國立政治大學資訊科學系
Department of Computer Science
National Chengchi University

碩士論文

Master's Thesis

利用車載智慧物聯網路由技術以調控紅綠燈改善城市交通

A Vehicular Smart IoT Routing Technology for Urban Traffic Light Control

研 究 生：林煙童

指導教授：蔡子傑

中華民國一一零年三月

March 2021

DOI:10.6814/NCCU202100430

利用車載智慧物聯網路由技術以調控紅綠燈改善城市交通

A Vehicular Smart IoT Routing Technology for Urban Traffic Light Control

研 究 生：林煙童　　Student：Yen-Tung Lin

指導教授：蔡子傑　　Advisor：Tzu-Chieh Tsai

國立政治大學
資訊科學系
碩士論文

A Thesis
submitted to Department of Computer Science
National Chengchi University
in partial fulfillment of the Requirements
for the degree of
Master
in
Computer Science

中華民國一一零年三月

March 2021

DOI:10.6814/NCCU202100430

致謝

待在政大兩年多的碩士生活，是我人生中最難忘寶貴的日子，首先要感謝我的指導老師蔡子傑教授，不論是團體論文報告或是個人研究討論，教授總能提出許多用心的建議和指導，對我而言，教授的思考方式和經驗分享一直是能讓我有所收穫，即便研究後期遇到瓶頸也是能引導我找出盲點並協助我改善問題，十分感謝教授的指導讓我能順利完成研究取得碩士學位。

在實驗室學習的期間，必須感謝我的同儕夥伴陳遠和豪廷，不管是修習學分課程、討論作業報告、一起提科技部計畫甚至是最後的碩士論文研究，我們總能彼此給予不同的建議和想法，對我而言，有他們的陪伴讓我在政大的時光豐富且精彩，也感謝辰瑋、宗霖、川睿、俞樺學弟妹們，與他們的相處讓實驗室熱鬧了起來，在辛苦做研究的過程中，彼此的陪伴豐富了我的研究生生活。

最後要感謝我的家人，讓我在沒有經濟負擔的情況下完成了我的碩士學位，我在研究後期遇到難關，有他們在背後的支持與鼓勵，是使我堅持下去的動力，謝謝大家。

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

利用車載智慧物聯網路由技術以調控紅綠燈改善城市交通

摘要

塞車被視為城市交通所需面臨的嚴峻議題，嚴重的交通壅塞會造成通勤的時間增加、燃料耗損、空氣汙染、駕駛易感到憤怒和煩躁等。當前多數的紅綠燈控制系統利用道路的車流量調控，鮮少根據車輛自身資訊，以兼顧到車輛停等時間。要蒐集這些數據不是需部署大量感測裝置在路段上就是讓車主自行提供車輛資訊，前者對一座城市而言是筆龐大的成本負擔，後者則須駕駛消耗 4G 網路頻寬上傳即時的車況數據，在 4G 網路不普及的區域，用路人未必會願意協助數據的提供。

本論文探討當一些車輛願意自主提供自身資訊時，在僅利用這些車輛資訊改善城市交通壅塞的惡況，提升交通流暢度。雖然車輛資訊有時效性的問題，但在本研究提出的 Hybrid routing 概念中，在不利用 4G 網路上傳數據的前提下，結合無線隨意網路和耐延遲網路的特性，設計一個車載智慧物聯網路由技術將這些車輛資訊繞送到周遭的任一邊緣節點以供路口紅綠燈動態的調控，讓這些數據在本研究中只要“及時”而非“即時”仍可達到相同的效用，以改善城市交通壅塞的現象。

最後使用 SUMO 交通模擬器進行模擬，其結果顯示在車道約 80%的壅塞程度下，即使只有 30%的車輛願意參與本研究的數據提供和轉發，其車輛平均等待時間仍可少於傳統的車流計數方法。

關鍵字:物聯網、智慧紅綠燈、邊緣節點、無線隨意網路、耐延遲網路

DOI:10.6814/NCCU202100430

A Vehicular Smart IoT Routing Technology for Urban Traffic Light Control

Abstract

Traffic congestion is regarded as a severe issue in urban traffic, which causes increased commuting time, fuel consumption, air pollution, and driving anger and irritability, etc. At present, traffic light control systems are mostly based on traffic flow and rarely utilize the vehicle's own information to give consideration to vehicle's waiting time. To collect vehicle information, it is either to deploy a large amount of sensing devices on the roads or drivers need to upload real-time vehicle information by themselves. The former is a huge cost burden for a city, the latter consumes extra 4G bandwidth which drivers may be reluctant to do so.

In this thesis, we study how to use only vehicle information to improve urban traffic congestion when some drivers are willing to provide their vehicle data. Since the vehicle information is time-sensitive, we propose a hybrid routing to deliver these data "in-time" rather than "real-time" to any one of the surrounding edge nodes, even without 4G networks involved. Based on characteristics of vehicular ad hoc networks and delay tolerant networks (DTNs), we develop a vehicular smart IoT routing technology for anycast to edge server for dynamic traffic light control and improving traffic congestion.

DOI:10.6814/NCCU202100430

To validate our model, we use the SUMO traffic simulator for the experimental simulation. The results show that under about more than 80% congested traffic lanes, our method achieves less the average waiting time compared to the traffic flow count method even only 30% of vehicles are willing to provide and forward data.

Keywords : Internet of Things, Smart Traffic Light , Edge Node , Wireless ad hoc Network, Delay Tolerant Network

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

目錄

第一章 緒論 1

1.1 背景與動機 1

1.2 研究目的 3

第二章 相關研究 4

2.1 紅綠燈相關論文 4

2.2 智慧紅綠燈採用 4G 和 V2I 新應用 6

2.3 無線路由 7

第三章 架構與決策方法設計 9

3.1 物聯網環境與架構 9

3.2 塞車情境設計 11

3.3 車輛資訊生成 11

3.4 路口紅綠燈時長計算 12

3.5 紅綠燈實驗前測 14

3.6 Hybrid routing 成本計算 15

3.7 對照組設計 23

第四章 模擬實驗結果與分析 25

4.1 SUMO 交通模擬器 25

DOI:10.6814/NCCU202100430

4.2 實驗架構設計 26

4.3 傳遞率 28

4.4 車輛參與占比 31

4.5 車道壅塞程度 33

第五章 結論與未來展望 37

5.1 結論 37

5.2 未來展望 37

參考資料 38

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

圖目錄

圖 2-1 智慧紅綠燈示意圖 6

圖 3-1 城市交通角色流程圖 10

圖 3-2 十字路口與紅綠燈示意圖 12

圖 3-3 紅綠燈時長配置 13

圖 3-4 前測實驗圖表 14

圖 3-5 車輛可通訊半徑和 update 不同的示意圖 16

圖 3-6 車輛 ad hoc network 路徑建立示意圖 17

圖 3-7 以 ad hoc network 模式比較成本流程圖 18

圖 3-8 車輛反向交會示意圖 19

圖 3-9 以 DTN 模式比較成本流程圖 20

圖 3-10 設置黃色壓條的路段示意圖 23

圖 3-11 固定紅綠燈時長配置 24

圖 4-1 SUMO 模擬之地圖設計(全景圖) 26

圖 4-2 不同路由方法的車輛資訊傳遞率比較圖 28

圖 4-3 不同路由方法和各對照組的車輛平均等待時間 29

圖 4-4 不同路由方法和各對照組的車輛平均旅行時間 30

圖 4-5 不同車輛參與比的車輛資訊傳遞率比較圖 31

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

圖 4-6 不同車輛參與比的車輛平均等待時間比較圖 32

圖 4-7 車道壅塞程度 75-80%的平均等待時間和及時傳遞率 33

圖 4-8 約 30%車輛參與和各對照組的平均等待時間比較圖 34

圖 4-9 車道壅塞程度 50-55%的平均等待時間和及時傳遞率 35

圖 4-10 約 70%車輛參與和各對照組的平均等待時間比較圖 35

圖 4-11 車道壅塞程度 25-30%的平均等待時間和及時傳遞率 36

圖 4-12 約 90%車輛參與和各對照組的平均等待時間比較圖 36

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

表目錄

表 3-1 不同模式的勝出造成選擇不同 21

表 3-2 權重實驗測試選取 22

表 4-1 實驗參數表 27

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

第一章 緒論

1.1 背景與動機

智慧城市旨在通過數位科技與數據的方式解決在城市中的問題，像是一個城市的經濟、環境、交通、生活、網路等，藉由這些大數據的分析和處理以改善城市服務和管理，優化市民的生活品質。其中，城市交通可被視為城市繁榮程度的指標，不少人把交通擁塞視為經濟成長的正面訊息（表示觀光、物流等需求暢旺），然而交通惡化也會對其城市環境及民眾健康帶來許多負面影響。根據荷蘭機構 CE Delft 的研究，光是歐洲地區，因塞車和車輛廢氣而起的醫療花費、保健支出、和相關經濟損失，就高達 790 億美元的規模。

針對如何改善交通壅塞這點各個國家都致力於研究該項議題，現今的城市作法大多是在交通號誌燈前方路面埋設偵測壓條感應器，當車輛通過路段時立刻計數行經的車輛，再透過蒐集的大數據即時回傳到交通控管中心，以調控後續的紅綠燈時長配置。雖然透過壓條感應器可對道路上的車輛作精確的計數以調控路口紅綠燈，然而鮮少是根據自身車輛資訊，如車位置座標、平均車速、路口等待時間等車輛自身數據對紅綠燈時長作計算與調控，其原因不外乎要蒐集到這些複雜的車輛資訊勢必得部署大量精密的物聯網感測裝置在各個路段，這對於一個城市而言勢必是筆龐大的開銷，若是讓車主自行提供自身車輛資訊，其本身為了要上傳這些即時的車況數據，必須得花費自身的 4G 網路頻寬才能上傳，這對於一個駕駛而言是非必要的開銷，若是在 4G 網路不普及或是沒有網路吃到飽的國家，用路人未必會願意協助數據的提供。

為此，在不利用到車輛駕駛以自身 4G 網路上傳數據的前提下，本研究結合了以下兩種不同類型的網路傳遞方式做為我們資料傳遞與蒐集的途徑，望能達到相同的效用以改善城市交通。無線隨意網路（WANET：Wireless ad hoc network）是一種分散式的無線網路系統，這種網路系統是臨時組成的，由節點與節點間連接，網路的拓樸變動性高，可能不存在一個穩定的網路環境；耐延遲網路（DTN：Delay Tolerant Network）

DOI:10.6814/NCCU202100430

是一種能將封包做儲存攜帶並轉發到目的地的一種數據傳播方式，能在不穩定的網路環境中(鏈路中斷)轉發封包，本研究期望結合這兩種不同類型的網路傳遞方式做為我們研究中資料匯集的方法，以應變在不同情境下的交通路況變化。

為了驗證車輛資訊的幫助能優化城市的交通問題，本論文探討在透過本研究所設計的資料路由傳遞方式下，將車輛資訊傳遞到城市中任一邊緣節點後，並在僅只使用這些車輛資訊重新調控路口紅綠燈，針對因塞車造成的交通堵塞問題做改善，以減少車輛在城市中所浪費的平均等待時間。另外，為了要改善複雜多變的城市交通，其車輛資訊勢必有時效性，然而這些資訊對於本研究而言只要“及時”非“即時”就可達到相同的效果，故本研究提出 Hybrid routing 的概念，透過無線隨意網路和耐延遲網路的結合，將車輛資訊路由到周遭的任一邊緣節點，以此方式不利用與我們相同的 4G 網路頻寬上傳車輛數據，減少用路人的負擔，最終期望能透過這樣的方式提供紅綠燈調控所需的路況資訊，改善城市交通壅塞的惡況。

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

1.2 研究目的

若要部署大量的物聯網感測裝置(如壓條、攝影機、感測器)在城市的各個角落，用以蒐集車輛的資訊對城市勢必造成龐大的成本負擔，本研究探討當車輛願意自主提供自身資訊時，在僅利用這些車輛資訊改善城市交通壅塞的現象。另外，其車輛資訊雖有時效性，然而這些數據對於本研究只要“及時”而非“即時”就可達到相同的效果。在不利用 4G 網路上傳車輛數據，本研究提出一項 Hybrid routing 的概念，結合無線隨意網路和耐延遲網路的路由特性，將車輛資訊傳遞到任一邊緣節點，協助後續路口紅綠燈的動態控制，改善因塞車造成的交通堵塞現象。

