

高速公路匝道匯流區車流特性之研究¹

A STUDY ON THE TRAFFIC CHARACTERISTICS IN FREEWAY MERGE AREAS

黃家耀 Ka Io Wong²
林貴璽 Guey-Shii Lin³
廖晉毅 Chin-Yi Liao⁴
溫雲晨 Yun-Chen Wen⁵
李祐德 You-Te Li⁶
陳威瑜 Wei-Yu Chen⁷
林亶理 Dan-Li Lin⁸
張舜淵 Shuen-Yuan Chang⁹
歐陽恬恬 Tien-Tien Ou-Yang¹⁰
洪瑋鍾 Wei-Chung Hung¹¹

(109 年 12 月 7 日收稿，110 年 3 月 18 日第一次修正，111 年 3 月 9 日定稿)

-
1. 本文為交通部運輸研究所「MOTC-IOT-109-PDB011 高快速公路匝道分匯流區容量及服務水準分析之研究 (2/3)－非獨立進出口分匯流區」部分研究成果，特此致謝。
 2. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系副教授 (聯絡地址：30010 新竹市大學路 1001 號，電話：03-5712121#57211，E-mail：kiwong@nycu.edu.tw)。
 3. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系講師。
 4. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。
 5. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。
 6. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。
 7. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。
 8. 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士。
 9. 交通部運輸研究所運輸計畫組組長。
 10. 交通部運輸研究所運輸計畫組研究員。
 11. 交通部運輸研究所運輸計畫組助理研究員。

摘要

高速公路進口匝道車流併入主線處，車流因需進行較密集車道變換，因而常導致車道速率變異大、亂流遞移，以及容量下降等現象。過去研究大多採用偵測器資料或路側攝影機進行現場調查，因受限於資料蒐集的困難度高，且傳統資料型態尚無法充分了解匝道匯流區內細緻的車流運作特性，因此本研究嘗試採用無人機進行空中拍攝，以俯視角度觀察整個匯流區內的車流互動現象，並進一步採用電腦視覺技術進行影像辨識，產生車流軌跡及車流特性資料。本研究以臺灣中山高速公路主線 3 車道的進口匝道匯流區為對象，經由六個調查地點之資料蒐集與分析結果發現，發現車流崩潰前最大 5 分鐘流率之對等小時流量介於 5,700 ~ 5,950 小車/小時之間；而發生車流崩潰前最大 15 分鐘流率之對等小時流量介於 5,500 ~ 5,810 小車/小時之間，兩者均較 2011 年臺灣容量手冊定義之建議容量值為低。此外，在順暢車流下，主線外側車道之使用率最低，在壅塞車流時，各車道之使用率會較接近；當進口匝道流率較大時，主線車流使用內側車道的比例會提高，故車道分布比例也可能會受匝道流率之影響。為進一步洞悉進口匝道匯流區段車流運作績效最差的位置，本研究以 50 公尺為單位，將匯流區段切劃成若干網格進行時間與空間兩維度的車流特性分析，發現各調查地點的運作績效最差位置並不存在一致性，但大致上會發生在加速車道末端至其上游 100 公尺範圍之主線最外側車道，此為匯流區內速率最低、車道變換頻次較高之位置。本研究各項結果可供高速公路匝道匯流區容量分析之參考。

關鍵詞： 高速公路；匯流影響區；亂流遞移；車流特性；車道變換頻次；無人機；電腦視覺

ABSTRACT

In the freeway system, traffic flow from the on-ramp merging to the mainline creates lane-changes and weaving, causing phenomena such as traffic turbulence propagation and capacity drop. Previous empirical studies using VD traffic data or road-side cameras are constrained by the data collection technologies, and the understanding of the traffic operation within the on-ramp merge area is still quite limited. In this study, we use unmanned aerial vehicles (UAV) to observe the traffic flow from the top view. We further use computer vision technology to extract vehicle trajectory data from the video and generate traffic characteristics at the temporal and spatial dimensions. This study presents the traffic data collected from six different sites on Taiwan's freeway interchange with three mainline lanes. The result shows that the maximum pre-breakdown flow rate over at 5-minute intervals is between 5,700 and 5,950

pcu/hr, and the maximum pre-breakdown flow rate at 15-minute intervals is from 5,500 to 5,810 pcu/hr. These values are significantly lower than the recommended values given by the Taiwanese Highway Capacity Manual (THCM, 2011). Under non-congested traffic flow conditions, the outermost lane has the lowest usage rate, while under congested traffic flow conditions, the usage rates among lanes are closer to each other. If the on-ramp has a higher flow rate, mainline traffic has a higher proportion to use the inner lanes, showing that the lane usage ratios are affected by the ramp traffic flow. To investigate the critical point of the merge area, which is the position with the worst operational performance, we divide the merge area into 50-meter cells and determine the spatial traffic characteristics. It is found that the critical points of the study sites are not at the same position, but in general it is somewhere between the end of the acceleration lane and its 100-meter upstream on the outermost lane, where the speed is the lowest and the lane change frequency is concentrated. The result of this study can be used for the development of capacity analysis methodology for the freeway ramp merge areas.

Key Words: Freeway; Merge influence area; Turbulence propagation; Traffic characteristics; Lane change frequency; UAV; Computer vision

一、前言

在高速公路中，進口匝道與高速公路主線會合之路段由於匝道之車輛需在加速車道結束前切入主線車道，會有許多的車道變換行為發生，故該路段經常會因車輛之匯流而造成車流壅塞之現象，導致入口匯流區經常為高速公路上發生壅塞之交通瓶頸區。而參照國內《2011 年臺灣公路容量手冊》^[1] 第五章之說明也提及，目前臺灣交通界有關匯流區之資料相當有限，高速公路匯流區之分析方法主要為參考交通部運輸研究所於民國 85 年出版之《高速公路上匝道路段交通特性資料收集》^[2]，以及民國 88 年出版之《都市快速道路與高速公路進口匝道車流特性之研究》^[3] 之現場調查資料，並訂定匯流區於服務水準判斷之檢核點位於併入點下游三分之二長度之地點。

過去之調查大多採取路側安裝調查設備，但此種調查方案有許多限制，以攝影範圍而言，攝影機為了要能夠錄製所有車道，勢必需要將攝影機從高一點的角度進行拍攝，但在路側並不一定有足夠的定點設施能夠供應架設。在路側攝影拍攝也僅能取得固定斷面之車流資訊，此方式無法得到匯流區各個區域之車流狀況。此外，在路段較長的區域也需要使用多台的攝影機，代表後續的資料處理需要觀察多部影片，人力資源成本較高，也是匯流區之現場調查資料有限之原因。

近期因新興調查的突破與無人機的興起，使用無人機進行空中拍攝也成為調查選項之一，無人機空拍能夠進行大範圍的攝影，並清楚觀察到路段上各車道之車輛，使路側安裝調查設備的問題簡化許多，且能補足路側攝影僅能收集固定斷面車流資訊之問題。該調查

方法^[4]可直接拍攝 700 公尺範圍內的影像，且在空間及時間的連續性上都優於過去蒐集資料的方法，除了能夠取得傳統之車流特性資訊(流率、速率、密度)，因其高空拍攝之特性能夠取得各車輛位於之車道位置，進而擷取車道變換之頻次，可用以分析亂流的程度及集中位置。

因此，本研究的目的是探討高速公路匯流區內之車流特性及容量，運用時空維度之車流特性資料，分析匯流區內及其上下游之車流演化，並探討匝道車流由加速車道併入主線所導致之亂流及其擴散現象，以視覺化及量化的方式說明加速車道車流對主線車流運作之影響。

本研究以臺灣國道 1 號及國道 3 號進口匝道匯流區為對象，選擇六個地點空拍調查，以分析匯流區內之車流運作情形。本文第二節回顧相關文獻，第三節說明車流特性資料的蒐集方法，第四節將說明分析結果，第五節為結論與建議。

二、文獻回顧

依照美國公路容量手冊(HCM)^[5]對於高速公路路段可區分為基本路段、交織路段，以及匝道分匯流區等三部份，其中分匯流區段所探討有關運行車流的影響因素相對於其餘兩者，應考慮之項目眾多，通常在主線車流或匝道車流增加時，若未針對分匯流影響區段輔以交通管理手段，一旦進入壅塞後的影響區衝擊範圍可能長達數公里，對高速公路運行績效影響甚鉅。

本研究目的在探究匝道匯流區段車流之操作特性，故以下相關文獻主要著眼於匯流區段之影響範圍、車道分布、容量界定，以及相關之評估標的與方式，俾瞭解與高速公路其他路段車流特性相異之處。

