{opt}^i\ optimization$ 
      end if
    end if
  end for
  t ← t + 0.1
  St ← St+0.1
end while
  
```

無保護左轉虛擬碼如 Algorithm3 所示，模擬的終止條件 *End Time* 為發生碰撞或者轉彎車輛成功轉彎後遠離路口 10 公尺為轉彎結束，無保護左轉所有車輛一樣會先對計算自身車輛 S_t^i 的最佳行駛狀態 S_{opt}^i ，接下來對其他車輛狀態進行下時間段預測 $O_{t+0.1}$ ，之後透過的指數機率模型進行車輛風險之評估 $Risk_{t+0.1}$ ，最後根據最佳化碰撞迴避計算出車輛下時間段狀態，如果為直行車輛最佳化時會多加入車道限制 *lane constraint* 如 3.5.1 所提到，給予直行車輛座標必須位於快車道內且朝向為 85 至 95 度，以避免直行車不降低速度而左右搖擺，如果為轉彎車輛為避免往慢車道大幅向右躲避直行車碰撞所以給了朝向上的限制 θ *constraint* 為 85 到 185 度避免其往右轉一圈再進行轉彎，如果未達終止條件進入下個時間段並更新車輛動態。

Algorithm 3 Pseudocode of non-protect left turn

```

End Time ← Finish turning or Vehicles collision
t ← Simulation Time , initial is 0
N ← Vehicles Number
St ← Vehicles State
Sopt ← Vehicles optimal State
Ot ← Other cars State
Riskt ← Exponential collision risk

while t ≠ End Time do
  for i = 1 to N do
    Sopti ← Calcualte By Sti
    St+0.1i ← Sopti
    Ot ← Calcualte By St delete ith car
    Ot+0.1 ← Calcualte By Predict Ot
    Riskt+0.1i ← Calcualte By Obstaclet+0.1
    if i = The car is straight car then
      St+0.1i ← Calcualte By Riskti and Sopti optimization add lane constraint
    else
      St+0.1i ← Calcualte By Riskti and Sopti optimization add  $\theta$  constraint
    end if
  end for
  t ← t + 0.1
  St ← St+0.1
end while
  
```





第四章

常見駕駛行為分析

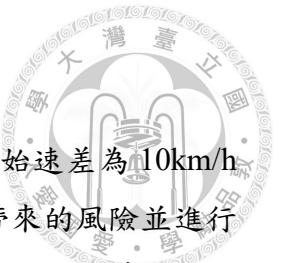
本研究從常見的駕駛行為挑選出三種進行駕駛行為分析，跟車行為分析可以確認指數分佈機率模型能否安全感知前車風險以及應變與預測誤差較大時的能力，超車行為及無保護路口轉彎行為能分析有無風險及風險高低對駕駛間行為的影響。

4.1 跟車行為分析

本節會進行兩部份的跟車行為分析，第一部份會讓前車以定速進行行駛，後車會依照其可接受風險進行跟車，透過不同速度差及可接受風險分析在跟車情況下指數分佈模型感知風險能力，第二部份會讓前車以特定速度變化行駛，分析車輛對於預測其他車輛狀態錯誤時對指數分佈模型的影響，最後會進行三台車的跟車行為確認過保守行為是否會導致後車較激進時追撞前車。每次實驗後如果沒有碰撞的發生會對後車之平均速度、與前車之平均及最短車距、後車感知平均風險進行評估，如有碰撞發生則對碰撞時兩車之速差及碰撞發生時間進行評估，並產出各個模擬工況下兩車之車速及車距對時間作圖。

4.1.1 前車定速行為

在前車定速分析部份會將前車設定為定速 40km/h，初始車距設定為 10 公尺，後車將依照偏好速度 50、60、70km/h 進行跟車，駕駛的可接受風險分別設定為 0.1、0.05 及、0.01，終止模擬的條件為碰撞發生或者模擬時間到達 10s。



後車偏好速度 50km/h

將後車偏好速度及初速度設置為 50km/h 可以觀察到兩車初始速差為 10km/h 之結果，這三種可接受情況下後車皆能即時感知前車速度較低帶來的風險並進行即時減速度避免碰撞發生完後進行跟車，其駕駛數據如表 4.1 所示，可以看到不同可接受風險情況下後車平均速度及跟前車平均、最短車距，當可接受風險越高，駕駛與前車的平均車距及最短車距明顯越小，駕駛的平均車速越快感受到風險也越高。

表 4.1: 後車偏好速度 50km/h 實驗結果

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.1	11.59577	5.69104	4.91256	0.01686
0.05	11.50335	6.48238	5.98	0.00862
0.01	11.28876	8.39783	8.01179	0.00187

根據圖 4.1 從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05 及、0.01，上方的圖 x 軸為時間 (s)、y 軸為前後車之車距 (m)，下方的圖為 V-T 圖 x 軸為時間 (s)、y 軸為車速 (m/s)，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度，可以看到在此工況下三種可接受風險後車的速度及車距變化有差不多的趨勢，而駕駛可接受風險越低駕駛越早進行減速度以避免車輛未來超過可接受風險且越快能與前車保持相同車速及維持固定車距。

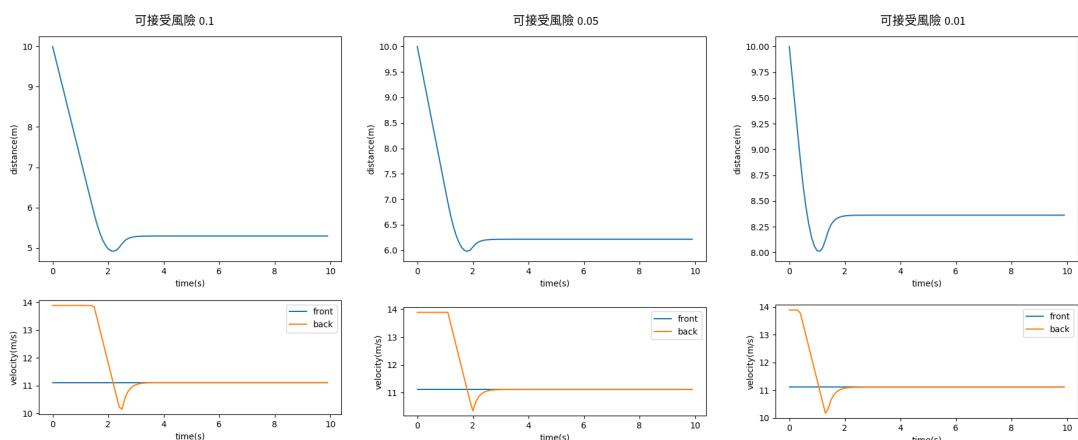


圖 4.1: 後車偏好速度 50km/h 實驗結果



後車偏好速度 60km/h

後車偏好速度及初速度設置為 60km/h 之結果與 50km/h 一樣，這在三種可接受情況下後車皆能即時感知前車速度較低帶來的風險並進行即時減速度避免碰撞發生完後進行跟車，整體如表4.2所示，透過此表可以看到在不同可接受風險下情況下後車平均速度及跟前車平均、最短車距數據可以看到整體趨勢與後車偏好速度設為 50km/h 有類似的結果，當可接受風險越高，駕駛與前車的平均車距及最短車距明顯越小，駕駛的平均車速越快感受到風險也越高，但是最短車距有明顯的變短，代表距離碰撞發生越來越近。

表 4.2: 後車偏好速度 60km/h 實驗結果

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.1	11.60966	5.21830	2.80889	0.02930
0.05	11.51724	6.09332	3.92000	0.01378
0.01	11.30264	8.08329	5.75554	0.00318