國立政治大學
National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

第二章 相關研究

2.1 紅綠燈相關論文

2.1.1 Adaptive Traffic Light Control of Multiple Intersections in WSN-based ITS [2]

本文使用無線感測網絡（WSN）蒐集實時的交通數據（如交通量、等待時間、停車次數和車輛密度）來研究多個路口的自適應紅綠燈控制，該方案根據這些實時的交通數據來調整多個路口的紅綠燈順序，可以從當地交通數據和相鄰交叉路口的交通狀況中計算出最佳綠燈時間長度。 在文中提出的自適應多路口紅綠燈控制方案，其目的是提高城市的交通吞吐量、減少平均等待時間和平均停車次數。其實驗結果表明相比於固定時間控制、促動響應控制，該方案可產生更高的交通吞吐量並減少車輛的等待時間。

2.1.2 Dynamic Allocation of Traffic Light Plans as a Traffic Reduction Strategy [5]

本文探討如何透過動態配置的方式改善交通紅綠燈以解決在大城市中由於車輛快速增長所造成的壅塞。在交通管理系統中存在兩種現有的控制策略：集中式和分散式，其中在分散式系統中，交通紅綠燈控制器具有自主權，可以將不同的交通管理策略應用於中央軟體，以報告其運行狀態。要完成該策略需要在城市中各道路間安裝大量的感測器，對城市而言是筆龐大的成本花費，為克服該難題該論文提出一項協作數據，利用城市的道路參與者如行人、汽、機車等所生成的大量路況數據，實驗表明使用者減少約 39%的平均等待時間。

2.1.3 FogFly: A Traffic Light Optimization Solution based on Fog Computing [6]

本文提供了一種基於霧的方法來解決紅綠燈優化問題，它利用了自適應交通信號控制（ATSC）模型。 ATSC 系統要求能夠嚴格反映實時流量狀態。所提出的霧計算框架，即 FogFly，由於其在位置感知、低延遲和對交通狀況變化的承受能力方面的特性

DOI:10.6814/NCCU202100430

而符合此要求。隨著交通數據的及時更新並在靠近數據源（即交叉路口的車輛）部署的霧節點處進行處理，可以有效地優化交通燈週期，同時可以有效利用網絡邊緣可用的虛擬資源。評估結果顯示，與在雲計算方法中運行的服務相比，在 FogFly 中運行的服務可產生更好的性能。

2.1.4 Virtual Traffic Light Control Considering the Continuity of Traffic Flow [19]

隨著車載隨意網路(VANET)的發展，出現了各種透過車輛的訊息交換方法以解決十字路口交通壅塞的問題，其中虛擬交通信號燈控制是可以根據交通流量來動態切換交通信號燈狀態的解決方案。本文提出了一種新穎的虛擬交通信號燈控制方案，與現有作品不同，考慮了交通流量的連續性，利用連續行駛的車輛來保持相對較高的行駛速度和較短的車輛間隙，並為了防止飢餓問題考慮了車輛的等待時間。其結果顯示該方法可以在交叉路口實現更高的吞吐量，即可以通過更多的車輛。

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

2.2 智慧紅綠燈採用 4G 和 V2I 新應用[21]

澳洲電訊公司 Telstra 在澳洲南部幾個交叉路口測試智慧紅綠燈系統，讓車輛連接 4G 蜂窩式網路，以支援車對基礎設施(V2I)的創新應用，進而紓解交通壅塞問題，其作法並非在每一個交叉路口的紅綠燈部署專用短程通信(DSRC)硬體，而是利用既有的 4G 網路來達到 V2I 應用。

Telstra 研發虛擬路側設備，可以跟車輛和紅綠燈的中央管控平台互動，透過 4G 網路廣播幾何資訊訊息以及訊號相與時間封包(SPaT)。雪梨適應性交通控製系統(SCATS)的 SPaT 引擎(SSE)會依照中央管控平台的即時資訊，產生訊號相與時間封包，再經由 4G 和雲端平台傳輸到 V2I 連網車，進而改善繁忙路段的車流和交通壅塞。

圖 2-1 智慧紅綠燈示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

2.3 無線路由

2.3.1 Ad-Hoc Network

無線隨意網路是一種分散式的無線網路系統，這種網路系統是臨時形成，無線隨意網路特色在於無須事先架設網路基礎設施，便能以無線網路的方式利用此種網路特性由節點與節點間進行動態連接傳遞資訊，也因為這樣，每一個節點網路中的節點都有能力轉送網路封包給其他節點（稱之為路由）。經典的路由協議可以按所需因素分成AODV（Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing）、DSDV（Destination-Sequenced Distance-Vector）、DSR（Dynamic Source Routing）等，這些路由協議首先需要建立完整的路由，然後在路由建立之後轉發。

2.3.2 Delay Tolerance Network(DTN)

延遲容忍網絡（DTN）是一種計算機網路體系概念，與傳統網路體系結構相比，旨在解決可能缺乏連續網路連接的異構網路中的技術問題，例如移動的節點間、極端的地面環境、空間中規劃的網路等。當發生難以或無法建立實時的節點到節點路徑時，可以採用「存儲-攜帶-轉發」的特性將資訊封包作存儲，並攜帶該數據進行移動，期待他最終能轉發給更適合的端或是轉發到目的地，也因為這樣特殊的傳遞方式，他的傳遞時間比傳統網路體系還要久，甚至因延時時間過長而造成封包過期。

2.3.3 PLASMA: A new routing paradigm for wireless multihop networks [1]

本論文建立了一個“中繼節點集”，該方法基於 Anycast forwarding 計算節點到其他節點的鏈接路徑，然後通過這些節點鏈接到目的地。 本文使用類 Bellman-Ford 算法來計算傳輸路徑的成本，透過中繼節點之間的成本的計算，來選擇優先級最高的權重最高的路徑，即成本最低的路徑來傳遞數據，該算法啟發我們節點到目的地間的成本設計可以提升我們數據的傳遞，以找出當下最佳的節點作為轉發節點，提升我們數據的傳遞成功率。

DOI:10.6814/NCCU202100430

2.3.4 DT-AODV: An On-Demand Routing Protocol based DTN in VANET [3]

本論文研究了 MANET 中的傳統路由協議，並建立了車輛在道路上的實際行駛情況進行網絡仿真，分析了 VANET 環境下 AODV，DSDV 和 DSR 路由協議的各個方面的性能，結果表明：這三種經典的路由協議不適用於 VANET，具有封包傳遞率低、路由負載高以及平均端到端延遲過大。然後根據耐延遲網絡（DTN）的網絡拓撲特性可以隨時間動態變化，以確定適當的封包傳遞路徑，並且可以有效地將封包發送到目的地，因此以存儲-攜帶-轉發的特性為設計基礎，提出了一種基於 DT-AODV 的按需路由協議 DTN，考慮了連接時 VANET 的可變性，在 VANET 中建立了有向圖模型，其實驗比較表明，DT-AODV 比 MANET 中的其他經典路由協議更適合 VANET。

2.3.5 Hybrid Routing Scheme Combining with Geo-Routing and DTN in VANET [4]

現今車載隨意網路(VANET)的挑戰在於節點的高移動性所造成的不穩定以及車道間死角所導致的通信中斷。本論文為了提高封包傳遞率和減少通信流量提出了 SRS (Source routing protocol based on Road network Structure)方法，基於道路拓樸和中繼節點的通信路徑計算，並動態修復斷開的路由。此論文另提到 SRS 在低車輛密度的環境中不能有足夠的封包傳遞率，如果未能在多個重新路由搜索中找到傳送封包的路徑，則改使用 DTN(Delay Tolerant Network)演算法來提高傳遞率。

DOI:10.6814/NCCU202100430

第三章 架構與決策方法設計

3.1 物聯網環境與架構

在本研究中，由於需要利用到大量在道路中隨意移動的車輛資料，並藉由無線隨意網路和耐延遲網路現資訊的任播路由(anycast routing)傳遞，將車輛資訊傳遞到任一邊緣節點用以協助重新計算和配置路口紅綠燈，故物聯網環境由以下角色組成：

1. Vehicle node：

   在地圖中隨意移動的車輛節點，會不斷的生成自身的資訊封包，如 GPS 座標、行駛方向、平均車速度、每次停止到啟動的路口等待時間，並將自身的資訊透過任播路由的方式轉發到城市中的任一邊緣節點。

2. Edge node (RSU)：

   做為車輛資料封包的接收地，安置在城市中任一路口(並非每個路口都有設置)，會定期將蒐集到的車輛資訊傳遞到交通中央控管中心(Edge server)。

3. Traffic Light：

   城市中各個路口的紅綠燈，受到 Edge server 的調控，其存在影響車輛在路口的流動和等待的時間，故對城市交通的影響至關重要。

4. Edge Server (Control Center)：

   交通中央管控中心，與邊緣節點和路口紅綠燈連接，負責控管各路口的紅綠燈，以每 10 分鐘(600 秒)為一個週期，將從邊緣節點蒐集到的車輛資訊計算並重新配置到各個路口的紅綠燈。

DOI:10.6814/NCCU202100430

本研究利用城市中隨意移動的車輛所生成的自身數據，提出一項 Hybrid routing 的概念，透過無線隨意網路和耐延遲網路實現資訊的任播路由 (anycast routing)傳遞，經過比較每台車傳遞到城市中任一邊緣節點(Edge node)這段過程的自身成本C_{iE}，決定出轉發的車輛以提升將數據傳遞到邊緣節點的傳遞成功率，再讓邊緣節點將這些車輛資訊定期傳到管控中心(Edge Server)進行相關的計算和處理。其中，本研究的邊緣節點和交通中央管控中心間傳遞成本為零且不會有傳遞延遲的情況。最終每 10 分鐘(600 秒)為一個週期重新配置城市中各個路口的紅綠燈，以改善整體城市的交通狀況。

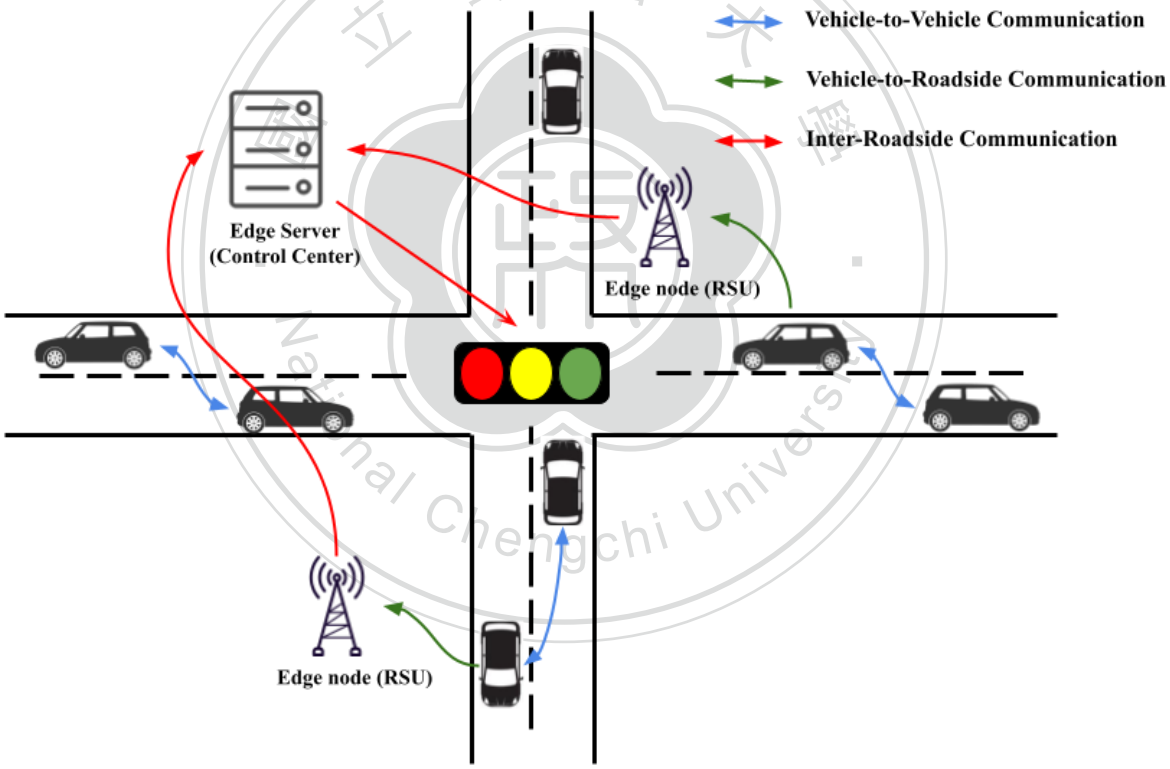

圖 3-1 城市交通角色流程圖

,

DOI:10.6814/NCCU202100430

3.2 塞車情境設計

在本研究中為了呈現因塞車造成的交通堵塞，在透過本研究的方法下及時調控路口紅綠燈以改善城市交通壅塞的惡況，故針對移動的車輛進行了相關的設計。在現實世界中，影響城市交通堵塞(塞車)的因素不外乎車流量過大、道路容量設計不良、路口紅綠燈配置未能及時調整、發生交通事故(不考慮)等，故本研究會針對縱向的路段增大車流，實現交通壅塞的情境以便作後續實驗。

