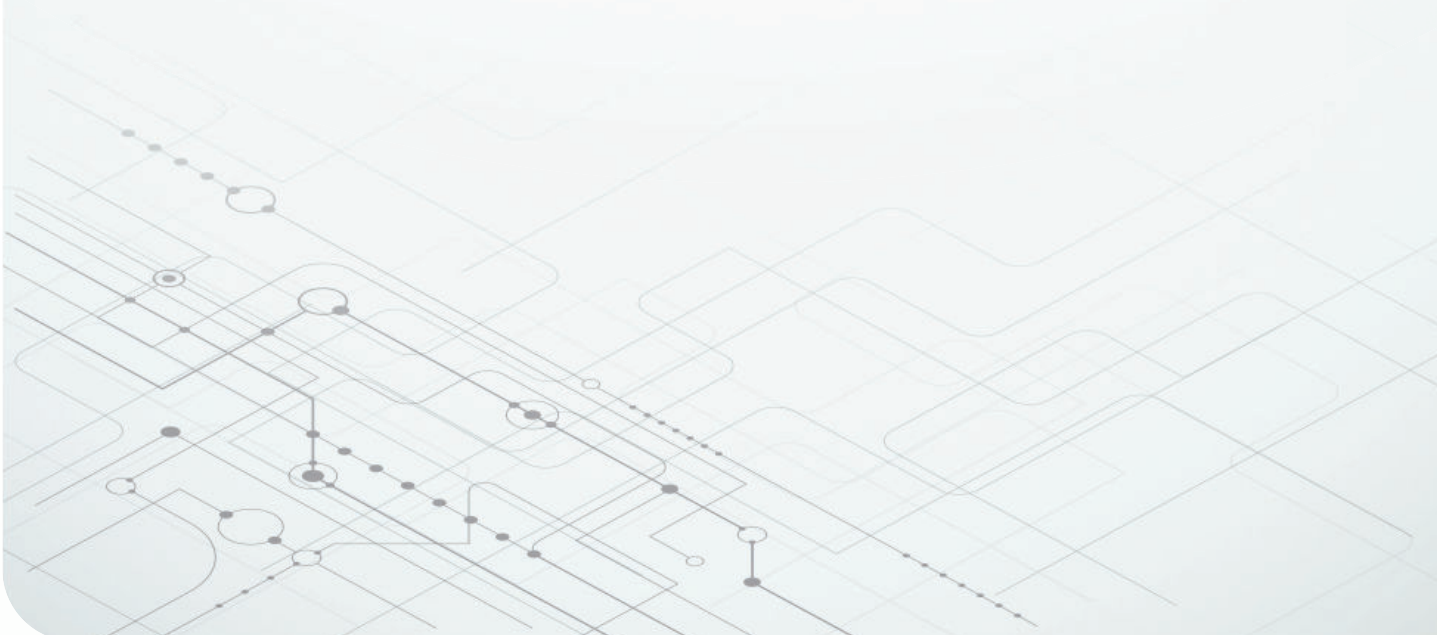


從偵測到決策：深度解析新一代 ADAS



Taylor Gage
Systems Engineer
Automotive ADAS



摘要

1 感測器融合
雷達、光達與攝影機的整合，提供了安全且符合真實世界 ADAS 運作所需的冗餘與交叉驗證

2 端對端 ADAS
自動駕駛汽車的成功，取決於先進駕駛輔助系統 (ADAS) 中感測、運算、通訊及執行之間的協同作用。

3 基礎設施支援
半導體技術的進步，決定了系統能否可靠運行，並向 Level 3 以上的自動駕駛等級邁進。

簡介

車輛自動駕駛技術的發展速度超越了多數人的預測，但實現底層技術改進所需的工程挑戰也隨之增加。單靠增加更多感測器或提升運算能力，並不足以讓車輛提升至下一個 SAE 等級。車輛必須針對周圍環境擁有持續且精確的感測數據，使其即便在霧、大雨、眩光或道路碎屑等不利環境條件下，仍能處理複雜狀況並在毫秒內採取行動。

新興的政府與產業法規，加上更嚴格的安全認證、可靠性及成本限制，持續影響著設計決策。汽車製造商面臨的真正挑戰，在於建構一個完整的端對端 ADAS 平台，使其能安全且可靠地在毫秒之間將偵測結果轉化為決策。這些更智慧、具備自我感知能力的車輛能否成功，並不取決於單一系統有多先進，而是在於所有系統之間如何無縫地協同運作。