圖4.2從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05 及、0.01，上方的圖 x 軸為時間 (s)、y 軸為前後車之車距 (m)，下方的圖為 V-T 圖，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度，從下方 V-T 圖可以看到在此工況下不同可接受風險趨勢類似，可接受風險越大越遠開始進行煞車減速，可接受風險較大為 0.1 多了一次減速過頭在加速的行為才完成跟車。

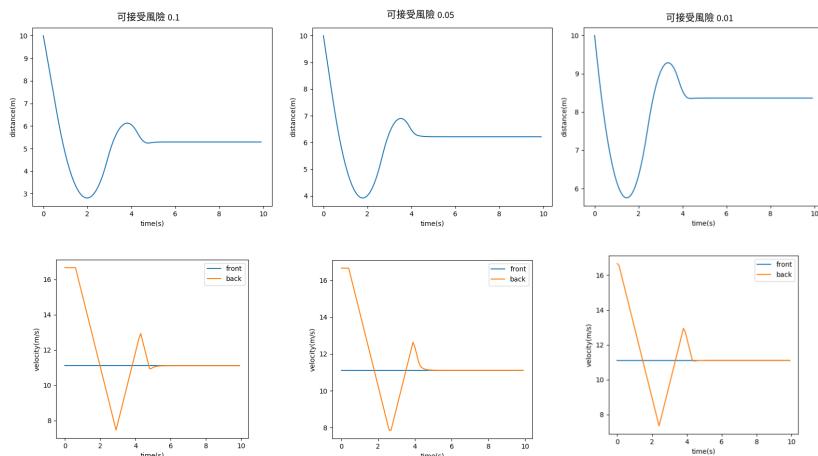
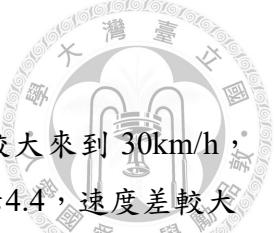


圖 4.2: 後車偏好速度 60km/h 實驗結果



後車偏好速度 70km/h

後車偏好速度及初速度設置為 70km/h 時此時與前車速差較大來到 30km/h，在可接受風險較高時開始有了碰撞的情況，結果如表4.3及表所示4.4，速度差較大的情況下可接受風險較高時後車會由於感知到危險較晚導致追撞到前車，且可接受風險越大碰撞時車輛將車速差越大導致更嚴重的碰撞產生，而當駕駛較保守時可以避免碰撞發生。

表 4.3: 後車偏好速度 70km/h 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	平均速度 (m/s)	碰撞速差 (m/s)	碰撞時間 (t)	平均風險
0.1	17.30327	2.73333	1.7	0.20991
0.05	16.58129	1.53333	1.9	0.22350

從圖4.3可以看到在不同可接受風險 0.1、0.05 及、0.01 時，上方為車距對時間作圖下方為車輛 V-T 圖，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度，可以看到可接受風險越高越晚開始煞車，導致煞車不及撞上前車而雖然可接受風險 0.05 時能成功跟車但其實進行相當長時間煞車並降低速度後才重新加速回到可接受風險的車距，速度變化相當大並非舒適的駕駛行為。

表 4.4: 後車偏好速度 70km/h 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.01	11.31645	7.09331	1.32000	0.05481

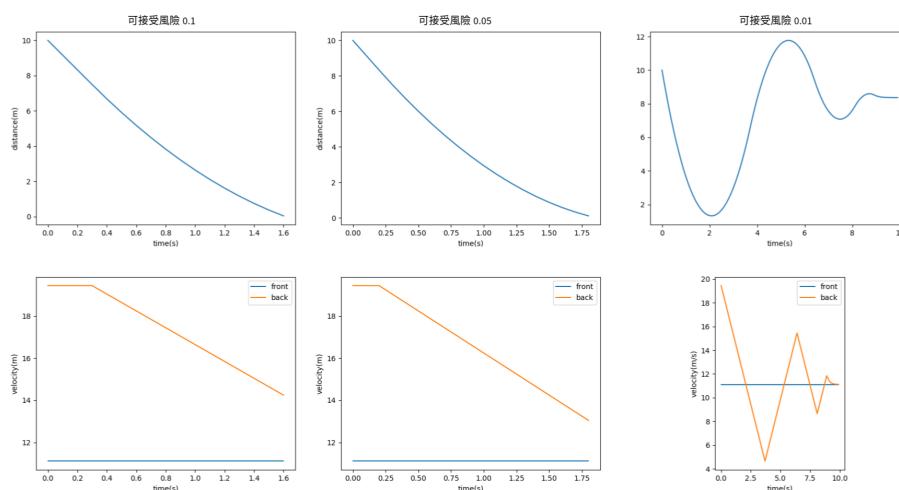


圖 4.3: 後車偏好速度 70km/h 實驗結果



4.1.2 前車變速行為

在前車變速分析部份前車將會以速度 $v = 45 + 20 \sin(\frac{2\pi t}{T}) \text{km/h}$ [31]，後車將會以偏好速度 65km/h 進行跟車，初始車距設定為 10 公尺，此部份主要分析車速與預測落差之結果，因此為了避免車輛一開始因車速差過大導致車輛碰撞會讓前車依照 $v = 45 + 20 \sin(\frac{2\pi t}{T} + \frac{T}{2})$ 行駛，並透過改變週期 T 產生不同變化急遽程度並進行跟車模擬，改變的週期為 36、24、12s，結束模擬條件為發生碰撞或者完成一個週期之跟車行為。

週期 T 為 36s

在前車週期 T 為 36s 的情況下前車最大加速度為 0.96962m/s ，前車實際行為與駕駛預測行為相差較小，所有車輛皆成功完成跟車，結果如表4.5所示可以看到不同可接受風險情況下後車平均速度及跟前車平均、最短車距，當可接受風險越大平均車距及最短車距會較小平均車速會越快。

表 4.5: 前車週期 T 為 36s 實驗結果

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.1	12.69249	3.93481	1.73178	0.09076
0.05	12.66682	4.72966	3.00332	0.04387
0.01	12.60721	6.53970	5.48658	0.00903

駕駛行為如圖4.4所示，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05 及、0.01，上方的圖 x 軸為時間 (s)、y 軸為前後車之車距 (m)，下方的圖為 V-T 圖 x 軸為時間 (s)、y 軸為車速 (m/s)，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度，可以看到可接受風險越大越晚開始減速，由於前車行為與預測相差不大所以在三種可接受風險中，車輛在降速後只須幾次速度震盪皆可在差不多時間開始完美跟車。

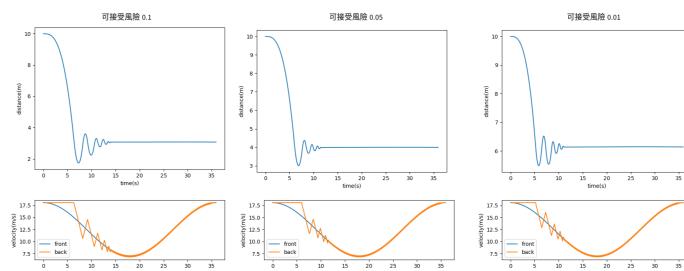


圖 4.4: 前車週期 T 為 36s 實驗結果



週期 T 為 24s

在前車週期 T 為 24s 的情況下前車最大加速度為 1.45444m/s^2 ，在不同可接受風險下皆成功完成跟車，結果如表4.6，可以看到不同可接受風險情況下後車平均速度及跟前車平均及最短車距，當可接受風險越大平均車距及最短車距會較小平均車速會越快雖然在所有可接受風險皆成功完成跟車，但在可接受風險為 0.1 時與前車最短距離為 0.0479 公尺差點就有碰撞的情況發生代表此可接受風險之安全距離不太夠。

表 4.6: 前車週期 T 為 24s 實驗結果

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.1	12.78871	3.89891	0.04790	0.14026
0.05	12.75022	4.71106	1.80723	0.05439
0.01	12.66081	6.50165	4.71971	0.01027

駕駛行為如圖4.5所示，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05 及、0.01，上方為車距對時間作圖下方為車輛 V-T 圖，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度後車需要多次較長時間煞車及加速才能完給跟著前車，可以看到可接受風險越大越晚開始減速，可接受風險適中的 0.05 反而比起可接受風險 0.1 或 0.01 更快能與前車速度曲線重合進行跟車。

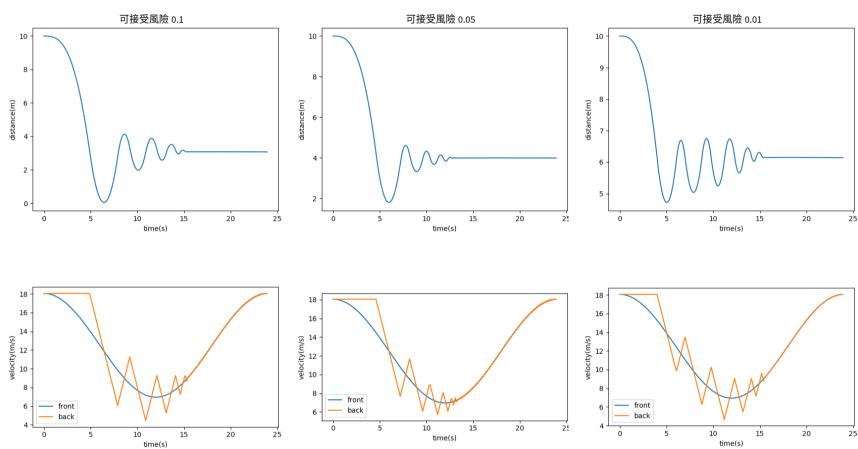


圖 4.5: 前車週期 T 為 24s 實驗結果



週期 T 為 12s

在前車週期 T 為 12s 的情況下前車最大加速度為 2.90887963m/s^2 ，前車行為變化較為急遽且與後車預測相差較大，只有在駕駛較為保守可接受風險為 0.01 時車輛沒有發生碰撞，在此情況中跟車結果如表 4.7 及表 4.8 所示，可以看到不同可接受風險情況下後車平均速度及跟前車平均及最短車距，可接受風險 0.1 及 0.05 都追撞了前車但可接受風險越大越早發生碰撞碰撞時後車速度也越高較為危險。

