

不只測距！高清 3D 深度感測，ToF 特寫人物神態

■文：任苙萍

研調機構 MarketsandMarkets 預估，今年全球飛時測距 (ToF) 感測器市場規模約 28 億美元，2025 年將達 69 億美元，期間年複合成長率 (CAGR) 為 20%，智慧手機與汽車為主要動力。由於快速獲取深度影像在機器人、人機交互和場景建模等皆應用廣泛，加上 3D 機器視覺 (Machine Vision) 在航天國防、消費電子和醫療保健等行業逐漸推展以及智慧工廠的廣為部署，都讓這

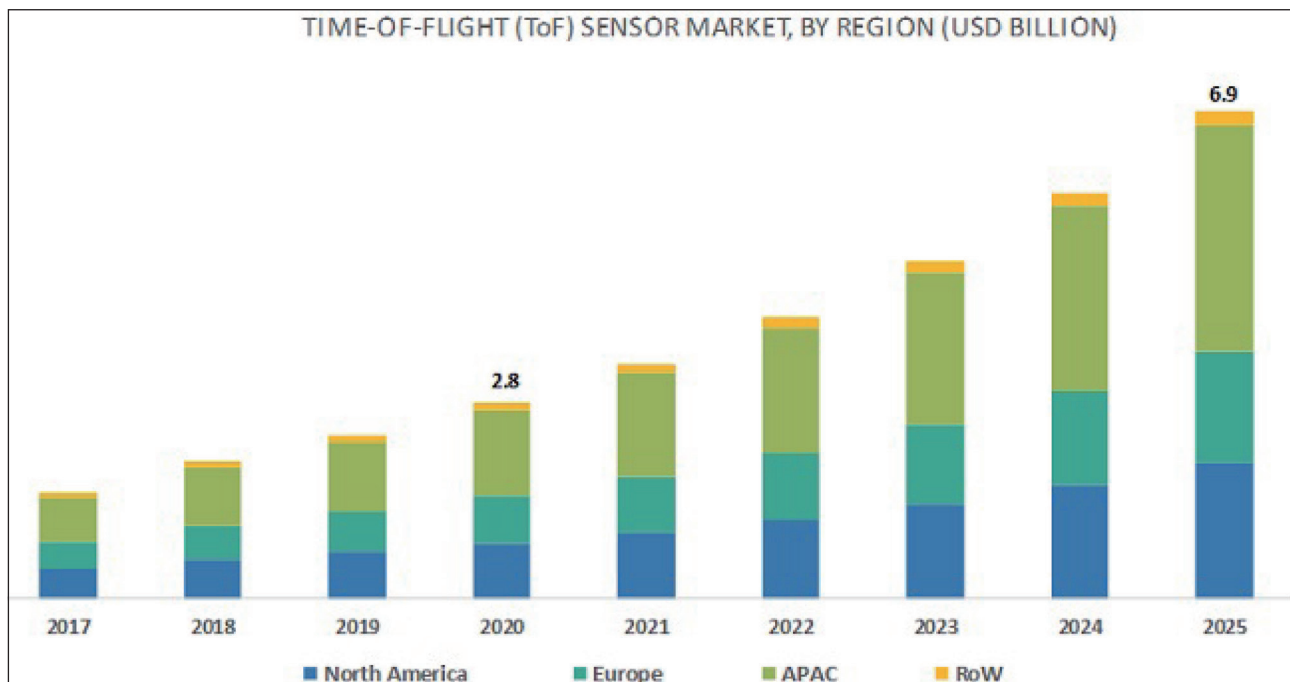
個原本單純用於對焦拍攝的功能模組有了更多可能——在手機的 3D 相機嵌入 ToF 感測器將為擴增實境 (AR)／虛擬實境 (VR) 的前行加柴添火。