多重推動力帶動發展

過去為豪華車保留的駕駛輔助功能現在已成為當今駕駛者的標準配置。消費者預期的提高，已推動市場穩步邁向國際自動機工程學會 (SAE) J3016 定義的 Level 2 自動駕駛，要求將車道維持輔助與主動式定速巡航列為標配，而自動停車和高速公路導航駕駛也正逐步導入中階及入門車款。對於大多數汽車製造商而言，Level 2 及其以上的自動駕駛已成為發展的起點。

政府法規同樣也在推動先進技術的開發與採用，以提升車輛安全性。現在的要求包括：確保駕駛者專注於路況的駕駛者監控系統、用於防撞的自動緊急煞車，以及盲點偵測與乘客偵測（以防止兒童被遺留在無人看管的車內）。雖然各地區的具體規範有所不同，但包括美國國家公路交通安全管理局、歐盟執委會到中國工業和信息化部在內，全球各地的主管機關都有著共同的目標：保護駕駛者、乘客以及弱勢路人的安全。

為了應對這些挑戰並在全球提供安全可靠的自動駕駛汽車，汽車製造商必須在以下四個領域推動創新：

- 感知：系統捕捉並解讀周圍環境。
- 運算：將處理後的數據轉化為即時駕駛決策。
- 通訊：在車輛內部傳輸大量原始與處理後的數據。
- 回應：透過線控技術等智慧底盤系統，在毫秒內將決策轉化為行動。