表 4.7: 後前車週期 T 為 12s 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	平均速度 (m/s)	碰撞速差 (m/s)	碰撞時間 (t)	平均風險
0.1	17.83450	5.015203573	3.8	0.07583
0.05	17.59402	4.077724999	3.9	0.07688

表 4.8: 前車週期 T 為 12s 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	平均速度 (m/s)	平均車距 (m)	最短車距 (m)	平均風險
0.01	11.60222	9.53378	0.00363	0.14826

過程如圖 4.6 所示，在不同可接受風險 0.1、0.05 及 0.01 時，上方為車距對時間作圖下方為車輛 V-T 圖，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為後車速度，在可接受風險 0.01 時經過了長時間的急煞車後幾乎快要至停止避免了與預測差距較大之前車減速行為發生追撞，可接受風險較高為 0.1 或 0.05 時皆太晚感知碰撞風險進行煞車導致碰撞的發生。

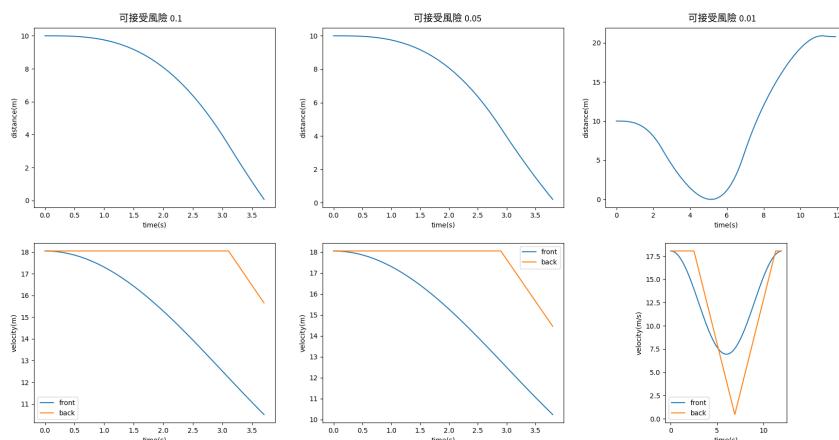


圖 4.6: 前車週期 T 為 12s 實驗結果



4.1.3 三車跟車行為

在前車變速之跟車實驗中前車週期 T 為 36s 時不論可接受風險設為 0.1~0.05、0.01 都能完成的跟車，在後方多加入第三台車進行跟車時，第三台車以可接受風險 0.1 進行跟車中間車分別以可接受風險 0.01 及 0.05 進行三車跟車實驗，速度與時間關係如圖4.7所示 x 軸為時間 (s)、y 軸為車速 (m/s)，V-T 圖中藍色為前車速度，橘色為中間車速度，綠色為後車速度，雖然在只有兩車時 0.01 及 0.05 皆能完成跟車，但在加入的後方車可接受風險較高情況下，中間駕駛在可接受風險 0.05 時反而不會發生碰撞在可接受風險較保守為 0.01 時會發生碰撞，因此比起追求自身安全選擇較保守策略，需要考慮與其他車輛可接受風險，彼此間相差較小反而能避免碰撞發生。

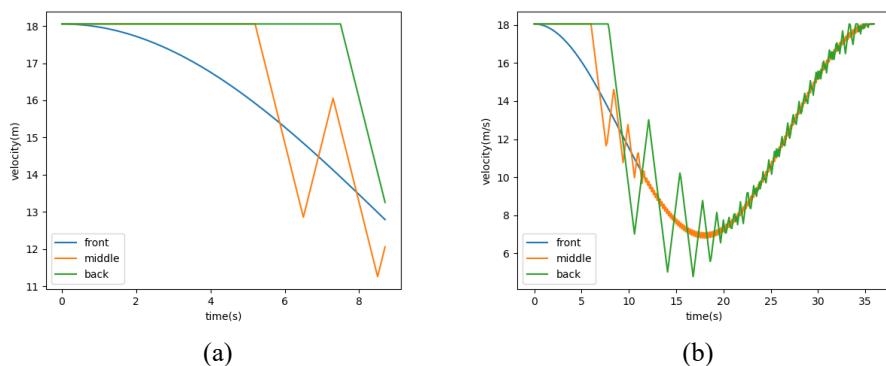


圖 4.7: (a) 中間車可接受風險 0.01 (b) 中間車可接受風險 0.05

4.1.4 跟車行為分析小結

透過前車定速及變速實驗之結果在只有兩台車的情況下越保守的駕駛行為確實能保證車輛在與前車速度差及對前車行為預測誤差大時能避免碰撞發生，但根據圖4.5之比較圖能發現比起較激進或保守的駕駛行為，車輛可接受風險適中反而能減少需進行速度變化時間具有更高的舒適性，且駕駛也並非只需要考慮單一車輛行為所以保守駕駛行為確實會導致後車較激進時發生追撞，因此比起始終採取保守之駕駛行為跟車時應隨道路狀況改變至合適駕駛風格。



4.2 超車行為分析

在超車行為分析中會設定慢車道前車依定速 40km/h 行駛，慢車道後車偏好速度為 50km/h 並根據風險行駛自行決定超車與否，快車車道放置三台車，第一台車頭將與快車道前車尾相距 5 公尺，快車道內車速及間距根據實驗設定，車輛 V-T 圖中直行超車之慢車道後車為藍色，快車道第一台車為橘色、第二台為綠色、第三台為紅色，由於車輛側向風險之影響，過於保守之可接受風險會導致車輛在車道內空間限制下無法接受與其他車輛並排導致完全無法執行超車所以本階段選擇之可接受風險為 0.1、0.05、0.02，在超車實驗終止模擬的條件為發生碰撞或者慢車道後車超出慢車道前車車頭 5 公尺。

4.2.1 快車道車速 55km/h

快車道車距 20m

將快車道車速設為 55km/h，快車道車距設為 20m，此時在快車道車距較大且速度差較小時不論可接受風險大小所有車輛皆成功完成超車，結果如表 4.9 所示可以看到不同可接受風險下最短距離及完成超車時間及決定超車時與前方車距，駕駛可接受風險較高時與慢車道前車距離較近時才會感受到風險而選擇超車，雖然風險較高但可以看到其完成超車時間略快，最短車距也隨著可接受風險增加而減少。

表 4.9: 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)	超車時與慢車道前車車距 (m)
0.1	0.87684	9.1	1.38889
0.05	1.80826	9.2	2.2222
0.02	2.83308	9.3	3.3333

根據圖 4.8 統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車之速度，可以看到快車道第一台車在可接受風險較低時在開始會有一小段速度變化是由於側向風險使得車輛會從車道中央稍微遠離慢車道車輛，而在可接受風險為 0.1 時快車道第二台車最後會有速度震盪原因為其嘗試要進行超車，但由於最佳化限制其在快車道內導致會有稍



微轉向後又轉回來的速度震盪，也可以看到當快車道第二台車在可接受風險較低會比較容易因為超車行為感到危險而進行減速度，圖4.9為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，可以看到在此工況下超車車輛行為大致相同。

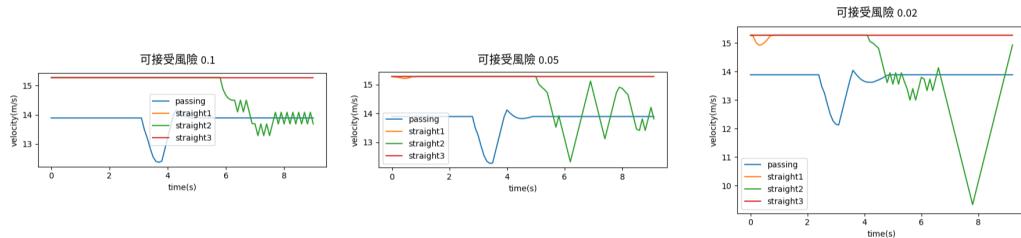


圖 4.8: 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (速度)

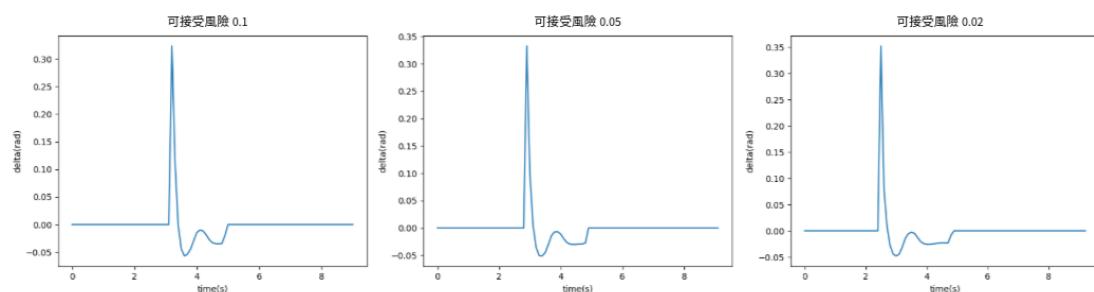


圖 4.9: 快車道車速 55km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (轉角)

快車道車距 15m

將快車道車速設為 55km/h，快車道車距設為 15m 時，結果如表4.10及表4.11所示，車輛可接受風險為 0.1 時會發生碰撞，其超車時與前車車距跟在快車道車距為 20m 時相同，因此在決定超車時機相同的情況下內車道車距變小導致可接受風險較高卻又決定超車會造碰撞事故，而可接受風險為 0.05 時與可接受風險 0.02 皆不會發生碰撞，但可接受風險較高最短車距較近但完成超車行為的時間也較短。

表 4.10: 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
0.1	0.47348	快車道第二輛車碰撞



表 4.11: 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
0.05	0.05323	9.2
0.02	0.781396	9.3

圖4.10統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車，圖4.11為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，可以看到在快車道車距變小的情況下，可接受風險為 0.1 時快車道第二台車煞車不及導致追撞的發生，而可接受風險較低時快車道車輛能即時煞車避免碰撞的發生，超車行為及完成超車時間與快車道車距 20m 並無太大差別。

