

Tom Catalino

Critical Link, LLC

Asheesh Bhardwaj

德州儀器 (TI)

運算密集、自訂機械視覺專用架構

介紹：

機械視覺技術的運用範圍越來越廣，目前已經部署於許多應用領域，未來將拓展到更多領域。其中包含用來製造各種產品的儀器及檢驗設備，產品項目多樣化，例如木板、藥品、半導體、刀片和汽車等。每種機械視覺應用均具備一套獨特的視覺系統需求，然而預設裝置通常不足以滿足需求。阿本白皮書詳述特定類別的運算密集機械視覺系統，詳細說明架構和其他資源，讓讀者能以此架構為基礎，或採用類似架構，發展專屬的視覺系統設計。

問題聲明：

許多機械視覺系統演算法的運算密集程度都非常高，因此需要使用專用硬體。每種應用均具備獨特需求，因此適合可編程架構，如 DSP 或 FPGA，而不適合固定功能的專用裝置或核心，例如以 CODEC 或 ASIC 進行的視覺分析和影片壓縮。

目前市面上已有許多可立即使用的視覺產品，提供適用於標準型視覺系統的基礎區塊。其中包括 OpenCV 的開放原始碼版演算法。許多視覺系統所需支援的標準包括使用多種不同標準視訊格式 (MPEG4、H.264 等)，以及標準數位介面組 (USB、GigE、Camera Link、HDMI 等) 的視訊編碼或轉碼。

當您需要開發出更專業的攝影機，又該怎麼辦？

或許您需要的攝影機不一定要具備每秒顯示幀數達 30fps 或 60fps 的全解析度高畫質影片。相反地，您需要完全客製化的演算法，能以超高畫面播放速率處理影片的一小部分，例如數千 fps，以及 50×50 畫素解析度。另一方面，您可能需要以低畫面播放速率、低整體耗電量，對超高解析度的非標準影像執行自訂演算法。然而，這種特殊攝影機的需求量或許並不高，不值得為了開發專業 ASIC 投入時間、成本，或承擔風險。

本論文提供專門處理這類獨特需求的架構，並提供必要資源，協助您根據說明的概念開發專屬設計。

架構：

Critical Link 為德州儀器 (TI) 設計網路成員之一，他們在許多具這類需求的設計中使用的架構，運用了 Xilinx 的 FPGA Spartan-6 系列，以及 TI OMAP-L138 DSP+ARM9™ 處理器的功率與彈性，包括使用其 uPP 介面。如同本論文所述，將這兩種裝置與 Critical Link 的 MityDSP-L138F 系統模組 (SoM) 結合，就能打造出低功耗系統，並有效處理獨特需求。

XILINX SPARTAN-6 的可編程邏輯功能：

將可編程邏輯整合至任何硬體設計，提高整體系統彈性。在此情況下，Xilinx Spartan-6 是特別恰當的選擇，可與 TI OMAP-L138 處理器搭配使用，適用於本論文中詳述的系統類型。Spartan-6 具備 SelectIO，加以設定之後，便能支援各種訊號標準，包括 LVDS。也可加以客製化，直接介接至最適合設計系統的數位成像感測器。此外，在 FPGA 與感測器之間設計 ADC 後，還可用於介接至類比感測器，例如 CCD 成像儀。

FPGA 取得影像資料後，就能利用可編程邏輯，迅速有效地對資料進行各種運算。FPGA 適合執行的運算包括邊緣或角落偵測、擷取，以及低階分析運算等。此外，FPGA 也可有效執行基本幀對幀運算。

