



National Taiwan University
System Optimization Laboratory

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

指導教授: 詹魁元博士

2024/07/29

大綱

1.研究目的與研究動機

2.研究方法

3.研究結果與分析

4.成果貢獻與未來展望

研究背景

自動駕駛車輛發展目的為何？

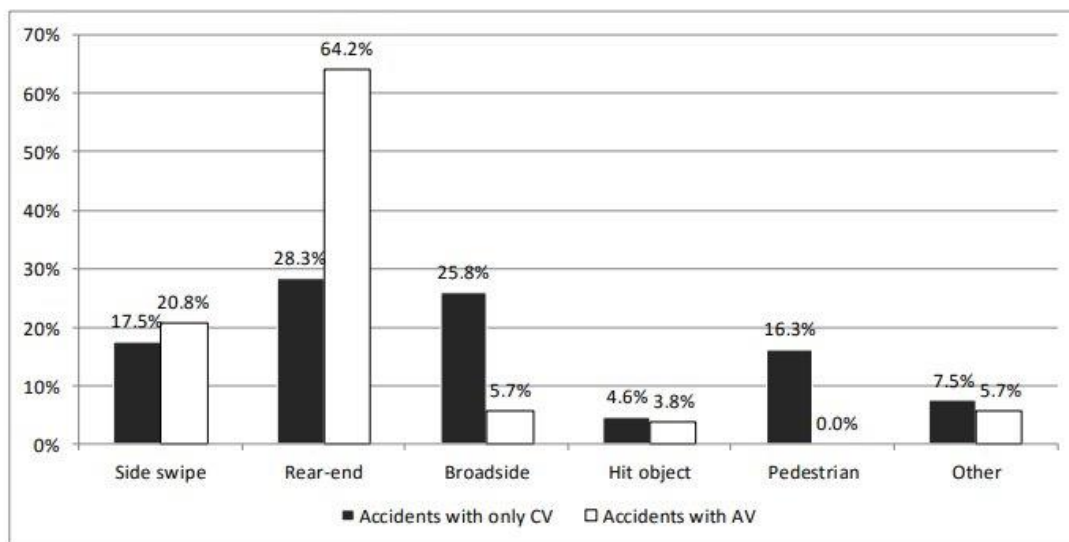
- 提高燃料使用效率
- 減少行駛時間
- 降低交通事故發生

現今自動駕駛車輛發展挑戰

- 道德問題
- 相關法律訂定
- 與人類駕駛行為差異

→ 有自駕車參與發生交通事故風險為一般駕駛間8倍，且發生事故有很大差異

自駕車參與事故差異



研究動機及目的

自駕車與人類駕駛差異:

- 駕駛風格: 自駕車較人類駕駛更為保守
- 社會行為: 人類駕駛間有信任及社會責任

影響駕駛風格的因素:

- 環境因素: 天氣、路況等等
- 人類因素: 年齡、駕駛經驗、可接受風險等等

→ 影響駕駛風格因素眾多對駕駛風格難以量化，可接受風險為人類因素中最直觀可以模擬對駕駛風格的影響

研究目的: 透過改變駕駛可接受風險模擬駕駛風格對交通影響

研究流程

前置作業

Step1:根據模擬駕駛行為設定參數

駕駛行為模型

Step2:碰撞風險評估

根據對其他車輛預測進行碰撞風險評估

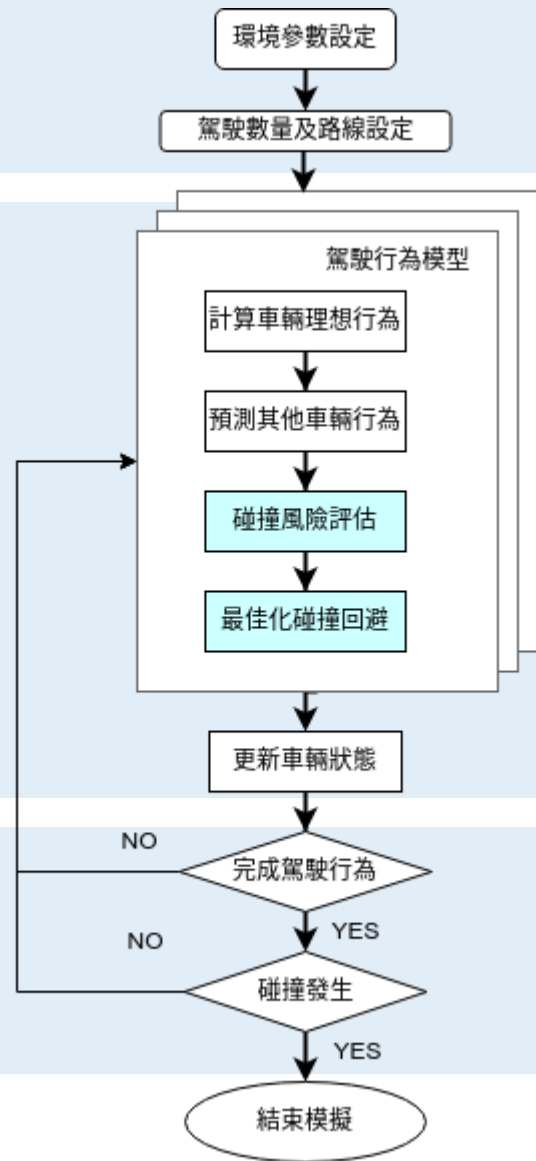
Step3:最佳化碰撞迴避

透過最佳化方法找到可接受碰撞風險值中與駕駛理想行為中差距最小之車輛狀態

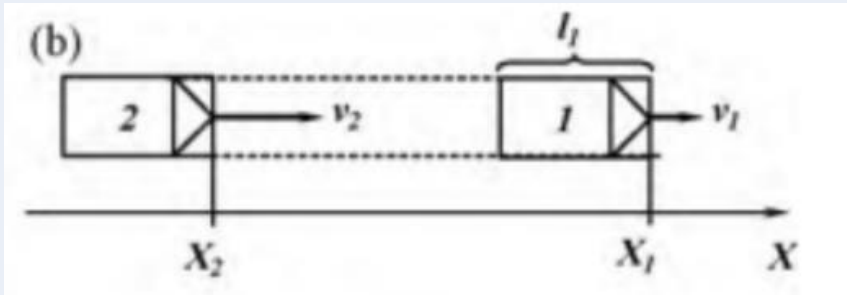
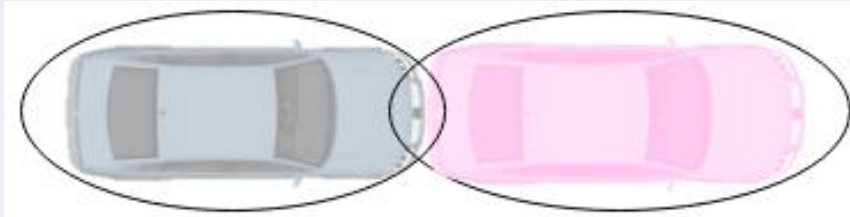
終止模擬判定

Step4:終止模擬判定

在駕駛完成規定行為或碰撞發生時結束模擬



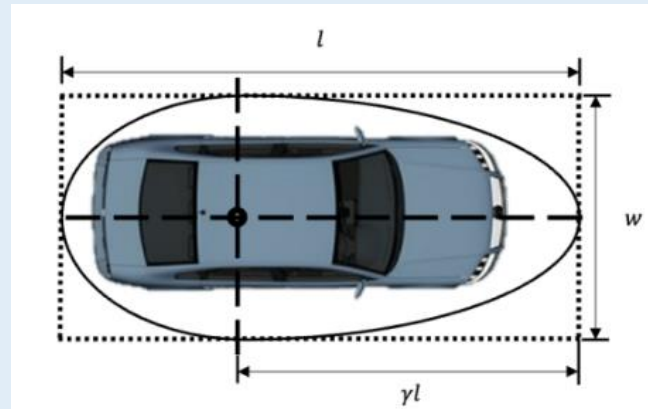
文獻回顧:碰撞風險評估

	時間風險	機率風險
	 $TTC = \frac{X_2 - X_1 - l_1}{V_2 - V_1}$	 $P = \iint_{xy} f(x, y) dx dy$
優點	考慮車速、駕駛反應時間	可應用於二維空間各種場景、能處理不確定性
缺點	需要有碰撞可能才能，計算無法考量車輛並排風險	計算方法較複雜導致速度較慢