感知：理解周圍環境

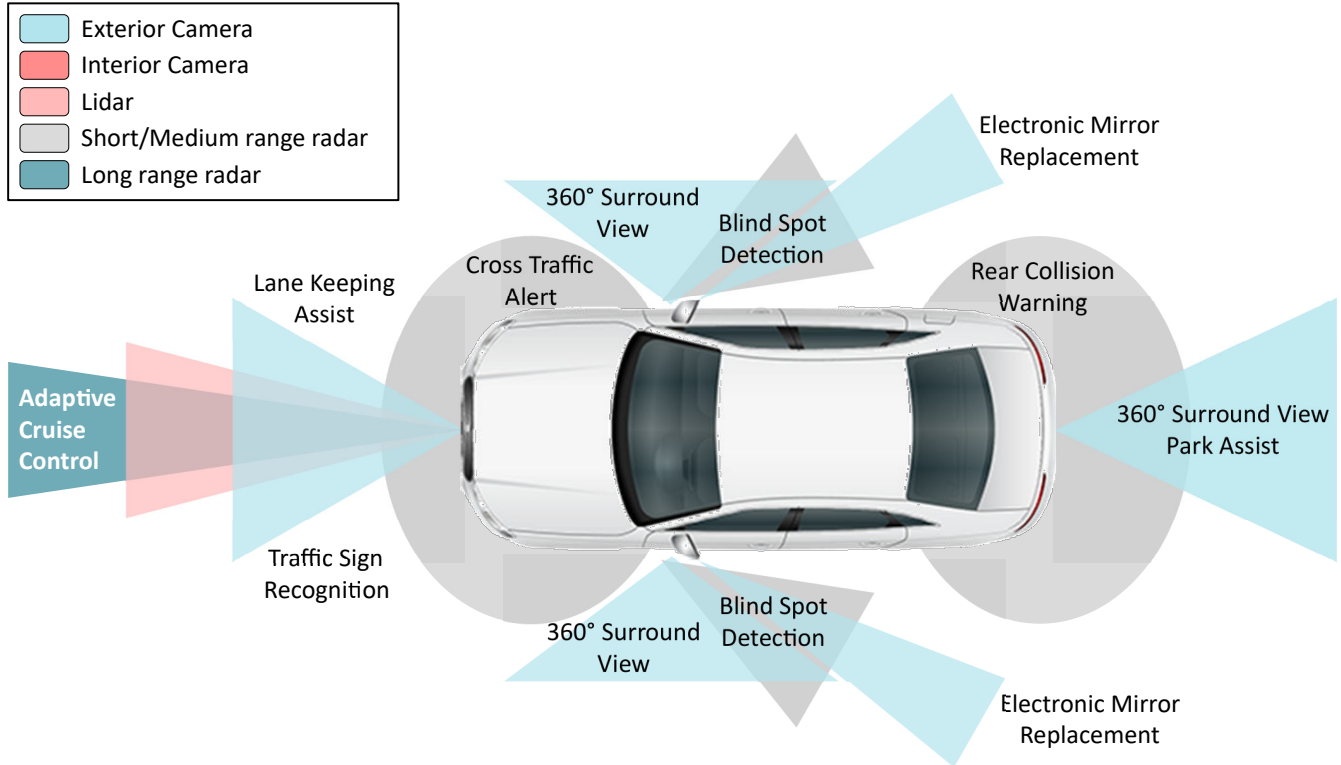


圖 1. 各感測器類型的車輛覆蓋範圍

在 ADAS 設計中，隨時全面理解車輛的周圍環境是最大的工程挑戰之一。看似簡單的過程，往往會迅速演變成主要的技術瓶頸。圖 1 中展示了各類感測器在車輛上提供覆蓋範圍的典型配置方式。每種感測器都有其優缺點，沒有任何單一類型的感測器能獨自為車輛周圍環境提供全面且完整的視野。

ADAS 設計中的感測器考量因素

雷達擅長透過調頻連續波 (FMCW) 測量來感測距離與速度，且無論是在霧、雨或低光源等環境條件下，皆能提供這些資訊，不受環境影響。高解析度毫米波 (mmWave) 雷達感測器正持續提升在 300 公尺以上長距離下的準確度，使車輛能夠更早偵測到物體。

以往雷達的不足之處在於低解析度及高動態範圍場景下的物體分類。然而，先進的 4D 成像雷達正縮小這一差距，實現了過往標準毫米波雷達無法達到的更精確物體分類與高度偵測。儘管有這些進展，單憑雷達仍無法與攝影機所提供的色彩、文字及豐富的物體分類資訊相提並論。

光達則提供了互補優勢，特別是在長距離解析度方面。傳統的光達系統利用飛行時間測量，透過近紅外光建構車輛周圍詳盡的 3D 地圖，擷取物體的距離、形狀與相對位置。在處理複雜狀況時，這些數據至關重要，例如感測並避開道路障礙物，或在敏感地形中進行精確的轉向操控。

在長距離場景中，掃描式光達具有低功耗與對人眼安全的優勢，但其依賴馬達驅動的反射鏡，會產生機械應力並降低使用壽命。針對短距離場景，閃光式光達因捨棄了移動式零件而獲得快速普及；它是同時觸發陣列中的所有雷射，在單一畫格內捕捉整個場景。

與掃描式系統相比，閃光式光達系統體積更小且更易於導入，但受限於必須符合人眼安全要求的雷射輸出功率準位，目前尚無法支援長距離應用。雖然霧和雪等惡劣天氣對光達仍是一項挑戰，但雷射脈衝光達接收器技術的進步，正逐步提升在這些條件下的性能。工程師正致力於將 FMCW 雷射調變技術導入車用光達，以提高可靠性、縮小所需的孔徑尺寸，並增加物體速度數據。

攝影機則完善了這三種感測模式，提供雷達與光達無法比擬的功能：色彩、文字以及豐富的物體分類數據。攝影機能精確辨識道路號誌、交通號誌與行人。諸如車道維持輔助等功能完全仰賴以攝影機為主的系統，因為道路上的車道線是二維的，雷達或光達無法偵測。然而，在三種感測模式中，攝影機最易受環境影響。低光源環境、強光造成的眩光，以及鏡頭上的泥土等碎屑，都可能導致攝影機系統形同失明。

感測器融合每種感測模式都有其擅長的場景，也有其不足的環境。因此，汽車製造商一直透過「感測器融合」來追求更高階的自動駕駛，即結合兩種或更多感測模式，而非僅依賴單一類型。舉例來說，將用於物體偵測的雷達與用於物體分類的攝影機配對，可透過跨感測器驗證與基於共識的決策機制，提升感測準確度。多種感測器類型同時也提供了冗餘，以增進安全性。如果攝影機因照明條件不良而無法看到，雷達或光達系統可輔助必要的視野，確保車輛安全運作。整合現有感測模式的數據，能將色彩感知、高解析度、物體速度數據以及對惡劣天氣的抗性等各項優勢結合在一起。

運用感測器融合技術精確辨識物體

感測器融合所能解決的挑戰，不僅止於惡劣的天候或照明條件。例如，加拿大英屬哥倫比亞省的多個城市採用了名為「路面佩蒂」(Pavement Patty) 的視錯覺手法，如圖 2 所示。