車輛移動軌跡和特性:

- 縱向的直行車輛(占多數)
- 橫向的直行車輛
- 任意轉彎的車輛
- 車輛不回頭

3.3 車輛資訊生成

車輛資訊對於路口紅綠燈調控的幫助是我們的研究議題之一，故本研究的車輛會定期生成自身車輛資訊如車輛座標、車速度、路口等待時間的封包，透過這些車輛資訊的協助以找出最佳的紅綠燈時長配置，其中根據車輛自身的行車路況分別生成兩種類型的車輛資訊封包：

- 當車輛移動時，會以每 10 秒生成一個含自身座標和移動速度的封包
  - *Packet = { gpsX, gpsY, speed, waiting time(=0), timestamp }*
- 當車輛停止時，會開始記錄在路口的等待時間直到啟動的瞬間，生成一個含自身座標和等待時間(停止->啟動這 0 段時間)的封包
  - *Packet = { gpsX, gpsY, speed(=0), waiting time, timestamp }*

DOI:10.6814/NCCU202100430

3.4 路口紅綠燈時長計算

本研究探討在透過車輛自身數據的協助下，對於紅綠燈調控是否有正向幫助，故在計算紅綠燈時長配置中加入了各路段的車流量、平均車速度、平均車等待時間，該數值來自我們所蒐集來的車輛資訊封包，透過解析封包中 gpsX 和 gpsY 座標定位出該封包產出的車道，並將該車輛資訊封包的其他資訊如平均速度、等待時間加入到其對應的十字路口系統(ID)和與其路口連接的南北向(NS)或東西向(WE)的車道上。

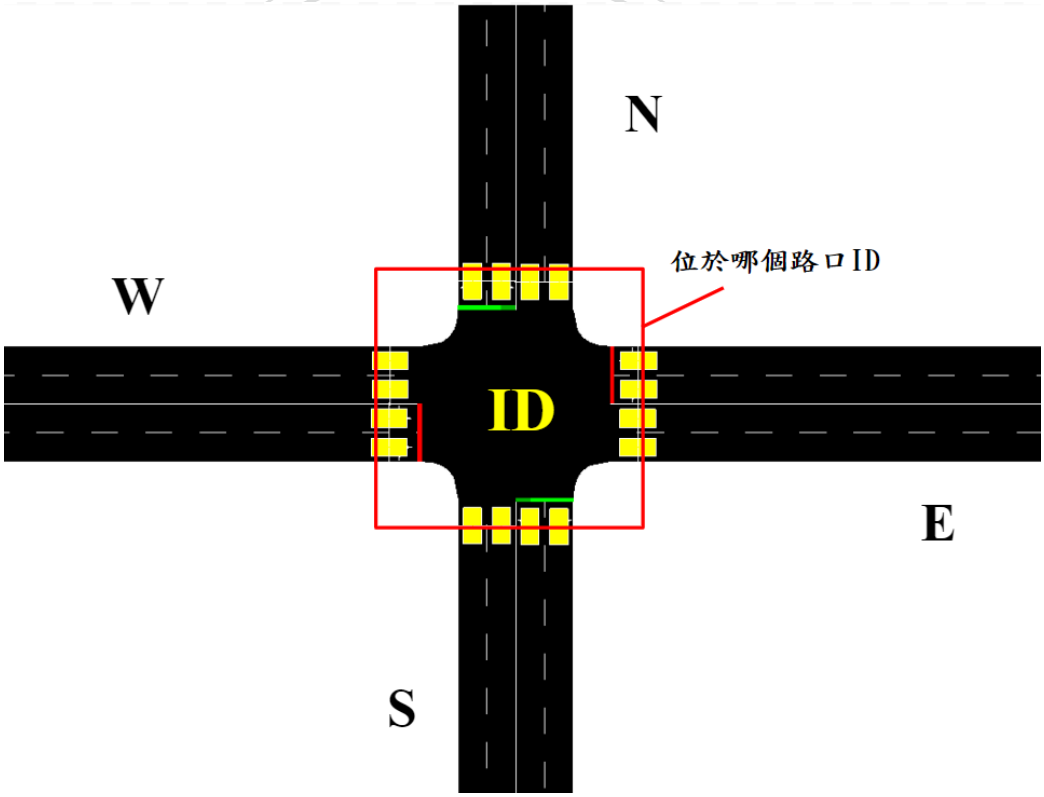

圖 3-2 十字路口與紅綠燈示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

本實驗利用封包的數量來判斷各路段的車流量，並依此獲得各路段的平均車速度和平均路口等待時間等資訊，依據各路口(ID)的東西或南北向的路段車流量、平均車速度、平均等待時間，搭配 a1、a2 變數平衡調整後得出該路口東西和南北向的綠燈時長，該公式設計如下：

$$\boldsymbol{Green\ \ Light\ \ length}[\mathrm{ID,NS/WE}] = \boldsymbol{a1} * \frac{\boldsymbol{vehicle\ \ flow}}{\boldsymbol{avg.vehicle\ \ speed}} + \boldsymbol{a2} * \boldsymbol{avg.waiting\ \ time}$$

- $\boldsymbol{vehicle\ \ flow}$：透過封包解析估算路口東西/南北向車道的車流量
- $\boldsymbol{avg.vehicle\ \ speed}$：路口東西/南北向車道的平均車速
- $\boldsymbol{avg.waiting\ \ time}$：路口東西/南北向車道的平均等待時間

本研究以每 600 秒為一個週期重新配置，其中為避免因紅綠燈配置在計算後給予的綠燈時間過長，故對東西向和南北向紅綠燈加總做平衡，以加總後不超過 120 秒為主，若超過則依比例重新配置：

if Green Light length[NS] + *Green Light length*[WE] >120：

$$\textit{Green Light length}[\mathrm{NS}] = 120 * \frac{\textit{Green Light length}[\mathrm{NS}]}{\textit{Green Light length}[\mathrm{NS}] + \textit{Green Light length}[\mathrm{WE}]}$$

$$\textit{Green Light length}[\mathrm{WE}] = 120 * \frac{\textit{Green Light length}[\mathrm{WE}]}{\textit{Green Light length}[\mathrm{NS}] + \textit{Green Light length}[\mathrm{WE}]}$$

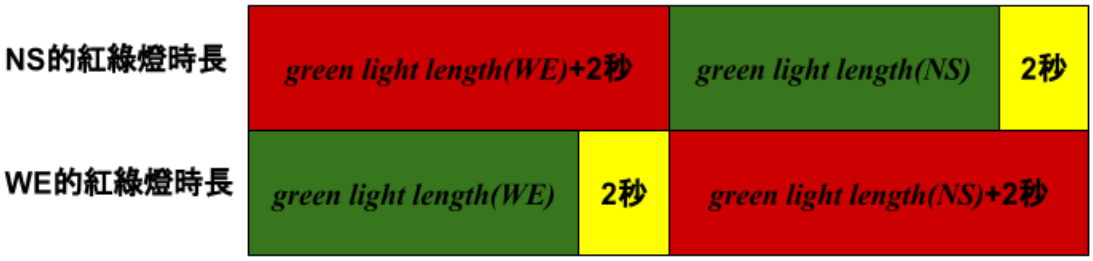

圖 3-3 紅綠燈時長配置

DOI:10.6814/NCCU202100430

3.5 紅綠燈實驗前測

我們對於設計的紅綠燈配置方法做了一項前測的實驗，該實驗針對不同比例的車輛資訊完整度所提供的車輛資訊下，對於紅綠燈的配置是否能過勝過單純只利用車流量和固定時長的紅綠燈配置，為此我們將車輛資訊完整度分成 100%、80%、50%、20%四種層級進行比對。

該實驗前測顯示，在資料完整度越高的情況下，對於紅綠燈配置改善的效果就越佳，其車輛的平均等待時間就越少。第二，80%和 100%的資料完整度對於平均等待時間的改善幅度不大，為此我們可以推估說只要有約 80%的路況車輛資料就能協助我們計算出較佳的紅綠燈配置時長，以改善城市交通壅塞的現象。第三，在利用到車輛其他資訊如車輛平均速度、車輛路段的等待時間的幫助下，對於車輛的平均等待時間能夠少於單只利用車流量和固定時長配置的方案。綜合以上三點，本研究採用所提出的 Hybrid routing 方法，將車輛資訊傳遞到任一邊緣節點進行蒐集和後續的紅綠燈調控以改善交通狀況，而我們的目標是盡可能的提升封包的傳遞成功率讓資料齊全。

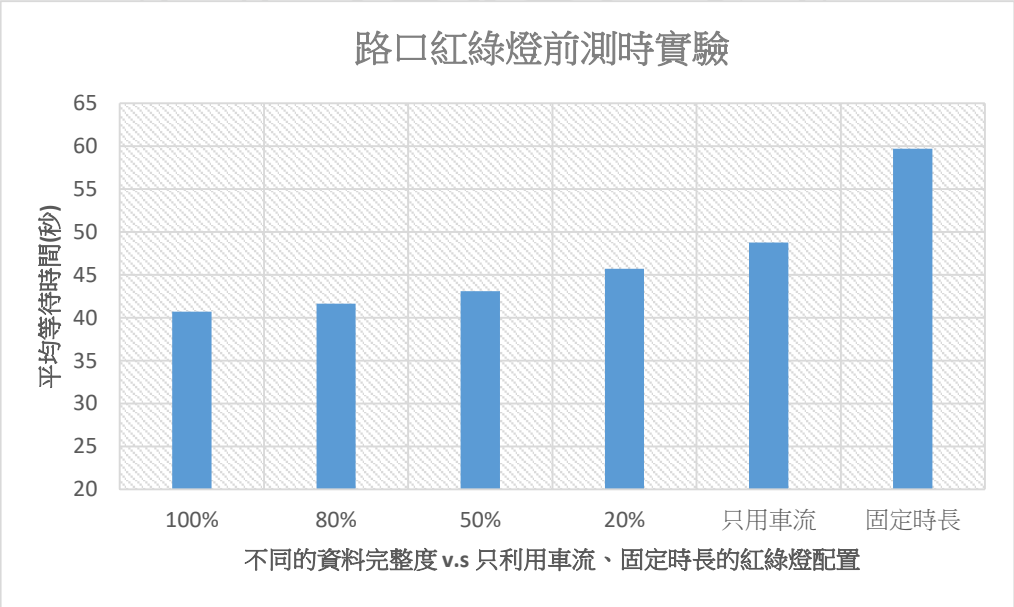

圖 3-4 前測實驗圖表

DOI:10.6814/NCCU202100430

3.6 Hybrid routing 成本計算

一、傳遞成本設計:

在本研究中，我們讓車輛以任播路由(anycast routing)的方式進行數據的傳遞，該方式是無線網路體系結構中使用的一種傳輸技術，它利用無線網絡的移動便利性和地域多樣性來改善無線網路的傳輸性能並減少可能的開銷。其中本研究產生的車輛資訊封包是唯一的 single copy (沒有副本)，以此減緩因大量車輛數據封包在網路中傳遞所造成的碰撞干擾問題。

為了避免數據封包隨意地傳遞造成封包的遺失，本研究提出一項 Hybrid routing 的概念，結合了 Ad-hoc network 和 DTN 兩種不同的路由傳遞演算法，設計車輛 i 路由到任一邊緣節點(Edge node)這段路程的成本C_{iE}，透過成本C_{iE}的比較選出合適的車輛成為轉發節點以提高車輛數據封包到達目的地的傳遞成功率，該成本設計如下：

$$C_{iE}：\{min\ hop\ count\ to\ edge,\ min\ time\ interval\ to\ edge,\ direction\}$$

其中，min hop count to edge 指車輛透過既有的傳統 ad hoc 路由演算法，建立起從目前車輛位置路由到任一邊緣節點的有效路由傳遞路徑，並回傳其過程中所需經過幾個 hop 的數量；min time interval to edge 是對曾相遇到邊緣節點的時間點距離當前時間的間隔，即多久前相遇過邊緣節點，將此轉換為時間成本，該數值提供後續和周遭車輛進行成本比較。

DOI:10.6814/NCCU202100430

在本研究中，車輛的無線可通訊半徑為 30 公尺，過程中我們讓車輛以每 10 秒為一個週期更新自身狀態藉此減少因為要不斷更新自身狀態的維護成本，當下會探索範圍內的其他車輛並發送讓範圍內的車輛回傳其成本C_{jE}的請求，再從蒐集回來的成本中選出最小的成本C_{jE}，與自身成本C_{iE}進行相關的比較。

以下圖為例，車輛 *i* 以每 10 秒為週期更新(update)，當 update = 10 時啟動搜索範圍內其他車輛讓其車輛回傳成本C_{jE}進行比較，過程中由於每台車的 update 都是獨立的狀態，故可能存在對方的 update 可能是幾秒前的狀態而非是當下最新的資訊，使得該成本資訊可能是舊的不確定性。