2.1 匯流區之影響範圍

美國 HCM 1950^[6] 匝道口分析中認為，匝道匯入點運行通常比分出點更複雜，因為必須將進口匝道車輛在匯入點插入主線車流內，故邏輯上，匯入點容量(可以是基本、可能、實際容量任一)應不會超過進口匝道併入主線路段下游的容量。由於高速公路主線駛近匝道區段的車流並非均勻分佈，由右側進口匝道匯入主線的車流只會併入主線較右側車道，且只在右側車道車流內有足夠間距時才能併入。故 HCM 1950^[6]認為匝道口上游主線車流的車道分佈才是決定匝道匯入點容量的重要因素，此觀點也是嗣後美國各版手冊發展匯入路段分析方法論的重要憑據。

HCM 1965^[7] 在上述觀念下，依據當時對匝道區段主線外側車道使用特性之相關研究，首先提出以主線最外側車道與其流量分布為主要評估標的與項目，除了發表主線最外側車道流量分布估算式外，最重要是以圖、表方式顯示匝道車流匯入主線之後，在最外側車道不同位置之殘留比例，此研究資料在後續 HCM 1985^[8]匝道口設施分析中被高度提

示，圖 1 為 HCM 1965^[7] 估算匝道口上游主線外側第一車道之流量時，定義在主進口匝道匯入點下游相當距離內仍行駛於第一車道之流率百分比。

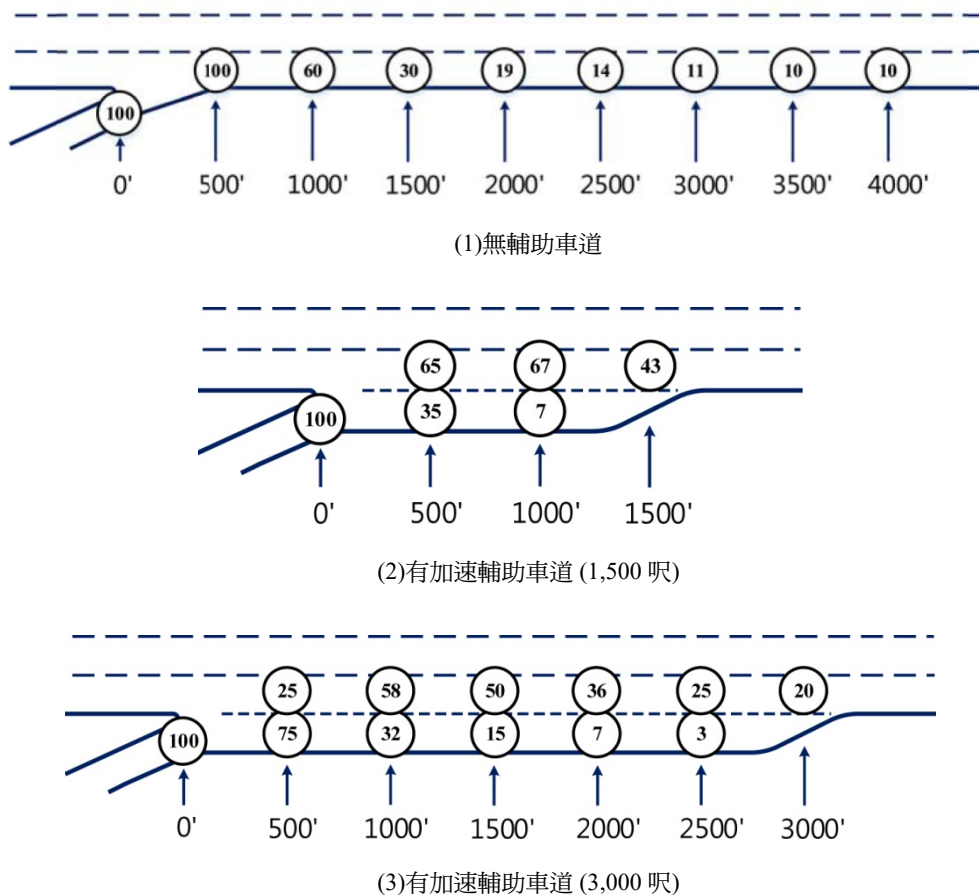


圖 1 進口匝道流量仍留在主線外側第一車道之百分比示意圖 (資料來源：^[7])

之後 HCM 1994、1997 依據紐約理工大學在 1994 年蒐集來自全美 10 個州 15 個城市，包含 42 處右側單線上匝道、16 處右側單線下匝道，以及 10 處較特殊幾何路型，共取得 341 筆 15 分鐘與 1002 筆 5 分鐘單線匝道流率資料分析與發表於 NCHRP 3-37 報告進行新方法論之發展，並成為後續 HCM 2000^[9] 與之後各版分析方法^{[5][10]} 的基礎。該系列版本與 HCM 1985^[8] 不同之處有：

1. 定義「匝道影響區」包括位於匝道匯入點下游 1,500 英尺範圍內之匝道加速車道與高速公路主線最外側二車道 (車道 1、2)。
2. 認為臨近分、匯流影響區總流量 (即緊鄰匝道口上游高速公路主線最右側 1、2 車道總流量) 是匝道影響區交通運行之主要衝擊來源。

2.2 各國容量手冊於匯流區之容量分析方法

2.2.1 國內之分析方法

國內高速公路匯流區交通資料蒐集於民國 85 與 89 年間，因交通取樣地點限制，適用於分析者僅國道一號桃園南下、中壢北上、內壢南下單一進口匝道共三處約 14 小時交通狀況資料，且並未包含匝道路段本身、匝道與平面道路交叉口之分析。

對於匯流區交通特性著重在匝道路段流量－速率－密度關係特性、檢核點之選擇、檢核點流率與大小車種之車道分佈統計，以界定檢核點車道流率與幾何設計、需求流率之關係。

2011 年臺灣公路容量手冊[1]對於匯流影響區的敘述，指出其範圍包含進口匝道、進口匝道與高速公路主線匯流區，及進口匝道與市區或其他道路之會合區，但由於目前國內能獲取之匯流影響區資料有限，故所提出之車流特性及分析方法有待日後可獲取之資料量足夠時，再進行修正。目前容量分析為參照運研所民國 85 年出版之《高速公路上匝道路段交通特性資料收集》^[2]，以及民國 88 年出版之《都市快速道路與高速公路進口匝道車流特性之研究》^[3]之現場調查資料，訂定匯流區於服務水準判斷之檢核點位於併入點下游三分之二長度之地點，並以影響區內之主線最內側 1 車道流率進行流率檢測與服務水準評估(如圖 2 所示)。

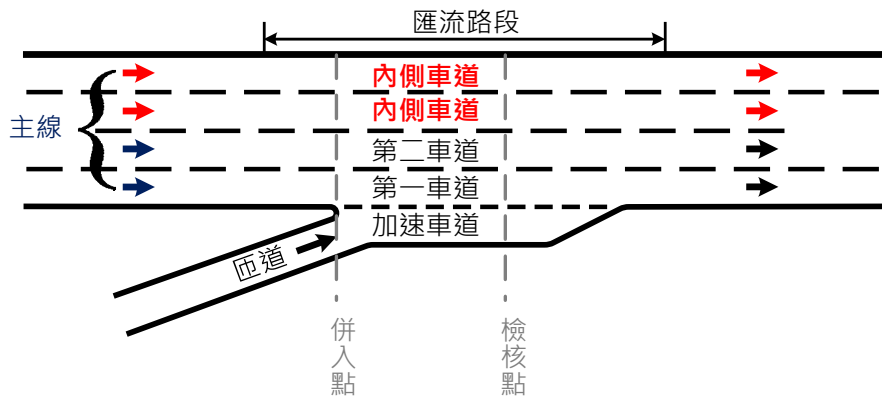


圖 2 進口匝道匯流區段示意圖 (資料來源：^[1])

2.2.2 各國之分析方法比較

當匯流匝道口發生癱瘓時，回堵車隊常同時發生在匝道與主線，當接近容量時，進口匝道常見車輛輪番匯入。美國自 HCM 1985 以來，普遍認為由進口匝道進入單一車道之總匯流量並不會影響高速公路匝道口附近基本路段的車道容量，亦即不會超過基本路段車流單一車道容量。為顯示不同國家在匯流區容量分析方法論主要評核項目之差異，本研究除