今後五年，消費電子是 ToF Sensor 主場

他們表示，汽車的 AR 抬頭顯示器 (HUD) 和投影機皆是 ToF 感測器的目標應用，使先進駕駛輔

助系統 (ADAS) 可顯示視覺警報，便於駕駛員查看投影在顯示螢幕上的虛擬訊息。受惠於高可靠、低功耗、低成本、易於集成和市場需求上揚，2020～2025 年將是 ToF 感測器在智慧手機、穿戴裝置、平板電腦和相機等消費電子增長最快的時期，包括：影像、位置和超音波感測器；不過亞太地區因為對於製造業的監視和檢查應用需求增加，CAGR 最高。與此同時，ToF 感測器需求激增將推動 ToF 技術

圖 1：ToF 感測器市場預測



資料來源：<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/time-of-flight-sensor-market-264466295.html>

更上層樓，惟相關方案的額外成本恐將造成桎梏。

ToF 雖能提供精確深度測量、拜智慧手機 3D 臉部解鎖之賜而聲名大噪，但另一研調機構 Research And Markets 表示，許多目前可用的 ToF 相機解析度偏低、且易受到各種測量誤差影響，包括來自感測器的雜訊。這歸咎於 ToF 難以生成正弦訊號、依賴反射率和積分時間的非線性深度偏移，以及訊號在深度不均勻性（邊緣）處疊加而產生的動態像素所導致的系統性擺動誤差。所以，目前許多 ToF 感測器系統都是借助深度學習

(Deep Learning) 的網格「佔用機率」或記錄不同視圖生成的點雲，來組合深度影像以建構 3D。

身為先進廠商之一的意法半導體 (ST) 印證：ToF 以手機出貨為大宗，產品重點在於關係到視野涵蓋範圍的視場 (FOV)，以及單點測距能劃分成多少區域？如今，ST FlightSense 從一維單點測距擴展到多區域測距、再到高解析度 3D 深度感測器，近兩年 ToF 模組出貨量已暴增近三倍；ST 並透露，最新 3D ToF 模組預計於今年底問市。亞德諾半導體 (ADI) 對 3D ToF 也多有著墨，正與思

科系統 (Cisco) 的衍生公司 Jungo Connectivity 共同研究將車載光達 (LiDAR) 和人工智慧 (AI) 用於駕駛艙內的監控技術。

高功率奈秒光學脈衝捕捉，車內狀態無所遁形

使用高功率奈秒光學脈衝「抓取」(capture) 汽車內部狀態，可觀察駕駛員的頭部和身體位置及視線方向，以檢測手勢動作或是否有睡意，例如，一旦感測到駕駛有困倦情形或因電腦視覺演算法／AI／光檢測／測距系統而分心，Jungo 的 CoDriver 軟體系統會提出警告。CoDriver 還支援乘客計數、安全帶磨損或關鍵醫療狀況檢測或觀察。上述 3D ToF 系統使用 640 X 480 像素的感測器，號稱解析度是同業的四倍，更易於檢測更小、更薄的物體（包含深度檢測），不需後端應用處理器 (AP) 就能輸出深度像素數據。

在駕駛艙內，更高的解析度可用於臉部識別以獲取資訊娛樂、個性化服務或線上付款。ADI 3D ToF 解決方案包括處理、雷射驅動器、電源管理、開發板及相關軟體、韌體，亦有提供合作夥伴的設計服務模組。ADI 亦與 First Sensor 公司開發光達產品，利用雪崩光電二極體 (APD) 優化互阻放大器 (TIA)，包括將寬動態範圍光電流轉換為低阻抗電壓訊號的多通道 TIA。ADI 表示，優化 APD 和 TIA 之間的互連至關重要，因為它會顯著影響背景雜訊和頻寬。這

圖 2：使用先進的深度學習、機器學習和電腦視覺演算法，透過面向駕駛員的攝影機來即時檢測駕駛員狀態並支援車內全面檢測技術，例如：乘客人數統計、安全帶使用情況檢測、危重病情檢測或觀察



資料來源：<https://www.analog.com/en/about-adi/news-room/press-releases/2020/2-5-2020-analog-devices-jungo-cooperate-on-in-cabin-monitoring-technology.html>