碰撞風險評估:指數分布模型

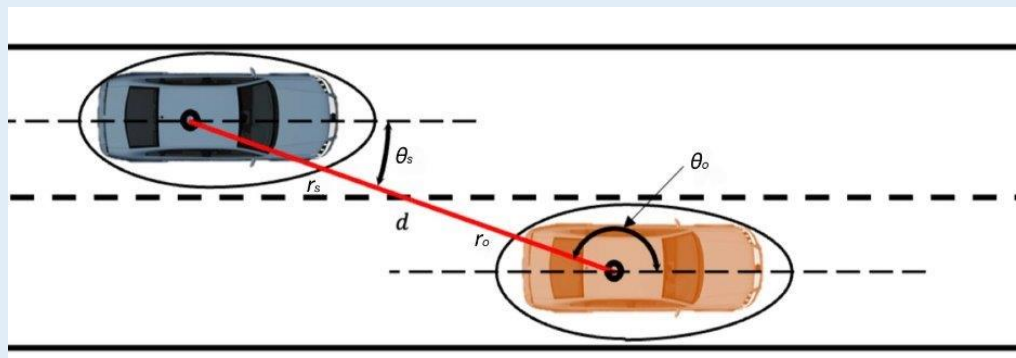
車輛碰撞半徑
 r_s

$$r_s = \begin{cases} \sqrt{(\gamma l \cos \theta_s)^2 + \left(\frac{w}{2} \sin \theta_s\right)^2} & , \theta_s \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ \sqrt{((1 - \gamma) l \cos \theta_s)^2 + \left(\frac{w}{2} \sin \theta_s\right)^2} & , else \end{cases}$$



碰撞風險
 $p(d)$

$$p(d) = \begin{cases} \exp(-\lambda(d - r_s - r_o)) & , d - r_s - r_o \geq 0 \\ 1 & , else \end{cases}$$

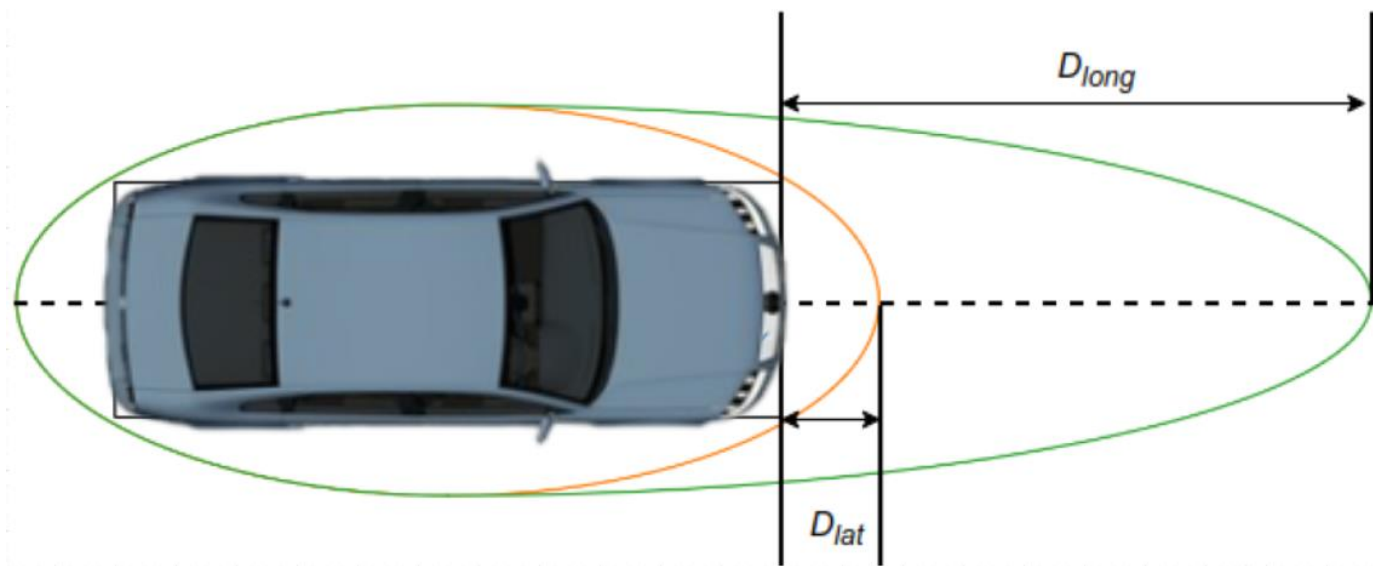


指數分布模型:駕駛敏感度

駕駛對不同方位風險敏感度不同，根據車輛方位改變 λ ，車輛朝向為 λ_{long} ，車輛側向為 λ_{lat} ，在駕駛可接受風險為 $p_{acceptable}$ ，駕駛可接受的距離如下
橘色為不論方位皆設為 λ_{lat} 結果，綠色為車輛朝向設為 λ_{long} 、側向 λ_{lat} 結果。

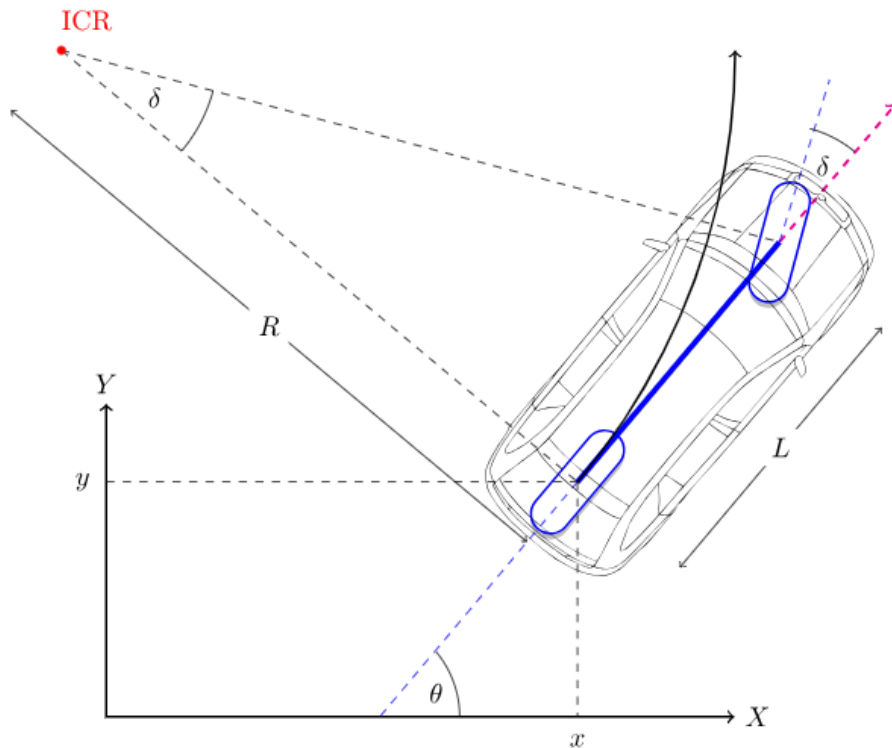
$$D_{long} = \ln(p_{acceptable}) / -\lambda_{long}$$

$$D_{lat} = \ln(p_{acceptable}) / -\lambda_{lat}$$



駕駛碰撞風險迴避:腳踏車模型

常用的車輛運動學模型，
假設輪胎偏滑角為0，將前
輪及後輪分別合併為一輪



- 車輛狀態 s_t :

$$s_t = [x \ y \ v \ \theta]^T$$

- 車輛控制命令 u_t :

$$u_t = [a \ \delta]^T$$

- 車輛狀態微分 \dot{s}_t :

