

# EtherCAT 全數位運動控制平台發展與應用

## EtherCAT Motion Control Platform Technology and Application

李宜玲<sup>1\*</sup>、曾俊彥<sup>2</sup>、李桂銘<sup>3</sup>、李峰吉<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 工程師

<sup>2</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 副研究員

<sup>3</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 研究員

<sup>4</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 經理

**摘要：**從傳統工業演變至自動化工業，廠區自動化設備的擴增提升了製品的產量與精密度，也讓硬體線路配置變得更加繁複，運用乙太網路控制自動化技術 (EtherCAT) 進行控制與網路通訊，不僅可將原本複雜的佈線改以網路線取代，即可進行高速資料與控制訊息的傳輸，提升資料的正確性與抗干擾能力；在 5G 來臨的時代，工廠將會迎來重大變革，結合大數據與 IoT 形成智慧型工廠，使得資料傳輸網路化成為重要的議題。本文將介紹工研院機械所以 EtherCAT 技術整合運動控制函式庫，開發出全數位運動控制平台 (EMP)，並結合開放式通訊協定 OPC UA 與 MQTT 之相關應用。

**Abstract :** The evolution from traditional industry to an automate industry caused the automation equipment to expand, which improved productivity and precision of the product, However it also made the wiring more complicated. By using Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT), we can replace the very complex wiring with Ethernet cable and to reach high-speed control and transmission of data; Thus, data accuracy and anti-interference ability can be enhanced. In the era of 5G, there is an essential revolution in the factory in combining the use of big data and IoT to build a smart factory; Therefore, the data transmission network will be a critical issue. The MMSL in the Industrial Technology Research Institute integrated EtherCAT technology and motion control command library to develop an EtherCAT Motion Control Platform (EMP). This article will introduce the development and application of EMP integrating with open communication protocol OPC UA and MQTT.

**關鍵詞：**全數位運動控制平台、運動控制函式庫、開放平台通信統一架構

**Keywords :** EtherCAT motion control platform, Motion control command library, Open platform communications unified architecture

### 乙太網路控制自動化技術 EtherCAT

EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology)- 乙太網路控制自動化技術最初為德國 Beckhoff 公司所研發的基於乙太網路通訊協議，並應用於自動化與工業控制領域的開放式即時現場匯流排 (Fieldbus) 技術。此技術突破了過去其他乙太網路解決方案的系統限制，具有靈活的拓樸結構、系統配置簡單、性能優越、操作簡便以

及成本低廉等優勢，使得過去無法以現場匯流排技術應用的領域得以此技術實現，EtherCAT 廣泛運用於自動化與工業領域，此技術由 EtherCAT 技術協會 (EtherCAT Technology Group, ETG) 負責支援並推廣該技術未來的發展，尤其隨著網路的發展，第五代行動通訊技術 (5th Generation mobile networks, 5G) 在未來將會改變整個社會型態，物聯網 (Internet of Things, IoT) 與工業 4.0 的概念衝擊各個行業，各項資料與控制訊息將會透過網路

來傳輸，EtherCAT 將會是自動化工業領域與 5G 聯結的橋樑。

## EtherCAT 運動控制軟體平台

### 1. EtherCAT 系統架構與運作原理

EtherCAT 架構是以主 (Master)/ 從 (Slave) 式來進行運作，相較於其他的工業通訊，EtherCAT 特色為「飛速傳輸」(Processing on the fly) 的技術，可改善網路傳輸延遲與不同步的問題。運行的方式是從 Master 端傳送符合 IEEE 802.3 標準的資料封包，會通過所有網路架構內的節點，因此 Slave 端可在封包到達該站時，獲取所需要的資料並且將需要傳送的資料放入訊框 (Frame) 內，接著再往下遞送，如圖 1 所示，此訊框只會被硬體的運作延遲所影響，由於乙太網路具有全雙工 (Duplex) 特性，最後會將訊息回傳給 Master 端，其有效資料率可以超過 100 Mbps，使得 EtherCAT 可以成為高性能的分散式 I/O 系統。

