

壹、前言

一、研究動機

隨著電動車、自動駕駛車的話題持續發燒，同時也帶動了相關產業技術的積極投入。我國政府目前在各地推動的「全台無人載具科技創新實驗計畫」，已經有十多個計畫正積極展開（如表一），其中「新竹市市區自駕物流服務實驗計畫」，可看到新竹貨運的貨車繞行大潤發的狀況（如圖一）。而在竹北正在進行的「新竹縣高鐵自駕接駁運行實驗計畫」，將從今年5月至9月，會有台灣首次在道路進行測試的無人自駕巴士展開第二階段免費載客測試。另外作者也注意到沿路已經有請用路人注意標示牌（如圖二）。由於是在作者生活圈所發生的事，也就開始好奇為何在無人駕駛的情況下能夠精準的感知週遭環境，不致有交通事故的發生，進而使人們更安全舒適的駕駛體驗，於是便開始進行相自動駕駛使用激光雷達相關的研究。

表一：全台無人載具科技創新實驗計畫

申請人名稱	創新實驗內容
勤崙國際科技股份有限公司	TSMC廠區擴大自駕接駁計畫
財團法人車輛研究測試中心	彰濱鹿港自駕車隊公共運輸實驗運行計畫
財團法人工業技術研究院	桃園機場員工自駕接駁與5G應用實驗計畫
大鵬灣觀光遊艇股份有限公司	高雄愛河至駁二臨海自駕船觀光服務實驗計畫
財團法人工業技術研究院	新竹市市區自駕物流服務實驗計畫
財團法人工業技術研究院	新竹縣高鐵自駕接駁運行實驗計畫
鼎漢國際工程顧問股份有限公司	臺中水湳場域自駕巴士虛實整合載客運行測試計畫
國立成功大學	成功大學自駕車輛試驗計畫
台灣智慧駕駛股份有限公司	桃園市青埔地區自駕巴士創新實驗計畫
勤崙國際科技股份有限公司	新北市自動駕駛電動巴士系統測試計畫
理立系統股份有限公司	台南市自動駕駛快捷公車上路營運實驗計畫
台灣智慧駕駛股份有限公司	台北市信義路公車專用道自駕巴士創新實驗計畫
高雄市輪船股份有限公司	太陽能船於高雄愛河河道自主航行實驗計畫
勤崙國際科技股份有限公司	自駕巴士彰濱鹿港觀光接駁運行計畫

（資料來源：作者綜合整理自經濟部網頁：<https://reurl.cc/lvRnlq>）

圖一：新竹市區自駕貨車測試路段，可看到新竹貨運的貨車繞行大潤發的狀況



（資料來源：Bob Wang (2022)。自駕五噸貨車台灣新竹市區夜間自駕功能驗證〔影片〕。YouTube。<https://reurl.cc/8q3YRX>）

圖二：竹北市區自駕車測試路段，提醒用路人注意的告示牌



（資料來源：作者拍攝自竹北市光明六路東二段和嘉祥五路口）

二、研究目的

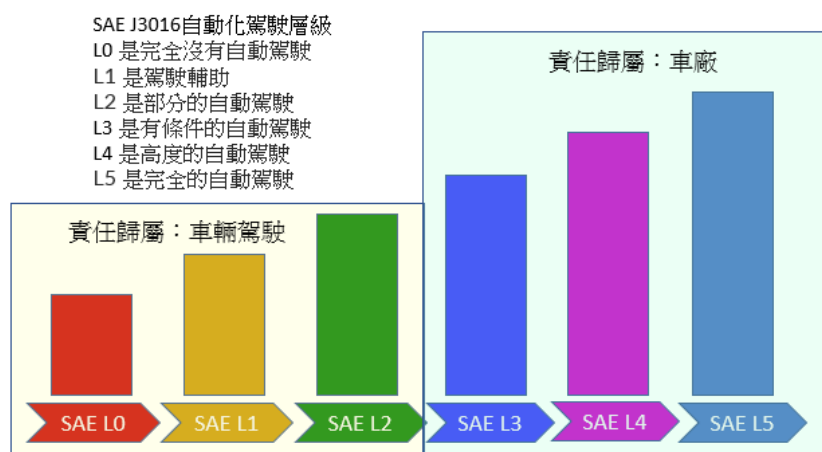
- (一) 瞭解激光雷達技術的歷史與原理。
- (二) 探討激光雷達技術的研究現況與方向。
- (三) 探索在自動駕駛中如何應用激光雷達技術達到安全舒適的乘坐體驗。