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

- 車輛下時間段狀態 s_{t+dt} :

$$s_{t+dt} = s_t + \dot{s}_t * dt$$

駕駛碰撞風險迴避:最佳化

最佳化方程式:

$$\min_{u_t} (s_{t+dt} - s_{opt})^2$$

$$\text{s.t. } s_{t+dt} = s_t + \dot{s}_t dt$$

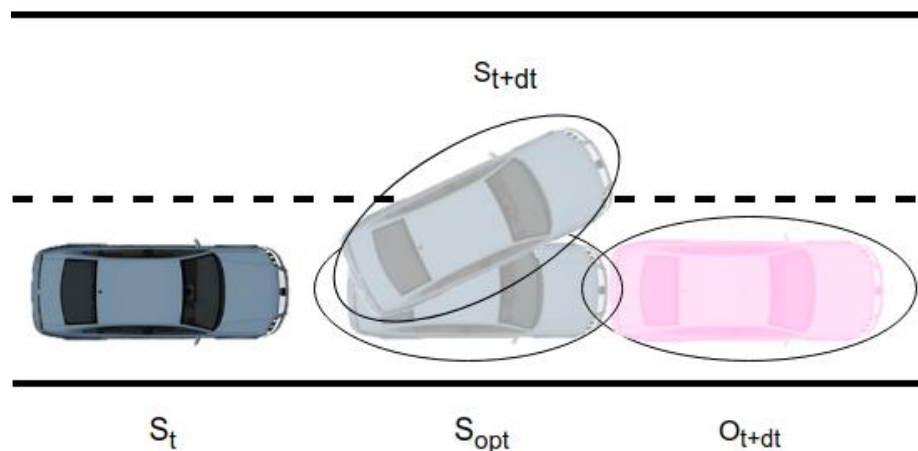
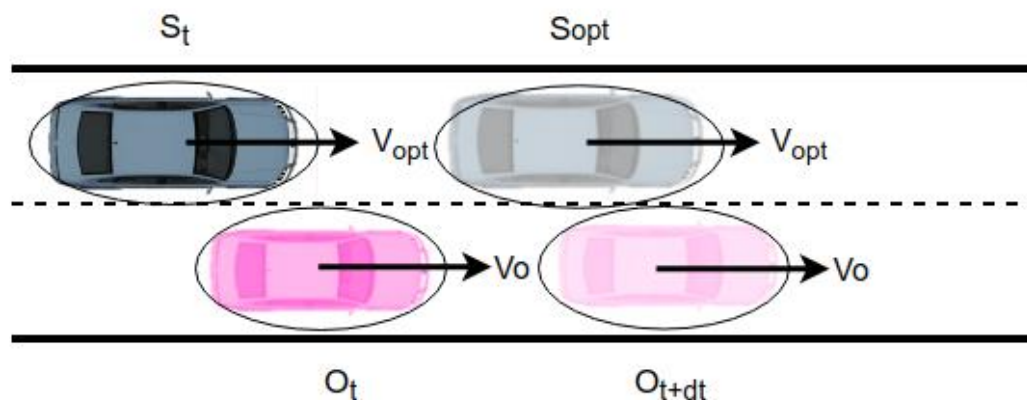
$$p(s_{t+dt}) \leq p_{acceptable}$$

$$v \leq v_{max}$$

$$|a| \leq a_{max}$$

$$|\delta| \leq \delta_{max}$$

在確保駕駛受到風險小於可接受風險限制下，找到滿足車輛模型及性能且與最佳路徑相差最小的車輛下時間段狀態及輸入之控制命令



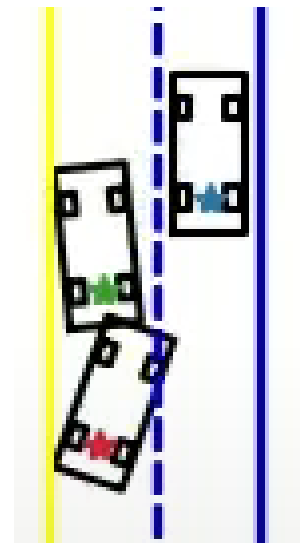
模擬駕駛行為及模擬假設

模擬假設:

- 駕駛能精準感測其他車輛狀態，且無視野遮擋
- 最佳化無解時根據情況施以最大減速度或最大加速度
- 一般台灣道路
- 快車道直行車限制

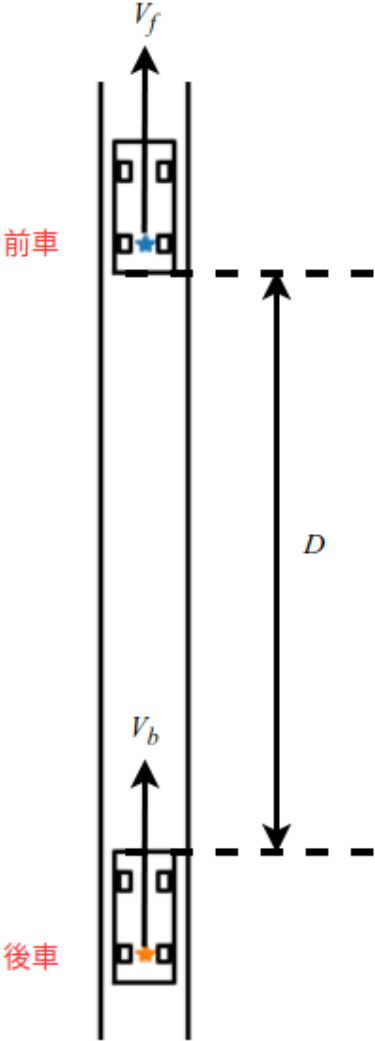
模擬駕駛行為:

- 跟車行為
- 超車行為
- 無保護左轉行為



快車道直行車限制原因

跟車行為分析:模擬工況設定



1.前車定速行為： $V_f = 40(kmh)$ ， $D=10(m)$

後車可接受風險	0.1	0.05	0.01
後車車速 $V_b(km/h)$	50	60	70

2.前車變速行為： $V_f(t) = 45 + 20 * \sin(\frac{2\pi t}{T} + \frac{T}{4})$

$V_b = 65(kmh)$ ， $D=10(m)$

後車可接受風險	0.1	0.05	0.01
前車週期 $T(s)$	36	24	12

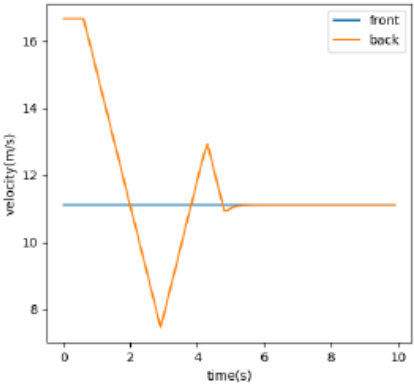
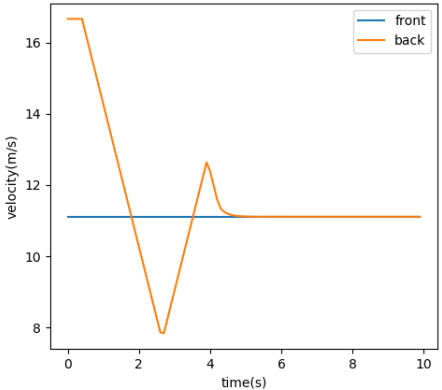
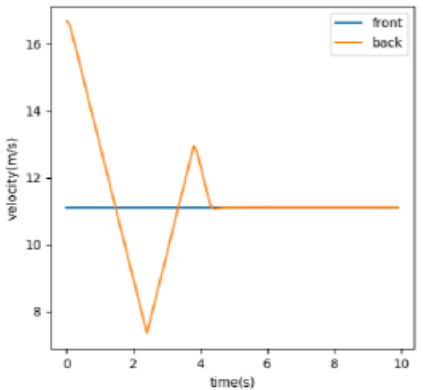
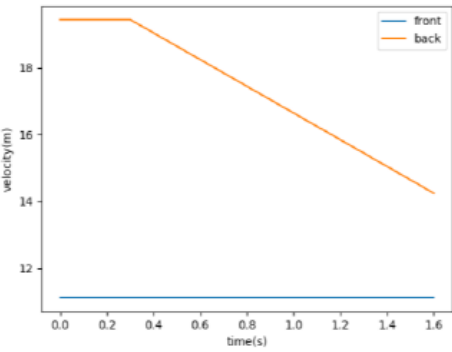
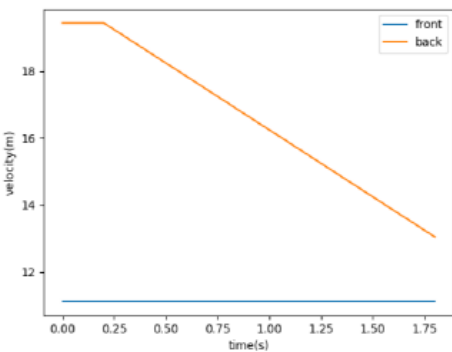
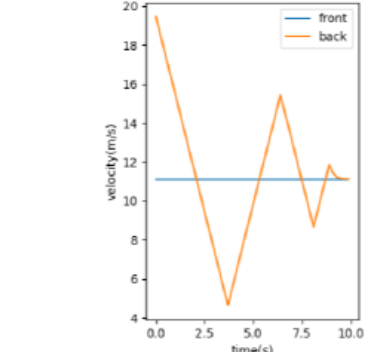
3.三車跟車行為： $V_f(t) = 45 + 20 * \sin(\frac{2\pi t}{T} + \frac{T}{4})$ ， $T= 36$

