如何驗證數位感測器嵌入式軟體的效能、可靠性和品質

■作者：Stephan Puri-Jobi/ ams AG

數位感測器 IC 硬體的操作可以被精確地說明並記錄在產品規格表中。然而，積體電路 (IC) 的正常運作還取決於其嵌入式軟體，其提供驅動程式、演算法和介面等功能。

軟體中的錯誤或故障有可能損害良好硬體的效能，甚至使其失去功能，但與硬體不同的是，IC 的軟體功能沒有被完整記錄在規格表中。設計工程師該如何評估感測器 IC 軟體的效能、完整性和可靠性？

本文旨在向系統設計工程師說明如何判斷感測器 IC 軟體對系統造成的風險，以及如何評估感測器 IC 製造商用來驗證軟體品質的方法。文章描述了感測器軟體的典型功能以及它們可能發生故障的方式，然後說明測試程式段以及整個系統的價值所在。本文說明感測器製造商可用來驗證感測器 IC 內部嵌入式軟體的方法，藉以滿足這個需求。

在過去，溫度感測器不過就是一片會隨著溫度變化而改變其電阻的矽片。一個非常單純的類比裝置，它不包含任何邏輯元素。當應用處理器需要知道目前溫度時，它必須測量感測器輸出端的電壓，然後執行類比至數位轉換 (analog-to-digital conversion)，如此才能夠計算溫度值。

現在，系統設計人員可以改用能提供數位輸出的溫度感測器。「智慧」數位感測器能為使用者帶來許多好處，包括更高的精確度和內建補償、診斷和故障查找功能、可設定的濾波器和可編程中斷等。數位感測器也能利用演算法來推導出無法被直接測量的數值，例如從空氣中的揮發性有機化合物濃度來推導室內空氣品質。再者，由於測量信號在感測器中被數位化，應用處理器上的開銷 (overhead) 也得以大幅降低，有助於簡化設計並降低系統功耗。

然而，數位感測器不再像之前的類比感測器一般是如此簡單的元件，因為它運行了嵌入式軟體，而軟體會形成新的風險因子。感測器硬體的效能可以被非常精確地描述並記錄在產品規格表中。此外，像是汽車產業的生產性零件核可程序 (Production Part Approval Process，PPAP) 等產業標準程序，能讓生產單元的品質以可驗證的方式加以量化。如此一來，在已知的操作條件下，系統設計人員對於感測器硬體的預期效能會具有高度的信心。

然而，對於感測器的嵌入式軟體，設計人員如何擁有同樣的信心呢？

畢竟，由嵌入式軟體引起的故障風險是確實存在的：根據 2016 年 11 月公佈在歐洲太空總署 (European Space Agency) 網站上的初步結果報告指出，Schiaparelli 太空艙之所在火星表面登陸失敗，是因為意外的感測器輸出條件觸發了模組的控制軟體，前後不超過一秒鐘。鑑於太空探索計畫是如此所費不貲，我們可以合理假設很少有嵌入式系統在 2016 年受到比 Schiaparelli 太空艙更嚴苛的測試，然而即便如此，這個登陸軟體仍然存在一個 bug。

當然，很少有設計師必須將他們的產品設計成能夠承受太空艙暴露的條件，但是他們大部分都有責任達到規定的品質水準和預期的使用壽命。這就需要某種可以驗證嵌入式軟體錯誤概率的方法，且

此一方法必須適用於設計者被限定的預算、開發資源和開發時間表。

任務或安全關鍵的感測器解決方案

一些被用在複雜測量應用中的感測器類型，可靠性的保證是絕對不可少的。這些感測器類型的例子包括：

- ■用於冷水表的流量感測器 (見圖 1)：公用事業公司提供給客戶的收費單須仰賴感測器輸出的準確性。
- ■氣體感測器 (見圖 2)：建築物居民的安全或甚至生命可能取決於感測器是否能夠可靠地偵測污染物的危險濃度。
- ■生物感測器 (見圖 3)：穿戴式健康監測儀所執行的光學心率測量，會影響醫生是否能正確地診斷病人病情。

