

# 可變重心車輛運動穩定性之模擬與控制研究

洪秉賢、張一屏

E-mail: 321502@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本研究旨在建立可變重心車輛運動穩定性之模擬控制研究，建立可變重心車輛運動縱向與橫向動態模擬系統，針對其道路行駛性能如加減速、轉彎、剎車制動以及車身重心變化時之側滾率加以評估比較，並配合適當之控制策略及控制器來進一步達成控制可變重心車輛運動穩定性之車體穩態控制目的。

本研究以物件導向模擬軟體建立分析車輛運動變化，建構出可變重心車輛動態系統模擬，包括縱、橫向驅動力、牽引力控制、轉向操控穩定控制、制動力分配控制、輪胎動態模型、橫擺模型、側滾模型等，進行可變重心車輛運動穩定性之性能與控制策略規劃，比較驗證及分析動態模擬系統。研究模擬可變車身重心高度之車體穩定控制動態分析之關係，利用建立之車輛動態系統模型，觀察在不同車速設定下車身重心高度變化之車輛運動，分析控制參數對橫擺與側向速度影響，根據車輛行駛狀況並配合控制器進行計算，可使可變重心車輛更精確地修正重心位置，以更安全之模式配合車輛動態模擬系統以達到穩定操控行駛之設計要求。