了蒐集國內容量手冊 THCM 2011^[1] 相關內容外，另篩選美國^{[5][8]} 與德國^[11] 兩個在近期發展新容量分析方法論較具代表性的國家進行對照，其中鑑於美國公路容量手冊在匯流區容量分析方法論方面已歷經多次異動，故分別引進 HCM 1985^[8] 與 HCM 2016^[5] 兩年版，表 1 顯示各國在匝道匯流區具體差異性之比較。表列對照項目之方法論在匯流區檢核點方面，因檢核點定義而有不同見解；在容量分析標的方面，德國法為分析整個匯流區車道斷面，有別於美國法、臺灣法僅分析車道的方式；在績效指標方面，美國法捨棄以 v/c 評定服務等級的觀念，其在 HCM 2016^[5] 版本與臺灣 THCM 2011^[1] 都有兩項評估績效指標；至於在車道容量方面，美國 HCM 1985^[8] 估計容量較為保守，HCM 2016^[5] 估計之最大值與臺灣 THCM 2011^[1] 相近，而德國則是利用匝道幾何條件來界定，此處以匯流區主線三車道為範例，其容量值經查表其值 5,800 小車/小時。

表 1 各國方法論於匝道匯流區之具體差異項目表

項 目	方法論			
	美國	美國	臺灣	德國
	HCM 1985 ^[8]	HCM 2016 ^[5]	THCM 2011 ^[1]	HBS 2015 ^[11]
檢核位置	第一車道與進口匝道流率和	第一車道與第二車道流率	併入點下游加速車道 2/3 處	匝道口下游
容量分析標的	主線第一車道	主線第一與第二車道	主線內車道	匝道匯流區(車道斷面)
績效指標	流率	1.密度(主) 2.速率(次)	1. v/c (主) 2.速差比 (次)	v/c
車道容量(最大值)	2,000 小車/小時/車道	2,400 小車/小時/車道	2,300 小車/小時/車道	三車道 5,800 小車/小時 (依匝道幾何型態查表)

(資料來源：^[12])

2.3 匯流區之車流特性

高速公路匝道是提供車輛經由平面式或高架式交流道的某一道路轉往另一道路的轉換路段，而相銜接的道路中最常見的是限制出入道路設施或高速公路。常見銜接高速公路與平面道路之匝道路段含三個部份，即高速公路匝道口、匝道路段，以及匝道與平面道路交叉口。高快速公路主線路段亂流大都起因於車輛由進口匝道匯入公路主線時，因路段實質幾何而發生必要的變換車道所致。

美國 HCM 1985^[8] 認為高速公路匝道口在車輛匯入主線時，因車輛間之換道衝突與速率變異而產生不尋常亂流，主線車輛為避免與匯入車輛相衝突，因而在相鄰匝道間之主線路段會發生較多車道變換行為；而匯入之車輛為求立即換道至外線道，也會導致在相鄰匝

道間之主線路段發生較多亂流。當愈多車輛進入匯流區段，基本流率、密度、速率之平衡關係便會改變，此特性咸認是影響路段容量與運行服務品質之要素。美國 HCM 在發展分析方法之初，即已認為進口匝道區亂流程度很難測度、量化，故不直接探討影響區發生亂流型式與程度，而是處理亂流對高速公路上、下游相鄰匝道區段車流的衝擊。Roess 與 Ulerio^[13] 認為測度匝道區段亂流衝擊程度的最佳指標之一是該區段速率分佈的標準差，藉由速率標準差之等級相關係數 (rank correlation) 分析，發現進口匝道區高度亂流會由緊鄰併入點之高速公路主線最右側車道開始，逐漸隨著愈往下游，愈往內側車道擴張，受亂流影響的車輛會儘量駛離該車道，以避免進口匝道匯流車輛之衝擊 (圖 3)，惟當時因現場無法佈設太遠之視訊設備，故無法得知亂流衝擊消散的距離。

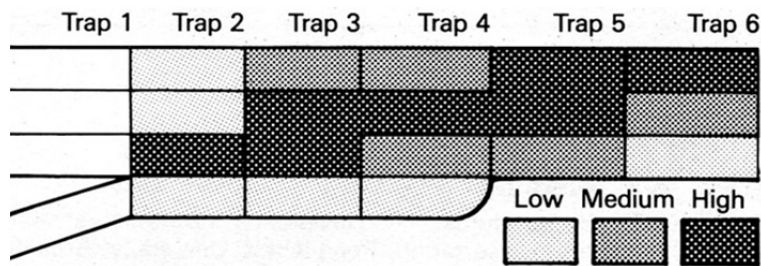


圖 3 進口匝道影響區亂流擴散示意圖 (資料來源：^[8])

匯流區之車輛變換車道行為，會使得匯流影響區發生亂流 (turbulence)，由 Roess 與 Ulerio^[13] 於 1993 年的研究指出匯流影響區以進口匝道尖角槽化區鼻端 (painted nose) 為參考點向下游延伸 1,500 英尺 (約 450 公尺)，影響區示意如圖 4 所示。

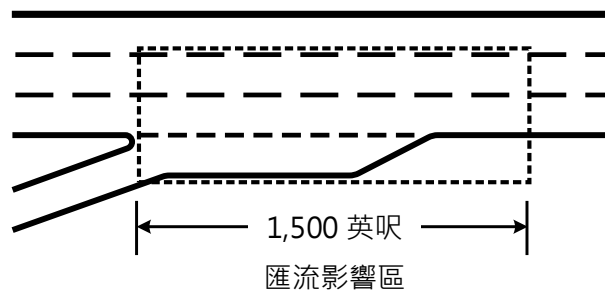


圖 4 匝道影響區示意圖 (資料來源：^[13])

HCM 1994 曾對前版方法提出評析，認為進口匝道車輛併入行為不僅會影響主線最外側車道，也會間接影響外側第二車道，故自此期中修正版本起，都將外側第二車道一併納入模式與分析考量，此外，本版認為駕駛人是否熟悉路況對容量會有影響，故亦將駕駛人特性納入容量折減之調整因素中。

而 Wolhuter^[14] 說明亂流的特徵為較大的速度差和速度擾動，造成影響區內的車流運行條件本質上是不穩定的，即使經過美國公路容量手冊計算程序算出服務水準達到設計標準，也不能排除亂流對於車流的影響性，而進一步導致車流崩潰 (traffic breakdown) 的可能性增加，使車流由非壅塞進入壅塞狀態。

三、調查方式及資料蒐集技術

本節簡要說明無人機現場調查與電腦視覺的影像分析技術，以及車流特性資料產生方式之概念，詳細可參閱^{[4][12][15]}。

3.1 現場調查與影像分析技術

本研究調查作業流程為滿足前述資料需求，必須取得較大調查範圍與連續性之交通資料。為了克服過往調查人力資源成本較高之問題，本研究採用無人機進行空中拍攝，該調查方法可直接拍攝 700 公尺範圍內的影像，且在空間及時間的連續性上都優於過去蒐集資料的方法，並透過電腦視覺方式，大幅降低資料處理所需之人力成本。空拍調查作業流程可分為三部份，分別為行前作業、現場調查、事後影像判讀作業。

在行前作業中，需要事先實地場勘，尋找適合之無人機起飛點，並實際拍攝調查地區的一段短影片，確認無人機之飛行位置，之後評估蒐集之短影片，確認該空拍方案是否能滿足資料分析之需求。

在現場調查則依據場勘試調查所選擇能夠滿足分析需求之拍攝參數，進行正式空拍作業，因正式調查時段須包含匯流區車流由中高密度之穩定狀態轉變為壅塞不穩定狀態，再由壅塞不穩定狀態回復為車流穩定狀態之過程，需要不間斷的觀察車流狀態演變，故空拍調查任務可使用兩台無人機輪流拍攝，第一台無人機升空拍攝，在監控電力即將耗盡前，令第二台無人機升空並就定位後，第一台無人機才降落至地面，進行電池更換後待命。透過此種交替升空方式，確保拍攝之依時交通影像可連續不間斷。空拍示意圖如圖 5 所示。

在事後影像判讀作業中，本研究採用電腦視覺方式，運用深度學習之影像辨識技術，分析無人機的空拍影像，萃取車流軌跡，推算觀測區域內各重要車流特性參數，除了能提升現場調查暨資料整理之作業效率，更能補足資料收集項目的多樣性及準確性。影像辨識技術之處理程序可分為四個步驟，包括輸入影片、區域穩態、目標路段剪裁、分析車流軌跡等步驟，流程如圖 6 所示。車流軌跡影片則是紀錄每一台車輛的編號與當前幀 (frame)，以及車輛於當前幀車身矩形框四點的 x 坐標與 y 坐標。