兩個參數的改進直接轉化為光達系統，該系統可在更長的範圍內以更高的精度檢測物體。

ADI 以在高性能微機電 (MEMS)、射頻 (RF) / 毫米波 (mmWave) 和光子 / 光學技術上的厚實底蘊，此項合作標誌 ADI Drive360 自動駕駛解決方案策略的下一階段。另一方面，ToF 陣列是用於移動後 3D 感測的關鍵組件，而 ToF 相機嵌入智慧手機可追溯至 2016 年，乃使用 pmd 和英飛凌 (Infineon) 的 ToF 陣列。英飛凌主張，感測器填補了現實與數位世界的鴻溝，與適當的軟體結合，可為智能設備和機器人賦予視覺、聽覺、嗅覺、知覺，直觀了解環境，重點是如何連結、詮釋來自

於不同感測器的訊息，這也是他們與 pmd 合作的動機。

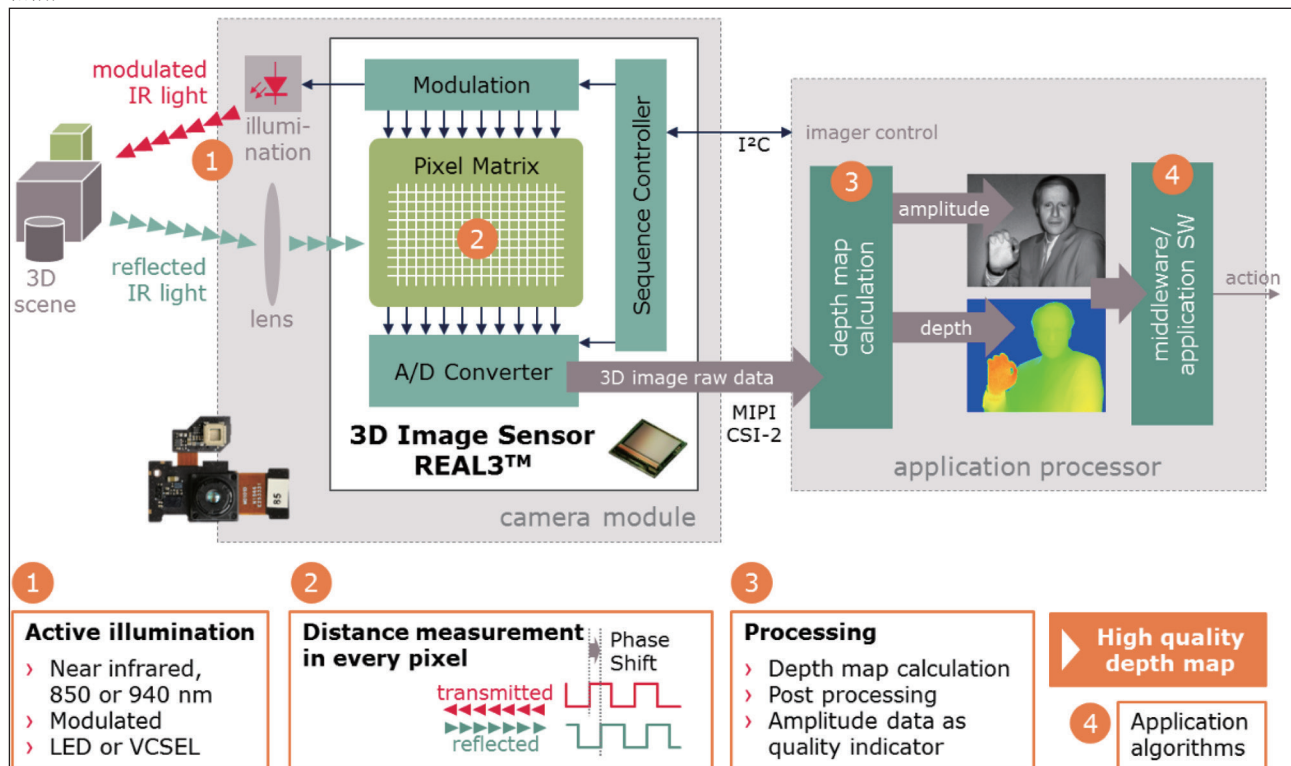
細微面容、手勢變化，ToF 瞭若指掌

3D 深度感測器在智慧手機及依賴於精確 3D 影像數據的應用扮演關鍵角色，與立體視覺或結構光技術相比，ToF 令人心動的性能、精巧和功耗，更適用於電池供電設備。ToF 深度感測器可實現臉部、手部細節或物體的精確 3D 影像，但前提是須確保映射出來的影像與原始影像匹配才有意義；而高性能像素陣列可實現出色的戶外性能，尤其是在強烈陽光下。透過英飛凌專利 SBI (抑制背景照明)

