

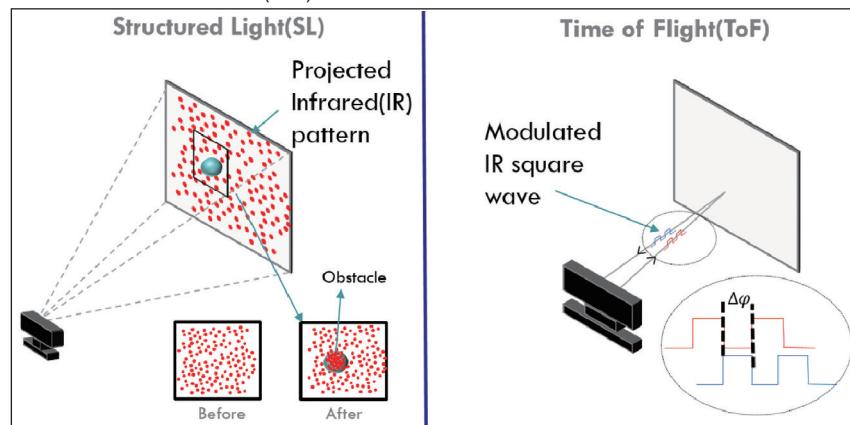
3D 感測，你在意的是真相、速度 or 距離？

■文：任莖萍

儘管 iPhone X 褒貶不一，但其搭載的 Face ID 臉部辨識解鎖功能卻成功炒熱 3D 感測話題。每當新興市場萌芽之初，總免不了衆家好手一番爭奇鬥艷。業界通常將 3D 感測技術分成三大類：利用雙鏡頭 RGB 相機模組調校兩部相機之間的畫素並擷取深度資訊的立體視覺 (Stereo Vision)、解析反射角度的結構光 (Structured Light) 和聚焦反射時間的飛時測距 (Time-of-Flight, ToF)。隨著工作原理的不同，應用取向也有所差異：

- 立體視覺：精度低、掃描速度慢、有效距離短，最類似人類大腦運作，好處是不易受環境光影響且成本低，適合環境光源不穩定／不足／過亮的影像拍攝或監控；
- 結構光：掃描精度最高、速度中等，容易受環境光影響，蘋果 (Apple)、意法半導體 (ST)、英特爾 (Intel)、高通 (Qualcomm)、艾邁斯半導體 (AMS，原名：奧地利微電子)、奇景光電 (Himax)、微軟 (Microsoft) 皆已投入；
- 飛時測距：回應速度最快、量測距離最大、能更有效感測環境光，減少應用處理器 (APU) 的工

圖 1：結構光 vs. 飛時測距 (ToF) 比較



資料來源：<https://www.semanticscholar.org/paper/A-New-Inspection-Method-Based-on-RGB-D-Profilin-Siddiqui/1b9ba74507bc12d059f97719e178609d25946d84>

作負載，進而降低耗電量；缺點是成本偏高，索尼 (Sony)、德州儀器 (TI)、亞德諾 (ADI)、意法半導體 (ST)、英飛凌 (Infineon)、PMD Technologies、艾邁斯半導體、谷歌 (Google)、微軟、濰景科技 (MicroVision)、VIVO 等是先進供應商。

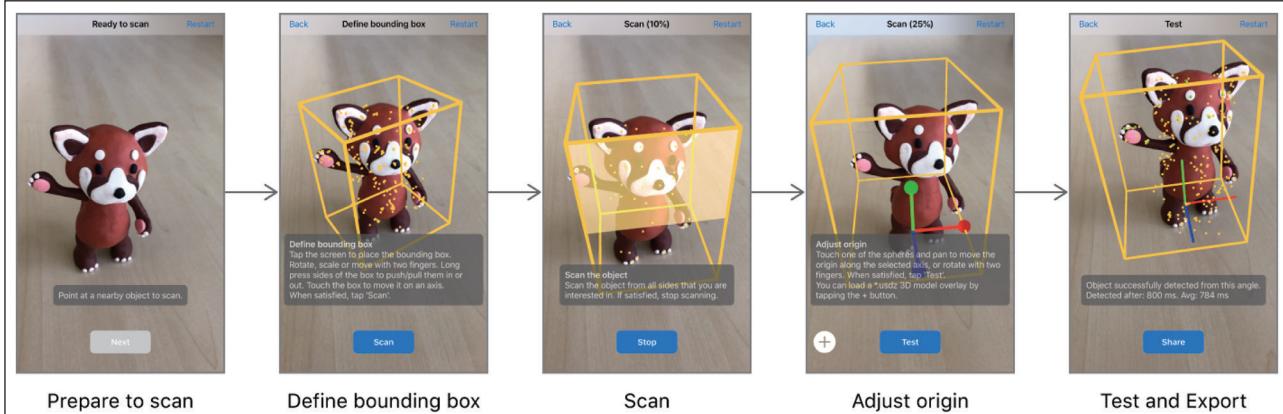
應用取向為基準，高階多探複合方案

雖說 3D 感測可廣泛應用於生物辨識、機器人、無人機、穿戴裝置、體感遊戲、虛擬實境／擴增實境／混合實境 (VR / AR / MR)、Animoji 動態表情創作，乃至汽車

安全駕駛等；但偵測要求不同，應對之道亦相異。以「存在偵測」(Presence Detection) 為例，若是戶外定點巡檢，且旨在粗略發現有無障礙物、不細究是何種物體，立體視覺已夠用。但若是嚴謹的身份驗證，結構光較具優勢；例如，用於解鎖或行動支付的人臉辨識。若是安防圍籬、工安防護或手勢辨識，飛時測距因抗干擾能力佳且可依據目標距離多段設定警報或致動，無疑是最佳解決方案。

簡言之，目標應用是判斷景深、人物或確切距離，將是首要考量。事實上，高階應用不會只單用某一種技術，而是採取複合式方案

圖 2：使用蘋果 iOS 應用程式掃描真實世界物體示例：準備掃描、定義邊界框、掃描、調整原點、測試及輸出



資料來源：https://developer.apple.com/documentation/arkit/scanning_and_detecting_3d_objects