貳、文獻探討

一、自動駕駛系統定義的標準

美國汽車工程師協會SAE J3016是一個為自動駕駛系統定義的標準，其中定義了從L0到L5的五個自動化駕駛層級。如圖三(F. A. Butt, et al, 2022)。然而我們都知道駕駛車輛的行為相當複雜，目前市售的車輛仍然是以輔助駕駛為主。但要達到無人自動駕駛，需要克服某些重要問題，像是無人自動駕駛首重的安全，要讓駕駛機器人完整知道週遭環境的狀況，才不會發生誤判而有損失。雖然現階段先進輔助駕駛系統已經有週遭環境感知的功能，然而到了L3的無人自動駕駛，若有事故的發生，責任將會歸屬於車廠，而不是L2的歸屬於駕駛。因此車廠對也必須特別注意駕駛機器人了解周圍情況，及車主使用L3時的安全。

圖三：SAE J3016自動化駕駛層級

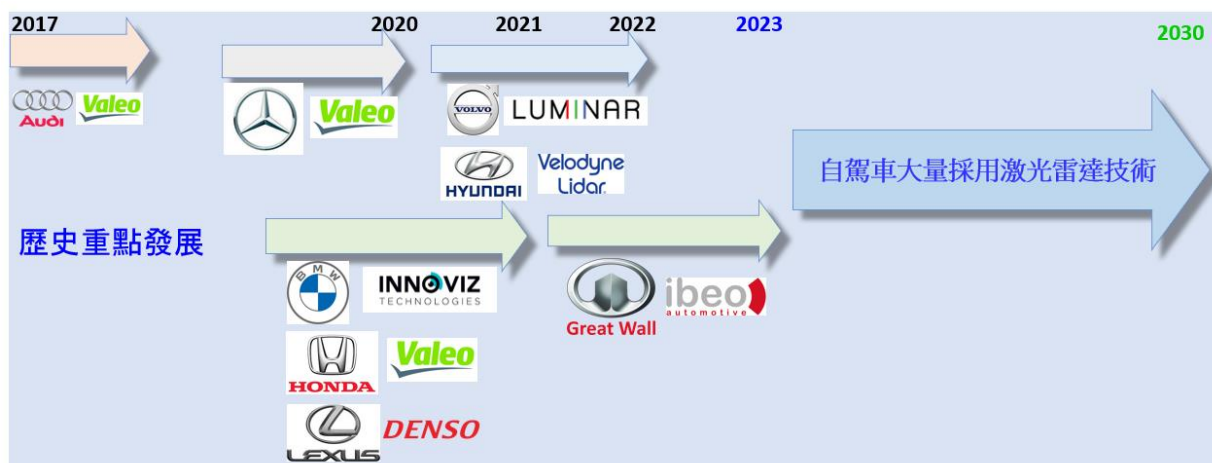


(資料來源：作者綜合整理自：F. A. Butt et al. (2022) "On the Integration of Enabling Wireless Technologies and Sensor Fusion for Next-Generation Connected and Autonomous Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14643-14668)

二、車廠採用激光雷達的發展

由於激光雷達具有偵測距離長、解析度及辨識度高等優點，因此成為實現Level 3以上自動駕駛優先考慮的感測元件。而自2017年開始規劃推出搭載光達的L3等級自駕車款的歐、日、韓、中國廠以及搭配的激光雷達品牌如圖四，預期之後會有更多車廠採用。

圖四：車廠採用激光雷達技術路線圖

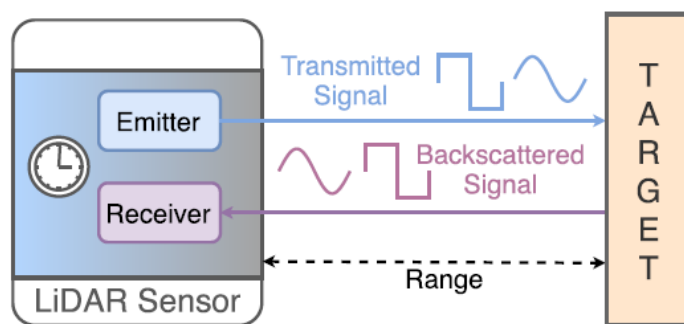


(資料來源：作者綜合整理自：DIGITIMES Research, March 2021, <https://reurl.cc/ml6Wpj>)

