

# 基於 I<sup>3</sup>C 分散式架構的人形 機器人靈巧手方案

■作者：Calvin Ji

近年來人形機器人技術迎來爆發式增長，全球科技巨頭不斷升級人形機器人產品和相關技術，推動機器人在工業、物流、醫療、教育和家庭等領域的廣泛應用。而在人形機器人系統中，靈巧手被認為是最複雜、最精密和最關鍵的執行系統，成為人形機器人發展的核心方向之一，它不僅需要具備高自由度的運動能力，還要實現對力量和位置的精準控制，以模擬人手的操作行為。

## 挑戰：傳統通訊方式在分散式架構中的瓶頸

在採用分散式電氣架構的靈巧手設計之中，負責每個主動自由度的電機驅動，以及分佈在每個手指的觸覺感測器，需要通過 UART

或 CAN 介面與手掌中央主控 MCU 通訊。主控 MCU 透過 CAN、RS485、EtherCAT 介面接入機器人本體系統匯流排。這種架構存在幾個需要解決的痛點，在一定程度上制約了靈巧手系統的性能提升、架構演進和輕量化、小型化的發展。

- 頻寬限制：UART/CAN 通訊的串列傳輸速率限制了控制線路頻寬；
- 線束複雜：每個手指需獨立佈線，導致線束數量龐大，增加組裝難度與故障風險。
- PCB 空間受限：多路通訊介面佔用大量 PCB 面積，限制系統整合程度。
- 擴展性差：增加自由度或感測器數量時，現有通訊架構難以靈活擴展。
- 非同步通訊問題：UART/CAN 為非同步通訊，微控制器 (MCU) 需搭配外部晶體振盪器，以

提供穩定且高精度的時鐘訊號，作為系統時序的基準，增加硬體複雜度。

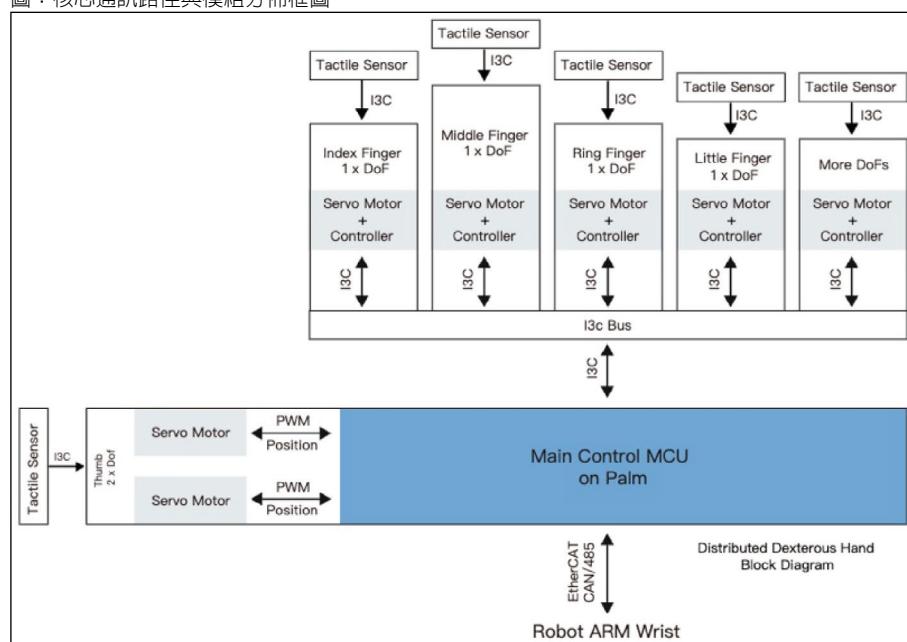
閱讀白皮書 (<https://www.nxp.com/webapp/Download?colCode=JOURNEY-MOBILE-ROBOTICS-WP>)，探索移動機器人如何從固定機械臂演進到人形機器人。