實現，iPhone X 臉部解鎖也不例外：ToF 相機發射紅外線 (IR) 雷射光偵測位於有效距離內的面部後，會啓動結構光的點投射器 (Dot Projector) 繪製、儲存臉譜，再由 IR 鏡頭接收、讀取點陣圖像 (點雲)，傳到 APU 做人工智慧 (AI) 演算。因此，不少晶片商奉行多軸同步發展策略，蘋果供應鏈的重

要成員 ST 就是一例；在發展基於單光子雪崩光電二極體 (SPAD) 的 ToF 感測器之餘，亦在結構光元件下足工夫。

ToF 反應快且準，但精細掃描 + 驗證仍須仰賴「結構光」

ST 名為「FlightSense」的 ToF 感測器包括雷射驅動器、940 nm 非可見光雷射第一級 (Class 1) 發射器、實體紅外線濾鏡、SPAD 光接收器和超快速的光子偵測陣列，可用於趨近 (Proximity) 感應、自動對焦、機器人防撞、無人機起降、環境光感應開關電器、手勢識別、庫存管理等，共有三個系列：

圖 3：ST「FlightSense」ToF 系列產品

ST's FlightSense™ Mass-Market Products

VL6180X Proximity, gesture & ALS sensor In Mass-production  <ul style="list-style-type: none"> • 1st generation ST ToF sensor • Main features: Proximity sensor & ALS • Major use cases: <ul style="list-style-type: none"> • Proximity distance measurement • Proximity detection • Lighting control • Basic gesture 	VL53L0X Ranging and gesture sensor In Mass-production  <ul style="list-style-type: none"> • 2nd generation ST ToF sensor • Main feature: Ranging sensor • Major use cases: <ul style="list-style-type: none"> • Up to 2 meters distance measurement • User / object detection • Robotics • Basic gesture 	new VL53L1X Long distance ranging sensor In Mass-production  <ul style="list-style-type: none"> • 3rd generation ST ToF sensor with lens • Main feature: Long distance ranging sensor, high speed • Major use cases: <ul style="list-style-type: none"> • Up to 4 meters distance measurement • Programmable FoV • User / object detection • Robotics
---	--	---

資料來源：ST 官網

2015 年的第一代 VL6180X 將紅外發射器、測距感測器和環境光感測器 (ALS) 三者整合在一個即用型的可回焊封裝中，不需繁複的光學和機械設計工序、就能依用戶定義分段執行測距和 ALS 量測為其特點，距離極限為 40 公分。

隨後問市的 VL53L0X / VL53L1X 是完全集成的一維單點測距 (1D ranging) 微型模組；前者有效距離 2 公尺，後者測距頻率高達 50Hz、距離達 4 公尺。不需額外光學元件的輔助，使用者可自行編程接收陣列上的「感興趣區域」(Region of Interest, ROI) 的大小和位置——矩形定義區域範圍，要求感光元件只針對該區域處理影像，再依設計所需自由縮減感測器的視場 (Field of Vision, FOV)，且可提供多區域操作控制。此外，FlightSense 先進的嵌入式光學串擾補償機制，給予設計者更多玻璃外蓋材質選擇。

VCSEL 成 ToF 主流光源，微波將取而代之？

為解決投射光束發散及耦合性欠佳的問題，發散角度小的「垂直共振腔面射型雷射」(VCSEL) 是現階段 ToF 主流紅外光源。然而，雷射光對人體傷害極大，依其危險性分成四個等級；第一級是安全係數最高者，雷射及其光束完全封閉於護罩內部，輸出功率極低、可安全目視，不會對眼睛、皮膚造成傷害。AMS 的 ToF 感測器——TMF8701 1D，也是單點測距的高

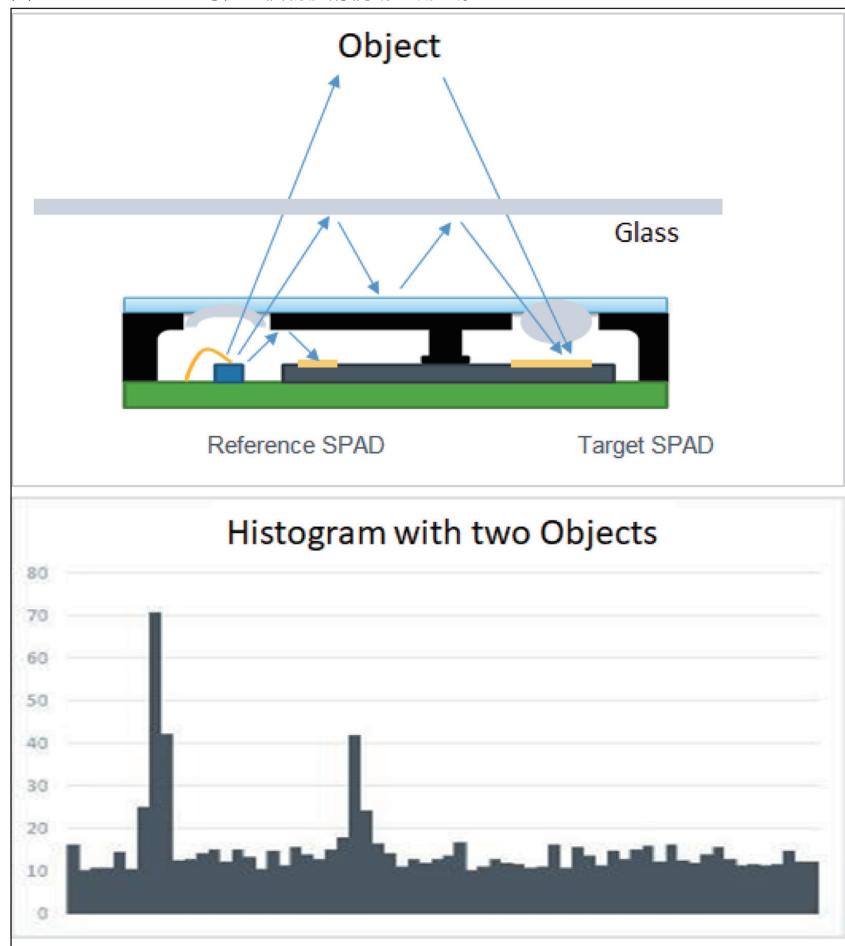
規產品，內建極窄脈寬的時間—數位轉換器 (TDC)，可即時量測 VCSEL IR 投射到物體距離；在測距頻率 60Hz 下，趨近檢測為 0 ~ 10 公分、感測為 10 ~ 60 公分。