三、激光雷達原理分析

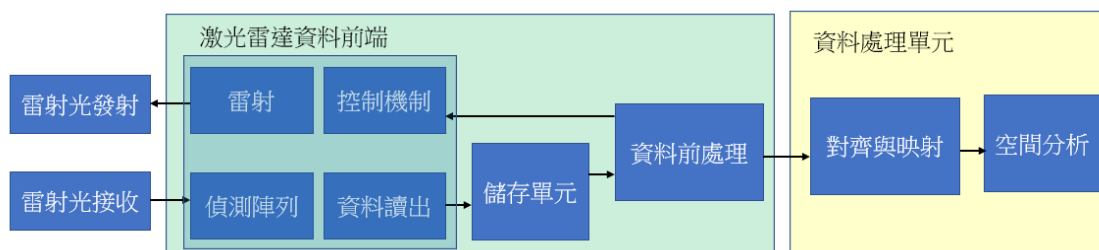
由於光的傳播速度是恆定的，因此激光雷達可以利用發射一束雷射光，並且測量雷射光到達待測物後反射回來的時間來計算物體的距離，也就是飛時測距(Time of Flight, ToF) 時間乘上光速，再除以2可得物體的距離，如圖五所示(R. Roriz, et al, 2022)。而事實上，接收到的資料還需經過資料預處理以得到深度資訊，再經過資料處理就可以得到空間分析資訊。而激光雷達必須精準的控制光束發射和接收，並予以處理，才能得到有用的資訊，如圖六所示。(G. Chen, et al, 2021)

圖五：激光雷達深度感知原理



(資料來源：R. Roriz, J. Cabral and T. Gomes, (2022) "Automotive LiDAR Technology: A Survey," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6282-6297, July 2022)

圖六：激光雷達技術之系統構建架構



(來源：作者綜合整理自：G. Chen, C. Wiede and R. Kokozinski, (2021) "Data Processing Approaches on SPAD-Based d-TOF LiDAR Systems: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 5656-5667, 1 March1, 2021)

四、激光雷達重要參數規格

為了達到安全與舒適的自動駕駛，即時得到環境感知的資訊就非常重要，表二列出市場上較先進的自動駕駛車激光雷達感測器重要參數規格，基本上影像感測器的重要規格，像是距離、視角範圍也都在激光雷達上出現。

表二、市場上較先進的自動駕駛車激光雷達感測器列表

製造商(型號)	樣式	距離	掃描頻率	視場角範圍	解析度	掃描點頻率	波長
Innoviz InnovizOne	MEMS	250 m	20 Hz	25° x 115°	0.1° x 0.1°	7.5M p/s	905 nm
Innovusion Falcon	Solid-state	280 m	10 Hz	30° x 110°	0.13° x 0.14°	6.5M p/s	n/a nm
Livox Horizon	Solid-state	280 m	n/a	25.1° x 81.7°	0.13° x 0.14°	240K p/s	905 nm
Luminar Hydra	Non-Rotating Mechanical, Flash	250 m	30 Hz	30° x 120°	0.03° x 0.07°	n/a	1550 nm
Ouster OS-2-128	Mechanical rotor	240 m	20 Hz	22.5° x 360°	0.18° x 0.18°	2.6M p/s	850 nm
RoboSense RS-LiDAR M1	MEMS Solid-state	150 m	20 Hz	25° x 120°	0.2° x 0.2°	1.1M p/s	905 nm
Velodyne VLS-128	Mechanical rotor	300 m	20 Hz	40° x 360°	0.11° x 0.4°	8M p/s	903 nm

