

國立陽明交通大學  
運輸與物流管理學系  
碩士論文

Department of Transportation and Logistics Management

National Yang Ming Chiao Tung University

Master Thesis

緊急車輛與輕軌優先號誌協調之研究

Priority Signal Coordination Between

Emergency Cars and Light Rails

研究生：王凱韻 (Wang, Kai-Yun)

指導教授：王晉元 (Wang, Jin-Yuan)

中華民國一十二年八月

August 2023

緊急車輛與輕軌優先號誌協調之研究

Priority Signal Coordination Between  
Emergency Cars and Light Rails

研究生：王凱韻

Student : Kai-Yun, Wang

指導教授：王晉元 博士

Advisor : Dr. Jin-Yuan, Wang



Submitted to Department of Transportation and Logistics Management  
College of Management  
National Yang Ming Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Traffic and Transportation

August 2023  
Taiwan, Republic of China  
中華民國 一一二年八月

# 緊急車輛與輕軌優先號誌協調之研究

學生：王凱韻

指導教授：王晉元

國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士班

## 摘要

運輸號誌優先系統給予車輛在抵達路口時，號誌為綠燈時使車輛優先通過路口的權利，在公共運輸中，常見公車、輕軌擁有此優先權，以提高和一般車輛的競爭力。除此之外，緊急車輛目前可在紅燈下通過路口，但存在高風險的事故風險，因此緊急車輛也應具備號誌優先的權力，確保安全又可減少旅行時間。本研究之目的為提出判斷邏輯與數學模型，以協調當緊急車輛與輕軌，兩者同時有號誌優先權在路口相遇，如何給出最佳的號誌順序。

本研究分成三個架構進行模擬：緊急車輛優先號誌、輕軌速度調控、緊急車輛與輕軌協調，其中分別建構輕軌速度調控和緊急車輛與輕軌協調的數學模型，並用 Gurobi 求解，透過 Sumo 微軟車流模擬軟體，搭配 Python 裡的 Traci 函數，抓取模擬資料並更改車輛速度、號誌時相。研究結果顯示，緊急車輛優先號誌可減少約 40% 的行車時間、輕軌速度控制方法可以減少約 20% 的一般車輛停等延滯、實現緊急車輛與輕軌之間的號誌協調。

關鍵詞：緊急車輛優先號誌、輕軌速度控制、多種運具優先號誌協調、號誌控制、車隊時間延滯

# Priority Signal Coordination Between Emergency Cars and Light Rails

Student : Kai-Yun, Wang

Advisor : Dr. Jin-Yuan, Wang

Department of Transportation and Logistics Management  
National Yang Ming Chiao Tung University

## Abstract

Transportation signal priority system grants vehicles the right of way to pass through intersections with green signal phases upon their arrival. In public transportation, this privilege is commonly extended to buses and trams to enhance their competitiveness against regular vehicles. Additionally, emergency vehicles are currently allowed to cross intersections during red signal phases, although this practice poses a significant risk of accidents. Therefore, it is imperative for emergency vehicles to also possess signal priority rights to ensure safety and reduce travel time. The aim of this study is to propose decision logic and mathematical models to coordinate scenarios in which both emergency vehicles and trams, both equipped with signal priority, converge at intersections, determining the optimal sequence of signal phases.

The study is divided into three frameworks: emergency vehicle signal priority, tram speed control, and signal coordination between emergency vehicle and tram. Mathematical model are design for tram speed control and signal coordination between emergency vehicle and tram. Gurobi is used to solve these models, and the Sumo, microscopic traffic network, with Python's Traci functions is utilized to collect simulation data and modify vehicle speeds and signal phases. The research demonstrates that implementing emergency vehicle signal priority can lead to a reduction of approximately 40% in travel time. Tram speed control method can decrease delay for regular vehicles by around 20%. Moreover, effective coordination of signal control between emergency vehicles and trams is achieved.

Keywords : emergency vehicle preemption, tram speed control, coordination of multiple modes of transportation priority signals 、 signal control 、 time-in-queue delay

## 誌 謝

感謝指導教授王晉元博士，不論是在研究過程或生活方面，皆給予我督促與指導。另外，感謝口試委員：張建彥博士及陳彥佑博士，對本論文的指導和建議，使得論文順利完成。

在研究所的兩年中，感謝和我一起進入研究的同窗：至婕、珺蓉、彩榛、瑄汝、暄筑、惟心、濬得、乙宙、家榮、丞翊等願他們將來一帆風順。另外，感謝同實驗室的學長姊：語芳、日隆、子賢、品蓁帶領做計劃，斯涵、書豪、欣妤一起奮鬥，學弟妹：雅潔、蘇旆、子傑、宣宇助教上的合作，使我在這兩年中留下美好及深刻的回憶。

最後，感謝我摯愛的家人，無怨無悔的支持我：連假時，爸爸來回高雄和新竹，讓我不用搶票，人擠人回家；媽媽隨時補齊生活用品，並關心我的身體狀況；在新竹的哥哥的緊急幫忙；弟弟每次陪我參加活動。因為有他們，我能無後顧之憂的完成學位，能與他們分享我所有的喜怒哀樂，是我人生最大的幸福。

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景與動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究範圍 .....	3
1.4 研究內容與流程 .....	3
<b>第二章 文獻回顧 .....</b>	<b>6</b>
2.1 運輸號誌優先系統 .....	6
2.2 緊急車輛路口優先號誌 .....	9
2.3 多種運具路口優先號誌 .....	10
2.4 輕軌速度控制 .....	11
2.5 績效評估 .....	12
2.6 小結 .....	12
<b>第三章 研究方法 .....</b>	<b>14</b>
3.1 蒐集路網時制、幾何線型 .....	15
3.2 路網繪製、資料抓取 .....	15
3.3 緊急車輛優先號誌(架構一) .....	17
3.4 輕軌速度調整數學模型(架構二) .....	20
3.5 緊急車輛與輕軌協調數學模型(架構三) .....	27

<b>第四章 模擬測試與分析 .....</b>	<b>30</b>
4.1 高雄捷運環狀輕軌.....	30
4.2 肇事路口及輕軌行經路口.....	32
4.3 救護車優先號誌與輕軌協調之模擬路段.....	33
4.4 輕軌速度控制之模擬路段.....	35
4.5 模擬情境.....	37
4.6 模擬結果.....	37
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>51</b>
5.1 結論.....	51
5.2 建議.....	52
<b>第六章 參考文獻 .....</b>	<b>53</b>



# 表目錄

表 3.1 道路資訊.....	15
表 3.2 緊急車輛與輕軌位置抓取.....	16
表 3.3 Traci 函數.....	16
表 4.1 輕軌速度設定參數.....	31
表 4.2 高雄主幹道平均流量.....	34
表 4.3 輕軌測試路段平均流量.....	36
表 4.4 各模擬情境.....	37
表 4.5 緊急車輛平均行車秒數(離峰時段).....	38
表 4.6 緊急車輛平均行車秒數(尖峰時段).....	38
表 4.7 支道平均停等秒數(離峰時段).....	39
表 4.8 支道平均停等秒數(尖峰時段).....	39
表 4.9 優先權對緊急車輛平均行車秒數比較.....	39
表 4.10 優先權對知道平均停等秒數比較.....	40
表 4.11 第 22 秒出發輕軌三種方法比較表.....	45
表 4.12 第 90 秒出發輕軌三種方法比較表.....	46
表 4.13 輕軌三種方法比較.....	47
表 4.14 輕軌三種方法對一般車輛平均停等秒數(離峰).....	47
表 4.15 輕軌三種方法對一般車輛平均停等秒數(尖峰).....	47
表 4.16 緊急車輛與輕軌協調測試結果.....	48

# 圖目錄

圖 1.1 民國 101 年至 111 年緊急救護出勤次數.....	2
圖 1.2 研究流程圖.....	5
圖 2.1 優先號誌—延長綠燈時相.....	7
圖 2.2 優先號誌—縮短紅燈時相.....	8
圖 2.3 優先號誌—插入優先方向之時相.....	8
圖 2.4 優先號誌—時相對調.....	9
圖 2.5 尋輕軌的最佳軌跡.....	11
圖 3.1 研究架構.....	14
圖 3.2 Sumo 模擬路口範例圖.....	16
圖 3.3 架構—流程圖.....	18
圖 3.4 緊急車輛於尖峰提出優先權位置.....	20
圖 3.5 輕軌加速—速度與時間關係圖.....	21
圖 3.6 輕軌減速—速度與時間關係圖.....	22
圖 3.7 輕軌減速—三段時間速度與時間圖.....	22
圖 3.8 架構二流程圖.....	26
圖 3.9 架構三流程圖.....	29
圖 4.1 高雄捷運環狀輕軌路網圖.....	30
圖 4.2 高雄輕軌與一般車輛於十字路口、T 字路口衝突圖.....	31
圖 4.3 輕軌通過路口與醫院、消防局所在位置、易肇事路口.....	33
圖 4.4 行經凱旋四路與中山三路口救援路線圖.....	34
圖 4.5 輕軌速度控制路線圖.....	36
圖 4.6 輕軌以速 10 公里行駛速度時間關係圖.....	41
圖 4.7 輕軌以時速 10 公里行駛距離時間關係圖.....	41
圖 4.8 輕軌站中多停靠速度時間關係圖.....	42

圖 4.9 輕軌站中多停靠距離時間關係圖.....	43
圖 4.10 輕軌加速速度時間關係圖.....	44
圖 4.11 輕軌加速距離時間關係圖.....	44
圖 4.12 第 22 秒出發輕軌三種方法距離時間關係圖.....	45
圖 4.13 第 90 秒出發輕軌三種方法距離時間關係圖.....	46
圖 4.14 輕軌早救護車 3 秒提優先權速度.....	50



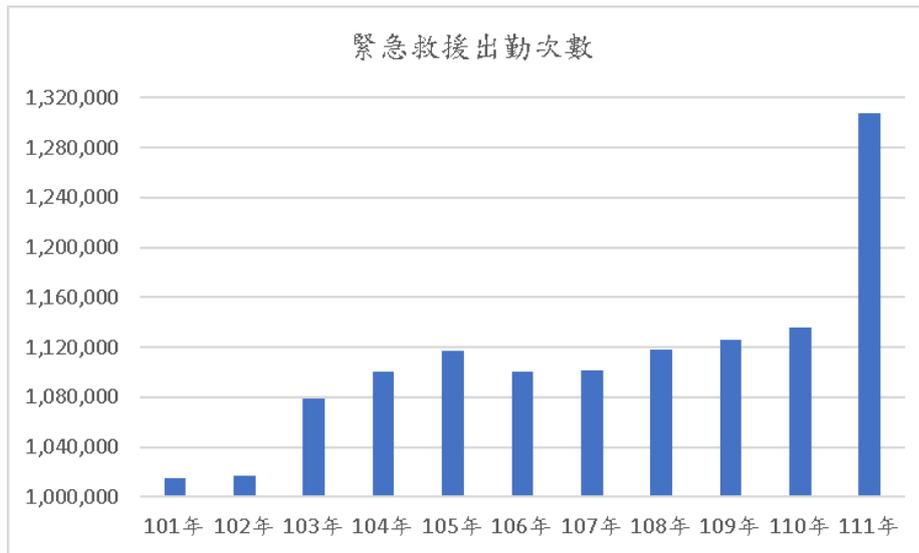
# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

隨著私人運具擁有數日益增加，都市道路已無法負荷龐大的車流量，公共運輸為私人運具的替代方案，能有效地緩解交通壅塞。臺灣常見公共運輸為捷運、公車和輕軌，其中輕軌目前已於高雄、淡水地區營運。在這些公共運輸中，捷運為 A 型路權，行駛在獨立的路軌上不受到一般車輛的影響，而公車和輕軌則屬於 B、C 型路權，需要與其他車輛共用道路。為了提高公車和輕軌與私人運具之間的競爭力，各地根據需求實施公車和輕軌優先通過路口的權力：當公車和輕軌即將抵達路口時，路口時相轉換到與其不衝突的時相，讓它們能夠快速通過而不需要等待紅燈。這樣的措施可讓公共運輸節省旅行時間，提高效率和民眾搭乘意願。

當運具擁有優先通過路口的權力，它們在路口時不需要太多減速或停下，可以維持一定的速度通過。然而，這也帶來了一些安全上的考慮，特別是當司機面臨危險時，不容易立即停下。在公共運輸中，輕軌相比於公車需要更長的時間和距離來進行減速，因為一般的機動車輛最大的緊急減速可超過  $5m/s^2$ ，而輕軌的最大減速度只有  $2.7 m/s^2$ 。由於輕軌體積大、車身長、載客多，因此在遇到緊急事故時更難迅速避讓，可能會導致更嚴重的交通壅塞或增加事故發生的風險，進而造成更多的傷亡人數。

除了討論公共運具擁有優先權外，本研究認為緊急車輛也應該擁有號誌優先的權力。根據內政部消防署的緊急救護統計，在過去的十年間，緊急救援的出勤次數逐年增加，從 101 年的 1,014,909 次至 111 年的 1,307,594 次，增幅約為 28.6%，如圖 1.1 所示。隨著民眾對緊急救援需求的增加，緊急車輛出現在道路上的頻率也隨之增多。因此，在路上行駛的車輛和行人需要時刻留意緊急車輛的存在，以確保它們順利執行救援任務。緊急車輛在出勤時需要爭取寶貴救援的黃金時間或確保警員執行任務的效率，因此希望能夠以最短的旅行時間到達案件現場、將傷患送往醫院。目前，在緊急車輛出勤時，通常透過警示燈和警笛聲告知前方車輛，要求它們讓出道路空間以讓緊急車輛優先行駛。除此之外，當緊急車輛遇到紅燈時可以優先通行，而不需要與一般車輛一起等待，這樣可以減少運送時間，快速抵達目的地。



圖片來源：內政部消防署

圖 1.1 民國 101 年至 111 年緊急救護出勤次數

然而，目前緊急車輛在優先通過路口時，為確保安全通常仍需遵循安全程序，遇到紅燈時，緊急車輛會減速並確認其他方向的車輛是否有來車，然後再加速通過路口。這個減速、確認、再加速的過程耗費救援的時間，影響了救援的效率。當在遇到較多紅燈的情況下，車輛必須在每個路口都減速，相較於遇到全部都是綠燈的情況，將花更多行駛時間。除此之外，儘管緊急車輛在過紅燈路口前確認其他方向是否有來車，但無法保證其他方向在綠燈時不會有車輛來不及反應而撞上緊急車輛，這可能導致救援行動停頓或引發更多問題。例如，救護車在送醫過程中發生車禍，導致患者不治，救援人員須承擔責任或救援人員自身也需要被搶救，這對救援人員來說增加了壓力又不安全。

基於以上考量，本研究將針對緊急救護車輛即將抵達路口的情況，透過實施緊急號誌轉換來確保緊急車輛過路口時皆能享有綠燈，以大幅提升緊急救援的安全性和效率。除此之外，本研究還將結合同時具備號誌優先權的輕軌，如前述所提，輕軌剎車的時間與距離皆比一般機動車輛更長。因此，當緊急車輛和輕軌於路口相遇時，如何妥善安排路口號誌，給予最佳的時相順序，避免兩者發生擦撞並讓雙方擁有最佳的行車效率為本研究探討議題。

## 1.2 研究目的

當行駛方向衝突且同時擁號誌優先權的輕軌與緊急車輛，前後抵達路口時皆提出優先權，號誌應先給誰綠燈讓其先通過，傳統遵守先到先服務，但未考慮車種優先權的等級，緊急車輛等待車身長的輕軌通過，可能造成整體效益不佳。研究中將優先等級加入路口號誌判斷中，因緊急車輛等級最高，應讓緊急車輛先通過輕軌後通過，利用緊急車輛和輕軌即時的位置與速度，輕軌速度和行駛距離可

以提前做出相應的對策。例如，當輕軌了解前方路口即將遇到緊急車輛時，可以在前一站稍作停留，避開即將到來的緊急車輛，同時增加在站內的充電時間。這樣的調整措施有助於避免輕軌和緊急車輛在路口交會時發生衝突，提高了兩者行車的效率，確保了交通的順暢。

### 1.3 研究範圍

目前臺灣的輕軌運營僅涵蓋高雄市和新北市淡水區兩個地區，由於高雄市的輕軌系統最早開始運營，大部分市民已經熟悉並使用該公共運輸系統，因此本研究範圍為高雄市的路網，緊急車輛與輕軌相交的路線。除了特別關注在輕軌和緊急車輛相遇的路口情況，這些路口同時存在一般車輛，因此模擬路網中，還將延伸到外部數個相關路口，以模擬實際情境中的複雜交通情況。

### 1.4 研究內容與流程

根據研究動機與目的，將研究的流程架構圖整理如圖 1.2，並對各流程說明如下：

#### 1. 確定研究主題

為提供緊急車輛更安全、快速的旅行過程，將利用號誌轉換提供緊急優先號誌，結合輕軌的優先通行特性，探討在各自不同出發時間點，緊急車輛與輕軌相遇、通過路口花費時間的情境下，如何安排它們的通行順序。

#### 2. 文獻回顧

回顧先前的文獻，統整號誌時相的轉換方法，驗證緊急車輛優先號誌的優勢，提供研究對緊急車輛號誌轉換的邏輯設計參考。另外，針對輕軌速度設計、優先權的運作，了解如何調整輕軌速度，為緊急車輛與輕軌相遇情景中，輕軌可調整的研究方法提供參考。

#### 3. 路口繪製

利用 Sumo 微觀車流模擬軟體繪製路網，篩選高雄輕軌和緊急車輛會發生衝突之路口，規劃緊急車輛行車路線有經過衝突路口，模擬路徑的車流量、號誌時相設置、輕軌行駛速度，估計緊急車輛與輕軌通過該路口的時間，包含不同時段下緊急車輛的出發時間，以模擬不同情境。

#### 4. 號誌時相轉換

在緊急車輛即將到達路口前，確保其行駛方向的信號燈為綠燈，其中需討論緊急車輛距離路口多遠時，啟動號誌轉換的機制。如果轉換得太早，可

能會影響其他方向的車輛，導致更多車輛在路口前等待；如果轉換得太晚，緊急車輛可能需要等待前方車輛通過，無法實現減少旅行時間的目標

## 5. 數學模型建構

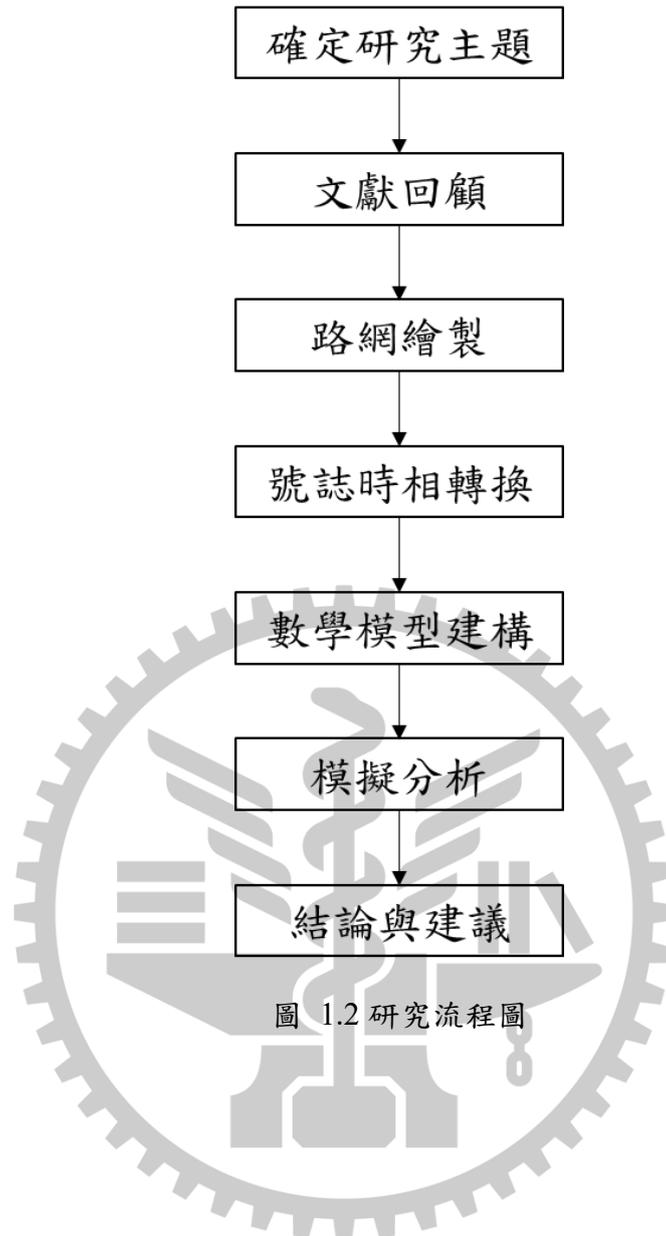
透過輕軌速度控制的數學模型，可以計算在特定時間內需行駛給定距離的情況下，輕軌應該如何進行加速、減速以及在站中停留等操作，並在模擬中測試計算的速度是否符合所需條件。除此之外，儘管輕軌和緊急車輛都享有號誌優先權，但兩者的優先級存在差異，因此建立數學模型，以找到存在衝突方向的緊急車輛與輕軌同時需要通過路口的情況下，如何轉換信號燈時相的最佳安排。