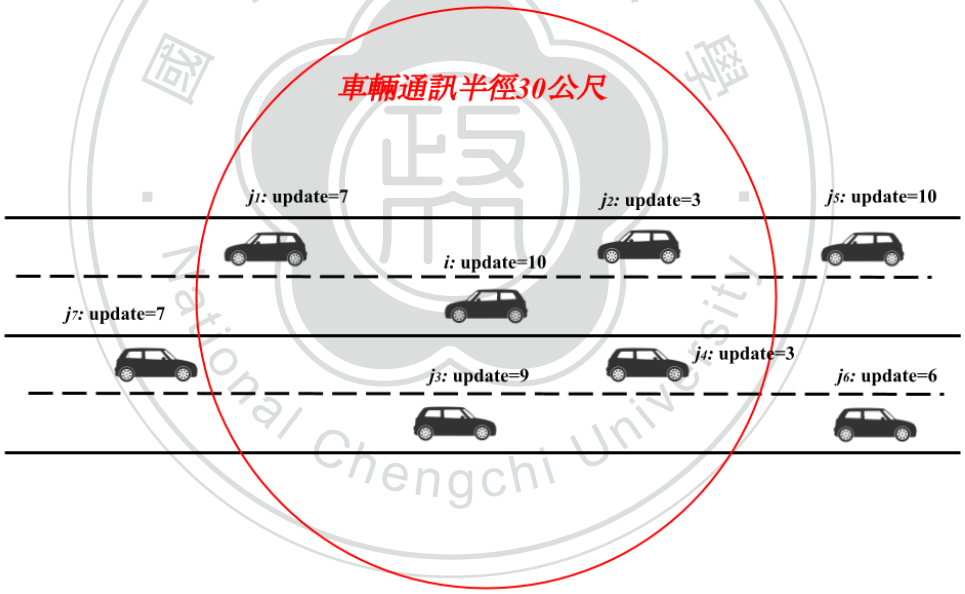

圖 3-5 車輛可通訊半徑和 update 不同的示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

二、車輛相遇情境-ad hoc 模式

由於 ad hoc 路徑的建立在過去已經有諸多的實驗，故在本研究中 ad hoc 路由路徑的建立並非我們深入探討的議題，我們假設在有方法能夠以 on demand 的方式建立起最短的 ad hoc 路由傳遞路徑，並依需要多少個 hop 數才能傳到邊緣節點作為成本進行比較。

其中車輛會以每 10 秒為週期 update 成本，查找和建立範圍內能傳遞到邊緣節點的 ad hoc 路由路徑，同時搜索半徑 30 公尺範圍內的其他車輛，讓範圍內的車輛回傳其成本C_{jE}進行比較。當建立好路徑後會與範圍內的其他車輛比較 hop count，以 hop count 最小的車輛勝出並攜帶對方的車輛數據封包。為符合真實情境，本實驗對每次 hop 的傳遞都設有 5%的機會鏈路會斷開，斷開後就由該車輛節點將該數據封包做儲存攜帶，並等待下次的轉發機會。

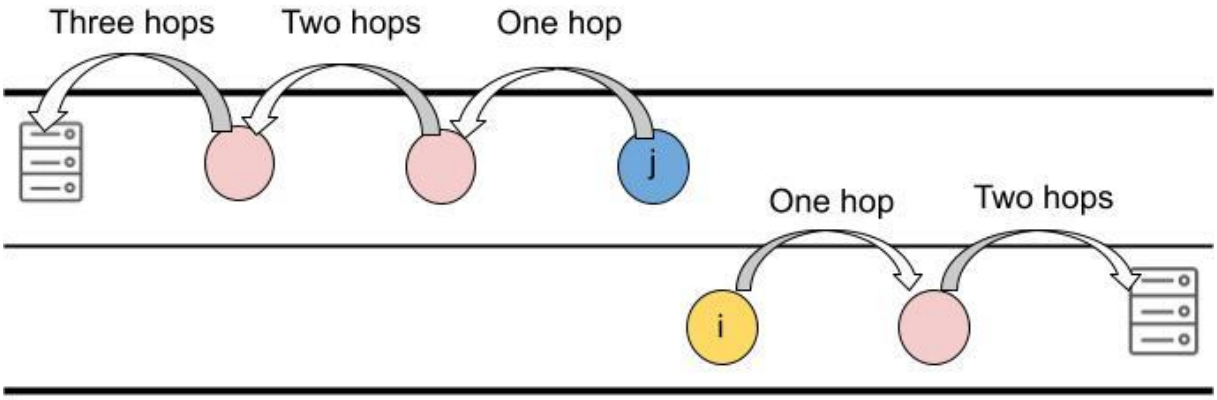

圖 3-6 車輛 ad hoc network 路徑建立示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

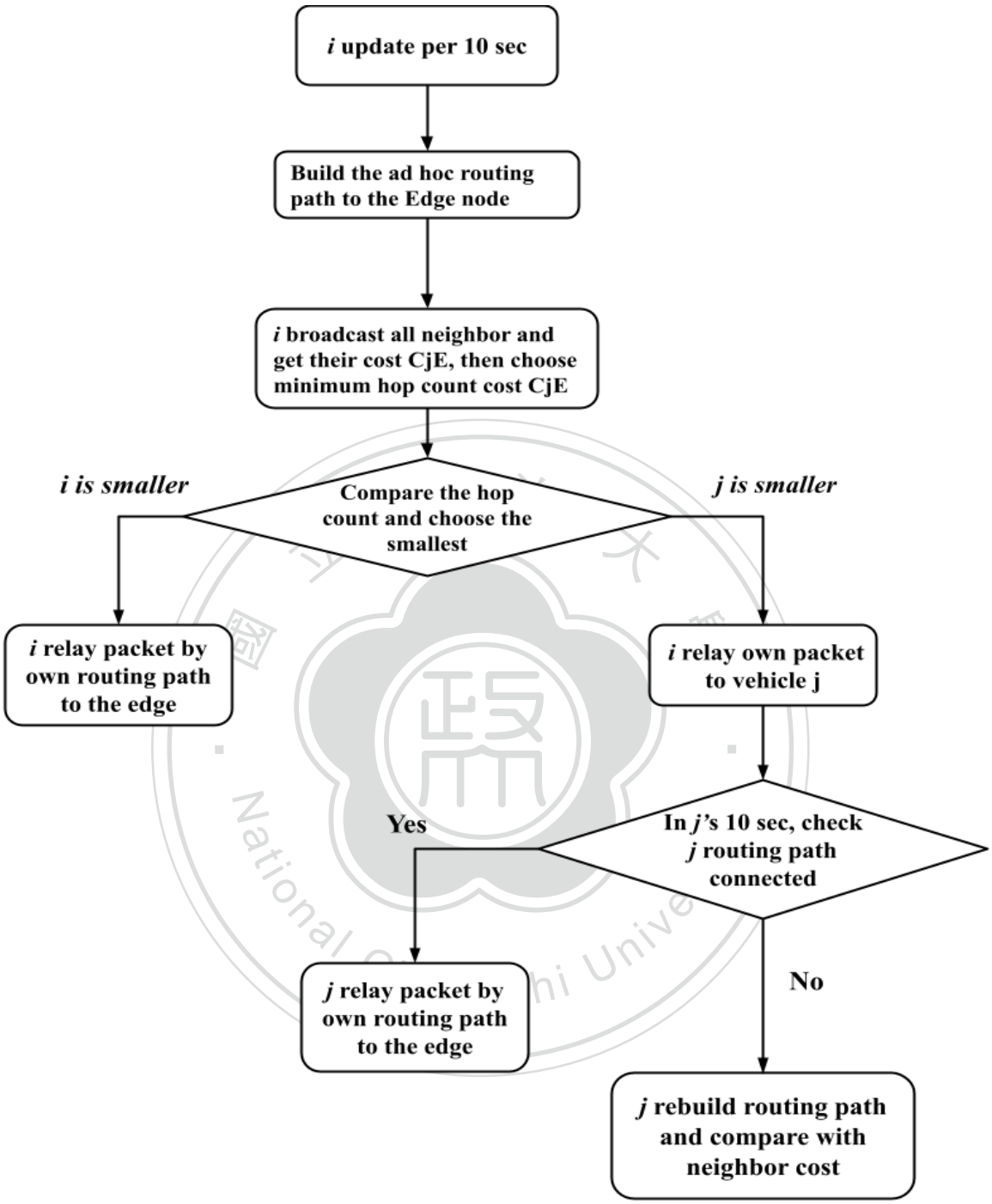

圖 3-7 以 ad hoc network 模式比較成本流程圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

三、車輛相遇情境-DTN 模式

在本研究中，車輛的無線可通訊半徑為 30 公尺，以每 10 秒為一個週期搜索範圍內的車輛，並讓範圍內的車輛回傳其成本C_{jE}，選出成本C_{jE}最小的車輛跟自身成本C_{iE}進行比較。

由於在本實驗中車輛移動的特性是會直行會轉彎但不回頭，故能透過交會車輛的方向作進一步的推估比較，若是跟自身車輛完全反方向，那交會的對向來車曾相遇邊緣節點的時間間隔即為未來相遇到邊緣節點的可能時長，故雙方車輛在比較過程中會交換 time interval 成本並選擇較小者，以此選出適合轉發車輛數據封包的車輛節點；反之若是跟自身車輛同方向或垂直相遇，在無法推估未來行徑軌跡的情況下，交換雙方的 time interval 進行比較可能無意義，故不進行成本的交換和比較。