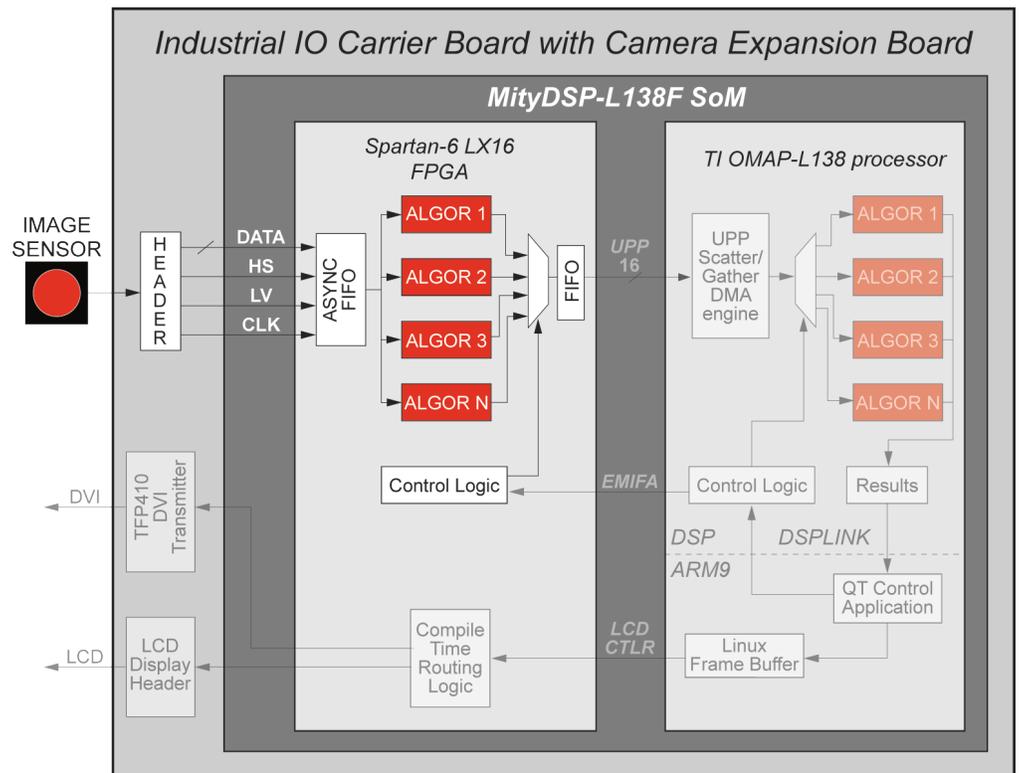


圖 1: Xilinx FPGA 影像處理功能

FPGA 的另一項優勢是可用來將原始資料篩選至僅剩必須由 DSP/應用處理器處理的資料。這點在處理的需求超過 DSP/應用處理器處理能力範圍時特別實用，例如以高畫面播放速率分析全解析度影片串流的每一畫面，或是純資料量高出處理器數位介面的容納能力。此原始資料篩選功能的運作方式是利用 FPGA 靜態或動態識別影像的特定區域，方便應用處理器加以處理 (例如牌照或人臉)；或者利用 FPGA 計算重要統計資料，例如影像上的直方圖或背景評估，然後將此資訊傳送至 OMAP-L138 處理器。

Xilinx Spartan-6 FPGA 能以超高畫面播放速率擷取資料，並捨棄無關的全部或部分畫面。之後，便可僅傳送所需資料到 DSP 進行處理，減少 FPGA 與 DSP/應用處理器之間的必要整體頻寬。

Xilinx Spartan-6 裝置提供高達 180 個 DSP48A1 圖塊，可加以運用，以平行硬體架構實作高效能影片加速區塊。Xilinx 也提供影片和影像處理 IP 核心，可用來縮短開發時間。

最後，Xilinx FPGAs 還可用於實作非標準介面。這可能是多重顯示器或多重攝影機系統、自訂同步序列介面、自訂平行介面，或單純是其他系統內部應用處理器未支援的標準介面附加功能。這些介面也同樣可以善用 FPGA (LVDS 等) 提供的各種實體層。

經由 uPP 將影像資料從 FPGA 傳遞至 DSP:

Critical Link 採用了 TI OMAP-L138 處理器的 uPP 介面，將影像資料從 Xilinx Spartan-6 傳遞至 DSP 板載 OMAP-L138 處理器。此介面的設計目的，是專門用來將大量資料連續移入或移出處理器的記憶體。

uPP 每時鐘循環可記錄一個資料字 (8 或 16 位元)。(或者，在雙倍資料速率下，每時鐘則可處理二個資料字，但時鐘速度必須放慢一半。) uPP 時鐘速率最多可達處理器時鐘速率的一半，uPP 時鐘上限為 75MHz，處理能力最高可達 150 MBytes/s。透過這個精巧的 uPP 介面，便可輕鬆與 FPGA 整合。