TMF8701 1D 亦具有 940nm VCSEL 一級眼睛防護機制；一旦 VCSEL 故障，安全電路會停止 VCSEL 驅動器，避免傷害視力。其基於「直方圖」(histogram) 架構和演算法的 SPAD 畫素設計，同樣可對抗玻璃防護罩的污跡或串擾，可容忍大氣隙 (air gap) 結構、抵消磁阻，還能量測多個物體的視場。以演算法為後盾，其光學

濾波器可實現高環境光恢復能力，陰暗和陽光環境的距離測量誤差在 ± 5% 以內。為力求物體映射的逼真，今年初，AMS 再與 AI 軟體商曠視科技 (Face++) 宣示將共同加速部署 3D 光學感測技術。

關於 VCSEL，前陣子財經界有個有趣的傳聞：微波 (microwave) ToF 將取代現行 VCSEL ToF。理論上，微波 ToF 的有效量測距離會較雷射更大，但要全盤吃下 VCSEL 市場卻未必可行。因為對於需做「影像比對」的應用而言，畫素解析度的需求順位仍高於一切；否則歐司朗 (OSRAM)

圖 4：TMF8701 1D 可從多個物體的視場量測距離



資料來源：AMS 官網：<https://ams.com/time-of-flight1>

圖 5：OSRAM VCSEL 紅外光束借助特殊微透鏡陣列，實現視場 (FOV) 均勻照明及易於安裝



資料來源：OSRAM 官網：<https://www.osram.com/os/press/press-releases/osram-enters-the-3d-sensing-market-with-two-new-vcsels-plpvcq-850-and-plpvcq-940.jsp>

表：TI ToF 相關產品

型號	產品描述	特色
OPT3101	用於連續波趨近感應和測距的高速、高解析度類比前端 (AFE)	<ul style="list-style-type: none"> 1. 整合完整的深度處理管道，包括 ADC、時序序列器和數位處理引擎； 2. 具有內置照明驅動器，可覆蓋大部分目標； 3. 高環境抑制比，即使 130klx 全日照條件仍可正常運作； 4. 時序序列器具有高度可配置性，能針對特定應用提供功耗與性能之間的折衷； 5. 提供包含相位、振幅和環境測量結果的深度資料； 6. 校準子系統支援相位資料校準，可校準溫度和串擾導致的不準確性。
OPT8241	3D ToF 圖像感測器	<ul style="list-style-type: none"> 1. 將 ToF 感應與經優化設計的 ADC、通用可編程定時發生器 (TG) 結合； 2. 以高達 150 f/s 畫面播放速率提供 QVGA 320 x 240 視頻圖形陣列； 3. 內建 TG 控制復位元、調製、讀出和數位化序列； 4. TG 可編程，能靈活優化各項深度感應性能指標，如：功率、運動穩健性、訊噪比和環境消除。
OPT8320	3D ToF 圖像感測器	<ul style="list-style-type: none"> 1. 高性能、高度集成的完整單晶片 (SoC)，用於陣列深度檢測，包括：通用 TG、優化設計的 ADC、深度引擎和照明驅動器； 2. 內置 TG 可靈活優化各種深度感應性能指標； 3. 內置深度引擎根據數位感測器數據計算深度數據； 4. 除相位數據外，深度引擎還提供每個畫素的幅度、環境和標誌及直方圖形式的全陣列統計訊息。
OPT9221	飛行時間控制器 (TFC)	<ul style="list-style-type: none"> 1. 可根據數位化感測器數據計算深度並透過可編程互補金屬氧化物半導體 (CMOS) 平行介面輸出； 2. 提供每個畫素的幅度、環境和標誌等輔助訊息，可實現過濾器和掩碼並動態控制系統配置以實現預期性能； 3. 支援各種分級和「感興趣區域」(ROI) 選項，有助於優化必須處理的數據吞吐量； 4. 9 mm x 9 mm NFBGA 封裝，可嵌入各種終端設備。

資料來源：TI 官網：<http://www.ti.com/sensors/specialty-sensors/time-of-flight/overview.html>

也不會在今年一月，鎖定機器視覺、人臉辨識和物體／建築掃描再推兩款新型 VCSEL 產品——PLPVCQ 850 和 PLPVCQ 940，以相機紅外線照亮標的物，然後將記錄圖像與儲存在系統中的圖像進行比對。或許，微波 ToF 更適合功能單純的防撞雷達。

CAPD 與 SPAD 爭輝，「背照式」ToF 圖像感測異軍突起

有別於 SPAD 架構，Sony 於 2017 年推出的「背照式」ToF 圖像感測器，結合自有電流輔助光子解調器 (CAPD) 與背照式 CMOS 圖像感測器畫素技術，將光電探測器下方的電路分層優化、動態創建電位梯度 (電子傳輸的斜率)，利用畫素中的漂移電流做高速調製，加速距離測量所需的相位差檢測。相較於傳統前照式，背照式在加倍調製頻率的同時，依然保持反射光效率，意即：相同距離量測可獲得更好的深度圖。另一方面，其畫素間距只有 $10\mu\text{m}$ ，號稱業界最小，亦可提高有效「畫素孔徑比」和光收集效率，實現高速距離測量處理並降低光源。

這是 Sony 於 2015 年收購 Softkinetic 公司後的心血結晶，據悉有效量測及深度圖採集的距離可達 5 公尺。Sony 採用 CAPD 技術的 ToF 系列產品統稱為「DEPTHSENSE」，德州儀器 (TI) 和邁來芯電子 (Melexis) 亦是循此路線發展：前者偏重工業機器