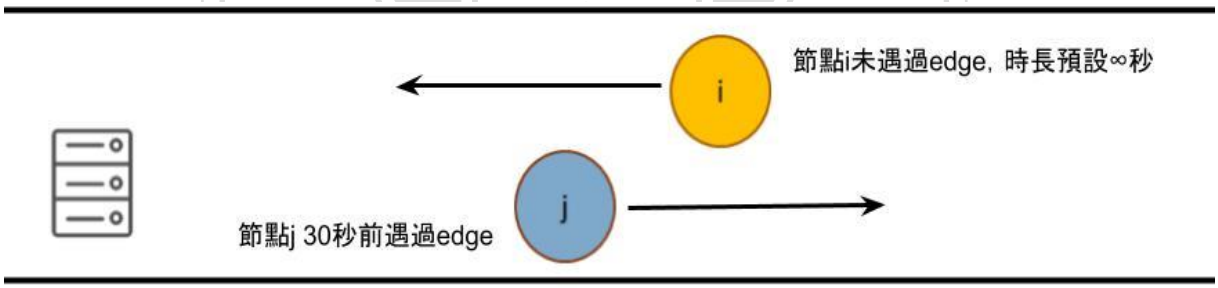

圖 3-8 車輛反向交會示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

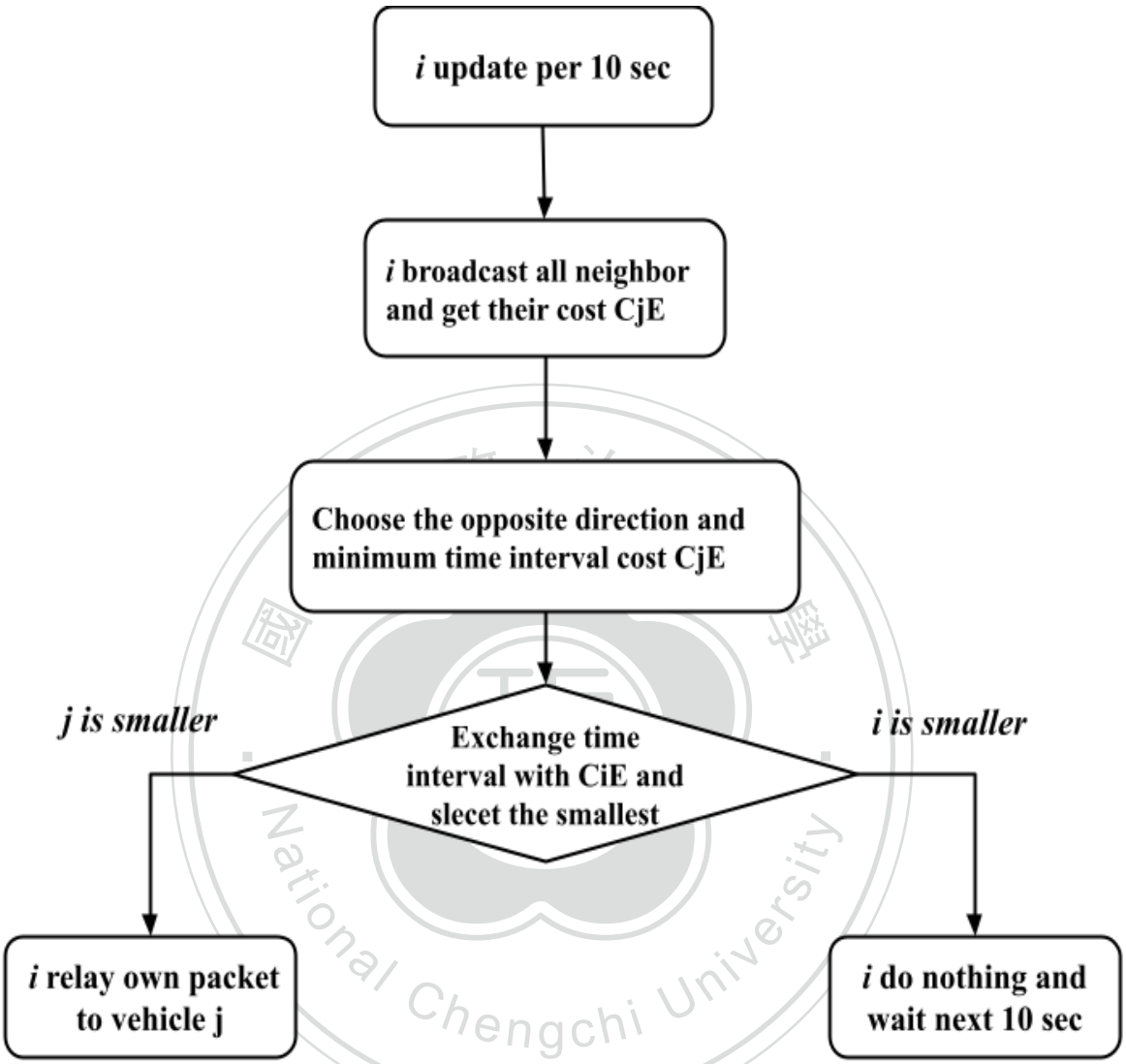

圖 3-9 以 DTN 模式比較成本流程圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

四、傳遞成本比較所遭遇問題

在本研究中，車輛以每 10 秒為週期接收半徑 30 公尺內的其他車輛 j 的成本 C_{jE}，以此選出適合攜帶數據封包的車輛，然而在選擇過程中可能存在車輛 i 的 hop count 比對方車輛 j 小，但車輛 i 的 time interval 在交換後卻比車輛 j 大，這意味著 DTN 算出的成本跟 ad hoc 算出的成本在比較後的決定不相同：

	hop count[i] < hop count[j]	*hop count[j] < hop count[i]*
time interval[i] < time interval[j]	*j relay own packet to i*	*Can't decide*
time interval[i] > time interval[j]	*Can't decide*	*i relay own packet to j*

表 3-1 不同模式的勝出造成選擇不同

由於在本研究中，兩種路由傳遞方式皆能在不同的車流情況有所利用，例如當車輛稀少或車速過快時，利用 Ad hoc network 可能難以建立路徑或是建好的路徑因鍊路斷開而造成資訊封包的遺失，這時利用 DTN 的攜帶和移動做轉發的特性就發揮其功效，將封包帶到目的地。反之當車道壅塞情形嚴重時，即便利用方向的判別來推估未來相遇到目的地的機會，但使用 DTN 的方式可能會因為車輛被堵住而無法將車輛資訊及時傳遞到邊緣節點造成封包過期，而這時透過 Ad hoc network 建立好傳遞路徑就能及時將資訊封包傳遞到目的地。

DOI:10.6814/NCCU202100430

為此，我們需要一個方法以判斷在不同車道壅塞情況下，選出以哪種方式判別有哪台車輛攜帶或轉發。由於 hop count 跟 time interval 兩個是不同的單位成本，經過我們多次的模擬，針對這樣的情況將雙方的 hop count 跟 time interval 相減，並依權重 *w* 協助我們決定以哪種成本判斷，選擇出以哪種路由方式判斷攜帶的車輛。

$$\left| time\ interval[i] - time\ interval[j] \right| \ v.s.\ w * \left| hop\ count[j] - hop\ count[i] \right|$$

	w = 3	w = 5	w = 7
case1	75.37	75.87	72.28
case2	87.76	87.34	84.26
case3	97.97	97.54	96.35
case4	112.10	111.35	110.29
case5	129.92	123.18	125.08

表 3-2 權重實驗測試選取

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

3.7 對照組設計

對照組(一) – Optimum

我們一共設計了四種不同的紅綠燈配置方式作為對照組，以用來跟我們的方法進行相關的比較。在對照組(一)中是最完整的狀態，讓車輛利用 4G 網路的方式上傳即時的自身車輛資訊，透過這些完整 100%的車輛資訊以協助計算本研究設計的紅綠燈控制系統。

對照組(二) – Lanearea Detector

由於真實世界中利用設置在路面下的壓條來為經過的車輛計數，故對照組(二)中我們在各路段的起點和終點位置皆設置了黃色的壓條，對每輛行經路段的車輛作 input 和 output 的判定，記錄各路段的車流進出情形，將 600 秒內所蒐集到的車流量進出進行該路口綠燈時長的計算與配置，其公式設計如下：

$$\boldsymbol{Green\ \ Light\ \ length[ID, NS/WE] = vehicle\ \ flow(last\ \ time) + vehicle\ \ flow(input - output)}$$

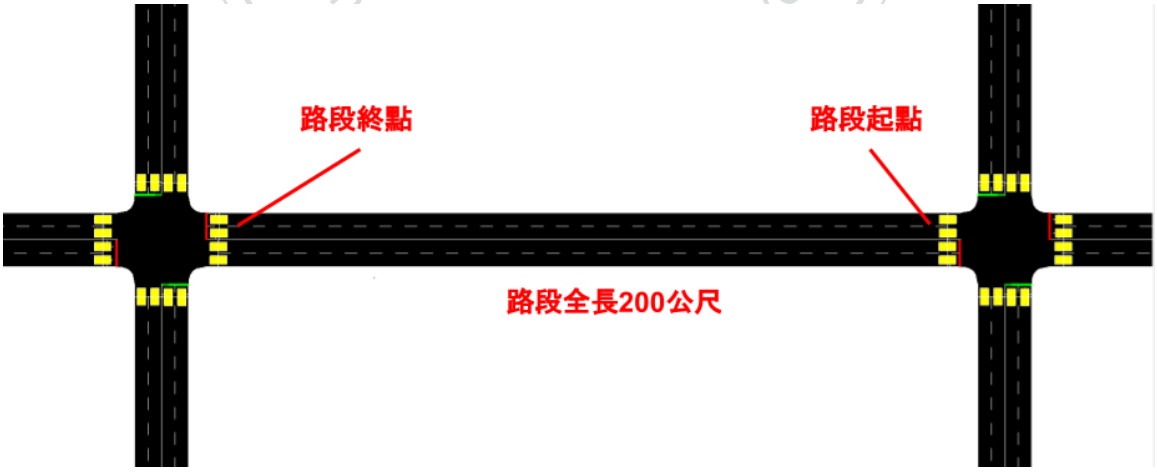

圖 3-10 設置黃色壓條的路段示意圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

對照組(三)－Indicator

在對照組(三)中，我們假設有方法能得知當下各路段的壅塞狀態，利用各個路段的壅塞程度協助我們做紅綠燈的配置，透過不同的壅塞程度做等比的紅綠燈配置，再對各路口(ID)的東西/南北向的紅綠燈進行下個週期的調整，同時每組紅綠燈配置以不超過 120 秒為主，超過則依比例調整。

$$\text{車道壅塞程度} = \text{當下車道上的車輛} \ / \ \text{車道最大車容量}$$

$$\textit{Green Light length}[\text{NS}] = 120 * \frac{\text{車道壅塞程度}[\text{NS}]}{\text{車道壅塞程度}[\text{NS}] + \text{車道壅塞程度}[\text{WE}]}$$

$$\textit{Green Light length}[\text{WE}] = 120 * \frac{\text{車道壅塞程度}[\text{WE}]}{\text{車道壅塞程度}[\text{NS}] + \text{車道壅塞程度}[\text{WE}]}$$

對照組(四)－Fixed Time

在對照組(四)中，在沒有任何車輛數據或是路況數據時，我們僅維持紅綠燈初始時長，即各路口紅綠燈的綠燈時長為 60 秒；紅燈時長為 60 秒；黃燈時長為 2 秒，作為沒有任何車況或路況下的路口紅綠燈配置。

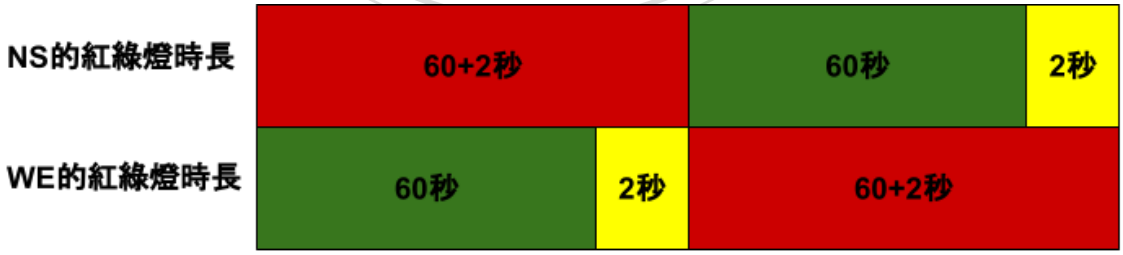

圖 3-11 固定時長紅綠燈配置

DOI:10.6814/NCCU202100430

第四章 模擬實驗結果與分析

4.1 SUMO 交通模擬器

實驗模擬採用 Simulation of Urban Mobility(SUMO)進行，SUMO 為一款由德國太空中心開發的微觀車流模擬軟體，它可以完整的模擬出由多個不同車輛組成的交通路線如何在設定好的道路網中進行移動。此類模擬可解決大量交通管理主題，並且對於每台車可明確建模自訂出路線，於道路中各自移動，其優點在於:

1. 免費
2. 開源
3. 內部控制可透過 Python 與其他多種程式語言進行讀取與控制模擬的過程
4. 更新頻繁且持續，BUG 偏少或出現明顯 BUG 會快速做修復
5. 有多個知名交通專案，如自駕車的開發模擬皆是以此模擬器進行

而 SUMO 最為強大的功能為 Traci(traffic control interface)交通控制介面，可自行利用 python 或 C++等程式語言從外部及時控制路網中任一元件，從車輛、道路、停車場到紅綠燈皆可直接透過程式邏輯運算控制，因此本研究透過自行控制產生之車流，對於車流中的車輛行為進行模擬與控制。

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

4.2 實驗架構設計

實驗透過 SUMO 中內建 netedit 地圖繪製，藉由該軟體設計出一個類“井”字型的地圖，每條路段長皆 200 公尺長的雙線道，並在該路網地圖中的其中三個十字路口設置 edge node 做為資料封包的接收地，模擬市區道路實際狀況。

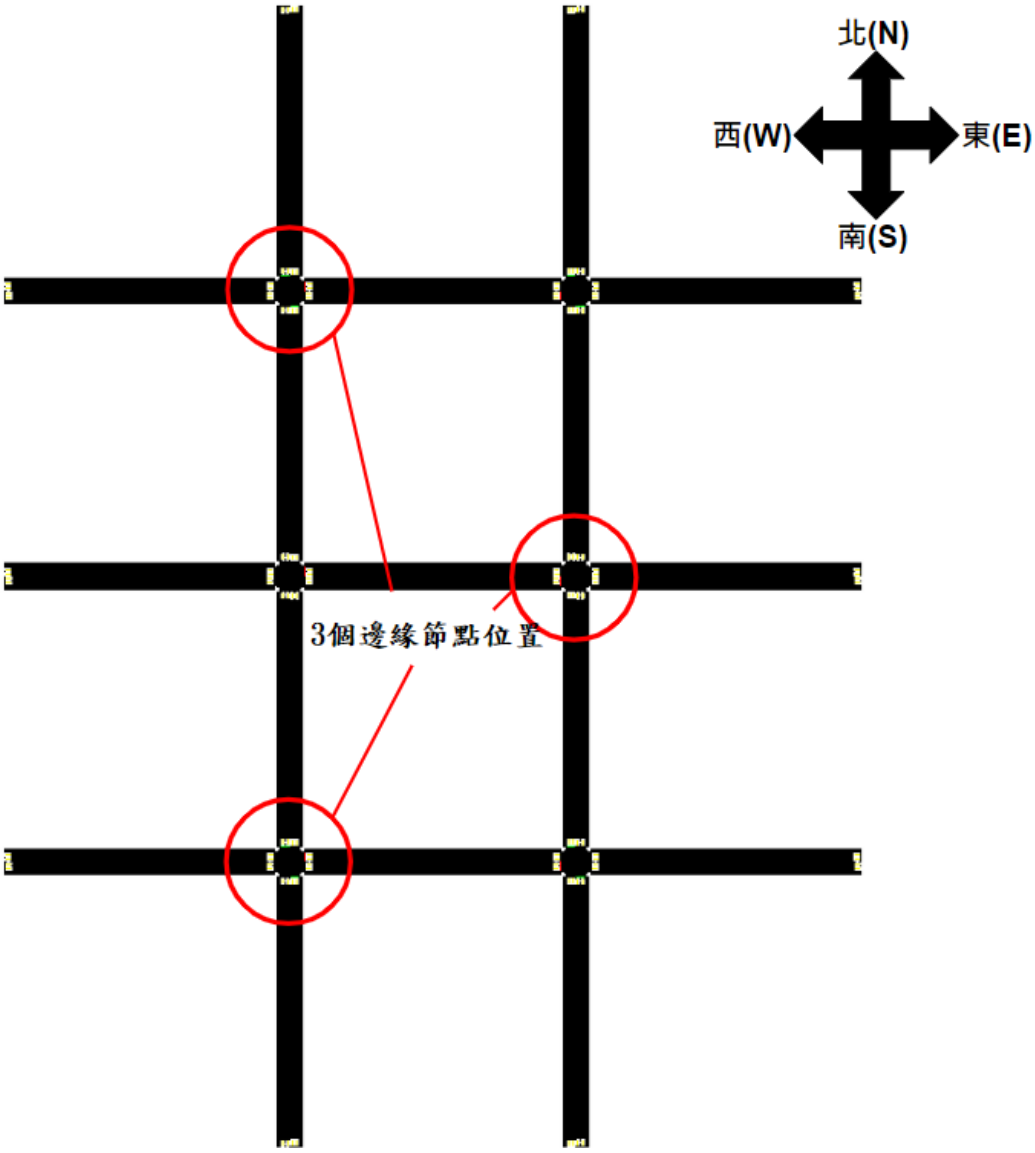

圖 4-1 SUMO 模擬之地圖設計(全景圖)