關鍵詞：車輛翻覆運動、翻覆穩定度指標、線傳即時車體穩定控制、動態硬體迴路模擬。

## 目錄

簽名頁 博碩士論文暨電子檔案上網授權書.....	iii	中文摘要.....	iv
ABSTRACT.....	v	誌謝.....	vi
目錄.....	vii	圖目錄.....	x
第一章緒論.....	xvii	符號說明.....	xix
1.1 前言.....	1	1.2 文獻回顧.....	1
2.1.1 橫向穩定控制與牽引力系統.....	2	2.1.2 煞車穩定控制系統.....	2
6.1.2.3 車輛側向控制與差動式煞車控制.....	6	8.1.2.4 可變重心與防側滾控制系統.....	8
11.1.3 研究動機.....	11	15.1.4 本文架構.....	15
第二章研究方法.....	17	2.1 車輛側滾現象.....	17 - viii
17.2.1 側滾控制原理.....	17	2.1.1 車輛側滾現象.....	17
17.2.2 側滾控制原理.....	17	2.1.2 側滾控制原理.....	17
18.2.1.3 主動側滾控制概念.....	18	2.1.3 主動側滾控制概念.....	18
20.2.2 建立車輛平面運動模型.....	20	2.2 建立車輛平面運動模型.....	20
23.2.1 車輛環境參數輸入模組.....	23	2.2.1 車輛環境參數輸入模組.....	23
24.2.2 輪胎滑移角動態模型建立.....	24	2.2.2 輪胎滑移角動態模型建立.....	24
26.2.2.3 車輛平面運動動態模型建立.....	26	2.2.3 車輛平面運動動態模型建立.....	26
32.2.3 可變重心車輛運動穩定性模型建立.....	32	2.3 可變重心車輛運動穩定性模型建立.....	32
39.2.3.1 三自由度車輛數學模型.....	39	2.3.1 三自由度車輛數學模型.....	39
39.2.3.2 可變重心車輛運動動態模型.....	39	2.3.2 可變重心車輛運動動態模型.....	39
46.2.3.3 可變重心高度與防傾作動器控制器設計.....	46	2.3.3 可變重心高度與防傾作動器控制器設計.....	46
52.2.4 實驗設計法與多目標最佳化.....	52	2.4 實驗設計法與多目標最佳化.....	52
54.2.4.1 實驗設計法.....	54	2.4.1 實驗設計法.....	54
55.2.4.2 多目標性能功效係數最佳化搜尋.....	55	2.4.2 多目標性能功效係數最佳化搜尋.....	55
56.3.1 參數訂定.....	56	3.1 參數訂定.....	56
58.3.1.1 可變重心車輛運動模型與CarSimR車輛模擬軟體參數訂定.....	58	3.1.1 可變重心車輛運動模型與CarSimR車輛模擬軟體參數訂定.....	58
58.3.2 可變重心高度與防傾作動器硬體車輛模型.....	58	3.2 可變重心高度與防傾作動器硬體車輛模型.....	58
63.3.2.1 可變重心高度車輛與防傾作動器設計.....	63	3.2.1 可變重心高度車輛與防傾作動器設計.....	63
64.3.2.2 直流馬達驅動器硬體設計.....	64	3.2.2 直流馬達驅動器硬體設計.....	64
66.3.2.3 車輛硬體模型.....	66	3.2.3 車輛硬體模型.....	66
68.4.1 可變重心車輛模型驗證及模擬結果.....	68	4.1 可變重心車輛模型驗證及模擬結果.....	68
74.4.2 PI 控制器最佳化參數搜尋.....	74	4.2 PI 控制器最佳化參數搜尋.....	74
90.4.3 可變重心高度與防傾作動器PI 控制器模擬結果.....	90	4.3 可變重心高度與防傾作動器PI 控制器模擬結果.....	90
114.4.4 模組輸出之側滾角ITAE 驗證.....	114	4.4 模組輸出之側滾角ITAE 驗證.....	114
129.5.1 結論.....	129	5.1 結論.....	129
134.5.2 建議事項與未來研究項目.....	134	5.2 建議事項與未來研究項目.....	134
136.參考文獻.....	136	參考文獻.....	136
137.圖目錄 圖1.1 不同高低摩擦側路面[3].....	137	圖目錄 圖1.1 不同高低摩擦側路面[3].....	137
3.圖1.2 車輛轉向操控動態[12].....	3	圖1.2 車輛轉向操控動態[12].....	3
5.圖1.3 車輛與輪胎滑移角示意圖[58].....	5	圖1.3 車輛與輪胎滑移角示意圖[58].....	5
7.圖1.4 橫擺穩定控制工作情形[59].....	7	圖1.4 橫擺穩定控制工作情形[59].....	7
9.圖1.5 車輛橫擺控制原理[59].....	9	圖1.5 車輛橫擺控制原理[59].....	9
10.圖1.6 可變重心車輛(TOYOTA-PM).....	10	圖1.6 可變重心車輛(TOYOTA-PM).....	10
11.圖1.7 TTR 系統流程圖[52].....	11	圖1.7 TTR 系統流程圖[52].....	11
12.圖1.8 車輛側滾型態[60].....	12	圖1.8 車輛側滾型態[60].....	12
13.圖1.9 車輛側滾風險預言[61].....	13	圖1.9 車輛側滾風險預言[61].....	13
13.圖2.1 SAE 車輛座標軸系統[49].....	13	圖2.1 SAE 車輛座標軸系統[49].....	13
18.圖2.2 車輛於直線行駛之側向力分析.....	18	圖2.2 車輛於直線行駛之側向力分析.....	18
21.圖2.3 (a)、(b)一般車輛於左轉彎之側向力分析.....	21	圖2.3 (a)、(b)一般車輛於左轉彎之側向力分析.....	21
22.圖2.4 (a)、(b)具主動側滾控制之車輛於左轉彎之側向力分析.....	22	圖2.4 (a)、(b)具主動側滾控制之車輛於左轉彎之側向力分析.....	22
23.圖2.5 車輛環境行駛負.....	23	圖2.5 車輛環境行駛負.....	23