視覺 (Machine Vision) 應用，尤其是更小的解析度感測器 (resolution sensors)，涵蓋機器人導航、手勢識別和樓宇自動化，為攝影機客製化設計提供極大靈活度；後者專注於汽車領域，所有感測器均經認證，主要客戶群為一階或二階汽車供應商。

「非蘋」陣營急起直追 3D 感測

3D 感測在去年西班牙世界行動通訊大會 (MWC) 已刮起旋風。奇景光電率先展示與高通合作開發的「SLiM」(結構光影像模組) 成果——基於高通 3D 演算法，以及奇景繞射光學元件和近紅外線 (NIR) 感測器，推出具備 3D 感測和臉部辨識功能的 Android 智慧手機樣品，為「非蘋」陣營樹立新的里程碑，並隨後在 10 月底，宣佈 SLiM 獲終端 AI 晶片商耐能智慧 (Kneron) 用以發展 3D 感測監控方案。有以下幾大賣點：

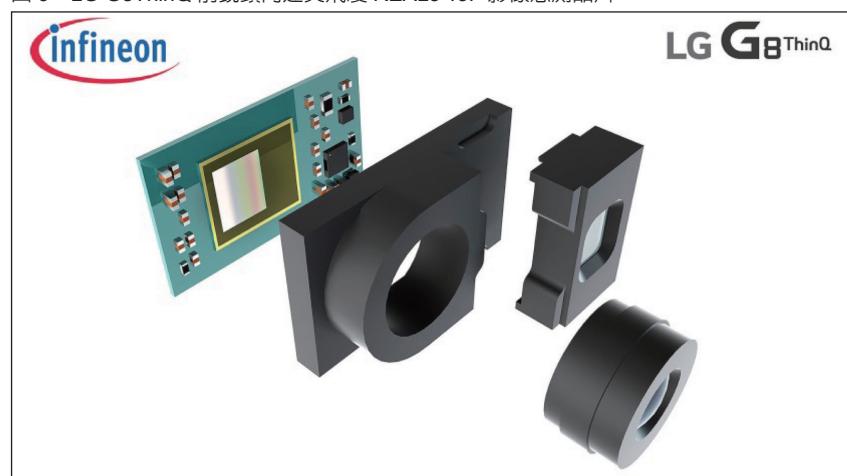
1. 點投射器可將超過 33,000 個隱

形點投射到物體上，建構複雜的 3D 深度圖 (Depth Map)；

2. 深度圖誤差率 < 1%，有效操作距離為 20 ~ 100 公分；
3. 以最複雜的 3D 深度圖建構獨特的臉部特徵，可用於即時解鎖及安全的線上支付；
4. 即使在完全黑暗或陽光明媚下，亦無礙辨識；
5. 通過國際雷射產品標準 IEC 60825 一級認證，確保對人眼無害；
6. 玻璃破碎偵測機制，當點投射器玻璃破裂，會自動關閉雷射。

今年的 MWC 就更熱鬧了，全球首款支援手掌靜脈認證的智慧手機 LG G8ThinQ，前鏡頭即內建英飛凌 REAL3 ToF 影像感測晶片——攜手 PMD Technologies 的 3D 點雲 (Point Cloud，係指 3D 掃描所產生之空間中的資料點集合) 演算法聯合打造。展出期間，英飛凌也順勢發佈第四代 REAL3 感測晶片——IRS2771C，樣品於今年 3 月供應，第四季量產；其尺寸僅

圖 6：LG G8ThinQ 前鏡頭內建英飛凌 REAL3 ToF 影像感測晶片



資料來源：英飛凌提供

有 $4.6 \times 5\text{ mm}$ ，卻有 $150k$ (448×336) 畫素輸出，幾近 HVGA 標準。他們預言，未來五年內多數智慧手機都將搭載 3D 鏡頭，而英飛凌有信心將在其中佔有相當大的份額。

ToF 當紅，但「立體視覺 + 結構光」雙鏡頭仍具潛力

無論結構光或 ToF 都需內嵌 IR 收發模組，且畫素陣列對 940 nm 紅外線極為敏感，須透過背景照明電路抑制，製程和成本自然高出一截。因此，雖然三鏡頭、五鏡頭在今年 MWC 頻搏版面，但晶片廠並未拋棄卻以基本雙鏡頭實施 3D 感測的想法：AMS 與高通聚焦 3D 成像的前置應用，計劃在 Snapdragon 平台發展「主動 3D 雙目攝像解決方案」參考設計，實現安全線上支付及動態深度臉部掃描。無獨有偶，聯發科技 (Mediatek) 為兼顧良率和可量產性，搶先在去年 9 月面向刷臉支付發表基於驥力 P60 與 P22 的「立體視覺 + 結構光」混血產品。

它是基於奇景光電的 IR 發射器與兩顆紅外線鏡頭，輔以曠視科技的人臉辨識、美顏和建模的參考設計，藉製程與 AI 演算法簡化校準流程並強化環境光抗擾度。不過，誠如英飛凌官方所說，ToF 反應快速、且不受外部光源影響，無論室內、室外的辨識率都更為出色，能更廣泛應用在各種生物驗證和 AR/VR 等應用。近年因先進駕駛輔助系統 (ADAS) 水漲船高的

「光達」(LiDAR)，亦是 ToF 光學測距應用：以紅外線脈衝波反射、掃描出物體輪廓，再經由已知光速計算脈衝光束從發射到接收的飛行時間，進而換算出物體的相對距離和速度。

著名汽車 ToF 用例： LiDAR、車內檢測&手勢識別

「光達」3D 掃描可補強傳統雷達無法識別物體細節，以及錄影鏡頭在暗光或逆光條件下識別效率差的弱點；雖然 HVGA 在手持式裝置是平衡功耗和效能的折衷規格，但若是汽車應用，考慮到車內顯示環境及內容可傳達性，還是需要更高解析度的加持才成。亞德諾 (ADI) 首推結合 Full HD CMOS 影像感測器和 VGA ToF 感測器模組的解決方案，能完美疊合 (overlapping) 實際影像，準確量測汽車與障礙物的距離，感測角度較