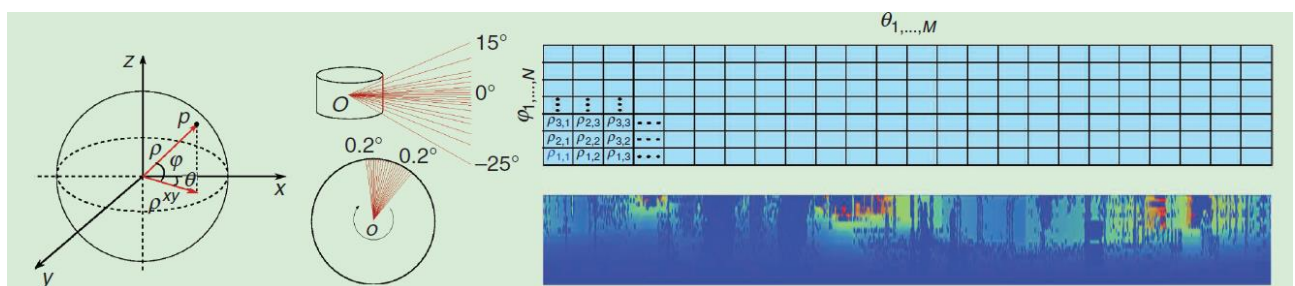
(資料來源：作者綜合整理自：R. Roriz, J. Cabral and T. Gomes, (2022) "Automotive LiDAR Technology: A Survey," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6282-6297, July 2022)

五、激光雷達三維點雲資料內容及處理

激光雷達使用三維點雲數據結構來儲存測量到的環境信息，若以雷射束發射為中心點，可用球座標 $(\gamma, \varphi, \theta)$ 來表示三維點雲每一點所代表之意義。以 Velodyne 所製造的 Ultra Puck 激光雷達為例，總共有32個光路，其中每個光路激光束的極角 φ 為固定，方位角則由掃描時間決定，每個範圍讀數都可以表示由 $P_{ij} = (\rho_{ij}, \varphi_i, \theta_j)$ ，其中 i 指某束激光極角 φ 的索引，其範圍在0-31； j 為方位角 θ 的索引，其範圍在0-1799， ρ_{ij} 則為距離資訊，如圖七所示 (Y.Li 2020)。因此建構出 $32 \times 1,800$ 帶有距離的資訊的三維點雲。

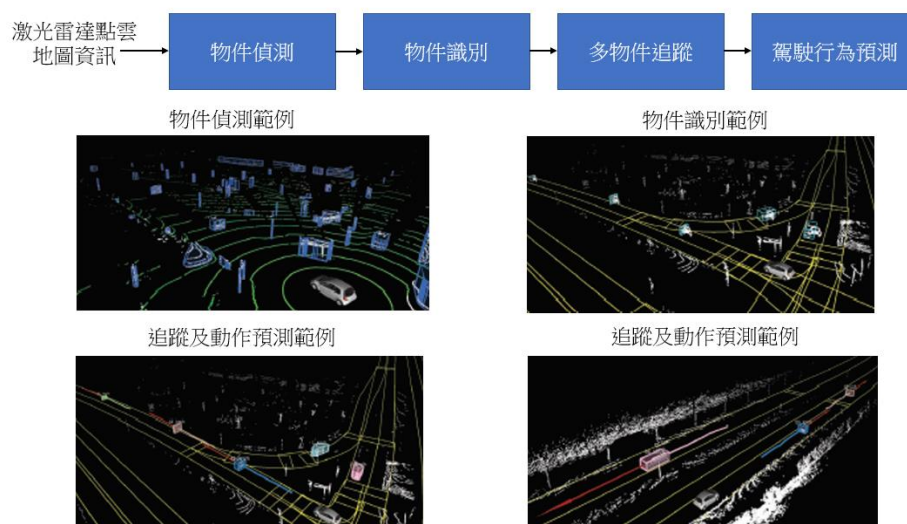
激光雷達使用三維點雲判斷環境時，常使用點雲分割的演算法，利用人工智慧的模型訓練，做到物件偵測、辨識、追蹤及駕駛行為偵測。如圖八 (Y.Li 2020)。

圖七、以球座標來顯示三維點雲每一點的取值位置



從先進駕駛輔助系統通往自動駕駛的關鍵距離感知技術-激光雷達

圖八：典型激光雷達感知系統的流程，每個步驟都有示範性的輸出。。



圖七、圖八 資料來源：(Y. Li and J. Ibanez-Guzman, (2020) "Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, no. 4, pp. 50-61, July 2020,)

