



自動駕駛中型巴士 感知系統 之發展

Development of Sensing System for Automated Driving Bus

蔣村杰 Tsun-Chieh Chiang / 工研院資通所車載資通訊與控制系統組 組長

粘為博 Wei-Po Nien / 工研院資通所車載資通訊與控制系統組 工程師

林修宇 Hsiu-Yu Lin / 工研院資通所車載資通訊與控制系統組 副工程師

楊宗賢 Chung-Hsien Yang / 工研院資通所車載資通訊與控制系統組 工程師

近年來自動駕駛成為在國際上的研發主流，建立自主自動駕駛感知系統的相關技術，成為我國延續資通訊產業優勢的機會。本文聚焦於介紹感知系統相關技術，包含物件偵測技術、物件辨識技術、多感測器融合技術、物件追蹤與物件路徑預測，並透過經濟部計畫打造國內首部自主研發之自動駕駛巴士，將這些技術落實及驗證，以建立本土自動駕駛研發的能量，期能將這些研發成果擴散到我國相關資通訊產業，創造新興產業商機。

Abstract

In recent years, autonomous driving has been a mainstream in research and development around the world. The autonomous driving perception system technology is an opportunity for Taiwan to continue its advantages in the communications industry. This article will focus on the introduction of sensing system related technologies, including object detection technology, object recognition technology, multi-sensor fusion technology, object tracking and object path prediction. We built the first self-developed self-driving bus in Taiwan through the Ministry of Economic Affairs' subsidy program. This article is to present the implement and validation of these technologies. It establishes the foundation of local RD arm and spreads technology results to Taiwan's related communications industry. Moreover, it creates business opportunities in emerging industries.

前言

國際上發展自動駕駛技術是目前的主流趨勢，全球有高達 30 家公司投入無人駕駛車研發的行列，除了傳統汽車大廠投入研發之外，矽谷為主的 Apple、Google、Tesla、Uber 也紛紛加入研發自動駕駛車的戰

局。國外無人接駁車系統積極搶攻國內自動駕駛場域市場，已擴展到數個主要的都市。然而目前國內自動駕駛系統的自主研發仍在起步階段。自駕車技術發展主要可歸納為：感知、規劃以及控制三大類：

1. 感知 (Perception)：是自動駕駛系統從周遭環境收集資訊，並抽取相關知識的能力，可分為環境感知及定位。環境感知係指評估且儲存環境資訊的過程，包括障礙物位置、路標偵測 / 標記等；定位係指自駕車能判斷處於環境中相關位置的能力。
2. 規劃 (Planning)：為達到終極目標作決策的過程，例如引領車輛從出發地到目的地路途中避開障礙物，且能規劃出最適路徑。
3. 控制 (Control)：執行已規劃方案的能力，是將規劃轉化為行動的過程，主要目的在於透過提供指令給硬體 (致動器)，驅動原先規劃的行動。

圖 1 是自駕車的軟硬體架構，包含各式感應器及各類軟體、物件偵測技術、物件辨識技術、多感測器融合技術、物件追蹤與物件路徑預測等，最後再將結果送至決策與控制端，使得自動駕駛車能順利運行。

