

工業物聯網的感測和測量： 邊緣節點

■作者：Ian Beavers/ADI 亞德諾半導體公司

工業物聯網 (industrial IoT) 涵蓋了正在發展之中的廣泛轉變，使得在相互連接機器兩端非常普遍的感測功能不僅僅只是一項競爭優勢，而是一種不可或缺的基本服務。工業物聯網從邊緣節點 (edge node) 開始，而邊緣節點則是有關感測和測量的進入點。這裡是物理世界與計算數據分析相互作用的地方。連接上網的工業機器可以感測到各種資訊，再利用它們來做出各種關鍵性的決定。這種邊緣感測器很可能與那些儲存歷史分析資料的雲端伺服器相隔很遠。它必須通過一個可將數據聚合到互聯網的閘道來連接。理想情況下，這種邊緣感測器節點是位於一小外形尺寸的包裝之內，不太會引起人們的注目，以便可以很容易地部署在空間受限的環境之中。

感知、測量、解譯、連接

本文是一系列探討工業物聯網發展的第一篇文章。在文中，我們將細說和探討在較大物聯網框架下，邊緣節點感測和測量功能的基礎樣貌：感測、測量、解譯 (interpreting) 和連接數據，以及對電源管理和安全性的額外考慮。每一部分都面臨到其獨特的一組挑戰。邊緣節點的智能分區將是成功實現工業物聯網的關鍵。在某些情況下，超低功率 (ULP) 則是最重要的性能指標。感測器在關鍵事件期間從睡眠模式甦醒時，大多數的潛在數據可能會被過濾掉。

感測器形成了工業物聯網電子生態系統的前端邊緣 (front-end edge)。測量將所感測到的資訊轉換成有意義的內容，例如壓力、位移或旋轉等可量化

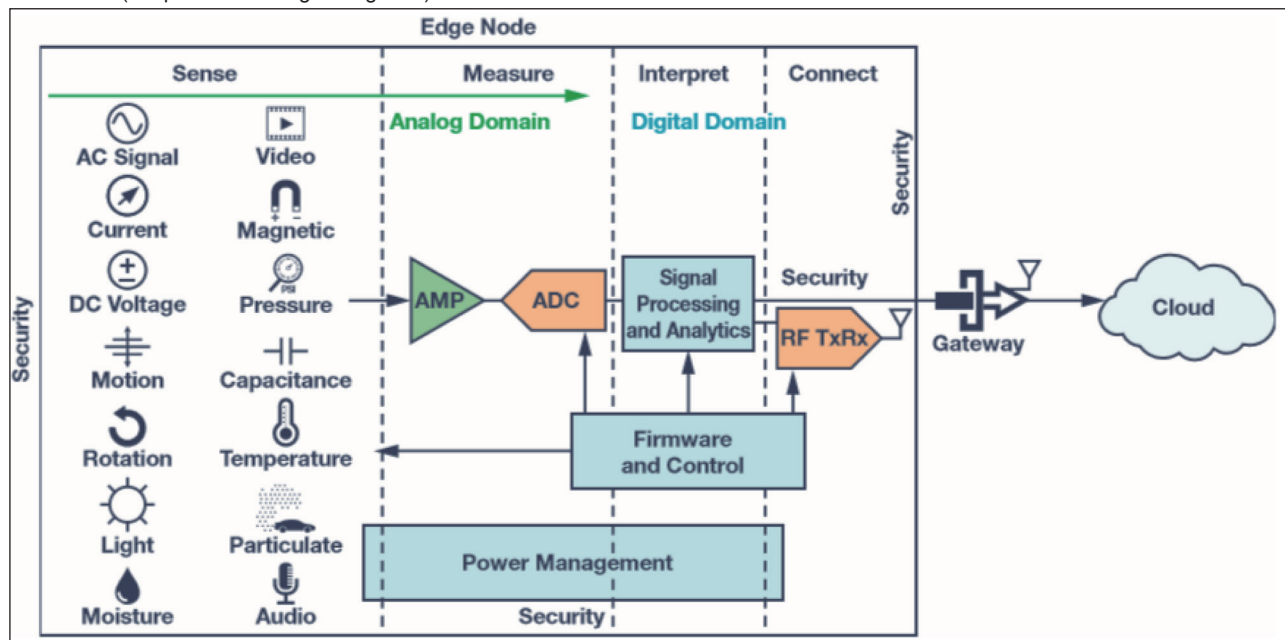
的值。在解譯階段，邊緣分析和處理將會把測量到的數據轉換為可操作的事件 (參考文獻 1)。只有最有價值的資訊會被送出節點之外，連接到雲端，以進行預測或歷史分析的處理。根據初始限制的接受程度，數據在沿著信號鏈一路傳送的過程中，將會被拒絕或過濾掉。理想情況下，感測器節點應該只會發送絕對必要的資訊，並在關鍵數據可用時儘快做出關鍵決策。

