

# ToF 近觀、mmWave 遠眺 自主移動好眼力！

■文：任蒼萍

感測器是物聯網 (IoT) 的基礎，而 3D 感測器正迅速席捲各類垂直應用。Research And Markets 新近發佈報告顯示，2018 年全球 3D 感測器市場規模為 48.57 億美元，預估 2019～2027 之年複合成長率 (CAGR) 為 32.5%，屆時市值將達 719.14 億美元。3D 感測採主動範圍、高幀速提供深度影

像，這些攝影機配有可照亮場域的紅外線 (IR) 光源和可捕捉反射紅外光的 CMOS/CCD 感測器。其中，深度測量是基於飛時測距 (Time of Flight, ToF) 原理——深度與 IR 訊號到達標的物並返回所需的時間成正比，綜合每個像素獲得的深度測量值而產生深度影像。

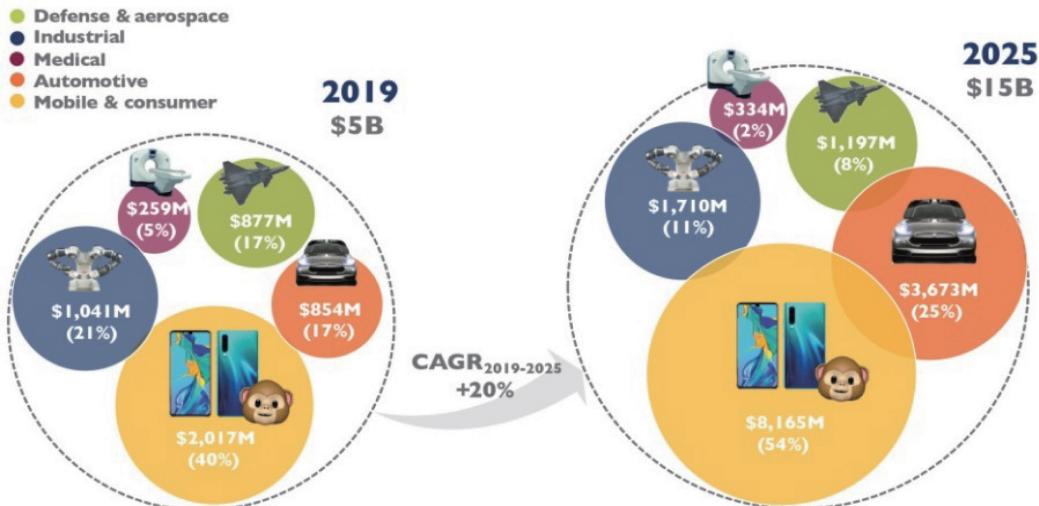
## 結構光開啓 3D 感測風潮，ToF 應用更趨多元

市場研究和策略諮詢公司 Yole Développement 對於全球 3D 成像感測市場的期望因預估期間不同而略有出入：將從 2019 年的 50 億美元增長到 2025 年的 150 億美元，翻漲三倍、CAGR 達 20%。

圖 1：Yole Développement 預估 2019～2025 年 3D 成像感測市場變化

### 3D sensing and imaging 2019-2025 market forecast (in \$M)

(Source: 3D Imaging & Sensing 2020 report, Yole Développement, 2020)



資料來源：[http://www.yole.fr/PowerModulePackaging\\_HitachiPowerModule.aspx](http://www.yole.fr/PowerModulePackaging_HitachiPowerModule.aspx)

其中，手機和消費電子的 3D 感測將從現今的 20 億美元成長至 80 億美元、汽車應用將從不到 10 億美元躍升至 37 億美元，而工業、醫療和國防應用也將推動市場——儘管增速很慢。受到 2017 年蘋果 iPhone X 臉部解鎖的啓發，兩年後 Android 手機製造商紛紛仿效、但卻選擇了不一樣的道路：棄結構光、改採 ToF 相機，並將其置於手機背部。

兩者相較，ToF 模組只需垂直腔表面發射雷射器 (VCSEL) 和發射器上的擴散器，可簡化設計架構；且背照式感光元件 (BSI) 可接受大角度的入射光，提升受光效率和成像品質。因此，Yole 較看好背照式；加上 Android 龐大生態系助陣、應用多元——例如，強化「散景」和縮放使擴增實境 (AR) 和遊戲更加生動，2025 年普及率將達 42%、將成為七成新型智慧手機的標配，而背照式份額將是正面感測器的兩倍。他們並提到，新進者 Vertilite (縱慧光電) 無需編