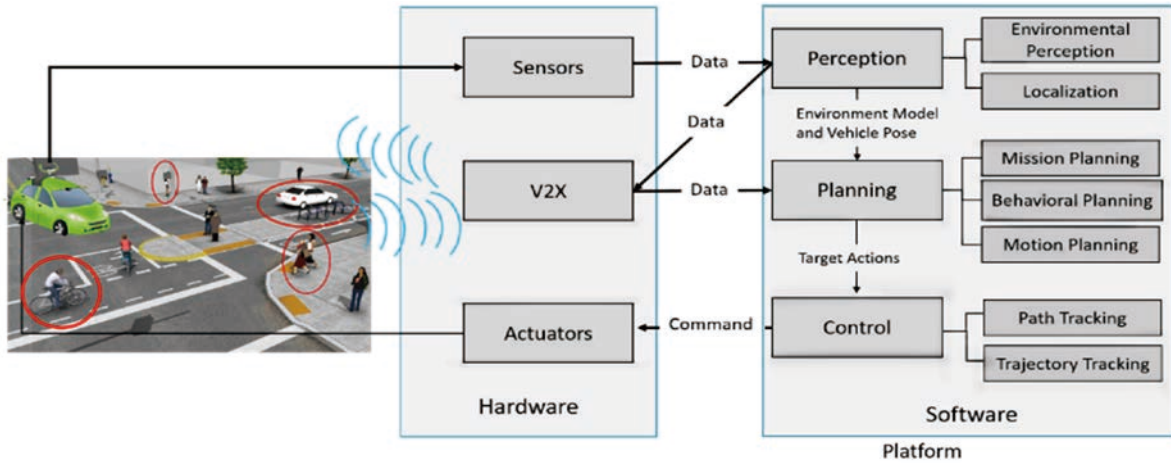


圖 1 自駕車的軟硬體架構

自駕車的感測器

針對應用於自駕車所需在距離偵測的感測器上，常見的有光學光達（light detection and ranging, LiDAR）、電磁波雷達（Radar）、影像相機（Camera）與超音波（Ultrasound），依照感測器的特性，將放置於車上不同位置，最常見的感測器擺放位置與感測距離如圖 2 所示，以下將分別介紹其優缺點，並做為適用於自駕車上的感測器選擇依據。

1. 光達（LiDAR）是一種主動式光學感測器，透過雷射光束撞擊至待測點後反射回感測器之光束飛行時間，可計算獲得與待測試物之相對距離，並依照連續多個距離資料的多寡，換算為 2D 或 3D 之物理座標，雷射光束常見的有紫外光、可見光以及紅外光，其中以波長 600 ~ 1,000 nm 最為普遍應用，目前市面上較常見的有 2D 與 3D 感測器產品，其中 3D 又依雷射光束的數量分為 8、16、32、64 Beam，並同時進行環

周 360 度高頻掃描，為目前自動駕駛常使用的解決方案，其它常見的光達產品，還有 LeddarTech 的固態區域式偵測光達、Quanergy 與 Velodyne 的 360 度多 Beam 掃描光達、Bosch 的部分空間掃描 3D 光達、Lumina 的單 beam 往復式區域空間掃描光達等，然而這些產品目前在感測資訊安全上還需完整的防駭驗證，以避免遭到惡意性的偽造光學攻擊。

2. 雷達（Radar）是一種主動式電磁波感測器，透過電磁波撞擊至等待測試點後反射回感測器之電磁波飛行時間，可計算獲得與待測試物之相對距離，並視連續多個距離資料的多寡可換算為 2D 或 3D 之物理座標，優勢在於穿透性與抗干擾力強，能在全天候使用，缺點則是檢測解析度低，常見的車用 Radar 工作頻率在 24 GHz、77 GHz、79 GHz 三種頻率附近，24 GHz 多用於中距離偵測，可應用於車側盲點偵測（Blind Spot Detection, BSD），77 GHz 以上多用於遠距離偵測，常

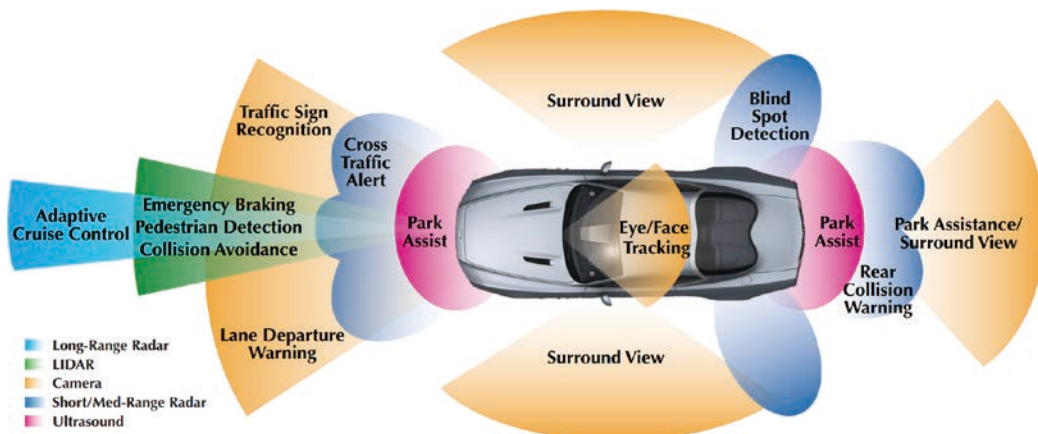


圖 2 各種感測器之應用定位

見的應用有適應性巡航控制 (Adaptive Cruise Control, ACC) 與前方碰撞警示 (Forward Collision Warning, FCW), 而普遍在國際間所制定的產品標準為 77 GHz 以上, 因為此種頻率比較能增加雷達的檢測解析度。

