

### 三、研究計畫內容（以中文或英文撰寫）：

- (一) 研究計畫之背景。請詳述本研究計畫所要探討或解決的問題、研究原創性、重要性、預期影響性及國內外有關本計畫之研究情況、重要參考文獻之評述等。如為連續性計畫應說明上年度研究進度
- (二) 研究方法、進行步驟及執行進度。請分年列述：1.本計畫採用之研究方法與原因及其創新性。2.預計可能遭遇之困難及解決途徑。3.重要儀器之配合使用情形。4.如為須赴國外或大陸地區研究，請詳述其必要性以及預期效益等。
- (三) 預期完成之工作項目及成果。請分年列述：1.預期完成之工作項目。2.對於參與之工作人員，預期可獲之訓練。3.預期完成之研究成果（如實務應用績效、期刊論文、研討會論文、專書、技術報告、專利或技術移轉等質與量之預期成果）。4.學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻。

#### (一) 研究計畫之背景

此部分之論述分為兩個部分，包含背景介紹、研究動機、研究綱要，以及與本計畫相關之研究及參考文獻評述。

##### 1. 背景介紹、研究動機、研究綱要

車輛是當今社會活動每天不可或缺的載具，舉凡自小客車、公車、運貨的卡車、計程車等等，肩負人們通勤、商業活動、及休閒等各項需求。此一年期之研究計畫，將探討一個提供車聯網 (Internet of Vehicles, 簡稱 IoV) 開發應用所需之軟體聯網驗證平台 (networked test bed) 的設計與實作。以下依序介紹車聯網的前世今生、當前應用、車聯網相關之設計在驗證面所需應付之挑戰、及本計畫之創新性與研究綱要。

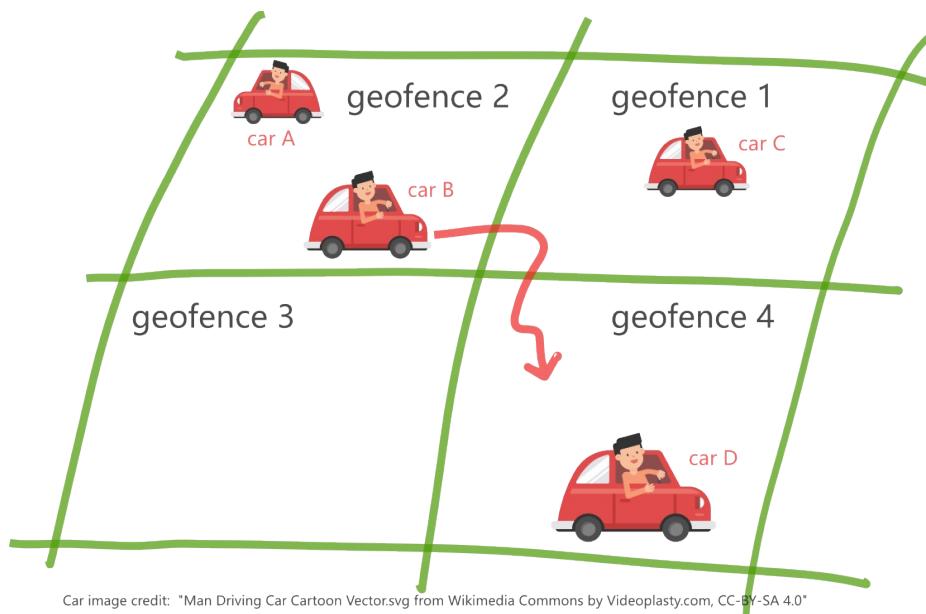
在大約 20 年前無線傳感器網路 (wireless sensor networks) 研究鼎盛的時代，即有相關研究探討車載隨意行動網路 (vehicular ad hoc networks) ，簡稱 VANET。VANET 可視為將廣義上的 MANET (mobile ad hoc network) 運用在車輛移動的情境中，其基本精神為，將每台車視為一個可移動的傳感器，形成一個具有動態網路連通性的自發無線網路，藉此讓各台車所感知的資訊能彼此共享，達成即時路況感知等應用，協助駕駛人能更好地規劃行車路線。VANET 也可藉由佈署於道路邊或十字路口的傳感裝置 (road-side units) ，簡稱 RSU，來與傳統有線網路介接，使得車輛也可將其感知的資訊透過 RSU 來傳遞給其他聯網裝置，或從 RSU 取得流通於傳統有線網路之上的資訊。簡而言之，VANET 勾勒了一個願景，能藉著善用資訊軟硬體科技，來更好地協助用路人，使得日常車輛的活動更便利、更安全。

由於實際大規模車輛佈署的成本以及實驗安全性等原因，VANET 的相關理論成果多透過使用網路或車輛交通模擬軟體的方式，來驗證及比較各演算法設計在不同行車情境中的成效。常見的網路模擬軟體包含 ns-2, ns-3, OMNet++ 等，常見的車輛交通模擬軟體為 SUMO。使用模擬軟體的優點為可快速地建置欲實驗探討的應用情境，並可視需要來調整相關實驗參數，也能產生一些實際世界不常出現的極端狀況 (車速過高/過低、網路過於壅塞等)，藉此更全面地驗證及展示所設計之 VANET 演算法的效能使用模擬軟體所存在的侷限，在於軟體只能模擬其能夠模擬的模型，亦即模擬的擬真性 (fidelity) 受限於模擬軟體的能力及其所能描繪的世界觀。相關模擬軟體的持續開發，對產業及學術研究有許多貢獻，

而另一方面，也陸續有研究著重在所謂的『虛實整合』：廣義來說，在整個系統的效能驗證過程中，使用模擬來補足因成本或安全性考量等而無法實作的系統環節，而其餘系統環節則以實際的硬體建構來運行，且達成虛部 (模擬) 與實部 (實作或實際空間) 能妥善整合在一起，善用模擬與實作各自的優點。無線網路相關控制應用的 WCPS<sup>1</sup>即為一個例子。

時空拉回到 2024 年的現今。在過去 20 年間，得益於智慧型手機的諸多應用需求，行動網路的發展及佈建也有了長足進展，市售的自小客車也已存在內建行動通訊網路的設備，或是能將用路人自己攜帶的手機等各種聯網智慧裝置連接到車載系統中。於此，早期的 VANET 概念也得以進一步推廣衍生，使得除了透過車輛自發的傳感器網路及路邊裝置 RSU 來交換行車資訊，車輛亦可直接透過 5G 等行動通訊網路與傳統有線網路持續介接。此外，得益於網路資料通訊頻寬的推升，多媒體資料傳輸如影像串流等也變為可行。這樣，如同 VANET 是廣義的 MANET 中一個極有價值的應用，車聯網 (Internet of Vehicles, 簡稱 IoV) 也是廣義的物聯網 (Internet of Things, 簡稱 IoT) 中一個極有價值的應用。城市中南來北往的諸多車輛，可扮演行動觀察者的角色，協助感知及通報城市中需要被關注的事件或態樣，以協助智慧城市相關應用如智慧交通管理的運行。對於每位連網的用路人來說，也可透過車聯網的資料交換，更快速且更精確地獲取其需要的相關時空地理資訊，例如行車目的地週邊的停車位資訊、中途的路況預測、臨時道路封閉等；對於連網的自動駕駛車輛，也更有助於達成自動車隊的協調與管理。