不管是經由有線或是經由無線感測器節點 (WSN)，邊緣節點必須要連接到網路之外。數據完整性在信號鏈的這個區塊中仍然是一關鍵。如果通信不一致、丟失或損壞，則最佳的檢測和測量到的數據就沒有什麼價值了。經由通訊而丟失數據是不可接受的。電氣雜訊的工業環境是嚴苛且無情的，特別是在高金屬含量情況下的射頻通信。因此，在系統架構設計期間，就應事先考慮到要設計出一種穩健的通信協議。

ULP 系統的電源管理要從穩壓器元件的選擇開始，以便實現最高的效率。但是，由於邊緣節點也會因快速的工作週期而被喚醒和進入睡眠，所以通電和斷電時間也不容忽視。而外部的觸發器或喚醒命令則可協助快速警告邊緣節點開始感測和測量數據。

數據安全也必須是工業物聯網系統的一項考慮因素。不僅邊緣節點內的數據保護必需是安全的，且也要保護其對網路閘道的存取，以免遭受惡意的攻擊。邊緣節點要有防欺騙的機制，以免網路存取權被騙走，而發生從事惡意活動的憾事。

圖 1：邊緣節點設備為感測、測量、解譯和連接帶來了智能的能力，從而連接到互聯網閘道，再到雲端。在數據被送出去進行更深入的數據採礦智能 (deeper data mining intelligence) 之前，這些數據可以使用某種形式的分析來對它進行預處理。



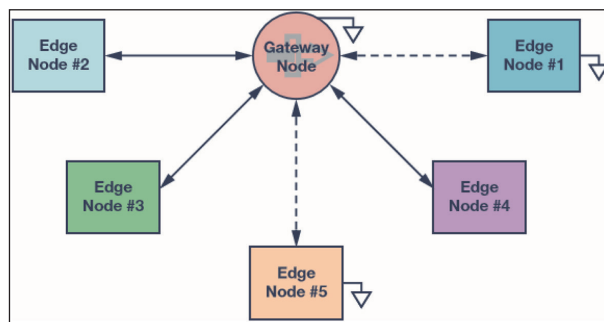
智能從邊緣開始

在邊緣節點，有許多的感測解決方案，它們也許不僅只是單一分立器件。在邊緣節點也許會有各種同時發生的狀況，而它們是與數據採集無關的。溫度、聲音、振動、壓力、濕度、運動、污染物、音頻和視頻都只是一些可以被感測到及處理的一些變數，然後經由閘道發送到雲端，以便進一步進行歷史和預測的分析。

若要說感測器是工業物聯網的骨幹，並不算誇張 (參考文獻 2)。但如果說它們是萃取洞察力 (extracting insight) 的中樞神經系統，則更為精確。邊緣節點感測和測量技術是有關數據誕生的所在地。如果在解決方案鏈中的這個階段，錯誤或不正確的數據被忠實地記錄下來，之後在雲端再多的後處理也無法恢復那些數據丟失的值。

關鍵任務系統，例如具有高風險結果的醫療和工廠線路故障的監測，需要高品質數據測量的穩健完整性。數據品質是至關重要的。假陽性 (false positive) 或遺漏的代價將是昂貴且耗時的，並且可能危及生命。代價高昂的錯誤將導致意外的維修、勞動使用效率低，或者或讓物聯網系統完全失去作

圖 2：許多邊緣節點輸出 (有線和無線) 將會自主地連接到一閘道節點，並在傳輸到雲端伺服器之前先被聚合。



用。智能始於邊緣節點，這些節點避免了“垃圾進，垃圾出”這句舊格言所描述的情況發生。

隨著存取到的資料寶藏越大 責任越大

在沒有邊緣節點智能能力的傳統信號鏈解決方案中，數據仍只是數據。對於要產生可協助做出可行決定的智能和知識來說，一個不具智慧能力的節點在這一方面是沒有幫助的 (參考文獻 1)。有許多的原始、低品質數據對有關的系統性能是沒有影響的 (參考文獻 3)。要轉換和發送所有這些數據到最終的雲儲存目的地，將會是很耗電和頻寬密集的。