兩後車車速為65(km/h)， $D=10(m)$ ，後車可接受風險0.1

中間車可接受風險	0.05	0.01
----------	------	------

跟車行為分析:前車定速工況

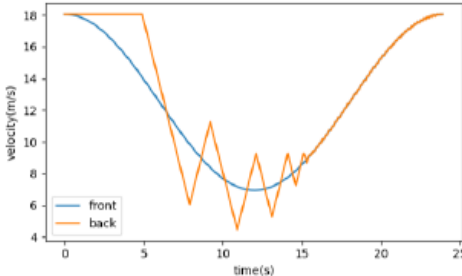
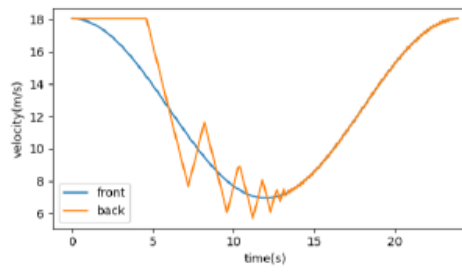
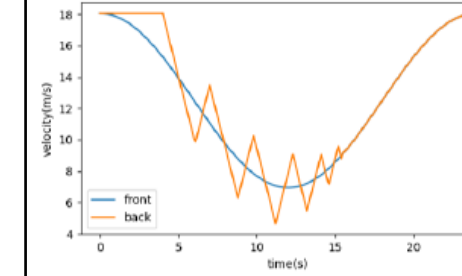
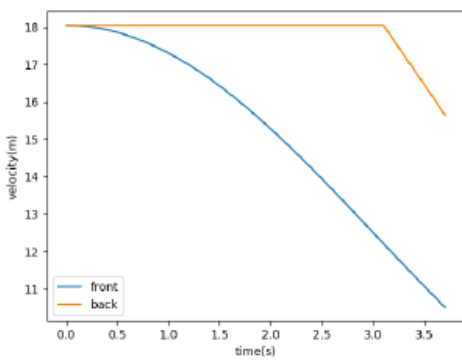
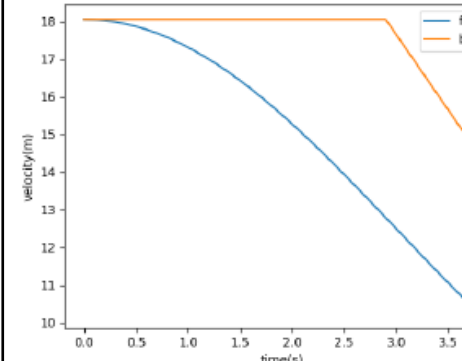
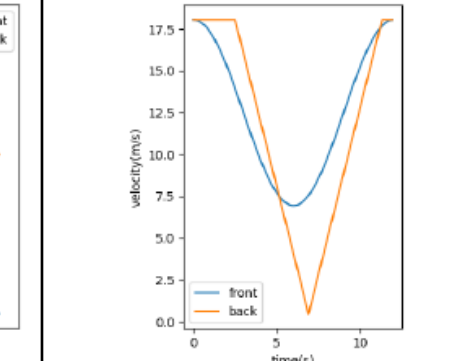
結果比較

V_b	可接受風險	0.1	0.05	0.01
	跟車結果	成功，最短車距:2.809(m)	成功，最短車距:3.92(m)	成功，最短車距:5.756(m)
60 (km/h)	V-T圖			
V_b	跟車結果	追撞，碰撞速差:2.733(m/s)	追撞，碰撞速差:1.533(m/s)	成功，最短車距:1.32(m)
70 (km/h)	V-T圖			

1. 碰撞時可接受風險越高，越晚感到危險而選擇減速，碰撞速差越大越危險
2. 車速差較大時可接受風險較小能避免碰撞發生

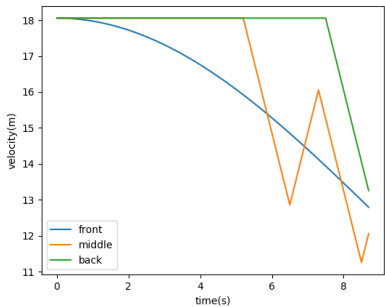
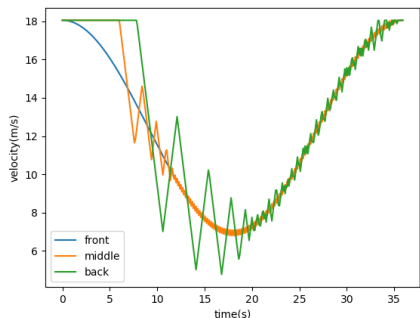
跟車行為分析:前車變速工況

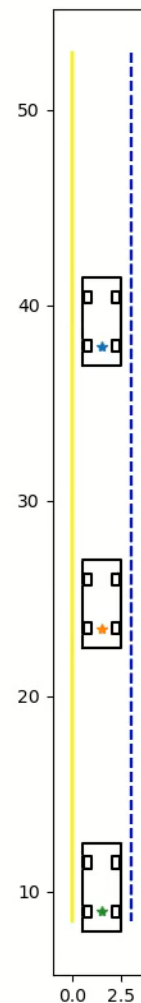
結果比較

T	可接受風險	0.1	0.05	0.01
	跟車結果	成功，最短車距:0.048(m)	成功，最短車距:1.807(m)	成功，最短車距:4.720(m)
24 (s)	V-T圖			
T	跟車結果	追撞，碰撞速差:5.015(m/s)	追撞，碰撞速差:4.078(m/s)	成功，最短車距:1.32(m)
12 (s)	V-T圖			