車聯網的相關研究重點之一，為車載資料如何透過網路有效果且有效率地傳輸。舉例來說，在大量車輛皆連網且皆有大量資料傳輸需求的情境中，若使用將資料廣播給每一台連網車輛這樣的傳輸策略車聯網本身的資料流量可能會成為行動通訊網路及傳統網路的不小負荷，不僅將影響車聯網的即時性與計算量，也影響使用前述網路的其他現有應用。關於如何選擇性地投放資料給真正需要的對象，有一類策略為善用每台車所在的位置資訊及其行程資訊，來篩選過濾車聯網的資料傳輸需求，從而在維持應用所需的同時，大幅降低網路的頻寬使用量。以下簡述一則應用情境，進一步介紹詳見後段相關研究文獻探討的部份。



考慮如上圖之示意圖，一類資料傳輸設計為建構一系列虛擬之地理圍欄 (geometric fence, 簡稱

<sup>1</sup>[https://wsn.cse.wustl.edu/index.php/WCPS:\\_Wireless\\_Cyber-Physical\\_Simulator](https://wsn.cse.wustl.edu/index.php/WCPS:_Wireless_Cyber-Physical_Simulator)

geofence)，將地理空間切分成一塊一塊獨立區域。圖中區域由四個地理圍欄劃分，A 車和 B 車位於 geofence 2 的範圍內、C 車位於 geofence 1、D 車位於 geofence 4。基於用路人或車輛往往最關注其當下所在之地區資訊這樣的假設，A 車及 B 車可能較會需要彼此之感測資訊，而 C 車及 D 車則較不需要 A 車之感測資訊。據此，資料傳輸可設計成讓所有在同一個 geofence 的車輛都只會收到所有該區域內的其他車輛資訊，如此可避免許多不需要的資料通訊。而當車輛進入不同的 geofence 所涵蓋之區域後，則更新其發送及接收資料的對象為新的區域之所有車輛。基於 geofence 的設計，可衍生成讓車輛先提供它未來預計將進入的區域之類別，藉此管理及預先提供該車在整個行車過程中所需要之資訊。例如上圖的 B 車，車聯網系統可依其行車路線，提供 geofences 2, 1, 4 內的車輛所發布之資訊，而過濾掉 geofence 3 內的車輛所發送之資訊。以上概念也可進一步推廣為讓車輛及用路人能訂閱特定地理區域之智慧城市相關資訊，如空氣品質、綜合路況等。當前廣泛被使用之 MQTT 通訊協定可作為上述案例的實現方式之一。

諸如上述所舉之車聯網應用設計，都須面對一個共同的問題：如何有效地驗證所提出的設計之效能呢？如同車聯網的前身 VANET 曾面臨的問題，實際佈署的成本及安全性考量往往使得軟體模擬為主要的效能驗證方式，或是僅能使用小規模的實作進行概念驗證 (proof of concept, 簡稱 PoC) [9]。然而有別於 VANET，車聯網中主要的資訊交換媒介不是無線行動隨意網路 (wireless mobile ad hoc networks)，而是透過行動網路 (例如手機熱點或車載電腦之 5G 網路) 來直接連接至傳統有線網路，因此網路通訊的部份相較於 VANET 的情況而言較易於實際實作及驗證。至於車聯網中各車輛的即時移動軌跡及其所處之地理位置，仍須透過車輛交通模擬軟體如 SUMO 等來模擬之，且 SUMO 並無自帶之資料網路模擬功能。基於本計畫申請人與其碩士班研究生已進行之先遣研究 [11] 及實作過程中的發現，發展此類虛實整合驗證平台須處理至少如下兩項挑戰：

挑戰一：虛實整合的時間同步問題 (Time Synchronization)。

車輛交通模擬軟體為離散時間模擬器 (discrete-time simulator)，其模擬之虛擬世界的時間行進速度不一定等同於實體世界的時間行進速度，而是取決於模擬軟體本身需模擬的情境複雜度以及外部軟體對其資料存取的頻率。而車聯網模擬的正確性與否，會基於行車速度 (虛擬世界) 與網路資料傳遞速度 (實體世界) 的合理相對比例：若虛擬世界的時間進程慢於實體世界，則從用路人視角來看，網路將是不合理地快速，而從網路傳輸視角來看，車輛行進速度將是不合理地緩慢；若虛擬世界的時間進程快於實體世界，則從用路人視角來看，網路將是不合理地緩慢，而從網路傳輸視角來看，車輛行進速度將是不合理地快速。上述兩種情況都將嚴重影響車聯網設計的效能驗證之可信賴度。

挑戰二：驗證平台的負載可擴展性問題 (Load Scalability)。

車輛交通模擬軟體在模擬大量車流時其運算速度會顯著下降，且自其擷取車輛軌跡資訊以進行資料通訊的時間成本及運算成本皆會顯著上升。計畫申請人之先遣研究實測表明，若將驗證平台之所有軟體模組全部佈署於同一台實體電腦主機上，則其僅能支持不到 700 台車輛的模擬案例。且模擬速度會隨著模擬案例當下的事件運算需求多寡而浮動，此也連帶影響前述之虛實整合時間同步挑戰。如何適切地將平台佈署於多台實體電腦主機，會是一個需研究的挑戰。

此文件所述之研究計畫重點創新，即在於發展一個通用的供車聯網相關設計所需之虛實整合驗證環境。預期整合實體網路及虛擬車輛行進資訊，提供一個更高擬真度的車聯網開發驗證平台。此一年期

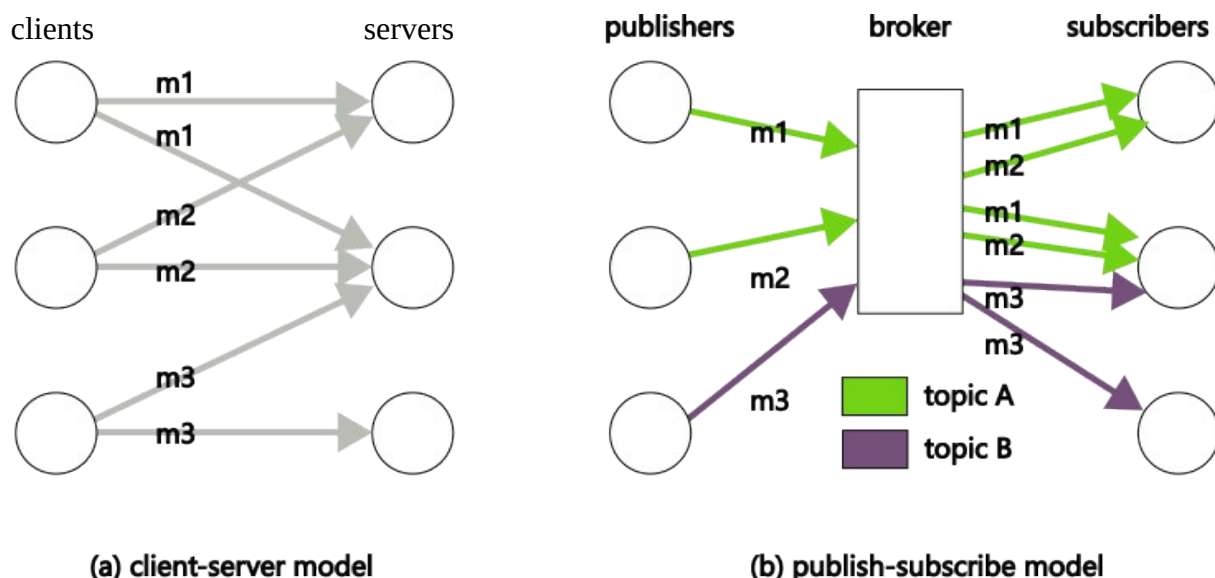
研究計畫將基於敝實驗室的先遣研究，針對上述兩項挑戰，研擬可能的解決方案。同時透過進一步文獻閱讀以及系統實作的方式，發掘其他潛在的挑戰及機會。也會將所開發之系統設計以開放原始碼之方式實作，並挑選一些具代表性之車聯網應用，將其實作於此驗證平台，藉以檢驗此平台是否能符合其設計之目的，並訓練可投身於相關應用開發之科研人才。