- 攝影機 (Camera) 的原理跟構造與人眼非常相似, 是一種被動式光源感測器, 由透鏡、光圈、濾鏡、影像感測器等元件組成。透鏡控制焦距與視角, 濾鏡控制通過的光源種類, 光圈控制光線進入的程度, 影像感測器則負責最後的感光成像, 依照不同等級之產品, 四種元件會有不同的控制能力, 然而成本上也隨響應時間而有所提升, 其優點在於具有高的 RGB 解析度, 缺點則是受光影與環境影響大, 並且較難取得準確之距離資訊以供車控端使用。
- 超音波 (Ultrasound) 是一種主動式聲波感測器, 透過聲波撞擊至等待測試點後, 反射回感測器之聲波飛行時間, 可計算獲得與等待測試物之相對距離, 然而超音波擴散的物理特性導致取樣點較大、解析度較低, 常應用於停車輔助系統的三角測量。

針對不同感測資訊需求, 如感測器與等待測試物的距離遠近、相對移動關係, 以及等待測試物類別的分類程度、移動速度、未來軌跡、語義分析 (semantic analysis), 加上感測時的環境, 如雨滴、霧霾、塵埃, 需善用不同感測器之優勢來達到自動駕駛的基本需求, 若需執行全盤考量的偵測, 也可進行多種感測資訊的融合 (sensor fusion), 達到各種感測器相輔相成之功效, 四種感測器在各種偵測需求條件下大致上的優劣比較如表 1 所示, 比較條件為假設四種感測器皆裝設在同一台車輛前方位置上, 並且僅使用單類感測器, 以及使用非學習方式演算法進行計算, 感測器以市面上較易取得產品為主。

表 1 各種感測器之優缺點比較

感測器種類	LiDAR	Radar	Camera	Ultrasound
物件分類能力	Fair	Poor	Good	Poor
物件障礙偵測	Fair	Good	Poor	Good
物件輪廓偵測	Good	Poor	Good	Fair
最遠距離估測	Good	Good	Fair	Poor
車道線追蹤	Poor	Poor	Good	Poor
偵測範圍	Good	Fair	Fair	Poor
惡劣天氣下之偵測能力	Fair	Good	Poor	Fair
惡劣光源下之偵測功能	Good	Good	Poor	Good

自駕車的感知系統

本章節將對目前應用於國內首部自駕中巴上之感知系統做介紹。圖 3 為應用於自駕中巴上之感知系統架構圖, 主要分為物件辨識、感測融合及針對物件追蹤與預測等三大部分。在物件感知模組中, 我們使用公認最準確與即時的影像與光達互相搭配, 相輔相成, 互相補足個別感測器的缺點。目前攝影機的缺點是在夜間的亮度與天氣而造成的攝影機沒辦法捕捉到夠遠的景色。而光達雖然目前能夠不受天候及亮度影像, 但是缺點是太遠的地方接收到的資訊太少, 而沒有辦法順利偵測到物體。綜合以上兩點, 我們提出了增進感知系統準確性的感測器融合技術, 透過結合攝影機與光達的優點, 為自駕車提供一副準確、即時與可靠的眼睛, 不僅能夠看得夠遠還能不受天候、亮度的影響。最後, 自駕車之所以能夠擁有自動駕駛的能力, 靠的就是物件追蹤與預測的技術來達成。透過追蹤物件的歷史軌跡, 並準確預測在道路上每一台車未來可能的行駛路徑, 來判斷可行駛區域, 以達到在路面上自動駕駛的目標。

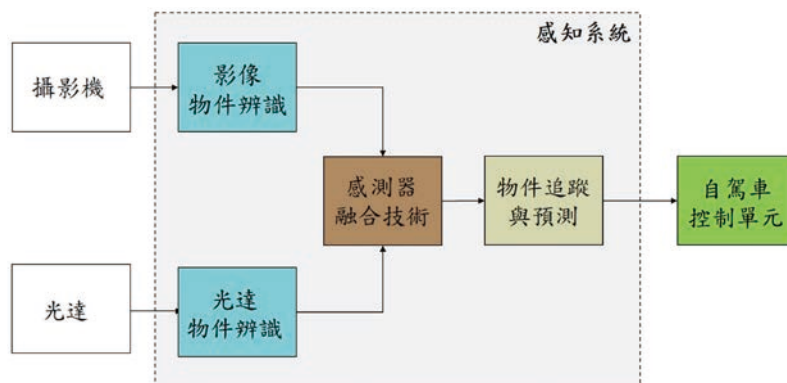


圖 3 系統架構圖

感知系統的研究是針對物件偵測、物件輪廓偵測、最遠距離估測、偵測範圍與抗天候與光影之必要關注項目，選擇採用光達感測器來實現距離偵測與估算，然而在只有前方一顆光達的情況下，針對自駕車之路徑演算法設計會有兩側死角的產生，例如當車輛兩側有其它車輛竄出，且瞬間切入到自駕車的前方，將導致自駕車本身演算法瞬間採取即時全力煞車，進而讓車輛產生嚴重頓挫感後才恢復速度，且會有碰撞風險存在，因此本研究會安裝多顆光達感測器，進行多顆光達感測器的資料融合，實現環周無死角之偵測，當有車輛在自駕車兩側時，提前採取放慢車速之策略，並且當車輛切入自駕車前方時，可以配合 TTC (Time-to-Collision) 來取消 AEB (Autonomous Emergency Braking) 作動，多顆光達感測器之全景圖如圖 4 所示。