相比之下，智慧型 (intelligent) 的智能分區

(smart partitioning) 邊緣節點之感測和測量則可將數據轉換為可發揮作用的資訊。智慧型節點可降低總體功耗、降低延遲，並減少頻寬的浪費 (參考文獻 4)。這讓具有長等待時間的反應物聯網 (reactive IoT) 遷移到即時和可預測的物聯網模型。基本的類比信號鏈電路設計理念仍然適用於物聯網。對於複雜系統，通常需要深厚的應用專業知識來解譯那些處理過的數據。

優化的智能分區將雲端價值最大化

在測量到的資訊中，只有最重要的才會經由管道送到雲端，以進行最終處理。在某些情況下，大多數數據是完全不重要的 (參考文獻 5)。然而，早在系統數據以遠程存取聚合在遠方的一個點之前，它就應發揮作用；此一系統數據是時間關鍵的，且有本地即時決策的需求。

與此相反的是，那些利用預測模型的歷史價值來影響長期洞察力的資訊，成為雲端處理的一種理想應用。為了回溯處理和決策而將數據歸檔到大規模數據庫之中，正是強大雲端處理和儲存所展現出的優勢 (參考文獻 6)。

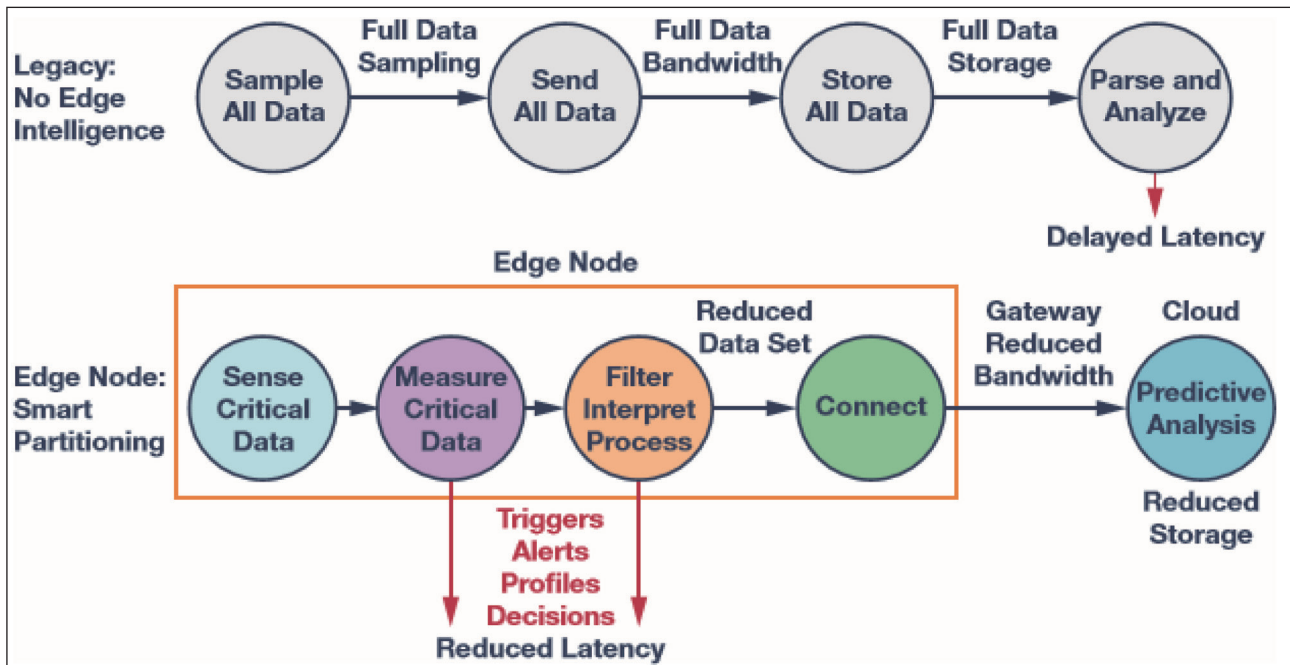
具有即時決策能力的邊緣節點

物聯網感測器主要是類比的。特定的工業應用需求將決定那些在邊緣節點前端所需要感測器的動態範圍和頻寬。在信號被轉換為數位表示及傳送到邊緣之外以前，信號鏈的前端是處於類比域之內的。如果選擇不正確，類比信號鏈中的每一個元件都可能抑制邊緣節點的整體性能。動態範圍將是有關的滿刻度感測器相對於雜訊基準或下一個最高干擾信號之間的增量。