## 2. 與本計畫相關之研究及參考文獻評述

以下綜述與本計畫相關之研究及文獻評述，分為兩個面向：(a) Publish-Subscribe 模型與實務；(b) 整合空間地理資訊的聯網資料通訊。在此計畫開始執行前以及執行期間，敝研究團隊亦會繼續收集分析相關研究論文及系統實作等資料。

### 2a. Publish-Subscribe 模型與實務

現今之大規模物聯網系統大部分使用的資料通訊架構皆基於 Publish-Subscribe 模型，亦即訊息的發布者 (Message Publishers) 與訊息的訂閱者 (Message Subscribers) 是透過一個代理者 (Message Broker) 以指定主題 (Topic) 的方式來傳遞訊息資料。訊息發布者告訴代理者它將發布何種主題的訊息，且訊息訂閱者也會告訴代理者它將需要何種主題的訊息。位居其中的代理者會依據主題來將訊息轉發給需要的訂閱者。



有別於傳統的 client-server 模型，在 publish-subscribe 模型中訊息的發布者與訂閱者不須知道彼此的網路位置資訊，故有利於資料通訊應用的規模擴充及機動調整 (參閱上圖)。以智慧城市的路口交通影像應用為例，佈建於台北市忠孝東路上的路口聯網攝影機，不需要知道所有欲取得此路口影像資料的電腦或手機等裝置的網路位置資訊，而只需要連線到前述的代理者，告知其將發佈主題為“忠孝東路”的訊息；而所有欲取得該影像資料的裝置，也不須知道路口攝影機的網路位置，而只需連線到那位代理者，告知其欲訂閱主題為“忠孝東路”的訊息，即可接收到所需的影像資料。智慧城市的管理者一方面可隨時新增或移除此主題的訂閱者 (例如交管中心的電腦伺服器或管理者出差攜帶的手機) 來調閱相關訊息，另一方面可依需求增減攝影機的佈建數量或抽換攝影機的軟硬體設備，皆不須重



新設定網路連線。

在 Publish-Subscribe (以下簡稱 pub-sub) 模型中，代理者有兩種發送訊息給訂閱者的模式。在第一種模式中，代理者會將一個主題的每筆訊息傳送給該主題的所有訂閱者；在第二種模式中，代理者則將一個主題的每筆訊息僅傳送給所有訂閱者之一。第一種模式的應用情境之一如前段所述，第二種模式的應用情境之一則為高流量的雲端通訊運算服務中，藉由佈建多個訂閱者來分散及平衡通訊運算的負載 (load balancing)。第一種模式在物聯網領域的主流通訊協定為 MQTT<sup>2</sup>，並已有許多相關的軟體實作<sup>3</sup>；第二種模式的實作之一為 NSQ<sup>4</sup>，為分散式的通訊中介層 (messaging middleware) 軟體。

基於 Publish-Subscribe 這樣具備隨插即用 (plug-and-play) 以及多播 (multicast) 特性的通訊模型，敝人認為其將適用於此計畫的車聯網應用，且此計畫預期發展之驗證平台也會支援這樣的通訊模型。在本計畫中，不會從零開始撰寫支援 Publish-Subscribe 模型所需的資料通訊模組，而是會將平台的設計與實作植基於相對成熟的現有 MQTT 軟體實作 Eclipse Mosquitto，從而能將資源及精力聚焦在創新的部分。藉由將實作建立在一個成熟的基礎上，也能幫助參與計畫的相關研究人員學習熟悉這些實用的工具與函式庫。

## 2b. 整合空間地理資訊的聯網資料通訊

車聯網的重要系統需求之一是服務規模的可擴充性 (scalability)，也就是需要能支援成萬上千的車載裝置透過網路交換資料。由於車載裝置產生的資料及所需的資料往往具有地域性，故依據地理區域來將網路及資料傳輸做適當的組織及過濾，能在不損及服務品質的情況下有效降低網路的負載，進而提高網路的可擴充性。在 DM-MQTT [6] 這篇研究中，探討使用階層式多個代理者以及整合 SDN (software-defined network) 的方式，來支援在大規模資料流情境下降低資料傳輸延遲以及各代理者的負擔，但其不考慮聯網裝置可能在不同區域間移動。而在 EMMA [8] 這篇研究中，則是設想將多個代理者分布在網路需涵蓋的區域中，並持續監測資料發布者及訂閱者與其代理者的連線品質，來決定是否要動態調整調整網路連線的拓樸，並往往會使用彼此地理距離較近的連線來做資料傳輸。此外，對於高流量的聯網資料傳輸，如影像資料傳輸等，前人亦探索了藉由監測當前區域網路吞吐量 (throughput) 的高低來動態調整待傳影像解析度的策略 [7]，以此來降低端到端資料傳輸的時間延遲。

在 LA-MQTT [9] 及其相關研究中 [2][3][4][5]，則是使用各連網裝置與資料發布者的相對地理位置來決定資料訂閱與傳輸，藉此降低網路負載來提升服務品質。這些研究使用了地理圍欄 (geofence) 的概念，將實體空間劃分成數個區域，每個區域賦予一個 MQTT topic，藉由連網裝置在圍欄內或圍欄外來決定其要訂閱那些 topics。每台連網裝置皆會訂閱其所在之地理圍欄的 topic，並發布其自身資料至相同 topic，如此可達成同地理區域內之資料交換，也自動相容於各連網裝置可能依實際情況移動至不同區域的情境。

<sup>2</sup> MQTT official website: <https://mqtt.org/>

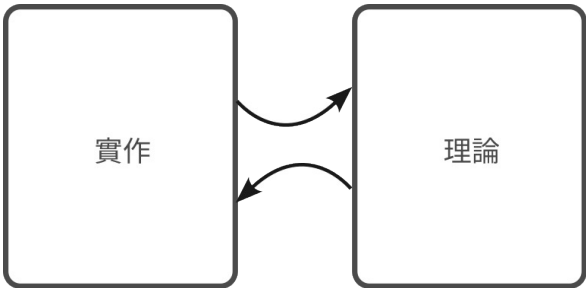
<sup>3</sup> MQTT implementation: <https://mqtt.org/software/>