這項路面藝術旨在警示並減緩超速駕駛的速度，其圖案呈現出一名孩童在路中央追逐球的影像。實際上，這是一個長 8 英尺、以特定角度貼設的乙烯基貼紙，在人類肉眼觀察下會產生 3D 錯覺。問題在於，這種錯覺也會誤導攝影機系統。如果自動駕駛汽車完全依賴影像數據，它會判定有一名孩童跑在車輛前方，進而採取劇烈行動，例如緊急煞車或切入對向車道。由於物體「分類」是影像感測器的強項，但物體「偵測」則不然，透過為車輛增設雷達或光達，即可避免這種誤判。如此一來，當攝影機訊號顯示道路上有物體或行人時，此資訊便能與擅長物體偵測的感測器進行交叉比對。一旦啟動此機制，雷達或光達系統將正確指出前方道路無障礙，而整體的 ADAS 系統便能判定攝影機產生的危險訊號僅為幻覺，進而避免做出危險的操縱動作。

這類錯覺設計原本是為了促使人類駕駛者保持專注並安全駕駛，但卻對自動駕駛汽車構成了挑戰，因為自動駕駛車本身已隨時遵守限速並監控環境，此類設計反而強迫它們必須處理並不存在的危險。「路面佩蒂」(Pavement Patty) 是一個有趣的案例，它揭示了每種感測模式都存在盲點。將雷達、光達與攝影機的感測數據進行融合，能提供所需的冗餘與交叉驗證，以安全地實現更高階的自動駕駛，並避免這類模稜兩可的情況。

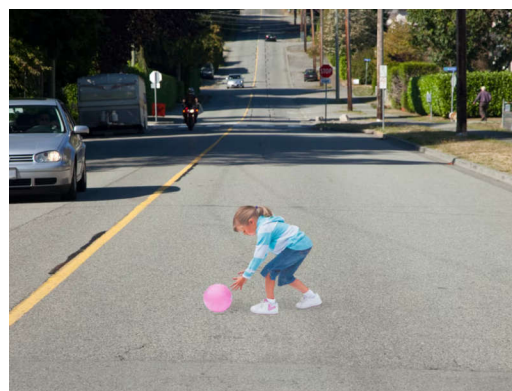


圖 2. 位於加拿大溫哥華的「路面佩蒂」(Pavement Patty) 3D 光學錯覺示意圖

運算：將感知數據轉化為駕駛決策

感知環境數據僅是自動駕駛汽車運作的第一步。車輛必須將這些數據轉換為周圍環境的全景影像，並在毫秒內做出即時決策。在現今許多車輛架構中，針對特定應用的數據處理是在感測器端進行的。例如，長距離前方雷達可能是主動式定速巡航的唯一輸入來源。隨著自動駕駛技術進步與感測器融合的需求增加，處理能力正從邊緣轉向集中式架構。

集中式運算單元具備多項優點：提升處理效率、簡化軟體更新發佈，並使功能更易於擴充，因為更換邊緣感測器不再需要對整個電子控制單元或軟體進行大改。

感測器融合應用與自動化決策需要專門的運算加速器，例如神經網路處理單元、影像數位訊號處理器 (DSP) 以及雷達快速傅立葉轉換加速器；這些技術皆有助於建立機器學習 (ML) 與預測性人工智慧 (AI) 網路，以驅動道路上複雜的即時決策。德州儀器的 TDA5 駕駛輔助系統單晶片整合了多個運算領域，可在單一封裝內處理感測器數據、即時控制與機器學習。此外，參考設計與軟體也能協助工程師縮短開發時程，加速進入量產階段。

通訊：車輛的骨幹

儘管可靠的感測與高性能運算至關重要，但若缺乏高頻寬、低延遲且長距離的通訊系統網路，這些功能將仍處於孤立狀態。如圖 3 所示，一系列通訊協定將車內各個系統連接起來，每種協定皆針對特定的數據輸入類型量身打造，並支援各項任務需求。

攝影機等高速、高數據密集型應用，需要長度大於 10 公尺的電纜才能連接至運算單元。串列器與解串列器 (SerDes) 為數據傳輸提供了非對稱通道，其正向通道速度可達 7Gbps 以上，並採用串列週邊介面 (SPI) 或間積體電路 (I²C) 等低速反向通道協定進行雙向通訊。