傳統雷達佳，可為倒車系統提供更大範圍的碰撞偵測預防。

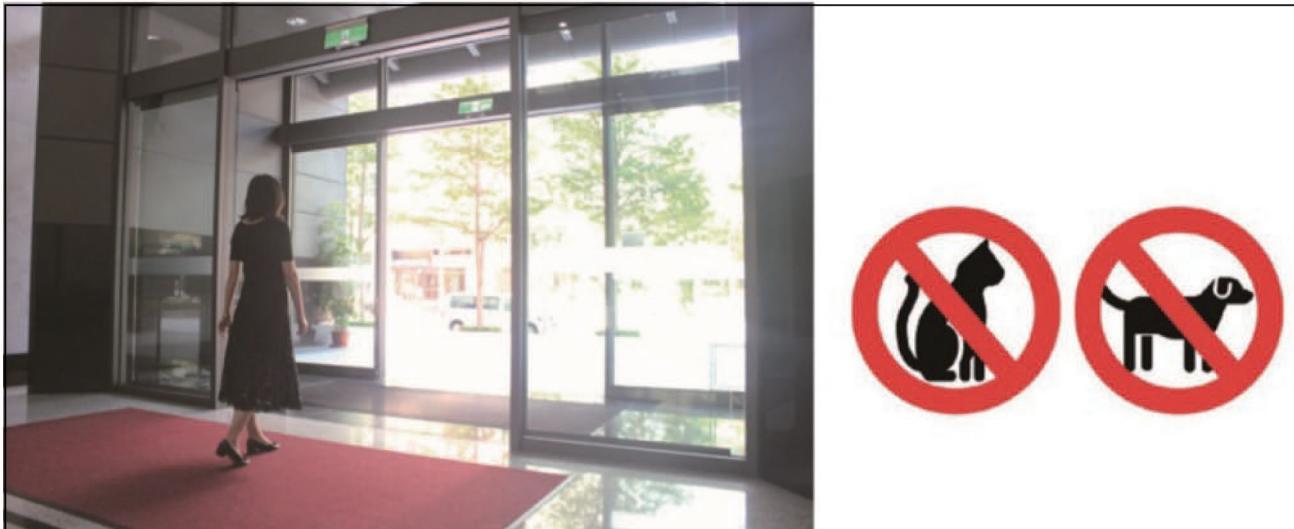
其 ToF 模組可經由複合影像廣播訊號 (CVBS) 介面輸出 RGB Color Image、Depth Mapped Image 和 IR Image 三種影像檔，ToF 解析度可達 640×480 ，採用 850 和 940nm 兩個波長雷射，室外、內皆適用，夜間行駛也依然清晰 (850nm 較接近可見光、夜視易產生「紅爆」，而 940nm NIR 不會被人眼察覺，更適合黑暗環境)。隨著車內監測系統不斷發展，未來的應用對解析度和整合方案的要求將愈發嚴苛；ADI 對車內檢測系統打造的 ToF 技術方案，可在低能耗條件下，支援更寬的視場角度，為車內駕駛員監控和手勢識別設備提供出色靈敏度和豐富功能性。

圖 7：不只監控車外環境需要寬廣視場角度，車內檢測亦然



資料來源：ADI 提供

圖8：ToF 3D 門禁僅允許人類通行，有效謝絕不受歡迎的非人類訪客



資料來源：ADI 提供

VGA 影像解析度等級 ToF：工業／商場篩選更高效

VGA 影像解析度等級的 ToF 搭配 ADI 另一元件 ADDI9033，亦可提高工業自動化產線的物件篩選辨識度，或用於建置虛擬電子圍籬。具人臉辨識的 ADI ToF 3D 立體影像感測可辨識空間中人與物體的相對位置距離，一改紅外線反射之自動門難以精準管理的缺點，可有效摒除野生動物亂入商場。ADI

ToF 還能應用於商業空間的 3D 人流統計，利用影像技術分辨身高，有效分辨進出人流並計數總量。有別於大多數傳統 3D 人流方案須安裝至少兩台立體攝影機，ADI 的 ToF 解決方案僅需一台 ToF 攝影鏡頭架，可設於門框上方且無安裝高度限制。

特別一提的是，去年 VIVO 曾大動作展示「零光感 3D 人臉識別」功能，強調不受環境光影響、可 24 小時全天候輕鬆解鎖，正是源自與 ADI 合作開發 ToF 3D 超感

應技術而來。透過 ToF 紅外景深鏡頭，能更準確的識別用戶面部巨大數量的立體特徵，大幅提升安全性，目前已成功與支付寶的支付功能對接。最後，統整選購 3D 感測元件的重點指標在於：光源、覆蓋距離、採樣頻率 (Hz)、時間控制、脈衝／連續波訊號處理的效率和精度，以及演算法的畫龍點睛。這些，將決定機器視覺的「眼力」好壞，也往往攸關後續產出的產品／服務品質。 **CTA**

COMPOTECHAsia 檢書
每週一、三、五與您分享精彩內容
<https://www.facebook.com/lookcompotech>

有 $4.6 \times 5\text{ mm}$ ，卻有 $150k$ (448×336) 畫素輸出，幾近 HVGA 標準。他們預言，未來五年內多數智慧手機都將搭載 3D 鏡頭，而英飛凌有信心將在其中佔有相當大的份額。

ToF 當紅，但「立體視覺 + 結構光」雙鏡頭仍具潛力

無論結構光或 ToF 都需內嵌 IR 收發模組，且畫素陣列對 940 nm 紅外線極為敏感，須透過背景照明電路抑制，製程和成本自然高出一截。因此，雖然三鏡頭、五鏡頭在今年 MWC 頻搏版面，但晶片廠並未拋棄卻以基本雙鏡頭實施 3D 感測的想法：AMS 與高通聚焦 3D 成像的前置應用，計劃在 Snapdragon 平台發展「主動 3D 雙目攝像解決方案」參考設計，實現安全線上支付及動態深度臉部掃描。無獨有偶，聯發科技 (Mediatek) 為兼顧良率和可量產性，搶先在去年 9 月面向刷臉支付發表基於驥力 P60 與 P22 的「立體視覺 + 結構光」混血產品。