由於無人機每趟架次飛行的高度與位置略有不同，造成軌跡資料的坐標基準也不盡相同，因此須將軌跡資料之影像坐標轉為共同 (common) 的影像坐標基礎，即可得相同的車道線與採樣斷面。此外，透過連續格位的位移，軌跡資料亦可用於計算速率，然而影像坐標並非真實坐標，亦需要進行坐標轉換，轉換概念為透過攝影測量技術將原始空拍影像校

正為具有地圖坐標的準正射影像，在無人機成像中心、影像坐標像點以及真實坐標物點三者共線條件下進行轉換，轉換後的坐標單位從像素 (pixel) 轉為公尺 (meter)，相關的調查方法與坐標轉換技術，可參考交通部運輸研究所報告^[12]以及黃家耀等人^[4]提出申請中之專利「無人機交通調查系統及其交通調查方法」。

軌跡資料之驗證方式可分為主觀與客觀兩種，主觀方式為將影像辨識分析之軌跡資料套回空拍影片，檢查軌跡資料是否與車輛四角密合；客觀方式為計算路段上中下游斷面是否達流量守恒，透過以上兩種方式可評估軌跡資料之正確性。



圖 5 空中拍攝畫面示意圖 (中和交流道)

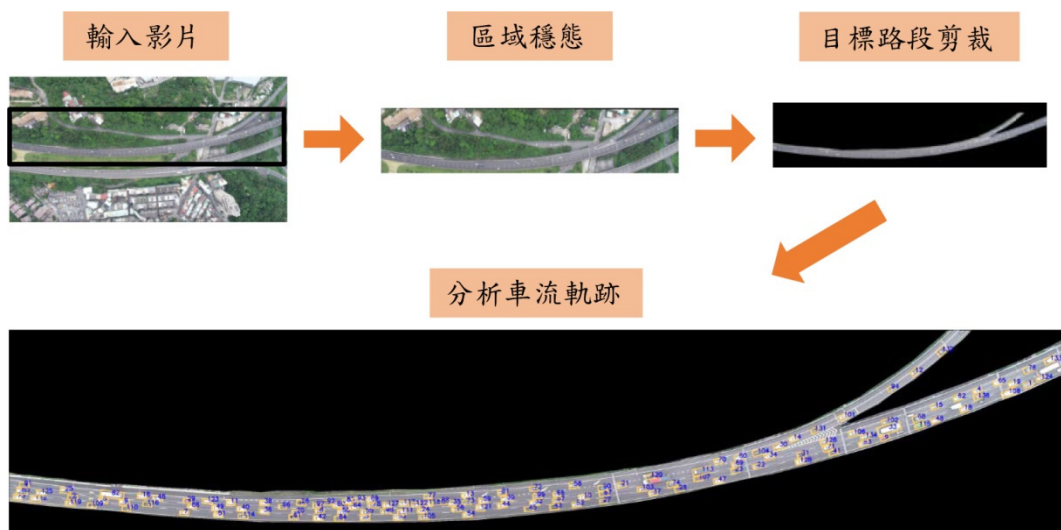


圖 6 影像辨識分析流程圖

3.2 車流軌跡及車流特性資料

軌跡資料為最詳細之交通資料型式，可描述車輛在單位時間上的空間位置，並應用於所有類型的車流分析與應用，經後續處理，可產生各車道之車流軌跡時空圖，某一車道的範例示意圖如圖 7 所示，該圖中橫軸代表時間 (0.1 秒為單位)，縱軸為空間位置 (單位：公尺)，每一條線即代表一台車輛從進入空拍畫面到離開空拍畫面的軌跡。此外，在車流軌跡時空圖中該斜率即代表瞬時速率，其顏色相對應的數值可參照右方的漸變顏色條：低速車流 (0~40 公里/小時) 所呈現之顏色會接近紅色；中速車流 (40~80 公里/小時) 為黃色；高速車流 (80~120 公里/小時) 為綠色。

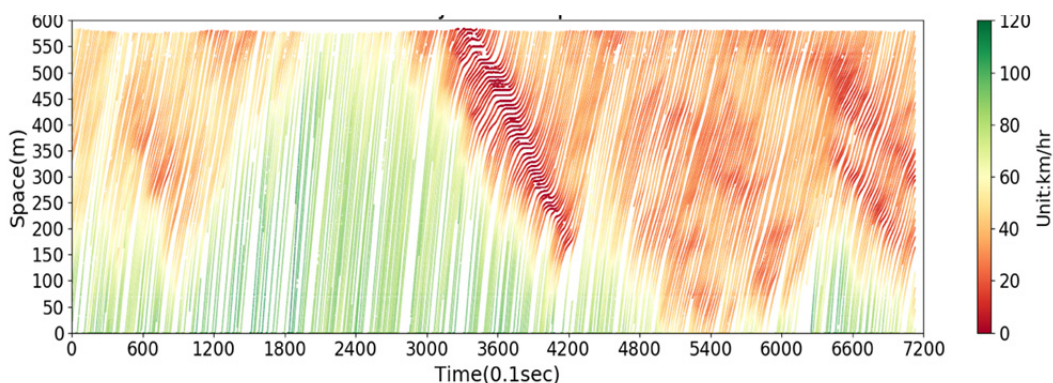


圖 7 車流軌跡時空圖

本研究透過車流軌跡，可進一步以電腦計算以下之車流特性資訊：(1) 流率、(2) 速率、(3) 密度、(4) 車道變換頻次。車流流率 (q)、密度 (k) 與速率 (u) 時空資料之計算，本研究參考 Edie^[16] 所提出的公式，該公式為針對車流軌跡，轉換為流率、密度、速率之資訊，詳細可參考研究報告^[15]。車種判斷方面，本研究透過影像辨識記錄每車之車長，用以區分每一台車輛的車種資訊：車長 8 公尺以內為小型車，8~13 公尺內為大型車，13 公尺以上為聯結車。

軌跡資料亦可供判斷各車輛之車道位置，進而使用於車道變換之計算。本研究將匝道匯流區以每 50 公尺為一區間進行劃分，並以車輛之車頭中心坐標位置為判斷基準，可紀錄各車輛進行車道變換的位置與頻次，車道變換頻次登錄示意圖如圖 8 所示。

四、分析結果

本節將透過現場調查所得之車流特性資料，探討匯流區內之車流現象，並與容量手冊建議之分析方法進行比較。本研究所蒐集之車流軌跡資料，能加以計算並產生時間及空間維度之車流特性，因受篇幅所限無法詳列，詳細可參考研究報告^{[12][15]}。針對匯流區內之

車流運作，本研究只分析 (1) 車流崩潰前最大流率、(2) 車道使用比例、以及 (3) 車道變換頻次與速率之空間分析。

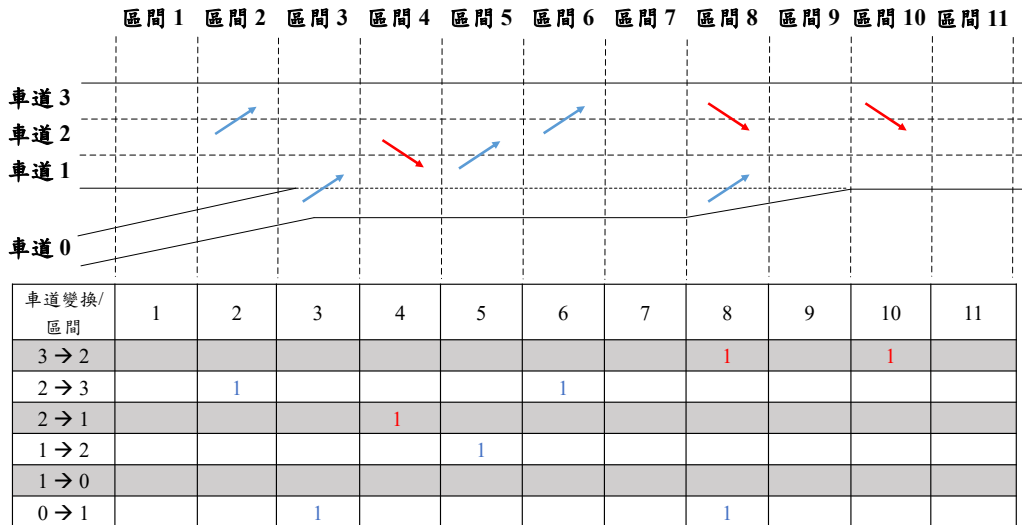


圖 8 車道變換頻次登錄示意圖

本研究選取六個地點進行現場調查，調查地點必須符合以下條件：(1)國道 1 號、國道 3 號主線 3 車道之進口匝道匯流區、(2)有經常發生車流壅塞現象、(3)壅塞現象並非因下游車流回堵所引起、(4)該區域並非無人機限禁航區。本研究所選定調查之地點如表 2 所示，