叁、研究方法

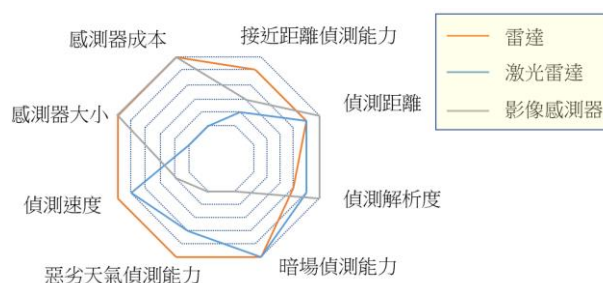
運用文獻分析法，收集與激光雷達有關相關的自動駕駛文獻，篩選和自動駕駛技術的起源、發展、原理和未來應用方向之內容，按主題把符合條件的文獻整理成一個清單，在查找資料的同時，除了加深和加廣自動駕駛相關感知的知識外，也對目前遇到的問題及可能的解決方向進行更深入的討論。最後作者也藉由實地訪問在台灣新竹科學園區研發激光雷達廠商來達科技技術長文彪博士，針對現行具輔助駕駛功能之自駕車在台灣發生事故的可能原因及未來解決方向來引導本篇論文之內容開展。

肆、研究分析與結果

一、SAE L3自駕車使用激光雷達的考量點

目前自駕車使用包含影像感測器及雷達等多種不同感測器，然而激光雷達在夜間低量度、薄霧、小雨及太陽光直射的狀況下效果明顯優於影像感測器，如圖九，因此為SAE L3自駕車採用激光雷達的主要考量。

圖九：以雷達圖示比較不同感測器的特性



(資料來源：作者綜合整理自：F. A. Butt, et al. (2022) "On the Integration of Enabling Wireless Technologies and Sensor Fusion for Next-Generation Connected and Autonomous Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14643-14668, 2022.)

實際比較激光雷達與影像感測器在同樣場景的效果，如圖十，很容易可以看出影像感測器不易辨識的環境下，激光雷達的確提供了更佳的感知效果。

圖十：惡劣環境下激光雷達比影像感測器更準確地感知環境狀況



(資料來源：Innoviz Technologies (2022). Innoviz Webinar: The LiDAR Standards for L3 Autonomy [影片]。YouTube。https://www.youtube.com/watch?v=djlYlzsVg-I)

二、L3自駕車搭配激光雷達規格之需求探討

(一) 道路彎道之辨識之影響

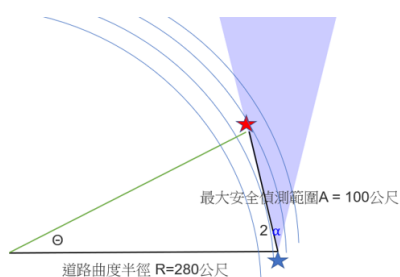
在進入彎道時，激光雷達通常需要被調整成偵測更寬 HFOV（水平視野角）來提高掃描的精度，以便更準確地判斷車輛是否接近車道標線或偏離車道。而在退出彎道時，激光雷達的 HFOV 也會被調整成更窄，以便更準確地測量車輛的位置和速度。這樣，激光雷達就能更快地作出反應，從而提高安全性。而 HFOV 可以用簡單的弧長計算公式及相似形原理求得，例如在道路曲度半徑 $R=280$ 公尺，最大安全偵測範圍 $A = 100$ 公尺的條件下（如圖十一），計算水平視場角 HFOV 如下：

弧長計算公式

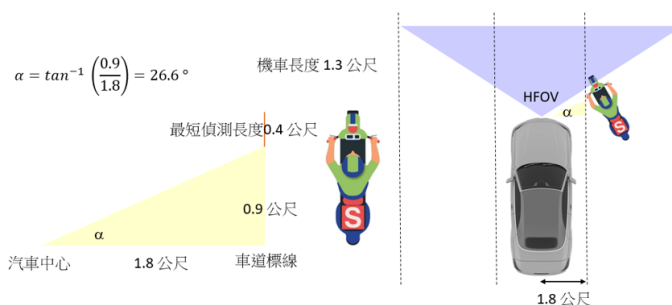
$$\text{Arc} = \theta \times (\pi / 180^\circ) \times R ; \text{Arc} = \theta \times (2 \pi / 360^\circ) \times R ; \theta = (\text{Arc} / R) \times (360^\circ / 2 \pi)$$

$$\text{例用相似形 } \alpha = \theta / 2 ; \text{近似HFOV} = 2 \alpha = 100 / 280 \times (360^\circ / 2 \pi) = 20.46^\circ$$