它是基於奇景光電的 IR 發射器與兩顆紅外線鏡頭，輔以曠視科技的人臉辨識、美顏和建模的參考設計，藉製程與 AI 演算法簡化校準流程並強化環境光抗擾度。不過，誠如英飛凌官方所說，ToF 反應快速、且不受外部光源影響，無論室內、室外的辨識率都更為出色，能更廣泛應用在各種生物驗證和 AR/VR 等應用。近年因先進駕駛輔助系統 (ADAS) 水漲船高的

「光達」(LiDAR)，亦是 ToF 光學測距應用：以紅外線脈衝波反射、掃描出物體輪廓，再經由已知光速計算脈衝光束從發射到接收的飛行時間，進而換算出物體的相對距離和速度。

著名汽車 ToF 用例： LiDAR、車內檢測&手勢識別

「光達」3D 掃描可補強傳統雷達無法識別物體細節，以及錄影鏡頭在暗光或逆光條件下識別效率差的弱點；雖然 HVGA 在手持式裝置是平衡功耗和效能的折衷規格，但若是汽車應用，考慮到車內顯示環境及內容可傳達性，還是需要更高解析度的加持才成。亞德諾 (ADI) 首推結合 Full HD CMOS 影像感測器和 VGA ToF 感測器模組的解決方案，能完美疊合 (overlapping) 實際影像，準確量測汽車與障礙物的距離，感測角度較

傳統雷達佳，可為倒車系統提供更大範圍的碰撞偵測預防。

其 ToF 模組可經由複合影像廣播訊號 (CVBS) 介面輸出 RGB Color Image、Depth Mapped Image 和 IR Image 三種影像檔，ToF 解析度可達 640×480 ，採用 850 和 940nm 兩個波長雷射，室外、內皆適用，夜間行駛也依然清晰 (850nm 較接近可見光、夜視易產生「紅爆」，而 940nm NIR 不會被人眼察覺，更適合黑暗環境)。隨著車內監測系統不斷發展，未來的應用對解析度和整合方案的要求將愈發嚴苛；ADI 對車內檢測系統打造的 ToF 技術方案，可在低能耗條件下，支援更寬的視場角度，為車內駕駛員監控和手勢識別設備提供出色靈敏度和豐富功能性。

圖 7：不只監控車外環境需要寬廣視場角度，車內檢測亦然



資料來源：ADI 提供

mmWave 延伸 3D 感測視線 幫汽車／機器開「天眼」

■文：任莖萍

毫米波 (mmWave) 是指波長介於 1 ~ 10 毫米的電磁波，工作頻率約在 10 ~ 300 GHz，高於無線電波、低於可見光及紅外線，兼具光波導引與電磁波導引特性；雖已有 140 GHz 天線樣品問世，但 24、77、79、94 GHz 是當下熱門頻段，而 60 GHz 有加溫之勢。如

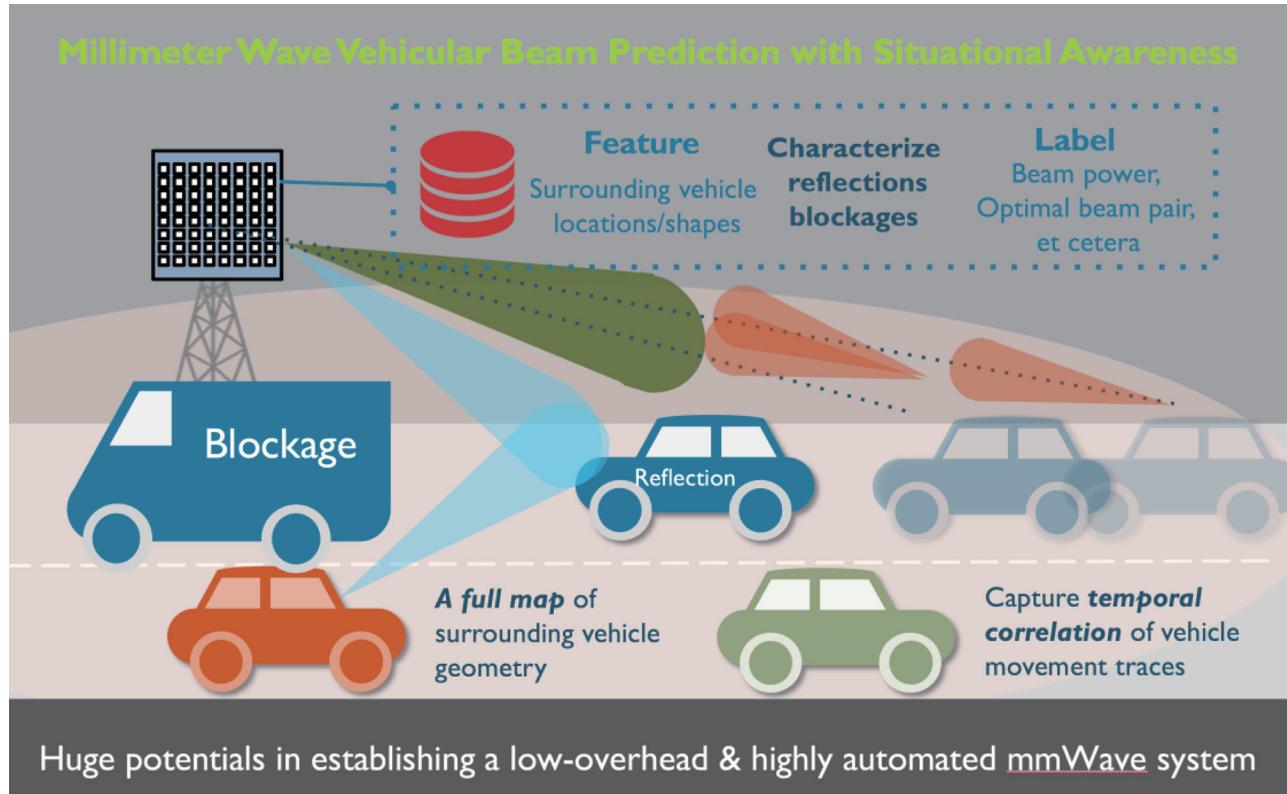
前文所述，車用雷達是毫米波感測的重點項目，高速或自動駕駛尤需拉大感測距離，行車安全才能多一份保障；美國國家公路交通安全管理局 (NHTSA) 已將自動緊急煞車 (AEB) 系統列為新車標配，中國大陸 2018 年新版新車評價指標 (C-NCAP) 亦納入主動安全系統，