表 2 各交流道調查地點之幾何型態與調查日期

地點	主線 車道數	主線 速限	匝道 車道數	加速 車道 長度	匝道 上下坡	匝道 儀控率	調查日期 及時間
國道 1 號南下 中壢交流道 A	3 車道	100 公里/小時	1 車道	190 公尺	上坡 匝道	閃黃	2020/03/27(五) 07:00~09:20
國道 1 號北上 頭屋交流道	3 車道	110 公里/小時	1 車道	250 公尺	下坡 匝道	800 輛/小時/車道	2019/05/12(日) 13:30~17:00
國道 3 號北上 新店交流道	3 車道	90 公里/小時	1 車道	250 公尺	上坡 匝道	1,300 輛/小時/車道	2020/03/25(三) 07:00~09:30
國道 1 號北上 新竹交流道 A	3 車道	110 公里/小時	1 車道	330 公尺	上坡 匝道	閃黃	2019/08/03(六) 09:00~12:00
國道 3 號北上 中和交流道	3 車道	100 公里/小時	1 車道	350 公尺	上坡 匝道	閃黃	2019/05/22(三) 06:25~10:00
國道 3 號南下 安坑交流道	3 車道	90 公里/小時	2 車道	600 公尺	上坡 匝道	1,300 輛/小時/車道	2019/05/15(三) 06:00~10:00

*依加速車道長度排列

包含國道 1 號南下中壢交流道 A、國道 1 號北上頭屋交流道、國道 3 號北上新店交流道、國道 1 號北上新竹交流道 A、國道 3 號北上中和交流道、國道 3 號南下安坑交流道。為了解調查地點之容量值，現場調查必須能觀察到車流崩潰之發生，意即車流狀況由穩定車流進入壅塞車流之現象，因此調查前需先分析偵測器資料，經由歷史資料判斷合適之現場調查日期及時間。

另外，在資料整理上，本研究之車流軌跡能產生任意斷面之車流特性資料。為便於討論匝道車流對主線車流之影響，將分析範圍切分為 3 個斷面進行探討，包括主線上游、匯流區內、主線下游，如圖 9 所示。

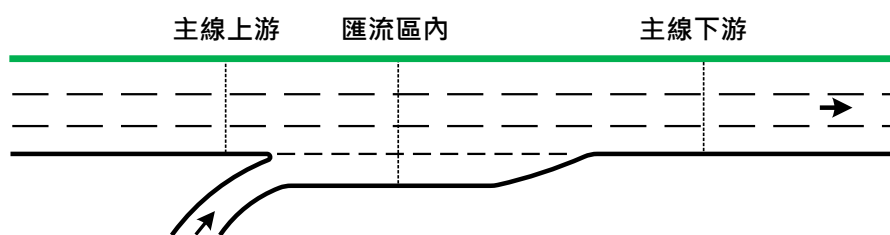


圖 9 進口匝道匯流區斷面示意圖

4.1 車流崩潰前最大流率

高速公路設施之容量無法負荷過大的流率，當流率超出設施容量時，會使原先順暢之車流進入不穩定之壅塞狀態，此時之車流速率會於短時間內急劇下降，且會維持低速率一段時間，待壅塞之車流紓解完畢後才會回到原先順暢之狀態，此現象被稱為車流崩潰 (traffic breakdown)。一般而言，容量值可定義為車流崩潰前之最大流率 (maximum pre-breakdown flow, PBF)，因此本節探討各調查地點發生車流崩潰前之最大流率。

本研究將調查所得之車輛數經小客車當量值 (PCE) 轉換為小客車單位數 (PCUs)，小型車以 1.0、大型車以 1.6、聯結車以 2.0 作為小車當量值。因 1 分鐘資料會有大幅波動，難以觀察趨勢，故本研究以滾動平均 (moving horizon) 方式進行平均小時流率之計算。本部份以兩種滾動平均之時間長度計算各調查地點於車流崩潰前之最大流率：(1) 最大 5 分鐘流率 (2) 最大 15 分鐘流率。最大 5 分鐘流率指車流崩潰發生前連續 5 分鐘之流率最大值，最大 15 分鐘流率指連續 15 分鐘之流率最大值，因此最大 15 分鐘流率應小於或等於最大 5 分鐘流率，而過去文獻中兩者都有被採用作為容量的判斷依據。各地點之車流崩潰前最大流率統整表如表 3 所示。

在六個地點當中流率最高之地點為國道 1 號北上頭屋交流道，其最大 5 分鐘流率可達到 6,500 小車/小時以上，其餘地點之最大 5 分鐘流率約介於 5,700~5,950 小車/小時之間。最大 15 分鐘流率於各地點則均低於最大 5 分鐘流率，除國道 1 號北上頭屋交流道達到 6,200 小車/小時以上外，其餘地點約介於 5,500~5,810 小車/小時之間。國道 1 號北上頭屋交流道

其最大流率較高之原因可能為該進口匝道為下坡路段，直觀上，匝道下坡時由於駕駛室視野較為寬闊且車速較高，可能導致匯流區容量較高。《2011 年臺灣公路容量手冊》所訂定之容量值為 2,300 小車/小時/車道，意即主線 3 車道的容量可達 6,900 小車/小時，然而，本研究六個調查地點之容量值都遠低於建議容量值，顯示容量手冊的建議容量值可能有高估的現象。

表 3 各地點車流崩潰前最大流率

地點	最大 5 分鐘流率 (小車/小時)	最大 15 分鐘流率 (小車/小時)
國道 1 號南下中壢交流道 A	5,731	5,526
國道 1 號北上頭屋交流道	6,581	6,221
國道 3 號北上新店交流道	5,748	5,537
國道 1 號北上新竹交流道 A	5,942	5,668
國道 3 號北上中和交流道	5,933	5,637
國道 3 號南下安坑交流道	5,945	5,810

上述有關六個地點之最大 5 分鐘及 15 分鐘流率，其數值可能受到道路幾何型態、交通管制措施所影響，因此以下進一步探討這些因素對容量值之關係。在道路幾何型態因素中，可能對容量造成影響之因素為主線車道數、車道寬、路肩寬、加速車道長度、匝道上下坡；在交通管制措施因素中，可能對容量造成影響之因素為主線速限、路肩有無開放、匝道有無儀控。由於調查地點主線均為 3 車道，車道寬、路肩寬均無太大差異，且路肩均未開放行駛，故予以排除；而匝道儀控為一動態資訊，尚可考慮儀控率、儀控開始之時間點等因素，經分析後發現對最大流率之關係不顯著，因此暫不納入以下的模式。最終保留主線速限、加速車道長度、匝道是否為下坡三個因子。

本研究提出將最大 5 分鐘流率、最大 15 分鐘流率進行統計迴歸分析，假設上述之三個因子與最大流率為線性關係，其迴歸式如式 1 與式 2 所示。其中 PBF_{5min} 代表最大 5 分鐘流率、PBF_{15min} 代表最大 15 分鐘流率；而匝道下坡為虛擬變數，當匝道坡度為上坡時其值為 0、下坡時其值為 1。

$$PBF_{5min} = \beta_0 + \beta_1 \text{速限} + \beta_2 \text{加速車道長} + \beta_3 \text{匝道下坡} \quad (\text{式 } 1)$$

$$PBF_{15min} = \beta_0 + \beta_1 \text{速限} + \beta_2 \text{加速車道長} + \beta_3 \text{匝道下坡} \quad (\text{式 } 2)$$

迴歸結果如表 4 所示，整體而言，最大 15 分鐘流率模式之統計及檢定結果較最大 5

分鐘流率模式為佳，所有係數在 95%之信心水準下均顯著異於 0，且係數之方向性均為正數。速度之係數為 2.45，較目前容量手冊之建議，自由流率提高 5 公里/小時其容量增加 50 小車/小時 (係數為 10) 為低；加速車道長度每增加 100 公尺，可讓最大流率提高 73.9 小車/小時；相較於匝道上坡，匝道下坡路段之最大流率增加 624.4 小車/小時。

表 4 最大流率之迴歸式係數表 (不含匝道有無儀控之變數)

	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2
PBF _{5min} (t 值)	4,838 (13.99)	7.92 (2.47)	0.661 (3.83)	688.1 (10.18)	0.9890
PBF _{15min} (t 值)	5,044 (94.54)	2.45 (6.59)	0.739 (28.80)	624.4 (59.36)	0.9996