在所有這些應用中，數位感測器結合了硬體的測量和軟體的資料處理。我們可以很容易地以元件的操作參數來說明硬體的誤差範圍，並且記錄在數

圖 2: CCS811 氣體感測器解決方案

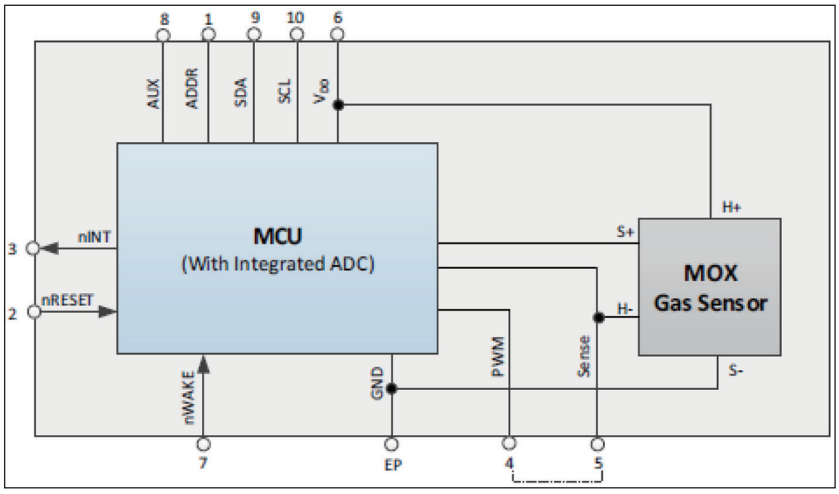


圖 1: TDC-GP30 超音波流量轉換器 (ultrasonic flow converter)