接下來將針對上述提到三大部分來做更詳細的說明。

物件辨識 — 感知系統的基礎

物件辨識可利用兩種感測器來達成，光學雷達及高速攝影機，其運作分述如下：

● 光學雷達

全景光達點雲資料會依據所使用的光達感測器數量與品牌型號而有所不同，本研究使用多顆光達感測器所產生出來的點雲約為 100,000 點 / Frame，而應用在自駕車上通常需注意兩大指標，準確度與更新率 FPS。在初步取得全景光達點雲後，首先會進行關鍵物之特徵點雲擷取，如行人、機車、汽車等具移動能力之關鍵物，並將非關鍵物體之點雲濾除，如地面、人行道，而在此過程之演算法設計上，需配合所使用之硬體平台，一般使用 CPU 或 GPU 進行運算，然而因本研究之點雲量極大，並且在應用上強調更新率，因此採用 GPU 方式進行大量平行化運算，兩者之差異如圖 5 所示。

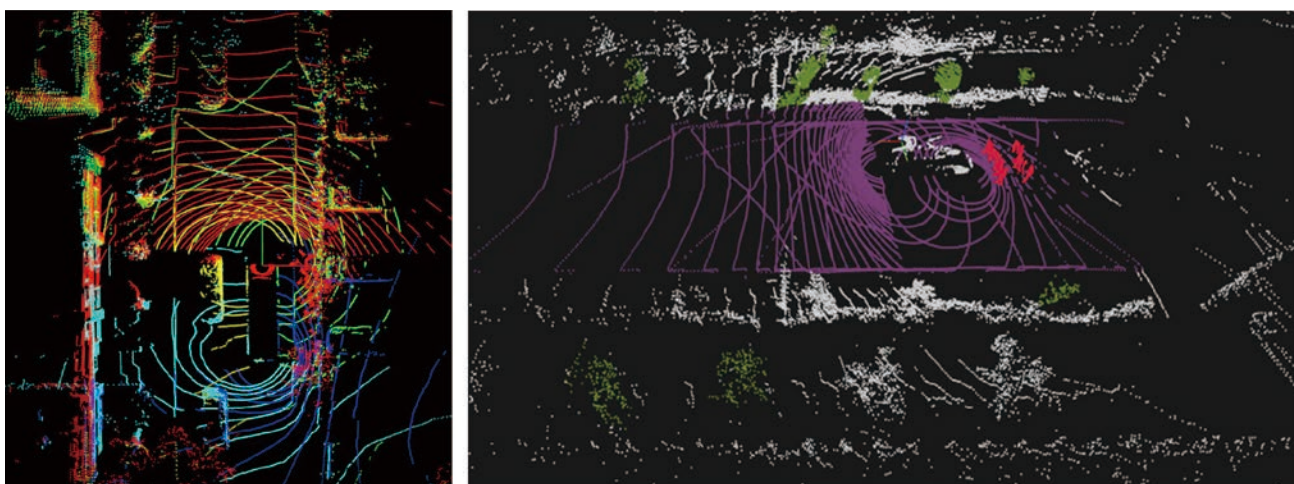


圖 4 環周光達感測器，俯視 (左) 與側視 (右)