然而，一地點所觀察之崩潰前最大流率有其隨機性，意即每天的最大流量可能會有所不同。以上模式之資料來源係採六個地點各 1 天的現場調查所得，此粗略模式旨在嘗試探討重要變因與最大流率是否存在顯著之因果關係，並未考慮不同調查天之隨機性，這是本模式之最大限制，建議未來可進一步蒐集更多資料進行補充分析。

4.2 車道使用分布

本部份說明實證調查資料之車道使用分布情況，每個地點以圖 9 所界定之 3 個斷面進行探討，因文章篇幅之限制，本研究以國道 3 號北上中和交流道以及國道 3 號北上新店交流道為例進行說明。

本研究所稱之穩定車流為路段在發生壅塞時，導致速率驟降前之時間，即流率漸增至最高點前的車流狀況，發生壅塞後且流量驟降之車流狀況即視為壅塞車流。圖 10 為中和交流道、圖 11 為新店交流道之車道使用率散佈圖。

中和交流道顯示在穩定車流進入壅塞前的情況下，主線上游車道 1 之車流流率佔主線總流率之 14% ~ 18%、車道 2 佔 36% ~ 52%、車道 3 佔 30% ~ 48%，車道 1 之使用比例比車道 2 及車道 3 低很多。主線下游因受匝道匯入車流之影響，車道 1 的車道使用上升至 24% ~ 31%，車道 2 及車道 3 的使用比例稍微下降至 35% ~ 44% 與 23% ~ 37%。然而，在進入壅塞車流的情況下，主線上游之車道 1 的使用上升至 15% ~ 33%、車道 2 下降至 30% ~ 46%、車道 3 為 33% ~ 48%；主線下游呈現相同的趨勢。

新店交流道顯示在穩定車流進入壅塞前的情況下，主線上游車道 1 之車流流率佔主線總流率之 14% ~ 24%、車道 2 佔 36% ~ 42%、車道 3 佔 38% ~ 46%，車道 1 之使用比例比車道 2 及車道 3 低很多。主線下游因受匝道匯入車流之影響，車道 1 的車道使用上升至 20%