## 解決方案：基於 I<sup>3</sup>C 汇流排的分散式通訊架構

本方案基於 I<sup>3</sup>C 的靈巧手內部區域匯流排拓撲結構，革新靈巧手內部通訊方式。該架構採用 i.MX RT1180 作為手掌主控 MCU，MCX A132 作為手指關節控制 MCU，通過 I<sup>3</sup>C 汇流排連接多個伺服節點與觸覺感測器，對外則通過 EtherCAT、CAN、RS485 連接到機器人系統匯流排。

靈巧手精準重現人手動作，可連線至行動機器人 (<https://www.nxp.com/applications/industrial/factory-automation/mobile-robotics:MOBILE-ROBOTICS>)，瞭解恩智浦如何賦能安全可靠的行動機器人。

圖：核心通訊路徑與模組分佈框圖



## I<sup>3</sup>C 汇流排優勢：

### 1、高速通訊能力

標準速率高達 12.5 Mbps，優於 UART 和 CAN2.0，且在特定條件下支援 DDR 模式，理論最高可達 25Mbps，滿足高解析度感測器和即時控制高頻寬需求；

### 2、簡化佈線與硬體設計

I<sup>3</sup>C 主機僅需兩根線 (SDA + SCL) 即可接多個匯流排從設備，減少線束數量，提升靈巧手模組化裝配效率。無需外部收發器和高準確度時鐘晶振，節省 BOM 成本與 PCB 空間；

### 3、動態設備管理能力

支援動態位址分配，設備在啓動時自動識別並獲取動態位址，避免靜態位址衝突。支持熱插拔 (Hot-Join)，單個手指模組可實現在通電狀態下靈活替換；

### 4、即時事件回應機制

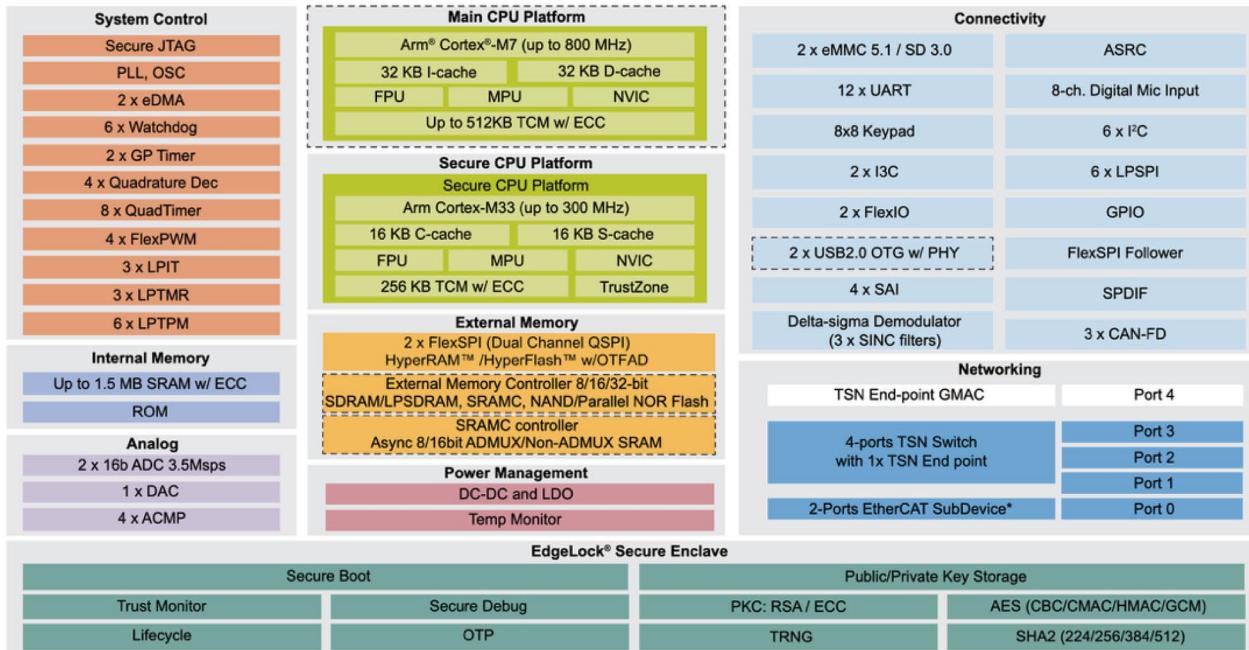
支援帶內中斷 (In-Band Interrupt)，設備可通過 SDA 線直接向主機發送緊急事件或故障訊號，無需額外 GPIO 中斷線，進一步簡化線束並提升主機回應速度。