## 6. 模擬分析

透過號誌的轉換，為緊急車輛提供優先安全通過路口的綠燈時相，比較在緊急車輛未有優先號誌和有優先號誌，兩者緊急車輛的旅行時間，以了解行車時間減少的程度。另外，分析其他車輛因優先號誌受到影響的程度以及延滯時間。同理，比較輕軌有速度控制與未有速度控制之下，輕軌的旅行時間與一般車輛的延滯。最後，分析研究中使用的數學模型是否可提高緊急車輛與輕軌的行車效率。

## 7. 結論與建議

通過分析結果，呈現緊急車輛優先號誌和輕軌速度控制帶來的效益，同時整理研究中提出的輕軌速度控制與優先號誌數學模型，提高兩者的行車效率，避免兩者發生事故機率，並對未來可延伸方向提出建議。



## 第二章 文獻回顧

為了深入研究當緊急車輛和輕軌都擁有路口優先權時，在路口相遇的情況下，如何避實現最佳的號誌控制。首先，2.1 節將探討優先通過路口的號誌系統，並詳細探討常見的時制轉換方法，為後續的研究方法提供參考依據。接著 2.2 與 2.3 節，由緊急車輛優先號誌和多種運具優先權協調的相關文獻，了解優先號誌系統所能帶來的實際效益，以及在模擬情境中的運作方式。因考量緊急車輛和輕軌皆有優先權，並且緊急車輛等級最高，因此輕軌需做出對應的速度改變，2.4 節將回顧相關文獻。最後 2.5 節，將使用常見的績效指標來評估，驗證本研究目標的有效性。

### 2.1 運輸號誌優先系統

隨著時代和社會生活方式的變遷，不同路口和各類型的車輛總需求逐漸超越原本道路的容納能力，成為需要解決的一個重要問題。近年來，為了讓特定的車種能夠更快速、更安全地通過路口，運輸號誌優先系統(Transit Signal Priority, TSP)被提出來實現這一目標，該系統在路口附近設置偵測器，當偵測到特定車輛接近路口時，優先轉換號誌使該車輛的行進方向獲得綠燈，其他方向的車輛須等待，其通過才能再通過路口。這種運輸號誌優先系統車輛可減少旅行時間，主要應用於大眾運輸工具，如輕軌和公車，以提高其服務水準和競爭力。除此之外，可根據不同地區的需求，也可以針對行人或貨車等車輛給予號誌優先權，以確保安全和方便。優先權可分為被動式優先(Passive Priority)和主動式優先(Priority)[1][9]，以下分別說明：

#### 1. 被動式優先

根據車輛在道路上歷史交通資料、路段周圍地標、土地利用情況等，譬如考慮到附近有商場的公車站，公車停靠時間較長，因而預測出車輛到達路口的時間，再將車輛優先號誌整合入路口號誌時制中，以在預測的時間內讓特定車輛優先通過路口。此方法操作容易、成本低，不需要安裝過多偵測器，但未考量到即時交通路況，若有較大的誤差，導致特定車輛無法在後續路口和原先的優先號誌相遇。被動式優先方法通常應用於大眾運輸系統的續進，特別是在多個連鎖的路口。

#### 2. 主動式優先

主動式優先會在離路口一段距離安裝設偵測器，當偵測到特定車輛接近時，會向路口的號誌發送優先通行的請求，路口的號誌根據這個請求來調整信號，使得優先車輛的行進方向得到綠燈，特定車輛可以順利通過路口，達到優先通行的目的。一般而言，主動式方法優於被動式，因為它考慮了即時的交通狀況，提供的

優先權更加準確，但其需要完整的轉換號誌邏輯及高成本的設置，以下為主動式常見的號誌轉換方法：

### (1) 綠燈時相延長

當偵測器感應優先車輛即將抵達路口時，路口號誌為優先車輛行進方向的綠燈時相，但剩餘燈秒數無法讓優先車輛完全通過路口，則延長綠燈秒數以確保其可以安全通過，可避免優先車輛需多停等一整個紅燈時相。但延長綠燈的時間有一定的限制，不能超過最長綠燈的時間，避免對其他方向的車輛造成過大的延滯。

方法如圖 2.1 所示，在正常情況下(黑線)，車輛在紅燈時到達路口，按照原來的時制行駛，未有優先權；優先權情況下(綠線)，當偵測器感應到優先車輛(紅色點)時，延長綠燈秒數方法，使在原先應為紅燈時相保持綠燈讓優先車輛通過，減少因等紅燈而產生的停等時間。

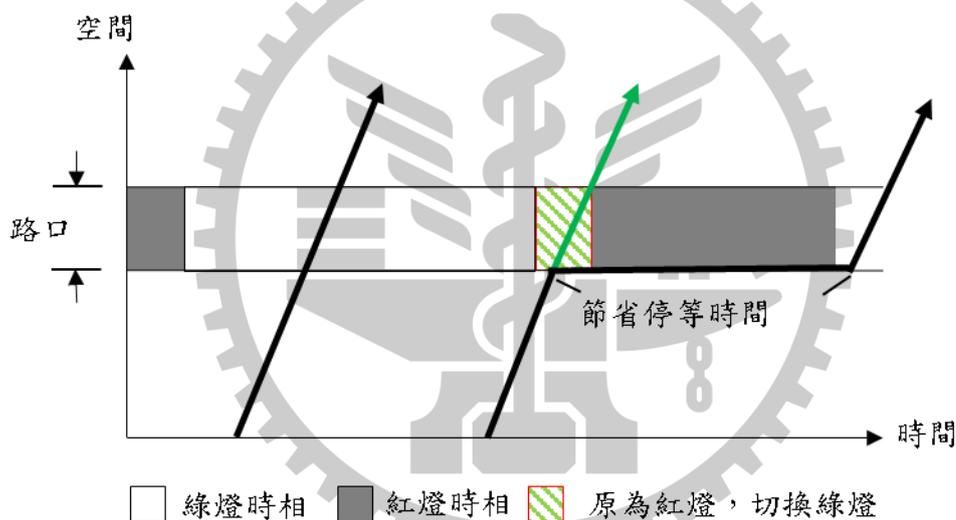


圖 2.1 優先號誌—延長綠燈時相

### (2) 紅燈時間縮短

當偵測器感應優先車輛即將抵達路口時，路口號誌為優先車輛行進方向的紅燈時相，代表優先車輛需停下等紅燈結束，為了實施優先通過策略，在確認紅燈已超過最短紅燈的限制之後，將紅燈直接切換為優先車輛的綠燈，使優先車輛通過路口。此方法須注意，確保不會對與優先車輛衝突的方向造成過大的延滯，因此最短紅燈的限制目的為至少給衝突的方向一定的綠燈秒數，並且在流量大的路口，可能需要在下一個週期時進行綠燈補償，以確保維持交通流暢。

方法如圖 2.2 所示，在正常情況下(黑線)，車輛在紅燈時到達路口，按照原來的時制行駛，未有優先權；優先權情況下(綠線)，當偵測器感

應到優先車輛（紅色點）時，紅燈切換為優先車輛的綠燈。

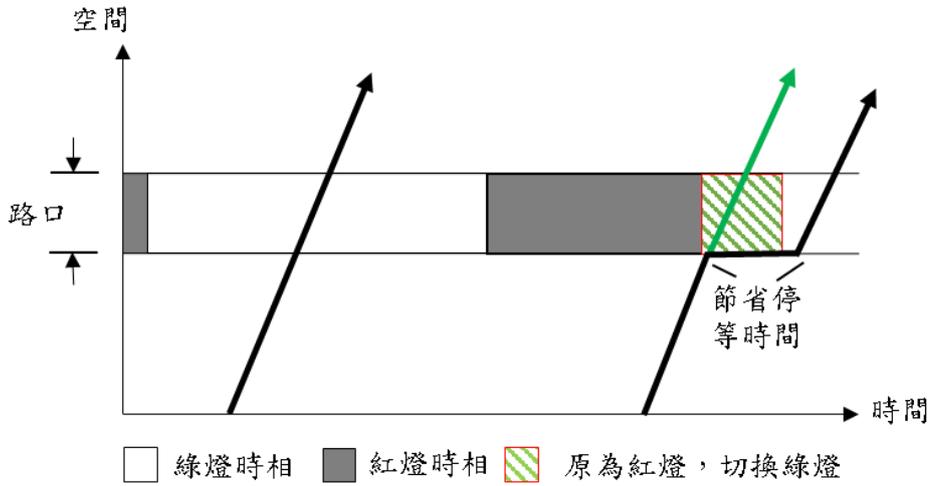


圖 2.2 優先號誌—縮短紅燈時相

### (3) 插入優先方向綠燈

當偵測器感應優先車輛即將抵達路口時，路口號誌為優先車輛行進方向的紅燈時相，且剩餘紅燈秒數還很長，可能原因為該路口涉及多個方向或時相，選擇紅燈時間縮短方法會造成其他方向嚴重的停等延滯，因此在紅燈中間插入優先車輛的綠燈，等優先車輛通過後再還回原時相。除此之外，如輕軌路線可能會斜切過路口，與各方向車輛皆衝突，輕軌時相設置為隱藏專用時相，只有在輕軌到達時才會啟用。

方法如圖 2.3 所示，在正常情況下（黑線），車輛在紅燈時到達路口，按照原來的時制行駛，未有優先權；優先權情況下（綠線），當偵測器感應到優先車輛（紅色點）時，紅燈切換為優先車輛的綠燈，再切換回原先的紅燈時相。

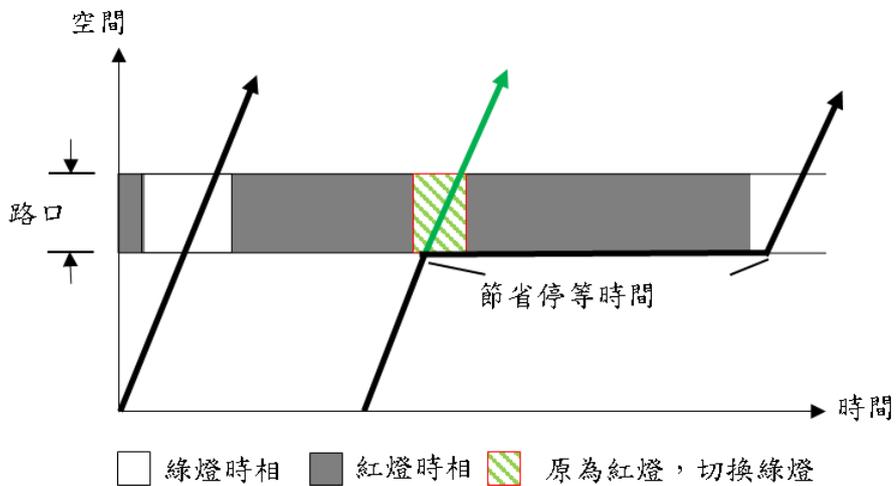


圖 2.3 優先號誌—插入優先方向之時相

#### (4) 時相對調

此方法適用於當路口的前後時相綠燈方向有微小的差異，例如，某一刻路口號誌即將轉換為前一個時相，但優先車輛需要的是後一個時相，這時可以將兩者的時相進行對調。圖 2.4 所示舉例，優先車輛方向北向直走，在原先時相順序中需等候一個時相，前後時相方向類似，因此可以將兩者對調，先開放後面的時相。此方法對路口相對影響小，時制的週期也較不會增加秒數。

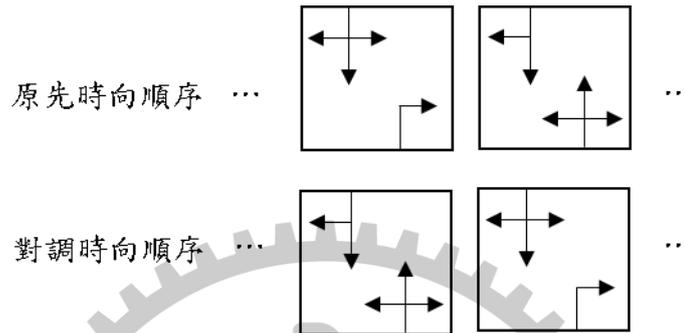


圖 2.4 優先號誌—時相對調

## 2.2 緊急車輛路口優先號誌

隨著汽車擁有量增加，加上臺灣機車密度高，道路車輛越多也容易造成車禍或事故發生，緊急車輛的出勤次數跟著增加。然而，緊急車輛反應、運送時間和道路車輛數量緊密相關，越多車輛旅行時間增加，特別是在尖峰時間段，當前方車輛無法立即消散讓路，緊急車輛就必須等待。另外，伴隨著老齡化社會，對救護車的需求持續增加，儘管需求增加，道路上的車輛擁擠問題仍然存在，這樣的情況導致緊急救護車輛需要花費更多時間來通行，從而影響了對傷患的快速救援。

Shuetsu Shibuya 等人[8]以日本緊急車輛搶道系統(FAST)模擬緊急優先號誌，其好處為降低緊急車輛通行時間、預防緊急車輛發生車禍、減少民眾與救護人員行車時的壓力、提高經濟效益如逮捕率、救援任務。FAST 系統結合提供最佳路徑和緊急號誌的轉換，當收到緊急需求時，根據路上的偵測器每 5 分鐘回傳的道路資訊，結合準備派出的緊急車輛位置，推薦最快速到現場的路徑，其推薦路徑同時考量是否有其他緊急車輛通過，避免多輛緊急車輛相遇影響彼此。當路口附近偵測器偵測緊急車輛到來，透過延長綠燈或減少紅燈讓緊急車輛行駛方向綠燈，在日本東京、千葉縣進行了實際驗證，分別成功縮短了平均旅行時間 14%和 12%，證實緊急車輛優先號誌效率方面的有效性。

Noorli 等人[7]以多倫多市 20 個不同交通密度區域為案例，透過車聯網概念

建立緊急車輛與號誌之間的聯繫，利用 Sumo 車流模擬軟體實作，提前偵測緊急車輛未來行駛路線上車輛排隊長度，當長度超過容忍值，先行開放綠燈疏散車流。研究結果對比了三種情境：未進優先行號誌、緊急車輛優先號誌（未提前偵測）、緊急車輛優先號誌（提前偵測排隊長度），在提前偵測排隊長度的情況下，緊急車輛的平均旅行時間相較於未進優先行號誌的情況下減少了 46.7%，相較於僅在緊急車輛即將到達時進行切換的情況下減少了 25.3%。除此之外，研究還進一步評估了緊急號誌對其他車輛的影響，這是通過其他車輛的延滯時間來衡量的。在高流量地區，雖然其他車輛的延滯時間增加了 3.75%，但緊急車輛的旅行時間卻減少了 28.6%。這表明提前偵測排隊長度並調整緊急號誌的做法可以顯著降低旅行時間，在高流量的都會地區尤其適用。

## 2.3 多種運具路口優先號誌

優先車輛從提出優先權到完全通過路口所需的時間被稱為優先權的延滯 (priority delay)。此常用於觀察當有衝突方向的不同運具，如公車對卡車、公車對公車，同時於路口提出優先權時，號誌系統的轉換情況，因為號誌只能回應一個優先要求，多數是遵守先到先服務 (first-come-first-serve) 的原則，但對整體的優先延滯未必是最佳。舉例來說，假設有兩台公車相繼到達路口，北向的比東向的早到，因此先提出了優先權，原本東向綠燈切成北向綠燈，之後再切回東向綠燈，需轉換兩次號誌且包含清道的時間。相較之下，若北向公車稍微等一下，讓東向公車先通過，再轉換成北向綠燈，整體的優先延滯較低。除此之外，不同優先等級對優先延滯有影響。正常來說，優先等級從高到低順序為緊急車輛、輕軌、公車、行人、一般車輛，因此當不同等級車輛相遇時，透過權重的計算方式，評估整體優先延滯，譬如緊急車輛比公車晚到，但應先讓緊急車輛通過後再給公車。

Qing 等人[6]探討多種皆優先權，包含公車、行人、一般車輛的連鎖，模擬動態號誌，時相會根據一般車輛的停等長度計算出該時相綠燈秒數。當欲通過路口時會向號誌申請優先權，若是有多運具要求優先權，利用混和整數線性 (MILP) 將優先權分等級以協調，若是協調未成功將在目標式添加懲罰值。於亞利桑那州模擬中只先放入公車、行人、一般車輛於路網內，優先等級依序為公車、行人、一般車輛，結果顯示提出的數學模式成功以更少延滯時間：公車的優先權延滯與原先先到先服務降低 25.9%、行人的則降低 14%，解決了多運具爭先通過路口情況，其中研究提出的方向已於該州現實中採用，有極大優勢發展於其他優先權運具中。

Zamanipour 等人[12]設計一個數學模型獲得一般車輛的平均延滯與整體優先延滯的帕雷托效率 (Pareto efficiency)。以卡車、運送車為擁有優先權的車種測試，獲得這些測試的帕雷托前沿 (Pareto frontier points)，不同的決策且決策中車輛的權重不同，會對應有不同的帕雷托前沿，提出優先權的運具會依據最佳解在不

同週期通過路口，此權重和對應的解可以幫助決策者制定一個偏好某種模式的政策。研究中測試 22 種不同優先權提出時間的組合，透過帕雷托前沿得出一般車輛的延滯不少於 19.24 秒。另外，若運輸車車輛比卡車輛多，但卡車的權重是運輸車的 5 倍，則優先讓卡車過，證實不同運具的權重的設計頗為重要。

## 2.4 輕軌速度控制

Albrecht 等人[4] 研究中提出速度優化，優化軌道系統的營運目標和時間，改善軌道的存在問題：(1)班次增加，導致網絡衝突和連續延滯提(2)旅客與政府機構不斷提高的質量的要求(3)能源成本增加。對軌道運具的速度和停靠時間的控制來增加運量，並降低能源消耗，研究介紹三個不同軌道如何控制軌道車輛的軌跡，滿足最低化的能源消耗及最大化的到站準確率。當中，輕軌因有優先權，會影響路口的時制，因此若可以在前一站通知下方路口的號誌，計算是否加速可以在綠燈時通過路口，給予最佳的速度建議讓輕軌通過而不影響到時制，如圖 2.5 所示，除了速度有最大時速 50 公里、最小時速 27.5 公里的限制，同時受時間、距離的限制，以最小化影響到的車輛。