EtherCAT 透過 IEEE 1588 標準的分散式時脈計算法來實現精確地同步化作業，藉由將其中一組 Slave 的設備當作主節點的參考時脈 (Reference clock)，因此在每次掃描週期中讀取主節點的時脈，由 Master 端控制器傳送同步化的電報，便可確保整體絕對的系統時間與一致同步性 (可達小於

100 ns 之差異)。因乙太網路物理層具有全雙工與邏輯環狀結構，Slave 端節點可於 EtherCAT 封包通過時使用時間戳記 (Timestamp) 量測封包離開與回傳的時間差，藉由此方式，主節點時脈可以簡單、精確地確定各個獨立 Slave 節點時脈的傳播延遲偏移 (Propagation offset)，反之亦然。分散式時脈依據延遲偏移進行調整，將可有效降低抖動值 (Jitter) 以符合 IEEE 1588 要求，小於 1 μs 的精確同步控制，達到支援多軸同步運動控制。

在性能部分，藉由 Slave 端設備的硬體整合與主機網路介面控制器 (NIC) 的直接記憶體存取功能，整個 EtherCAT 協定的處理過程都在硬體中進行，I/O 的存取不受協定堆疊 (Protocol stacks) 的執行時間與 CPU 性能的影響。EtherCAT 還具有連接雲端設備的功能，運用邊緣閘道 (Edge gateway) 可通過 EtherCAT Master 端的電子郵件閘道 (Mailbox gateway) 功能，讀取 Slave 端設備中的任何資料。EtherCAT 是一個開放性的通訊協定，可以整合其它基於 IT 系統的協議，如：OPC UA、MQTT 與 AMQT 等協議，形成 IoT 的架構。