<sup>4</sup> NSQ official website: <https://nsq.io/>

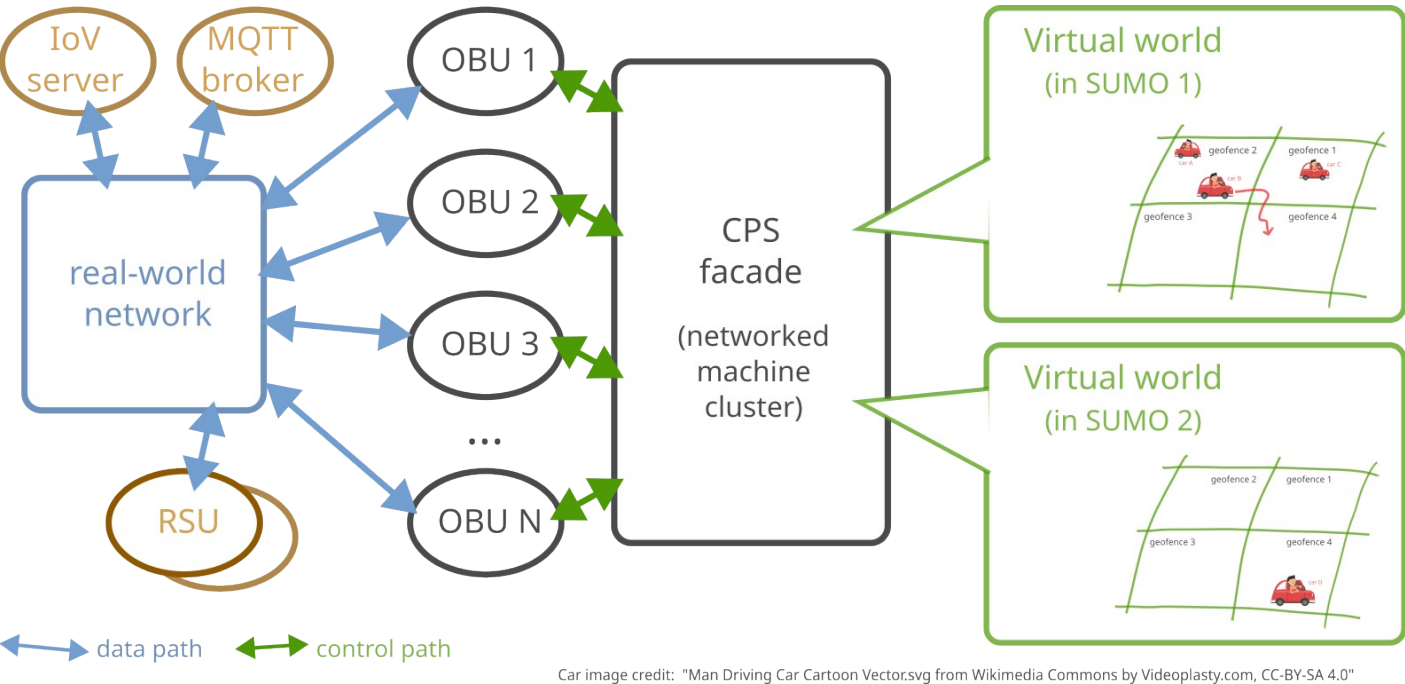
(二)研究方法、進行步驟及執行進度

本計畫為一年期研究計畫。以下針對研究方法與原因及其創新性、預期困難及解決途徑，分述之：

甲、研究方法與原因及其創新性



本計畫預期結合兩項成熟的開放原始碼軟體，分別為實體網路通訊協定 MQTT 的實作 Eclipse Mosquitto，以及虛擬車輛交通模擬軟體 SUMO，來設計及實作一個虛實整合的車聯網研究驗證平台。預期將採用由實際系統實作主導研究進度，在過程中應用適合的即時系統理論與分散式計算理論，並發掘新的理論需求，設計後再透過將其實作的方式來驗證適用性並整合進現有系統，以此方式迭代進行。在此計畫中使用實作主導研究進展的原因在於，將 Mosquitto 與 SUMO 初步介接這項工作本身並不困難，先完成這個部份，可確保於計畫進行中能持續有一個可以運行的系統基礎版本，便於在其上快速測試一些研究上的靈感，以及以它為基底去探討不同的系統架構 (詳見後述)。另一個原因，在於通常軟體開發所需投入的時間精力，往往會高於預期。故時時保有一個階段性的系統實作，較能確保計畫的產出，避免最後有好的理論但卻來不及使其落地結果。



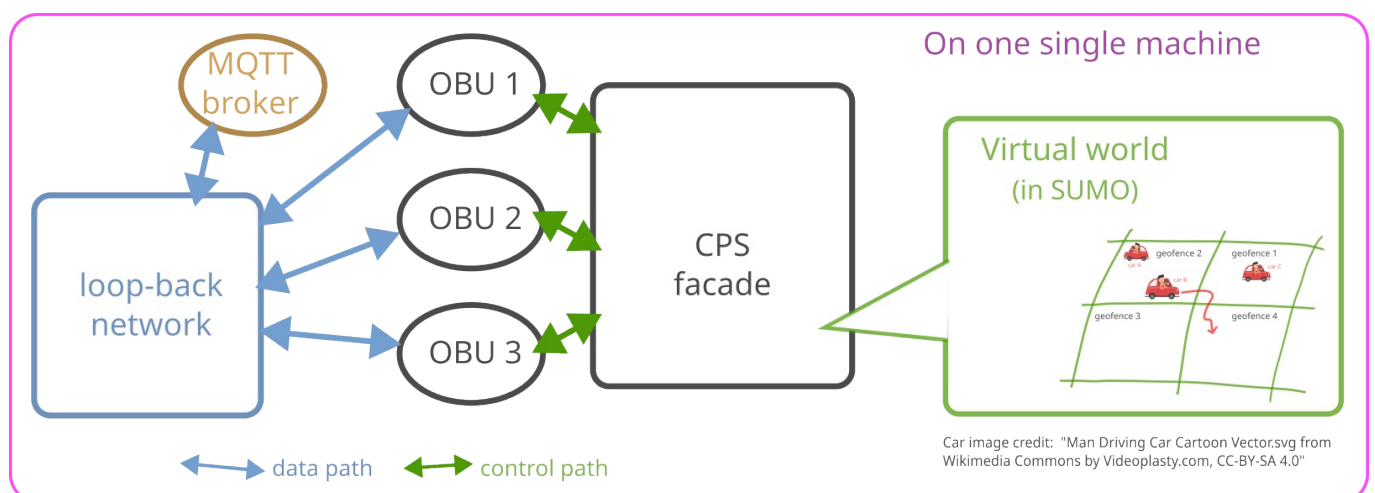
本計畫將開發的虛實整合車聯網驗證平台之創新系統架構如上圖所示。實部為架構圖左側以藍色箭頭 (data path) 連接之各模組，為車聯網應用本身的資料通訊部份。虛部為架構圖中間部份以綠色箭

頭 (control path) 連接之各模組，為驗證平台要作到虛實整合所需的內部資料傳遞。連接實部與虛部的模組即為各車載聯網運算裝置 (on-board unit)，簡稱 OBU。亦即，車聯網的應用程式是運行在 OBU 中，並與其他車輛之 OBU 或車聯網基礎設施中的 IoV server 伺服器及路側裝置 (road-side unit, 簡稱 RSU) 彼此交換資料。實際上 OBU 可以是車輛內建之車載電腦，也可以是用路人置於車中之智慧手機等連網運算裝置；在驗證平台中，OBU 為一般電腦主機或 Raspberry Pi 樹梅派等嵌入式開發設備。