荷參數輸入模組.....	26	圖2.6 SAE 輪胎座標軸系統[49].....	26	圖2.7 四輪轉向輪胎滑移角示意圖.....	28
圖.....	28	圖2.8 車輛滑移角動態模型程式.....	28	圖2.9 車輛滑移角動態模型組.....	29
圖.....	29	圖2.10 Magic Formula 輪胎回正扭矩示意圖.....	29	圖2.11 輪胎受力總負載模型.....	30
圖.....	30	圖2.12 輪胎受力總負載程式.....	30	圖2.13 模型與CarSimR比較之左前、後輪滑移角.....	31
圖.....	31	圖2.14 模型與CarSimR比較之右前、後輪滑移角.....	31	圖2.15 車輛橫向力動態模型.....	32
圖.....	32	圖2.16 車輛橫向力動態模型程式.....	33	圖2.17 車輛輪胎正向力示意圖.....	34
圖.....	34	圖2.18 車輛縱向力動態模型.....	34	圖2.19 車輛縱向力動態模型程式.....	35
圖.....	35	圖2.20 (a)左前輪正向力與CarSimR比較圖.....	36	圖2.20 (b)左後輪正向力與CarSimR比較圖.....	36
圖.....	36	圖2.21 (a)右前輪正向力與CarSimR比較圖.....	37	圖2.21 (b)右後輪正向力與CarSimR比較圖.....	37
圖.....	37	圖2.22 模型側向加速度與CarSimR比較圖.....	38	圖2.23 模型橫擺率與CarSimR比較圖.....	38
圖.....	38	圖2.24 三自由度車輛運動模型車速與轉向角圖.....	41	圖2.25 三自由度車輛運動模型Y 方向受力圖.....	42
圖.....	42	圖2.26 三自由度車輛數學模型側傾方向受力之後視圖.....	43	圖2.27 三自由度車輛數學模型.....	45
圖.....	45	圖2.28 三自由度車輛數學模型與CarSimR輸出之側滾角比較圖.....	45	圖2.29 車輛側滾力矩示意圖.....	46
圖.....	46	圖2.30 側滾臨界值模型.....	48	圖2.31 車輛運動自由體圖.....	49
圖.....	49	圖2.32 可變重心車輛側滾動態模組.....	51	圖2.33 可變重心車輛側滾動態模組程式.....	51
圖.....	51	圖2.34 3dof 與VSDL 與CarSimR輸出之側滾角比較圖.....	52	圖2.35 側滾控制系統架構圖.....	53
圖.....	53	圖2.36 側滾角PI 控制器模型.....	54	圖2.37 ITAE 計算模組.....	54
圖.....	54	圖3.1 CarSimR車輛模擬軟體定義座標.....	59	圖3.2 CarSimR車輛模擬軟體設定界面.....	62
圖.....	62	圖3.3 CarSimR車輛模擬軟體動畫.....	62	圖3.4 Matlab\SimulinkR模型各參數定義.....	63
圖.....	63	圖3.5 可變重心車輛模型設計圖(低速行駛).....	64	圖3.6 可變重心車輛模型設計圖(高速行駛).....	65
圖.....	65	圖3.7 防傾作動器車輛模型設計圖.....	66	圖3.8 驅動器電路圖.....	67
圖.....	67	圖3.9 驅動器硬體圖.....	67	圖3.10 8051 微控器程式碼.....	68
圖.....	68	圖3.11 可變重心車輛模型上視圖.....	69	圖3.12 可變重心車輛模型(低速).....	69
圖.....	69	圖3.13 為可變重心車輛模型(高速).....	70	圖3.14 (a)、(b)、(c)防傾作動器車輛模型圖.....	71
圖.....	71	圖3.15 防傾作動器車輛模型作動圖(前視).....	72	圖3.16 防傾作動器車輛模型作動圖(後視).....	72
圖.....	72	圖4.1 車速輸入條件.....	75	圖4.2 不同車速下之方向盤轉角.....	75
圖.....	75	圖4.3 DLC 路徑.....	76	圖4.4 車速30km/h, DLC 之側滾角變化.....	77
圖.....	77	圖4.5 車速50km/h,DLC 之側滾角變化.....	77	圖4.6 車速70km/h,DLC 之側滾角變化.....	78
圖.....	78	圖4.7 側滾臨界估計值.....	78	圖4.8 車速30km/h,DLC 重心位置偏左側5、15、25 公分之側滾角變化.....	80