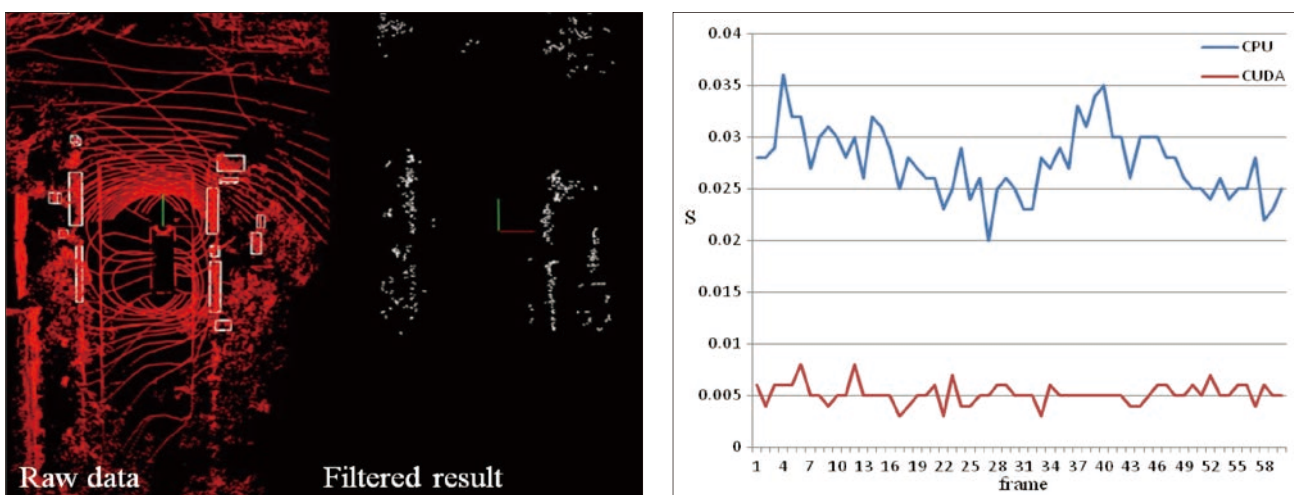


圖 5 資料處理前與處理後比較 (左) 與 CPU 與 GPU 之 FPS 比較 (右)

非關鍵物體之點雲濾除，一般來說會直接針對所有點雲進行處理，然而雖使用 GPU 可以達到約 10 倍的加速，但還是可以經由簡易的空間切割方式，達到更快速的點雲處理，本研究將整體空間短暫切割為上下兩個部分，辨識出非關鍵物件後，再將關鍵物件合併回去，可進一步提升處理速度，如圖 6 所示。

取得關鍵物之特徵點雲後，接著再利用 GPU 進行平行化之分群處理，並加入自行設計之物體特徵演算法，依據點雲分散密度進行物件偵測，接著再將多個時間點的物件偵測蒐集起來追蹤物件資訊，最後維持在 10 FPS 以上辨識出前方障礙物件，並輸出給控制端使用，如圖 7 所示。

● 高速攝影機

近年來在機器學習、深度學習領域演算法日新月異，拜急遽發展之賜，在原本準確率無法滿足人類需求的物件辨識領域上，有了突破性的進展，也使得人類離自動駕駛的目標又向前邁進了一大步。有別於一般的物件辨識，在白駕車的物件辨識中遭逢了許多困難與挑戰。其中為了自駕車的安全性，各個角度都須備有攝影機以涵蓋各個視角，以確保每個角落均受監控。此外，除了能夠需在不同的天候、早晚情境下應用，也需因地制宜，對不同的地區所出現各種不同的車子、道路標誌做不同類型的物件辨識。為了訓練物件辨識模型能符合自駕車應用，我們需針對相機影像、資料集蒐集與深度模型訓練等三大要素進一步的分析與探討。

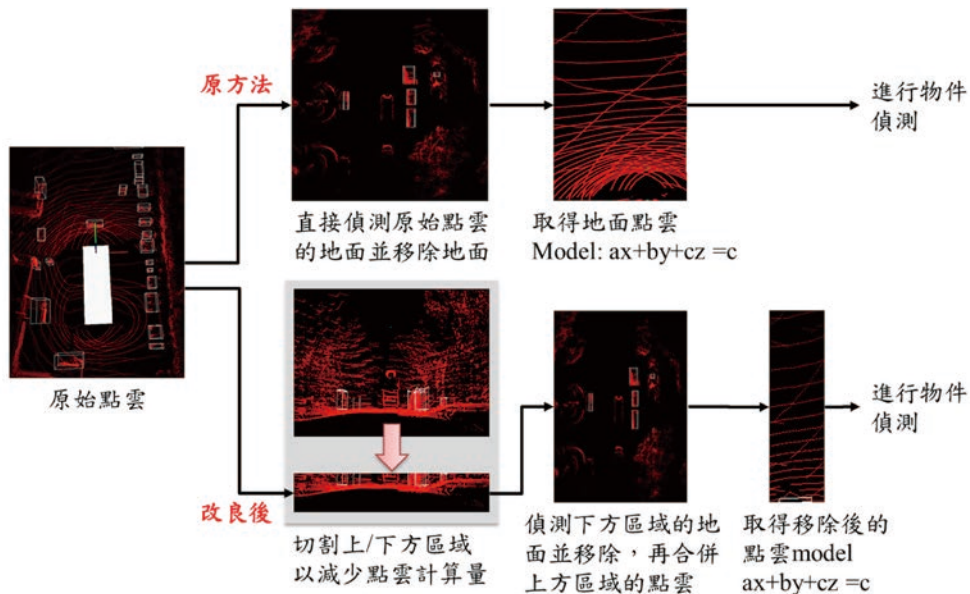


圖 6 資料處理前與處理後比較 (左) 與 CPU 與 GPU 之 FPS 比較 (右)