雖然 SerDes 技術傳統上僅用於攝影機應用，但隨著雷達與光達系統技術的日益演進，催生了將原始數據直接發送至中央運算單元的串流架構，這同樣也需要 SerDes 的高性能。隨著這些應用的擴展，時間同步性變得至關重要，這能防止雷達或光達互相干擾，並實現更高解析度的級聯雷達配置，因為這類配置需仰賴感測器之間極其嚴密的時間耦合。如需具體範例，請參閱[用於車用前方雷達的單晶片毫米波串流雷達參考設計](#)。

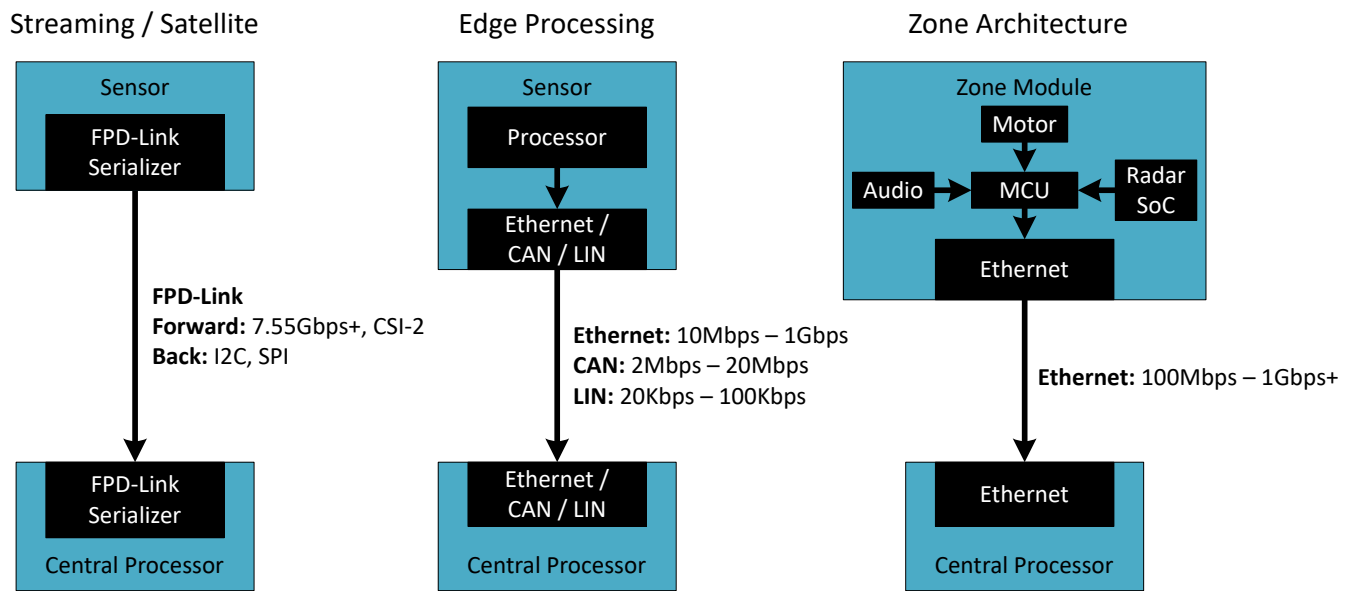


圖 3. 支援不同車輛架構的各種網路協定與頻寬示意圖

除了 SerDes 外，[汽車乙太網路](#)已成為車內網路中一種可靠的通訊協定。乙太網路可連接各個網域控制器，並實現分散式處理與區域架構。對於需要獨立運算單元的 ADAS 與車載資訊娛樂應用，乙太網路提供了長距離雙向信號鏈，並整合了媒體存取控制安全 (MACsec) 等安全功能，以滿足日益嚴格的網路安全需求。

乙太網路同樣支援嚴密的時間同步，確保全車的數據與決策保持一致。在區域架構中，乙太網路可將多個數據來源（例如角落雷達、座椅馬達控制器與音訊訊號），以及控制器區域網路 (CAN) 和區域互連網路 (LIN) 等傳統協定，匯總為單一輸出至集中式運算單元，從而降低線束成本與複雜度。諸如 10BASE-T1S 等標準將乙太網路的連接能力