1. 前車行為與預測落差小時，可接受風險適中速度變化時間較短
2. 前車行為與預測落差大時，可接受風險較小能避免碰撞發生

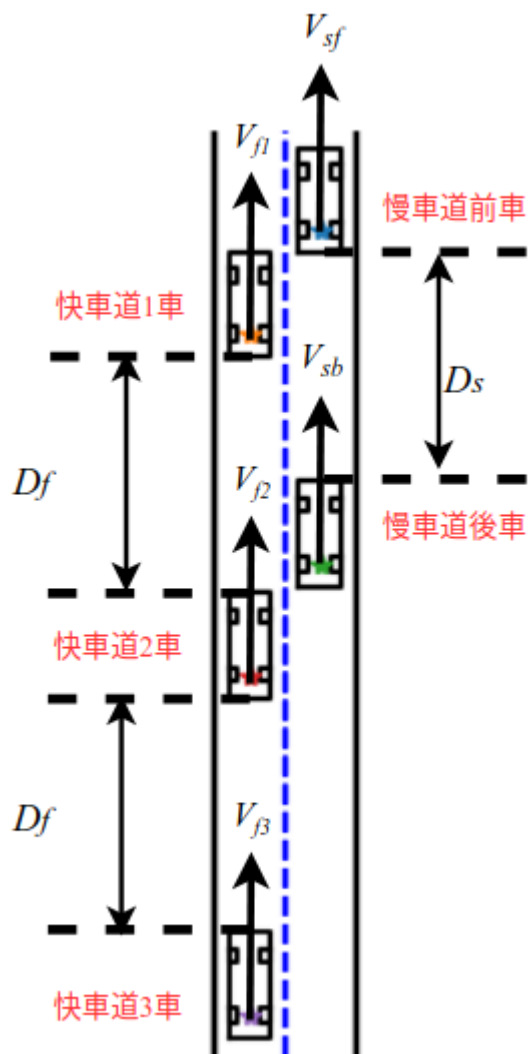
跟車行為分析:三車跟車工況

結果比較	T	中間車可接受風險	0.01	0.05
		跟車結果	失敗	成功
	36	V-T圖		



後車車輛可接受風險較大時，中間車輛可接受風險過小會導致碰撞發生

超車行為分析:模擬工況設定

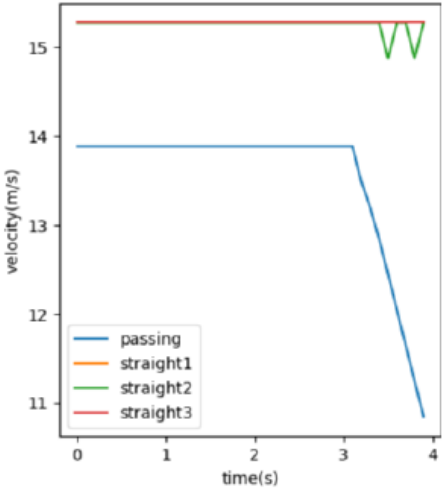
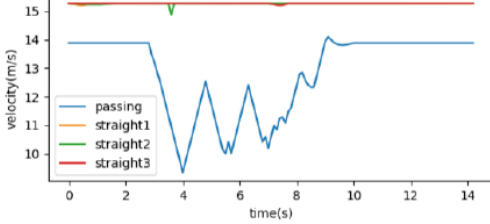
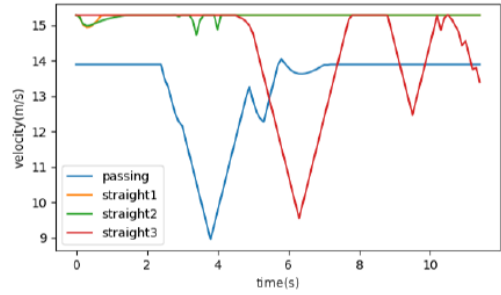


- 慢車道初始車距 $D_s = 10(\text{m})$
- 慢車道前車車速 $V_{sf} = 40(\text{km/h})$
- 慢車道後車車速 $V_{sb} = 50(\text{km/h})$
- 測試工況變數

快車道車速 $V_f(\text{km/h})$	55	60	
快車道車距 $D_f(\text{m})$	20	15	10
車輛可接受風險	0.1	0.05	0.02

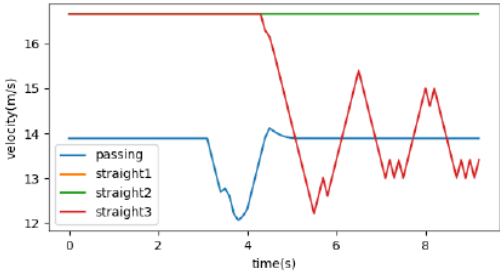
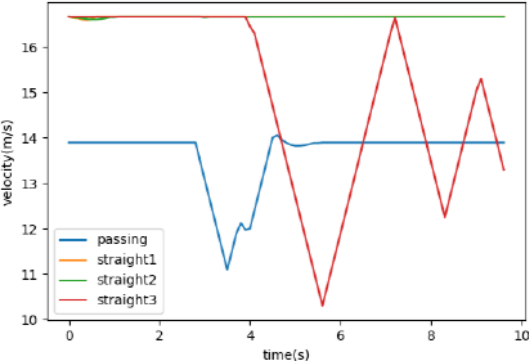
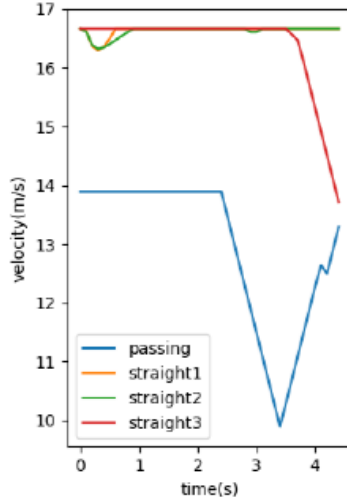
超車行為分析

- 快車道車速55kmh，快車道車距10m

結果比較	可接受風險	0.1	0.05	0.02
	超車結果	超車時車距過小導致後車追撞， 碰撞車輛速差:4.8285(m/s)	嘗試超車失敗後等所有 車輛通過完成超車， 完成時間:14.3s	在第二及第三台車中間超車， 完成時間:11.5s
	V-T圖			

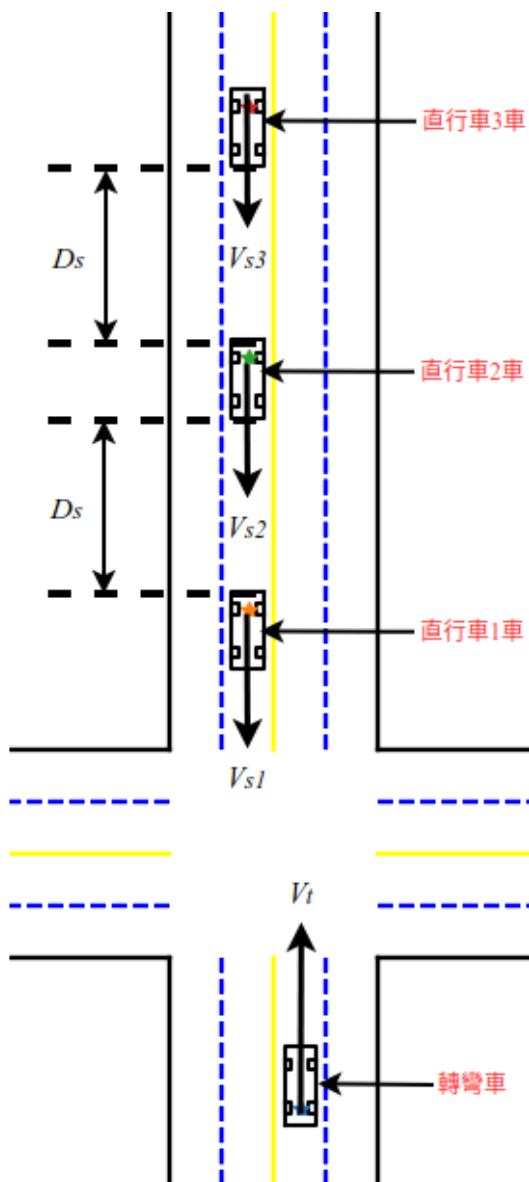
超車行為分析

- 快車道車速60kmh，快車道車距10m

結果比較	可接受風險	0.1	0.05	0.02
	超車結果	在第二及第三台車中間超車 完成時間9.3(s)	在第二及第三台車中間超車 完成時間9.7(s)	遭第三台車追撞， 碰撞速差:0.3934(m/s)
	V-T圖			

車輛間行為保守或激進影響選擇超車時機，在不同可接受風險皆可能導致不同駕駛決策行為，因此比起以保守風險行駛更應該根據環境調整可接受風險

無保護左轉分析:



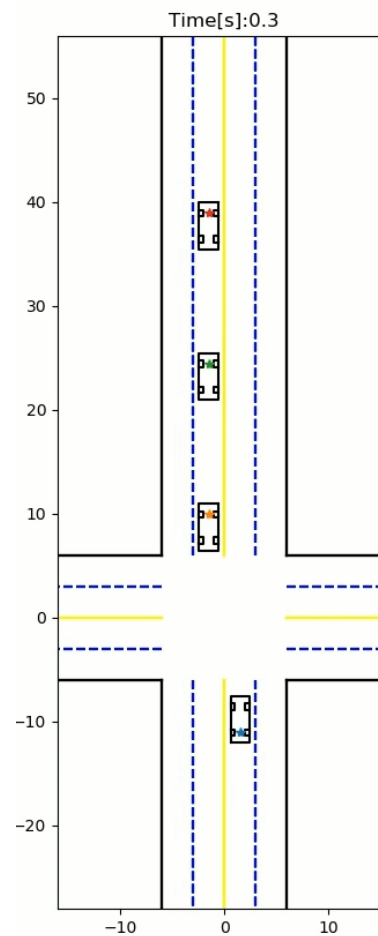
- 直行車車速 $V_s = 50(\text{km/h})$
- 測試工況變數