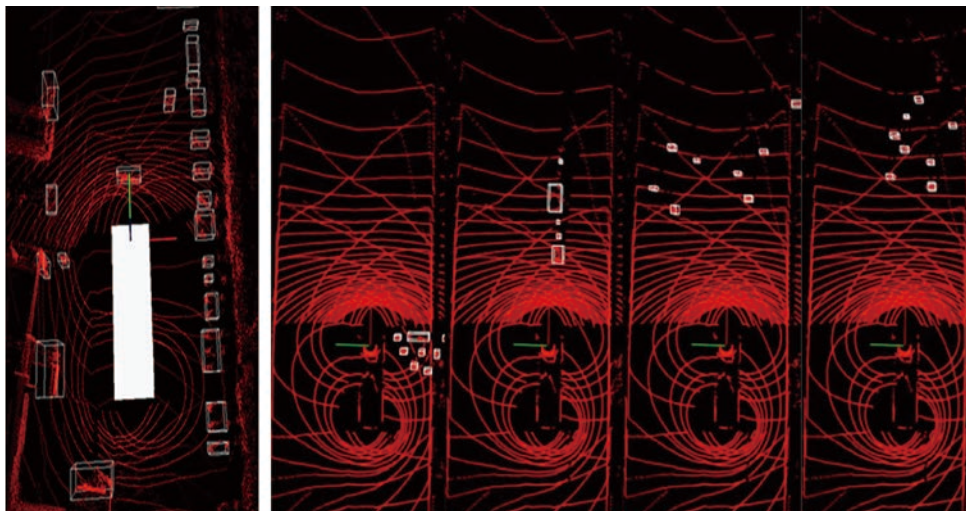


圖 7 光達車輛 (左) 與行人 (右) 偵測

相機如同自駕車的眼睛，然而，如何配置攝影機以達到環周無偵測死角？確實為一大課題，且過多的攝影機又會造成運算資源上的耗損。經過不斷的嘗試與驗證，我們使用共九顆攝影機，前方使用 4 顆，為了有足夠的可視距離讓自駕車於高速行駛中提早辨識遠方物件，進而防範任何有可能會發生的情境。而側方及後方的攝影機，為了防止自駕大型車在轉彎時，容易造成的內輪差引發的危險，因此在側方及後方攝影機，彼此都有些微的 overlap，以確保任何角度均無遺漏，避免發生危險之可能，詳細配置與影像如圖 8 與圖 9 所示。

在機器學習領域，好的模型固然重要，但更重要的是資料集的品質與數量。想要建立符合應用的神經網路模型，如同教導一個機器人要學習人類的特定行為為模式，需訂定出目標，篩選出符合應用的模型架構，基於好的學習策略與大量的資料集，一步一步的學習到最符合目標的結果。比方說自駕車須於夜晚、雨天甚至濃霧中運行，因此訓練資料集中就必須有這樣的資料，不然很有可能因為沒有學習過的情境進而造成危險。而在數量的部分，因為



圖 8 自駕車環周影像

深度學習近年的異軍突起，模型的深度逐漸增加，為了達到更好的準確率，需要的資料集數量也相對的需要增加。可以說是資料集的好壞決定整個系統的成敗。

在深度學習模型的部分，我們經過許多嘗試與改進，使用了一些方法來使我們模型可以準確的偵測與辨識物體。我們用卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 作為模型基底，並加入 inception model 方法^[1]來避免模型太深時，容易造成梯度爆炸 (Gradient exploding) 與梯度消失 (Gradient vanishing) 的問題，並根據現有資料量將模型配置成 53 層的深度結構。另外，原本僅能分成單一類的 softmax，換成能夠同一物件分成數類別的 binary cross-entropy。舉例來說，休旅車在原先的模型內，有時會辨識成車子或是貨車，故採上述作法以提升準確率。我們也加入 Feature Pyramid Networks 的概念^[2]，不僅在最後一層才進行偵測與辨識，而且在模型淺層時就先辨識與偵測，故無論物體的形狀大小，均可被偵測到。最後，我們在模型中增加一乘一的卷積層，用來分享各個 feature maps 間的資訊，讓透過 filter 萃取後的資訊，可在同一層內互相結合形成更複雜的 feature maps。