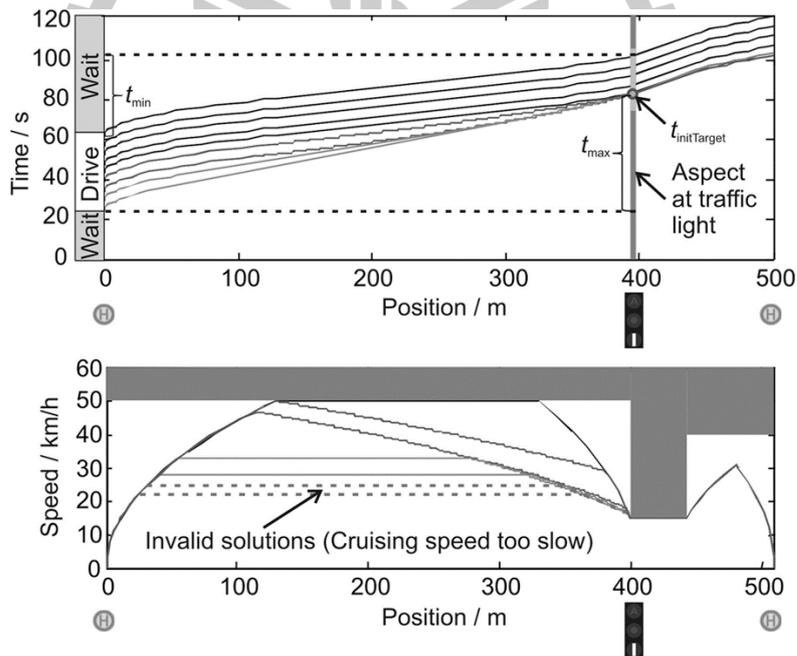


圖 2.5 尋輕軌的最佳軌跡

Cats[5]為解決大眾運輸到站的不確定性，利用即時的預測到站模型提高旅客的滿意度、增加了乘客量、減少等待時間。以挪威的某一路線輕軌作為實驗對象，收集六個月的輕軌資訊，設計由不同距離、時間計算應行駛的速度公式，並追蹤駕駛員的反應，因駕駛員對不同速度狀態的反應不相同直接影響到輕軌到站的時間點。研究結果顯示，速度控制方法預測的到站時間，有高達 89% 的誤差在 1 分鐘以內，此方法可減少業者在營運、旅客等待班次上時間的不確定性，雙方皆贏

的局面。

## 2.5 績效評估

交通部運輸研究所[2]針對號誌路口績效進行評估，考量安全、效率、環境三種指標。針對緊急車輛和輕軌的優先號誌協調，本研究重於效率方面的績效，其中再分為旅行時間與延滯秒數，具體解釋如下：

### 1. 旅行時間

緊急車輛的優先號誌主要為減少緊急車輛在路上的旅行時間。透過確保緊急車輛所通過的路段都是綠燈，大幅減少其旅行所需的時間，省下的時間可提高搶救成功的機會，將分別計算在有緊急號誌與無緊急號誌的情況下，比較緊急車輛的旅行時間，評估緊急號誌設置的效果。

### 2. 延滯秒數

車輛平均停等時間和排隊長度皆可作為指標，若路段排隊長度已超過其綠燈可通行車輛數，未能在這次週期通過的車輛變成剩餘車輛，須等下一綠燈方可通過，可能造成車輛排隊長度增加，尤其尖峰時間造成嚴重的回堵。因為車輛等紅燈為主要增加其旅行時間因子，因此利用停等百分比可以了解緊急號至影響其他方向之車輛。

## 2.6 小結

Watanab 等人[11] 探討救護車使用警示燈及警示聲是否減少發生事故機率，以 2016 年美國緊急醫療服務系統的統計數據分析。研究結果顯示，使用警示燈及警示聲反而比未有警示更容易發生事故，當救護車載著病患前往醫院，未使用警示的情況每 100,000 趟會有大約 7% 發生事故，有使用警示之救護車其發生事故卻增加到了 16.5%。作者提出衡量，是否為了只爭取少時間在紅燈下讓緊急車輛通過路口，反而增加救援人員、病患在路上發生事故之風險。

綜上所述，從文獻回顧可以得知，緊急號誌的開放能同時減少旅行時間並增加救護人員的安全性，因此緊急號誌的設置具有重要性，號誌轉換方法與判斷邏輯可以為接下來研究方法做參考。在路口績效的文獻回顧中，因此當緊急號誌開放，會造成其他方向造成影響，停等秒數增加造成廢棄排放量增加、旅行時間大幅增加等影響，因此適合用來評估緊急號誌的績效。

在現有的研究中，大多關注於緊急車輛和一般車輛之間影響，緊急號誌會導致一般車輛等待，然而，隨著公共運輸工具（如公車、輕軌）也開始實施路口優先權，關於多個優先權請求同時影響一個路口的研究相對較少，尤其是涉及緊急

車輛和輕軌等不同類型的車輛。除此之外，這些不同優先權之間相互影響的協調策略也鮮少被提及。本研究針對緊急優先號誌中，不僅將一般車輛納入考慮，還將輕軌納入模擬分析，並透過輕軌的速度控制以達到路口最佳的優先延滯。以高雄市的路網為模擬對象，固定的時制規劃，緊急車輛與輕軌的優先權如何進行協調，規劃最佳的號誌控制。



### 第三章 研究方法

本研究的目的是在於解決緊急車輛在擁有優先號誌的情況下與輕軌在同一路口相遇時，路口的號誌如何最佳的轉換和輕軌速度的調整。為達成此目標，研究方法先討論「緊急車輛優先號誌」和「輕軌速度調控」的流程，最後結合這兩個部分概念，設計「緊急車輛與輕軌協調」的流程，以實現緊急車輛和輕軌在同一路口相遇時的順暢協調，從而優化整體交通流動效能。研究架構如圖 3.1。

1. 緊急車輛優先號誌：為了驗證緊急優先號誌的效果，可大幅減少緊急車輛的行車時間，模擬中規劃緊急車輛起訖路線，在行經路徑比較無優先號誌與有實施優先號誌，兩種情境下緊急車輛的行車時間，後續以**架構一**代表。
2. 輕軌速度調控：當輕軌即將到達路口，且路口號誌當下非輕軌共用時相，輕軌會立即提出優先權而使一般車輛的停等時間增加，透過數學模型計算如何微調輕軌的速度，在輕軌共用時相通過路口，從而降低輕軌提出優先權的頻率，且減少對各路口一般車輛的影響，後續以**架構二**代表。
3. 緊急車輛與輕軌協調：當緊急車輛與輕軌同時於路口相遇，且雙方行進方向有衝突，運用優先等級控制的數學模型，得出最佳的緊急車輛和輕軌的行進次序與號誌轉換順序。這一部分結合了「緊急車輛優先號誌」和「輕軌速度調控」兩個流程的概念，後續以**架構三**代表。

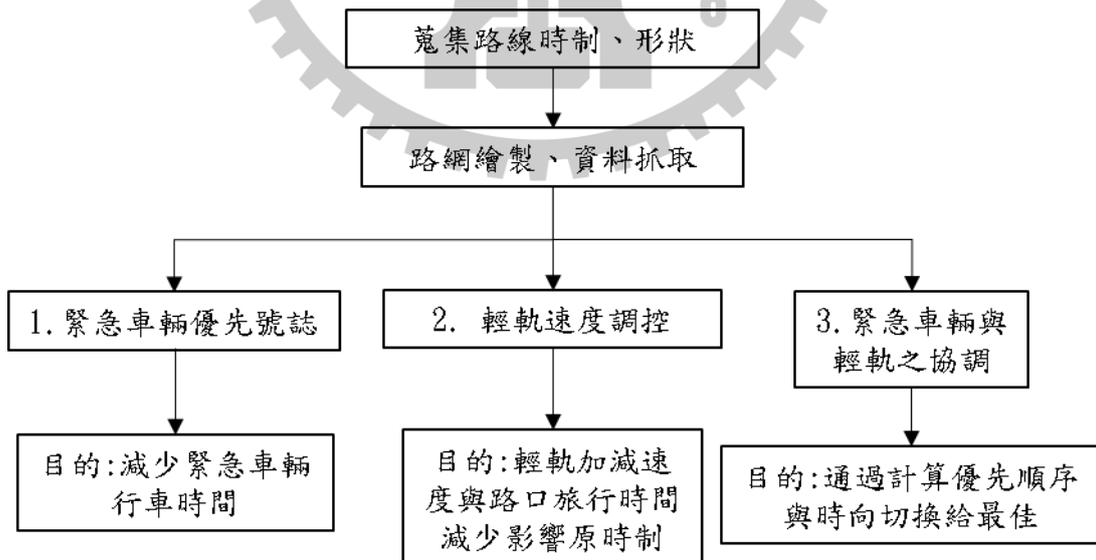


圖 3.1 研究架構

### 3.1 蒐集路網時制、幾何線型

規劃要模擬的路徑後，為了繪製路網圖，了解路線經過的路口數後，應蒐集以下資訊，以表 3.1 說明：

表 3.1 道路資訊

項目	資訊
路的長度	路口之間的距離，以米為單位
道路幾何	十字路口、T 字路口、多方項路口
車道數	車道數、專屬左右轉道
車流量	尖離峰通過路段的車輛數
轉彎率	路口進行轉彎的比例、禁止左、右轉
路口時制	時制規畫、各個方向通行順序及時長

### 3.2 路網繪製、資料抓取

研究的路網以 Sumo 來繪製。Sumo(Simulation of Urban Mobility)是由德國太空中心於 2001 年開發的微觀車流模擬軟體，可以進行車流量、不同交通運具於路網中呈現，其內建圖形化程式 NETEDIT 用於畫路網：車道數、路口樣式、路線和路線連結、號誌秒數規劃、公共運輸站牌設置等；車流文件則輸入車流量、轉彎率、公共運輸車長和到站資訊、偵測器裝設等，兩者結合便可繪製出精簡的路網。

除此之外，透過 Traci(Traffic Control Interface) 界接於 Python 中，可以針對不同需求利用函數讀取資料，像是每台車的車速、每台車的位置、路上的車輛數、路口每秒的時相，這些即時的資訊可幫助決策者對特定需求以更改原本的路網模式，譬如更改車輛路線、更改車輛速度、轉換號誌時相、公共運輸靠站時間等。對緊急優先號誌極有幫助，因緊急號誌受延滯的車輛可藉由偵測道路車輛數各道路延滯車輛秒數，圖 3.2 為 Sumo 模擬路口範例圖。

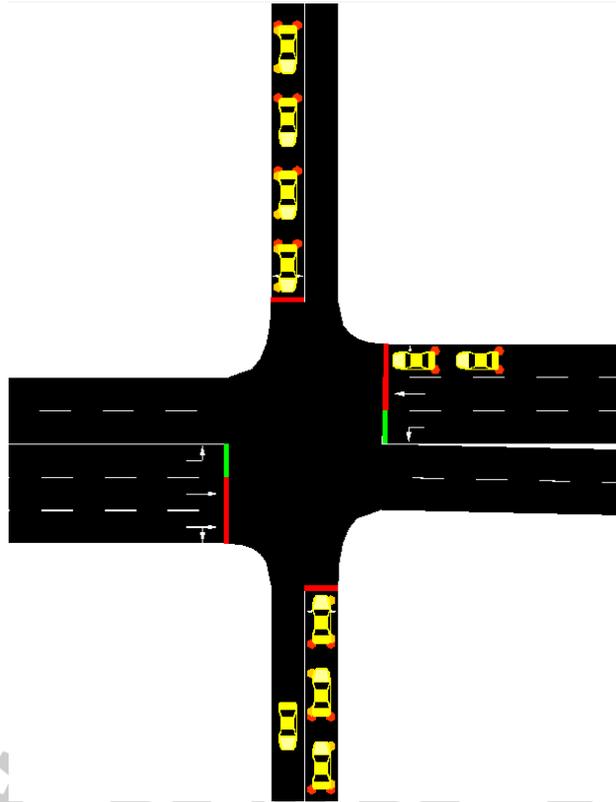


圖 3.2 Sumo 模擬路口範例圖

為了實現緊急車輛與輕軌之間的協調，最重要是需要隨時了解它們的位置，現實中緊急車輛與輕軌位置以表 3.2 所示，可用 GPS 和計軸器回傳當下的位置，而 Sumo 模擬中，利用 Traci 提供的函數讀取想要的資料，表 3.3 為研究中主要會使用的函數，做為模擬中取得參數或更改車輛資訊之工具。

表 3.2 緊急車輛與輕軌位置抓取

車種	位置
緊急車輛	GPS
輕軌	鐵軌設有計軸器

表 3.3 Traci 函數

函數	定義
traci.vehicle.getPosition()	車輛位置(x,y 座標)
traci.junction.getPosition()	路口位置(x,y 座標)
traci.trafficlight.getPhase()	號誌目前時相
traci.trafficlight.setPhase()	號誌更換時相
traci.lane.getLastStepVehicleNumber()	車道上車輛數
traci.vehicle.setBusStop()	車輛於公共運輸站停下
traci.vehicle.slowDown()	車輛更改速度

### 3.3 緊急車輛優先號誌(架構一)

架構一的流程如圖 3.3 所示。當 119 指揮中心接獲報案後並指派緊急車輛出發時，後台系統會提供車輛的最佳行駛路徑，藉由緊急車輛的即時的 GPS 定位可計算出緊急車輛與各路口之間的距離，當緊急車輛接近路口時，與路口相距一段距離時會提出優先權，路口號誌收到優先權後會判斷目前時相對於緊急車輛而言是綠燈還是紅燈。

綠燈時，會取得剩餘的綠燈秒數，並計算該秒數是否足夠讓緊急車輛通過，緊急車輛所需時間 = 緊急車輛與路口相距 / 緊急車輛車速，若剩餘綠燈秒數不足以通過，則將延長綠燈秒數直至緊急車輛通過為止。

紅燈時，需先判斷該時相是否已經超過最短綠燈時間，最短綠燈用來保護其他方向車輛與行人，避免用路人因紅燈變綠燈時已出發在路口中，後又立即轉乘紅燈，而反應不及或還未通過路口。當最短綠燈以滿足時，會判斷該時相的剩餘綠燈秒數是否小於 10 秒，且下一個時相為緊急車輛的時相，此 10 秒的限制是因為當緊急車輛通過路口，切回原時相需至少 5 秒的黃燈和紅燈，等該時相剩餘秒數跑完又有至少 5 秒的黃紅燈，因此若該時相剩餘秒數少於 10，則考慮不需再補回，而將紅燈時相縮短。若最短綠燈未被滿足，判斷是否緊急車輛時相與目前時相可對調，如果可以則進行時相調整，若未有時相可對調，則先滿足該時相綠燈秒數超過最短綠燈，然後再插入緊急車輛的時相。最後，在緊急車輛通過路口後，號誌會轉換回原先時相，以確保不跳過其他原本的時相，避免對其他車輛造成過多的延滯和停等。

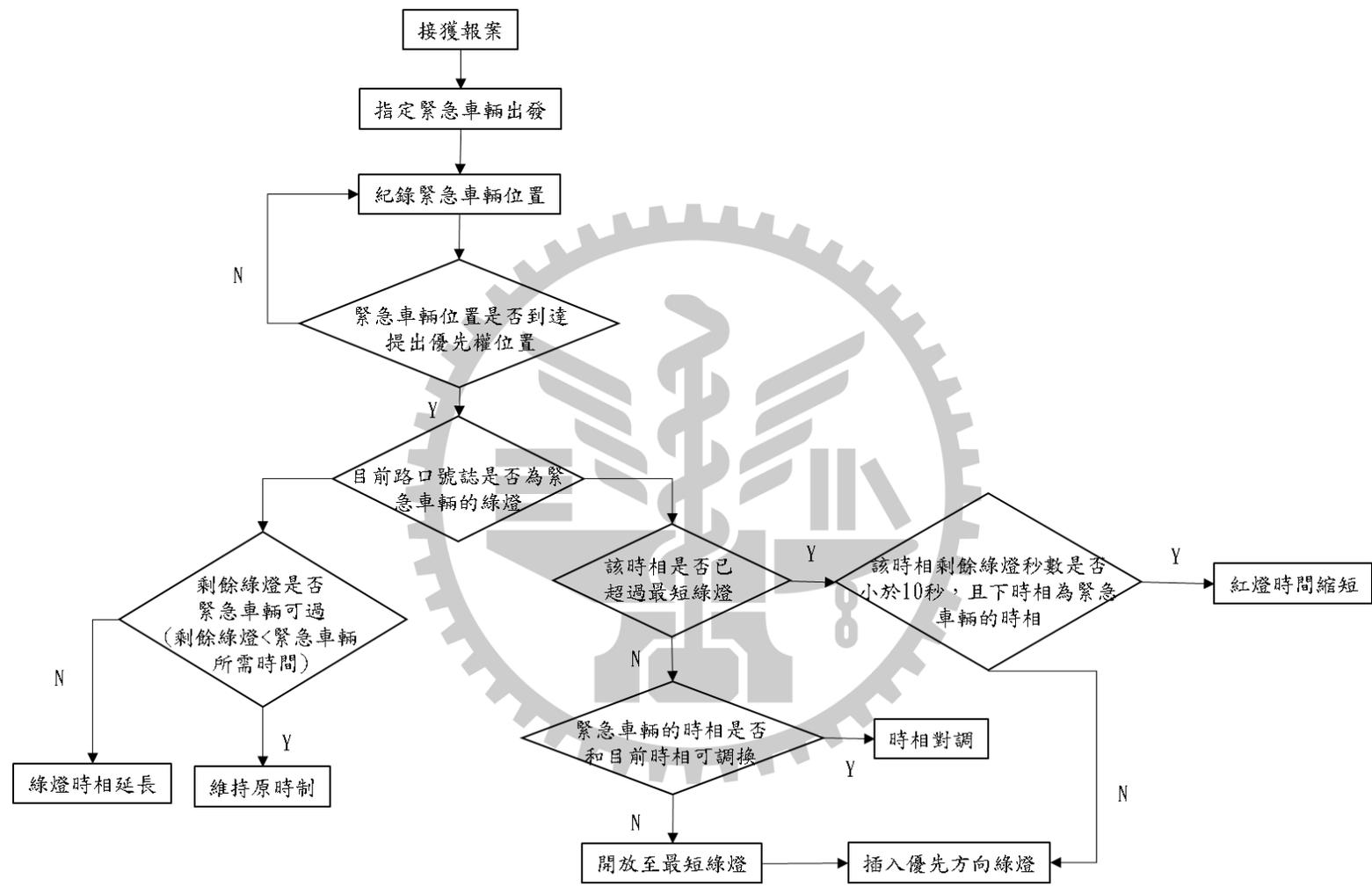


圖 3.3 架構一流程圖

過往文獻優先權多設置 100 至 300 公尺，因考慮在紅燈轉換時，需要滿足最短綠燈時間、3 秒的黃燈和 2 秒的全紅燈，研究中針對緊急車輛優先權提出位置於路口前 150m，但此距離非適用於尖峰時間，因高流量會導致停等車隊的增加，這可能使得緊急車輛在到達路口時需要等待前方的停等車輛疏散後才能通過。目前主要有兩種方法可以解決此問題：

#### (1) 提前偵測停等車輛數

提早數個週期就開始偵測路段上的車輛數。若停等車輛已超過可接受的停等長度，則提前轉換為緊急方向的綠燈，以清除停等車隊，確保當緊急車輛即將到達時，前方的停等車輛數量處於可接受的範圍，這樣緊急車輛就不需要等待太長時間[7]。