由於物聯網感測器通常會尋找已知的和未知的活動，所以類比濾波器並不總是有意義的。在對信號進行取樣之後執行數位濾波。除非在感測器的前端用了一個類比濾波器，否則基本的或其它雜散信號的諧波就會拌入到所感測到的資訊中，並與相關的信號競爭奪功率。因此，在設計階段期間，在時域和頻域中規劃未預期的感測信號將可防止不想要的假影出現在測量到的數據中。

信號鏈中的下一單元是 ADC，而感測到的資訊通常就是以 ADC 來測量。如果物聯網的邊緣節點是以離散元件來設計的，就應注意要選擇不會降低感測器動態範圍的測量 ADC。嵌入式 ADC 的輸入滿量

圖 3: 邊緣節點的智能分區可解決以前所無法解決的新挑戰。在信號鏈中愈早期的階段即有更精簡的處理能力和智能，便可擁有更有效率且完整的物聯網解決方案。



程範圍通常可與感測器輸出幅度充分匹配。理想情況下，感測器輸出幾乎會用掉整個 ADC 的輸入範圍，在 1 dB 內，而不會使 ADC 飽和，也不會在範圍界限之處被限幅 (clipped)。然而，還可以用放大器級來增加或衰減感測器的輸出信號，以便使得 ADC 本身的動態範圍最大化。該 ADC 的滿量程輸入、取樣速率、位元解析度 (resolution in bit)、輸入頻寬和雜訊密度都將對邊緣節點的信號測量性能做出貢獻。

前端放大器可以嵌入在節點的測量中，也可以分立元件的形式添加在 ADC 之前。放大器的增益、頻寬和雜訊也可以增強邊緣節點的性能。

在信號鏈中位於感測器之後的測量 ADC，通常是奈奎斯特速率 (Nyquist rate) 或連續時間 $\Sigma - \Delta$ (CTSD) 這兩種取樣架構中的一種，其中後者在嵌入式 ADC 中則較為常見。奈奎斯特速率 ADC 具有等於取樣速率頻率一半的標稱平坦雜訊基準，即 $f_s/2$ 。CTSD 使用具有陷波通帶的過取樣率，陷

波通帶將會把雜訊推到相關頻寬之外，以增加動態範圍。測量 ADC 架構及其解析度是理解邊緣節點的類比頻寬和動態範圍的關鍵。

例如，在頻域裡，1 Hz 的每單位頻寬之雜訊密度是基於 ADC 的 SNR 以及雜訊在 ADC 取樣頻譜上所擴展的寬度。在奈奎斯特速率 ADC 中，雜訊頻譜密度 (每 1 Hz 頻寬) = $0 \text{ dB} - \text{ADC 信號雜訊比} - 10 \times \log (f_s/2)$ ，其中 $f_s/2$ 是取樣率除以 2 或 ADC 的單一奈奎斯特區。理想的信號雜訊比 (SNR) 可以 $\text{SNR} = 6.02 \times N + 1.76 \text{ dB}$ 計算，其中 N 是 ADC 位元的數目。然而，ADC 的實際 SNR 包括電晶體和半導體處理的非理想性 (nonideality)，包括電雜訊和電晶體級的元件缺陷。這些非線性因素將把 SNR 性能降低到理想的情況之下，因此請參閱 ADC 數據手冊上相關的 SNR 性能說明。

邊緣節點的動態範圍是由感測器的動態範圍、信號的放大率、及 (如果需要的話，) ADC 滿量程動態範圍。如果滿量程感測器輸出信號未達 ADC 滿量程範圍輸入的 1 dB 之內，那麼，ADC 動態範圍的某些部分將保留而不會使用。相反地，來自感測器超過範圍的 (overranged) ADC 輸入將使取樣信號失真。放大器頻寬、增益和雜訊也都是邊緣節點動態範圍所要考慮因素中的一部分。結合感測器、放大器和 ADC 的電氣雜訊將是每一 rms 分量平方和 (square sum) 的平方根 (參考文獻 7)。