轉彎車車速 $V_t(\text{km/h})$	30		40
直行車車距 $D_s(\text{m})$	20	15	10
車輛可接受風險	1	0.05	0.001

無保護轉彎分析:無風險駕駛(可接受風險為1)

- 模擬結果

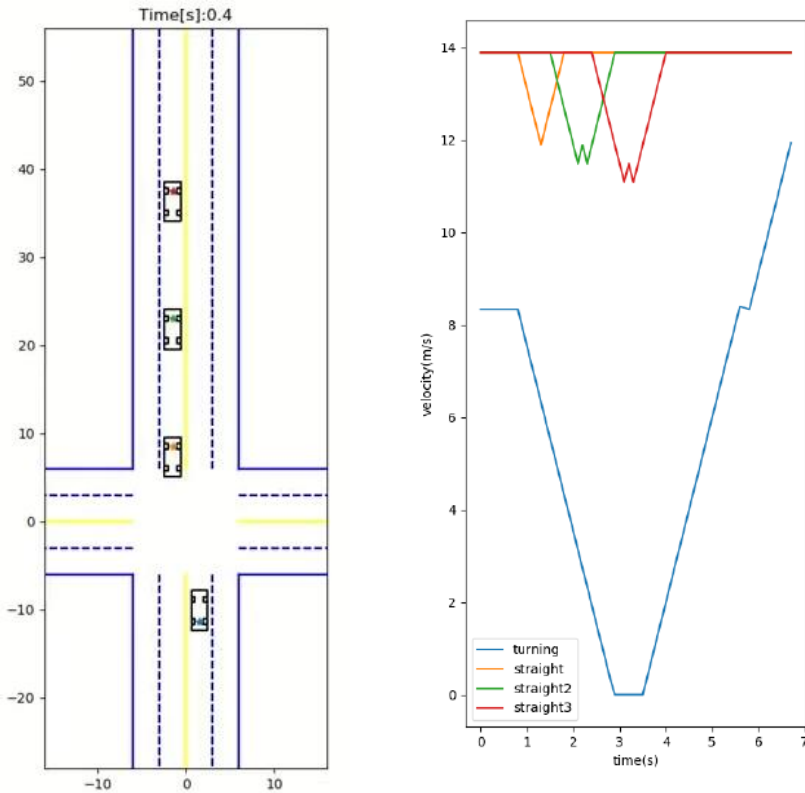
可接受風險		1	0.05	0.001
V_t	D_s	轉彎結果		
30	20	成功	成功	成功
	15	失敗	失敗	成功
	10	失敗	失敗	成功
40	20	失敗	成功	成功
	15	失敗	成功	成功
	10	失敗	失敗	直走



不考慮風險只能在最安全的路況完成轉彎，較為危險的工況不考慮風險無法完成轉彎

無保護轉彎分析:保守駕駛(可接受風險0.001)

- $V_t=30(\text{km/h})$ 、 $D_s=10(\text{m})$ 影片及V-T圖



- $V_t=30(\text{km/h})$ 時完成轉彎時間

工況	可接受風險		
		0.05	0.001
$D_s 20(\text{m})$		3.7(s)	3.9(s)
$D_s 15(\text{m})$		轉彎失敗	7.3(s)
$D_s 10(\text{m})$		轉彎失敗	6.8(s)

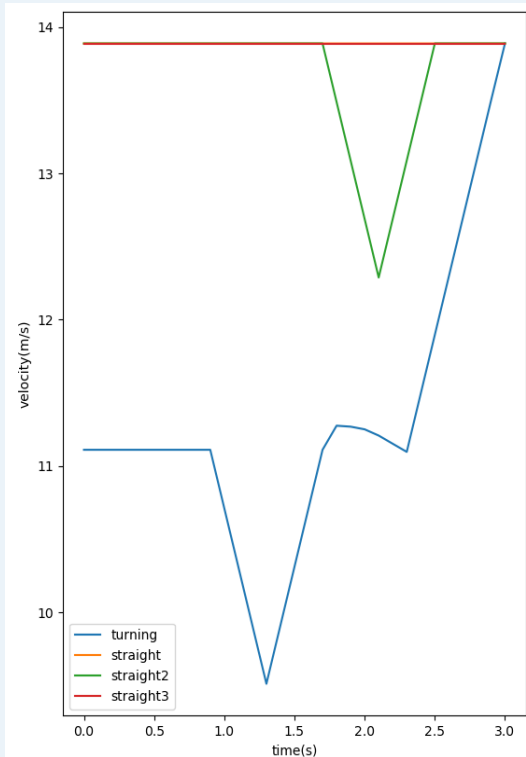
轉彎時車輛行為只要夠保守一定能通過但轉彎花費時間會很高，

無保護轉彎分析:

工況

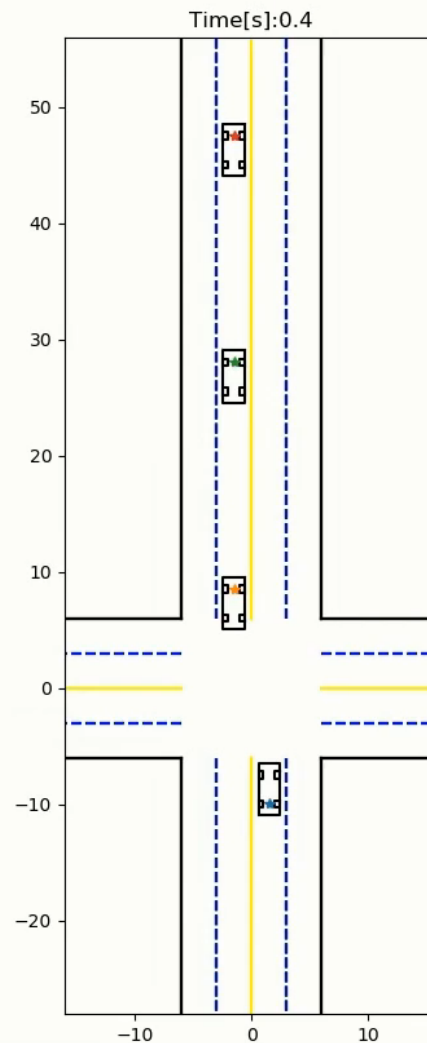
$V_t=40(\text{km/h})$ 、 $D_s=15(\text{m})$
可接受風險0.05

V-T圖



超車結果

成功通過，完成時間3.1s，
遠快於可接受風險0.001的7.3s



某些工況中可接受風險能在避免碰撞的情況下減少交通時間

研究結論與未來展望

研究貢獻

1. 透過改變駕駛可接受風險探討不同風格駕駛行為
2. 建立基於指數分布風險評估的駕駛模型適用於多種駕駛環境

未來展望

1. 提高模擬環境複雜度
2. 使用更精確車輛模型
3. 更好的碰撞風險分析方法
4. 加入人類社會行為



National Taiwan University
System Optimization Laboratory

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

指導教授: 詹魁元博士

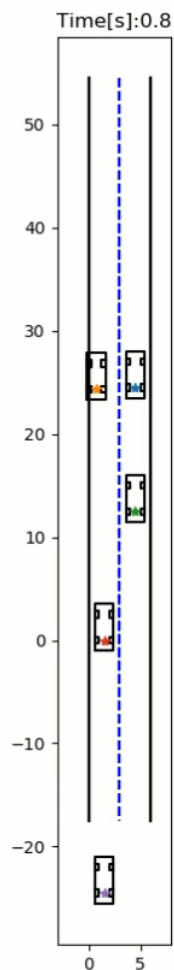
2024/07/29

超車統整

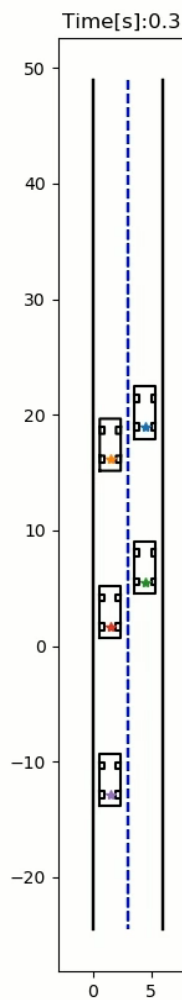
可接受風險		0.1	0.05	0.02
V_f	D_f	超車結果		
55	20	成功	成功	成功
	15	失敗	成功	成功
	10	失敗	成功	成功
60	20	失敗	失敗	成功
	15	失敗	失敗	失敗
	10	成功	成功	失敗