圖十一：進入彎道之水平視場角 HFOV 計算範例



圖十二：超車搶道辨識之水平視場角 HFOV 計算範例



(二) 超車搶道之辨識之影響

激光雷達可以測量相鄰車道車輛的位置和速度，因此它可以根據這些訊息，來偵測並判斷相鄰車道車輛的搶車道行為。若要能精確地偵測相鄰車道車輛的搶車道，就要考慮水平視場角HFOV, 以及切入車最短辨識距離。

舉例而言，假設最短偵測長度0.4 公尺，機車長度 1.3 公尺，汽車中心距車道標線1.8 公尺，（如圖十二），我們可用簡單的三角函數算出水平視場角 HFOV。

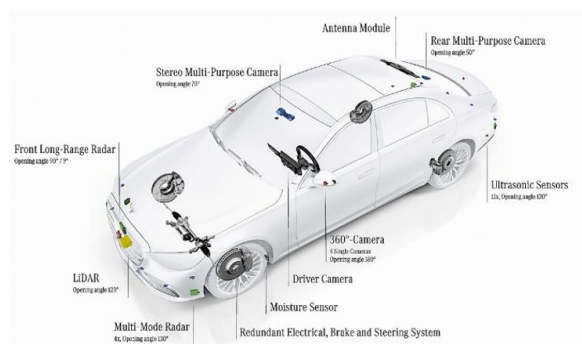
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0.9}{1.8} \right) = 26.6^\circ; \text{ HFOV} = 180^\circ - 2 * \alpha = 112.8^\circ$$

三、Benz符合SAE J3016法規之商用化實例

(一) Benz L3自駕車激光雷達的配置狀況

Drive Pilot (L3) 的配置，雷射雷達 (Lidar) 安裝在前方散熱格處。如圖十三所示。

圖十三：BENZ 激光雷達安裝位置，其中水平掃描範圍為120度



(資料來源： Dan Carney (2022). What it is Like to Trust Mercedes Drive Pilot's Level 3 Driver Assistance, Retrieved July 27, 2022. from <https://reurl.cc/33g9N8>)

圖十四：BENZ 使用Valeo 激光雷達之外觀



(資料來源： HEXAGON (2023). Valeo SCALA 3D Laser Scanner (Gen 2), Retrieved Feb 20, 2023. from <https://reurl.cc/OVXy7r>)

Benz Drive Pilot 可以實現 L3 級自動駕駛， Benz Drive Pilot 是採用Valeo Scala 第二代激光雷達。如圖十四， Drive Pilot 是賓士的一種L3 自動駕駛的主要特點是，汽車的道路和車輛的控制都由電腦系統負責，但駕駛者仍然必須在需要時駕駛車輛。此外，Benz Drive Pilot 主要通過以下兩種技術實現 L3 級自動駕駛：

1、感測技術： Drive Pilot 使用多種感測技術，如彩色影像感測器、激光雷達、高精度 GPS和陀螺儀等，以獲得關於車輛和周圍環境的訊息。

2、控制技術： Drive Pilot 利用車輛的駕駛控制系統，包括變速器、剎車系統和轉向系統，以根據探測到的環境資訊控制車輛的行駛方向和速度。

(二) Benz L3自駕車在德國柏林的實測分析

Benz Drive Pilot於2022年5月已獲得德國聯邦機動車輛運輸管理局（KBA）核准，為符合UN-R157法律規格的SAE Level 3系統。這種自動駕駛系統是藉由結合各種感測器、GPS 和汽車的設計，實現 L3 級自動駕駛。