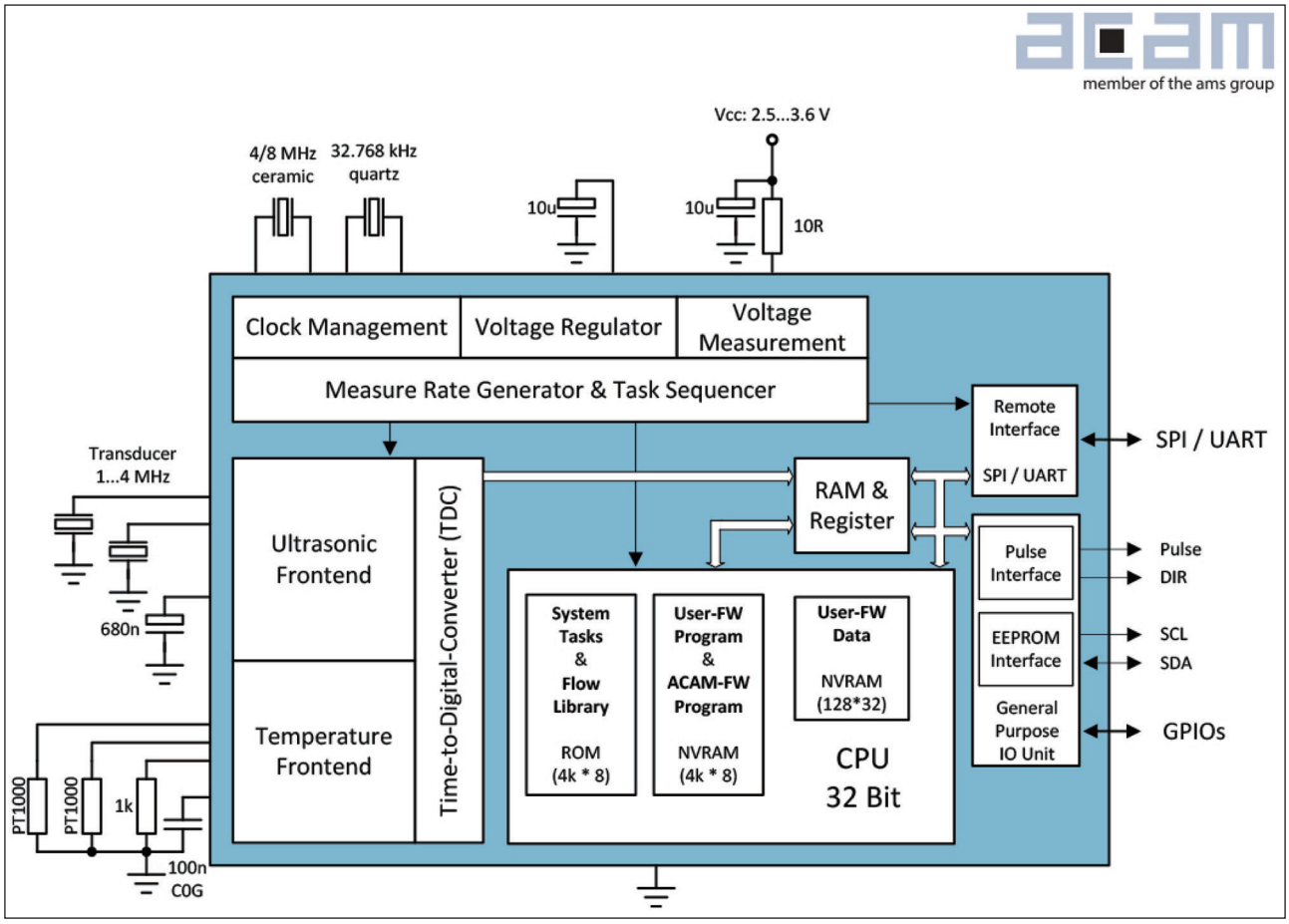


圖 3： AS7000 生物感測器

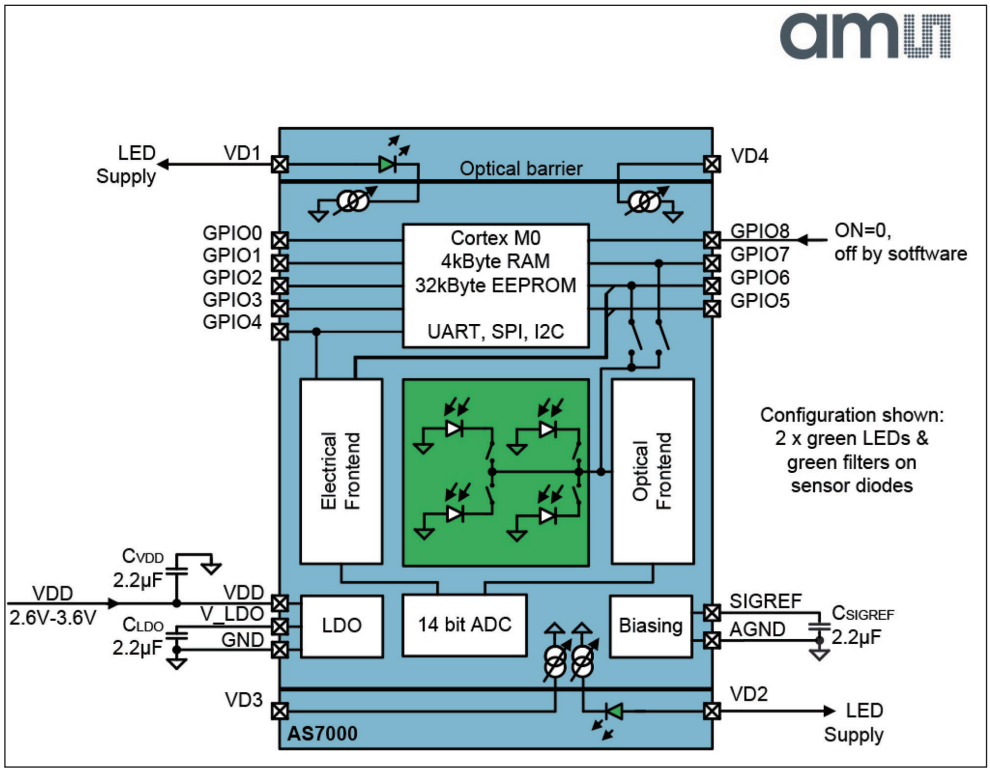
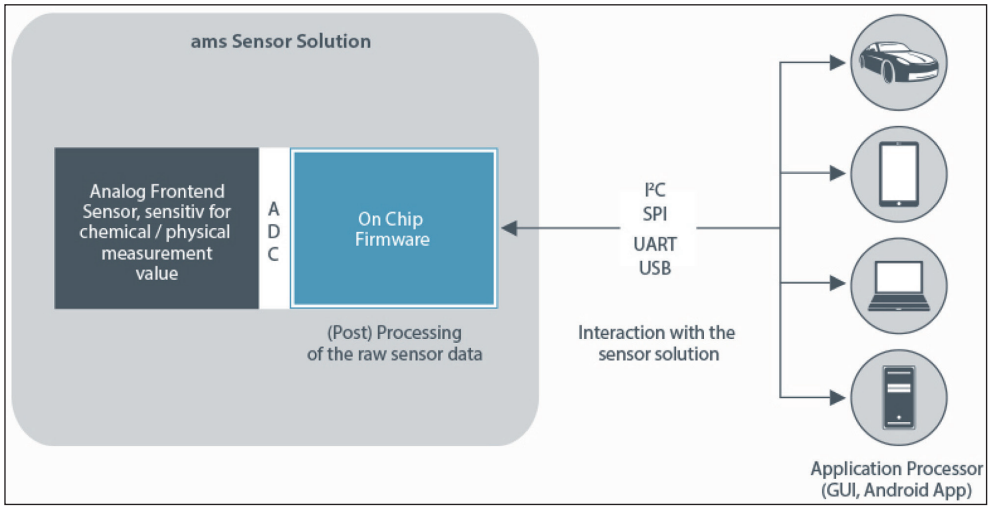