即使運用深度學習模型演算法的優點，若沒有適當且足夠的資料集，那麼學深度習的效果依然有限。自駕車需學習辨識出道路上所有可能出現的物件，包括交通號誌、四輪車、二輪車、行人等，所蒐集的資料集物件類別數過多，且包含不同尺寸的物件，同時模型還要能對抗各種天氣型態，如雨天、過曝等情形。然而我們通常很難在短時間蒐集大量資料，並透過人工方式標註 Ground truth 供模型使用。所以在訓練過程中，我們預先使用傳統影像處理濾除雜訊，透過 Data augmentation、Color shift、Random crop 等技術，達到擴充資料集與抗光影變化。接著使用 open data 蒐集較廣泛類型的資料集，讓訓練模型能辨識大部分的物件，再依照當地不同場景的資料集，進一步分析與訓練，使得我們的模型具有高精準度的效果。



圖 9 自駕車前方相機物件偵測

感測器融合技術 — 感知系統的高準確性

我們利用物件偵測與辨識的 2 種感測器，以相機能夠拍攝到遠的物體，且可準確辨識類別的優點，及光達不受天氣、亮度影響的優點，相輔相成，讓自駕車可以全天候的運行，避免發生危險。為了結合兩種維度不同的感測器資訊，我們提出異質感測器融合技術 (Sensor Fusion)，目的是將兩個不同維度的資訊投射在同一維度上，讓物件追蹤與偵測模組能夠準確預測。

異質感測器融合技術 (Sensor Fusion) 整合所有高精度的感測數據，以更加準確的感知自駕車環周的環境，相對於單一感測器的限制，感測器融合技術可以做出更好、更安全的車輛控制的指令。本方法透過將圖片上擁有的二維影像資訊，包含物件二維位置、物件類別都投影到三維上，與光達同一個維度之下。此方法不僅可以讓原本三維上透過光達偵測的物件都有透過二維影像來的類別，還能補足光達或相機沒偵測到的物體。

在整個自駕車系統架構內，感測端如同人類的五官，網羅附近所有的可見訊息，將這些遠近的訊息融合後，再交由運算決策系統 — 大腦，最後由如同人類四肢的車控系統執行大腦命令，當自駕車的大腦、五官、四肢可以協調合作，即可落實安全駕駛。

物件追蹤與預測 — 感知系統的預測

在經過物件辨識與異質感知器的融合之後，與人類行為為相似，透過各個感官接收到環境資訊，經由大腦融合這些訊號進而做出決策，而物件追蹤與預測就是在自駕車中扮演決策的重要角色。如果行駛在道路上，能夠可以精準的感知及預測環周的物件，未來有可能會經過的地方或是會做出怎樣的駕駛行為，必定可以減少事故的發生。為發展軌跡預測演算法讓系統可即時識別出環周物件，經由環周物件之歷史軌跡資訊進行分析，提供該物件之預測軌跡資訊，以下將針對軌跡路徑預測演算法進行說明。

• 物件追蹤

為了達到精準物件路徑預測的目的，需要一個精準的物件追蹤來判斷連續時間的物體是否為同一個物體，並持續記錄物體軌跡。透過物件偵測及異質感測器融合後，將所有環周物件資訊投影到三維座標上。因此，透過上述兩模組之結果，每樣物體共有以下參數：：X 軸物件中心、Y 軸物件中心、物件寬度、物件高度、物件類別、物件為此類別之信心程度、物件立體座標（共八

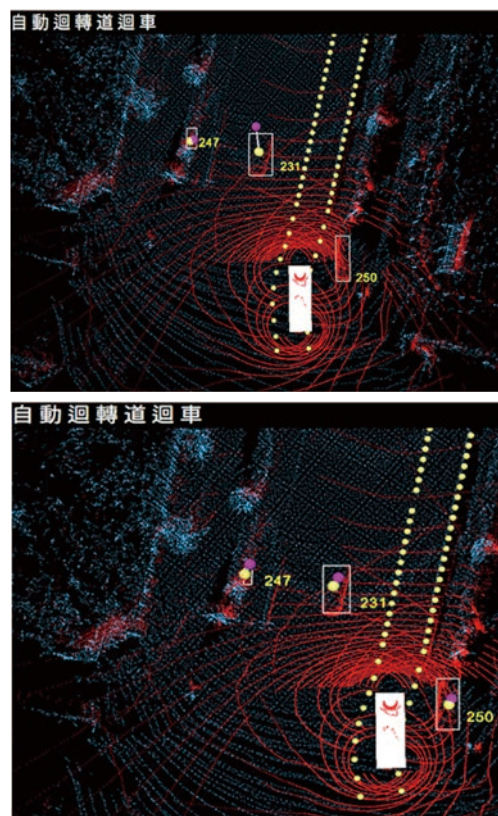


圖 10 環周物件追蹤

點)。物件追蹤會把各個物體加上一個參數，並命名為偵測編號 (Identity)。如果物體在時間 $t-1$ 時與時間 t 時為同一物體，則把偵測編號設為同樣的編號，以代表兩個物體為相同物體。圖 10 為環周物件追蹤的結果。