碼 VCSEL 輸出光束、易於生產的 ToF 泛光發射器頗具吸引力，去年已贏得華為 3D 感測訂單。

## 自駕車、無人機、機器人，動靜井然有序

ToF 乃經由向標的物發射連續特定紅外光脈衝訊號以推估相距多遠？相遇時間？或藉由相位角度估量物體的三維景深，ToF 相機模組可擴及智能車、機器人、智能家庭等領域。例如，用於手勢辨識或偵測車內動靜，自駕車高度依賴的光達 (LiDAR) 亦是基於 ToF 技術，差別在於：ToF 相機是連續波調變，可實現「像素級」測量；而光達是以快速掃描取勝、即時性較佳，但因為數據點較稀疏，畫質不如 ToF 攝影機，適合長距、廣角偵測。對應智能車的 ADAS，無人機 (Drone/UAV) 也有「APAS」(先進飛行輔助系統)，新一代無人機通常會配備 ToF 防撞系統。

ToF 感測器在 2016 年初入無

人機，能藉由「單次拍攝」測量全場景之標的物距離、繪製 3D 環境模型，懸停時亦可高速旋動做 360 度全方位掃瞄，用於物體掃描、室內導航、避障、手勢導引、跟蹤物體、測量體積、測高、3D 攝影等；可單獨使用，也可將視覺影像、超音波、ToF／光達或毫米波 (mmWave) 雷達做「感測器融合」(Sensors Fusion)。美中不足的是：飛行中 ToF 只能做單方向偵測、易受外在環境光影響且高速處理運算成本高。ToF 還能為機器人開眼，小至掃地機器人、大到無人搬運車 (AGV)／自主移動機器人 (AMR) 皆有採用。

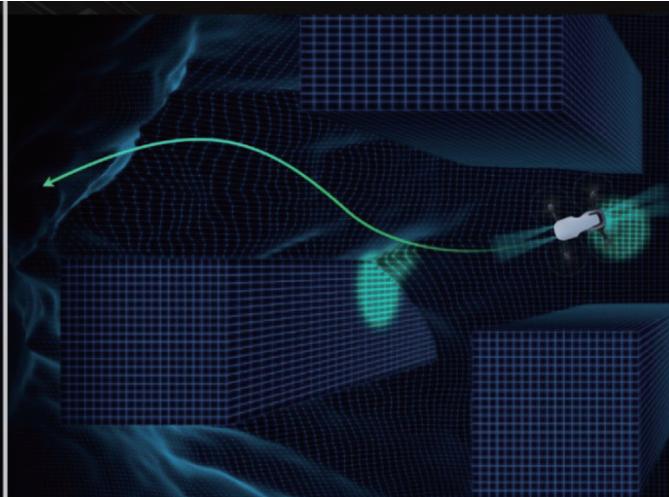
## 毫米波感測實現邊緣 AI

智能感測的另一重要趨勢是借助電波強度，將目光放得更遠。將毫米波雷達晶片與傳統感測器集成，可進行接近 (proximity)／在場 (Presence) 偵測、儲罐液位測量、人員活動探測、計數、移動監視，或自動化設備之間／人機協作

圖 2：用戶打開 APAS 後，Dji Mavic Air 無人機會主動針對前、後方向的障礙物繞行



資料來源：<https://www.dji.com/tw/mavic-air>



的安防。ResearchAndMarkets 認為，雲端機器人技術將從行動邊緣運算 (MEC) 以及基於毫米波頻率的 5G NR (新無線電) 商用受益匪淺——當 5G NR 採正交分頻多工調變 (OFDM)，需將信道壓縮到毫米波範圍內。嵌入毫米波雷達的機器人可進行智能定時和定位，使其具有相對且運動的感知能力以做出回應。

再者，隨著感測器數量越來越多，若要將所有數據全數直上雲端，顯然不夠有效率。於是，擁有人工智慧 (AI) 的邊緣設備遂成優選方案 (參閱：《「邊緣 AI」是 IoT 裝置與實體感測器的入口》 <http://compotechasia.com/feature/2019/1111/43272.html> 一文)。毫米波感測器可透過兩種方式實現邊緣 AI。一是感測區域大、速度快、角度廣、能反射不同標的物的本質，可檢測、辨別視野中不同對象的特徵；二是經由集成晶片