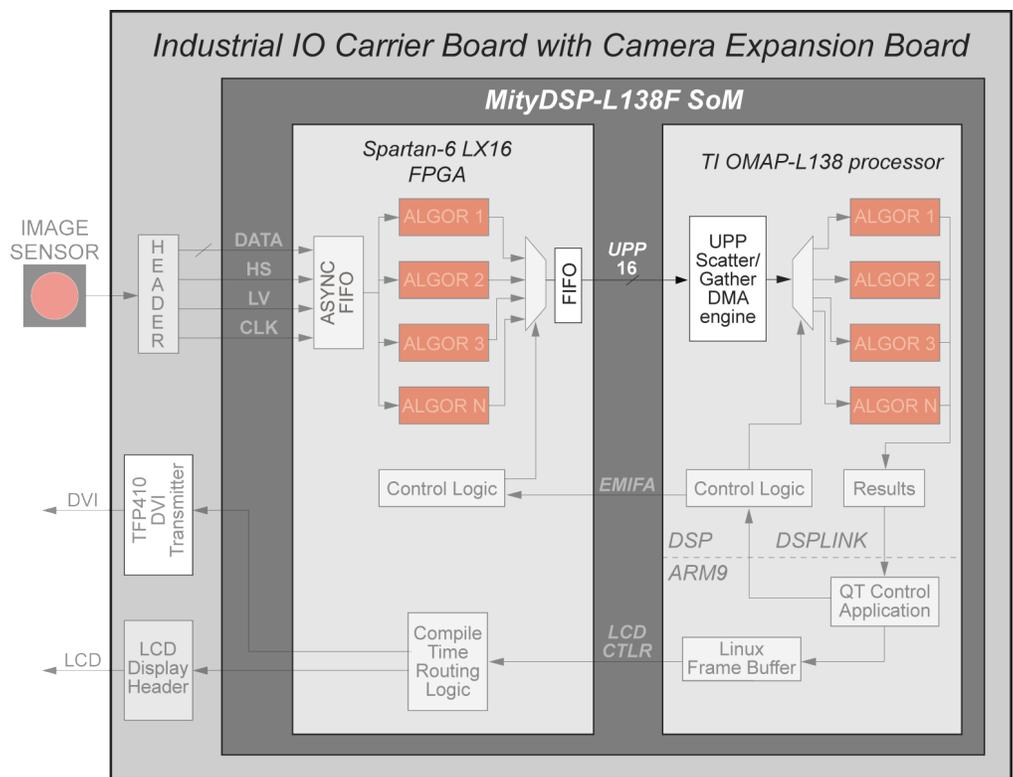


圖 2: TI OMAP-L138 DSP+ARM9 處理器與 FPGA 之間的 uPP 介面

實際上，TI OMAP-L138 處理器擁有兩個 uPP 介面，每個介面可獨立配置。就硬體觀點而言，uPP 介面是一種相當單純的同步資料介面。它具有時鐘接腳、資料接腳和多種控制接腳，用來代表有效的資料及開始/等候狀況。其實，這種介面可以和一些平行ADC 與 DAC 緊密搭配使用。

以上述 uPP 資料速率為例，下表（表1）說明從Xilinx Spartan-6 FPGA 移轉到OMAP-L138 處理器系統記憶體額定最大 fps。請注意，這些計算不含感測器所需的幀間隔或線間隔。擴大系統時，必須考量 OMAP-L138 處理器 456-MHz ARM9 和 456-MHz 浮點的所需演算法執行能力，因為這會影響整體處理畫面播放速率。

理想作法是在原型系統或評估模組上進行所需演算法的試驗。在任何情況下，將 DSP 或 ARM 中處理的應用程式識別為系統設計的限制因子後，此時便可藉由識別可從 OMAP-L138 處理器移出並移入 FPGA 的重複運算，讓FPGA 發揮最大效用。這可讓 DSP 和 ARM 集中處理非重複運算、更全面的運算，或是同時需要多重畫面的運算。如果擷取速率很高，而且 uPP 周邊設備無法處理全部的原始資料，便可運用FPGA 降低整體資料速率。