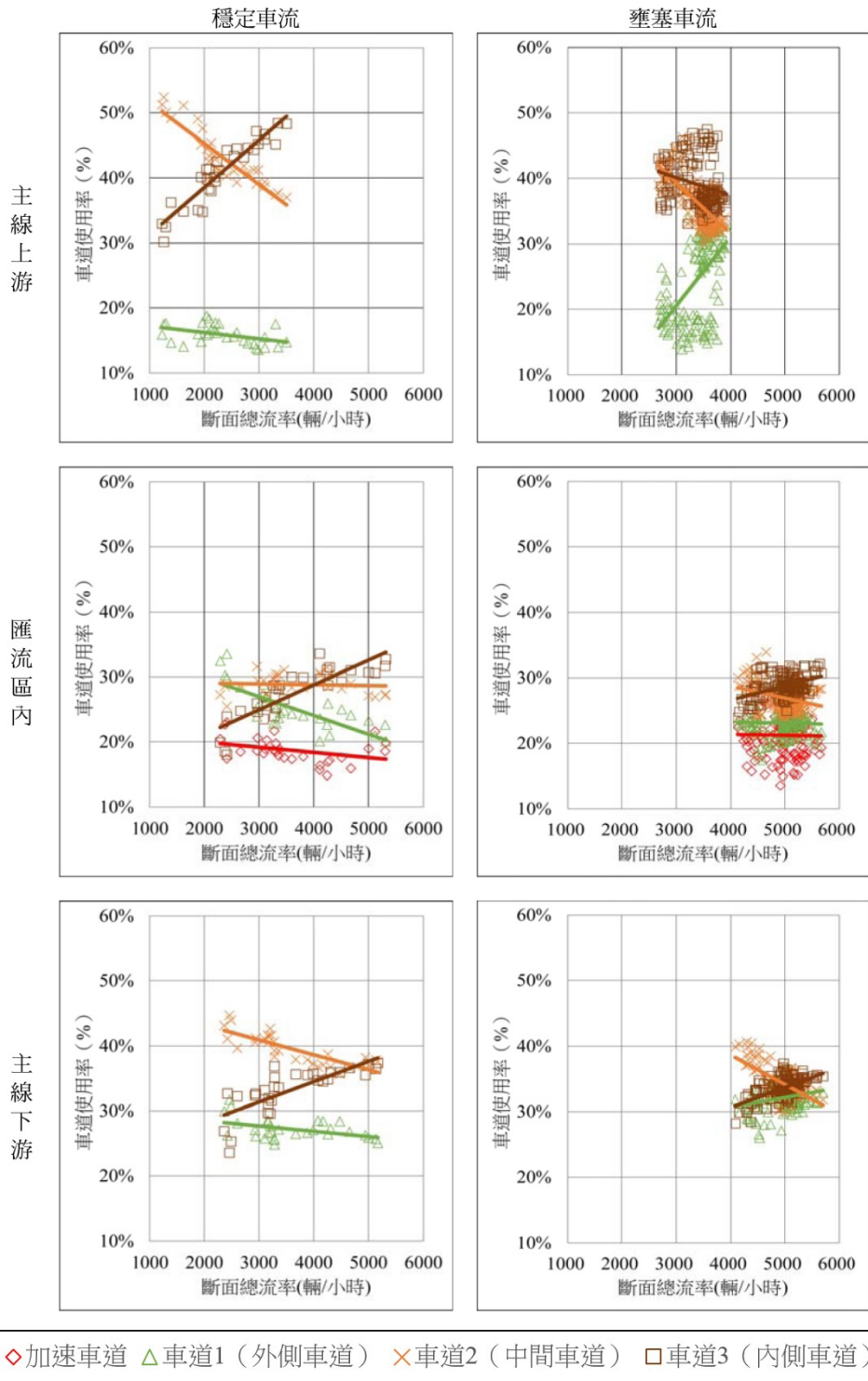


圖 10 國道 3 號北上中和交流道車道使用率

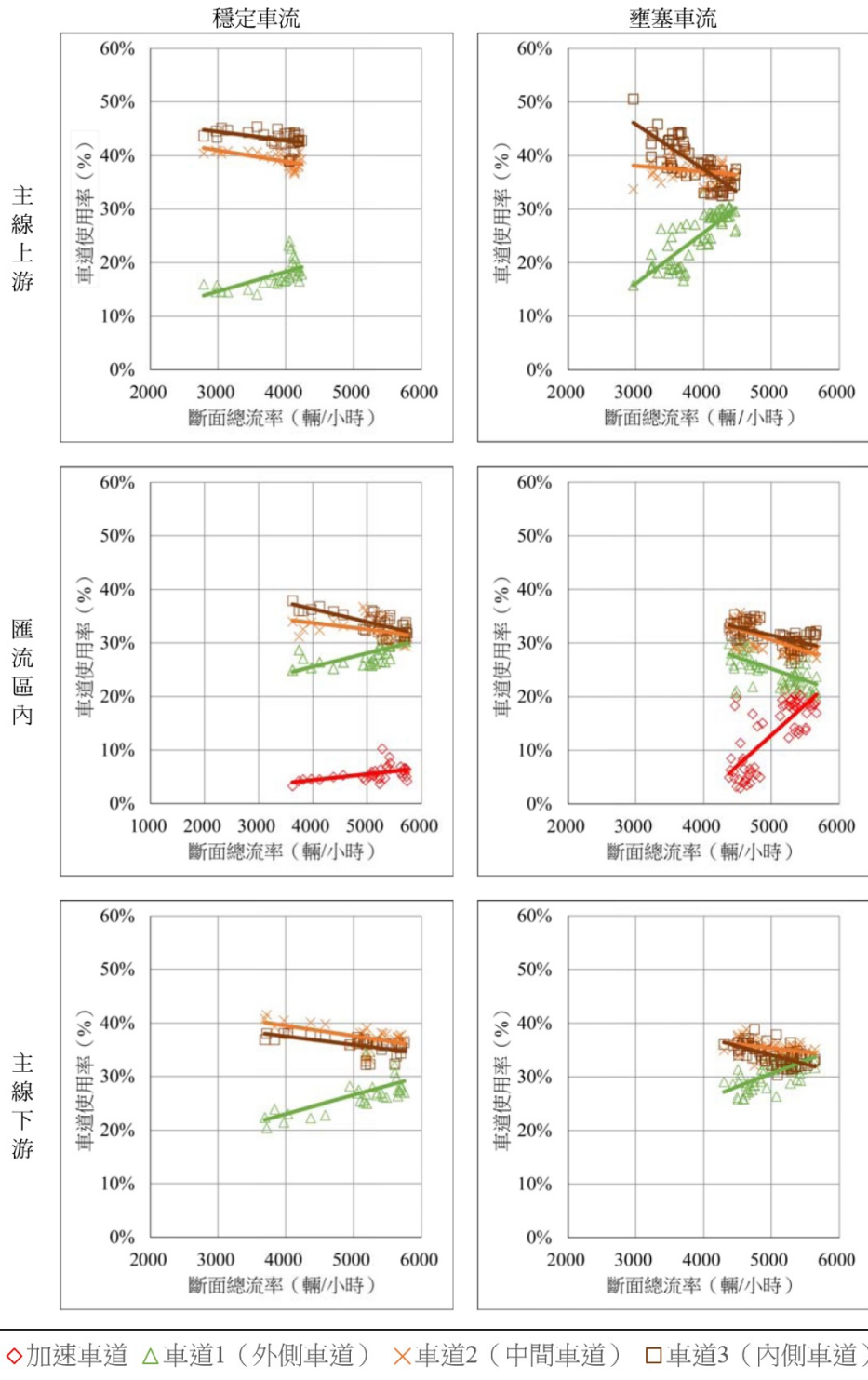


圖 11 國道 3 號北上新店交流道車道使用率

~35%，車道 2 及車道 3 的使用比例稍微下降至 33%~42%與 32%~39%。然而，在進入壅塞車流的情況下，主線上游之車道 1 的使用上升至 15%~33%、車道 2 下降至 33%~40%、車道 3 下降至 32%~51%；主線下游呈現相同的趨勢。

由車道使用率之散佈圖可得出幾個結論：(1) 兩地點在穩定車流與壅塞車流情況下均有明顯差別，在穩定車流下，車道 1 之使用率均為最低，當進入壅塞車流時，各車道之使用率會較為接近；(2) 不論是在中和或是新店交流道，匯流區內與主線下游在穩定車流所觀察到之最大流率均無太大差異，可得出最大流率之觀察點位置不論是在於匯流區內或是主線下游，在數值上不會有太大的差別；(3) 中和交流道在主線上游且為穩定車流之狀況下，當斷面總流率越高，會使內側車道之使用比例上升，但新店交流道卻無太大差別。此現象可能與兩地點之進口匝道匯入流率有關，因中和交流道之進口匝道流率為 1,900 小車/小時，新店交流道則較低，為 1,400 小車/小時，當匝道流率較大時，主線車道之車輛會傾向往內側移動，故車道使用也可能受道匝道流量所影響。

4.3 空間維度之車道變換頻次與速率分析

本研究根據各調查地點所蒐集的車道變換以及速率資訊，繪製出車道變換與速率示意圖，並將匯流區內之空間切割為網格狀，以便將資料視覺化呈現。車道變換頻次資訊以 50 公尺為一個區間記錄車流由一網格變換車道至另一鄰近網格之次數，再轉換為每小時的次數；速率資訊為分析時段行經網格內車流之平均速率，以 10 公尺為一個區間。本研究取由穩定車流轉換至壅塞車流前 20 分鐘的資料為分析時段。

各調查地點之車道變換與速率區間圖如圖 12 所示，共包括 5 個調查地點；六個調查地點之一（國道 1 號南下中壢交流道 A）因調查當天有陣風導致空拍影片晃動較頻繁，參考影片並進行人工比對確認車道變換資料的誤差較大，因此不納入分析。

匯流區影響範圍內車流運作績效最差的位置，可理解為影響範圍內流率高、速率低、亂流程度高之點。亂流程度指主線一區間範圍內車輛進行車道變換的頻繁程度，車道變換頻率越高、亂流程度越高。而傳統的調查方式無法記錄車道變換，因此沒有亂流程度的實證研究文獻可參考。本研究假設以每 50 公尺區間範圍內之車道變換頻率作為亂流程度的判斷依據，訂定三個等級：區間範圍內之車道變換小於 50 次/小時為亂流程度低、51~100 次/小時為亂流程度中、車道變換大於 100 次/小時為亂流程度高。亂流程度等級之門檻值的訂定方式是以有利於視覺化為原則，以亂流程度中、高所佔區塊在分析範圍內之佔比皆可清楚顯示為主要考量。

圖 10、圖 11 之分析已顯示，匯流區內及主線下游之最大流率差異不大，因此難以以流率作為評估依據。在速率資訊中，由圖 12 之速率變化可發現，各地點之速率最低之點大致發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺至下游 100 公尺範圍：

1. 頭屋交流道：速率最低之點，發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺至下游 100 公尺範圍，範圍內沒有明顯區別；

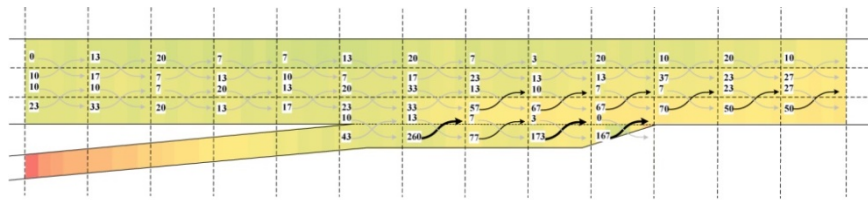
2. 新店交流道：速率最低之點，發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺處、下游 100 公尺處；
3. 新竹交流道：速率最低之點，發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺處；
4. 中和交流道：速率最低之點，發生於外側車道加速車道末端位置上游 50 公尺至下游 50 公尺範圍，範圍內沒有明顯區別；
5. 安坑交流道：速率最低之點，發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺處。

車道變換頻次方面，由圖 12 中可明顯發現，各地點之車道變換集中點不盡相同，亂流區域及遞移樣態也有所區別：

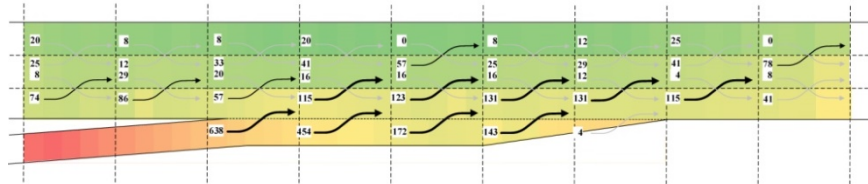
1. 頭屋交流道：車道變換最頻繁之處，發生於 (i) 匯入點開端 100 公尺處、及 (ii) 加速車道末端；
2. 新店交流道：車道變換最頻繁之處，發生於 (i) 匯入點開端 100 公尺處，其後約平均分佈於下游之加速車道長度；
3. 新竹交流道：車道變換最頻繁之處，發生於 (i) 加速車道起點後 50 公尺，其後約平均分佈於下游之加速車道長度；
4. 中和交流道：車道變換最頻繁之處，發生於 (i) 加速車道起點後 50 公尺至下游 200 公尺；
5. 安坑交流道：車道變換最頻繁之處，發生於 (i) 加速車道起點至下游 200 公尺、及 (ii) 加速車道終點至上游 100 公尺內。

整合車道變換資訊以及速率資訊可得知，穩定車流的情況下主線之車流密度較低，匝道車流會於加速車道開端盡量併入主線外側車道 (如圖 12(a)(b)(c)(d)(e)所示)，但當主線較為壅塞時，則只能於加速車道中尋找機會併入 (如圖 12(b)(c)(d)所示)，亦有情況是匝道車流難以併入主線，最終只能集中於加速車道終點強行切入 (如圖 12(a)(e)所示)。因此，推測亂流之程度及集中之位置除了受加速車道長度影響外，應與主線流率及匝道流率併入主線之情形有關。

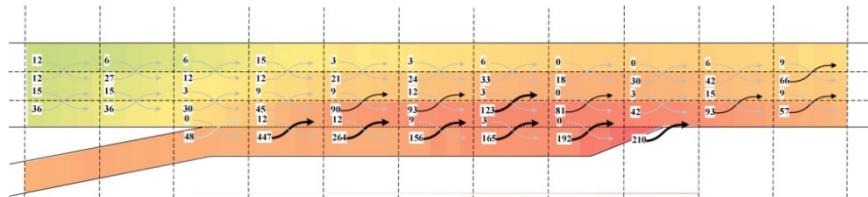
以上由實證資料所得之結果與過去研究作一比較，2011 年臺灣公路容量手冊的分析方法，參照^{[2][3]}之現場調查資料，將檢核點位訂定於加速車道併入點下游三分之二長度之地點，作為匯流區內服務水準最差之檢核位置。而本研究之結果則認為應為服務水準最差之點在加速車道末端位置上游 100 公尺至下游 100 公尺範圍。兩個調查結果並不衝突，若加速車道長度約 300 公尺左右，加速車道三分之二長度之地點剛好是加速車道末端位置上游 100 公尺處。然而，過去之現場調查^{[2][3]}受限於資料收集方式及成本，並未蒐集主線上游及主線下游之數據，本研究的發現進一步補充匯流區的檢核點訂定方式，可供高速公路進口匝道匯流區的容量分析之參考。