內嵌的微控制器 (MCU) 和數位訊號處理器 (DSP) 就地處理、分類邊緣訊息。

## 毫米波的短板&疑慮

然而，毫米波受限於視距 (LOS) 無法大幅移動、訊號繞射能力差、易受障礙物屏蔽，以及每隔 1,000 呎就需密集建置基頻單元 (BBU) 為其缺點。此外，有人擔心 24GHz 或 37GHz 頻段將會干擾氣象衛星感測、對天氣預報的準確性構成威脅，要求必須強制降低毫米波發射功率，這將限縮有效範圍，故應盡可能釋出 3.5GHz 和 3.7 ~ 4.2GHz「中頻帶頻譜」更為重要，以符合衛星電視的 C 波段 (4 ~ 8GHz) 頻寬。不過，新的供應商正另尋其他衛星頻譜區域解此疑慮，如：Ku (12 ~ 18GHz)、Ka (26.5 ~ 40GHz) 和 V (40 ~ 75GHz) 波段。

市調公司 IDTechEx 日前

預言，未來二十年移動即服務 (MaaS) 將迅速拓展，2030 年自駕系統市場達 570 億美元，2040 年市值將增長三倍以上、達 1,730 億美元，滿足總旅行需求的 30%，另全球 SAE Level 3+ 自駕車和 robotaxi 服務將攜手形成 2.5 萬億美元的市場。一般來說，毫米波多用於取得中長程 (> 200 公尺) 的距離與速度，較不易探測到緊挨在車輛旁邊的人物；然特別一提的是，聯發科 (MediaTek) 去年發佈一款名為「Autus R10」(MT2706) 的毫米波「超短距雷達平台」(USRR)，標榜探測範圍為 10 公分 ~ 20 公尺，最快今年將導入設計。

## 毫米波能否取代光達？ 「角解析度」是關鍵

「Autus R10」工作頻率為 76 ~ 81GHz (對應波長約 4 毫米)，能檢測小到幾毫米的運動，

圖 3：毫米波雷達可實現超精準偵測，打造智能空間



資料來源：佐臻公司：<https://www.jorjin.com/>

可取代超音波近身偵測並獲得更精確的解析度。有鑑於毫米波雷達較不受天氣影響，有些自駕車業者主張以毫米波雷達取代光達，但事實是：兩者仍有互補需要，關鍵在於「角解析度」。它是指儀器能分辨遠處兩件細小物件下所形成的小夾角，是衡量光學儀器「解像能力」的指標——數值越小、解像能力越高，常以「瑞立判據」(Rayleigh criterion) 作為標準；而

在相同範圍內，兩個相等目標可分開的最小角度取決於光束的發散度，是波長和孔徑大小的函數。

改進的角解析度可檢測到較小的物體，並區分周圍多個物體。以近紅外線為訊號源的光達，即擁有優異的角解析度 ( $< 0.1$  度)；反觀 24GHz 毫米波雷達僅能聚焦至 20 度、即使 77GHz 高頻也只有 5 度。簡言之，毫米波遠視能力雖佳，卻因影像不夠精細且欠缺