邊緣節點的動態範圍是由感測器的動態範圍、信號的放大率、及 (如果需要的話，) ADC 滿量程動態範圍。如果滿量程感測器輸出信號未達 ADC 滿量程範圍輸入的 1 dB 之內，那麼，ADC 動態範圍的某些部分將保留而不會使用。相反地，來自感測器超過範圍的 (overranged) ADC 輸入將使取樣信號失真。放大器頻寬、增益和雜訊也都是邊緣節點動態範圍所要考慮因素中的一部分。結合感測器、放大器和 ADC 的電氣雜訊將是每一 rms 分量平方和 (square sum) 的平方根 (參考文獻 7)。

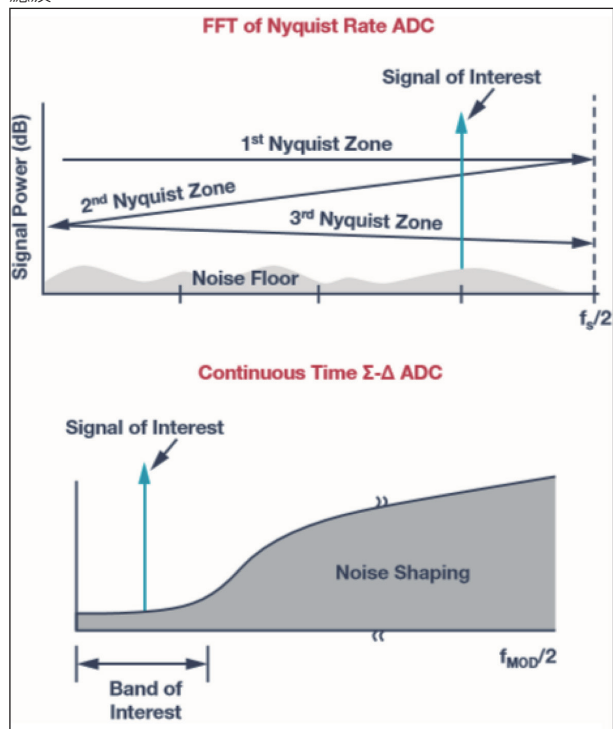


圖 4: 在物聯網感測器上沒有前端類比濾波器的情況下，奈奎斯特速率 ADC 將會把高於第一奈奎斯特區域的高階頻率折回到相關的頻寬中。相比之下，具有過取樣調變時脈的 CTSD ADC 架構使用雜訊整形 (noise shaping) 技術，以便讓相關的頻帶內可以有高動態範圍。CTSD 對信號混疊較不敏感，因為它提供了固有的濾波。

智慧工廠

工業物聯網中的一個重要的應用是機器振動狀態監測。新的或傳統的機器設備有一些重要的部件，例如旋轉軸或齒輪，這些部件會與高動態範圍

圖 5: 圖中的感測器信號輸出幅度與 ADC 的輸入滿量程不匹配，動態範圍丟失 (藍色) 了。於是需要使用放大器來將感測器的動態範圍最大化，同時還要防止 ADC 飽和 (紅色)。信號匹配必須考慮到整個邊緣節點信號鏈的頻寬、動態範圍和雜訊。

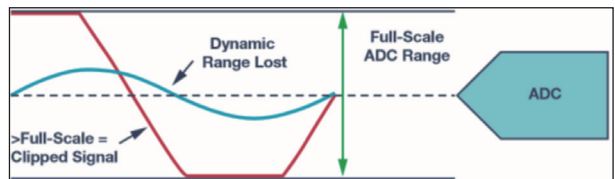
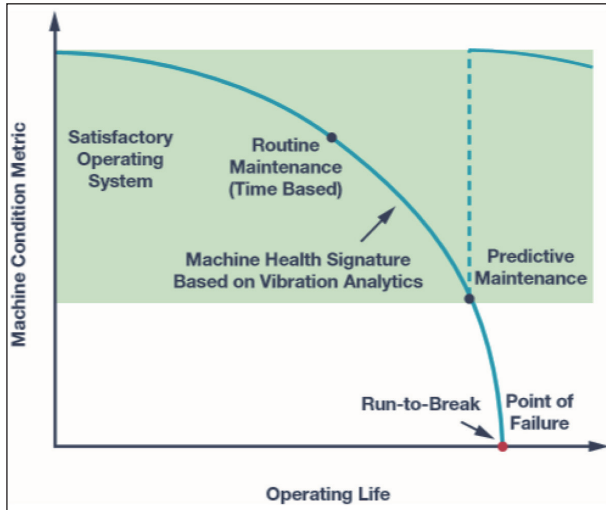