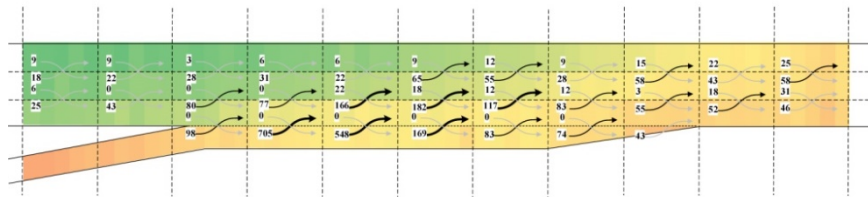
(a)國道 1 號北上頭屋交流道 (加速車道長度：250 公尺)



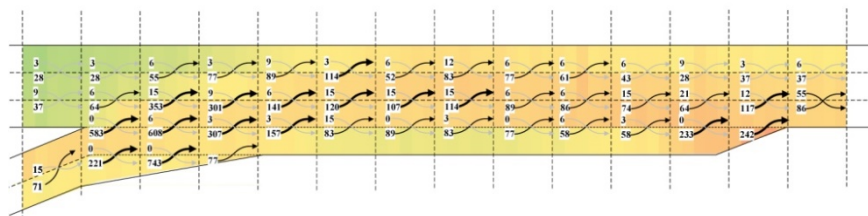
(b)國道 3 號北上新店交流道 (加速車道長度：250 公尺)



(c)國道 1 號北上新竹交流道 A (加速車道長度：330 公尺)



(d)國道 3 號北上中和交流道 (加速車道長度：350 公尺)



(e)國道 3 號南下安坑交流道 (加速車道長度：600 公尺)

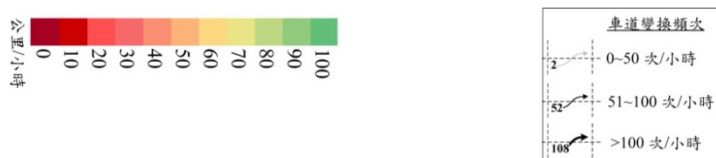


圖 12 車道變換與速率區間圖

五、結論與建議

5.1 結論

本研究透過無人機空拍進行六個匯流區地點之現場調查，並經由電腦視覺方式抓取車輛軌跡，透過軌跡資料擷取流率、速率、車道變換頻次等時空維度之車流資料進行車流特性，並獲致結論如下：

1. 有別於傳統的車流特性資料來源如車輛偵測器或路側架設攝影機，本研究運用無人機及影像辨析技術，取得時空維度之車流特性。在高速公路匯流區的车流運作上，透過分析匯流區內及其上下游之車流演變，以亂流的擴散現象說明加速車道長度對於主線車流運作之影響。
2. 在最大流率部份，國道 1 號北上頭屋交流道因進口匝道匯入主線為匝道下坡，車流崩潰前之最大 5 分鐘流率可達 6,581 小車/小時、最大 15 分鐘流率可達 6,221 小車/小時；其餘匝道上坡地點之最大 5 分鐘流率約介於 5,700 ~ 5,950 小車/小時之間、最大 15 分鐘流率介於 5,500 ~ 5,810 小車/小時之間。顯示各地點之最大流率均明顯低於《2011 年臺灣公路容量手冊》訂定之容量值。
3. 本研究將六個調查地點之最大流率，與主線速限、加速車道長度、匝道是否為下坡變數進行線性迴歸分析，發現主線速限、加速車道長度、匝道是否為下坡三個變數與最大流率均呈現顯著之正相關。因受限於資料不足，無法確認匝道儀控會否對最大流率產生影響。
4. 匝道匯流區在穩定車流與壅塞車流運行狀況下之車道使用比例有明顯差別，在穩定車流狀況下，各調查地點主線最外側車道之使用率都最低，當進入壅塞車流狀況時，各車道之使用率會較接近。
5. 匝道匯流區內與主線下游在穩定車流所觀測到之最大流率均無太大差異，亦即最大流率之觀測點位置無論是在匯流區段內或在主線下游，其數值沒有太大差別；當匝道流率較大時，主線車道之行進車輛會傾向往內側車道移動，因此，車道使用分布也可能受匝道流量所影響。
6. 本研究根據各調查地點蒐集之車道變換與速率變化，產生匝道匯流區段內空間維度之車道變換與速率對照圖。在高速公路主線車流由穩定進入壅塞前階段，最外側車道為之車流最先發生壅塞狀況。各地點之速率最低之點大致發生於外側車道加速車道末端位置上游 100 公尺至下游 100 公尺範圍，可作為高速公路進口匝道匯流區的容量分析方法及檢核點位置訂定的參考。

5.2 建議

運用無人機及影像辨識技術進行交通調查，屬於新興科技，目前相關研究並不多，因

此尚有很多研究議題。一些對於本研究之限制及未來研究課題之建議如下：

1. 本研究蒐集之車流軌跡資料，能用於觀察車流之微觀行為。目前分析之六個地點均顯示最大流率較容量手冊的容量建議值及過去的現場調查值為低，其原因尚不清楚，可能與高速公路之幾何設計（如加速車道長度）或管理措施（如匝道儀控、路肩開放）有關，也有可能受用路人駕駛行為習慣之影響，建議未來可嘗試透過微觀的車流特性資料進一步探討。
2. 本研究之統計分析發現最大流率受主線速限、加速車道長度、匝道坡度所影響，而過去的容量分析方法未考慮兩項因素，建議未來匯流區之分析方法可將加速車道長度納入。
3. 調查方式方面，無人機續航力限制使一趟次的飛行只能收集約 15 分鐘的影片，因此兩台無人機無縫接軌的作業流程必須能流暢執行。而無人機調查的成本尚高，本研究最多只能蒐集連續 4 小時之車流資料，所能建構的 Q-K-V 關係圖並不夠完整。期望無人機的技術發展可逐漸提高續航力，普及化無人機的交通調查方式。
4. 現場調查之車流行為具有隨機性，過去研究發現在不同壅塞時段，如平日早上、平日下午、假日之車流行為也有所不同，觀察到的最大流率值也會有所影響。若未來調查成本降低後，可於同一地點、不同時段進行多次調查，深入比較不同交通特性對於容量造成的影響。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，**2011 年臺灣公路容量手冊**，民國 100 年。
2. 交通部運輸研究所，**高速公路上匝道路段交通特性資料收集**，民國 85 年。
3. 交通部運輸研究所，**都市快速道路與高速公路進口匝道車流特性之研究**，民國 88 年。
4. 黃家耀、林貴璽、溫雲晨、廖晉毅、張舜淵、歐陽恬恬，「無人機交通調查系統及其交通調查方法」，**中華民國專利（提出申請中）**，民國 109 年。
5. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 6th edition. Washington DC, 2016.
6. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 1st edition. Washington DC, 1950.
7. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 2nd edition. Washington DC, 1965.
8. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 3rd edition. Washington DC, 1985.
9. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 4th edition. Washington DC, 2000.
10. Transportation Research Board(TRB), *Highway Capacity Manual*, 5th edition. Washington DC, 2010.

11. Wu, N., and Lemke, K., "The New Procedures for Diverge, Merge, and Small Weaving Segments In the New Version of German Highway Capacity Manual (HBS 2015)" Transportation Research Procedia, International Symposium on Enhancing Highway Performance, 2016, Berlin, Germany.
12. 交通部運輸研究所，高快速公路匝道分匯流區容量及服務水準分析之研究 (1/3)－獨立進出口分匯流區，民國 109 年。
13. Roess, R. P., and J. M. Ulerio., "Capacity of ramp-freeway junctions" *Final Report, NCHRP Project*, 1993, pp.3-37.
14. Wolhuter, K, *Geometric Design of Roads Handbook*, 1st Edition, CRC Press, 2015.
15. 交通部運輸研究所，高快速公路匝道分匯流區容量及服務水準分析之研究 (2/3)－非獨立進出口分匯流區，民國 110 年。
16. Edie, L. C., "Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions", *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1963, pp.139-154.