超車

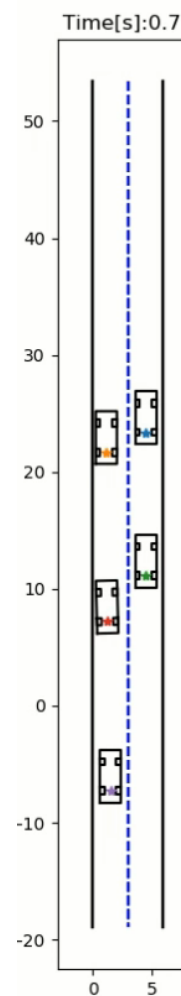
• 過第1.2 間



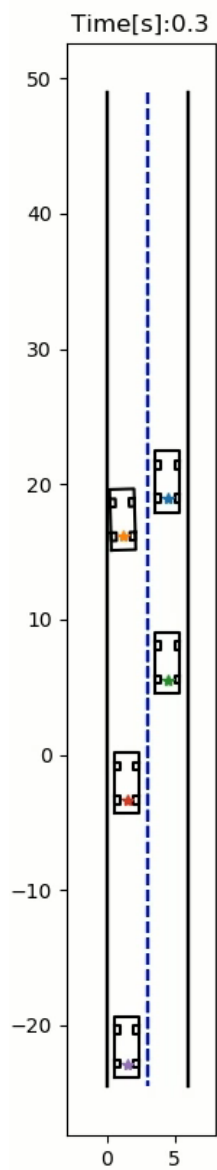
過2.3台間



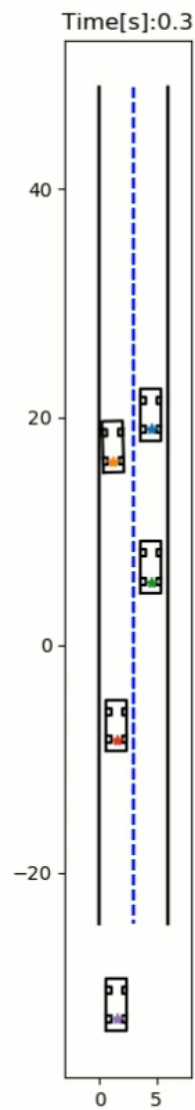
等全部通過



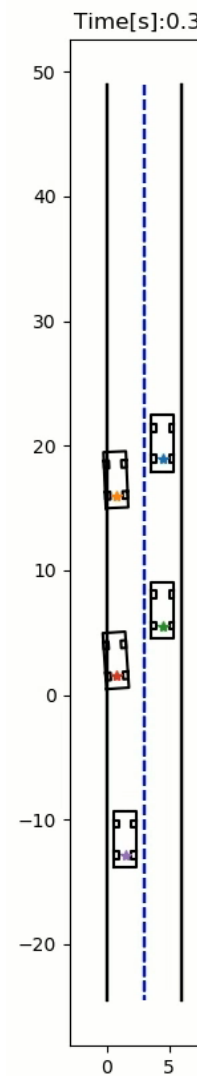
撞 2車



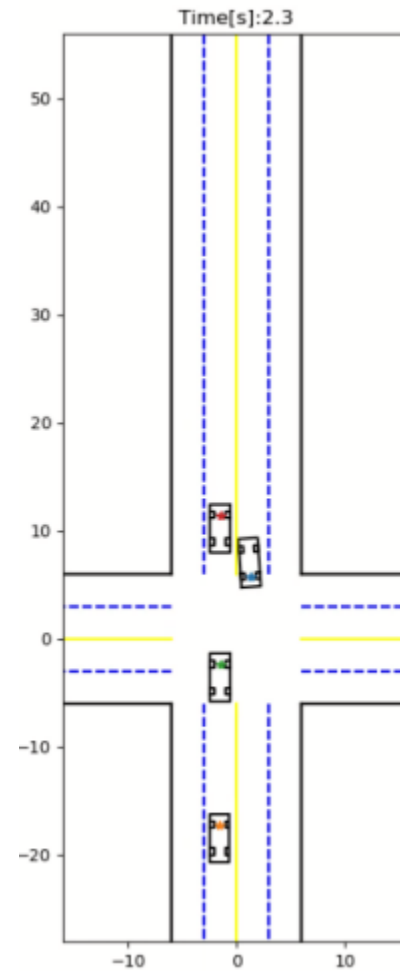
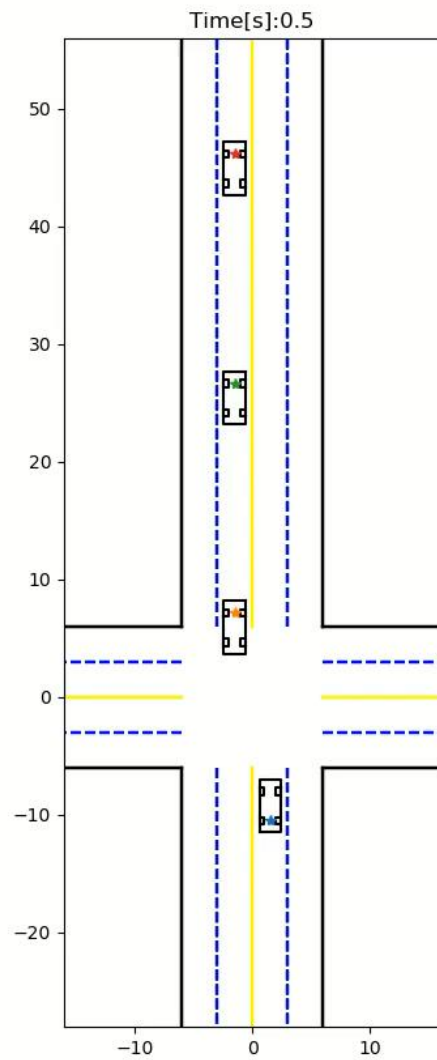
被2車追撞



被3車追撞



30 15 0.05



超車可接受風險0.05

可接受風險0.05	前車車速	40	初始車距	10	前車與內側前車距離	5	15.2777777	11.1111111	8	1						
	後車車速	50														
	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	後車均速	後車均速	後車均速	結束時間	超車時間	
指數	55	10	0.097126287	2.117975809					成功	12.84558503	15.27579578	15.27162712	15.27584871	14.3	7.7	
		15	0.053232231	2.222222222					成功	13.77393387	15.27469629	14.16084546	15.27777778	9.2	2.8	
		20	1.808259631	2.222222222					成功	13.77393387	15.27469629	14.70244682	15.27777778	9.2	2.8	
可接受風險0.05	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	後車均速	後車均速	後車均速			
	60	10	0.158588776	1.257774354					成功	13.63428098	16.66426292	16.66199213	14.99577282	9.7	3.5	
		15		2.222222222	撞2車	5.126516993	11.54025471	16.6667717	失敗	13.60713891	16.66032679	16.65448013	16.66666667	3.7	2.8	
		20		2.222222222	被2車追撞	1.758160722	13.07465748	14.8328182	失敗	13.63402426	16.66032679	16.57296348	16.66666667	3.7	2.8	

超車可接受風險0.1

可接受風險0.1	前車車速	40	初始車距	10	前車與內側前車距離	5	15.2777777	8							
	後車車速	50													
指數	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	後車均速	後車均速	後車均速	結束時間	超車時間
	55	10	1.388888889	撞2車	4.828520422	10.4492573	8	15.2777778	失敗	13.5557102	15.2777777	15.2577777	15.2777777	4	3.1
		15	1.388888889	被2車追撞	0.473478735	13.2088453	9	13.6823241	3失敗	13.6629465	15.2777777	15.2088249	15.2777777	4	3.1
		20	0.87683718	6	1.388888889				成功	13.7887865	15.2777777	14.8180637	15.2777777	9.1	3.1
可接受風險0.1	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	後車均速	後車均速	後車均速	結束時間	超車時間
	60	10	0.33855225	6	0.735555575				成功	13.7448700	16.6666666	16.6666666	15.2276947	9.3	3.4
		15	1.388888889	撞2車	5.817474285	10.8492974	1	16.6667717	失敗	13.6251116	16.6666666	16.6666666	16.6666666	3.9	3.1
		20	1.388888889	被2車追撞	3.381997375	12.4088453	9	15.7908427	7失敗	13.7184255	16.6666666	16.6473591	16.6666666	3.8	3.1