### 5、可靠的訊號完整性

在高速驅動模式下，I<sup>3</sup>C 採用 Push-Pull 驅動模式，相比傳統的 I<sup>2</sup>C，顯著提高了訊號完整性，有利於延長傳輸距離並增強外掛程式連接的可靠性。

基於 I<sup>3</sup>C 的靈巧手方

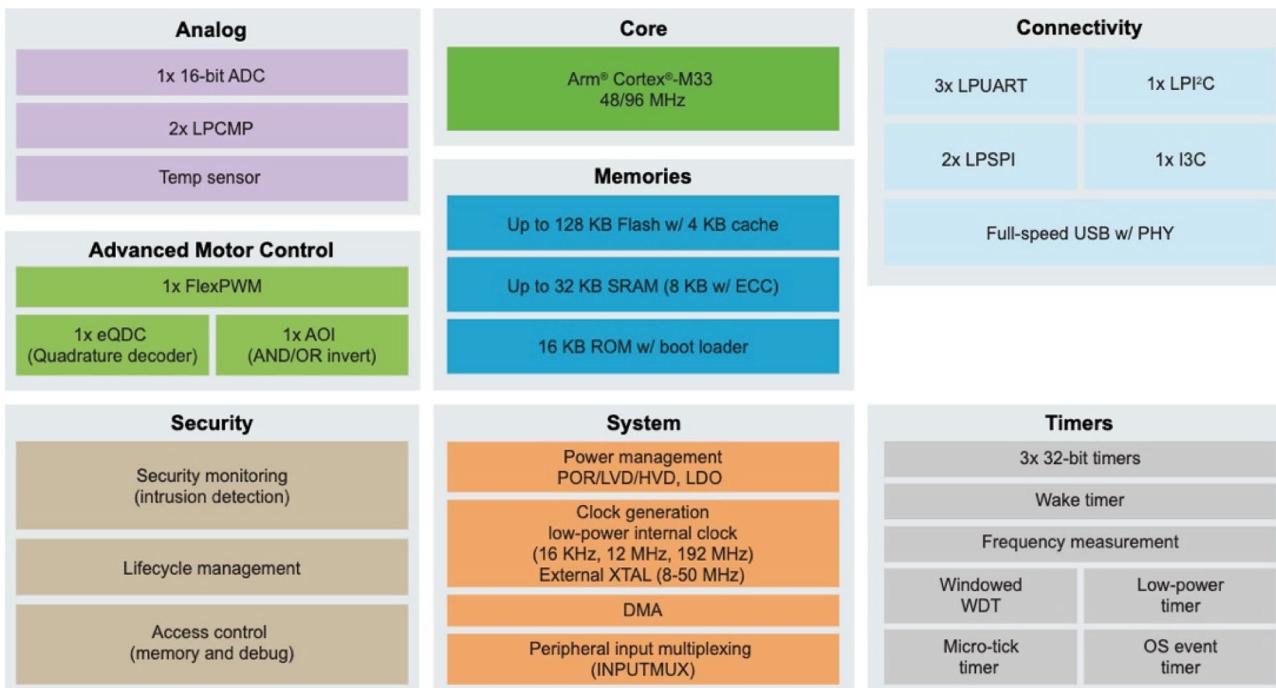
圖 : i.MX RT1180 結構框圖



案採用恩智浦 i.MX RT1180 作為手掌中央主控 MCU，請連接至產品頁面 (<https://www.nxp.com/products/i.MX-RT1180>) 瞭解更多。