在德國柏林道路上，Benz 的測試者以 L3 模式演示自動駕駛。測試者不需要將手扶住方向盤。而可以做其他活動，如看 email, 玩遊戲，方向盤上綠燈表示目前是在 L3 模式，在道路允許的情況下，自動控制車輛的行駛方向和速度，並在需要時通知駕駛員需要採取行動，如圖十五。

圖十五：Benz EQS AMG 以L3自動駕駛模式行駛於德國柏林市區的狀況



(資料來源：Mr. Benz (2022) . 2023 NEW AUTONOMOUS Mercedes DRIVE?! Level 3 Autonomous EQS POV Drive! Interior Ambiente Review [影片]。YouTube。https://reurl.cc/4Qy9ev)

圖十六：Benz自駕車以SAE L4無人模式在德國斯圖加特的機場停車場的狀況



(資料來源：Bosch Mobility Solutions (2022) . EN | Bosch Automated valet parking: The driverless parking service [影片]。YouTube。https://reurl.cc/qkmeeg)

（三）Benz 無人駕駛自駕車在德國斯圖加特的機場停車場的運作

在德國斯圖加特的機場停車場，Bosch 和 Mercedes-Benz從2022年12月開始了世界上第一個SAE L4模式的自動代客停車服務。賓士車主只需把車開到特定停車場，就可以下車離開，然後車子就以無人的模式自動開到指定停車格停放，如圖十六。

伍、研究結論與建議

一、技術瓶頸

（一）雷射光對於待測物體有不同的反射率之影響

由於物體各個結構的表面塗裝或材質不同，導致對於雷射光的反射率也不一致，進而影響物體的辨識。這一方面可以增加光源強度來提高物體的反射率以及更大的動態範圍。而近年來使用深度學習方法，經由訓練深度學習AI模型，可以克服物體的材質不同對激光雷達測量精度的影響。(J. Beltrán, et al., 2018)

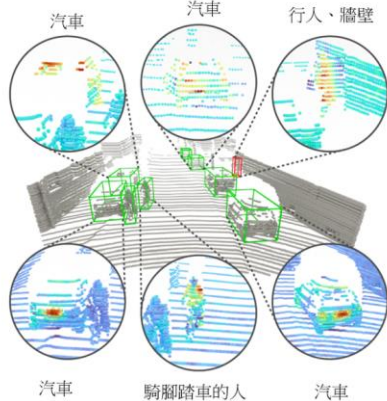
（二）接收不同激光雷達的脈衝時可能會產生干擾

在ToF 激光雷達運作過程中，預期接收到的信號可能受到來自其他 ToF 激光雷達的激光束的干擾，或是受到強烈陽光的干擾，而致使深度資訊被破壞。而最近有激光雷達的廠商使用多個頻率調變連續波（FMCW）的方式來組成雷射光束，雖然這種方式成本較高，但是可以有效運用克卜勒效應的特性測量距離和速度。（Y. Li, et al., 2020）。

（三）遮擋物體對被遮擋物之辨識之影響

激光雷達獲取點雲的方式是透過利用從其中心發射的雷射光束掃描周圍環境所得之訊息，因此無法掃描一個物體後面的物體，如圖十七。目前也有研究考慮使用資料過濾、分割和分類、二次抽樣策略或是動態步長處理這類特殊情況（D. Schinagl, et al., 2022）。

圖十七：點雲中的遮擋物體和被遮擋物體示意



(資料來源：D. Schinagl, et al. (2022) "OccAM's Laser: Occlusion-based Attribution Maps for 3D Object Detectors on LiDAR Data," 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), New Orleans, LA, USA, 2022, pp. 1131-1140.)

圖十八：多感測器訊息接收與感知融合



(資料來源：作者綜合整理自：F. A. Butt, et al. (2022) "On the Integration of Enabling Wireless Technologies and Sensor Fusion for Next-Generation Connected and Autonomous Vehicles," in IEEE Access, vol. 10, pp. 14643-14668)

二、建議

（一）激光雷達與影像感測器感知融合技術

雷達具有成本低的優點，但解析度不足，無法辨識物體。由於激光雷達與影像感測器在不同的使用環境各有其特點，並有互補的特性，我們可以利用感知融合技術來讓不同感測器彼此校準其自環境接收的資訊，如圖十八。