#### (2) 動態調整優先號誌提出距離

偵測路段上的停等車輛數，計算疏散這些車輛所需時間，根據疏散所需的時間，動態地調整提出優先號誌的距離。根據疏散所需的時間，動態地調整提出優先號誌的距離。例如，如果計算出疏散車輛需要的時間較長，則將提出優先號誌的距離往上游拉長，如提前 300 公尺就提出優先權。這樣做可以確保在緊急車輛到達路口時，前方的車輛已經被疏散，讓緊急車輛能夠順利通過[10]。

考慮到臺灣路口之間存在連鎖的設定，使用方法一可能造成連鎖在數個週期前久被打破，使停等車隊的問題持續傳遞到下游，另外，隨時有新的車流匯入，可能導致車輛無法減少到可接受的停等長度，從而使緊急號誌不斷開放，最終造成路口壅塞。因此本研究在尖峰時，選擇使用方法二，通過根據流量調整優先號誌提出的距離，提高緊急車輛優先號誌在尖峰情況下的適用性，計算公式參考 Vit Obrusnik [10] 停等車隊、行進車隊消散時間、緊急車輛到達時間計算，利用這三項可知緊急車輛於路口多遠提出優先權。其利用 Sumo 各變數多次模擬後，計算出 Sumo 參數值分別為  $t_x=1.22s$ 、 $t_a=5.82s$ 、 $L_{hn}=18.79m$ ，供研究中尖峰時優先權提出位置計算參數，計算式如下所列：

$$\text{停等車隊最後一台車加速至飽和速度所需時間 } T_L = n \times t_x + t_a$$

$$\text{行進車隊消散時間 } T_X = \gamma \times T_L \times L_{hn} \div v_{op}$$

$$\text{緊急車輛到達時間 } T_A = D \div v_E$$

其中

$$n = \text{停等車輛數 [veh]}$$

$$t_x = \text{綠燈起步平均反應時間 [s]}$$

$$t_a = \text{綠燈起步平均加速時間 [s]}$$

$\gamma$ =該路段車輛到達率[veh/s]

$L_{hn}$ =行駛車隊平均車間距[m]

$v_{op}$ =飽和速度[m/s]

$v_E$ =緊急車輛車速[m/s]

$D$ =緊急車輛與路口距離[m]

緊急車輛於尖峰提出優先權位置流程圖由圖 3.4 所示。當緊急車輛出發後，會計算 $T_A, T_L, T_X$ 的值，並判斷緊急車輛到達時間是否小於前方車輛疏散時間，若小於代表緊急車輛到達路口時，停等車輛還未疏散完畢，緊急車輛需停下等疏散，因此需在當下秒數就提出優先權，號誌開放緊急時相，並記錄提出時緊急車輛的位置。本研究將與路口相距 150 公尺也加入流程中，作為提出優先權位置的下限，以維持設置的最短綠燈及 5 秒的黃燈、紅燈，若還未小於 150 公尺，下一秒會繼續計算 $T_A, T_L, T_X$ 的值，等緊急車輛通過路口。

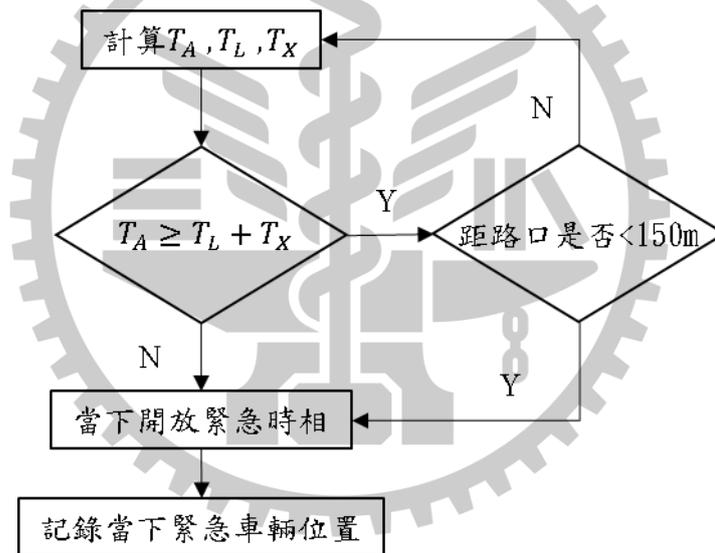


圖 3.4 緊急車輛於尖峰提出優先權位置

### 3.4 輕軌速度調整數學模型(架構二)

輕軌擁有優先通過路口權力，當計軸器(與路口相距 100m)偵測到輕軌時，路口號誌判斷目前時相是否為輕軌共用時相，輕軌共用時相指該時相是否允許一般車輛同時通過路口，一般為行駛方向與輕軌平行。若不是輕軌共用時相或者剩餘綠燈秒數不足以讓輕軌以目前速度通過路口，則輕軌將提出優先權。路口時相的轉換或延長，皆會影響原本路口的時制，從而增加衝突方向一般車輛的停等時間。架構二的目的是希望通過對輕軌的加減速控制，即使不提出優先權，輕軌也能夠不停下地通過路口，從而降低提出優先權的次數，減少因為優先號誌的插入對一

般車輛造成的停等時間增加，以下說明加速與減速發生時機與應用：

### 1. 輕軌加速

如圖 3.5 所示，當目前時相為輕軌共用時相，但剩餘秒數無法使輕軌以目前速度通過路口。無優先權(黑線)接近路口時，因號誌已轉換成下一個時相，需減速至 0，在路口等待下一個綠燈才能繼續前進；提出優先權(綠線)，路口號誌會延長輕軌共用時相，以確保輕軌可以通過，輕軌可以維持原始速度前進，而不需要停下；速度調控(紅線)，會提前判斷輕軌加速可在剩餘綠燈秒數內通過路口，一旦通過路口，輕軌再減速回到原始速度，從而達到不停下並且不影響原路口時制的效果。

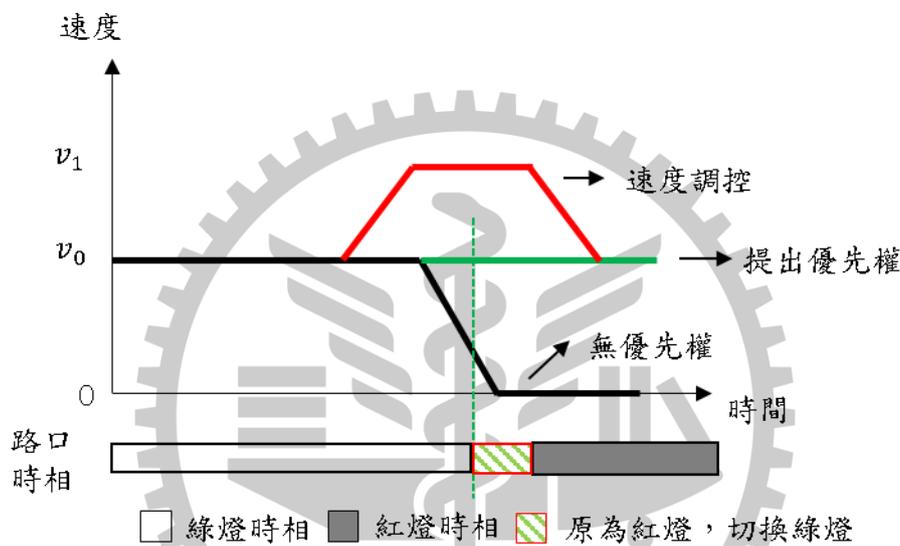


圖 3.5 輕軌加速—速度與時間關係圖

### 2. 輕軌減速

如圖 3.6 所示，當目前時相是輕軌共用時相的上一個時相，以輕軌目前速度行駛到路口還未轉為輕軌共用時相。無優先權(黑線)需減速至 0，在路口前停下等待綠燈才能加速出發；提出優先權(綠線)，路口時相轉換成輕軌共用時相，輕軌可維持原速度前進，不需要停下；速度調控(紅線)，可以在減速的情況下等待至共用時相，通過路口後再加速至原速度，同樣達到不停下且不影響原路口時制的效果。

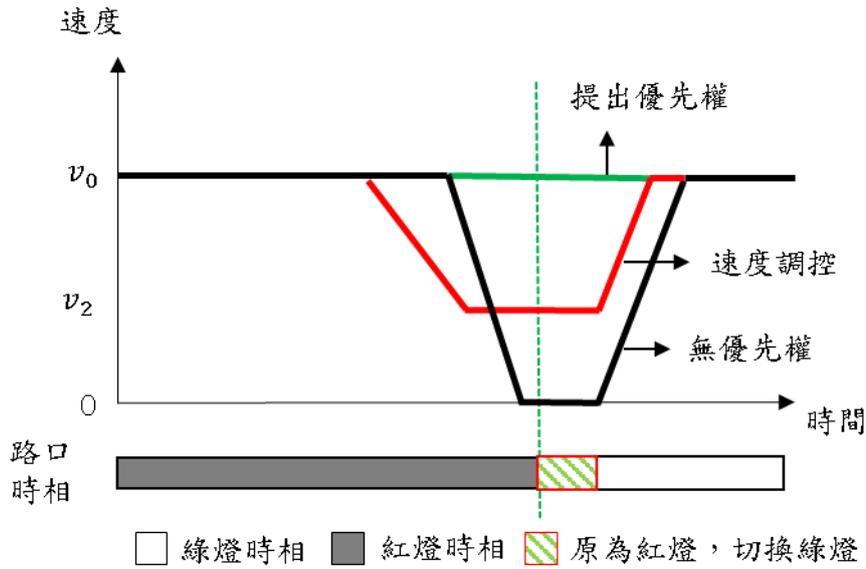


圖 3.6 輕軌減速—速度與時間關係圖

透過上述情境描述，以圖 3.7 輕軌減速為例，藍色區域為輕軌的行駛距離，可將行駛時間分成三部分：

1. 維持原始速度時間( $t_1$ )：以 $v_0$ 行駛的時間段
2. 速度變化時間( $t_2$ )： $v_0$ 減速至 $v_2$ 的時間段
3. 最小速度行駛時間( $t_3$ )：以 $v_2$ 行駛的時間段

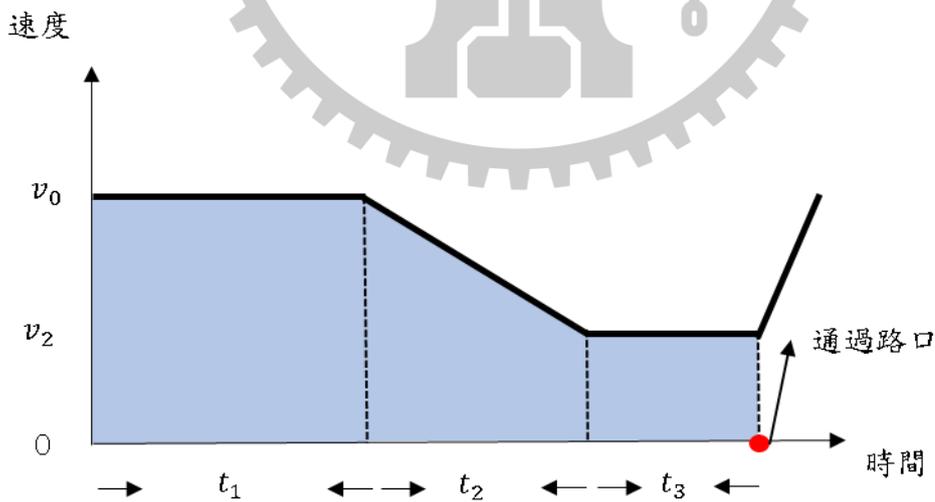


圖 3.7 輕軌減速—三段時間速度與時間圖

為了使輕軌可盡量維持以原始速度行駛，減少速度變化的時間長度，因此目標式將最小化非 $t_1$ 的時間段，尤其是 $t_3$ 在新的速度行駛時間段，以避免輕軌低速滑行時間過久或高速無法對應緊急情況，因此將 $t_3$ 另乘以 100 參數，和 $t_2$ 相比下

更小。架構二的數學模型呈現如下：

Min

$$(t_2 + 100 \times t_3) \times v^{up} + ((t_2' + 100 \times t_3) \times z - M \times (1 - z) + M \times (1 - z) \times (1 - S)) \times v^{down}$$

限制式

$$t_1 + t_2 + t_3 = g^{last} \quad (1)$$

$$d \times v^{up} \leq v \times t_1 + (v \times t_2 + 0.5 \times (v^{max} - v) \times t_2) + v^{max} \times t_3 \quad (2)$$

$$t_1 + t_2' + t_3 = g^{last} + y + r \quad (3)$$

$$d \geq v \times t_1 + (v \times t_2' - 0.5 \times (v - v^{min}) \times t_2') + v^{min} \times t_3 \times v^{down} \quad (4)$$

$$t^{stop} = (g^{last} + y + r - d/v) * S \quad (5)$$

$$t_1, t_3 \geq 0, t_2 \geq (v^{max} - v)/a, t_2' \geq (v - v^{min})/a' \in I$$

$$z \in \{0,1\} \quad (6)$$

---

參數

---

$M$	大數
$S$	100 公尺內是否有站(0 或 1, 1 代表有站)
$g^{last}$	目前時相剩餘秒數(s)
$y$	目前時相對應的黃燈秒數(s)
$r$	目前時相對應的紅燈秒數(s)
$d$	輕軌與路口相距(m)
$v$	輕軌目前速度(m/s)
$v^{max}$	輕軌最大速度(m/s)
$v^{min}$	輕軌最小速度(m/s)
$v^{up}$	輕軌選擇加速(0 或 1, 1 代表加速)
$v^{down}$	輕軌選擇減速(0 或 1, 1 代表減速)
$a$	輕軌最大加速度(m/s <sup>2</sup> )

$a'$	輕軌最大減速度( $m/s^2$ )
變數	
$t_1$	原始速度行駛時間長度(s)
$t_2$	速度加速行駛時間長度(s)
$t'_2$	速度減速行駛時間長度(s)
$t_3$	新的速度行駛時間長度(s)
$t^{stop}$	需在站中多停靠的秒數(s)
$z$	是否在站內停靠久一點(0 或 1, 1 代表靠站時間不增加)

輕軌速度變化分為加速與減速兩部分，以下以加速與減速說明目標式及限制式：

#### 1. 加速

目標式中會計算 $t_2$ 與 $t_3$ 的時間值，由式(1)(2)限制。式(1)為三段時間相加需等於剩餘綠燈秒數，未使用小於等於是希望輕軌速度變化不長，剛好等於剩餘綠燈秒數即可；式(2)為三個時間各自行駛距離相加需大於等於目前輕軌與路口距離，以確保輕軌在剩餘綠燈秒數可以安全通過路口。

#### 2. 減速

減速中包含輕軌減速、輕軌在站內停靠時間增加，因為輕軌在停靠時間可充電，因此若判斷需要減速且有站點選項，則優先選擇停靠久一點。目標式利用 $z$ 來決定輕軌會降速還是停靠時間增加，利用大數 $M$ 輔助計算，由式(3)(4)(5)限制。式(3)為三段時間相加需等於目前時相綠燈剩下時間加黃、紅燈時間，否則輕軌仍會遇到紅燈；式(4)為三個時間各自行駛距離相加需小於目前輕軌與路口距離，以確保輕軌行駛到路口時可以銜接到輕軌共用時相。式(5)計算當 100 公尺內有站可停靠，多停靠時間等於當輕軌共用綠燈開啟，並減掉目前距離/最小速度，因為輕軌不需停等至綠燈開始才起步，可大約計算目前到路口距離所需時間，在輕軌共用時相開啟動前，先從站中出發。

式(6)代表三個時間值需為整數，而判斷是否增加靠站時間 $z$ 為 0-1 變數。當中， $t_2$ 範圍根據加速度與速度變化計算而得，因輕軌的加速度 $a$ 和減速度 $a'$ 不同，因此利用 $t_2$ 和 $t'_2$ 代表中間變化的時間段。

架構二流程圖如圖 3.8 所示，當輕軌距離路口還有 200 公尺時，因輕軌會在 100 公尺提出優先權，因此設計 2 倍距離開始判斷，將進行判斷是否需要進行加

速或減速，以下分為加速與減速部分解釋：

### 1. 加速情況

首先，判斷時相是否為輕軌共用時相。如果是，先計算以目前速度是否可在剩餘綠燈秒數通過，如果是的話代表不需延長綠燈、調整時制。若剩餘綠燈秒數不足以讓輕軌通過，則判斷從 $v$ 加速至 $v^{max}$ 可以通過路口，其可約以 $d/v^{max}$ 計算，若剩餘綠燈秒數少於所需時間，代表加速仍會遇到紅燈需停下，因此選擇提出優先權。若加速可以通過路口，將參數輸入架構二的模型中，得到 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 的值，並依時間計算加速度，輕軌執行加速。

### 2. 減速情況

若目前非輕軌共用時相，接著判斷是目前的時相是否是輕軌共用的上一個時相，代表輕軌有機會透過減速而不影響原時制。如果是，先計算以目前速度是否到達路口可銜接輕軌共用時相，如果是的話代表不需紅燈縮短、調整時制。若輕軌到達路口仍為紅燈，判斷 100 公尺內是否有設站點可增加停靠時間，如果沒有車站，計算以最小速度行駛是否可以等到綠燈，若可行將參數輸入架構二的模型中，得到 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 值。若在 100 公尺內有站點，將參數輸入架構二的模型中得 $t^{stop}$ 值，輕軌依變數做出相應的反應。

減利用數學模型得到相應的變數後，需滿足以下條件才執行減速或停靠時間增加，否則仍選擇提出優先權，限制的目的在于免輕軌以低速度行走花的時間太長或靠站過久，未實現輕軌擁有優先權可減少旅行時間的特點：