- 雙核架構 (240MHz M33 + 800MHz M7)，高性能處理能力；
- 整合 2 個 I<sup>3</sup>C 介面，可連接多個伺服節點與

圖 : MCX A132 結構框圖



感測器：

- 支援 EtherCAT、CAN-FD、UART 等多種工業通訊協定介面；
- 豐富的 PWM、ADC、編碼器介面，單一晶片最多可直接驅動六個無刷空心杯馬達。
- 手指關節伺服節點和觸覺感測器採用恩智浦 MCX A132(<https://www.nxp.com/products/MCX-A13X-A14X-A15X>)。
- 小尺寸封裝，適合手指模組嵌入；
- 整合 1 個 I<sup>3</sup>C 介面，與主控實現高速通訊；
- 內置 16-bit ADC，用於觸覺感測器類比高品質訊號採集；
- 支持 IEC 61508 SIL2 功能安全自測庫，滿足未來人形機器人對功能安全的要求。

## 總結

恩智浦希望通過創新的 I<sup>3</sup>C 匯流排拓撲設計，推動靈巧手系統向更高整合度、更強性能、更廣應用場景演進。同時恩智浦 i.MX RT1180 與 MCX A132 產品組合也為這一架構提供了堅實的硬體基礎，助力人形機器人技術實現新突破。

## 作者：

■ 紀成 (Calvin Ji)/ 恩智浦中國產品線工業 MCU 現場應用工程師



■ 畢業於山東大學，獲自動化學士學位、控制理論與控制工程碩士學位，於 2013 年加入恩智浦半導體公司工作至今，專注於 IIOT 微控制器產品應用方案開發與客戶技術支援。

## 趨勢科技與緯創數技投資攜手 打造全價值鏈企業級 AI 轉型工廠

趨勢科技宣布與緯創數技投資控股 (Wistron Digital Technology Holding Company, 以下簡稱緯創數技) 簽署合作意向書，結合其強大的 AI 基礎架構與系統整合能力，將打造全新「全價值鏈全球 AI 轉型工廠」Magna AI 公司，專注於為全球企業與組織提供 AI 驅動的顧問、建構、整合與營運服務共同推動新一代企業 AI 智慧轉型。

Magna AI 致力於成為全球獨特的全價值鏈 AI 轉型工廠，整合從策略規劃、架構設計、系統整合到營運維運的全方位能力，提供安全、端到端的 AI 平台，協助企業加速落地人工智慧，邁向智慧型企業的未來。

Magna AI 的獨特之處在於結合了緯創數技在 AI 硬體與系統整合上的深厚實力與趨勢科技整合 NVIDIA NIM 微服務的 AI 軟體與資安平台技術的領導優勢，透過雙方核心能力的整合，打造出一個統一的「AI 工廠模式」，提供安全、端到端的 AI 平台，助力企業快速構建並部署下一代 AI 智能工廠，其中包含：

- AI 運算與基礎架構：可依需求在公有雲、私有雲、主權雲或本地環境中進行架構設計、部署與優化。
- AI 原生應用與自動化：為各國及企業量身打造實際可用的 AI 解決方案。
- AI 驅動的產業方案與平台：針對金融、醫療、能源、政府等特定領域的挑戰與機會，提供量身打造的轉型解決方案。
- AI 安全體驗：在 AI 技術堆疊的每一層中，從設計階段即內嵌資安防護，確保信任性、韌性與合規性。
- AI 服務與顧問：採用前置部署工程師模式，將專家直接嵌入客戶營運環境中，以加速成果實現。