（二）用固態式激光雷達取代傳統機械式激光雷達

隨著半導體製程技術的成熟，固態式激光雷達具有更小、更輕、更耐用的特性。它們不需要額外的機械部件來旋轉雷射光源，因此它們可以更輕易地安裝在車輛上。另外因為它們沒有磨損的部件，所以固態式激光雷達相對而言就更加耐用。

（三）開發視野角360度覆蓋範圍的激光雷達

激光雷達的覆蓋範圍可以進一步擴大。目前像是 Innoviz 激光雷達可以提供水平360度的視野角產品，隨著技術的進步，有效的使用覆蓋範圍更大的激光雷達將可使車輛自動駕駛更加安全。

最近在台灣陸續傳出具輔助駕駛功能的車輛撞上高速公路工程車的事件，今年二月美國特斯拉（Tesla）開始召回36萬輛安裝全自動駕駛（Full Self-Driving）測試版車輛，而美國公路安全保險協會(IIHS)正準備評級特斯拉(Tesla) Autopilot、福特汽車(Ford) Blue Cruise以及通用汽車(GM) Super Cruise等半自駕系統，然而內華達州在2022年底正式成為第一個確認Benz DrivePilot符合州法規的地區。

在今年剛結束的美國最大國際消費性電子展CES 2023展會中，激光雷達參展者為數也相當多，包括法雷奧（Valeo）、Innoviz、大陸集團（Continental）、禾賽、RoboSense、ZVision、Innovusion、Cepton等。可以看到自駕車所帶動感測元件商機潛力。作者也期待搭配著人工智慧演算法的激光雷達能成為自駕車的關鍵感知元件，推動相關產業發展，並帶給人們更安全舒適的駕駛體驗。

陸、參考文獻

- 中華民國經濟部(無日期)。無人載具科技創新實驗資訊揭露。擷取日期：2023年2月20日 <https://reurl.cc/lvRnlq>
- Bob Wang (2022)。自駕五噸貨車台灣新竹市區夜間自駕功能驗證〔影片〕。YouTube。
<https://reurl.cc/8q3YRX>
- DIGITIMES Research (2021)。歐日韓廠光達車款上市時間遞延，中國車廠紛推搭載光達高階純電動車。擷取日期：2021年3月16日 <https://reurl.cc/ml6Wpj>
- Mr. Benz (2022)。2023 NEW AUTONOMOUS Mercedes DRIVE?! Level 3 Autonomous EQS POV Drive! Interior Ambiente Review〔影片〕。YouTube。
<https://reurl.cc/4Qy9ev>
- Bosch Mobility Solutions (2022)。EN | Bosch Automated valet parking: The driverless parking service〔影片〕。YouTube。
<https://reurl.cc/qkmeeg>
- Innoviz Technologies (2022)。Innoviz Webinar: The LiDAR Standards for L3 Autonomy〔影片〕。YouTube。
<https://www.youtube.com/watch?v=djLYlsVg-I>
- HEXAGON (2023)。Valeo SCALA 3D Laser Scanner (Gen 2), Retrieved Feb 20, 2023. from <https://reurl.cc/OVXy7r>
- Dan Carney (2022)。What it is Like to Trust Mercedes Drive Pilot's Level 3 Driver Assistance, Retrieved July 27, 2022. from <https://reurl.cc/33g9N8>
- G. Chen, C. Wiede and R. Kokozinski, (2021) "Data Processing Approaches on SPAD-Based d-TOF LiDAR Systems: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 5656-5667, 1 March1, 2021
- R. Roriz, J. Cabral and T. Gomes, (2022) "Automotive LiDAR Technology: A Survey," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6282-6297, July 2022
- F. A. Butt, J. N. Chattha, J. Ahmad, M. U. Zia, M. Rizwan and I. H. Naqvi, (2022) "On the Integration of Enabling Wireless Technologies and Sensor Fusion for Next-Generation Connected and Autonomous Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14643-14668, 2022.
- Y. Li and J. Ibanez-Guzman, (2020) "Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, no. 4, pp. 50-61, July 2020
- J. Beltrán, C. Guindel, F. M. Moreno, D. Cruzado, F. García and A. De La Escalera, "BirdNet: A 3D Object Detection Framework from LiDAR Information," *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 2018, pp. 3517-3523