- (1) 減速的三個時間段相加需少於以原始速度行駛的 2 倍。
- (2)  $t^{stop}$  需小於原停站時間的 2 倍。

### 3. 非加、減速情況

如果當前時相不適合加速或減速，輕軌會於 100 公尺選擇提出優先權，影響時制。

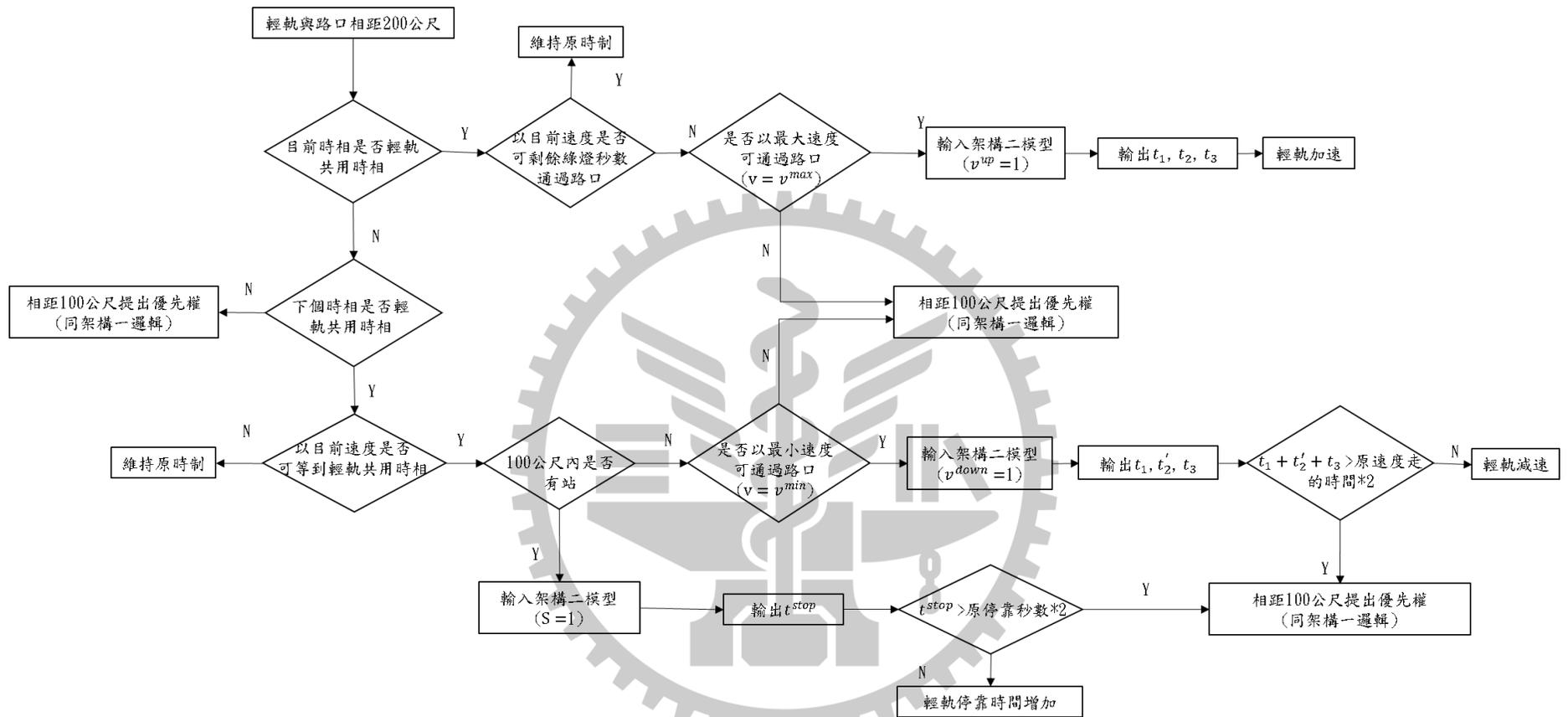


圖 3.8 架構二流程圖

### 3.5 緊急車輛與輕軌協調數學模型(架構三)

在緊急車輛和輕軌同時出現在同一路口的情況下，由於緊急車輛具有更高的優先權，因此路口號誌需先讓緊急車輛通過，然後再開放輕軌通過。然而，目前號誌根據優先權提出順序，先到先服務的原則，這意味著如果輕軌早於緊急車輛提出優先權，號誌會先給予輕軌優先號誌，輕軌通過後才切換成緊急車輛的優先號誌。然而，這種方式並未考慮到權重的差異。

因此，在架構三中將权重納入考慮，當任何一方提出優先權時，會同時抓取另一個運具的位置，並計算各自通過路口所需時間。根據各自通過時間、权重，判斷應該給予哪一方誰先通過的權利、時相。主要的目標是讓輕軌配合緊急車輛通過時間作出對應的加、減速或在站內停靠時間增加。

在數學模型中，通過時間的定義是指任何一種運具從它提出優先權的位置或時刻開始，至實際通過路口所需的時間。對於緊急車輛，它在路口前 150 公尺會提出優先權。對於輕軌，由於它需要做速度變化，如果在前 100 公尺內有站點可停靠，則在站中停留最後 5 秒被視為優先權提出的時間；如果沒有站點可停靠，則將在距離路口 200 公尺判斷是否加、減速，優先權提出為在路口前 100 公尺轉換時相時。舉例來說，緊急車輛的預估通過時間可以計算為  $(150 + \text{路口距離}) / \text{緊急車輛的速度}$ 。如果輕軌先通過，則可能需要加上等待輕軌通過的時間。因此，這個模型的目標是最小化緊急車輛和輕軌的實際通過時間。

為了使緊急車輛通過時間小於輕軌通過時間，將緊急車輛通過時間乘以 10 作為其权重，架構三的數學模型如下所示。目標式中，同樣利用  $z$  和  $S$  決定輕軌是否可靠站，大數  $M$  輔助計算：

Min

$$(t^{emer} \times 10 + t^{tram}) \times z - M \times (1 - z) + M \times (1 - z) \times (1 - S)$$

限制式

$$t^{emer} \geq d^{emer} / v^{emer} \times e + (t^{tram} + 5 + q \times t_x + t_a) \times r \quad (7)$$

$$t^{tram} \leq (t^{emer} + d^{tram} / v^{tram}) \times e + d^{tram} / v^{tram} \times r \quad (8)$$

$$r + e = 1 \quad (9)$$

$$t^{stop} = (d^{emer} / v^{emer} - d^{stop} / v^{tram}) \times S \quad (10)$$

---

參數

---

$q$	緊急車輛前方停等車輛數(個)
$d^{tram}$	輕軌與路口相距(m)
$d^{emer}$	緊急車輛與路口相距(m)
$d^{stop}$	輕軌站點與路口相距(m)
$v^{tram}$	輕軌目前速度(m/s)
$v^{emer}$	緊急車輛目前速度(m/s)

---

變數

---

$t^{tram}$	輕軌通過時間(s)
$t^{emer}$	緊急車輛通過時間(s)
$r$	輕軌優先(0 或 1, 1 代表輕軌先過)
$e$	緊急車輛優先(0 或 1, 1 代表緊急車輛先過)

---

式(9)為緊急車輛與輕軌各自是否先通過的變數，相加為 1，代表只有一種運具可以先行，式(7)(8)分別計算緊急車輛與輕軌的通過時間式。(7)為緊急車輛通過時間。當  $e$  等於 1，代表緊急車輛先通行，通過時間等於緊急車輛與路口之間的距離/緊急車輛車速，前方停等車隊可在緊急車輛到達路口時消散掉，因此未計算停等消散時間；當  $r$  等於 1，代表輕軌先通行，通行時間等於輕軌通過時間加上 5 秒的黃、紅燈加上緊急車輛前方停等車輛消散時間，因先開輕軌共用時相導致緊急車輛還需等此時間，消散時間同樣利用[10]參數計算。式(8)為輕軌通行時間，當  $e$  等於 1 時，代表緊急車輛先通行，通行時間等於緊急車輛通行時間加上輕軌從站或當下位置到達路口所需時間；當  $r$  等於 1 時，代表輕軌先通行，通行時間等於輕軌距離除以輕軌速度。式(10)為計算若有站可停靠時，在站中多停靠的秒數等於緊急車輛通行時間減掉輕軌從站出發到路口所需時間，因不需等到綠燈亮起輕軌就可以起步。

架構三流程圖如圖 3.9 所示。每一秒鐘，會抓取緊急車輛和輕軌的位置信息，並接收是否有任何一方提出優先權，一旦其中一方提出了優先權，將參數輸入架構三的數學模型中，計算兩者通過路口所需的時間，並利用 0-1 變數  $r$  和  $e$ ，以判斷號誌應該優先讓哪一方通過：

### 1. 緊急車輛優先通過

$e$  等於 1，輕軌速度進行控制，速度和時間參數輸入架構二的模型中，減速或靠站時間增加，以讓輕軌不如原本早到達路口，少輕軌的停等時間，或者在靠站

時進行更多的充電。在這種情況下，架構二流程中原先對減速的限制會取消，代表輕軌的減速可以超過原定的 2 倍，或者停靠站的時間可以超過原定的 2 倍，因為讓緊急車輛優先通行。在緊急車輛通過後，將號誌切換至輕軌的正常時制，使其通過路口。

## 2. 輕軌優先通過

$r$  等於 1，將判斷路口目前是否為輕軌共用時相。若是則可以加速通過，除了可降低輕軌再提出優先權影響原時制，也可以提早將號誌切成緊急號誌，提早疏散停等車隊；若非輕軌共用時相，則切換成輕軌時相，輕軌通過後再切成緊急優先時相，讓緊急車輛通過。

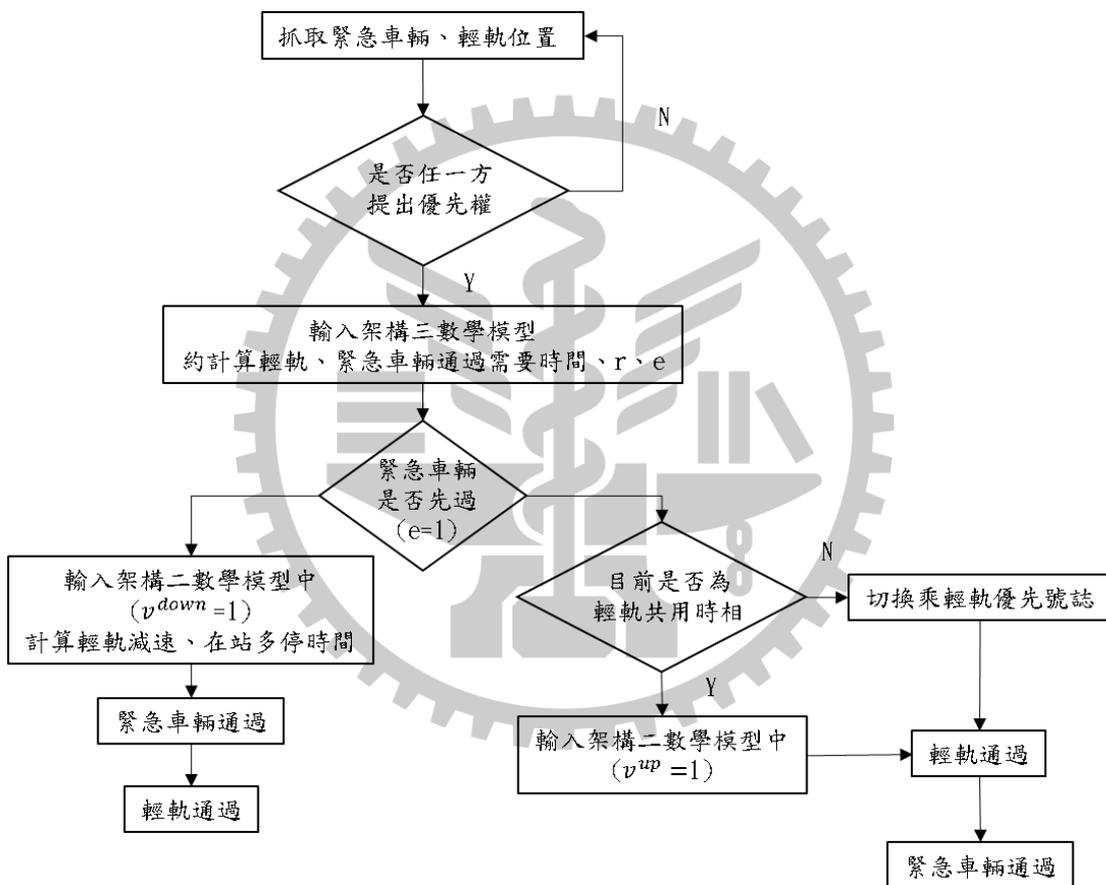


圖 3.9 架構三流程圖

## 第四章 模擬測試與分析

緊急車輛中包含警車、救護車、消防車，在本研究中將選擇救護車作為模擬對象，因為救護車運送傷患在緊急事件中等級最高，因此研究目的為強調如何最大地節省救護車運送病患的旅行時間，以提高急救過程的效率。本章將介紹高雄輕軌及救護車與輕軌路線如何選擇，最後呈現三種架構的模擬結果與分析。

### 4.1 高雄捷運環狀輕軌

高雄捷運環狀輕軌，全長 22.1 公里，設有 37 處車站，為連接南、北高雄環狀交通系統。根據 2022 年的統計數據，每日平均搭乘人次約為 13,800 人，並且可與凹子底、西子灣和凱旋三個捷運站進行轉乘，進一步提升高雄市的大眾運輸系統便利性。高雄輕軌的建設分為兩階段，第一階段於 2015 年開始試運營，並在 2017 年實現全線通車；目前第二階段工程僅 C25 至 C31 路段尚未完成，其他路段已經投入使用，路網圖如圖 4.1 所示。

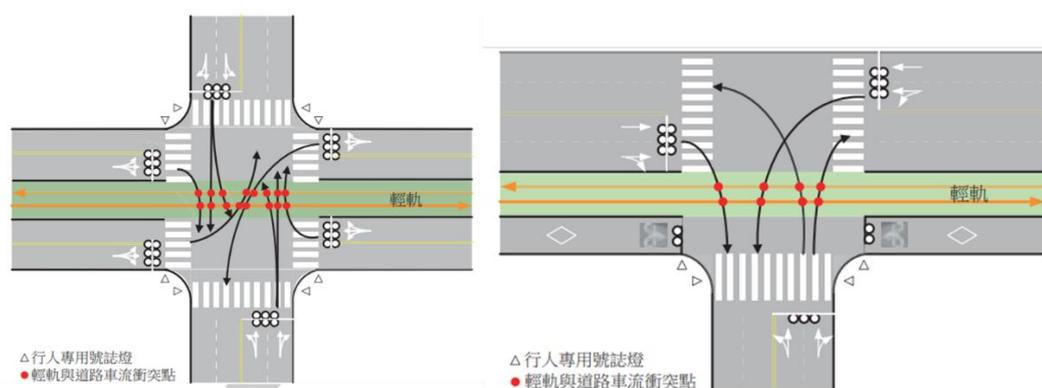


圖片來源：高雄市政府捷運工程局

圖 4.1 高雄捷運環狀輕軌路網圖

高雄輕軌包含了兩種路權，一種是橫跨愛河段高架的 A 型路權，另一種為

部分路段與一般車輛分隔道路，但在路口會和汽機車交會的 B 型路權。圖 4.2 為高雄輕軌在 B 型路權中，路口常見的十字路口、T 字路口，與一般汽機車、緊急車輛交會時，潛在發生衝突點的示意圖，由於輕軌享有優先通過路口之權利，須確保避免與其他車輛的潛在衝突點，因此輕軌號誌需要和一般車輛的號誌進行整合。在一般情況下，路口按照固定的時制運作，當輕軌接近路口且被計軸器偵測到，行控中心會計算列車到達預估時間，然後選擇最適合的優先通行邏輯，並通知號誌開放與輕軌不衝突的時相，以實現優先通過的目標[4]。



圖片來源：中華技術

圖 4.2 高雄輕軌與一般車輛於十字路口、T 字路口衝突圖

輕軌車長約為 34 米，最大載客量可達 250 人。列車的最高限速為 50km/hr，主要在高架路段(A 路權)可以最高限速行駛，其他路段(B 路權)的平均速度為 20 至 25 km/hr。在加速方面，加速度上限為  $1.3m/s^2$ 、正常減速度為了不使民眾搭乘感到不舒服，如進站減速度為  $0.8m/s^2 \sim 1.5m/s^2$ ，而在緊急剎車減速度為  $2.7m/s^2$ [1]，表 4.1 為研究中 Sumo 對輕軌速度設定參數，其中  $v^{max}$  最大行駛速度與  $v^{min}$  最小行駛速度設為平均行駛速度的 1.6 與 0.4 倍，可使輕軌保持在可應變緊急狀況下。

表 4.1 輕軌速度設定參數

參數	數值
平均行駛速度	25 km/hr
最大行駛速度	40 km/hr
最小行駛速度	10 km/hr
加速度	$1m/s^2$
減速度	$1m/s^2$
最大加速度	$1.3m/s^2$
最小減速度	$1.5m/s^2$
停靠時間	30s
提出優先權位置	100m

## 4.2 肇事路口及輕軌行經路口

根據臺灣交通部道路交通安全督導委員會以 CBI(Combine Index)指標，統計民國 110、111 年高雄前十大肇事路口，其中 CBI 計算公式如下式(11)至(14)，此指標同時考量事故的嚴重性與事故發生的頻率：

$$\text{CBI}=\text{SRI}+\text{SSI} \quad (11)$$

$$\text{SRI}(\text{相對頻率指標值})：\text{案件數}/\text{最高案件數} \quad (12)$$

$$\text{SSI}(\text{相對嚴重度指標值})：\text{EPDO}/\text{最大 EPDO 值} \quad (13)$$

$$\text{EPDO}(\text{事故當量})=30 \text{ 日死亡人數} \times 9.5 + \text{受傷人數} \times 3.5 + \text{案件數} \quad (14)$$

由於輕軌行經鼓山、三民、鹽埕、苓雅和前鎮這五個行政區，因此選擇在這些行政區內統計前十大肇事路口，圖 4.1 呈現五個行政區個別前十大肇事路口、輕軌路線、醫院及消防局位置、輕軌與一般車輛有交會的路口。經觀察可發現易發生肇事路口主要位於流量大的幹道上，代表這些路口具有一定危險性且需要頻繁的救護車使用，適合做模擬中救護車的路線規劃。架構一將選擇救護車的路線，其中路線包含與輕軌交會路口，架構三著重此交會路口，因此架構三的路網同架構一，由 4.3 詳細敘述；架構二將延伸交會路口輕軌的路線，由 4.4 詳細敘述。

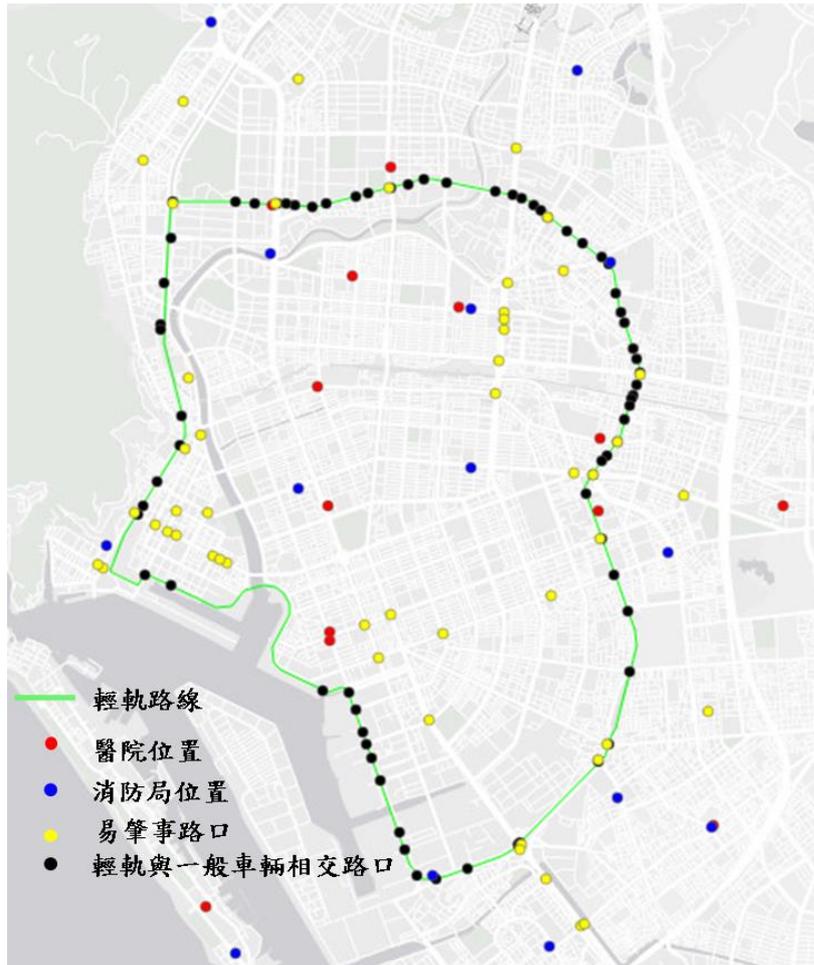


圖 4.3 輕軌通過路口與醫院、消防局所在位置、易肇事路口

### 4.3 救護車優先號誌與輕軌協調之模擬路段

假設圖 4.1 中易肇事路口發生發生事故且須救護車送至醫院，規劃的路線有以下條件：

1. 救護車由消防局出發，前往車禍路口急救，然後將受傷者送往醫院。
2. 救護車的路線必須穿越與輕軌有衝突的路口。
3. 輕軌第二階 C25 至 C31 尚未通車，該區域被排除在外。