圖 4：典型感測器解決方案的架構



據規格表中。

然而要說明感測器軟體的誤差範圍，我們最好是將問題拆分成幾個部分。

幾乎每個數位感測器都包含以下幾個主要元素 (見圖 4)：

■一個負責收集原始數據的類比前端

■接取硬體的驅動程式

■負責數據處理和分析的演算法

■將數據傳遞給應用本身的膠合邏輯 (glue logic)

這意謂著每個數位感測器都包含不同的軟體元件，並有著不同的要求：

■某些軟體元素被耦合至特定的硬體元件

■某些軟體元素具有重要的計時功能

■某些軟體需要較強大的運算能力

■某些程式碼沒有特定的要求

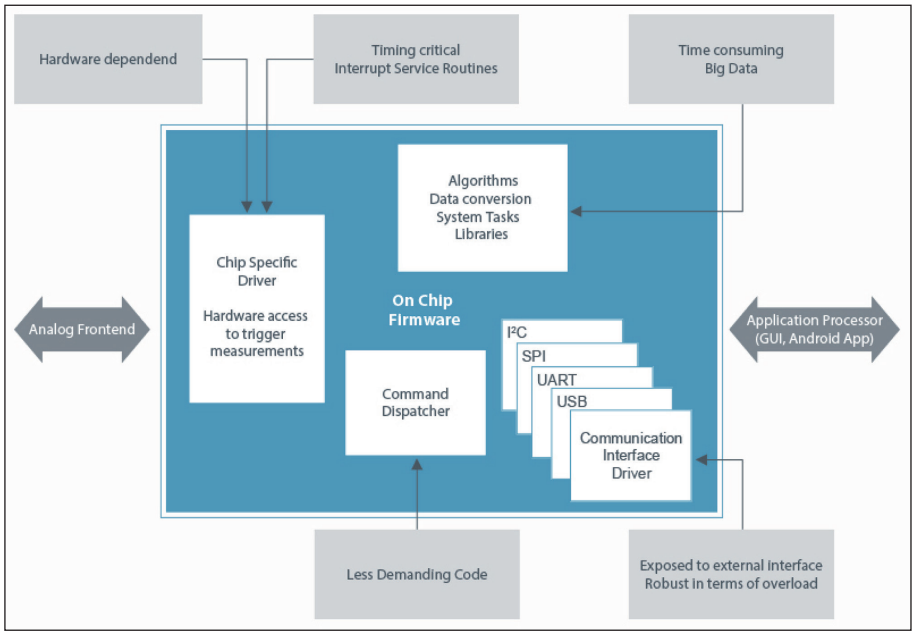
不同的錯誤可能會出現在程式庫的不同部分，所以必須仔細制定測試規則，以發現每種錯誤類型 (見圖 5)。例如：

■在演算法中，測試應該要查找捨入誤差 (rounding errors) 和有符 / 無符誤差 (signed/unsigned errors)，以及緩衝區溢位 (Buffer Overflow)