### 2.IntervalZero RTX/RTX64

Windows 作業系統並不是一個具有即時性的作業系統，一般來說必須搭配使用硬體 DSP、FPGA 的方式來達成硬即時 (Hard real-time) 的控

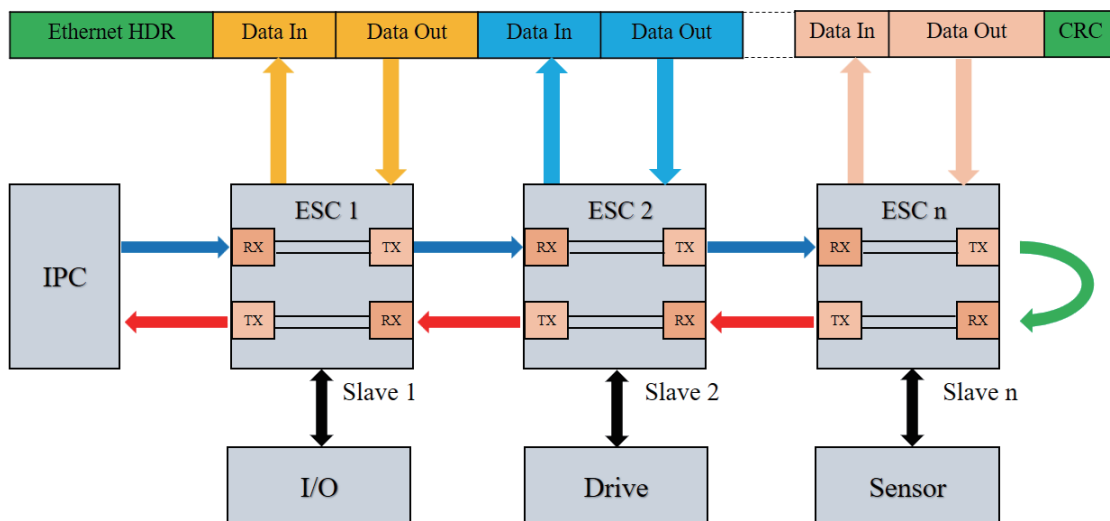


圖 1 EtherCAT 運作原理

制，美國 IntervalZero 公司針對 x86 與 x64 多核心多處理器所提出的硬即時的軟體解決方案：RTX/RTX64，可以將 Windows 作業系統轉變成即時的作業系統 (Real Time Operating System, RTOS)。RTX/RTX64 擁有一個對稱多工處理器 (Symmetric Multi-Processing, SMP)，使用優先權順序驅動的方式與先佔式演算法讓關鍵的執行緒擁有較高的優先權；分為兩種操作模式，一為共享模式 (Shared Mode)，RTSS 即時子系統與 Windows 共用 CPU 核心；第二種操作模式為專用模式 (Dedicated Mode)，將某些系統的核心指定給 Windows 專用，剩餘的核心由 RTSS 即時子系統使用，亦即可以指定 RTX 能運行在哪幾個系統核心，以 8 核心的 CPU 為例，Windows 至少須指定使用 1 個核心，RTX/RTX64 可以獨佔剩餘的 1 至 7 個核心，更進一步來說，RTX/RTX64 本身並不會更改 Windows 本身排程的機制，而是在 Windows 作業系統上建立一即時子系統 (Real-time Subsystem, RTSS) 與建立一個即時的硬體抽象層 (Real-time Hardware Abstraction Layer Extension, Real-time HAL Extension)，此即時的硬體抽象層並沒有取代

Windows 的硬體抽象層，而是讓運行在 RTSS 即時子系統下的執行緒，可以擁有高於 Windows 的優先權，因為此即時的硬體抽象層具有支援高精度的時脈功能、計時器 (最小可以設定為 1  $\mu$ s)、中斷機制、例外處理以及增強相容性，讓運行在 RTSS 的執行緒得以確保即時的可靠性與即時性。如圖 2 為 RTX/RTX64 與 Windows 的運作架構圖。

### 3. EtherCAT 運動控制平台 EMP

由工研院機械所開發之 EtherCAT 運動控制平台 (EtherCAT Motion Control Platform, EMP)，以 EtherCAT 通訊作為基礎，使用者透過乙太網路傳送資料封包與 EtherCAT 從站 (例如：伺服驅動器、周邊 I/O 模組) 進行資料交換，在通訊架構上為分散式時脈，可以讓驅動器及 I/O 模組的命令更新週期達到 250  $\mu$ s，也能保證各從站間同步誤差小於 1  $\mu$ s，這樣的優勢更適合應用於高響應及高效能的工業控制產業，相容於 CoE(CAN Application Protocol over EtherCAT) 的通訊協定，運動控制模式支援週期同步位置模式 (Cyclic Synchronous Position, CSP)、週期同步速度模式

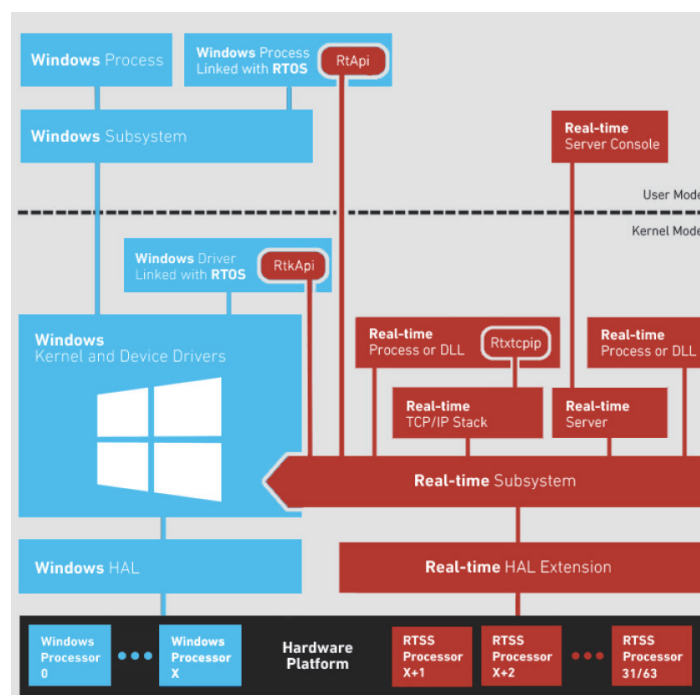


圖 2 RTX/RTX64 與 Windows 的運作架構圖 [7]