此車聯網之開發驗證平台中，並沒有實際車輛。車輛的移動是藉由 SUMO 軟體來模擬，其運行於由多台電腦主機集成之運算叢集。此叢集在此計畫中稱為 CPS (cyber-physical) facade，負責將運行其中之 SUMO 提供的即時車輛及路況資訊模擬，轉傳至各台 OBU。從 OBU 的視角觀之，其不會且也不需知道載運其的『車輛』是真實車輛或是程式模擬。最後，基於可擴展性的原因，此一開發驗證平台，預期要能夠將 SUMO 所模擬之虛擬世界，依需要拆分成多個虛擬空間，分由 CPS facade 中的不同主機運行，以分散所需之運算負載。每個虛擬空間為整個虛擬世界的部份態樣，且需彼此同步，使得若從 OBU 的視角觀之，相當於一個完整的虛擬世界。

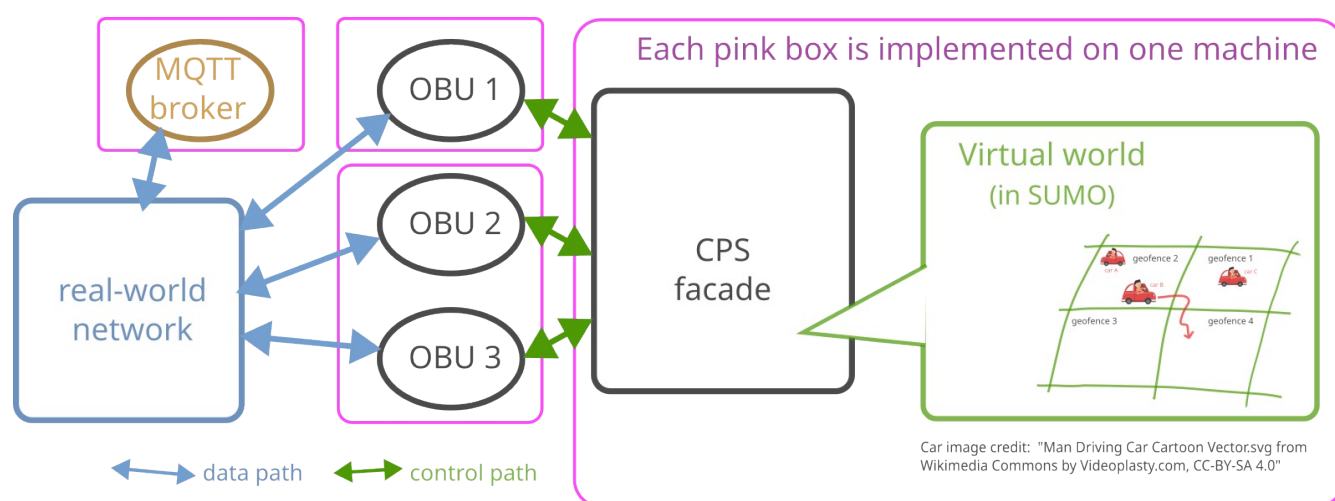
此計畫之研究進行步驟，預計採用『先求有、再求好』的方式逐步推進：

- 1) 預期首先會將此架構之所有模組實作在同一台電腦主機中，採用少量車輛數、一個 SUMO 虛擬世界的方式，先確認各模組彼此的功能整合程度，以及虛實整合時間同步的解決方案。此步驟之架構圖如下圖所示，data path 的部份會使用 MQTT 通訊，惟使用 localhost networking 的方式，讓 data path 的各個模組獨立運行但運行在同一台機器上。CPS facade 在此步驟的主要功能，是透過如 TraCI<sup>5</sup>這種可即時擷取及改寫 SUMO 運行資訊的程式，來將虛擬世界中車輛的位置資訊與各個 OBU 中的資訊同步。在此研究階段，預期上圖黑色的部份會是用一個多執行緒程式來實作，亦即 CPS facade 及每個 OBU 將會是一個執行緒，各執行緒間透過 global buffer 及 synchronization primitives 來交換資料。關於虛實整合時間同步的挑戰及可能解決途徑，將詳述於下節『預計可能遭遇之困難及解決途徑』的第一個部份 (第 10 頁)。



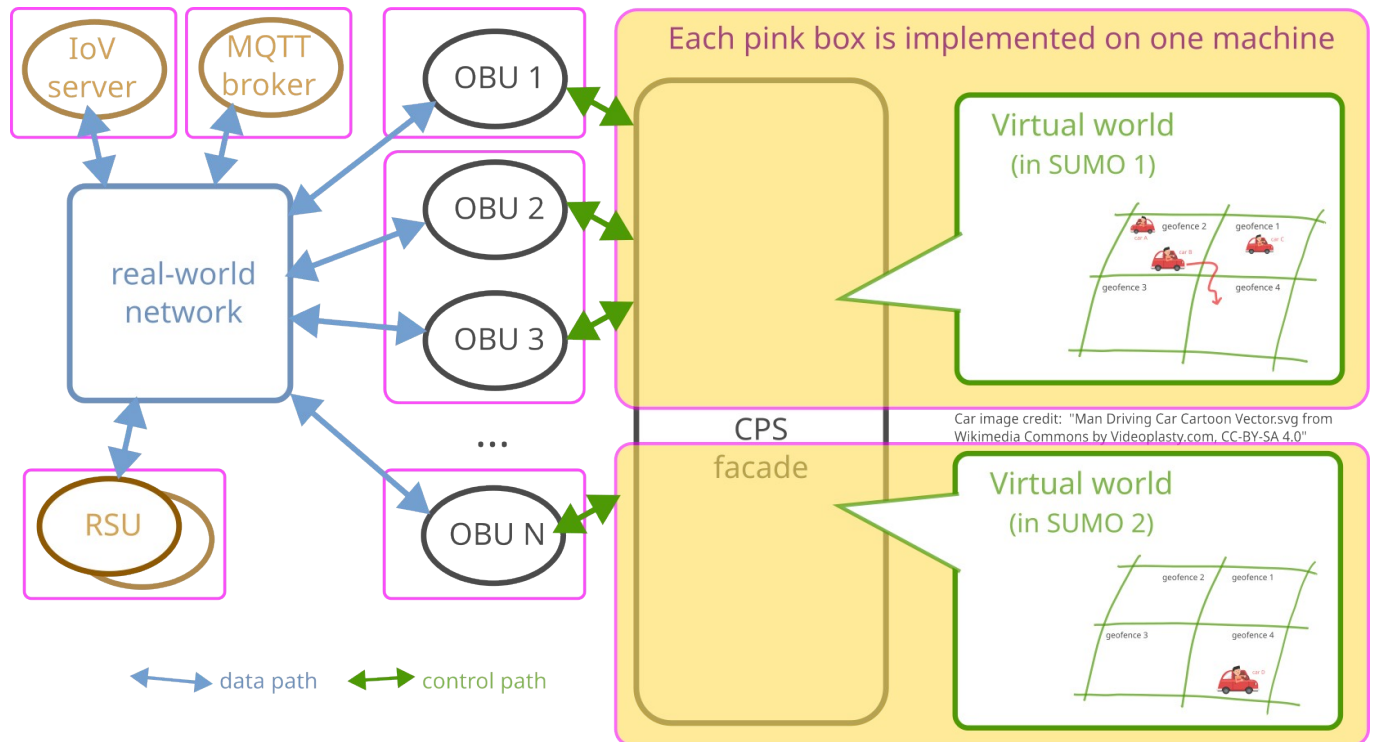
<sup>5</sup><https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.html>