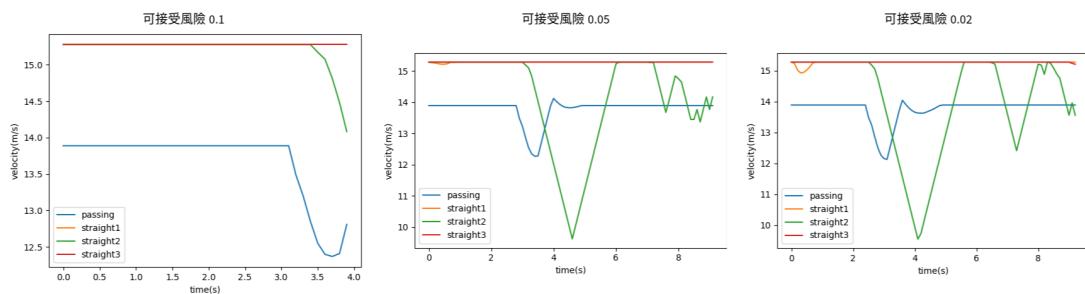


圖 4.10: 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (速度)

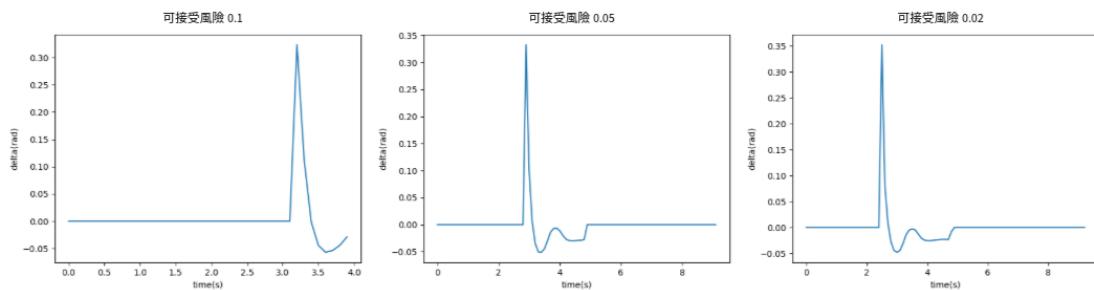


圖 4.11: 快車道車速 55km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (轉角)

快車道車距 10m

將快車道車速設為 55km/h，快車道車距設為 10m 結果如表4.12及表4.13所示，內車道車距在減小後可接受風險為 0.1 時會與快車道第二台車發生碰撞，且其碰

撞速差比其快車倒車距為 15m 時更大表示此行為更危險。有趣得為車輛可接受風險在 0.02 比 0.05 完成時間要快，原因在可接受風險為 0.05 時慢車道後車嘗試超車失敗後回到慢車道進行跟車後等所有車輛通過後完成超車，所以完成超車時間花了 14.3 秒，而可接受風險較保守為 0.02 車輛先等快車道第二台車通過才選擇超車因此不用等第三台車通過變完成超車其超車時間反而只花了 11.5 秒。

表 4.12: 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
0.1	4.82852	快車道第二輛車碰撞

表 4.13: 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)	超車時與慢車道前車車距 (m)
0.05	0.09712	14.3	2.1180
0.02	0.112468	11.5	3.3333

透過圖4.12可以看到在不同可接受風險 0.1、0.05 及、0.02 時車輛 V-T 圖，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車，圖4.13為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，可以看到當可接受風險為 0.1 時慢車道車輛選擇超車時車距過小，快車道第二台車嘗試躲避不及還無減速行為就發生碰撞，從可接受風險 0.05 可以看到快車道車輛幾乎都沒有降速且慢車道後車嘗試超車失敗後無法在找到時機超車，只能等所有車輛過去，而可接受風險 0.02 時再次選擇在第二及第三台車超車且快車道三車有降速的行為完成超車行為。

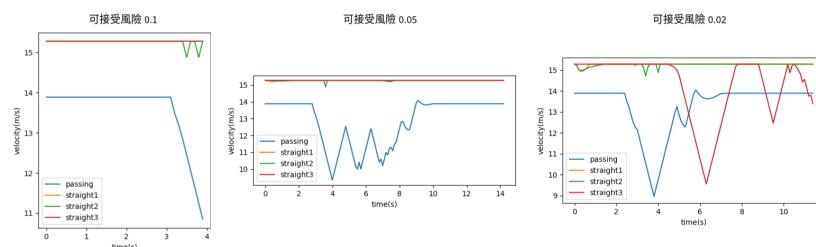


圖 4.12: 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (速度)

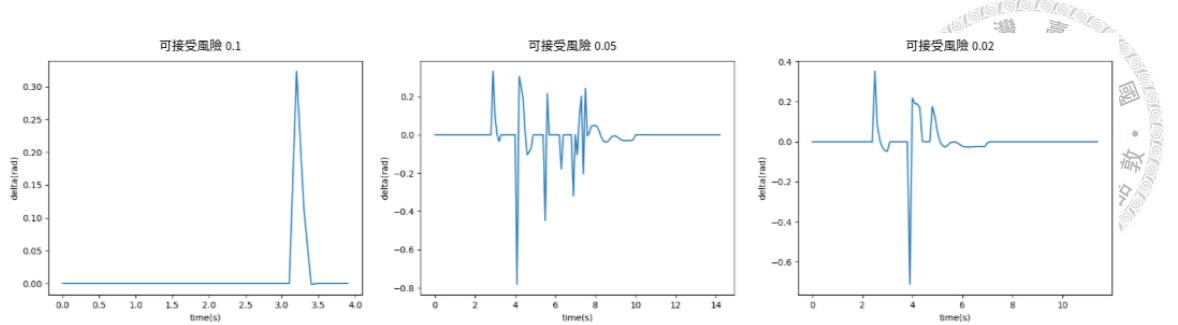


圖 4.13: 快車道車速 55km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (轉角)

4.2.2 快車道車速 60km/h

快車道車距 20m

將快車道車速設為 60km/h，快車道車距設為 20m 結果如表4.14及表4.15所示，在此交通工況下僅有可接受風險較保守為 0.02 時成功超車，在可接受風險為 0.1 或 0.05 時皆會被快車道車輛追撞，但可以發現可接受風險為 0.1 時碰撞速差較大代表較為危險。

表 4.14: 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
0.1	3.381997	快車道第二輛車碰撞
0.05	1.758161	快車道第二輛車碰撞

表 4.15: 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
0.02	0.398643279	9.3

圖4.14統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車，圖4.15為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，透過可接受風險為 0.1 或 0.05 較高時快車道 2 車難以感知風險導致減速有限碰撞發生，而可接受風險 0.02 則快車倒車向較早開始減速使慢車道後車成功超車。

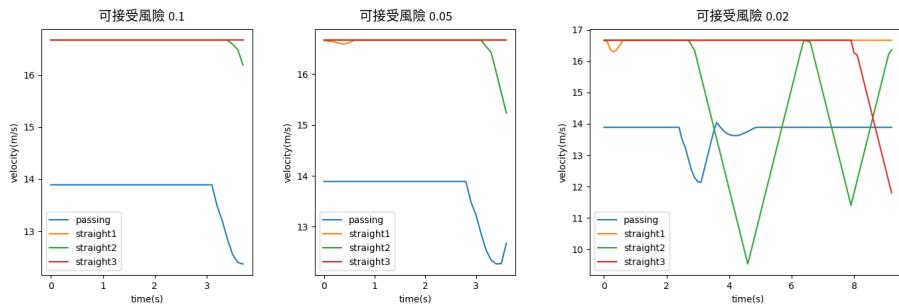
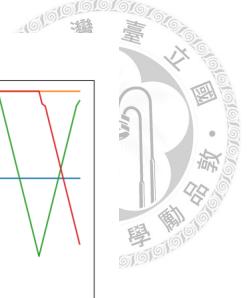


圖 4.14: 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (速度)

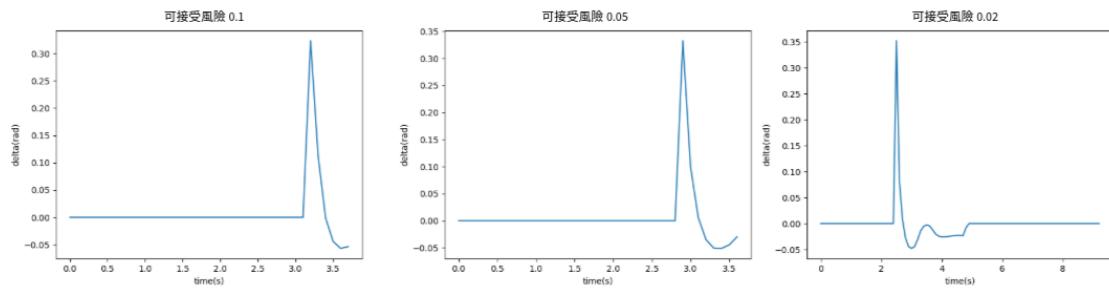


圖 4.15: 快車道車速 60km/h、快車道車距 20m 實驗結果 (轉角)

快車道車距 15m

將快車道車速設為 60km/h，快車道車距設為 15m 結果如表4.16所示，此時在慢車道後車欲超車時剛好快車道車與慢車道前車所留空隙較為剛好，不論可接受風險大小皆會嘗試超車但都為快車道車輛無法即時煞車範圍，可接受風險較低時碰撞速差較低較為安全，

表 4.16: 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
0.1	5.817474285	快車道第二輛車碰撞
0.05	5.126516993	快車道第二輛車碰撞
0.02	4.48201232	快車道第二輛車碰撞

如圖4.16統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車圖4.17為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，可接受風險較小為 0.01，碰撞時後車有較明顯減速導致碰撞時危害降低，在可接受風險 0.1

時車輛會強制直行超車導致碰撞而在可接受風險為 0.05 時發現直行超車後風險過高選擇嘗試切回慢車道但降速不夠多導致追撞到前車，而在可接受風險為 0.02 時則因為快車道車輛由於可接受風險較低離慢車道較遠導致慢車道後車超車到一半在中線上行駛一段後繼續嘗試超車失敗遭到快車道 2 車追撞。

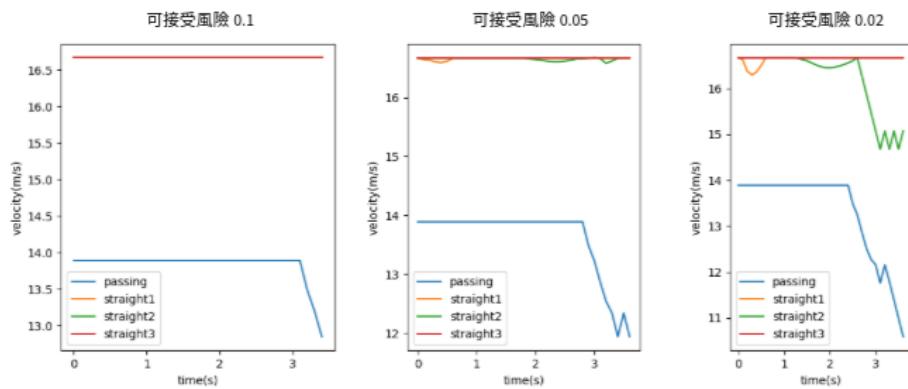


圖 4.16: 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (速度)

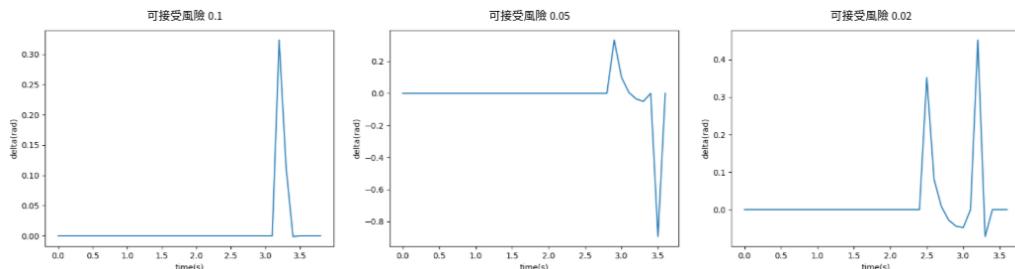


圖 4.17: 快車道車速 60km/h、快車道車距 15m 實驗結果 (轉角)

快車道車距 10m

將快車道車速設為 60km/h，快車道車距設為 10m 結果如表 4.17 及表 4.18 所示，此時反而車輛可接受風險較大能順利完成超車，且可接受風險較大完成時間較短，而可接受風險較保守時選擇在第二輛車通過慢車道前車後在直行超車反而導致快車道第三台車撞煞車不及撞上超車車輛。