W × H	位元組/ 畫素	fps
1024 × 1	2	73,242
64 × 64	2	18,311
256 × 256	2	1,144
1024 × 256	2	286
640 × 480	2	244
752 × 480	2	208
640 × 480	3	163
1024 × 768	2	95
1280 × 720	2	81
1280 × 720	3	54
1920 × 1080	2	36
1920 × 1080	3	24

表 1: 經由 uPP 的額定畫面播放速率為150MB/s

利用 uPP 的兩個獨立通道，就能輕鬆實作圖 3 中的架構。傳入資料可由 FPGA 預先處理，再經由 uPP 傳送至 OMAP-L138 處理器的 DSP，接著進一步處理，以執行智慧影像/影片分析運算。最後，資料可透過 FPGA 傳回任何輸出介面。資料第二次通過 FPGA 時，便可執行低階輸出處理，例如將影片覆蓋在 OMAP-L138 ARM 核心提供的圖形使用者介面上方，或依 OMAP-L138 處理器的 DSP 指示，提供文字或其他圖形覆蓋。

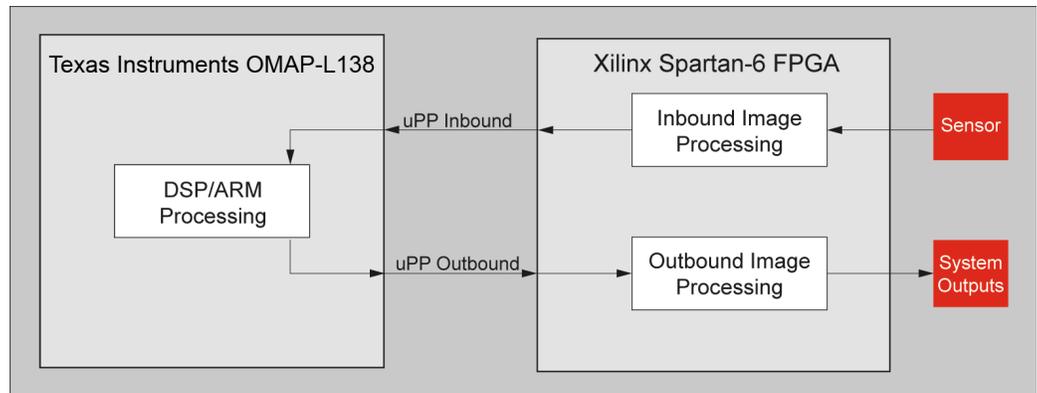


圖 3：TI OMAP-L138 DSP+ARM9 處理器 uPP 輸入和輸出

OMAP-L138 處理器的整合式 ARM 和 DSP 處理功能：

到目前為止，我們已經討論了 FPGA 資料取得、FPGA 資料處理，以及 OMAP-L138 處理器資料移轉，這個處理器提供自行處理內部影像資料的獨特架構，整合 456-MHz ARM9 應用處理核心與 456-MHz TMS320C674x DSP 核心。

OMAP-L138 處理器 + Xilinx Spartan-6 FPGA 架構組合在 Critical Link 普遍運用方式，是讓 OMAP-L138 處理器的 DSP 在預先處理影像資料從 FPGA 送達時，執行剩餘演算「heavy lifting」。執行此工作的方式是實作以 C 或 C++ 手編的自訂演算法，並使用 Code Composer Studio™ 整合式開發環境 (IDE) 中 TI 提供的編譯器將演算法依 DSP 最佳化；或是使用 TI 提供的影像和影片處理專用最佳化程式庫：IMGLIB 和 VLIB。OpenCV 開放原始碼程式庫搭載許多可輕易匯至 DSP 的視覺相關演算法。