2) 接著，會將平台中的 data path 部份實作在多台主機運行，也會將 control path 中的 OBU 及 CPS facade 拆分成多台主機運行，透過實體聯網之方式，探究此一開發驗證平台的負載可擴展性問題。此階段架構圖如下頁上圖所示。和前一研究階段相比，此步驟會使用實體的網路 (圖中左側藍框) 來連接 data path 上的各台實體主機 (圖中左半部粉紅色框)。取決於 OBU 之運算負載以及可使用的實體主機數量，預計會將 OBU 佈署於多台主機，每台主機運行一個或多個 OBU。考量 SUMO 在模擬多車情境時的運算需求頗高，CPS facade 將會獨立運行於另一台實體主機 (圖中右側粉紅色框)，單獨運行 SUMO，而 TraCI 則是執行於運行 OBU 的主機上。在這樣的多主機配置下，control path 也會需要透過網路來交換資料 (圖中綠色雙向箭頭)。值得一提的是，control path 為此驗證平台自身運作所需，與平台上運行的車聯網之 networked application 的 data path 彼此互為獨立關係，故 control path 的網路通訊可以使用 MQTT 以外的其他方式達成。預期會先使用 MQTT 的方式實作，但其 MQTT broker 與 data path 使用之 MQTT broker 不同，以避免資料流互相干擾。





3) 最後，預期探討將車輛模擬之虛擬世界，拆分成由 CPS facade 叢集中多台主機所建構之虛擬空間，並加入 RSU 及 IoV server 等進階車聯網元素，以其進一步提昇可順利模擬之車聯網參與的車輛數及完整度。此部份架構圖如下圖所示。與前一個研究階段相比，最主要的調整為虛擬空間的拆分，原因是在於當需模擬的車輛數持續增加時，SUMO 本身將需耗費許多主機的運算資源，此時若該主機若還要與許多 OBU 進行資料交換，預期將大幅拖慢整體的車聯網情境模擬速度。本計畫針對此問題的創新設計，在於同時運行多個 SUMO 所建構之虛擬世界，每個 SUMO 運行在獨立一台機器上，並藉由 TraCI 來存取各虛擬世界的模擬樣態，使得從每台 OBU 的視角來看，其依然能取得根據其地理區域所需要的資訊。相關細部設計將詳述於下節『預計可能遭遇之困難及解決途徑』的第二個部份 (第 12 頁)。



## 乙、預計可能遭遇之困難及解決途徑

此部份將針對於本計畫背景敘述段落所提之兩大挑戰 (前述第 3 頁)，分述挑戰原因以及可能之解決途徑。

### 挑戰一：虛實整合的時間同步問題 (Time Synchronization)

延續先前所述，具體而言，SUMO 此一離散時間模擬器的運作方式，為將整段需模擬之案例 (例如一小時) 之系統樣態變化拆分為一段一段之離散時間單位 (time step)，預設為一秒鐘。舉例來說，SUMO 會嘗試依據車速等物理參數設定，去推論在『虛擬世界』經過一秒鐘後，該車的位置會在哪裡，據以更新模擬畫面以及系統樣態。時間單位為一可調整之參數，若調整為小於一秒鐘，則整個案例模擬完成所需的『實體世界』時間會增加，因為 SUMO 會進行更微小時間範圍的推論；若需模擬之情境較為複雜，例如車輛數較多，則即便時間單位不變，模擬完成所需的『實體世界』時間亦會增加，因為同樣時間單位內需計算較多事情。上述時間關係可用一稱為 real-time factor 的效能指標來描述之：

$$\text{real-time factor} = \text{虛擬世界經過的時間} / \text{實體世界經過的時間}$$

舉例來說，若 real-time factor 為 10，則意味著模擬一個 10 小時的車流交通情境只需要花費實體世界的 1 小時，亦即此模擬非常有效率。而當需模擬之情境過於複雜時，real-time factor 往往會小於 1。在純虛擬環境的模擬中，real-time factor 的數值大小提供模擬器的使用者得知當前的模擬效率，但該數值與模擬的正確性較無關<sup>6</sup>。然而，在如本計畫所提出之虛實整合車聯網開發驗證平台中，因為車載裝置是透過實體網路交換資料，且實體網路的傳輸所需時間是依據實體世界時間的進程，故只要 real-time factor 遠大於或遠小於 1，則若不做相應處理，則模擬的結果將會有嚴重偏差。原因分述如下。

若 real-time factor 遠大於 1，則意味著由虛擬世界的視角觀之，網路傳輸的速度將遠慢於非模擬情境下的網路速度。此情況造成的後果是車聯網模擬世界中的資料交換將慢的不切實際：在真實世界的情境下，一台車透過網路將資訊投遞給另一台車，在一般的網路流量負載下，整個過程通常不會超過一秒鐘；然而在虛實整合的開發驗證平台中，若 real-time factor 遠大於一，則在模擬世界的視角下，也許一台車透過網路將資訊投遞給另一台車，會花費數十秒鐘的時間。就車聯網應用而言，若資料交換速度過慢則資料抵達時可能已過了其應用時效。例如路況預測，在前車通知前方壅塞的消息抵達時，用路人已經駛抵了壅塞的區域。故這樣的車聯網效能驗證將會誤導車聯網的應用開發者。

若 real-time factor 遠小於 1，則意味著由虛擬世界的視角觀之，網路傳輸的速度將快的不切實際：舉例來說，若 real-time factor = 0.05，則虛擬世界過 20ms 時，實體世界已經過了一秒鐘，而根據實際經驗可知，在一秒鐘內大多數的城市內距離的網路傳輸皆可完成；也就是說，在這樣的虛擬世界中，大多數的車聯網資料傳輸將皆可在 20ms 內完成傳輸，這將與未來實際佈署車聯網到實體世界時會有的情況很不一致。故這樣的車聯網效能驗證也將會誤導車聯網的應用開發者。

<sup>6</sup>實際上，調整時間單位的長度會影響模擬情境的行為如車道變換的成功率等，因為時間單位很小則意味著系統在當前情境能做決策的次數會較多 (見 <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Output/>)。

在虛實整合的開發驗證平台中，當需模擬的車輛數逐漸提昇時，real-time factor 將逐漸降低。然而，由於透過 TraCI 將虛擬世界樣態映射到每台 OBU 所能觀察到的資訊皆需消耗時間 (control path 之耗時)，故當需模擬的車輛數逐漸提昇時，由虛擬世界觀察到的『網路速度』亦將會變慢 (實際網路速度加上 control path 之耗時)。這樣雙重因素影響下，導致的結果是，若沒有針對此現象做相對應的平台設計，則無法保證虛實整合模擬的時間一致性，要不就是模擬過程中的網路速度呈現過快，或是呈現過慢。

在此研究計畫提案中，申請人團隊認為處理此挑戰所需的關鍵技術為，平台要能依據情況來『修正』虛擬世界的時間進程。初步分析得知，修正時間進程的方式有兩個必備面向，分述如下。