表 4.17: 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
0.02	0.393397	快車道第三輛車碰撞



表 4.18: 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
0.1	0.33855	9.3
0.05	0.15859	9.7

圖4.17統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，其中藍色為執行超車的慢車道後車速度，橘色、綠色、紅色分別為快車道 1 車、快車道 2 車及快車道 3 車，圖4.19為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 0.1、0.05、0.02，在可接受風險為 0.1 及 0.05 時雖然導致三車必須大幅度降速，但慢車道後車皆成功通過快車道二車與三車之車隙，反而是較保守可接受風險為 0.05 時不佳的超車空隙導致快車道三車追撞。

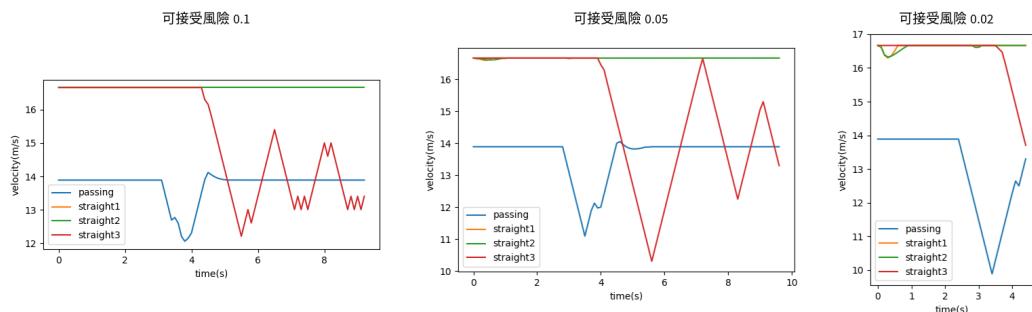


圖 4.18: 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (速度)

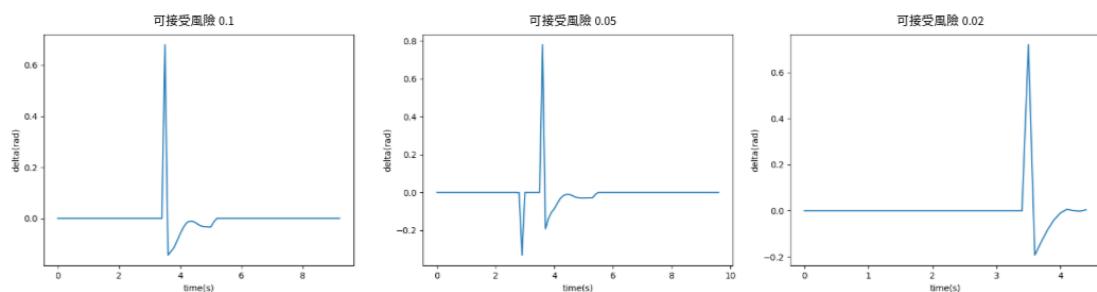


圖 4.19: 快車道車速 60km/h、快車道車距 10m 實驗結果 (轉角)



4.2.3 超車行為分析小結

在超車行為分析中不同車速及車距會導致車輛考慮超車時慢車道前車與快車道車輛之車輛空隙不同，因此可以將其視為 6 種不同車輛間隙時不同可接受風險間結果，但在快車道車速較慢時可接受風險 0.05 及 0.01 皆可以完成，較激進的可接受風險會有碰撞發生，快車道車速提高後慢車道後車難以從快車道一車及二車間空隙通過，不同情況不同的駕駛風格反而能安全通過。

4.3 無保護路口轉彎分析

在無保護路口行為分析中設定往南直行車輛偏好速度為 50km/h，直行車輛間車距分別放置為 10、15、20 公尺，第一輛直行車與路口車距為 10 公尺，轉彎車分別以期望車速 30、40km/h 行駛並根據風險決定轉彎行為，此小節想探討風險之重要性，可接受風險為 1 時代表車輛只要能躲過就好不在乎車輛間隙，可接受風險 0.05 為較中等之可接受風險 0.001 為較保守可接受風險，車輛完成轉彎後會將偏好速度變為直行車速度。

4.3.1 轉彎車速 30km/h

直行車距 20m

在轉彎車車速設為 30km/h，快車道車距設為 20m 時結果如表 4.19 所示，此表統計了不同可接受風險情況下成功轉彎之完成時間及過程中最早車距，在直行車距為 20m 情況下在不論駕駛有無考慮風險的情況下皆能順利轉彎，但可接受風險過保守時完成轉彎時間較晚。

表 4.19: 轉彎車速 30km/h、快車道車距 20m 實驗結果

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
1	2.143524244	3.7
0.05	2.238534153	3.7
0.001	0.96216071	3.9

圖 4.20 統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，其中藍色為轉彎車速度，橘色、綠色、紅色分別為直行車 1 車、

直行車 2 車及直行車 3 車，圖4.21為不同可接受風險情況下超車車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，在此工況下不論可接受風險大小皆能順利轉彎且轉彎行為相似，但可接受風險較小時轉彎車輛轉彎時降速較多，也可以看到直行車在有可接受風險及保守之可接受風險時直行車輛會有降速行為。

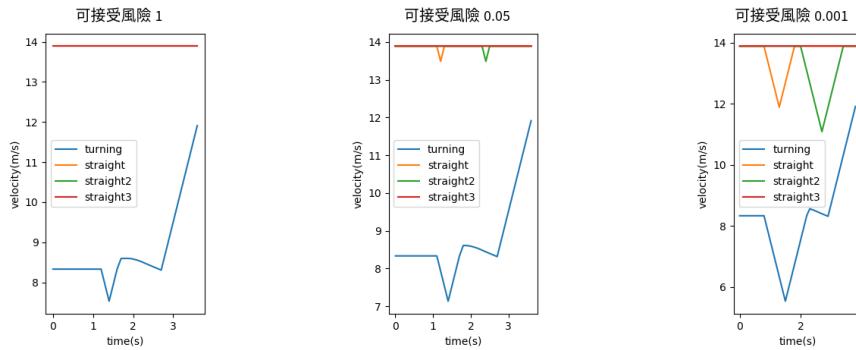


圖 4.20: 轉彎車速 30km/h、直行車距 20m 實驗結果 (速度)

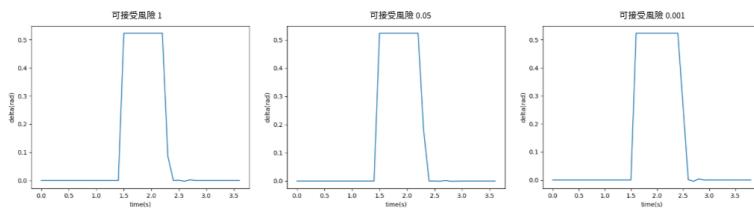


圖 4.21: 轉彎車速 30km/h、直行車距 20m 實驗結果 (轉角)

直行車距 15m

在轉彎車車速設為 30km/h，快車道車距設為 15m 時結果如表4.20及表4.21，兩表分別不同可接受風險下有碰撞發生時之碰撞速差及碰撞情況以及沒碰撞時完成時間及最小車距，可以看到在發生碰撞時無考慮接受風險的碰撞速差會較大。

表 4.20: 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
1	22.41052836	撞第二台直行車
0.05	21.21733412	撞第二台直行車



表 4.21: 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
0.001	0.572401273	7.3

圖4.22統計了不同可接收風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，其中藍色為轉彎車速度，橘色、綠色、紅色分別為直行車 1 車、直行車 2 車及直行車 3 車，圖4.23為不同可接受風險情況下轉彎車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，可以看到只有在可接受風險保守為 0.001 時轉彎車輛會在嘗試轉彎失敗後較保守可接受風險導致轉彎車無解並進行降速，等到所有車輛通過後進行轉彎避免碰撞，而可接受風險在 0.05 時也將近完成轉彎但車尾被直行車撞擊，且當碰撞發生時如果車輛不考慮碰撞風險車輛無降速行為碰撞時較危險。

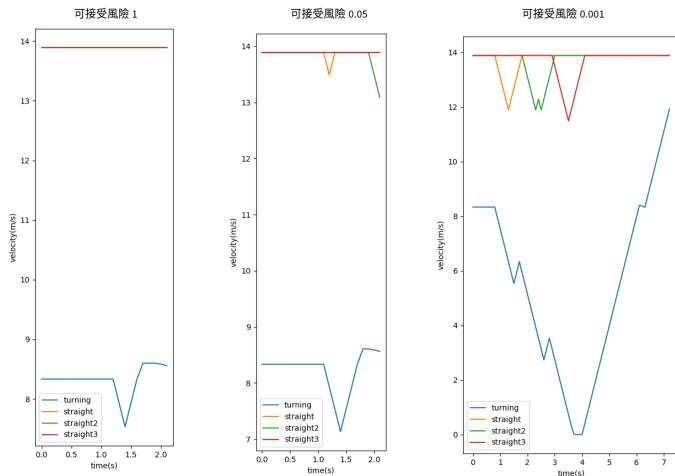


圖 4.22: 轉彎車速 30km/h 直行車距 15m 實驗結果 (速度)

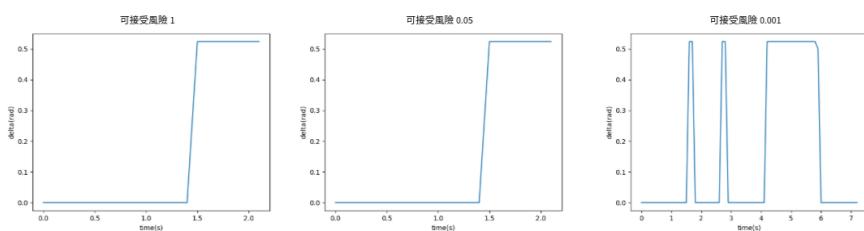


圖 4.23: 轉彎車速 30km/h、直行車距 15m 實驗結果 (轉角)



直行車距 10m

在轉彎車車速設為 30km/h，快車道車距設為 10m 時結果如表4.22及表4.23所示，可以看到與直行車距為 15m 時有相同結論只有在可接受風險保守時轉彎車輛會等所有車輛通過後在進行轉彎避免碰撞，但由於直行車輛通過較快導致，導致與快車道距離大時相比轉彎行為完成時間較短，

表 4.22: 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果 (碰撞)

可接受風險	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
1	22.41052836	撞第二台直行車
0.05	21.21733412	撞第二台直行車

表 4.23: 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果 (無碰撞)