皆少不了毫米波雷達相助。

77GHz 長距 + 79 GHz 短距將成範本

24GHz 因「繞射」(diffraction，電磁波遇障礙物會偏離原來直線傳播路徑) 能力強，且訊號損失、衰減小，是最早初

圖 1：由於機動性高，光束掃描不足以滿足汽車應用低延遲要求，而毫米波可利用車輛和機器學習工具的態勢感知預測波束訊息，包括最佳波束對指數、波束功率及聯合優化



資料來源：<http://utsaves.org/initiatives/millimeter-wave-vehicular-beam-prediction-with-situational-awareness>

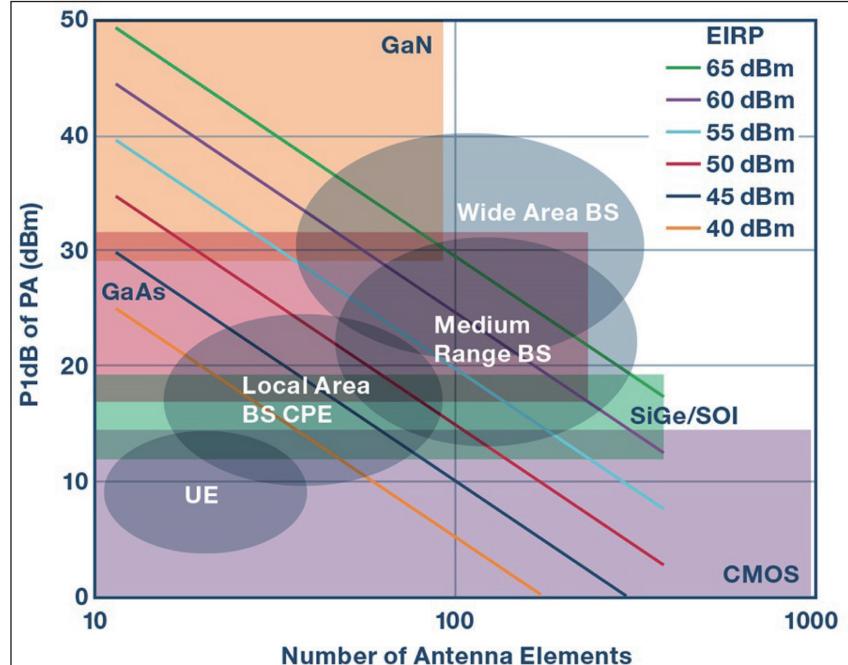
試啼聲者。然由於歐洲早先已將 24GHz 分配給天文和電信工業應用，為減少干擾，歐盟決議限制 24GHz 發射功率，使距離大幅受限；且解析度也受限於頻寬、無法拉高，無法辨識物體具體樣貌，故只能用於車側盲點偵測 (BSD)、車道偏移警示 (LDW)、自動跟車等短距離感測。77GHz 頻率高、波長短，距離和速度的檢測精度較高，適用於長距離自動緊急煞車、適應性巡航 (ACC)、前方碰撞預防 (FCW) 等。

2015 年世界無線電通訊大會定調將 77GHz 作為車載雷達之用，已成國際標準；至於 79GHz，偵測角度達 120 度，遠高於 24GHz 的 60 度和 77GHz 的 30 度，視角更見寬闊，4GHz 的頻寬亦在傳輸速率上大勝；惟距離解析度 (range resolution)，能清楚分辨兩個物體的最近距離) 不如 77GHz，但足以取代 24GHz 短距雷達：頻寬更大、抗干擾能力更強、設備更小、更易於安裝。還有一個較少被提及的原因：利於車用雷達介面統一。現行 24GHz 天線採用的是 SMA 介面，而 77GHz、79GHz 則是透過「波導」(waveguide) 介面饋入訊號。

同屬高頻製程，有利器件集成

同樣採用高頻毫米波加上製程沿革，更有利集成：從砷化鎵 (GaAs) 走到矽鋁 (SiGe)，再進入互補金屬氧化物半導體 (CMOS) 時代，電晶體密度更高、功耗更低、

圖 2：各種基於發射器功率的毫米波無線電製程



資料來源：ADI 官網：<https://www.analog.com/en/technical-articles/bits-to-beams-rf-technology-evolution-for-5g-millimeter-wave-radios.html>

體積更小——英飛凌 (Infineon)、亞德諾 (ADI)、電裝天 (Fujitsu Ten)、德州儀器 (TI) 皆採 CMOS 製作高頻毫米波雷達收發晶片，亦順勢拉開將微控制器 (MCU)、數位訊號處理器 (DSP)，與訊號放大器、射頻 (RF) 等類比前端 (AFE) 整合序幕。自動因應多變的行車環境動態調整頻率，是車用雷達感測的另一挑戰，以便自主感知周遭車輛雷達的頻率、便即時應對進退，發揮車聯網 (V2X) 效益。

但先決條件是：雷達感測器必須能穿透塑料、牆壁、衣服、玻璃等阻隔，並經得起風霜雨雪霧和強烈光照等氣候考驗。隨著元器件走向整合，導入技術門檻變低、成本也日漸親民，毫米波開始試探汽車之外的應用，例如，24GHz 可用智慧家庭、工業機器人等短距感