電路，可在每個像素實現 VGA 解析度，其新型 3D 影像感測器晶片 IRS2877C 將於今年中量產。

邁來芯 (Melexis) 汽車級 ToF 影像感測器 MLX75027，在單個球柵陣列封裝 (BGA) 提供 VGA (640 x 480 像素) 解析度的影像感測和處理，使用調變光源和光學 ToF 感測創建駕駛艙三維影像，用於監視人 / 物、辨識手勢、檢測車輛外部空間、行人和障礙物的碰撞預警以及導航應用。該器件支援高達 100MHz 調變頻率，可發揮垂直腔面發射雷射器 (VCSEL) 的全部潛力以實現高距離精度，支持 135 FPS 幀速率，能檢測、追蹤快速移動的物體，評估板 EVK75027-110-940-1 可提供 940nm VCSEL

圖 3：ToF 技術將單個調變的紅外光源投射到感興趣的對象、用戶或場景上，然後由 ToF 成像儀捕捉反射光並測量每個像素的深度、幅度和相位差



資料來源：<https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/radar-image-sensors/3d-image-sensor-real3/>

圖 4：SiLC Technologies 採用連貫測量方法，可將精度提高幾個數量級



資料來源：<https://www.silc.com/>

照明和帶有內置帶通濾波器的 110 度視場光學器件。

值得注意的是，複合式 (Combo) 產品正在興起。SiLC Technologies 力推「4D ToF + 視覺感測器」系統單晶片 (SoC)——智能視覺，是光達系統的理想方案；傳統圖像感測器在直接將光子轉換為電子建立 2D 圖像的過程，會忽略光子在相位、波長和偏振方面所隱含的大量訊息——原始 ToF 是經由查看兩個或多個測量值以演算法得出速度數據；「智能視覺」的調頻連續波 (FMCW) 可實現無干擾的仿人眼安全操作，利用連貫檢測技術實現低雷射峰值功率並「同時測量瞬間速度」。另隨著越來越多的車輛配備光達，FMCW 僅接收相干返回的光子，不易受到其他光達干擾。

FMCW 1550nm 強勢登場，但複雜度&成本待解

SiLC 表示，通常這樣的方案需要整合窄線寬雷射器和同調接收器 (相干接收器) 等價格高昂的電信級組件，而他們可解決這樣的困擾：利用成熟的矽光子平台，將所有必需的功能集成到單一矽晶片中，進而提供緊湊且經濟高效的解決方案。今年美國消費電子展 (CES 2020) 期間，再與 Varroc 照明系統聯袂展示上述單晶片在汽車 LED 前照燈的應用，利用四個 SiLC 的矽光子 FMCW 1550nm 視覺晶片，讓每個前照燈可提供完整的 20 x 80 度視場，可準確檢測高度、寬度、距離、反射率、速度和光偏振，並強調此一晶片架構可無縫嵌入車輛的任何位置。