DSP 可處理運算密集影像分析和處理運算，例如物件偵測、物件識別、邊緣偵測、色彩轉換、影像篩選、物件追蹤和大小調整。

機械視覺演算法需要使用許多篩選運算，以便找到物件的形狀、縫隙、髒污和其他異狀。擴大、侵蝕、Sobel、Canny filter、Harris、Hough 和 Haar 分類器可協助物件尋找和特徵擷取工作。物件偵測和追蹤演算法主要是由 Lucas Kanade、光流、卡爾曼濾波器、Bhattacharya 距離和高斯模型支援。

多數影像處理運算均發生於灰階或 RGB 色彩模式。如果擷取的影像資料格式為 YCbCr，亮度 Y 資料可用於灰階處理。視所需的處理類型而定，可將 RGB 格式的擷取資料轉換成 YCbCr 格式，或保持為 RGB 格式。執行大量訊號處理演算法的函式為 IMGLIB 或 VLIB 的一部分，或可在 OpenCV 取得。開發的應用程式也利用 DMA 存取外部記憶體，以便將資料移轉至內部記憶體，加快處理速度。

移動物件分割是機械視覺處理的範例之一，此作業需要以灰階模式處理影片，並刪除背景與處理前景資料。這需要使用型態運算，如前景遮罩上的擴大和侵蝕。物件邊界是利用連接的元件模型形成。