DOI:10.6814/NCCU202100430

在本實驗中，路口紅綠燈會以 10 分鐘(600 秒)為一個週期重新配置，過程中會將這段時間內所蒐集到的車輛資訊統整並計算，該車輛資訊透過車輛以無線隨意網路的方式傳遞，故資訊的及時傳遞率對於紅綠燈配置影響至關重要，另外車輛為隨機生成，車輛總數約 5000-6000 輛，其各路段的車流量和移動的軌跡皆不相同，這些車道上的變數皆為影響紅綠燈時長配置的因素，固定參數列表如下：

Parameter	Range
地圖範圍	600 * 800 平方公尺
各路段長度	200 公尺
道路數量	17 條
車最大速	30km/hr(8.3m/s)
車通訊範圍	半徑 30 公尺
實驗總時長	3600 秒
紅綠燈初始時長	R/G/Y: 60/60/2
紅綠燈(路口)數量	6 組
紅綠燈變換週期	600 秒(10 分鐘)
邊緣節點(RSU)	3 個

表 4-1 實驗參數表

DOI:10.6814/NCCU202100430

4.3 傳遞率

在本實驗中，我們在車道壅塞程度約 80%的情況下，根據車輛的資訊傳遞率、平均等待時間、平均旅行持續時間作為判別本研究方法對於城市交通的影響，並透過路由傳遞演算法、車輛參與占比和車道壅塞程度的不同分別探討在不同情況下的實驗結果，此節介紹無線網路路由演算法的傳遞方式對其影響。

1.車輛資訊傳遞率

在車流等各參數皆固定的情況下，觀察本研究方法 Hybrid routing 和只使用 DTN 或 ad hoc 的路由演算法的車輛資訊傳遞率，並依傳遞率和及時傳遞率這兩實驗結果作探討。其實驗結果顯示，Hybrid routing 由於顧全到不同的路況，故及時傳遞率效果表現最好而優於另外兩個方法。另外只使用 DTN 的傳遞率優於 Hybrid routing 但及時傳遞率卻低於本研究方法，該結果表明雖然透過 DTN 的判別方法可以有效推估出未來行經邊緣節點的可能性進而提升車輛資訊傳遞率，然而卻因為嚴重的塞車造成車輛資訊封包過期而未能及時傳遞到目的地。

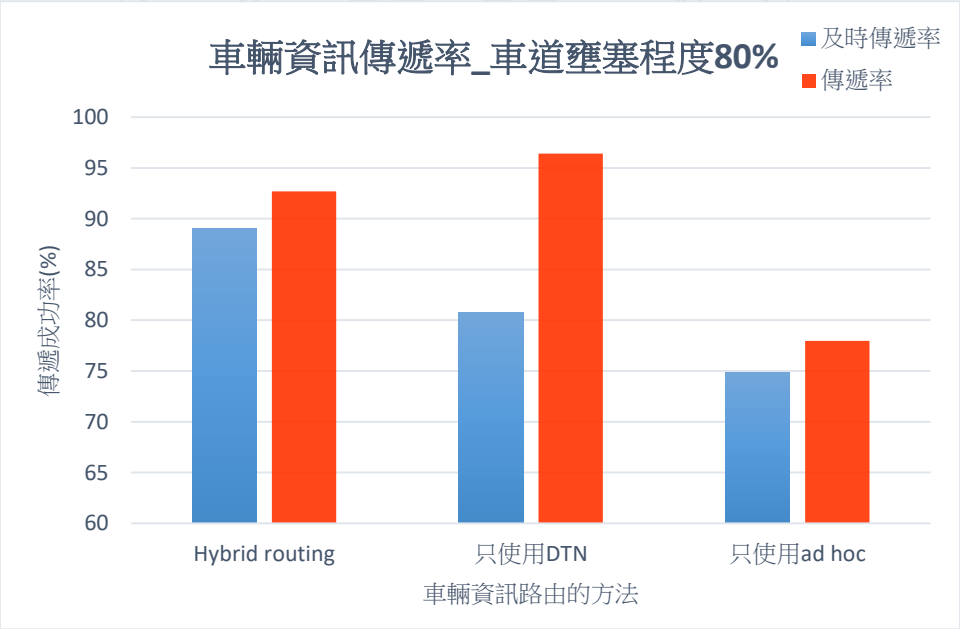

圖 4-2 不同路由方法的車輛資訊傳遞率比較圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

2. 車輛的平均等待時間

在此實驗中，我們對上述提到的不同類型路由演算法與四個對照組比較在車道壅塞程度約 80%的情況下，車輛在設計的地圖中的平均等待時間(非自願)。經實驗結果顯示，本研究提出的 Hybrid routing 因為及時傳遞率高而使得車輛資訊的蒐集也相對完整，故能更有效的計算出較佳的紅綠燈時長，其車輛平均等待時間的表現只略遜於 optimum 配置下的紅綠燈方案。

另外本研究提出的 Hybrid routing 方法能優於傳統利用壓條的 detector 方法，推測原因是當車道嚴重堵塞時，利用壓條感應器僅能考慮到車流量而沒有如車速、等待時間等車況資訊，且嚴重的交通壅塞可能產生車道回堵的問題而產生誤判的情況，諸多因素使得僅利用車流無法準確的計算壅塞狀態下的紅綠燈時長配置。

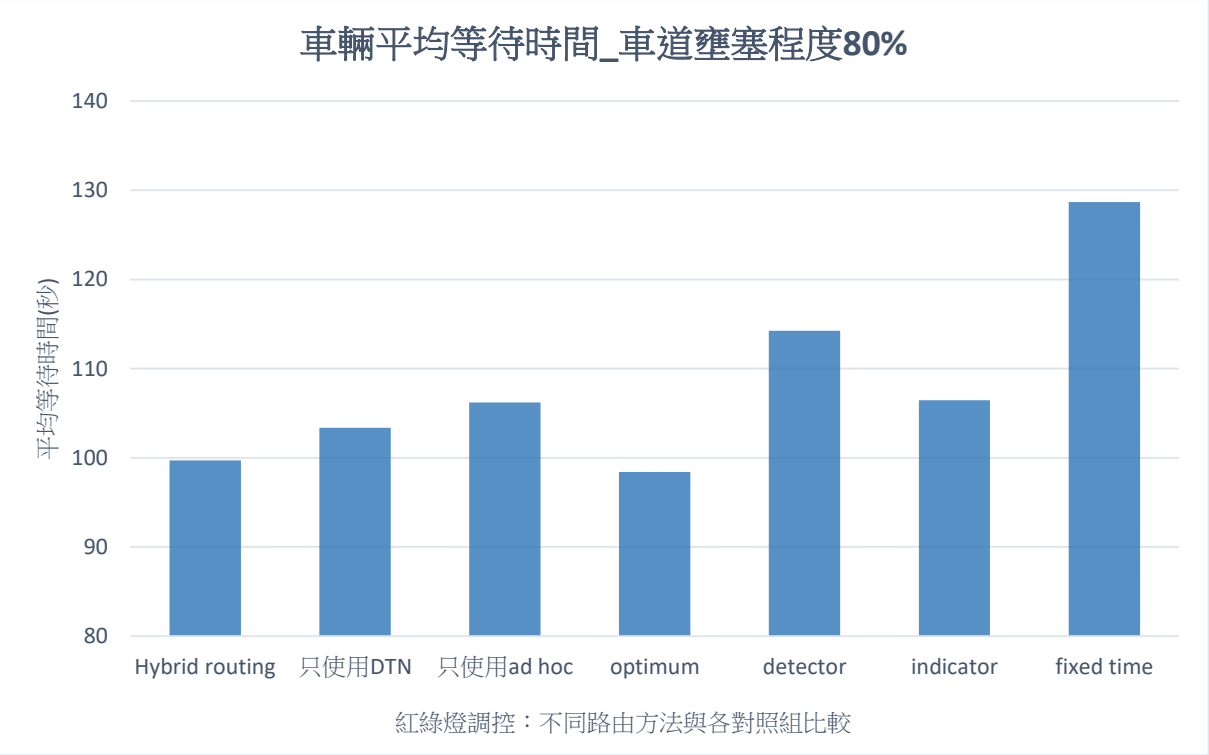

圖 4-3 不同路由方法和各對照組的車輛平均等待時間

DOI:10.6814/NCCU202100430

3. 車輛的平均旅行持續時間

在此實驗中，我們對上述提到的不同類型路由演算法與四個對照組比較在車道壅塞程度約 80%的情況下，車輛的平均旅行持續時間(含車輛平均等待時間)。經實驗結果顯示，與上述相同，本研究提出的 Hybrid routing 及時傳遞率高使得車輛資訊的完整度也較高，故能更有效的計算出較佳的紅綠燈時長，其車輛平均旅行持續時間只略遜於 optimum 配置下的紅綠燈方案。

圖 4-4 不同路由方法和各對照組的車輛平均旅行時間

DOI:10.6814/NCCU202100430

4.4 車輛參與占比

在本節實驗中，我們考慮到在現實世界中並非每位車主都願意自主提供自身車輛資訊並協助資訊封包的轉發，故我們考慮不同的車輛參與占比，在 90%、70%、50%、30%、10% 劃分成五個層級，探討在不同的參與比下對於本研究的車輛資訊傳遞率和車輛平均等待時間是否仍能維持良好的表現。

1.車輛資訊傳遞率

在此實驗中，由於將車輛的參與占比劃分成五個層級以研究 Hybrid routing 在多少的車輛參與比下仍舊能勝過現實世界中利用壓條感應器(detector)的對照組(二)。車輛參與占比的減少意味著能提供路口紅綠燈時長配置的車輛資訊跟著減少，這對於紅綠燈時長配置的正確性亦產生影響，同時因為可以協助轉發的車輛跟著減少，進而提升將車輛資訊及時路由到目的地的難度。目前實驗結果顯示在車道壅塞程度約 80%的情況下，我們的 Hybrid routing 方法仍舊有約 80%的及時傳遞率。