測控制；而 60GHz 因具備以下特性，還能用於對雜訊干擾敏感的生命體徵感測或有距離層次的人機互動，頗具黑馬之姿：

1. 非授權頻段：聯邦通信委員會 (FCC) 大手筆為 57 ~ 64GHz 之間的免授權頻段分配 7GHz 非信道頻譜，足以實現多重 gigabit 等級的射頻鏈路，大數據吞吐不成問題；
2. 窄波束天線：60GHz 無線電波束非常窄，可將多個收發裝置安裝在同一處所，互不干擾。共址無線電可基於橫向、角度間隔或交叉極化天線而彼此隔離，且易於安裝和排列；
3. 訊號會因氧氣吸收而衰減：這雖限制了 60GHz 鏈路可覆蓋的距離，但結合小波束特性反會提高對其他 60GHz 無線電干擾的免

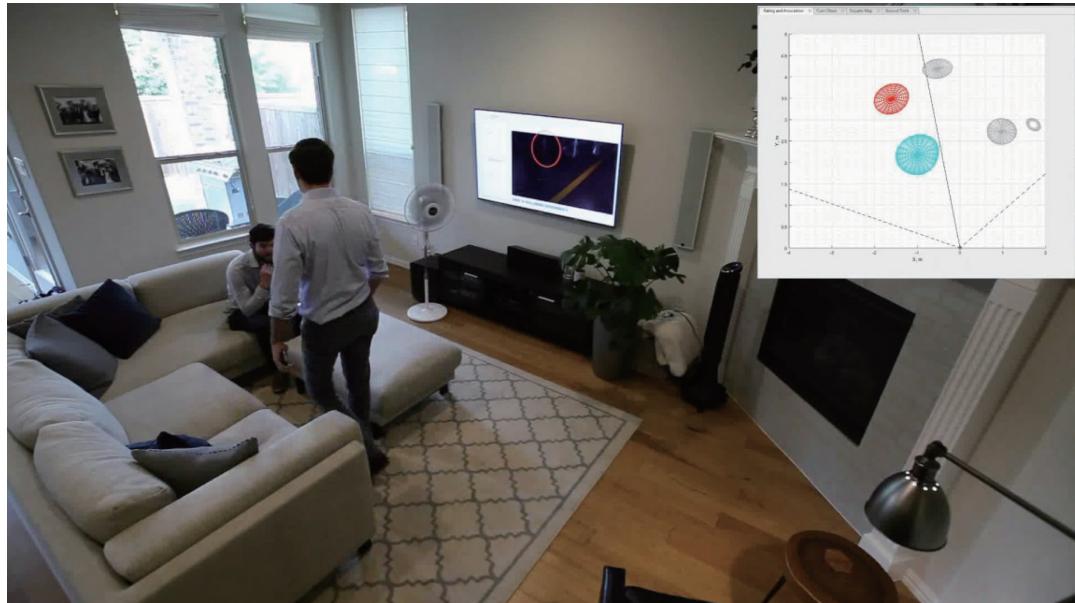
疫力。

TI 在毫米波的產品線佈局脈絡就很清晰：AWR1x 系列符合汽車安全完整性等級 ASIL-B 要求，例如，將 77GHz 毫米波感測單晶片 (SoC)——AWR1843 安裝在保險桿後面，能遠至 40 公尺之外自動搜尋空置車位、停車，或偵測行人、監控車內駕駛人／乘客安全；而 IWR1x 亦將 AFE、類比數位轉換器 (ADC) 和處理器整合成一個 SoC，系統設計者不必再費神研究複雜的訊號鏈走線，又能極小化器件尺寸、功耗和成本，更重要的是：簡化了硬體配置、校準和軟體開發過程——其軟體開發套件 (SDK) 囊括多種演算法範例和軟體庫。

單柱難擎天，「感測融合」是解方

整體而言，「毫米波」雷達可透過訊號反射，確定物體的距離、速度和角度（即使標的物體很小），且能同時識別多個目標。相較於紅外線、雷射、視像等光波導引，毫米波導引對煙霧、灰塵的穿透能力強，具有全天候、全天時感測特性。業界普遍認為，實現先進

圖 3：使用 60GHz mmWave 感測器進行人員分類（右上角紅色和藍色標示），以及誤檢測緩解（灰色）



資料來源：TI 官網：https://e2e.ti.com/blogs/_b/industrial_strength/archive/2018/11/07/leveraging-the-60-ghz-rf-band-for-intelligent-industrial-mmwave-sensing

駕駛輔助系統 (ADAS)，一台車至少需要「1 長 + 4 中短」，共 5 個毫米波雷達支援才夠；其中，近距探測因回波和發射波的間隔非常短，多以調頻連續波 (FMCW) 取代週期性發射的短脈衝。至於要達到 Level 3 以上的自動駕駛水準，「感測融合」(Sensors Fusion) 是必要手段。

例如，光達 (LiDAR) 是將光線投射到物體，經由反射形生 3D 輪廓、找出表面特性以判斷標的物，主要作用是提供「高角度」解析的距離資訊。905nm NIR 是其常用光源，角度解析度 < 0.1 度，遠遜於利用電磁波傳導的毫米波——24GHz 通常 > 20 度，高頻 77GHz 也還有 5 度以上的水準，但光達的好處是：可提供更為精細的 3D 影像，確切辨認偵測目標的形體。毫米波的遠視能力雖較佳，可探測 200 公尺以上的遠方物體，

卻無從辨認具體為何物？汽車、機車、單車或行人？自然無法推估障礙物的行進速度，亦無法及時採取適當因應措施。

理想場景是：先由毫米波負責大範圍初步搜索，其次由光達負責精準量測距離、方位並回報中控，配合一般近紅外線 (NIR) 攝影機仔細分辨障礙物類型後，採取應變措施；此外，夜視環境恐還需要紅外線雷達的輔助。另有人主張，應再將遠紅外線 (FIR) 攝影機加入掃描陣容，藉由物體的熱幅射影像協助判斷障礙物是否為活體？是動物、一般成人或老弱婦孺？該在多遠的距離觸發應對機制？當然，這還得視市況前景與建置成本而定。

CTA