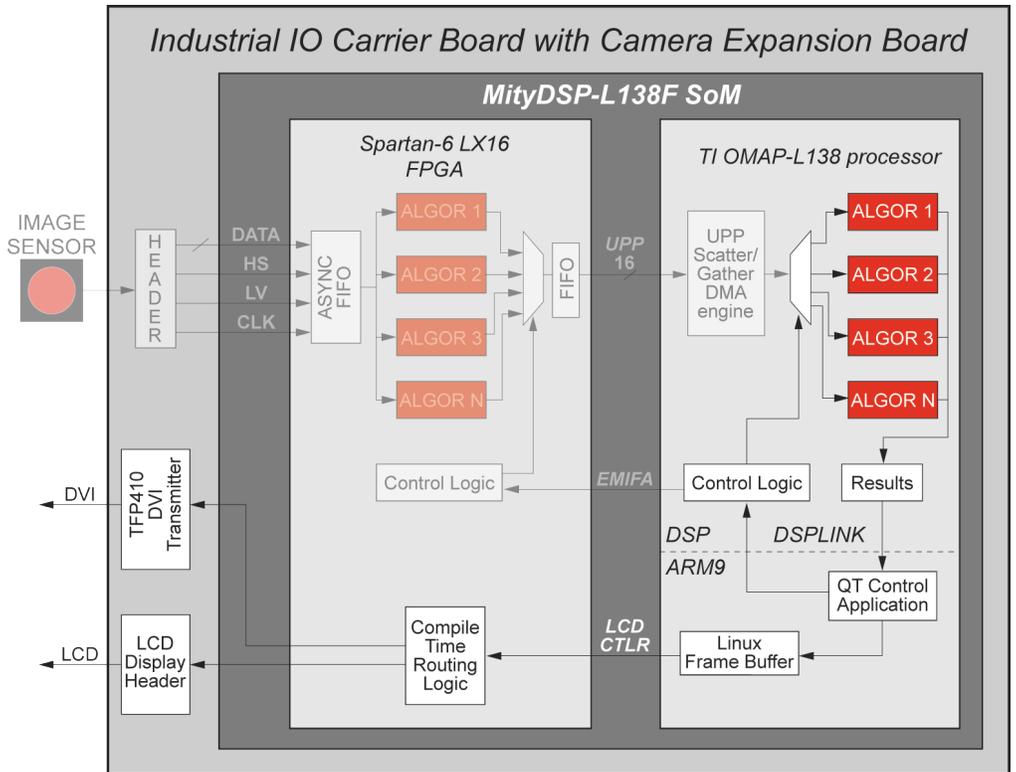


圖 4: TI OMAP-L138 DSP+ARM9 處理器的影像處理功能

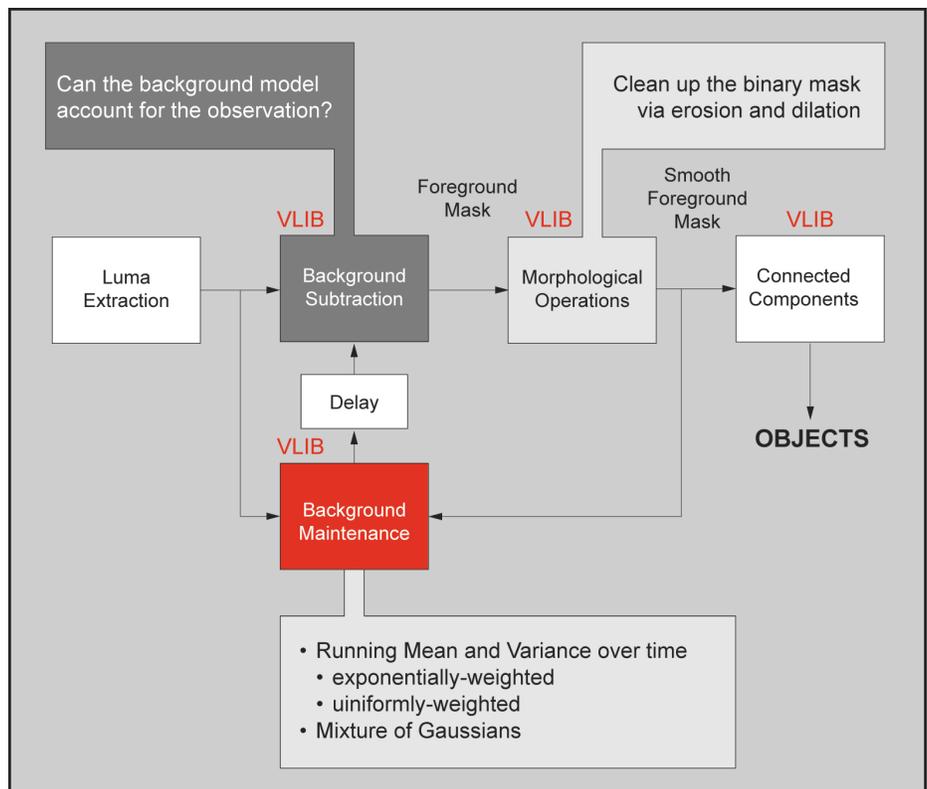


圖 5: 移動物件分割

精確度為 16 位元的移動物件分割，效能低於單一高斯模型的 16 位元精確度。視所需的運算類型而定，可選擇饋入 DSP 的約略解析度。資料位於外部記憶體時，VLIB 處理會產生 50% 的額外負擔。

VLIB 功能	循環/畫素
將 YUV 轉換成 Luma	0.38
減去背景	1.38
侵蝕	0.2
擴大	0.2
EWRMean	1.16
EWRVariance	1.37
CreateCCList	1.8

表 2: VLIB 效能基準

外部系統介面連接至 ARM 核心，並由 ARM 核心管理，如此一來，就能在同個位置管理資料處理和驅動程式處理負擔。將運算工作小心分散至三個可用的核心，就能將架構的處理能力發揮到最大。

執行 DSP 演算工作時，DSP 可與 OMAP-L138 處理器的 ARM 通訊，再透過 ARM 與外界通訊。這可能會是本機或遠端使用者介面，或甚至是更大系統內部的其他處理子系統。DSP 可經由共用記憶體、信箱或各種 TI DSPLink 程式庫提供的其他機制與 ARM 通訊。RingIO、MessageQ 和 Notify 在 DSPLink 內提供這類通訊的專用介面。ARM 與 DSP 之間共同記憶體區域用於分享這些處理器間的資料指標。DSPLink 程式庫提高資料交流效率。

設定資料可從 ARM 傳遞至 DSP，同時測量結果、統計資料及原始或處理過的影像/影片資料也可傳遞至 ARM，與外界分享。由於 ARM 可執行功能齊全的作業系統，例如 Embedded Linux、Windows CE、QNX 或 ThreadX，因此特別適用於執行通訊和顯示功能。