在物件追蹤演算法的部分，首先我們取得物體在三維上的立體座標，並根據物體所在象限判斷目前該根據哪部分的特徵進行追蹤。並將 t 與 $t-1$ 中所有物體彼此的距離做成一個表格。在產生這樣的表格後，假設產生的表格為一個 x 乘 y 的表格，我們先搜尋表格內的最小值，稱做 D_{\min} ，若 D_{\min} 的位置在 (X_{\min}, Y_{\min}) ，將物體在 $t-1$ 時的 identity 放到物體在 t 時的 identity 中，即視兩個物體分別在 $t-1$ 與 t 時為同個物體，與此同時，將 $(X_{\min}, 0)$ 到 (X_{\min}, y) 與 $(0, Y_{\min})$ 到 (x, Y_{\min}) 中所有距離設為無限大，換句話說， $t-1$ 中已經給出去的編號接下來不能再做使用，且 t 中已有編號者不能再被判斷成其他編號。反覆執行幾次後即完成物件追蹤。

在自駕車決策中，物件追蹤是不可或缺的一環，唯有透過追蹤知道物體過去的軌跡，才能預測物體可能行進的方向及速度，讓自駕車能夠及早準備，避免危險的發生。

● 軌跡路徑預測

環周物件軌跡預測演算法系由前端影像和光達等感知設備，針對每個環周物件做物件路徑追蹤，根據每個環周物件所得到的歷史軌跡，透過曲線擬合運算方式，求出方程式的參數。根據上述演算機制，導入自駕車 ROS 系統進行實車測試。

進行功能實測過程中，發現環周物件路徑預測演算法在判斷上，可能因各感測器座標系定義不同，而導致預測判斷失準之現象，例如：靜態物件被辨識成移動中物件，或是動態物件受自駕車自身移動狀況影響（包括位置、速度與轉向角）。故以設計一座標轉換演算機制為目標，將相對座標轉換至絕對座標（大地座標），以提升判斷精準度。

未來發展

自動駕駛電動巴士的發展已掀起另一波自駕浪潮，全球不少城市已經利用自動接駁小巴進行接駁服務。因國內地狹人稠，對於最後一哩的自動接駁的需求極高，我國應基於資通訊產業既有優勢，結合自主軟體與整合技術，加速切入自動駕駛在感知、控制與決策次系統所需技術，才能在此波熱潮中迎頭趕上，並串聯國內車輛產業打造自有無人接駁系統用於特定

場域，提供民眾有感服務，並帶動車電、零組件產業，與營運業者，聯結國際大廠，以臺灣汽車零組件廠已建立之國際汽車產業鏈管道，以價格優勢和品質保證，擴大臺灣在產業鏈之地位及市場佔有率。

放眼國際，自動駕駛取代傳統駕駛模式，將為必然發展之趨勢，相關自動駕駛法規必須與時俱進，以穩健不躁進方式進行階段性調整修訂，以維持其時效與前瞻性。行政院會於 2018 年 5 月通過「無人載具科技創新實驗條例」草案，立法院同年 11 月 30 日正式完成立法，交通部亦同步修正道路交通安全規則第 20 條，制定「自動駕駛車輛申請道路測試作業要點」，郵電司亦已公告創新實驗頻譜之實驗場域，將 5,850 ~ 5,925 MHz 在特定實驗區域提供車聯網技術研發測試，後續如何讓自動駕駛從研發、測試到應用各個環節規範在法律框架內，積極穩妥地推動自動駕駛車輛的健全發展，將是我國立法機構與行政部門跨域合作的一大課題。

參考文獻

1. Kaiming He, et al., (2016) "Deep residual learning for image recognition." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
2. Tsung-Yi Lin, et al. (2017), "Feature Pyramid Networks for Object Detection." CVPR. Vol. 1. No. 2.

108.3.21 繁華似華 — 土木與人研討會



當天請到黃鐸院士、陳嘉正主席、張盈智總經理、張志德主席精彩演講

108.4.13 如何演繹人生 — 魅力口才課程



有近八十位年輕人參加，現場氣氛熱絡

- 一個凝聚產官學土木專業知識的團體
- 一個土木人務必加入的專業學術團體
- 一個國際土木組織最認同的代表團體
- 一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



<http://www.ciche.org.tw>
下載入會申請表

歡迎加入學會



中國土木工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

e-mail: service@ciche.org.tw