圖 6: 雖然常規的機器維護可以在固定的時間間隔執行, 但它通常不是在有關機器狀況的智能指導之下完成的 (參考文獻 10)。通過分析特定機器操作的振動性能, 可以在邊緣節點處警告預測的故障點和維修的里程碑。

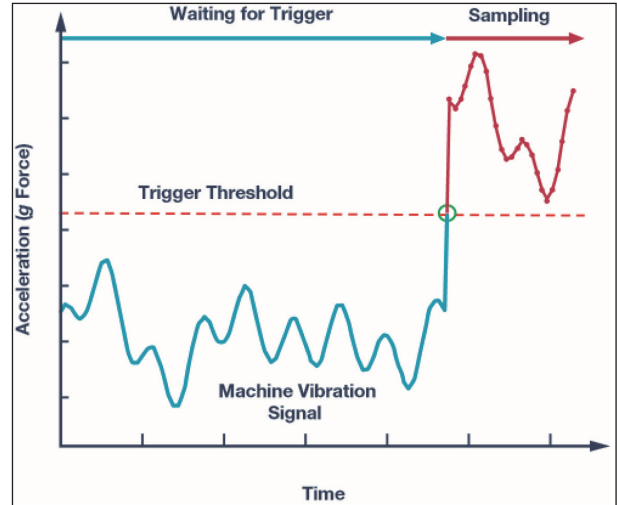


的 MEMS 加速度計一起安裝 (參考文獻 8)。這些多軸感測器可即時地對機械的振動位移進行取樣。可測量、處理這些振動特徵, 並與理想的機器特徵相互比較 (參考文獻 9)。在工廠中, 這種資訊的分析有助於提高效率, 降低線路故障的情況, 並能夠提前預知機械的故障。在極端情況下, 具有快速惡化的機械部件的機器便可立即關閉, 否則的話就會造成進一步的損壞。

藉由使用邊緣節點分析, 可以大幅縮短決策時延 (time latency)。圖 7 就是這樣的一個例子, 其中有一個 MEMS 感測器, 當超過臨界值極限時會提出警告, 且也會立即送出警報。如果事件的重要性足以被認為是具有關鍵性的, 則節點就會被賦予一種權限, 可自動地讓引起問題的設備失去作用, 以避免發生具時間敏感性的災難性機械故障。

另一方面, 也可調用一觸發信號, 啟動另一個感測和測量節點 (例如位於輔助機器元件上的節點), 開始解譯基於第一事件的數據。這可減少來自邊緣節點的取樣數據的總數據集。為了確定來自額定值的任何振動異常, 前端節點的設計要具有可進行檢測所需的性能。感測和測量電路的動態範圍、取樣率和輸入頻寬應足以識別任何偏離事件。

圖 7: 取樣過後的機器振動數據之時域表示形式, 其中比較器閾值可以決定所感測到的和測量到的數據是否會被傳送到邊緣之外。可以維持較低的功率狀態以過濾大部分的資訊, 直到因為閾值穿越事件發生而形成數據在數量上的優勢。



智慧城市

具有嵌入式視頻分析能力的智能城市工業相機是一種不同的工業物聯網邊緣節點應用。智能城市定義了城市使命, 將無數的資訊和通信點整合到一內聚的系統 (cohesive system) 中, 以管理城市的資產。