可接受風險	最短車距 (m)	完成時間 (t)
0.001	0.689781857	7.3

圖4.25統計了不同可接受風險情況下之 V-T 圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，其中藍色為轉彎車速度，橘色、綠色、紅色分別為直行車 1 車、直行車 2 車及直行車 3 車，圖4.24為不同可接受風險情況下轉彎車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛可接受風險為 1、0.05、0.001，可以看到在可接受風險為較大時所有車輛皆不會特別做出最佳化路徑外的減速行為導致最後碰撞發生，而可接受風險為 0.001 轉彎車會將車速降至 0 等待所有車輛通過在通過，且直行車通過時感受到側向風險而有減速的現象發生。

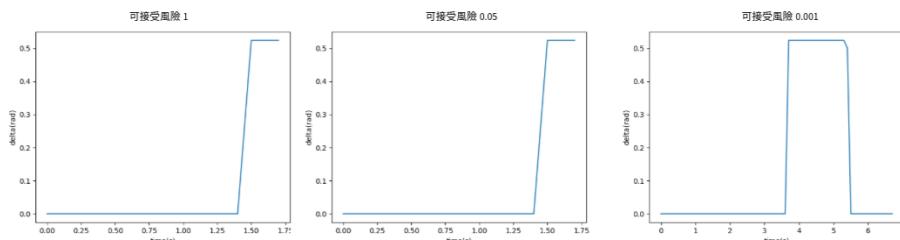


圖 4.24: 轉彎車速 30km/h、直行車距 10m 實驗結果 (轉角)

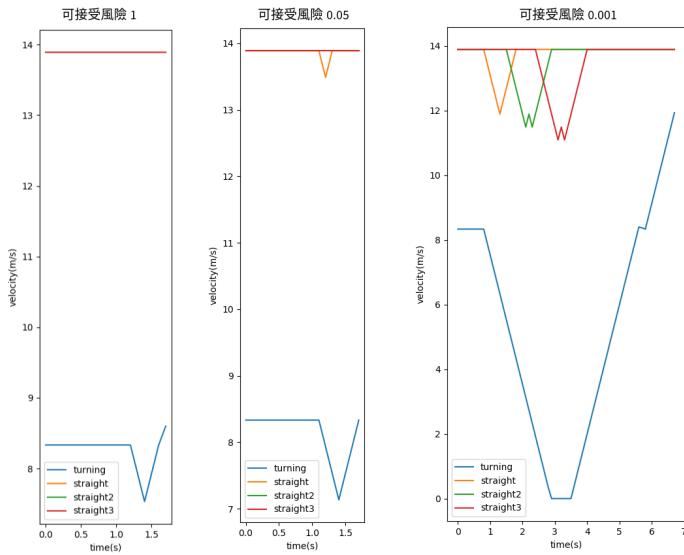


圖 4.25: 轉彎車速 30km/h 直行車距 10m 實驗結果 (速度)

4.3.2 轉彎車速 40km/h

將轉彎車速提升至 40km/h 增加轉彎時車速差距，當車輛不考慮風險可接受風險為 1 時不論直行車距設置為多少結果皆相同。如圖 4.26(a) 會由於一進路口時錯誤之判斷導致後面最佳化無解後在時間為 1s 時直接撞上第一台直行車輛，無法完成任何轉彎行為。

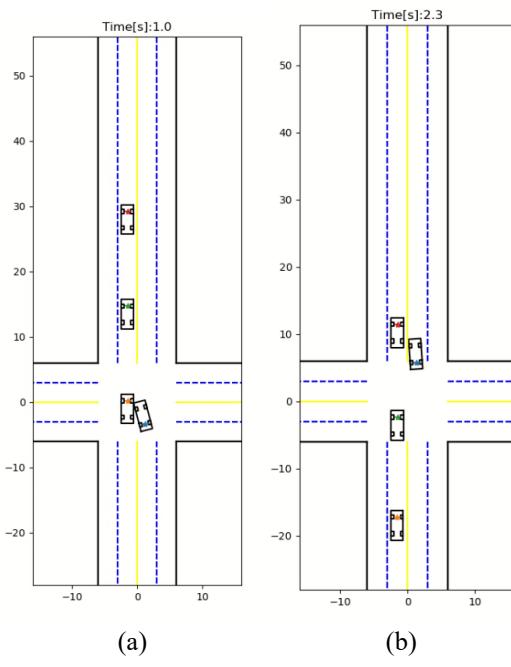


圖 4.26: (a) 可接受風險 1 問題 (b) 可接受風險 0.001 問題



而當駕駛可接受風險較保守為 0.001 在車距較大為 20 及 15m 時如表4.24所示，皆會從直行車第一及第二台車之間完成轉彎，完成時間相同但直行車距較小為 15m 時轉彎車與直行車最短車距較小差點碰撞。

表 4.24: 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.001 實驗結果

直行車距	最短車距 (m)	完成時間 (t)
15	0.617747154	3.2
20	3.584894875	3.2

圖4.27統計了不同車距情況下可接受風險為 0.001 之 V-T 圖，從左至右駕駛直行車距為 15、20m，其中藍色為轉彎車速度，橘色、綠色、紅色分別為直行車 1 車、直行車 2 車及直行車 3 車，圖4.28為可接受風險為 0.001 下轉彎車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛直行車距為 15、20m，在直行車車距較大時能順利通過且在 15m 時由於車速足夠不需要等所有車輛通過就能通過完成時間比起 30km/h 快了 4.2 秒，但在直行車距為 10m 由於太晚感知風險導致煞車不及超過路口如圖4.26(b) 所示雖不會產生碰撞但已經超過路口無法完成轉彎。

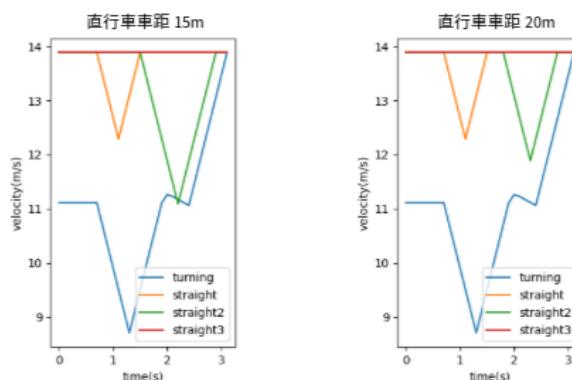


圖 4.27: 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.001 實驗結果 (速度)

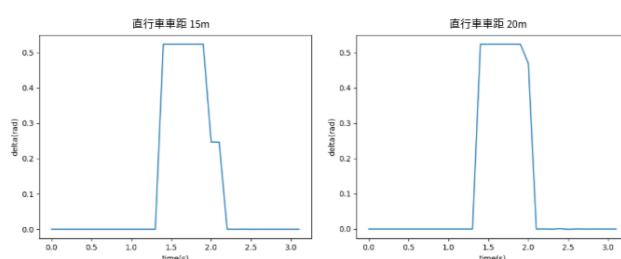
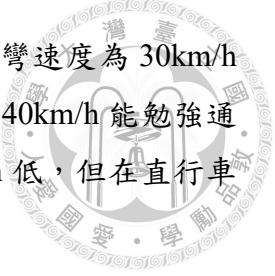


圖 4.28: 轉彎車速 40km/h、可接受風險 0.001 實驗結果 (轉角)



當駕駛可接受風險為 0.05 時結果如表4.25及4.26所示，與轉彎速度為 30km/h 時相比可接受風險為 0.05 時在直行車車距為 15m 得情況下車速 40km/h 能勉強通過而 30km/h 則來不及通過被直行車追撞，完成時間也比 30km/h 低，但在直行車距為 10m 時發生碰撞兩方速差較高較為危險。

表 4.25: 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果 (碰撞)

直行車距	碰撞速差 (m/s)	碰撞情況
10	23.4	撞第二台直行車

表 4.26: 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果 (無碰撞)

直行車距	最短車距 (m)	完成時間 (t)
15	0.28174	3.1
20	3.313865	3.1

圖4.29所示，統計了不同車距情況下可接受風險為 0.05 之 V-T 圖，從左至右駕駛直行車距為 10、15、20m，其中藍色為轉彎車速度，橘色、綠色、紅色分別為直行車 1 車、直行車 2 車及直行車 3 車，圖4.30為可接受風險為 0.05 下轉彎車輛轉角對時間作圖，從左至右駕駛直行車距為 10、15、20m，

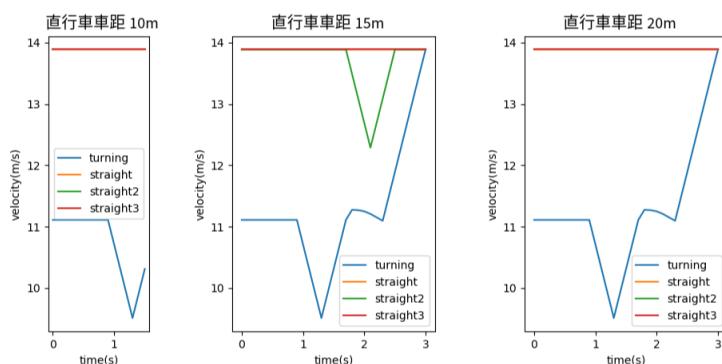


圖 4.29: 轉彎車速 40km/h 可接受風險 0.05 實驗結果 (速度)

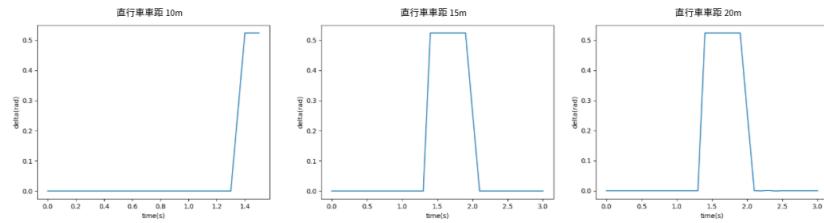


圖 4.30: 轉彎車速 40km/h、可接受風險 0.05 實驗結果 (轉角)

4.4 小結

本節進行了三種常見駕駛行為之分析，首先在跟車行為中很好的反應當選擇較安全的可接受風險駕駛時在對速度差及駕駛行為與預期相差較大時能提早進行加減速度上處理以避免碰撞發生，但當問題延伸之三台車的跟車時可以看到當其他駕駛並非同樣保守時較保守車輛容易因為對前車反應過保守導致被後車追撞，這也證明了自駕車參與追撞佔比高的原因。

而在超車及無保護左轉的行為分析上，可以評估車輛間兩各自考慮風險會導致駕駛間的互動，超車行為中在車輛間速差較小的情況下只要並非車輛皆為激進風格駕駛都能順利完成超車，而將速度差提高後有的工況激進一點能夠成功超車，有的工況要保守一點沒有什麼規律，在無保護左轉中只要選擇最保守策略確實能順利完成幾乎所有車速及車距狀況，但其完成時間勢必會很長，而完全不考慮風險車輛只有在超級安全的工況能順利轉彎，無法處理人類行為的不確定性。

雖然自駕車之間皆為保守駕駛確實能保證許多常見駕駛情境安全，但在多車的情況下過於保守還是會有碰撞發生，且適中的可接受風險在有些工況能提供更好的舒適型，如果能根據駕駛環境調整可接受風險能在提昇自駕車之安全性。



結論與未來展望

5.1 結論

在本研究首先於第一章回顧了目前道路事故狀況及對於自駕車期望與現實之落差衍生至本研究之動機及目的，並在第二章中對於目前交通中風險分析之相關方法以及自駕車相關議題進行回顧及探討，在第三章中介紹本論文所使用之機率風險及駕駛行為與車輛模型，並說明如何使用最佳化完成基於碰撞風險之駕駛行為，在第四章中對幾種常見之駕駛行為進行模擬及分析並證實可接受碰撞風險對於道路事故之重要性最後本章總結並列出本研究之研究成果及貢獻，並提出未來可延伸之研究方向本論文之研究貢獻與成果主要以下幾點

- 建立基於指數機率分佈風險之駕駛模型