圖.....	80	圖4.9 車速50km/h,DLC 重心位置偏左側5、15、25 公分之側滾角變化.....	80	圖4.10 車速70km/h,DLC 重心位置偏左側5、15、25 公分之側滾角變化.....	81
圖.....	81	圖4.11 車速30km/h,DLC 重心位置0.55m 之側滾角變化.....	82	圖4.12 車速50km/h,DLC 重心位置0.55m 之側滾角變化.....	83
圖.....	82	圖4.13 車速70km/h,DLC 重心位置0.55m 之側滾角變化.....	83	圖4.14 車速30、50、70km/h,DLC 重心位置0.55m 之ITAE.....	84
圖.....	83	圖4.15 車速30km/h,DLC 重心位置0.88m 之側滾角變化.....	84	圖4.16 車速50km/h,DLC 重心位置0.88m 之側滾角變化.....	85
圖.....	84	圖4.17 車速70km/h,DLC 重心位置0.88m 之側滾角變化.....	85	圖4.18 車速30、50、70km/h,DLC 重心位置0.88m 之ITAE.....	86
圖.....	85	圖4.19 路面振盪輸入條件.....	87	圖4.20 車速30km/h,DLC 路面振盪之側滾角變化.....	88
圖.....	86	圖4.21 車速50km/h,DLC 路面振盪之側滾角變化.....	88	圖4.22 車速70km/h,DLC 路面振盪之側滾角變化.....	89
圖.....	88	圖4.23 車速30、50、70km/h,DLC 路面振盪之ITAE.....	89	圖4.24 可變重心高度PI 控制器Kph、Kih 參數比較圖(30km/h).....	91
圖.....	89	圖4.25 可變重心高度PI 控制器Kph、Kih 參數比較圖(50km/h).....	92	圖4.26 可變重心高度PI 控制器Kph、Kih 參數比較圖(70km/h).....	92
圖.....	91	圖4.27 防傾作動器PI 控制器Kpa、Kia 參數比較圖(30km/h).....	93	圖4.28 防傾作動器PI 控制器Kpa、Kia 參數比較圖(50km/h).....	94
圖.....	92	圖4.29 防傾作動器PI 控制器Kpa、Kia 參數比較圖(70km/h).....	94	圖4.30 搜尋之可變重心高度最佳化PI 控制器參數(70km/h).....	98
圖.....	93	圖4.31 搜尋之防傾作動器最佳化PI 控制器參數(70km/h).....	99	圖4.32 ITAE 與T 對應Kph、Kih 最佳化曲面(70km/h).....	99
圖.....	94	圖4.33 ITAE 與T 對應Kpa、Kia 最佳化曲面(70km/h).....	100	圖4.34 可變重心Kph、Kih 參數比較圖.....	101
圖.....	98	圖4.35 防傾作動器Kpa、Kia 參數比較圖.....	101	圖4.36 可變重心Kph、Kih 參數比較圖.....	102
圖.....	99	圖4.37 防傾作動器Kpa、Kia 參數比較圖.....	103	圖4.38 可變重心Kph、Kih 參數比較圖.....	103
圖.....	101	圖4.39 防傾作動器Kpa、Kia 參數比較圖.....	104	圖4.40 路徑模組圖.....	105
圖.....	102	圖4.41 實驗設計法搜尋之最佳化PI 控制器參數(30km/h).....	106	圖4.42 ITAE 與T 對應Kph、Kih、Kpa、Kia 最佳化曲面(30km/h).....	106
圖.....	103	圖4.43 實驗設計法搜尋之最佳化PI 控制器參數(70km/h).....	110	圖4.44 ITAE 與T 對應Kph、Kih、Kpa、Kia 最佳化曲面(70km/h).....	110
圖.....	104	圖4.45 車輛重心偏移左側之最佳化PI 控制器參數(70km/h).....	112	圖4.46 ITAE 與T 對應Kph、Kih、Kpa、Kia 最佳化曲面(70km/h).....	112
圖.....	105	圖4.47 路面震盪之最佳化PI 控制器參數.....	113	圖4.48 ITAE 與T 對應Kph、Kih、Kpa、Kia 最佳化曲面(70km/h).....	114
圖.....	106	圖4.49 車輛重心高度隨車速變化圖.....	115	圖4.50 車速30km/h,DLC 變化之Kph、Kih	