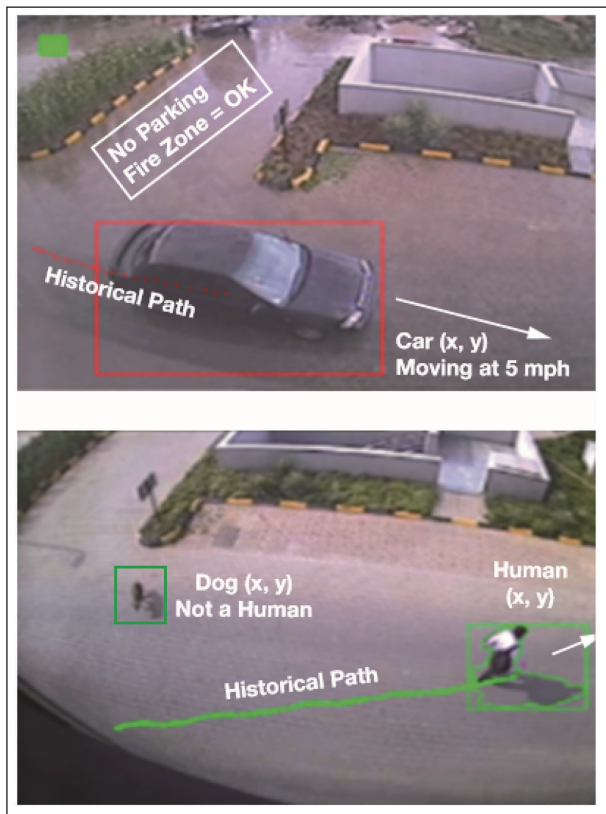
一種常見的應用是提供停車位空位警報和佔用檢測。在投入使用時, 每個相機具有預定的視場 (field of view)。在分析中, 可以定義和使用邊界的邊緣檢測, 以識別各種物件和其運動。

不僅可以分析物件過去的運動, 且由於物件的軌跡, 也可以利用數位信號處理 (DSP) 演算法計算出在邊緣之處的預測路徑。

與頻率濾波的情況類似, 末端處理 (end processing) 通常並不需要視頻分析幀的全頻寬。在不以安全為目的的使用情況下, 通常只需要完整視頻幀的一個小子集即可。大多數從幀到幀的視覺數據在固定安裝的相機上是靜態的。靜態數據會被過濾掉。在某些情況下, 僅需要分析越界 (boundary crossing) 的統計或相關物件的運動坐標。簡化的子集可當作是一種麵包屑坐標 (breadcrumb coordinate) 傳送到信號鏈中的下一個開道。

邊緣節點視頻分析可以提供許多過濾過的解譯

圖 8: 使用邊緣節點視頻分析, 可以在低功率系統中確定物件類型檢測、運動軌跡和邊界穿越, 而不需要將全頻寬視頻數據傳送到雲端來進行分析。只需要傳送具有麵包屑物件坐標和類型的時間戳記即可。



來區分物件的類型, 如汽車、卡車、自行車、人類、或是動物等。這種去除法 (decimation) 可減少雲端伺服器內需要的數據頻寬和計算能力, 否則, 為了分析要向信號鏈中下一單元發送的全幀速率視頻數據, 就需要這些數據頻寬和計算能力。

室內相機應用可以算出穿過入口邊界的人數,

圖 9: 在邊緣節點上, 具有 DSP 物件檢測演算法的高動態範圍成像器可以確定運動和邊界上的入侵事件, 即使在低照明條件下也可執行這些功能。圖中的範例使用視覺對比來定義室內工廠 / 辦公室 (左) 和室外停車場 (右) 的邊緣檢測。



再調節房間的照明、或冷熱程度。為了在極端照明條件或其它挑戰性照明 (例如下雨) 情況下仍能發揮視覺上的有效性, 在戶外相機中便需要用到一種高動態範圍的相機。典型的每一像素 8 位元或 10 位元的成像感測器可能無法提供足夠的亮度動態範圍, 此一範圍是與橫跨所有檢測場景無關的。與以 240Hz 刷新率觀賞快動作的運動相反, 可使用較慢的幀速率來監測工業分析相機上的活動。

平台級解決方案

ADT7420 是一款 4 mm×4 mm 的數位溫度感測器, 具有突破性的性能, 包含一解析度為 0.0078°C 的內部 16 位元 ADC, 僅消耗 210 μA 的電流。ADXL362 是一款超低功耗 3 軸 MEMS 加速度計, 在運動觸發喚醒模式下, 取樣速率為 100 Hz 時, 所消耗的電流僅 2 μA。它不使用功率負載循環, 而是在所有數據速率採用全頻寬架構, 這可防止輸入信號的混疊 (aliasing)。ADIS16229 是一款雙軸, 18 g 數位 MEMS 振動感測器, 內嵌有射頻收發器。它還提供板載頻域信號處理功能, 具有 512 點數位 FFT 的能力。