駕駛模型通常都以特定目的開發，文獻中較少適用於多種人類駕駛行為場景之模型，kolekar [21] 成功使用機率場將其適用至多場景，目前現有機率風險以高斯分佈及蒙地卡羅法為主，本研究以更符合駕駛心理之指數機率風險作為碰撞風險之評估法並建立駕駛行為之模型。

- 探討駕駛風險認知對於道路安全重要性

本研究讓讓駕駛在不同可接受風險下進行駕駛行為模擬，並得到不同駕駛情境下駕駛對風險之接受度交通結果，本研究案例展示了需要根據不同駕駛情境有不同之風險認知。



5.2 未來展望

本研究目前可針對任何設定環境及任何可接受風險進行車輛行為分析基於此研究結果，繼續延伸的部份如下：

- 增加車輛模型精準度

本研究目前使用為腳踏車模型，與車輛實際給予油門、煞車及方向盤轉角之反饋有所落差，因此更精準之車輛模型有助於得到更準確之最佳化結果。

- 增加駕駛道德行為

本研究之駕駛可接受風險並不會隨著時間改變，而駕駛之可接受風險會隨著交通路況及個人心理而有所波動，因此給予駕駛可接受風險之波動可以更好反應真實情況。

- 增加交通環境隨機性

本研究之道路環境無交通號誌之變化及車流數量為固定，因此延伸到更長時間及更複雜之模擬並增加交通環境之隨機性更能看出機率風險對於駕駛之影響。

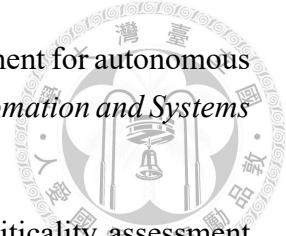
- 更優秀之風險評估方法

目前風險評估領域並無統一之風險概念對真實反應駕駛心理程度也有限，且無法反應駕駛對靜態及動態障礙物風險評估之差異，因此更優秀的風險評估有助於增加實驗之可靠性。



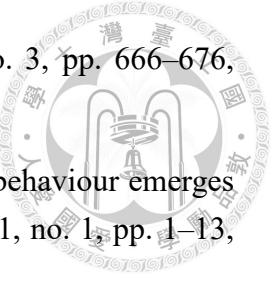
參考文獻

- [1] 內政部警政署、交通部道路交通安全督導委員會, “警政統計通報 111 年第 26 週.” <https://www.npa.gov.tw/ch/app/folder/592>, 2022.
- [2] L. Eboli, C. Forciniti, and G. Mazzulla, “Factors influencing accident severity: an analysis by road accident type,” *Transportation research procedia*, vol. 47, pp. 449–456, 2020.
- [3] S. O.-R. A. V. S. Committee *et al.*, “Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems,” *SAE Standard J*, vol. 3016, p. 1, 2014.
- [4] D. Almaskati, S. Kermanshachi, and A. Pamidimukkula, “Global policy and the adoption of autonomous vehicles,” *Transportation Research Procedia*, vol. 73, pp. 329–336, 2023.
- [5] D. J. Fagnant and K. Kockelman, “Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 77, pp. 167–181, 2015.
- [6] Đ. Petrović, R. Mijailović, and D. Pešić, “Traffic accidents with autonomous vehicles: type of collisions, manoeuvres and errors of conventional vehicles’ drivers,” *Transportation research procedia*, vol. 45, pp. 161–168, 2020.
- [7] G. Lu, B. Cheng, Q. Lin, and Y. Wang, “Quantitative indicator of homeostatic risk perception in car following,” *Safety science*, vol. 50, no. 9, pp. 1898–1905, 2012.
- [8] S. Lefèvre, D. Vasquez, and C. Laugier, “A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles,” *ROBOMECH journal*, vol. 1, pp. 1–14, 2014.
- [9] J. Dahl, G. R. de Campos, C. Olsson, and J. Fredriksson, “Collision avoidance: A literature review on threat-assessment techniques,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 4, no. 1, pp. 101–113, 2018.



- [10] S. Noh and W.-Y. Han, “Collision avoidance in on-road environment for autonomous driving,” in *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, pp. 884–889, IEEE, 2014.
- [11] A. Tamke, T. Dang, and G. Breuel, “A flexible method for criticality assessment in driver assistance systems,” in *2011 IEEE intelligent vehicles symposium (IV)*, pp. 697–702, IEEE, 2011.
- [12] A. Laureshyn, Å. Svensson, and C. Hydén, “Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, no. 6, pp. 1637–1646, 2010.
- [13] J. Nilsson, A. C. Ödblom, and J. Fredriksson, “Worst-case analysis of automotive collision avoidance systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 1899–1911, 2015.
- [14] G. R. de Campos, A. H. Runarsson, F. Granum, P. Falcone, and K. Alenljung, “Collision avoidance at intersections: A probabilistic threat-assessment and decision-making system for safety interventions,” in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 649–654, IEEE, 2014.