第一個時間修正的面向，在於補償 control path 之時間耗時。舉例來說，預期可在平台之 CPS facade 透過 TraCI 逐步擷取各 OBU 所需資料時，暫停 SUMO 的模擬。這樣做的效果，相當於 CPS facade 的耗時將不會被虛擬世界所觀察到，亦即虛擬世界所觀察到的網路資料傳輸費時將不會包含 CPS facade 的耗時。

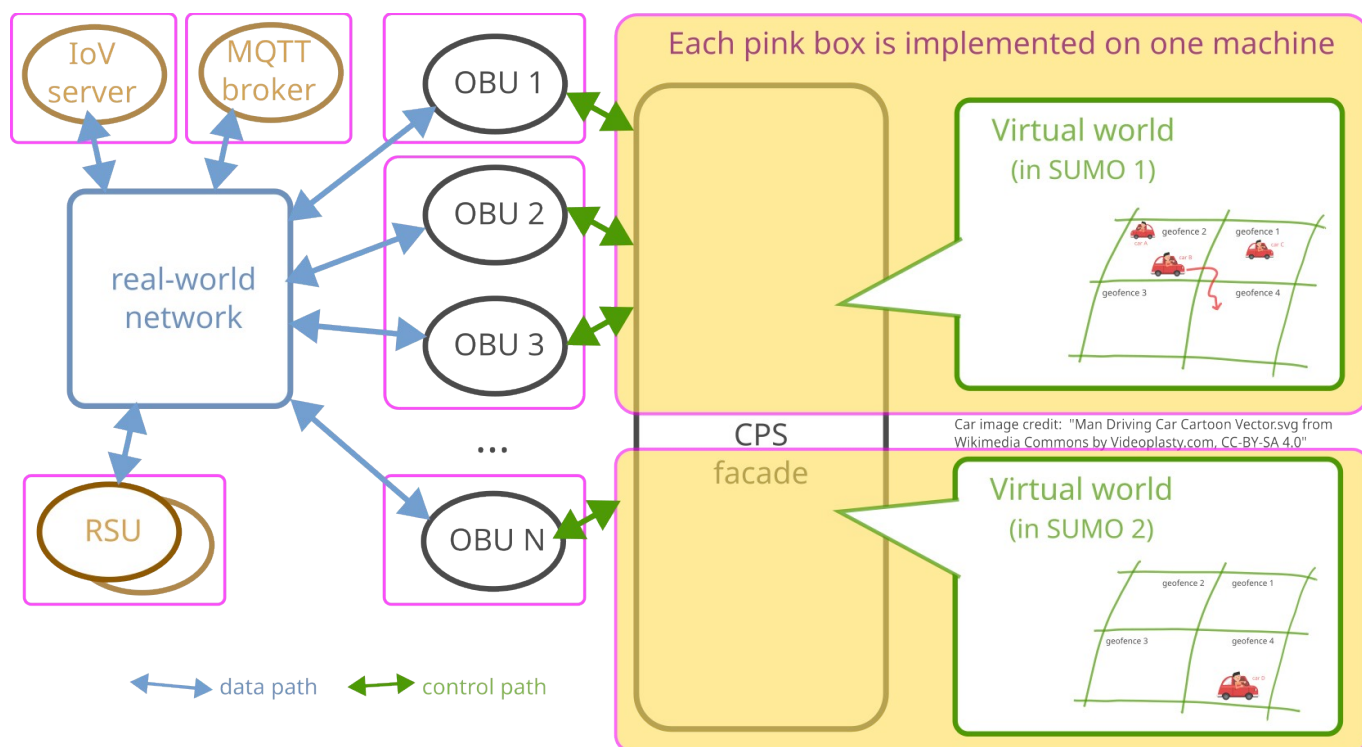
然而單單執行此種做法會衍生一個問題，舉例如下：倘若有 5,000 輛車在同一虛擬時間單位內需要發送資料，則 CPS facade 將需要一些時間來將此需求反映到各 OBU 並由 OBU 透過真實網路來發送資料。倘若將所有需求反映到各 OBU，這樣的動作需要花費實體世界的 2 秒鐘。若將 SUMO 的模擬暫停 2 秒鐘來等待這個動作完成，則在這 2 秒結束前，將會有 OBU 已經透過網路接收到這 2 秒剛開始時某些 OBU 發送的資料。當 SUMO 的時間暫停結束前，若已收到資料的 OBU 已經做了一些相對應的運算 (例如重新規劃行車路線)，則當 SUMO 的時間暫停結束時，從虛擬世界的角度觀之，相當於該資料傳輸及 OBU 行為更新這兩件事皆在『一瞬間』完成。明顯地，這樣會造成模擬的失真。故需要下述的第二個時間修正面向。

第二個時間修正的面向，在於管制資料傳輸之結果反映回虛擬世界的時間點。延續上述的例子，那些已經在 2 秒內收到資料的 OBU，其更新車輛行為的動作，平台必須要給予適當的『延遲』，才能合理地在虛擬世界反映資料傳輸所需的時間。將此概念推廣之，本計畫所將開發之虛實整合平台，預期需要紀錄每筆資料傳輸實際的時間花費，據此逐步地在虛擬世界時間暫停結束後，於適當之時間點將結果推送回虛擬世界。

以上，為關於虛實整合的時間同步問題 (Time Synchronization) 的探討。

## 挑戰二：驗證平台的負載可擴展性問題 (Load Scalability)

延續前述研究三步驟的論述 (第 7-9 頁)，負載可擴展性問題的基本處理方針，為將負載從單一實體主機卸載至多台實體主機。以下針對卸載 SUMO 虛擬世界的運算負載至多台主機的部份，詳述本研究計畫於此處的構思。下圖為前述之步驟三架構圖的複製。



於本平台中，SUMO 是運行於 CPS facade 的主機叢集中。卸載 SUMO 虛擬世界運算負載的方式，為將一個虛擬世界切分成多個子世界，並將每個子世界各自運行於叢集中的一台主機。切分虛擬世界之所以可行的關鍵因素，在於每台 OBU 並不需要知道城市中所有車輛的資訊。舉例來說，使用地理圍欄 (本計畫第 2-3 頁) 的方式，每台 OBU 只會要求能接收在同圍欄中的其他 OBU 發送之資訊，或是數組特定圍欄中的 OBU 發送之資訊。據此，預期可根據地理圍欄的範圍來切分虛擬世界，每台 OBU 對應到其中一個子世界。在如此設計下，一方面來說，CPS facade 的主機叢集中，每台運行 SUMO 的主機之負載皆能降低；另一方面來說，若善加依據 OBU 所隸屬之虛擬世界來分配各 OBU 所運行的主機 (例如上圖 OBU 2 及 OBU 3 運行在同一主機，因其皆對應到 SUMO 1 之子世界；OBU N 則運行在另一台主機，因其對應到 SUMO 2 之子世界)，則在各組 OBU 的主機上運行之 TraCI 的運算及網路負擔亦可減輕，因其只須存取 CPS facade 叢集中的特定主機而非所有主機。

以上所述之構想，預期需面對一衍生之問題：當車輛由某地理圍欄範圍進入另一地理圍欄範圍時，若新的地理圍欄範圍隸屬於不同的虛擬子世界，則車輛如何從一子世界『移動』到另一子世界？針對此問題的因應之道，本計畫申請者認為可從 OBU 主機之 TraCI 著手。TraCI 不只有提供擷取 SUMO 當下運行狀態的功能，也提供改變 SUMO 下一時間單位運行狀態的功能。故，在 OBU 程式知道其將跨越地理圍欄時，供應其資料存取所需的 TraCI 勢必也會知道此資訊，故可在該 TraCI 中更新其 control path 之路徑，將其原先連接之子世界的車輛資訊移除，並將其新增至新的子世界。