控制器輸出側滾角.....115	圖4.51 車速50km/h,DLC 變化之Kph、Kih 控制器輸出側滾角.....116	圖4.52 車速70km/h,DLC 變化之Kph、Kih 控制器輸出側滾角.....116	圖4.53 車速30km/h,DLC 變化之Kpa、Kia 控制器輸出側滾角.....117	圖4.54 車速50km/h,DLC 變化之Kpa、Kia 控制器輸出側滾角.....117	圖4.55 車速70km/h,DLC 變化之Kpa、Kia 控制器輸出側滾角.....118	圖4.56 車速30km/h,DLC 固定高度輸出之側滾角.....118	圖4.57 車速50km/h,DLC 固定高度輸出之側滾角.....119	圖4.58 車速70km/h,DLC 固定高度輸出之側滾角.....119	圖4.59 車速30km/h,DLC 重心高度變化之輸出側滾角.....120	圖4.60 車速50km/h,DLC 重心高度變化之輸出側滾角.....120	圖4.61 車速70km/h,DLC 重心高度變化之輸出側滾角.....121	圖4.62 車速30km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....121	圖4.63 車速50km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....122	圖4.64 車速70km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....122	圖4.65 車速30km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....123	圖4.66 車速50km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....123	圖4.67 車速70km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....124	圖4.68 車速30km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....124	圖4.69 車速50km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....125	圖4.70 車速70km/h,DLC 變化之重心偏移輸出側滾角.....125	圖4.71 車速30km/h,DLC 變化之路面振盪輸出側滾角.....126	圖4.72 車速50km/h,DLC 變化之路面振盪輸出側滾角.....126	圖4.73 車速70km/h,DLC 變化之路面振盪輸出側滾角.....127	圖4.74 車速30km/h,DLC 輸出之ITAE 值.....129	圖4.75 車速50km/h,DLC 輸出之ITAE 值.....130	圖4.76 車速70km/h,DLC 輸出之ITAE 值.....130	圖4.77 車速70km/h,DLC 重心偏移5 公分輸出之ITAE 值.....131	圖4.78 車速70km/h,DLC 重心偏移15 公分輸出之ITAE 值.....131	圖4.79 車速70km/h,DLC 重心偏移25 公分輸出之ITAE 值.....132	圖4.80 車速70km/h,DLC 路面震盪輸出之ITAE 值.....132	表目錄 表1.1 國內外可變重心輕型載具主要概念車特性.....14	表1.2 用於車體穩定控制之感知器進化表[51] .....16	表2.1 Magic Formula 參數參照表格.....30	表3.1 標致206 相關規格.....59	表3.2 CarSimR車輛模擬軟體之操作手冊定義.....60	表3.3 本研究車輛相關規格表.....61	表4.1 實驗設計控制器參數三階層分布(30km/h) .....95	表4.2 實驗設計控制器參數三階層分布(50km/h) .....95	表4.3 實驗設計控制器參數三階層分布(70km/h) .....95	表4.4 實驗設計所得之PI 控制器參數對應結果(70km/h) .....96	表4.5 PI 控制器參數最佳化計算結果(30km/h).....97	表4.6 PI 控制器參數最佳化計算結果(50km/h).....97	表4.7 PI 控制器參數最佳化計算結果(70km/h).....98	表4.8 實驗設計控制器參數三階層分布(30km/h) .....105	表4.9 PI 控制器參數最佳化計算結果(30km/h).....107	表4.11 實驗設計控制器參數三階層分布(50km/h) .....107	表4.12 PI 控制器參數最佳化計算結果(50km/h) .....107	表4.13 實驗設計控制器參數三階層分布(70km/h) .....108	表4.14 PI 控制器參數最佳化計算結果(70km/h) .....108	表4.10 實驗設計所得之PI 控制器參數對應結果(70km/h) .....108	表4.15 實驗設計控制器參數三階層分布(70km/h) .....111	表4.16 PI 控制器參數最佳化計算結果(70km/h) .....111	表4.17 實驗設計控制器參數三階層分布(70km/h) .....113	表4.18 PI 控制器參數最佳化計算結果(70km/h) .....113
------------------	--	--	--	--	--	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--	---	---	--	------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	------------------------	----------------------------------	------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--

## 參考文獻

本研究旨在建立可變重心車輛運動穩定性之模擬控制研究，建立可變重心車輛運動縱向與橫向動態模擬系統，針對其道路行駛性能如加減速、轉彎、剎車制動以及車身重心變化時之側滾率加以評估比較，並配合適當之控制策略及控制器來進一步達成控制可變重心車輛運動穩定性之車體穩態控制目的。本研究以物件導向模擬軟體建立分析車輛運動變化，建構出可變重心車輛動態系統模擬，包括縱、橫向驅動力、牽引力控制、轉向操控穩定控制、制動力分配控制、輪胎動態模型、橫擺模型、側滾模型等，進行可變重心車輛運動穩定性之車性能與控制策略規劃，比較驗證及分析動態模擬系統。研究模擬可變車身重心高度之車體穩定控制動態分析之關係，利用建立之車輛動態系統模型，觀察在不同車速設定下車身重心高度變化之車輛運動，分析控制參數對橫擺與側向速度影響，根據車輛行駛狀況並配合控制器進行計算，可使可變重心車輛更精確地修正重心位置，以更安全之模式配合車輛動態模擬系統以達到穩定操控行駛之設計要求。