摘要: 本論文說明可因應部分機械視覺市場變化多端的需求的架構。此架構運用 Xilinx Spartan-6 FPGAs 的能力 (雖然任何系統的 FPGA 均可用於設計中)、TI OMAP-L138 提供的浮點和定點 DSP 與 ARM9，以及本身提供的便利又易於使用的 uPP 介面周邊設備。

如需這些主題的相關詳細資訊，可參閱下列參考資料。特別是 Critical Link 提供的 MityDSP-L138F SoM 和視覺開發套件，可作為方便工程師使用的平台，使用專屬設計進一步探索此架構。

實用連結：

- **Critical Link MityDSP**
- **Critical Link 視覺開發套件**
- **TI OMAP-L138 DSP+ARM9 處理器**
- **Xilinx Spartan-6**
- **Xilinx 影像處理程式庫**
- **TI IMGLIB**
- **TI VLIB**
- **TI Code Composer Studio™ IDE**
- **開發原始碼 OpenCV**
- **TI OpenCV 應用**

Important Notice: The products and services of Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries described herein are sold subject to TI's standard terms and conditions of sale. Customers are advised to obtain the most current and complete information about TI products and services before placing orders. TI assumes no liability for applications assistance, customer's applications or product designs, software performance, or infringement of patents. The publication of information regarding any other company's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Code Composer Studio is a trademark of Texas Instruments Incorporated. All other trademarks are the property of their respective owners.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services per JESD46, latest issue, and to discontinue any product or service per JESD48, latest issue. Buyers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All semiconductor products (also referred to herein as "components") are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its components to the specifications applicable at the time of sale, in accordance with the warranty in TI's terms and conditions of sale of semiconductor products. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by applicable law, testing of all parameters of each component is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or the design of Buyers' products. Buyers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with Buyers' products and applications, Buyers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI components or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of significant portions of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI components or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that component or service voids all express and any implied warranties for the associated TI component or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Buyer acknowledges and agrees that it is solely responsible for compliance with all legal, regulatory and safety-related requirements concerning its products, and any use of TI components in its applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Buyer represents and agrees that it has all the necessary expertise to create and implement safeguards which anticipate dangerous consequences of failures, monitor failures and their consequences, lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate remedial actions. Buyer will fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of any TI components in safety-critical applications.

In some cases, TI components may be promoted specifically to facilitate safety-related applications. With such components, TI's goal is to help enable customers to design and create their own end-product solutions that meet applicable functional safety standards and requirements. Nonetheless, such components are subject to these terms.

No TI components are authorized for use in FDA Class III (or similar life-critical medical equipment) unless authorized officers of the parties have executed a special agreement specifically governing such use.

Only those TI components which TI has specifically designated as military grade or "enhanced plastic" are designed and intended for use in military/aerospace applications or environments. Buyer acknowledges and agrees that any military or aerospace use of TI components which have **not** been so designated is solely at the Buyer's risk, and that Buyer is solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI has specifically designated certain components as meeting ISO/TS16949 requirements, mainly for automotive use. In any case of use of non-designated products, TI will not be responsible for any failure to meet ISO/TS16949.

Products

Audio	www.ti.com/audio
Amplifiers	amplifier.ti.com
Data Converters	dataconverter.ti.com
DLP® Products	www.dlp.com
DSP	dsp.ti.com
Clocks and Timers	www.ti.com/clocks
Interface	interface.ti.com
Logic	logic.ti.com
Power Mgmt	power.ti.com
Microcontrollers	microcontroller.ti.com
RFID	www.ti-rfid.com
OMAP Applications Processors	www.ti.com/omap
Wireless Connectivity	www.ti.com/wirelessconnectivity

Applications

Automotive and Transportation	www.ti.com/automotive
Communications and Telecom	www.ti.com/communications
Computers and Peripherals	www.ti.com/computers
Consumer Electronics	www.ti.com/consumer-apps
Energy and Lighting	www.ti.com/energy
Industrial	www.ti.com/industrial
Medical	www.ti.com/medical
Security	www.ti.com/security
Space, Avionics and Defense	www.ti.com/space-avionics-defense
Video and Imaging	www.ti.com/video

TI E2E Community

e2e.ti.com