(Cyclic Synchronous Velocity, CSV)、週期同步轉矩模式 (Cyclic Synchronous Torque, CST) 與位置控制模式 (Profile Position Mode, PP) 以及原點復歸模式 (Homing Mode, HM)；目前 EMP 支援標準的 EtherCAT 伺服驅動器，已完成測試的驅動器品牌包含：日系的安川 YASKAWA、松下 Panasonic、三洋 SANYO DENKI、東方馬達 Oriental Motor，歐美 LTI、Copley Controls，以及台灣的大銀微 HIWIN、台達 DELTA 與東元 TECO；工研院機械所也完成開發串接 EtherCAT 從端的專用輸出控制硬體介面卡 ECATS-IO32，可以提供 16 點輸入與 16 點輸出功能的全數位 IO 卡。

在 EtherCAT 的協定中定義了兩個檔案，分別是 ESI 與 ENI 檔案；只要是 EtherCAT 的 Slave 裝置都會提供一個網路硬體裝置設備的描述資訊檔 (EtherCAT Slave Information File, ESI File)，讓 EtherCAT 主站能夠透過其所提供的 ESI 檔案進行控制；ENI 檔案 (EtherCAT Network Information File, ENI File) 主要用途為描述一個特定的 EtherCAT 網路，這個檔案通常會由 EtherCAT Configurator 產生，EtherCAT 主站會根據目前的網路配置，從每一個 ESI 檔案中擷取部分資料組合

而成，其內容主要記錄所有 Slave 的裝置與設定；若網路拓樸狀態改變時，必須重新再產生 ENI 檔案。工研院機械所在 EMP 上開發一套可以快速產生 ENI 檔案的軟體：Preset Tool，使用者不需要進行繁瑣的設定，就能產生符合 EMP 平台所使用的 ENI 檔案。如圖 3 所示為 EMP 與周邊系統架構圖。

在 EMP 系統初始化成功後即會啟動運動控制函式庫 (Motion Control Command Library, MCCL)，使用者可以透過使用 MCCL 進行以下功能：首先，設定機構參數以及運動群組參數，即可進行多軸運動同步控制命令、龍門同步響應控制、手輪模式與路徑軌跡規劃；MCCL 提供點對點運動、直線運動、2D/3D 空間圓弧與全圓運動、螺線運動等多軸軌跡規劃函式；在運動控制則提供了運動空跑、運動延遲、微動 / 吋動 / 連續吋動、運動暫停、繼續、棄置等操作函式；在軌跡規劃功能方面可針對各運動軸設定不同的加 / 減速時間、加 / 減速型式、進給速度、最大進給速度與最大加速度；過行程保護功能包含軟體和硬體的過行程保護功能；在控制系統中常見的追蹤問題，提供動態調整進給速度的速度強制 (Override speed) 功能，允許動態調整進給速度；在定位控