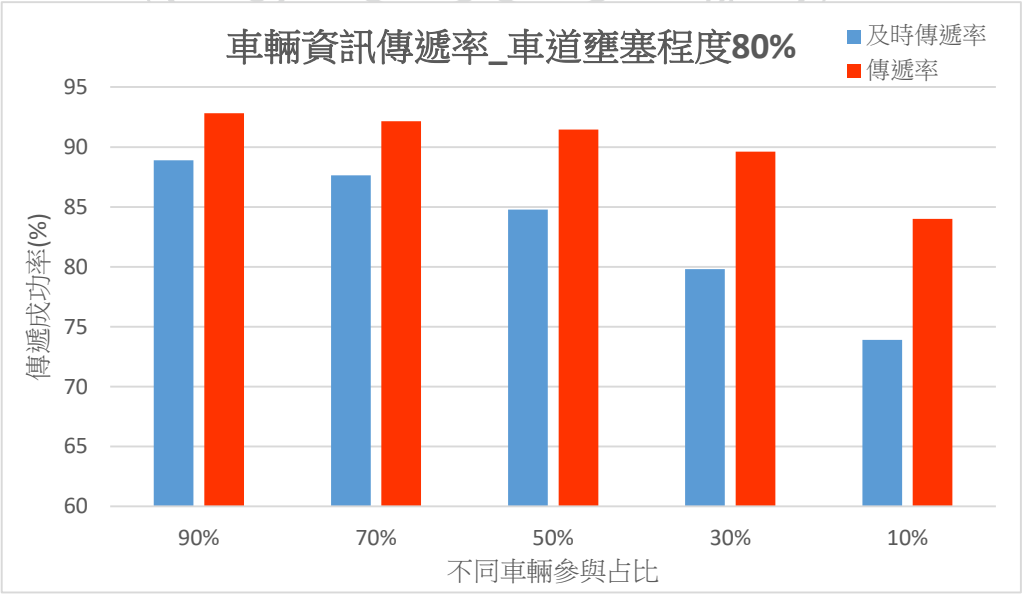

圖 4-5 不同車輛參與比的車輛資訊傳遞率比較圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

2. 車輛平均等待時間

在此實驗中，我們對不同車輛參與占比在使用 Hybrid routing 方法和各對照組進行比較，研究在設計的地圖中車輛的平均等待時間(非自願)的表現狀況，目標是希望勝過利用壓條感應器(detector)的對照組(二)。

實驗結果顯示在約 30%車輛參與比下，本研究提出的 Hybrid routing 方法的車輛平均等待時間仍舊少於利用壓條感應器(detector)的對照組(二)，推估因為本研究方法在紅綠燈時長計算中加入車流量以外的車況資訊如車速度、車等待時間，故在車道嚴重堵塞時，即便只有 30%的車輛願意參與資訊提供和轉發，車輛的平均等待時間仍舊少於除了有完全資料的 optimum 以外的其他對照組。

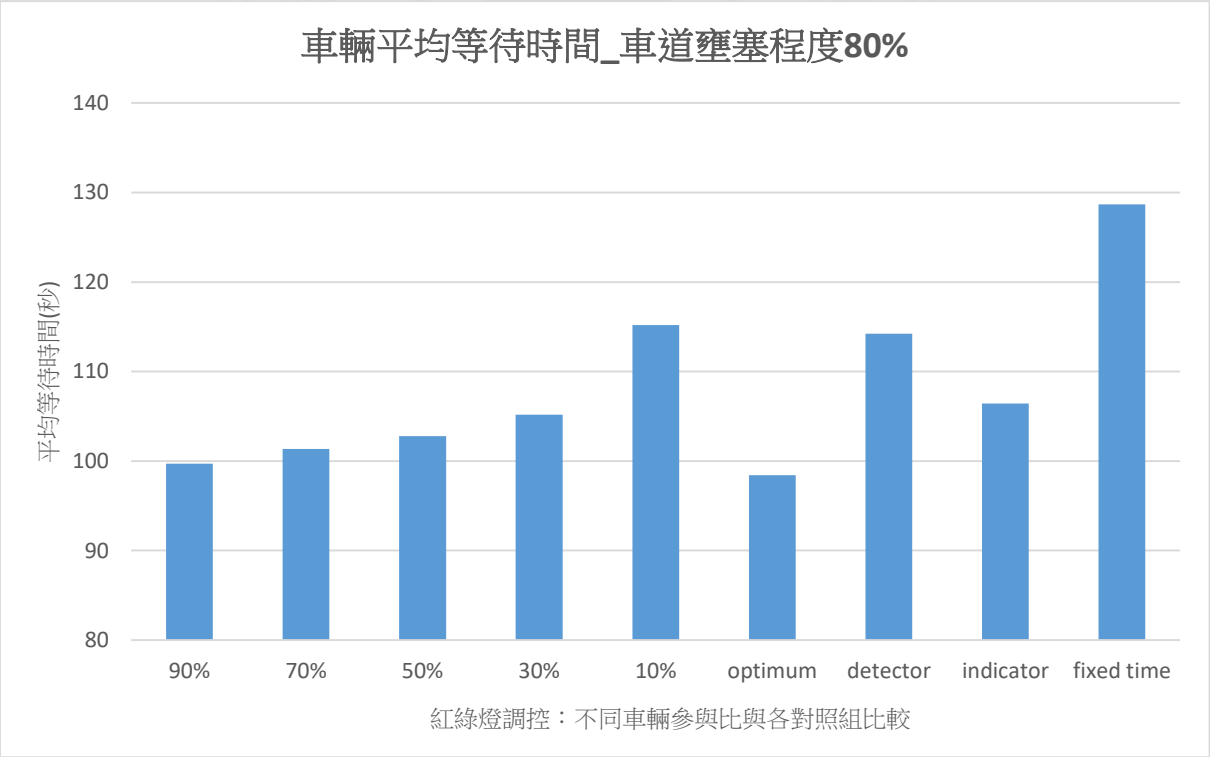

圖 4-6 不同車輛參與比的車輛平均等待時間比較圖

DOI:10.6814/NCCU202100430

4.5 車道壅塞程度

在本節實驗中，我們認為塞車狀態可能也是影響實驗的因素，故對車道的塞車狀況細分出三種不同層級的交通壅塞程度，並探討在不同車輛參與占比的協助下，本研究提出的 Hybrid routing 方法對於車輛的資訊及時傳遞率和車輛的平均等待時間是否仍舊維持良好的表現

1. 車道的壅塞程度 75-80%:

在此車道壅塞程度中，車道被約 75-80%的車輛占滿而產生嚴重的交通堵塞，故車輛的平均等待時間也是三個壅塞程度中最長，其平均等待時間落在 95-130 秒左右。如前面實驗得知，當及時傳遞率越高，所擁有的車輛資訊就越完整，對於路口紅綠燈的配置效果就表現的越好，使車輛平均等待時間越少。

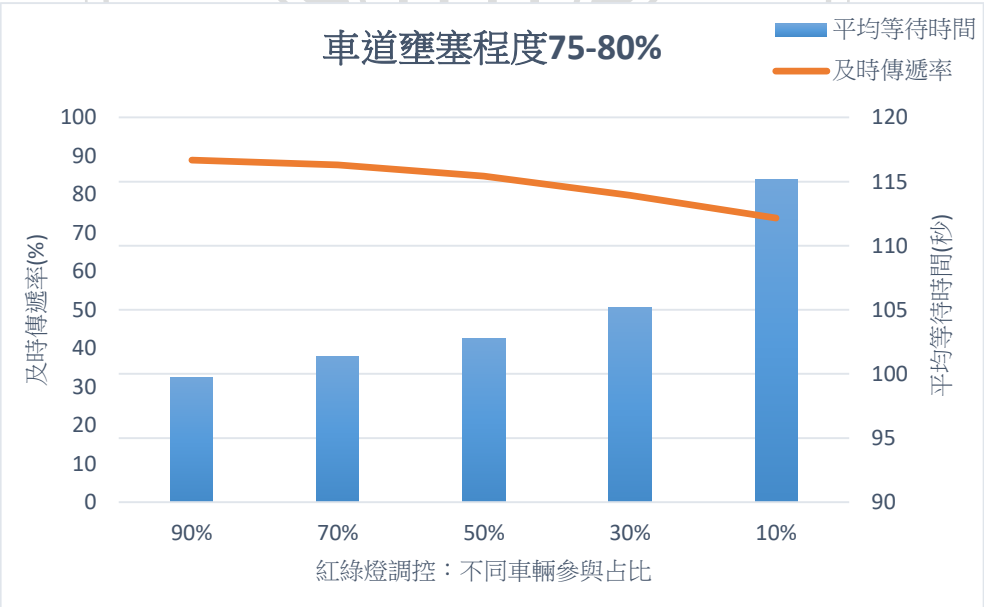

圖 4-7 車道壅塞程度 75-80%的平均等待時間和及時傳遞率

DOI:10.6814/NCCU202100430

我們的研究目標是希望勝過傳統利用壓條感應器(detector)的對照組(二)，經實驗結果顯示，當交通嚴重堵塞造成車道回堵的現象時，對於利用壓條感應器的對照組(二)在車流的計數效果不佳，故即便只有 30%的車輛願意提供自身的車輛資訊和協助轉發，其車輛的平均等待時間仍舊少於利用壓條(detector)的對照組(二)。

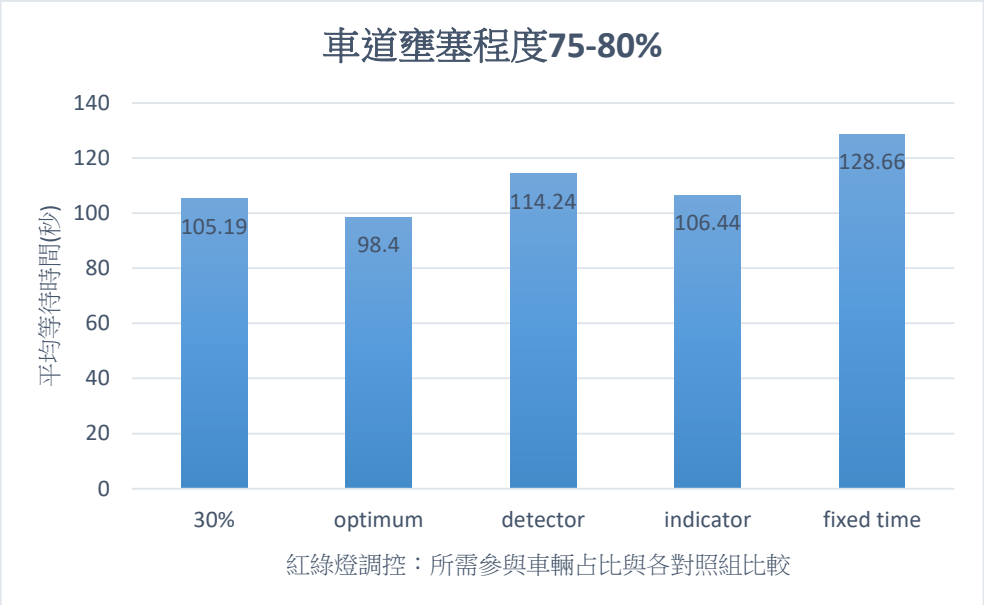

圖 4-8 約 30%車輛參與和各對照組的平均等待時間比較

2. 車道的最大壅塞程度 50-55%:

在此節實驗中車道被約 50-55%的車輛占滿，其車輛平均等待時間落在約 75-90 秒。我們觀察到在這樣壅塞狀態下，車輛的其他資訊對於紅綠燈配置的改善不如嚴重交通堵塞的效果好，經實驗數據圖顯示，至少需約 70%的車輛參與資訊的提供和轉發，車輛的平均等待時間才能少於利用壓條感應器的對照組(二)。