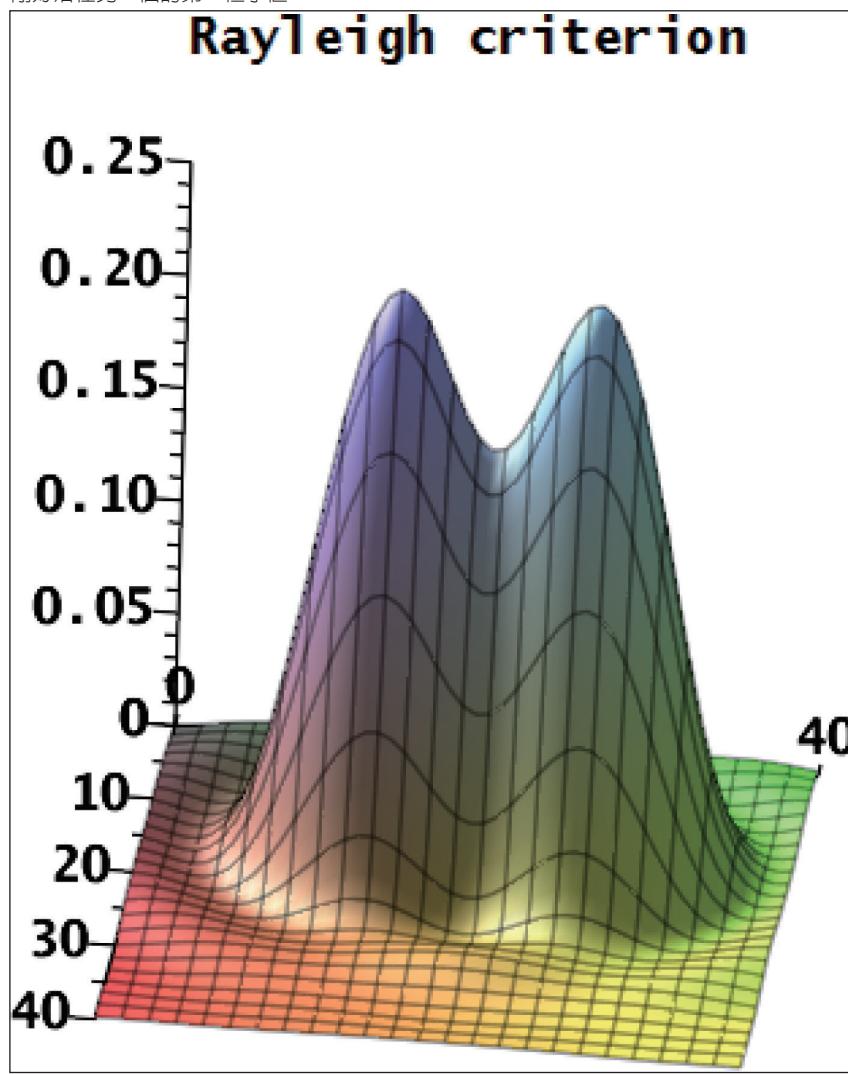
速度數據，很難細辨具體人／物特徵（參閱：《mmWave 延伸 3D 感測視線幫汽車／機器開「天眼」》<http://www.compotech.com.tw/feature/2019/0315/41318.html> 一文）。這樣的爭論在 2016 年特斯拉 (Tesla) 自駕路測發生死亡車禍後更趨激烈。

現階段業界的共識是：毫米波雷達只能視為 ADAS，若要達到 L4 ~ L5 自駕車等級，就非光達不可！同屬無人載具，無人機亦是要角，利用軟體做感測器融合彙整多方數據。去年，新加坡無晶圓廠毫米波晶片 (MMIC) 供應商 arQana 即宣佈投入 5G 毫米波相控陣技術研發，用於 5G 蜂巢基礎設施、無人機檢測雷達和 Ka/Ku 頻段的行動衛星通訊 (SOTM)；近期則有工程設計公司攜手無人機系統 (UAS) 廠商，開發 60GHz、可負重 250 公斤的重型無人機，使往返於建築工地搬運建材。60GHz 的免費、未授權特性正吸引大廠紛紛搶進。