超車可接受風險0.02

可接受風險0.02	前車車速	40	初始車距	10	前車與內側前車距離	5	15.27777778								
	後車車速	50													
	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	後車均速	後車均速	後車均速	結束時間	超車時間
	55	10	0.112468003	3	3.333333333			成功	13.25675977	15.26543182	15.24942567	14.3114318	11.5	4.8	
指數		15	0.781396277	7	3.333333333			成功	13.74589545	15.26251045	14.04567571	15.27658493	9.3	2.4	
		20	2.833083578	8	3.333333333			成功	13.74589545	15.26251045	13.97084704	15.27777778	9.3	2.4	
可接受風險0.02	內側車速	內側車距	與內側車最短車距	超車時車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞超車車速	內側車速	超車結果	超車均速	超車時間	後車均速			
	60	10		2.987381919	被3車追撞	0.393396691	13.30644768	13.69984437	7失敗	12.95975456	16.64071865	16.62805554	16.38631741	4.5	3.6
		15		3.042716442	撞2車	2.917133114	11.75646099	14.6735941	失敗	13.67000684	16.62891028	16.48400927	16.66666667	3.1	2.6
		20	0.398643279	9	3.042716442				成功	13.74589545	16.65415451	14.54713784	16.31730707	9.3	2.6

轉彎

可接受風險		0.05														
直行車速	直行車距	與直行車最短車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞轉彎車車速	直走車速	轉彎結果	轉彎車平均車速	直走車1V	直走車2V	直走車3V	執行車	時間	速差		
			撞第二台車	21.4222222	8	7.933333391	13.48888889	失敗	8.13333333	13.8666666	13.8888888	13.8888888	9	2	1.8	7
轉彎車速	15	2.238534153	撞第二台車	21.2173341	2	8.528445225	12.68888889	失敗	8.21685394	13.8707070	13.8343434	13.8888888	9	2	2.2	1
								成功	8.76025953	13.8780780	13.8780751	13.8888888	9		3.7	

可接受風險		0.001												
		與直行車最短車距			碰撞轉彎車車速			轉彎車平均車速		直走車1V	直走車2V	直走車3V	執行車	完成時間
直行車速				碰撞情況	碰撞速差	速	直走車速	轉彎結果						
	50	10	0.689781857					成功	5.29016169	13.7418300	13.6124183	13.5241503		
									2	7	1	1		6.8
轉彎車速		15	0.572401273					成功	5.42388336	13.7519025	13.7025787	13.6916041		
									8	9	6	2		7.3
	30	20	0.96216071					成功	8.30768478	13.6324786	13.3863247	13.8888888		
									4	4	8	9		3.9

無風險可接受 風險1													
直行車速	直行車距	與直行車最短車距	碰撞情況	碰撞速差	碰撞轉彎車速	直走車速	轉彎結果	轉彎車平均車速	直走車1V	直走車2V	直走車3V	執行車	
轉彎車速	50	10	撞第二台車	22.4886354	8.599746514	13.88888889	失敗	8.25923081	13.8888888	13.8888888	13.8888888		21.0221628
			撞第二台車	22.4105283	6	8.521639472	13.88888889	失敗	8.31852069	13.8888888	13.8888888	13.8888888	1.8
		15											4

轉彎

可接受風險		0.05													
直行車速	直行車距	距	與直行車最短車	碰撞轉彎車		直走車速	轉彎結果	轉彎車平				執行車			
				碰撞情況	碰撞速差			車速	均車速	直走車1V	直走車2V			直走車3V	
				撞第二台車	23.400000			05	9.911111163	13.4888888	10.736111			13.888885	13.888888
50	10					9失敗	11	97	89	89		1.6			
轉彎車速	15	0.281742933					成功					1	3.1		
40	20	3.313861855					成功	54	42	89	89		3.1		

可接受風險		0.001													
直行車速	直行車距	距	與直行車最短車		碰撞轉彎車		直走車速	轉彎結果	轉彎車平				執行車	完成時間	
			碰撞情況	碰撞速差	車速	均車速			直走車1V	直走車2V	直走車3V				
50	10		無					煞車不及	11.009097	13.688888	13.276388	13.888888			
轉彎車速	15	0.617747154						成功	04	8	91	89		3.2	
								成功	97	8	65	89			
40	20	3.584894875						成功						3.2	

無風險可接受 風險1														
直行車速	與直行車最短車		碰撞轉彎車		轉彎車平				直行車1V	直行車2V	直行車3V	執行車		
	直行車距	距	碰撞情況	碰撞速差	車速	直走車速	轉彎結果	均車速						
50	10		撞第一台車	2.8840677	68	11.00482103	13.8888888	失敗	11.13781201	13.88888889	13.88888889	13.88888889	1.1	
			轉彎車速											
	15		撞第一台車	2.8840677	68	11.00482103	13.8888888	失敗	11.13781201	13.88888889	13.88888889	13.88888889	1.1	
			轉彎車速											
40	20		撞第一台車	2.8840677	68	11.00482103	13.8888888	失敗	11.13781201	13.88888889	13.88888889	13.88888889	1.1	
			轉彎車速											

	lambda	0.75					
			(車頭對車尾但程式內室車頭對車頭所以程式內要設定				
	初始車距	1024.5					
	前車定速	40					
	後車速度	50					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	5.69104	11.59577	0.01686	4.91256		
	0.05	6.48238	11.50335	0.00862	5.98000		
	0.01	8.39783	11.28876	0.00187	8.01179		

T=10

	lambda	0.75					
			(車頭對車尾但程式內室車頭對車頭所以程式內要設定				
	初始車距	1024.5					
	前車定速	40					
	後車速度	60					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	5.21830	11.60966	0.02930	2.80889		
	0.05	6.09332	11.51724	0.01378	3.92000		
	0.01	8.08329	11.30264	0.00318	5.75554		

	lambda	0.75					
			(車頭對車尾但程式內室車頭對車頭所以程式內要設定				
	初始車距	1024.5					
	前車定速	40					
	後車速度	70					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	4.29686	17.30327	0.20991	-0.50000	碰撞	1.7
	0.05	4.07474	16.58129	0.22350	-0.18667	碰撞	1.9
	0.01	7.09331	11.31645	0.05481	1.32000		

11.11111111

碰撞速差	碰撞後車速
2.733333333	13.84444444
1.533333333	12.64444444

	lambda	0.75					
	初始車距	1024.5	(車頭對車尾但程式 內室車頭對車頭所 以程式內要設定				
	前車週期	12					
	後車速度	65					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	7.14252	17.83450	0.07583	-0.43814		3.80000
	0.05	7.02251	17.59402	0.07688	-0.21284		3.90000
	0.01	9.53378	11.60222	0.14826	0.00363		

碰撞速差	碰撞後車速
5.015203573	15.25555556
4.077724999	14.05555556

	lambda	0.75					
	初始車距	1024.5	(車頭對車尾但程式 內室車頭對車頭所 以程式內要設定				
	前車週期	24					
	後車速度	60					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	3.89891	12.78871	0.14026	0.04790		
	0.05	4.71106	12.75022	0.05439	1.80723		
	0.01	6.50165	12.66081	0.01027	4.71971		

	lambda	0.75					
	初始車距	1024.5	(車頭對車尾但程式 內室車頭對車頭所 以程式內要設定				
	前車週期	36					
	後車速度	70					
指數機率	可接受風險	平均距離	平均後車速度	平均風險	最短距離	有無碰撞	發生碰撞時間
	0.1	3.93481	12.69249	0.09076	1.73178		
	0.05	4.72966	12.66682	0.04387	3.00332		
	0.01	6.53970	12.60721	0.00903	5.48658		

11.11111111	
碰撞速差	碰撞後車速