DOI:10.6814/NCCU202100430

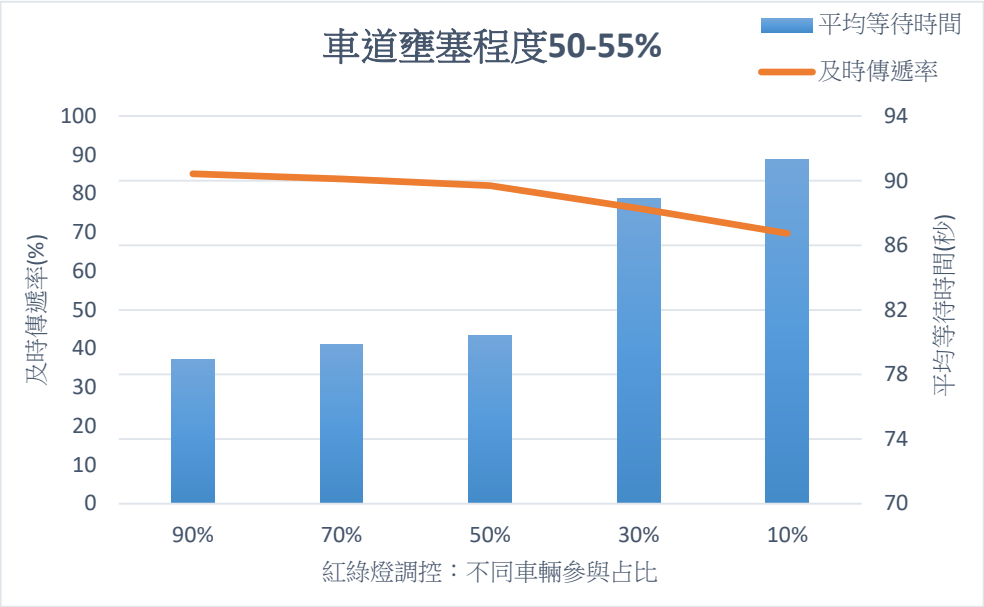

圖 4-9 車道壅塞程度 50-55%的平均等待時間和及時傳遞率

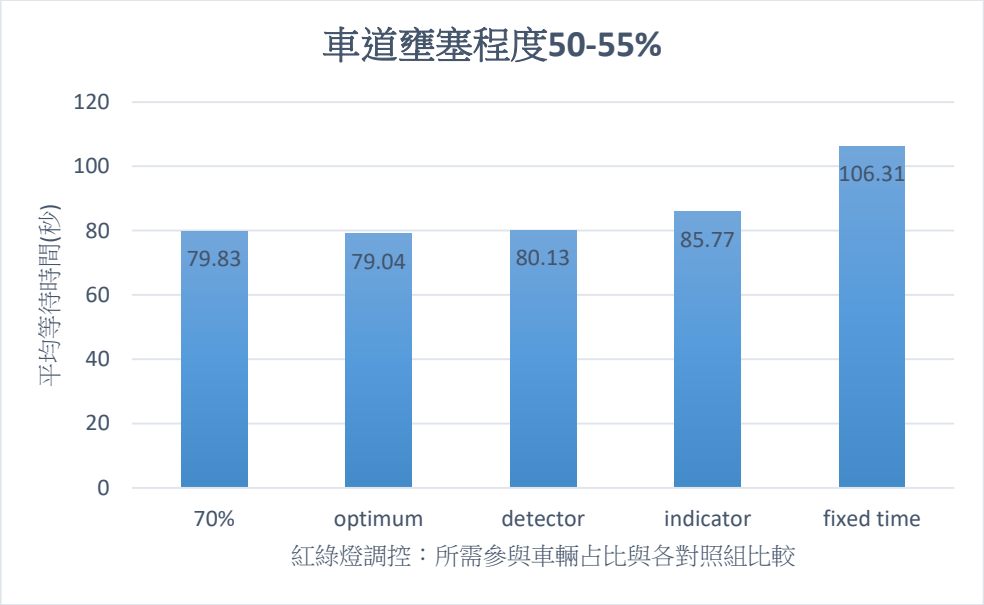

圖 4-10 約 70%的車輛參與和各對照組的平均等待時間比較

3. 車道的最大壅塞程度 25-30%：

在此車道壅塞程度中只有 25-30%的車道會被車輛占滿，其車輛平均等待時間落在約 45-55 秒，本實驗對不同的車輛參與比和各對照組進行比較，我們的目標希望勝過傳統利用壓條感應器(detector)的對照組(二)。

DOI:10.6814/NCCU202100430

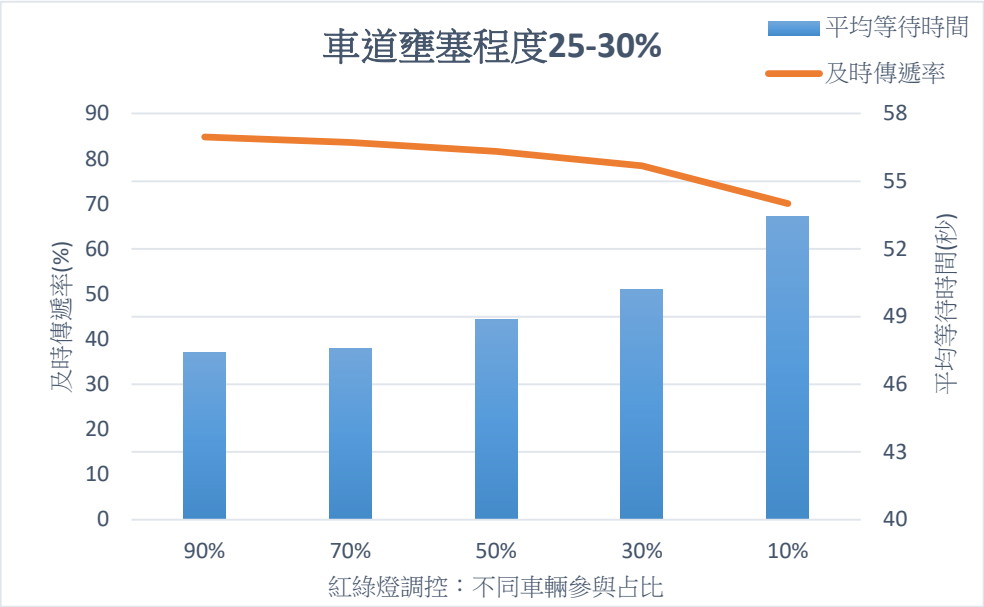

圖 4-11 車道壅塞程度 25-30%的平均等待時間和及時傳遞率

經實驗數據圖顯示，在車道壅塞程度約 25-30%時，即使有 90%的車輛參與車輛資訊的提供和轉發，其車輛平均等待時間仍然高於利用壓條感應器的對照組(二)，但這時的車道因為車輛稀少而交通順暢，車輛的平均等待時間落差不大，能改善的幅度僅只有不到 1 秒左右的差距。

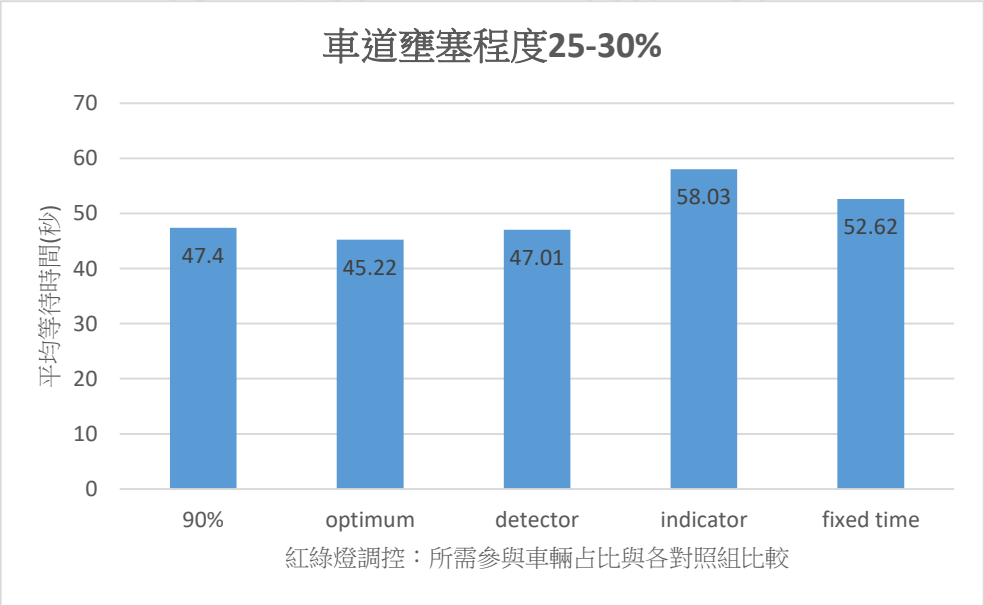

圖 4-12 約 90%的車輛參與和各對照組的平均等待時間比較

DOI:10.6814/NCCU202100430

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本研究設計了一項利用車輛自身數據改善城市交通，透過車輛提供如車座標、車平均速度、路段等待時間，藉由提出的 Hybrid routing 路由方法，以提升車輛資訊的及時傳遞率，並對路口紅綠燈進行調控改善交通，減少車輛的平均等待時間和平均旅行時長。目前實驗模擬顯示在路段約 80%的塞車程度下，以約 30%的車輛參與數據的提供和轉發時，仍就能勝過傳統利用壓條感應的對照組(二)，達到一定程度的交通改善。

5.2 未來展望

目前本實驗僅設計了一個類“井”字型的路口地圖來模擬車輛資訊封包傳遞及其後續交通變化，但在真實環境中應是錯綜複雜的地圖，而城市路口也未必是單純的十字路口，如何根據這些複雜的情況透過所蒐集到的車輛資訊來改良紅綠燈配置為未來的主要目標。此外，本實驗中紅綠燈時長的計算只使用到車輛自身的座標、平均速度、平均等待時間，而這之間還有許多車輛自身的資訊可被利用，期望未來加入預測模型的協助以最佳化紅綠燈時長的計算和配置。

國立政治大學 National Chengchi University

DOI:10.6814/NCCU202100430

參考資料

[1]. R. P. Laufer, P. B. Velloso, L. F. M. Vieira, and L. Kleinrock, “PLASMA: A new routing paradigm for wireless multihop networks,” in Proc. IEEE Conf. INFOCOM, 2012, pp. 2706–2710.

[2]. B. Zhou, J. Cao, and H. Wu, “Adaptive traffic light control of multiple intersections in WSN-based ITS,” in Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, May 2011, pp. 1–5.

[3]. D. Zhu, G. Cui, Z. Fu, “DT-AODV: An On-Demand Routing Protocol based DTN in VANET” Appl. Math. Inf. Sci. 8, No. 6, 2955-2963 2014.

[4]. F. Sato, R. Kikuchi, “Hybrid routing scheme combining with geo-routing and DTN in VANET. ” In: Proceedings of the 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2016), pp. 250–255, July 2016

[5]. M. L. Suarez, L. E. Alvarez, P. A. Camacho, L. C. Marin, B. Vasquez, G. Gutierrez, R. A. Aranzazu, M. Carranza, F. G. Montoya, A. Valdes, C. Gonzalez, M. Jaramillo, S. Henao, "Dynamic allocation of traffic light plans as a traffic reduction strategy", in MOVICI-MOYCOT 2018: Joint Conference for Urban Mobility in the Smart City (Medellin, 2018), pp. 1–7.

[6]. Q. T. Minh, C. M. Tran, T. A. Le, B. T. Nguyen, T. M. Tran, and R. K. Balan, "FogFly: A traffic light optimization solution based on fog computing, " in Proc. ACM Int. Joint Conf. Int. Symp. Pervasive Ubiquitous Comput. Wearable Comput. (UbiComp), 2018, pp. 1130–1139.

[7]. N. Indra Er, K. D. Singh, and J.-M. Bonnin, “DC4LED: A Hierarchical VDTN Routing for Data Collection in Smart Cities,” in 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp. 1-4

[8]. C. Giannini, P. Calegari, C. Buratti, and R. Verdone, “Delay tolerant network for smart city: Exploiting bus mobility,” in Proc. AEIT Int. Annu. Conf., Apr. 2016, pp. 1–6.

[9]. J. G. Filho, A. Patel, B. L. A. Batista, and J. Celestino, Jr., ‘‘A systematic technical survey of DTN and VDTN routing protocols,’’ Computer. Standards Interfaces, vol. 48, no. 1, pp. 139–159, Nov. 2016.

[10]. Y. Zguira, H. Rivano, A. Meddeb “IoB-DTN: A lightweight DTN protocol for mobile IoT applications to smart bike sharing systems” 2018 Wireless Days (WD), IEEE (2018), pp. 131-136

DOI:10.6814/NCCU202100430

[11]. J. Lee and B. Park, “Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 13, no. 1, pp. 81–90, Mar. 2012.

[12]. M. A. S. Kamal, T. Hayakawa, and J.-I. Imura, “Development and evaluation of an adaptive traffic signal control scheme under a mixedautomated traffic scenario,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 21, no. 2, pp. 590–602, Feb. 2020

[13]. S. Garg et al., “Edge computing-based security framework for big data analytics in VANETs,” IEEE Netw., vol. 33, no. 2, pp. 72–81, Mar./Apr. 2019

[14]. J. Liu et al., “High-efficiency urban traffic management in context-aware computing and 5G communication,” IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 1, pp. 34–40, Jan. 2017

[15]. R. Akamatsu, K. Obara, and H. Shigeno, “Road-oriented geographic routing protocol for urban vehicular ad hoc networks,” in Proc. 29th Int. IEEE Conf. Advanced Information Networking Applications Workshops, Mar. 2015, pp. 721–726.

[16]. V. K Shah, B. Luciano, S. Silvestri, S. Bhattacharjee, and S. K Das. “A diverse band-aware dynamic spectrum access network architecture for delay-tolerant smart city applications.” IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020.

[17]. Muthanna, M.S.A., Abdukodir, K., Ateya, A.A, Al-Bahri, M. “Delay Tolerant Network model based on D2D communication.” In: 2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), pp. 1–5. IEEE (2019)

[18]. 呂嘉文（2017), “A Study on Adaptive Traffic Signal Control with Vehicular Ad-hoc Network.”, 國立成功大學,交通管理科學研究所碩士論文

[19]. 洪維駿（2020),“Virtual Traffic Light Control Considering the Continuity of Traffic Flow” 國立中正大學, 資訊工程研究所碩士論文

[20]. SUMO User Documentation
https://sumo.dlr.de/docs/index.html

[21]. 智慧紅綠燈新聞：
https://www.digitimes.com.tw/iot/article.asp?cat=158&cat1=20&cat2=35&id=0000576583_VOF6237M7GE4DX433TXCP

[22]. 交通壅塞相關新聞：
https://city.gvm.com.tw/article/68846

DOI:10.6814/NCCU202100430