## 免費、未授權秀色可餐，60GHz 揪戰火

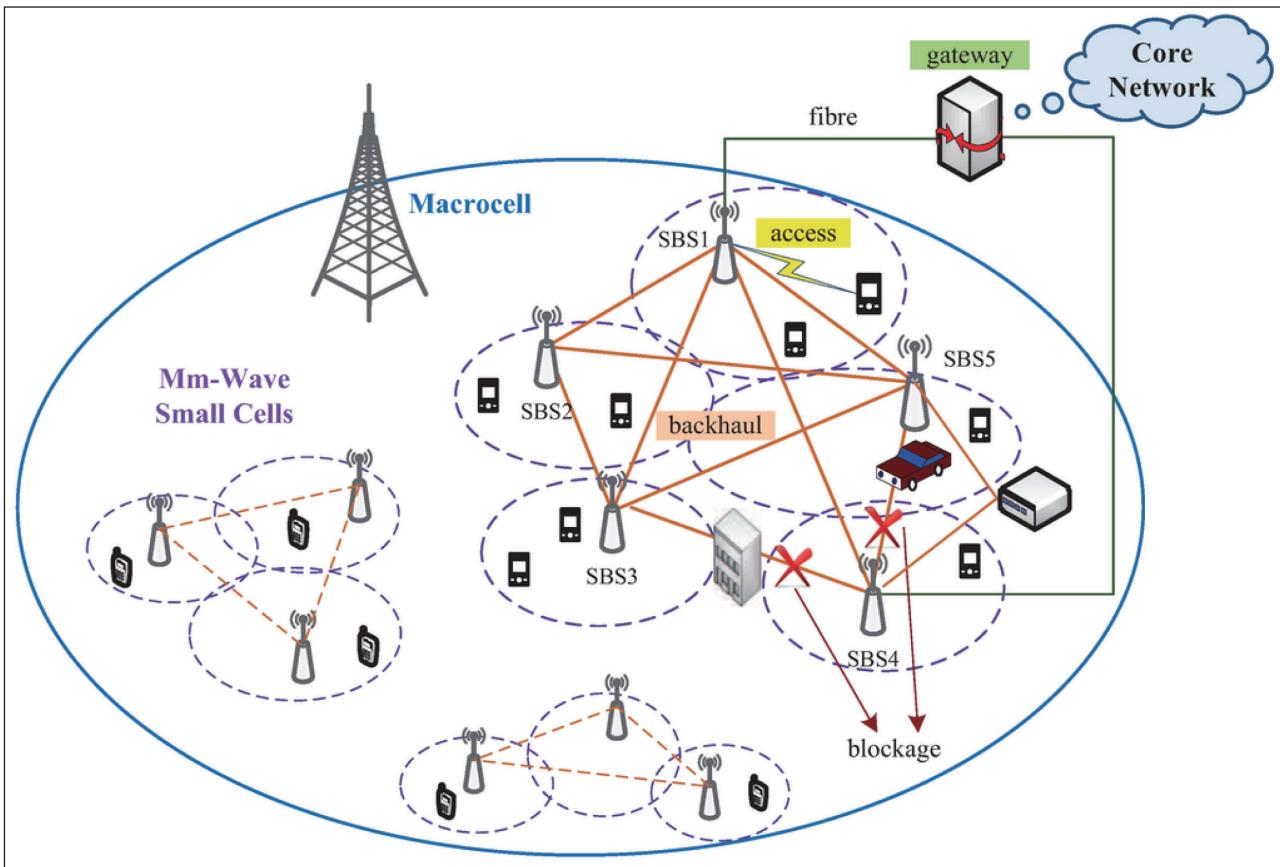
徠卡測量系統 (Leica Geosystems) 已要求聯邦通信委員會 (FCC) 允許在 60 ~ 64GHz 航行無人機，Vayyar Imaging 正遊說交互式運動感應設備在 57 ~ 64GHz 運作，3GPP R17 亦擬將 5G 標準擴展到 60GHz 頻段。眼見 60GHz 魅力無法擋，因擔心太多設備加入 60GHz 而徒生干擾，高通 (Qualcomm)、臉書

圖 4：「瑞立判據」(Rayleigh criterion)：兩個相等強度的點光源，其中一個的中央極大值，剛好落在另一個的第一極小值



資料來源：<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%88%86%E8%BE%A8%E7%8E%87>

圖 5：5G 毫米波回傳系統



資料來源：<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/892>

(Facebook)、谷歌 (Google)、英特爾 (Intel) 和三星 (Samsung) 等公司已成立 60GHz 共存研究小組，敦促 FCC 為 60GHz 頻段解決技術和政策問題，共同訴求是：更明確保持雷達技術與「場強擾動感測器」 (field disturbance sensors) 之間的合理共存。

尤其，後者所需功率高於目前允許值。同時佔盡 Wi-Fi 與 5G 地利的高通一直是 802.11ad (WiGig) 的積極拓荒者，旨在實現 Gbps 高速無線通訊，自不希望出現太多與之爭利者。Facebook Terragraph 技術亦選定 60GHz 作為網狀網路 (Mesh) 的回程 (Backhaul)，經由

固定無線存取 (FWA) 搭配毫米波創建分佈式無線網狀網路，期以最小成本提供光纖等級的連網速度，兼顧城、郊對高速互聯網的需求。至於 60GHz 雷達感測器的用途，除了測量物體的速度、距離和角度，還可結合機器學習 (ML) 做手勢識別、遠距心率檢測、人員追蹤甚至物料分類等。

整體而言，自動駕駛需要的是一整套感測器、而非獨立的某種感測技術。基於 ToF 的光達強在可「鳥瞰」全景、提供全面視角，以便創建即時 3D 地圖，可顯示車輛、道路設施與行人的形態和深度，惟「遠眺」時的精度與近身觀

測相去甚遠，缺乏細節供識別、分類之用（這部分仍須仰賴高清紅外攝影機），恐有盲點存在，且成本依舊居高不下成為市場阻礙，壓低至 1,000 美元是初步目標。下一個須超前思考的問題是：當自駕車滿街跑後，一旦直接打照面時，光達是否會因光源干擾導致車上乘客陷入危險？下一篇文章中，有業者提出相關解方。 