擴展至區域內的低頻寬終端節點，進一步簡化了佈線並降低成本。這種區域網路架構直接實現了軟體定義車輛，使空中下載 (OTA) 更新能夠在車輛出廠後推送新功能與新能力至車輛上，減少昂貴硬體改版的需求。若要進一步了解此主題，請參閱文章：[乙太網路如何加速邁向軟體定義汽車](#)。

雖然區域架構與串流 ADAS 感測器帶動了乙太網路與 SerDes 的需求，但 CAN 與 LIN 對於全車控制系統仍至關重要，包括座椅馬達、後處理雷達數據以及照明系統。對於 ADAS 感測或動力總成等高性能應用，CAN 彈性資料速率 (CAN FD) 提供了多主控拓樸來進行雙向指令傳輸。而對於暖通空調與座椅馬達等較簡單的應用，CAN FD Light

則提供了固定位元速率與單一主控拓樸，從而降低終端節點與區域控制器的成本與複雜度。

隨著車輛自動化程度的提升與架構的演進，設計人員需要靈活的網路選項，以支援精確的時間同步、功能安全與網路安全防護。

回應：將數據轉化為行動

感測與運算固然重要，但若沒有行動，這一切都將毫無意義。更全面的數據、先進的運算以及更快速的通訊，正匯聚於自動駕駛汽車運作的最後一步：讓車輛採取行動。**智慧底盤系統**加入了關鍵的執行層，將駕駛輔助決策轉化為精確的物理反應；其中，線控技術能在毫秒級的時間內提供卓越的控制精度與性能。

隨著這些系統變得更加精精密，預測功能將利用經過驗證的真實數據來縮短反應時間，從而立即避開危險，在駕駛者尚未意識到威脅之前，便能保護乘客與行人的安全。**圖 4** 展示了此流程的一個範例。

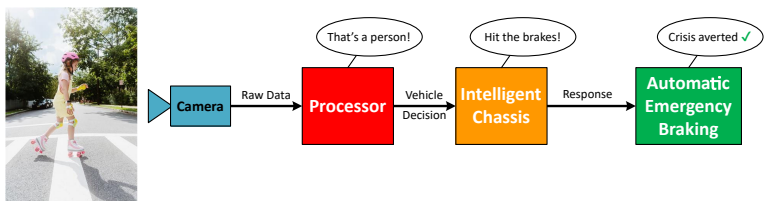


圖 4. 從偵測到決策的流程圖

隱藏的促成因素：讓一切成為可能的 IC 技術

即使是最先進的 ADAS 平台，也必須依賴支援車輛中各個系統的類比半導體與嵌入式處理器。體聲波元件與**電源管理積體電路 (IC)** 在討論自動駕駛的大環境下常被忽略，但它們其實能提升感測、運算及聯網方面的系統性能，確保這些系統在真實世界的環境條件下仍能可靠運作。TI 在設計這些元件時，是從全車架構的高度出發，而不僅僅是考慮單一應用。

結論：通往更高階自動駕駛之路

未來十年，自動駕駛汽車技術的各個層面都將迎來重大進展。FMCW 光達將在原本已相當精準的測距感測器基礎上，提供更精確的速度與方向數據。更先進的 AI 模型將能處理複雜的駕駛環境，以及當前系統無法因應的操作邊角案例。隨著瓶頸從硬體轉向軟體，OTA 更新將為車廠提供一條路徑，使其能在 Level 3 硬體的基礎上，實現 SAE J3016 Level 4 自動駕駛。智慧底盤系統將運用即時資訊，將數據轉化為動作，實現更平順且反應更迅速的行駛體驗。

這些技術早已超越概念階段。隨著普及率持續成長，成本隨之降低，並為以往受限於成本的設計導入了更高水準的安全性。實現完全自動駕駛取決於車輛各個系統之間的無縫整合。透過推動感測、處理、通訊連接及執行等領域的創新，TI 正致力於協助汽車製造商為全球各地的每一位駕駛者與每一條道路，打造更安全、更智慧的車輛。

作者簡介

Taylor Gage 是 TI 車用 ADAS 工程與行銷團隊的系統工程師，專攻外部感測領域，包括攝影機、雷達及光達系統設計。他利用在 FPD-Link 聯網技術與 TI 雷達產品組合方面的專業知識，協助 OEM 及一級供應商推進自動駕駛技術，並開發更安全的車輛。Taylor 擁有 Texas A&M 電機工程學士學位，目前正於 Southern Methodist University 攻讀 MBA。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025