■在接取硬體的元件中，測試軟體是否正確地回應超時是非常重要的

■在連結其他系統，例如主機微控制器或應用處理器的介面上，軟體必須能夠以中斷處理過載在 ams，感測器軟體的測試程式區分了這些類型：程式被設計成可分解為多個區段來進行測試。另外，一些較小的區段不需要使用許多介面連結至

圖 5：在 ams 感測器解決方案晶片上微控制器中的晶片上韌體 (ROM 程式)



程式的其他區段，但是儘可能地獨立於呼叫程式 (calling code)。

測試演算法程式是很簡單的：針對一組給定的輸入值，測試人員能確切預期會有什麼輸出。且由於這部分的程式不需要知道數據來自何處，所以它不依賴感測器硬體。

相較之下，驅動程序的測試 – 例如，驗證感測器是否正確執行註冊器存取 — 就需要模擬硬體。

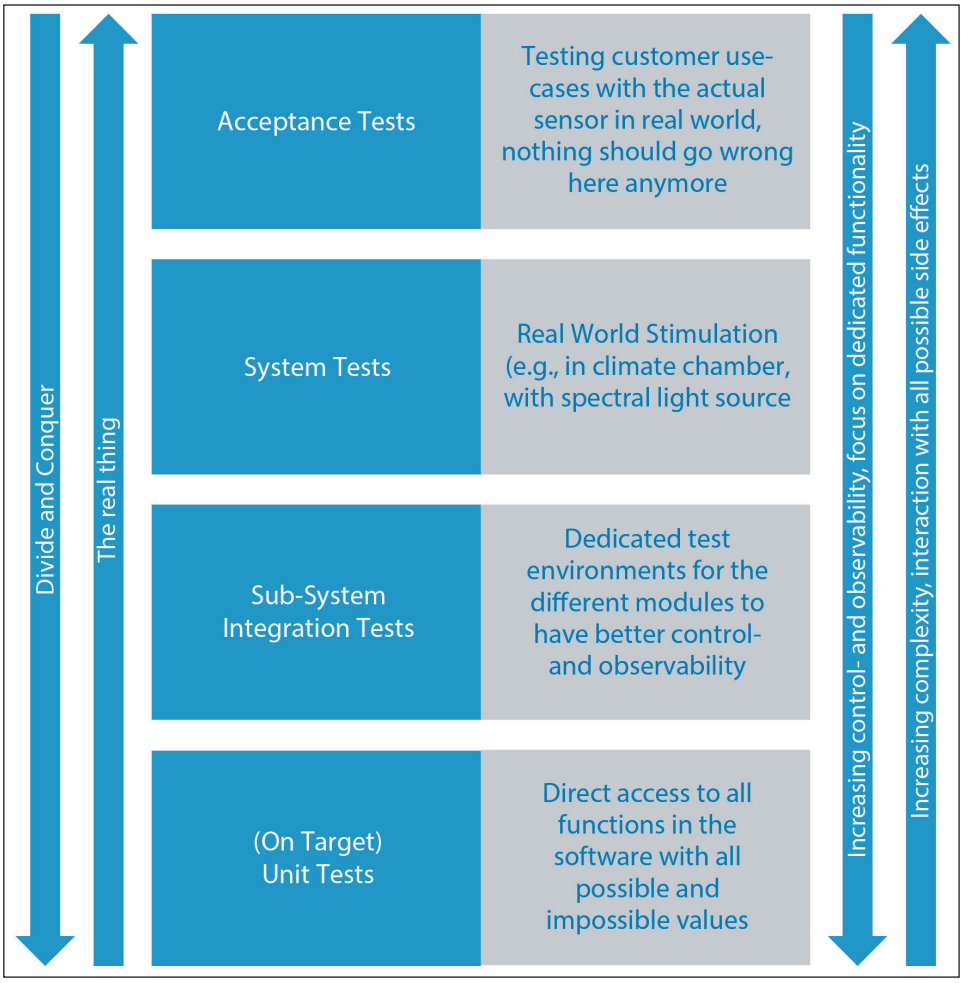
不過，有效地測試程式區段會發現諸如溢位 (overflow)、緩衝區之外接取事件，以及迴圈終止條件錯誤等 bug，但是這些測試並不足以驗證整個感測器系統的功能。