研調機構 IDTechEx 指出，1550nm 是利選擇，因為其最大

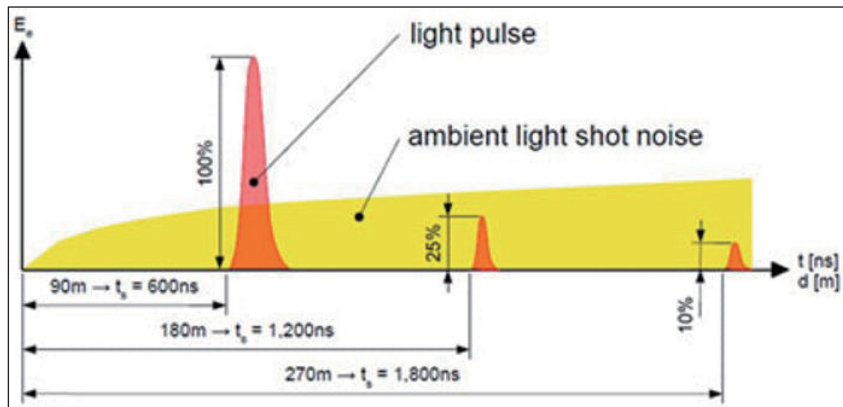
工作功率比 905nm 功率高四十倍、太陽輻射比 905nm 低三倍，且在雨、雪、潮濕表現更佳；相較於波長 < 905nm、需調變幅度以進行訊號編碼的 ToF，「訊號雜訊比」(SNR，信噪比) 可提高十倍——SNR 與峰值功率成正比；此外，可透過線性調頻長度控制距離解析度和精度。唯一要求是：需要更複雜的非矽雷射器和檢測技術；另 1550nm 採用的應是 InP (磷化銦) 製程，須放置在空腔中並透過板載驅動電路線性化、且需要非矽光電探測器的協助，成本較高。

FMCW 的設計和製造皆複雜許多，需要可調諧的窄頻寬雷射光源。SiLC 單晶片架構會產生向上和向下的線性調頻 (頻率斜坡)，而源於速度和範圍的返回訊號延遲會導致自身頻移。此時，可透過「返回訊號 + 本地訊號」取得「拍頻」(beat note 或 beat frequency) 測量。同樣聚焦 1550nm 的還有豪威科技 (OmniVision) 與光程研創 (Artlux)，面向行動裝置、汽車光達和機器視覺應用共同開發號稱「全球首個基於矽基銻 (GeSi) 光子之廣譜 3D ToF 感測器」，可檢測範圍涵蓋可見光及 850nm/940nm、1350nm/1550nm 不可見光，擬於今年第一季量產。

深度誤差、測量時間、背景雜訊，魔鬼藏在細節裡

光程研創表示，GeSi 像素在更長的近紅外波工作比 940nm 安

圖 5：長程測量 vs. 雜訊的權衡



資料來源：<https://www.idtechex.com/en/research-article/idtechex-attends-autosense-latest-trends-in-automotive-lidars/19715>

全得多，可在符合安全法規下使用更高的雷射功率，這意味著可在 1200 ~ 1400nm 安全部署的雷射功率是 940nm 的十倍；代工夥伴台積電 (TSMC) 補充，GeSi 的深度誤差比矽像素低。與此同時，瑞士半導體廠商 ESPROS Photonics 試圖使用高性能 CCD 解決 ToF 光達測量時間與 SNR 之間的兩難。