為滿足上述條件提高緊急號誌效益，將凱旋四路與中山三路的交叉口選定為事故路口。由於救護車必須經過中山路，這是高雄主要的幹道之一，交通流量較大，救護車行經於此需要多次減速停下以確保安全，且高流量會增加救護車的行車時間，因此這個路段特別適合進行緊急號誌的號誌控制。最接近事故路口的消防局是前鎮消防分隊，醫院為阮綜合醫院。救護車由前鎮消防分隊出發，到凱旋四路與中山三路路口肇事地點，再前往阮綜合醫院，行經 23 個路口，路線如圖

4.4 所示，表 4.2 統計了民國 111 年在該路段的平均每小時車流量。

值得注意的是，凱旋四路與中山三路的交叉口也是輕軌的路口之一，路口時制中包含輕軌共用時相，而當救護車已經在此路口進行救援時，在出發前就需提前知道輕軌的位置，以計算出最佳的時相分配，以確保兩者都能在路口安全通過。

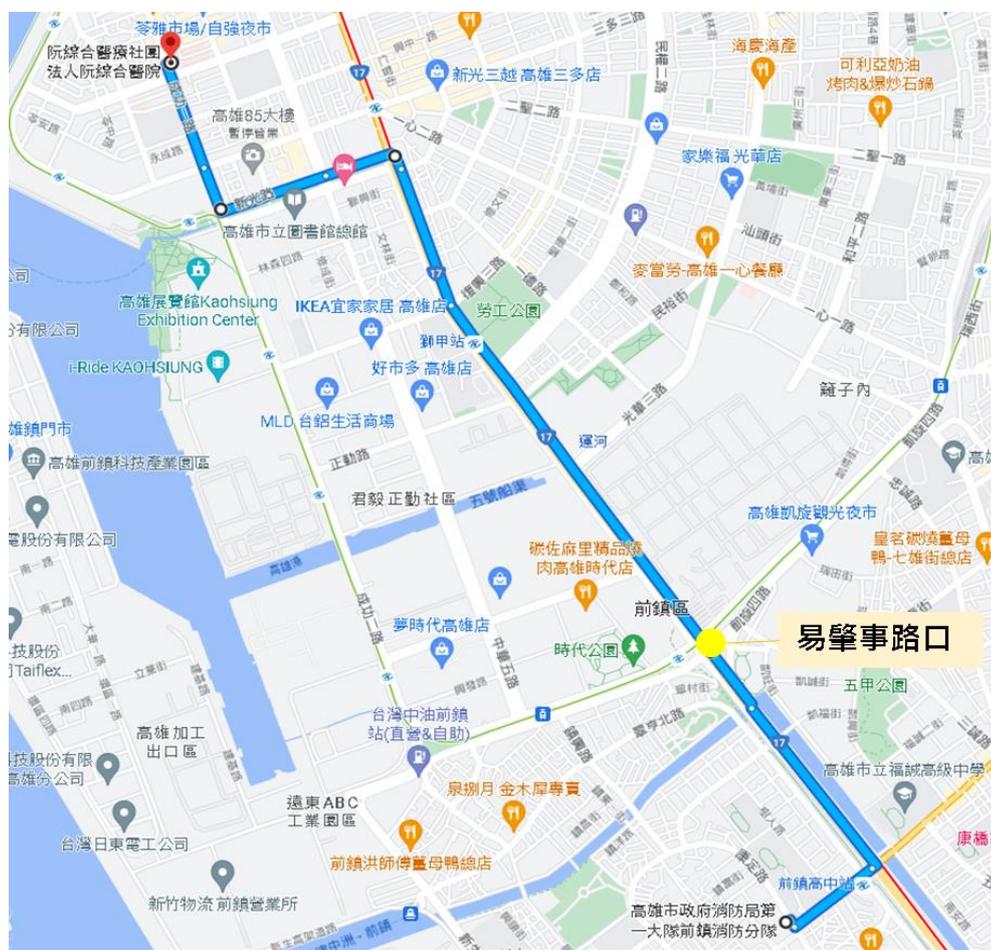


圖 4.4 行經凱旋四路與中山三路口救援路線圖

表 4.2 高雄主幹道平均流量

道路	路段	方向	離峰平均 小時流量	尖峰平均 小時流量
中正路	四維-三多	北	788	1128
		南	765	937
中正路	三多-民權	北	605	800
		南	532	688
中正路	中安-凱旋	北	829	1077
		南	839	988
中正路	中安-凱旋	北	839	1101
		南	849	1017

中華路	時代-中華五	北	248	399
	路 939 巷	南	254	298
中正路	凱旋	東	632	850
		西	398	528

資料來源：高雄市政府交通局

#### 4.4 輕軌速度控制之模擬路段

此測試的目標在於計算輕軌通過路口時，是否可以透過調整速度或在前一站停留更長的時間，以減少對路口提出優先權的需求，從而降低對原有路口時制的影響。

規劃路線為從凱旋瑞田站(C2)往西北方向行駛至五權國小站(C34)，途經 6 個站和 6 個路口，6 個路口皆有輕軌共用時相，路徑如圖 4.5 所示。選擇該路段原因為輕軌行經過一心路、二聖路、三多路、四維路，為高雄熱門路段，選擇這段路段的原因是輕軌經過了一心路、二聖路、三多路、四維路等高雄的熱門道路，測試結果可以最大程度地減少對各個路口時制的影響，對一般車輛的干擾也會較少。表 4.3 呈現在尖峰和離峰時段的上述四條路段的車流量，數據參考鼎漢國際工程顧問股份有限公司於民國 103 年為高雄政府規畫輕軌時，對第一階段輕軌行經路段調查的資料以及高雄市都市計畫。在模擬中，假設列車在每個站點停留 30 秒後發車，並計算在每個路段上，輕軌是否可以通過調整速度的方式來實現目標。

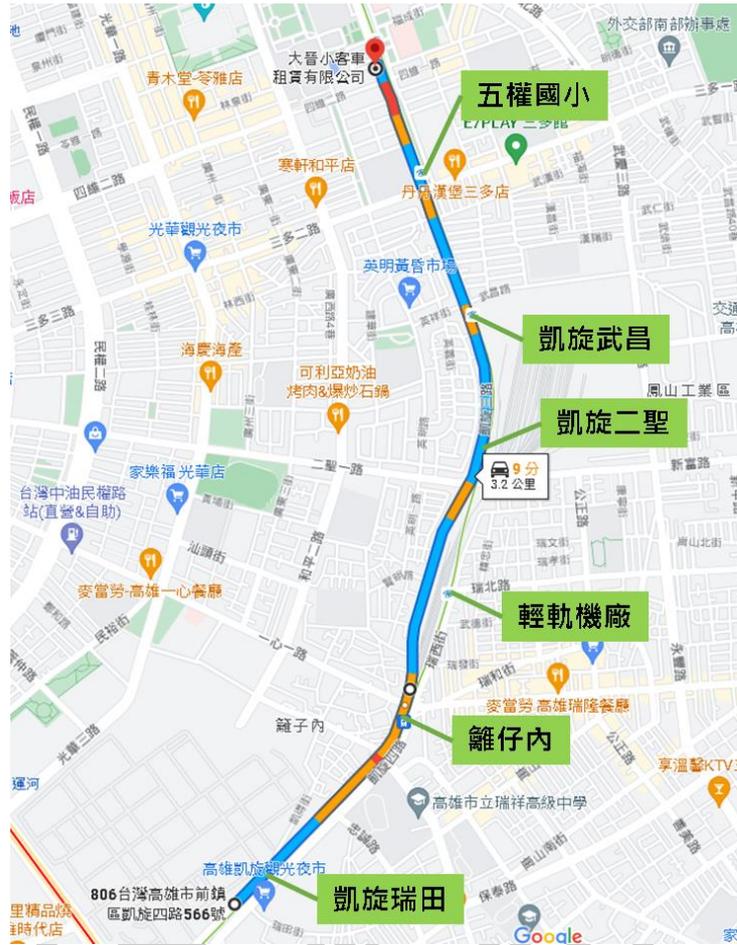


圖 4.5 輕軌速度控制路線圖

表 4.3 輕軌測試路段平均流量

道路	方向	離峰平均 小時流量	尖峰平均 小時流量
凱旋四路	北	732	1464
	南	680	1360
一心路	東	717	732
	西	688	1306
二聖路	東	498	640
	西	420	820
武昌路	東	394	506
	西	328	341
三多路	東	863	1109
	西	667	1304

資料來源：鼎漢國際工程顧問股份有限公司

## 4.5 模擬情境

為了實驗在不同流量下，緊急車輛優先號誌策略與輕軌速度控制是否能夠相對減少行車時間及對原有路口停車等待的影響，各模擬將使用兩種不同的交通流量：尖峰時段和離峰時段。其中，尖峰時間設定為早上 7 點至 9，而離峰時段設定為早上 9 點至下午 4 點，根據高雄市提供路口時制規劃，路口時制對應兩段時段當下的時制與週期。

為了避免救護車出發遇到的各路口號誌皆相同組合，測試中路段週期以 30 秒做不同的救護車出發時間點，譬如週期 150 秒的路段，共會測試 5 次(150/30)，各自分別出發時間為 0、30、60、90、120 秒，150 秒出發同 0 秒出發的週期組合，此為時間上做的調整。同時，為避免在同樣組成的車流中救護車遇到相同的車流，將利用 5 個不同隨機值讓 Sumo 跑出不同的車輛路徑，呈現不同的車流組成，救護車在不同的車流中行駛，結果取測試次數的平均值來呈現。

在輕軌測試中，為了了解輕軌在不同週期秒數下的表現，因此每隔 1 秒做為出發時間點，測試路段輕軌週期尖峰與離峰皆為 150 秒，因此實驗 150 次，同樣取測試次數的平均值。測試次數統整如表 4.4 所示。

表 4.4 各模擬情境

模擬	時段	測試出發時間點次數	總測試次數
救護車	離峰	每 30 秒 1 次	150(週期)/30×5(隨機值)
	尖峰		180(週期)/30×5(隨機值)
輕軌	離峰	每 1 秒 1 次	150(週期)×5(隨機值)
	尖峰		150(週期)×5(隨機值)

## 4.6 模擬結果

透過 Sumo 對三種架構運用各自的模型與邏輯進行模擬，其中假設在事故路口救護人員的處理時間為 3 分鐘，也就是模擬中救護車會於事故路口停 3 分鐘後出發至醫院，模擬結果中會取測試次數的平均，來代表救護車、輕軌在不同時間點出發會遇到的號誌燈號與車流情況，各測試結果解釋如下：

### 1. 救護車優先號誌(架構一)

表 4.5 和 4.6 分別為離峰、尖峰的車流量下，無優先號誌和有執行優先號誌情況下的行車時間。這裡的行車時間指的是總旅行時間減去處理時間，以突顯在有優先號誌時，在行車過程中可減少的時間。觀察結果可以發現，在有執行優先號誌的情況下，尖峰和離峰時段的行車時間大多行車秒數都能減少 40%以上，其

中尖峰時段減少幅度相對較大，主要有以下兩個原因：

- (1) 尖峰時段的路口週期相對較長，救護車在各路口停等秒數逐漸累積，而當執行緊急優先號誌時，可以發現尖、離峰的行車秒數差距不大，因此在尖峰減少幅度較大。
- (2) 在尖峰時段，提出優先權的位置會隨著前方停等車輛數的變化而調整，提前疏散停等車隊，使救護車能夠更快速通過路口，進而減少行車秒數。

以上結果證實，執行緊急優先號誌有助於迅速將傷者送往醫院，以獲得更多的救援時間進行治療。

表 4.5 緊急車輛平均行車秒數(離峰時段)

出發時間	無緊急車輛優先 之行車秒數	有緊急車輛優先 之行車秒數	減少幅度%
10:00:00AM	889.6	503	43.5
10:00:30AM	859.8	497	42.2
10:01:00AM	829.6	480.8	42
10:01:30AM	799.2	497	37.8
10:02:00AM	889.2	515.2	42.1
平均	853.5	498.6	41.6

表 4.6 緊急車輛平均行車秒數(尖峰時段)

出發時間	無緊急車輛優先 之行車秒數	有緊急車輛優先 之行車秒數	減少幅度%
8:00:00AM	933.8	481.6	48.4
8:00:30AM	976	517.8	46.9
8:01:00AM	941	513	45.5
8:01:30AM	883	553.2	37.3
8:02:00AM	975.6	528.2	45.9
8:02:30AM	943	528.6	43.9
平均	941.9	518.8	44.9

表 4.7 至 4.8 分別呈現在離峰和尖峰的車流量下，在有無執行優先號誌對支道或衝突方向車輛的平均停等秒數。從表中可以觀察到，在低流量情況下，停等時間的增加在 10% 以內，而尖峰時段的增加幅度可達約 20%，主要有兩個原因：

- (1) 尖峰時段的車流量較大，如果車輛無法預期在綠燈時通過路口，則需要等待下一個綠燈週期才能通過，導致每輛車的平均停等時間增加。

(2) 尖峰時，提出優先權位置有可能比 150 公尺更早提出，受到波及的車輛更多，因此停等時間也隨之增加。

除此之外還可發現，隨著後續週期的增加，兩者的停等時間均有所下降，這意味著受到影響的車輛可以在後續週期中逐漸疏散。增加支道停等時間為優先號誌的負面影響，可以做為是否執行優先號誌的考慮因素。

表 4.7 支道平均停等秒數(離峰時段)

後續週期個數	無緊急車輛優先 支道平均停等秒數	有緊急車輛優先支 道平均停等秒數	增加幅度%
1	35.6	38.7	8.7
2	35.9	37.9	5.6
3	35.7	37.4	4.8

表 4.8 支道平均停等秒數(尖峰時段)

後續週期個數	無緊急車輛優先 支道平均停等秒數	有緊急車輛優先支 道平均停等秒數	增加幅度%
1	45.8	56.6	23.6
2	45.9	54.6	19
3	45.8	52.7	15.1

在尖峰測試中，優先號誌提出距離會根據救護車當前路口停等車輛數量而改變。通過表 4.9 和 4.10，可以比較固定距離 150 公尺提出和距離可變，兩種情況下對救護車的行車秒數以及對支道停等秒數的影響。從表中可以看出，距離可變的行車秒數相對於固定距離，可節省約 4-6% (30-70 秒) 的時間，而支道平均停等秒數則增加約 1.5%，因提早疏散停等車隊可減少救護車減速停下時間，相對支道綠燈提早被切掉，增加停等時間。如果以行車時間為主要考量，距離可變的方法表現較為優越。

表 4.9 優先權對緊急車輛平均行車秒數比較

出發時間	緊急車輛優先 (150m)行車秒數	緊急車輛優先 (距離可變)行車秒數	減少幅度%
8:00:00AM	512.4	481.6	6
8:00:30AM	521.6	517.8	0.7
8:01:00AM	579.8	513	11.5
8:01:30AM	562	553.2	1.6
8:02:00AM	539.8	528.2	2.1
8:02:30AM	536.6	528.6	1.5
平均	543.1	518.8	4.5

表 4.10 優先權對知道平均停等秒數比較

後續週期	緊急車輛優先(150m)	緊急車輛優先(距離可變)	增加幅度 %
	支道平均停等秒數	支道平均停等秒數	
1	55.7	56.6	1.6
2	53.8	54.6	1.5
3	52.1	52.7	1.2

## 2. 輕軌速度控制(架構二)

利用架構二的數學模型，模擬輕軌從凱旋瑞田站到五權國小站。其中，籬仔內站與凱旋武昌站與路口的距離在 100 公尺以內，因此輕軌可在這兩站點的減速過程中選擇停靠在站久一點。輕軌從站中出發，若皆無提出優先權時可能遇到以下三種形況：

### (1) 靠站未多停，以時速 10 公里行駛：

當從站點出發時，時相仍在輕軌共用時相的前一個時相，但剩餘紅燈即將結束。輕軌在這種情況下，不用馬上加速至時速 25 公里，而是先以較低低速的 10 公里前進，等到通過路口後再加速至時速 25 公里，如圖 4.6 速度時間關係圖、圖 4.7 位置時間關係圖所示。

輕軌約在 25 至 55 秒停靠站內，而輕軌共用時相約於 75 秒開始，從站出發後有 2 種走向：綠色曲線代表在無優先號誌情況下，從站點出發，前進一段距離後因號誌仍為紅燈，需要減速停等，等到綠燈再加速；紅色曲線代表透過速度控制，輕軌以最小速度行駛以延滯到達路口的時間，並可等到綠燈通過路口。除了減少輕軌不用在路口前停下的次數，圖 4.7 可發現，在通過路口後，紅色曲線在綠色曲線左側，由於不需要從停止狀態開始加速，速度控制方法讓輕軌在通過路口後比無優先權方法情況下，更早到達前方位