- [15] J. Van Brummelen, M. O’ brien, D. Gruyer, and H. Najjaran, “Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow,” *Transportation research part C: emerging technologies*, vol. 89, pp. 384–406, 2018.
- [16] D. Parekh, N. Poddar, A. Rajpurkar, M. Chahal, N. Kumar, G. P. Joshi, and W. Cho, “A review on autonomous vehicles: Progress, methods and challenges,” *Electronics*, vol. 11, no. 14, p. 2162, 2022.
- [17] W. Schwarting, J. Alonso-Mora, and D. Rus, “Planning and decision-making for autonomous vehicles,” *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 187–210, 2018.
- [18] P. Koopman and M. Wagner, “Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 90–96, 2017.
- [19] C. Basu, Q. Yang, D. Hungerman, M. Singhal, and A. D. Dragan, “Do you want your autonomous car to drive like you?,” in *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 417–425, 2017.
- [20] C. M. Martinez, M. Heucke, F.-Y. Wang, B. Gao, and D. Cao, “Driving style recognition for intelligent vehicle control and advanced driver assistance: A survey,” *IEEE*

Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 19, no. 3, pp. 666–676, 2017.

- 
- [21] S. Kolekar, J. De Winter, and D. Abbink, “Human-like driving behaviour emerges from a risk-based driver model,” *Nature communications*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2020.
 - [22] A. R. Wagner and R. C. Arkin, “Recognizing situations that demand trust,” in *2011 RO-MAN*, pp. 7–14, IEEE, 2011.
 - [23] W. Schwarting, A. Pierson, J. Alonso-Mora, S. Karaman, and D. Rus, “Social behavior for autonomous vehicles,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 50, pp. 24972–24978, 2019.
 - [24] J. Zhao, W. Zhao, B. Deng, Z. Wang, F. Zhang, W. Zheng, W. Cao, J. Nan, Y. Lian, and A. F. Burke, “Autonomous driving system: A comprehensive survey,” *Expert Systems with Applications*, p. 122836, 2023.
 - [25] 行政院內政部國土管理處, “市區道路及附屬工程設計標準.” <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?pcodes=D0070156&flno=11>, 2022.
 - [26] Y. Li, K. Li, Y. Zheng, B. Morys, S. Pan, and J. Wang, “Threat assessment techniques in intelligent vehicles: A comparative survey,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 71–91, 2020.
 - [27] M. Theers, “Algorithms for automated driving.” <https://thomasfermi.github.io/Algorithms-for-Automated-Driving/Control/BicycleModel.html>.
 - [28] D. Helbing and P. Molnar, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical review E*, vol. 51, no. 5, p. 4282, 1995.
 - [29] H. Cheng and M. Sester, “Modeling mixed traffic in shared space using lstm with probability density mapping,” in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 3898–3904, IEEE, 2018.
 - [30] 鍾詔東, “建立二維駕駛反應模型以評估市區路口風險,” 2022.
 - [31] J. Wang, J. Wu, X. Zheng, D. Ni, and K. Li, “Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system,” *Transportation research part C: emerging technologies*, vol. 72, pp. 306–324, 2016.