具 DSP 性能的 Blackfin 低功率成像平台 (BLIP) 可以讓那些基於經過驗證的數位信號處理工具的工業視覺設計可以快速地建構原型。優化的軟體庫可針對運動感測、人員計數和車輛檢測為設備製造商提供一種開箱即用的解決方案。

參考文獻：

- 1 Colm Prendergast. "Smart Partitioning and Value Creation in a Connected World." Keynote IoT Address: IESA Vision Summit 2015.
- 2 Stephen Lawson. "IoT Keeps Pushing Analytics Closer to the Edge." PCWorld: IDG News Service, 2016.
- 3 Lisa Morgan. "Edge Analytics an Antidote to IoT Data Deluge." InformationWeek: UBM Electronics, 2016.
- 4 Daniel Kirsch. "The Value of Bringing Analytics to the Edge." Hurwitz & Associates Services, 2015.
- 5 Jason Stamper. Why IoT Is Driving Analytics to the Edge of the Network. 451 Research, 2015.
- 6 Steve Nelson. "Exploring the Internet of Things from End to End." Element14: Newark Electronics, 2014.
- 7 Umesh Jayamohan. "Understanding How Amplifier Noise Contributes to Total Noise in ADC Signal Chains." Analog Dialogue, February 2013.
- 8 Robert Randall. Vibration-Based Condition Monitoring. New South Wales, Australia: University of New South Wales, 2010.
- 9 Ed Spence. "Bring the Benefits of MEMS Accelerometers to Condition Monitoring." Electronic Design, Penton Publishing, 2016.
- 10 Jamie Smith. "Smart Edge Devices for the Industrial Internet of Things." ARC Industry Forum, 2015
- 11 Blackfin Low Power Imaging Platform (BLIP). Analog Devices, Inc., 2014.

關於作者：

Ian Beavers[ian.Beavers@analog.com] 目前在 ADI 公司於北卡羅來納州格林斯伯勒市的自動化能源和感測器團隊中擔任產品工程經理一職。他從 1999 年起開始在該公司任職。Ian 在半導體產業擁有超過 19 年的經驗。Ian 擁有北卡羅來納州立大學的電子工程學士學位，及北卡羅來納大學格林斯伯勒分校的企業管理碩士學位。

線上支援社群

要與線上技術支援社群中的 ADI 技術專家聯繫。詢問您在設計上所面臨到的棘手問題，瀏覽 FAQ 或與線上人員交談，或參與討論。請參閱網站：ez.analog.com

CTA

ADI 選擇 Arrow Electronics 作為全球經銷通路策略合作夥伴

Analog Devices, Inc. (ADI) 日前宣佈選擇 Arrow Electronics, Inc. (NYSE: ARW) 作為公司在全球的經銷通路策略合作夥伴。ADI 將保留當前的區域經銷網路，並委任 Arrow 作為唯一的全球經銷通路合作夥伴。此舉旨在為 ADI 的客戶提供更深層次的支援和更廣泛的服務，在這種新型簡化結構下，客戶將能夠利用強大、專注的通路團隊和全面的端到端支援服務，涵蓋從設計和原型開發到物流支援的整個過程。

ADI 公司全球銷售和數位行銷資深副總裁 Martin Cotter 表示：“ADI 繼續從客戶利益出發進行投資，在擴大我們的直銷團隊的同時，加深與 Arrow 的合作，從而增強我們的通路營運。Arrow 的生態系統集技術銷售和行銷、完整的產品生命周期解決方案和物流服務於一體，使 ADI 能夠將通路策略從側重交易轉變為著眼大局。

數十年來，Arrow 一直是 ADI 的重要通路合作夥伴之一，在全球供應鏈、物流支援、全產品生命周期的設計和生產方面提供了專業的服務和專業知識，完善了 ADI 廣泛的高性能類比產品系列，包括資料轉換器、信號調節、射頻和微波、電源、DSP 和感測器 IC。

Arrow 全球元件業務總裁 Andy King 表示：“Arrow 與 ADI 有著長期的成功合作關係，我們很期待看到雙方進一步的合作將為市場帶來的創新技術。透過合作，兩家公司可利用 ADI 產品組合的廣度和深度，以及 Arrow 的端到端和全產品生命週期服務，幫助客戶解決在類比和混合信號領域面臨的最大挑戰，包括新興的物聯網市場中出現的挑戰。