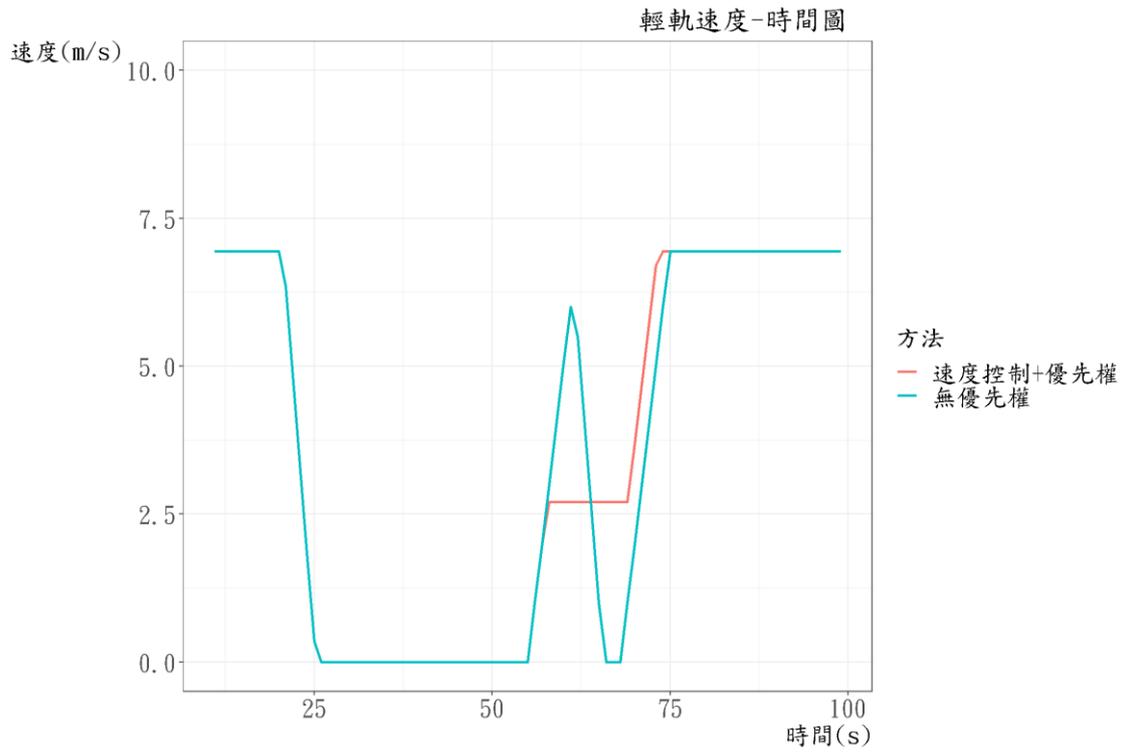


圖 4.6 輕軌以速 10 公里行駛速度時間關係圖

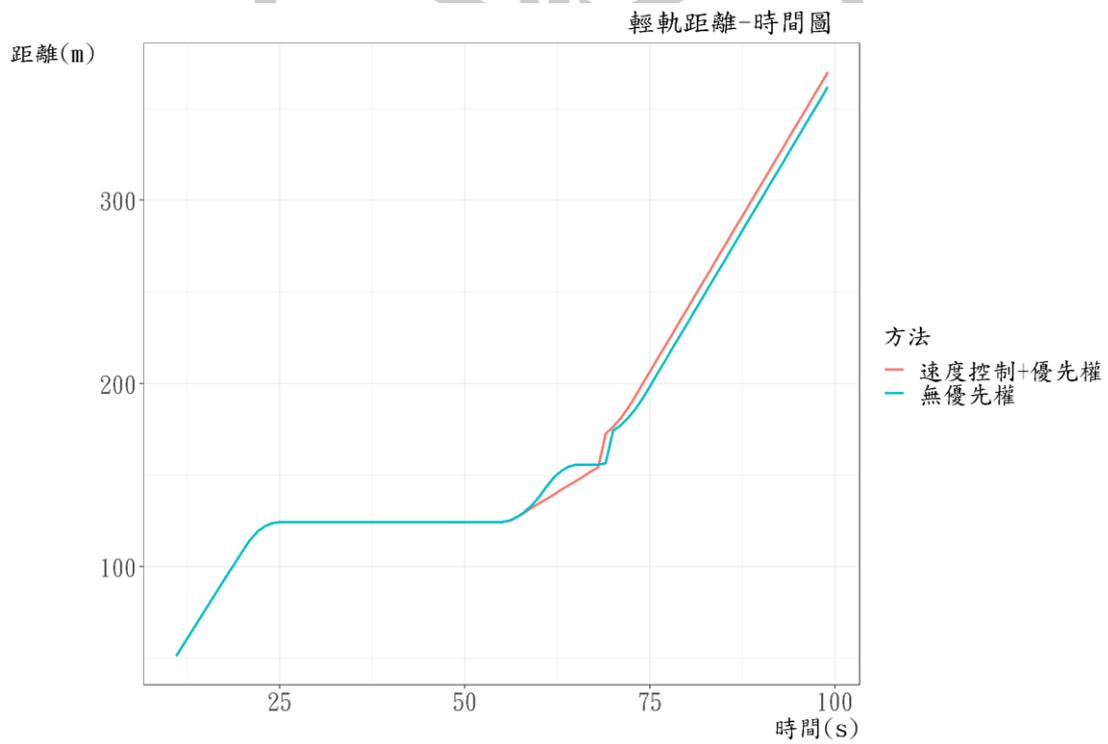


圖 4.7 輕軌以時速 10 公里行駛距離時間關係圖

(2) 靠站多停：

當從站點出發時，路口時相還在輕軌共用時相的前一個時相，但剩餘紅燈尚有一段時間，與(1)情況不同於剩餘紅燈還有一段時間，即使用最小時速 10 公里也無法等到綠燈。因此，輕軌選擇延長在站中的停靠時間，以等待綠燈，同時這段時間也可以用來進行充電，如圖 4.8 速度時間關係圖、圖 4.9 位置時間關係圖所示。

輕軌約在 25 至 55 秒停靠站內，而輕軌共用時相約於 85 秒開始，從站出發後有 2 種走向：綠色曲線代表在無優先號誌的情況下，輕軌在離開站點後因為紅燈需要停下；而紅色曲線則是選擇在站中多停靠 16 秒，至約 71 秒後從站中出發，從而達到通過路口時無需提出優先權。圖 4.9 可發現輕軌於站中停靠時間比無優先權多，且提早加速，在通過路口後一樣也較無優先權位置前面。另外，因知道剩餘的紅燈秒數，可稍微提早從站中出發，通過路口後再加速，因此從圖 4.9 可以看出，同樣在通過路口後，紅色曲線在綠色曲線左側。透過在站中停靠多一段時間，輕軌不僅避免了提出優先權，還可以在通過路口後加速，使其位置超越了無優先號誌情況下的位置。

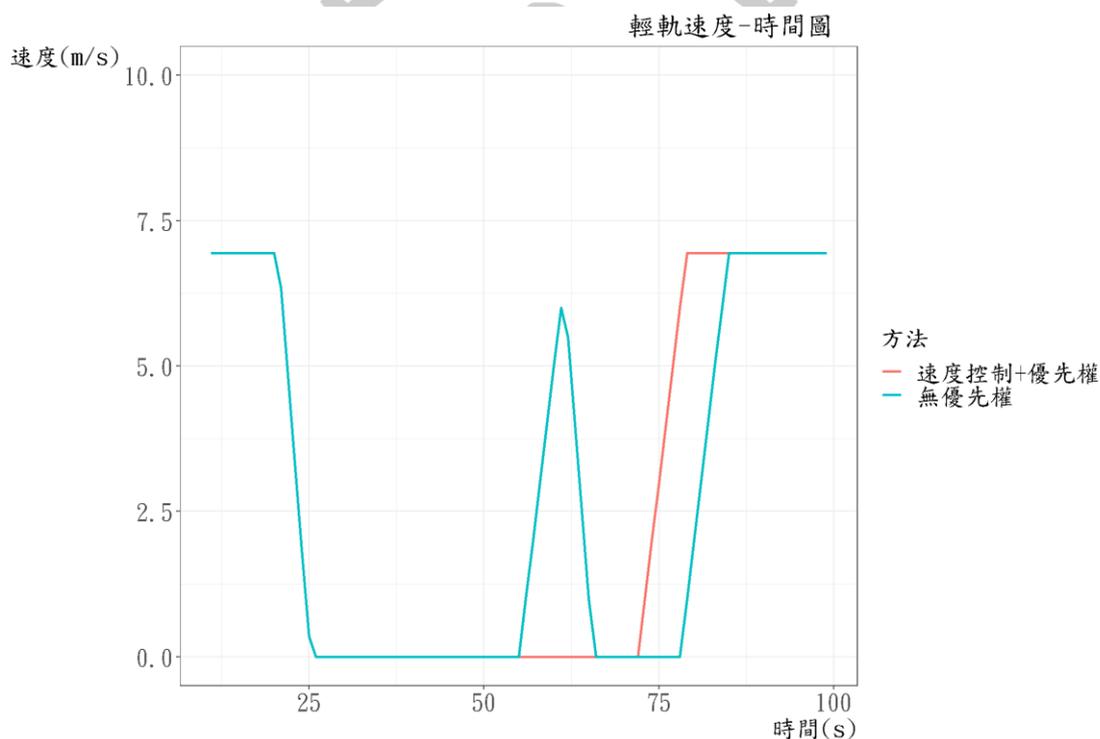


圖 4.8 輕軌站中多停靠速度時間關係圖

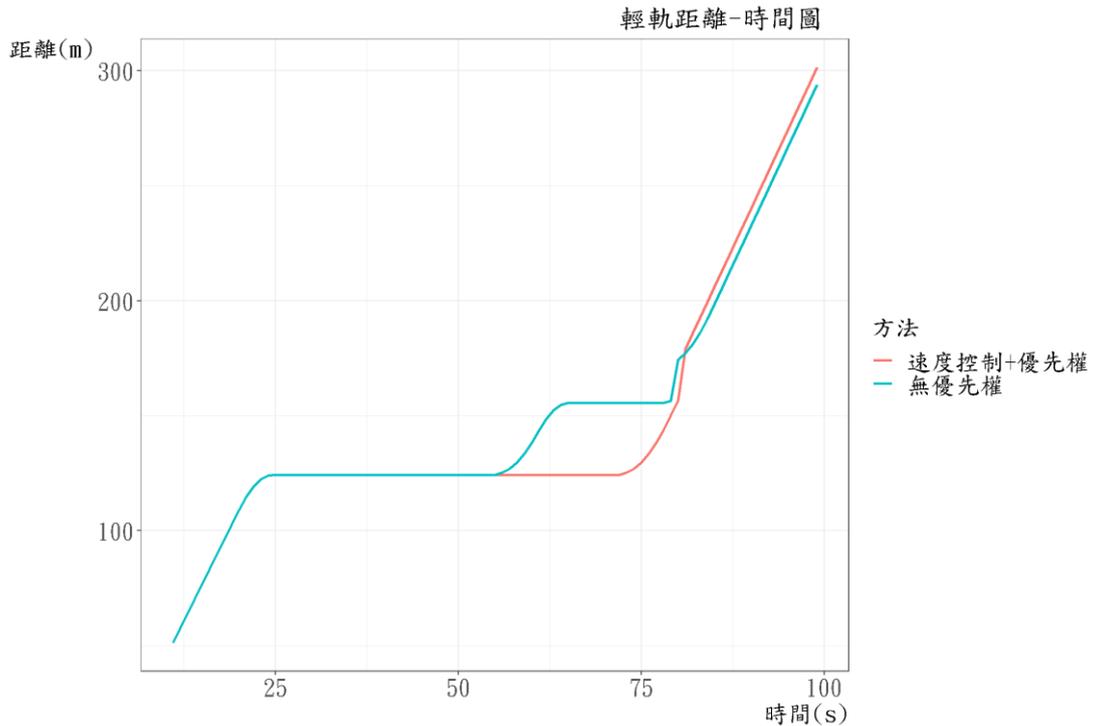


圖 4.9 輕軌站中多停靠距離時間關係圖

### (3) 靠站後須加速：

當從站點出發時，當前路口的時相為輕軌共用時相，但剩餘秒數不足以讓輕軌安全通過。如果輕軌加速到最大速度 40 公里就能夠通過路口，避免提出優先權並延長綠燈時相，如圖 4.10 速度時間關係圖、圖 4.11 位置時間關係圖所示。

輕軌約在 25 至 55 秒停靠站內，而輕軌共用時相約於 62 秒結束，從站出發後有 2 種走向：綠色曲線代表在無優先號誌的情況下，輕軌離開站點後但無法在剩餘秒數內通過路口，因此會減速等待下一個綠燈；紅色曲線代表速度控制，輕軌稍微加速至 9.1m/s 可順利通過路口。從圖 4.11 可以明顯看出，無優先號誌情況下，在 66 秒時輕軌停在路口，而速度控制情況下則能夠前進至下一個路口。

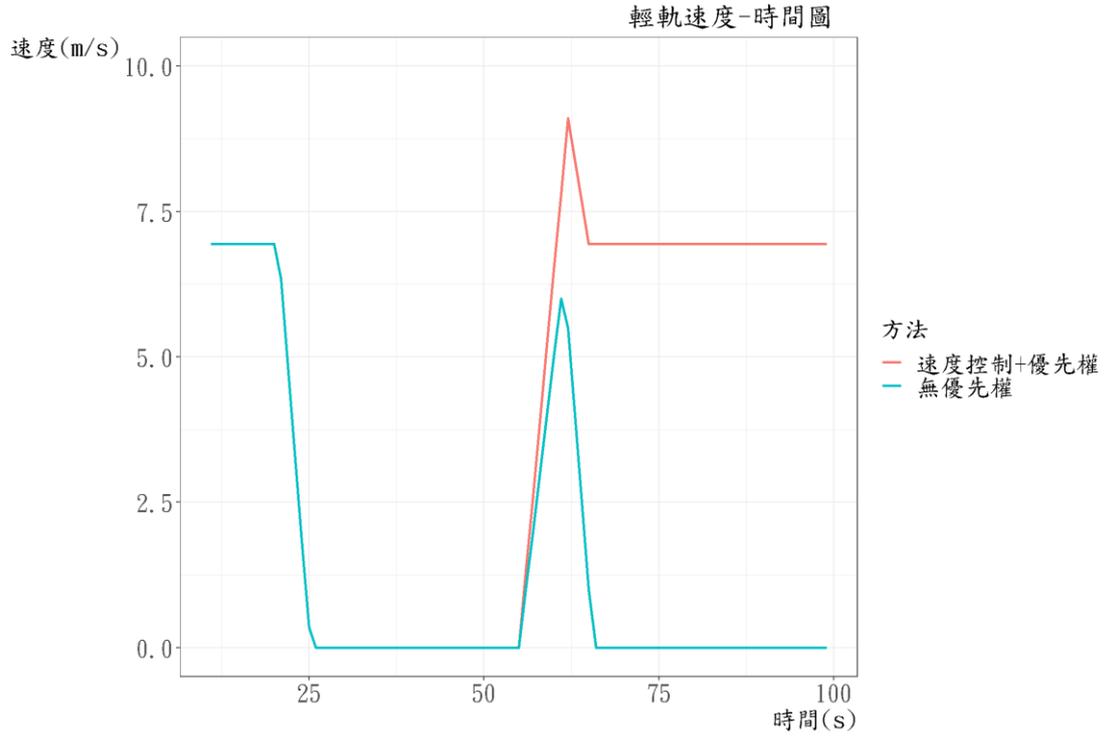


圖 4.10 輕軌加速速度時間關係圖

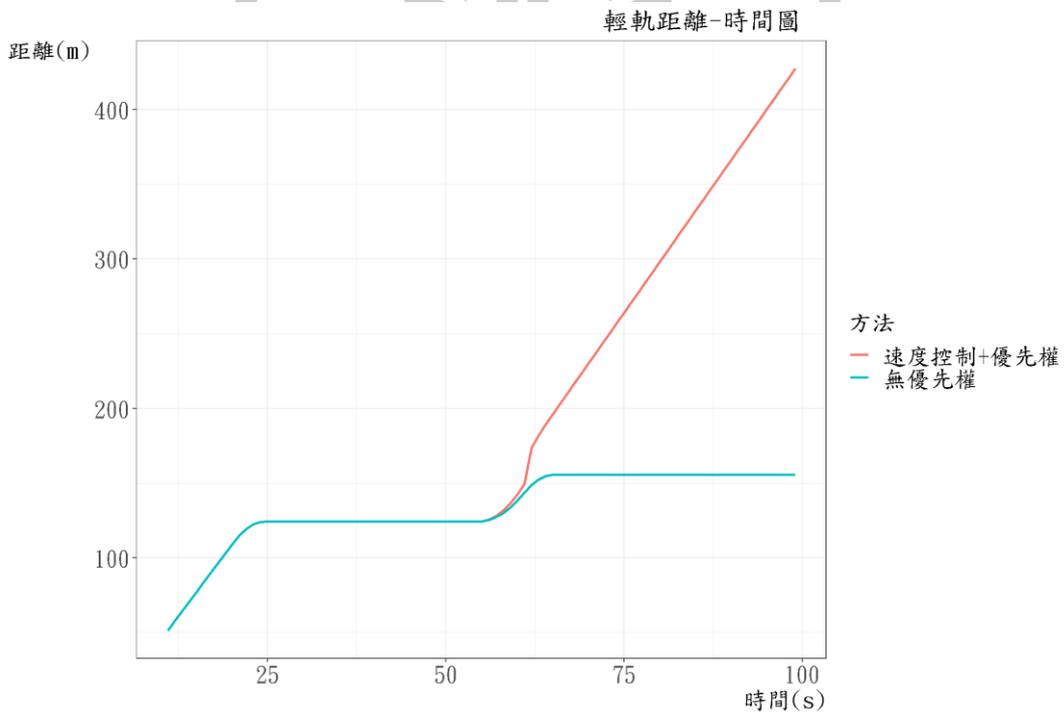


圖 4.11 輕軌加速距離時間關係圖

圖 4.12 和表 4.11 分別為整個測試路段中，針對不同出發點的輕軌行駛情況，其中在兩種速度控制方法中，輕軌提出優先權的次數從 5 次減少到 2 次。在圖 4.12 與圖 4.13 中，藍色曲線代表只要到路口非輕軌共用時相皆會提出優先權；

綠色曲線代表無優先權，輕軌會在路口前停紅燈；紅色曲線代表除了提出優先權且加入速度控制，為架構二的流程概念，而六個路口位置分別約於 780、980、1760、2360、2760、3160 公尺。

針對速度控至方法，從圖 4.12 中可以觀察到，第一個路口選擇減速通過路口，而無優先權須於路口停紅燈，位置介於優先權與無優先權之間；第二個路口在離站時，選擇先以時速 10 公里行駛，通過路口再加速；第三、四個路口，由於加減速都無法等到綠燈，因此需要提出優先權；三種方法在第五個路口皆可遇到輕軌共用時相，可直接通過；第六個路口因共用時相的剩餘綠燈秒數不夠，因此選擇加速通過路口。每個路口的三種方法決策情況詳見表 4.11。

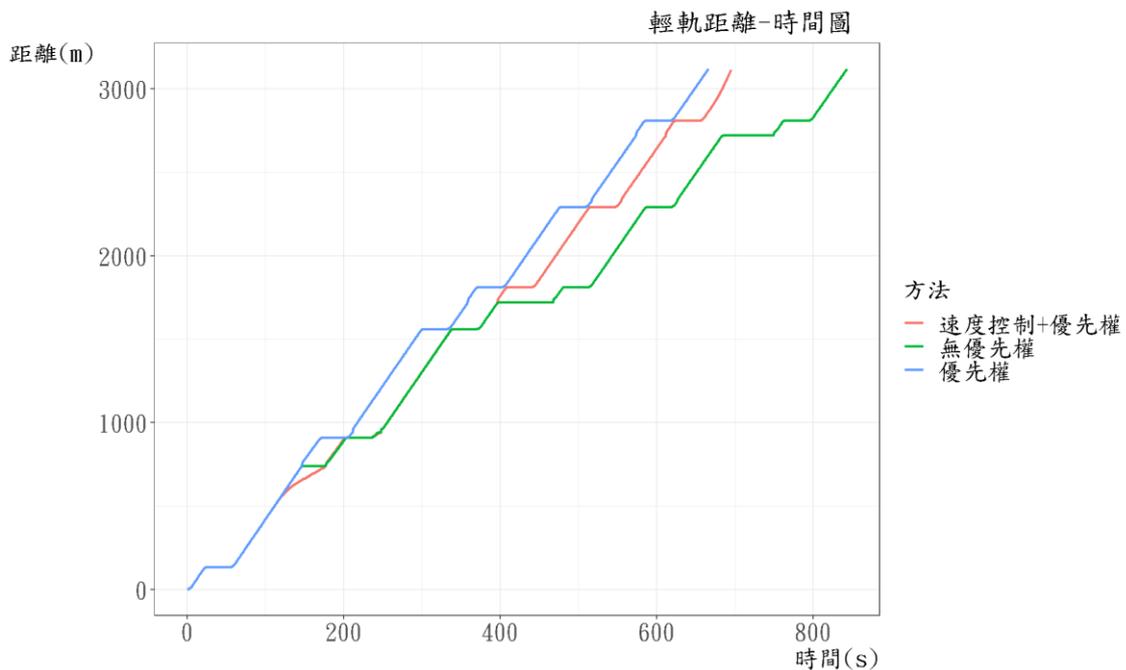


圖 4.12 第 22 秒出發輕軌三種方法距離時間關係圖

表 4.11 第 22 秒出發輕軌三種方法比較表

方法	路口一	路口二	路口三	路口四	路口五	路口六
速度控制+ 優先權(紅)	減速	時速 10 公尺	優先權	優先權	直接過	加速
無優先權(綠)	等紅燈	等紅燈	等紅燈	等紅燈	直接過	等紅燈
優先權(藍)	優先權	優先權	優先權	優先權	直接過	優先權