以上，為關於驗證平台的負載可擴展性問題 (Load Scalability) 的探討。



### (三)預期完成之工作項目及成果

本計畫在一年期程中之進行步驟及執行進度甘特圖如下，期程自 2025 年 8 月至 2026 年 7 月：

工作項目	2025					2026						
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
環境建置與擴充												
應用案例探討												
開源系統實作												
架構整合												
成果整理及發表												

本研究計畫預計於一年執行完畢，包含以下五項工作項目：

- 環境建置與擴充：本計畫研究團隊將建置一個供計畫執行所需之聯網軟硬體環境，主要包含電腦工作站群集，以及連接各裝置設備之網通設備。雖然車聯網之車載運算傳感裝置可能為特定嵌入式硬體或用路人之智慧手機，然而從本計畫研究的切入角度來看，可使用一般之個人電腦或工作站電腦來代替車載運算裝置。車載傳感器之資料，則由電腦軟體模擬資料生成。預期隨著研究計畫執行推展，將有需求購置一些新的運算及網通設備。
- 應用案例探討：本計畫研究團隊將持續研讀產學界相關研究論文與期刊，收集並整理車聯網通訊及智慧城市的相關應用，藉由分類的方式，了解各項應用在時間延遲及系統資源的需求，以及資料傳輸的各項重要參數，如每筆資料的大小及資料傳輸之頻繁程度等。
- 開源系統實作：本計畫研究團隊首先將學習 SUMO 的應用面使用以及其本身程式之開發，並精熟 MQTT 之相關成熟軟體內涵及開發。透過實際整合運行這些軟體的方式，依計畫進度來設計開發符合需求的系統驗證平台。
- 架構整合：本計畫研究團隊將持續發展一個可供車聯網應用開發及其效能驗證之虛實整合系統架構，以應用導向的方式，配合相關文獻閱讀，以應付當前及新興的應用需求。該架構並將實作於此計畫發展之開源運算平台。
- 成果整理及發表：本計畫研究團隊將整理各階段代表性研究成果，並投稿發表國際重要研究會議與期刊，增加台灣學術研究能見度及能量。投稿目標為此領域之世界頂尖研究會議，如 ACM SenSys, ICDCS, IoTDI, RTSS, RTAS 等，以及重要學術研究期刊，如 ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, ACM Transactions on Internet of Things, ACM Transactions on Embedded Computing Systems, IEEE Internet of Things Journal, IEEE Systems Journal 等。

最後，本計畫預計將達成下述成果：

- 訓練具備思辨、實作能力以及國際視野的研究人才：本計畫執行期間，申請人將訓練參加本計畫之各級研究生，透過修習申請人開授之研究所課程“資料通訊”、“即時系統”、“網宇實體系統”等課程，以及每週一對一指導閱讀批判研究論文的方式，搭配團體書報討論的方式，培養及厚植研究生思辨的能力。申請人也將透過指引研究生學習運用與開發車聯網相關開源軟體的方式，加強參與者的實作能力；並透過鼓勵研究生閱讀國際研究期刊、白皮書、及參與專題演講及會議的方式，擴大參與者的國際視野，與當前的重要產學科研方向接軌。申請人也將透過各樣進修，進一步提升自己的教學研究水平，以及領導統御研究團隊的能力，並探求新的研究方向與課題。
- 產出新穎且實用的網路通訊中介層架構設計與實作：本計畫申請人預期透過實務資料收集及文獻閱讀分析和實作驗證，將理論與實務結合，以應用導向的方式，完成新穎且具實用價值的網路通訊中介層研究。基於申請人過往的經驗，如此的研究進行方式，可確保計畫所需的人力物力資源能運用在社會當前需要的議題上；也因著結合理論建模分析，可使所發展的系統具有可擴充性而不僅僅局限於當前看的到的應用，並可有方向地評估進一步的發展性。本計畫申請人也預期在此計畫中逐步建立雛形系統，供階段性的成果驗證，以及用於公開學術展示，促進相關研究工作的推動。申請人也將使用開源軟體開發及散布的方式，透過這些成果提升此領域產學合作科研能量，以及可能的加值應用。
- 提升台灣科研工作之國際能見度及促進跨國合作交流：在本計畫執行期間，申請人將時時提醒自己及整個研究團隊，需本著誠信及務實的態度從事實踐性的研究。申請人預期如此將取得有實用價值的成果，且將有助於研究成果的投稿發表，具體有力地說服審稿者這些成果的影響力，也讓世界投注更多眼光與資源給台灣的研究團隊，形成正向循環，提供台灣的人才世界級的視野與交流機會，也招募世界各國的優秀人才為台灣所用。

## 參考文獻：

- [1] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [2] L. Guo, L. Chen, D. Zhang, G. Li, K. -L. Tan and Z. Bao, "Elaps: An efficient location-aware pub/sub system," 2015 IEEE 31st International Conference on Data Engineering, 2015, pp. 1504-1507, doi: 10.1109/ICDE.2015.7113412.
- [3] Long Guo, Dongxiang Zhang, Guoliang Li, Kian-Lee Tan, and Zhifeng Bao. 2015. Location-Aware Pub/Sub System: When Continuous Moving Queries Meet Dynamic Event Streams. In Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '15).

- [4] Hasenburg, Jonathan, and David Bermbach. "GeoBroker: Leveraging geo-contexts for IoT data distribution." *Computer Communications* 151 (2020): 473-484.
- [5] Hasenburg, Jonathan, and David Bermbach. "GeoBroker: A pub/sub broker considering geo-context information." *Software Impacts* 6 (2020): 100029.
- [6] Park, Jun-Hong, Hyeong-Su Kim, and Won-Tae Kim. "Dm-mqtt: An efficient mqtt based on sdn multicast for massive iot communications." *Sensors* 18.9 (2018): 3071.
- [7] Tsai, Ming-Fong, et al. "An Adaptive Solution for Images Streaming in Vehicle Networks using MQTT Protocol." *International Conference on Internet of Things as a Service*. Springer, Cham, 2017.
- [8] T. Rausch, S. Nastic and S. Dustdar, "EMMA: Distributed QoS-Aware MQTT Middleware for Edge Computing Applications," 2018 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), 2018, pp. 191-197, doi: 10.1109/IC2E.2018.00043.
- [9] Federico Montori, Lorenzo Gigli, Luca Sciallo, and Marco Di Felice. 2022. LA-MQTT: Location-aware Publish-subscribe Communications for the Internet of Things. *ACM Trans. Internet Things* 3, 3, Article 20 (August 2022), 28 pages. <https://doi.org/10.1145/3529978>
- [10] Hermann Kopetz and Wilfried Steiner. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer; 3rd ed. 2022 edition. eBook ISBN 978-3-031-11992-7.
- [11] 陳昱瑋 Chen, Yu-Wei (2024) 整合車輛軌跡模擬與訊息交換的車聯網測試平台 An Internet-of-Vehicles Testbed for Integrating Trajectory Simulation and Real Message Exchange. National Taiwan Normal University.