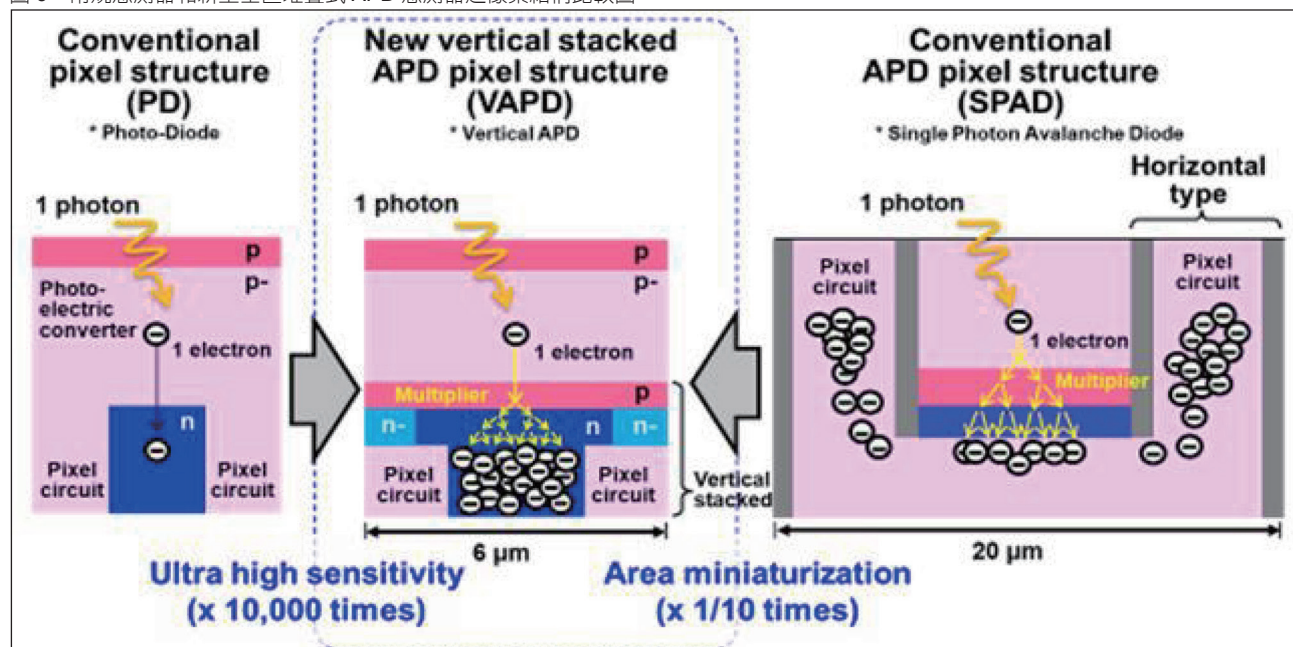
為等待遠方訊號，影像感測器須長時間保持開啓、累積大量背景訊號而產生散粒雜訊 (shot noise)——與「環境時間積分的時間平方」成正比，訊號強度又與「距離平方」成正比。

因此，長程測量的環境散粒雜訊很容易將背景訊號掩蓋掉。ESPROS Photonics 說明，CCD

感測器會透過 CCD 陣列將測量到的光子依循個別像素 (pixel-by-pixel) 做轉換，需時約 5ns。一旦發出雷射光會自動選擇適合者，將捕捉到的光線轉換為電荷，再透過 CCD 陣列依序傳送，並一再重複這個過程。最終，總曝光時間為 5ns，可減少 360 倍的环境光。好處是：可捕捉遠處反射的訊號，無需長時間開啓攝影機，因而可將雜訊降至最低。同場競技的還有本就在 ToF 感測器晶片和核心演算法擁有壓倒性優勢的索尼 (Sony)。

Sony 在 CES 展示集成 33 個感測器的電動車 Vision-S——包括使用三部固態光達測量距離以產生準確的 3D 空間視圖，並借助 ToF 檢測／識別車內人員。順帶一提，Sony 自 2015 年收購比利時手勢識別公司 SoftKinetic 後，順勢取得 DepthSense ToF 感測系統，

圖 6：常規感測器和新型垂直堆疊式 APD 感測器之像素結構比較圖



資料來源：<https://news.panasonic.com/global/press/data/2020/02/en200218-2/en200218-2.html>

奠定厚實基礎；去年推出 ToF 相機模組就一舉在 3D 感測接收器搶下 45% 市佔。同屬日系廠商，松下 (Panasonic) 日前發佈基於自有 APD 技術的 ToF 影像感測器。借助電子倍增器和電子儲存的垂直堆疊結構 (VAPD)，能減少傳統單光子雪崩光電二極體 (SAPD) 的像素面積。