針對速度控至方法，從圖 4.13 中可以觀察到，圖 4.13 為第一個路口判斷在剩餘綠燈秒數內加速通過，位置較優先權與無優先權提早；第二個路口可不改

變直接通過路口；第三、六個路口，由於加減速都無法等到綠燈，因此需要提出優先權；第四個路口，剩餘紅燈秒數仍長，用時速 10 公里行駛仍須停下，因此選擇於站中多等 10 秒再出發，在距離 2360 附近的靠站，紅色曲線停等時間較藍色曲線長；第五個路口因共用時相的剩餘綠燈秒數不夠，因此選擇加速通過路口，又較藍色曲線提早到達下游路段。每個路口的三種方法決策情況詳見表 4.12。

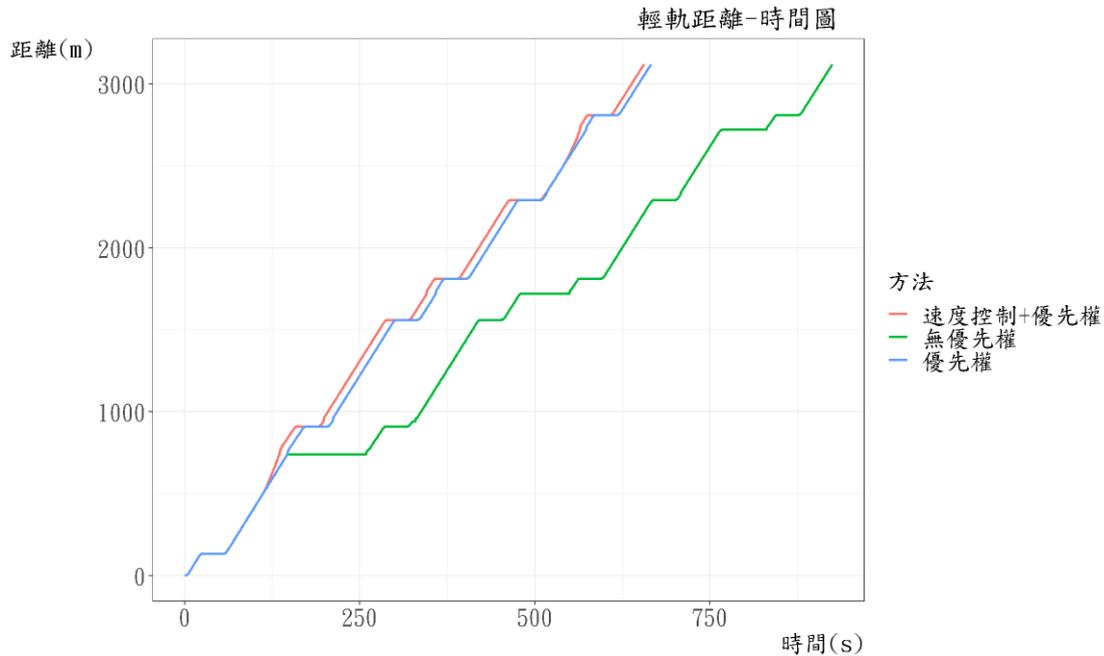


圖 4.13 第 90 秒出發輕軌三種方法距離時間關係圖

表 4.12 第 90 秒出發輕軌三種方法比較表

方法	路口一	路口二	路口三	路口四	路口五	路口六
速度控制+優先權(紅)	加速	直接過	優先權	站中多等 10 秒	加速	優先權
無優先權(綠)	等紅燈	直接過	等紅燈	等紅燈	等紅燈	等紅燈
優先權(藍)	優先權	優先權	優先權	直接過	優先權	優先權

以上兩個範例中，速度控制方法痛過加速、減速、多停等，其曲線可能介於優先權與無優先權之間或較藍色曲線左側，代表旅行時間方面，有時少於優先權方法，有時多於優先權方法。然而，無論是在加上優先權的方法還是速度控制的方法中，其旅行時間都較少於無優先權的方法。

在進行 150 次測試後，輕軌提出優先權的次數和旅行時間分別比較於三種方法的結果如表 4.13 所示，從這些結果可以看出，速度控制方法將輕軌提出優先權的次數從 5 次降低到 2.6 次，同時旅行時間並未和優先權方法相差太多。

表 4.13 輕軌三種方法比較

方法	提出 優先權次數	和優先權 相比%	旅行時間	和無優先權 相比%
無優先權	0	-100	726.5	-
優先權	5	-	533	-26.6
速度控制+ 優先權	2.6	-48	559.3	-23

速度控制方法在旅行時間方面相對於優先權方法確實有所增加，但對一般車輛的停等時間有顯著的下降。表 4.14 與表 4.15 中，列出了離峰和尖峰時段下，後續三個週期內，一般車輛平均停等秒數，與無優先權情況相比，速度控制方法的一般車輛停等時間增加約 7%，而優先權方法的增加幅度約為 25~27%。速度控制方法能夠顯著減少對一般車輛的影響，特別是在尖峰時段流量增加時，優先權方法的影響上升較快，而速度控制的影響上升較緩，這顯示速度控制對原路口的影響相對較小，且較不受流量大小影響。

表 4.14 輕軌三種方法對一般車輛平均停等秒數(離峰)

方法 \ 後續週期	1		2		3	
	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比
無優先權	48.12	-	48.03	-	47.73	-
優先權	60.13	24.96%	56.28	17.18%	53.77	12.65%
速度控制+ 優先權	51.17	6.34%	50.15	4.41%	49.19	3.06%

表 4.15 輕軌三種方法對一般車輛平均停等秒數(尖峰)

方法 \ 週期	1		2		3	
	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比	和無優先 權相比
無優先權	65.15	-	66.62	-	67.7	-
優先權	82.87	27.2%	78.98	18.56%	77.6	14.62%
速度控制+ 優先權	69.99	7.43%	71.15	6.68%	71.2	5.21%

### 3. 緊急車輛與輕軌協調(架構三)

救護車於路口前 150 m 提出優先權，而輕軌於路口前 100m 提出優先權，當救護車與輕軌前後接近路口，一般路口號誌根據先到先服務，誰先提出優先權先讓該車輛通過，因此兩種車的優先權會產生以下三種組合與對應的決策：

- (1) 救護車先提出優先權、輕軌還未提。
- (2) 救護車與輕軌同時提出優先權。
- (3) 輕軌先提出優先權、救護車還未提。

前兩者情況，在架構三中很明顯會判斷救護車先走再把路口給清軌，使救護車旅行時間最小，因此模擬著重於第三種情況。對於第三種情況，測試中輕軌從前鎮之星站出發，站點距離路口 100m 內，輕軌可選擇在站內多停等，等待救護車通過後再繼續行駛，表格 4.16 呈現了模擬結果，根據左側提出優先權的秒數差距，分別有原情況先到先服務和架構三流程，各自救護車與輕軌的通過時間，而最右側則呈現了架構三，輕軌在站內多停等的秒數。

從表 4.16 可發現，當輕軌比救護車提前 21 秒以上先提出，架構三的數學模型皆判定判定輕軌有足夠時間通過路口，救護車之後再通過路口，因此號誌先執行輕軌共用時相，同時因救護車還未通過，輕軌會做加速給予中間切換號誌、清道更多時間，因此輕軌通過時間比原情況稍微小。當輕軌提前救護車提出優先權相差秒數介於 1~20 秒，在原情況輕軌會先過，而救護車需減速甚至停下，而架構三的數學模型最小化整體通過時間，會先給救護車通過輕軌後過，因此輕軌會在站中多停等，可以發現架構三中救護車通過秒數皆呈現固定，因救護車從 150m 提出優先權至通過該路口需要的時間至少 18 秒。最後，當輕軌與救護車提出時間相差 0 以下，因救護車優先權較高，道路號誌會優先讓救護車通過，值得注意的地方是兩個方法的輕軌通過時間皆相同，但架構三允許輕軌在站內多停等，而不是在路口停下，這樣輕軌可以進行更多充電。

表 4.16 緊急車輛與輕軌協調測試結果

輕軌比救護車提早多久提出優先權(秒)	原情況		架構三		架構三
	救護車通過時間	輕軌通過時間	救護車通過時間	輕軌通過時間	輕軌多停等秒數
21	18	21	18	17	0
20	31	21	18	50	27
19	31	21	18	49	26
18	31	21	18	48	25
17	31	21	18	47	24
16	31	21	18	46	23

15	31	21	18	45	22
14	31	21	18	44	21
13	31	21	18	43	20
12	31	21	18	42	19
11	31	21	18	41	18
10	31	21	18	40	17
9	31	21	18	39	16
8	31	21	18	38	15
7	31	21	18	37	14
6	31	21	18	36	13
5	35	21	18	35	12
4	35	21	18	34	11
3	35	21	18	33	10
2	35	21	18	32	9
1	35	21	18	31	8
0	18	31	18	31	7
-1	18	31	18	31	6

圖 4.14 為輕軌提早救護車提早 3 秒提出優先權，Y 軸的距離為與路口相差的距離，在上方圖的原情況中，輕軌先走救護車後過，因此紅色圈圈中可以發現救護車前方停下等待輕軌通過。而下方圖代表架構三，救護車可先通行，後輕軌再從站出發通過路口，可明顯看出輕軌停等時間增加，原本應約於 3630 秒出發到約 3640 秒才出發，對照表 4.16 可知，輕軌除了原本於站中停的 30 秒還多停了 10 秒，也就是藍色方框表示處。

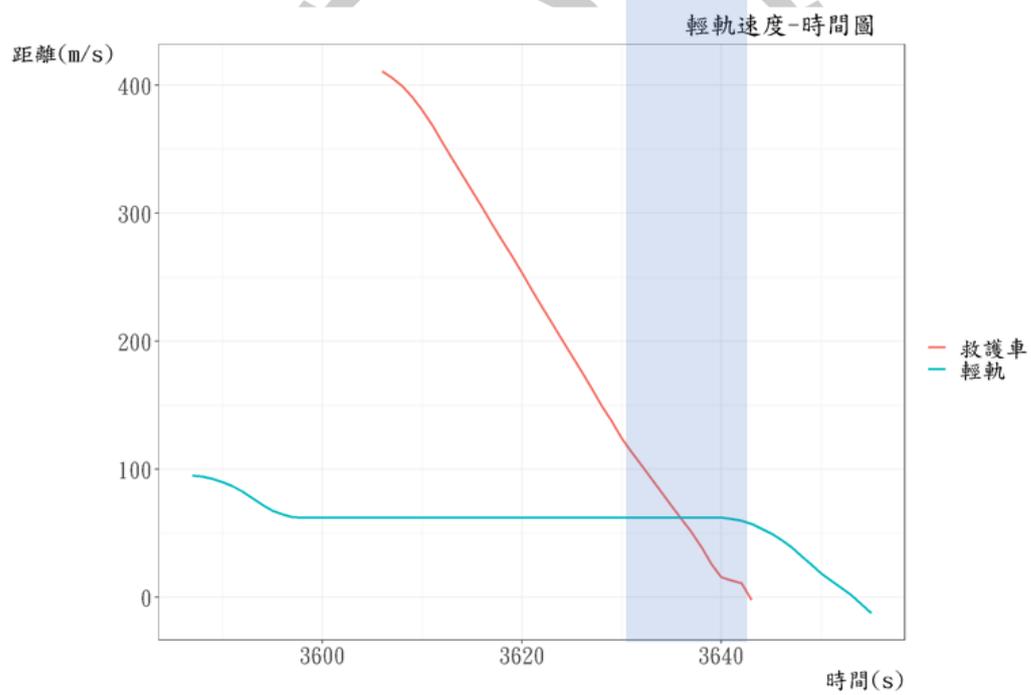
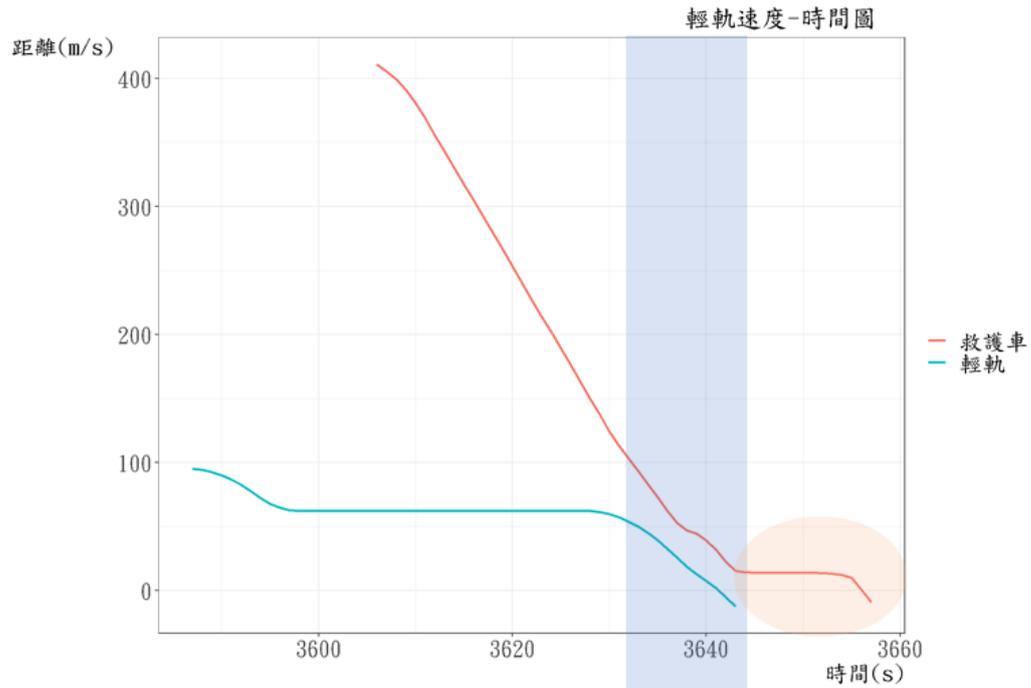


圖 4.14 輕軌早救護車 3 秒提優先權速度

## 第五章 結論與建議

本研究的核心目標在於降低緊急車輛的行車時間，通過實施緊急號誌的優先通行措施，並同時兼顧同樣享有優先權的輕軌系統，在路口相遇時，利用號誌的轉換使整體路網的效率最佳。首先，提出輕軌速度控制的數學模型，並藉此模型減少提出優先權的次數，進一步降低優先權對一般車輛的影響，最後將速度控制模型結合緊急車輛與輕軌號誌協調數學模型，以確保緊急車輛能夠擁有最高優先的通行。本節將總結測試結果，並就未來的研究方向和建議提出了一些建議，以供後續的研究人員或相關機關作為參考。

### 5.1 結論

1. 經過實施緊急號誌優先通行，緊急車輛的行進時間相較於無優先措施時，能夠減少約 41%至 45%。特別在尖峰時段效果更加顯著，因於流量增大和週期更長，使得緊急車輛需要更長的等待時間。透過緊急車輛優先權，能夠有效地疏導前方等待車隊，使緊急車輛能夠更快速地穿越路口，大幅增加了救援的黃金時間。除此之外，這也有助於減少因緊急車輛通過紅燈路口而導致的二次事故風險。
2. 優先權導致時相轉換時，對原本路口的一般車輛會產生一定的影響。如果號誌提前轉換為緊急時相，這會增加其他方向一般車輛的等待時間。例如，如果在距離路口 150 公尺之前就轉換為緊急時相，可以減少約 30 秒的行車時間，然而也導致一般車輛的平均等待時間增加約 1 秒。
3. 輕軌速度控制可減少優先權的提出。測試結果顯示，原本僅考慮優先權的方法中，一般停等車輛的等待時間增加約 25%~27%，而使用速度控制方法，可下降至約 6%~7%，對原路口的影響較小。尤其尖峰下，僅執行優先權方法，隨流量增加，受影響車輛增加，而在速度控制下，離峰和尖峰相比，一般車輛受影響增加幅度不大，流量大之路口效果更佳。
4. 在測試緊急車輛與輕軌前後出現在同一路口的情況下，利用模型計算出哪種車輛應先通行，同時輕軌會採取加速、減速、站中停久一點的措施。測試結果顯示，緊急車輛的通行時間可保持在最低時間 $=$ (路口 150m+路口寬距)/救護車時速，而輕軌在站中最多多停等 27 秒，這在可接受的範圍之內。

## 5.2 建議

1. 在本研究中，針對尖峰的緊急車輛優先號誌，提出優先權位置可變動，其根據前方停等車輛數多寡做改變，測試中，利用 Sumo 可即時獲取前方停等車輛數的數量，以便隨時調整優先權的位置。然而，目前路口尚未可即時取得停等車輛的數量資訊，因此建議可藉由政府提供的歷史路口資料，為優先權提出位置參考，約略計算每個週期內，各秒湧入並停下等紅燈的車輛數量，作為停等車隊的參考依據，進而找到最佳提出優先權位置。
2. 由於本研究的緊急車輛優先號誌會對各路口的車輛造成影響，因此建議後續可做時相補償。透過比較執行緊急號誌與歷史資料的各方向車輛停等秒數或停等長度，以了解其受影響程度，利用正補償、逆補償方法提供補償，並調整回連鎖路口的設定。
3. 在輕軌速度調控方面，除了模型中所限制的距離和時間，還需考慮輕軌的電量因素。當輕軌加速時，電量損耗可能會增加，若加速過程導致輕軌電量低於安全值，則應考慮放棄加速並選擇優先權通行；減速或站中停久一點可以提高輕軌電量。因此當一段路包含加減速時，電量消耗應為主要考量因素，因此建議取得的輕軌電量變化資訊，可做出更精確的判斷。
4. 就本研究中的輕軌速度模型而言，只考慮等加或等減的速度變化，因此建議可以將非等加等減的數學式納入研究的模型中，以找到更為平滑的速度變化曲線，或藉由調整速度的限制：最小時速 10km 或最大時速 40km，以更貼近實際情況。

## 第六章 參考文獻

1. 「C型路權輕軌系統之規劃設計暨交通安全課題分析」，交通部運輸研究所，民國110年4月。
2. 「交通號誌時制重整計畫(II)－績效評估模式建立」，交通部運輸研究所，民國97年4月。
3. 「輕軌號誌系統及道路交通號誌整合探討」，中華科技，民國106年1月。
4. Albrecht, T., Binder, A., Gassel, C.(2013). Applications of Real-time Speed Control in Rail-bound Public Transportation Systems. *IETIntell. Transp. Syst.* 2013,7, 305–314.
5. Cats O., Real-time predictions for Light rail train systems(2014), *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 2014, pp. 1535-1540.
6. He, Q., Head, K. L., & Ding, J. (2014). Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 65-82.
7. Noori, H., Fu, L., & Shiravi, S. (2016). A Connected Vehicle Based Traffic Signal Control Strategy for Emergency Vehicle Preemption. In Proc. Transp. Res.Board 95th Annu. Meeting, 2016, pp. 6716–6763.
8. Shibuya, S., Yoshida, T., Yamashiro, Z., & Miyawaki, M. (2000). Fast Emergency Vehicle Preemption Systems. *Transportation Research Record*, 1739(1), 44–50.
9. Smith, Harriet R, Hemily, Brendon, Ivanovic, Miomir (2005). Transit Signal Priority (TSP):A Planning and Implementation Handbook. United States Department of Transportation.
10. Vít Obrusník, Ivo Herman, Zdeněk Hurák.(2020). Queue discharge-based emergency vehicle traffic signal preemption. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 53, Issue 2, Pages 14997-15002, ISSN 2405-8963.
11. Watanabe, B. L., Patterson, G. S., Kempema, J. M., Magallanes, O., & Brown, L. H. (2019). Is Use of Warning Lights and Sirens Associated With Increased Risk of Ambulance Crashes? A Contemporary Analysis Using National EMS Information System (NEMSIS) Data. *Annals of Emergency Medicine*, 74(1), 101-109.

12. Zamanipour M., Head L., & Ding J. (2014), Priority System for Multi-modal Traffic Signal Control, *Transportation Re-search Board 93rd Annual Meeting*, Washington, DC, Jan. 2014.