比部分的總和更多

兩千多年前，亞里斯多德 (Aristotle) 就已經發現整體不僅僅是其各個部分的總和。這個說法當然適用於嵌入式軟體。在針對軟體的每個區段進行獨立測試之後，必須驗證所有部分是否能夠正確配合 (見圖 6)。

特別是測試工程師必須確保軟體在任何可能使用的硬體環境中都能正確執行。例如，與單機式的感測器裝置相較，手機的硬體環境要求更嚴苛，因為手機通常會觸發更多的感測器中斷。因此，壓力測試是

圖 6：奧地利微電子 (ams) 的通用測試架構



必須進行的，以檢查感測器 IC 中的各種介面是否可以承受中斷過載而不遺失任一位元的數據。

系統測試還需要驗證系統的排序。例如，初始化程序和計算程序可以獨立驗證，但系統軟體必須以正確的順序呼叫這些程序，否則感測器將失效。

最後，軟體在異常情況下的操作也必須進行驗證。在遭遇極端出乎意料的感測器輸出條件之後，Schiaparelli 太空艙失敗了，當然我們也不可能測試感測器可能暴露的所有潛在極端事件。ams 執行的軟體檢查旨在驗證各種非標準條件下的效能，例如，當出現不正常的大電流汲取時，感測器軟體就會例行地測試操作是否正確，以檢查感測器是否能承受電源供應的異常波動。

如何證明感測器軟體的完整性

理論上，任何給定感測器 IC 的軟體測試程式的目標都是為了向使用者提供百分之百的保證，保證感測器系統在任何時候、在所有應用中、在任何操作條件下都能正常工作。畢竟，這是使用者的理想要求。

然而在實際情況中，以火星登陸艙為例，是沒有百分之百保證這種事的。既然沒有，使用者又該如何評估軟體錯誤所導致的感測器 IC 故障可能性呢？

這個問題很難準確地回答。在汽車電子領域中，存在著一個系統安全標準：ISO 26262。這提供了一個架構來預測系統在預期應用中的故障率。針對每種模式下的故障模式分析和故障率測量，此標準實施極為嚴謹的流程。

然而，愈嚴謹的測試過程，所需要的時間就愈長，成本愈高。因為成本和時間的緣故，ISO26262 此種驗證流程通常不適用於消費性產品。但是重視信譽的消費性產品製造商仍然需要對其使用的感測器 IC 的品質和可靠性有著強大的信心。

為了讓所有客戶能評估自己對於 ams 感測器的嵌入軟體可以抱持何種信心程度，ams 已經自定軟體品質要求標準 (Software Quality Requirements standard)。該標準的規範定義了所有軟體計畫的軟體品質水準和要求，並制定了標準開發和測試流程。

為了驗證是否符合標準，ams 會根據標準針對選定的軟體計畫進行評估。只要客戶提出要求，ams 會解釋標準細節，並說明其所屬的軟體開發過程。根據所選擇的品質水準，此標準要求開發者遵循最佳實作方式，例如：

■需求管理
■靜態程式分析
■內部程式審查
■程式的單元測試
■系統測試以驗證功能完整性
■產生日誌文件和測試報告，以備客戶檢視
■透過測試達到程式覆蓋率的最小百分比
■正確記錄源程式碼和測試

藉由這種方式，ams 能夠保證數位感測器 IC 中的嵌入式軟體可以提供穩健、可預測的效能，讓使用數位感測器的系統設計人員能夠受益於其功能和效能優勢，而不會對主機系統的可靠性造成風險。

作者簡介

Stephan Puri-Jobi 於哈根貝格應用科技大學就讀硬體和軟體系統工程。他於 2005 年加入 ams AG 擔任軟體應用工程師，協助客戶將 ams 的硬體產品和軟體解決方案整合至其終端產品中。2011 年，他加入恩智浦半導體 (NXP Semiconductors) 擔任智慧卡部門的測試工程師。他於 2013 年以測試架構師的職務重新加入 ams。他現在負責 ams 感測器解決方案領域的各種軟體計畫的軟體驗證。 CTA