弱光檢測 + 光子累積和時分間接，讓 ToF 看得更遠

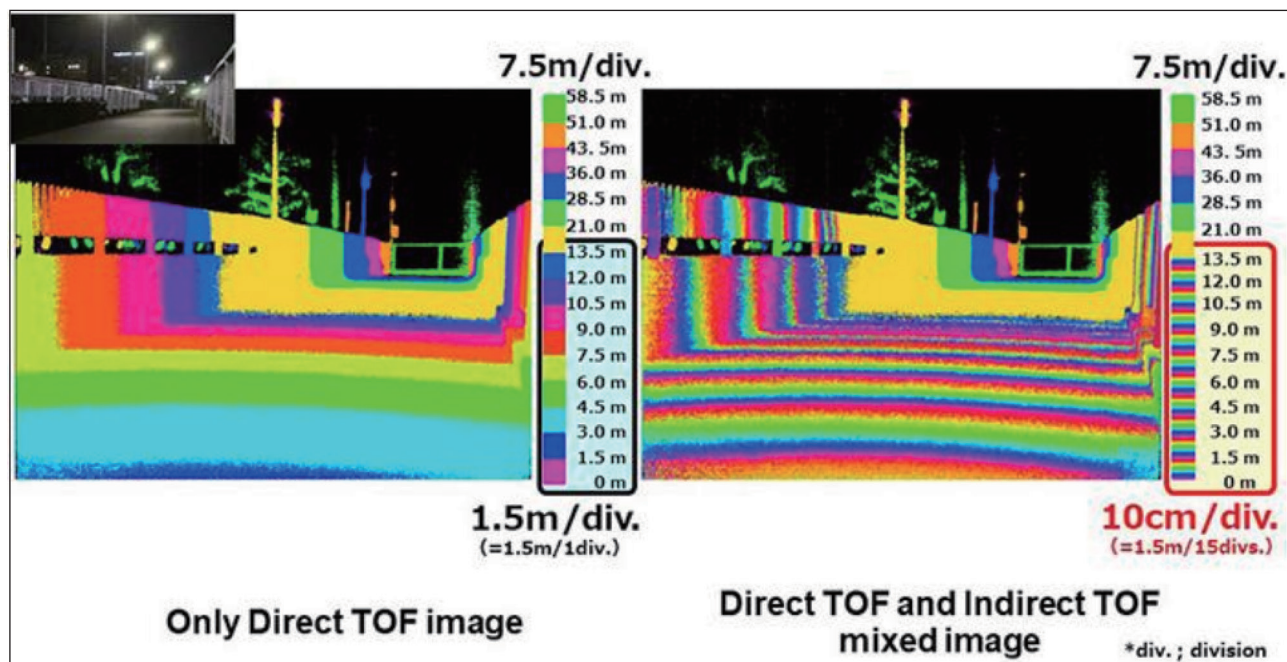
如此一來，可根據物體位置獲取百萬像素、間距為 $6\mu\text{m}$ 的高精度 3D 訊息且便於微型化。除了

長距離和高解析度的 3D 成像，新感測器還實現了高精度測距，可精確檢測遠處重疊的人和物體。有別於常規 ToF 感測器不能檢測弱光訊號、僅限於短距離檢測；透過將入射光子的數量轉換為積分訊號並應用間接 ToF 計算，即使在 10 ~ 100 公尺的長距離，也能實現 10 公分的短距間隔感應成像。松下早先於 2018 年發佈配備 APD 遠程的 ToF 影像感測器雖能檢測由近而遠的小物體，但測距精度只有 1.5 公尺，遠處人、物仍有重疊現象。

今年新問市的 APD-ToF 可解決此問題，且最大距離為 250 公尺。通常，ToF 測距借助測量從光

源發出的撞擊子、反射和返回的光子飛行時間來計算距離。從 > 10 公尺處反射意味：從機率上說，一個光子的訊號幾乎無法到達！特別一提的是，松下的「弱光檢測技術」可透過使用內置在所有 APD 像素中的獨特積分電路，穩妥捕捉單一光子的弱訊號並以機率計算入射光子的數量。另「光子累積和時分間接」ToF 技術可將入射光子的數量轉換為積分訊號，並適用於短距離的間接 ToF 計算，如前所述，使 3D 成像能以 10 公分間隔的距離精度實現 10 ~ 100 公尺的長距離檢測，這對於傳統的 ToF 感測器和光達來說是困難的。CTA

圖 7：右圖中的 APD-ToF 感測器，使用光子累積和時分間接 ToF 技術所獲取的 3D 範圍圖像層次更為清晰



資料來源：<https://news.panasonic.com/global/press/data/2020/02/en200218-2/en200218-2.html>