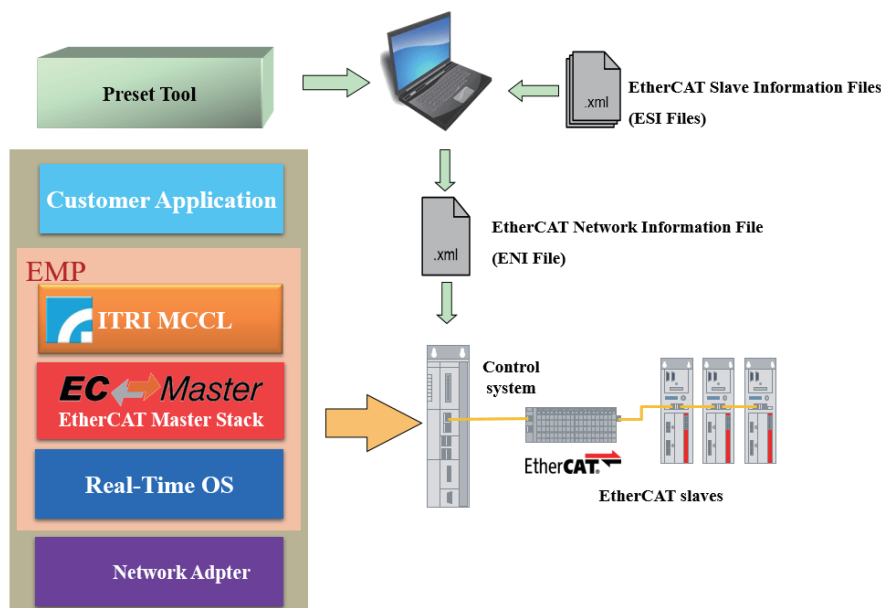


圖 3 EMP 與周邊系統架構圖

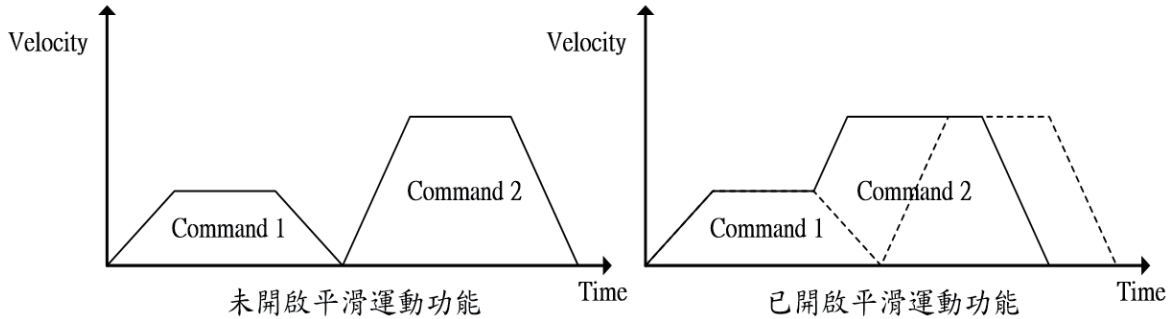


圖 4 平滑運動軌跡圖

制部分提供齒輪齒隙與間隙補償功能。

MCCL 運動控制函式庫的三大特色，第一是提供進階軌跡規劃功能：平滑運動 (Blending motion) 功能，是指當不同運動命令間不須精確定位，且須快速到達指定位置時，可滿足不同運動命令間的等速段達到速度平滑連續的要求 (也就是在完成前一段運動命令時速度不需減速到停，可直接加速或減速到下一段運動命令要求的速度)。由圖 4 可以看出開啟平滑運動功能運動情形，第一筆運動命令在達到等速段不經減速段，而直接加速至第二筆運動命令的等速段 (如圖 4 右圖之實線所示)，如此命令的執行時間較快，但各筆命令的連接處會有軌跡失真的狀況存在。

平滑運動功能適用於直線 - 直線、直線 - 圓弧與圓弧 - 圓弧之間的平滑運動，圖 5 的實線部分，顯示開啟平滑運動功能後，兩線段的運動軌跡圖，虛線代表原先規劃的運動軌跡。

MCCL 另兩大特色為座標轉換 (Coordinate transform) 與客製化運動軌跡規劃曲線 (Customized motion)；座標轉換為將卡式座標 (Cartesian

position) 轉換成關節座標 (Joint position)，主要的應用是在機械手臂上的座標轉換機制，將馬達轉動角度轉換到卡式座標系需要座標轉換，稱之正向運動學 (Forward Kinematics, FK)，將卡式座標系轉換為馬達轉動角度，則稱為逆向運動學 (Inverse Kinematics, IK)，工研院機械所也針對六軸機械手臂完成開發正逆向運動學的動態函式庫；另一特色為客製化運動軌跡規劃曲線，可以協助使用者進行多元且高階運動軌跡規劃的設計、提供客製化插值設計與客製化連續路徑平滑處理之功能，達到使用者能夠自訂運動軌跡規劃，更加彈性使用運動控制函式庫。

#### 4.EMP-S 與開發應用程式架構

EMP-S 為純軟體架構的全數位運動控制平台，讓運動控制完全擺脫硬體軸卡的包袱，僅需要一台工業用電腦即能對機台進行即時運動控制；由於 EMP-S 加入 IntervalZero 的 RTX 子系統，將 Windows 作業系統從通用型作業系統 (GPOS) 轉變為即時作業系統 (RTOS)，因此確保了執行多軸運動控制的即時性與可靠性，控制週

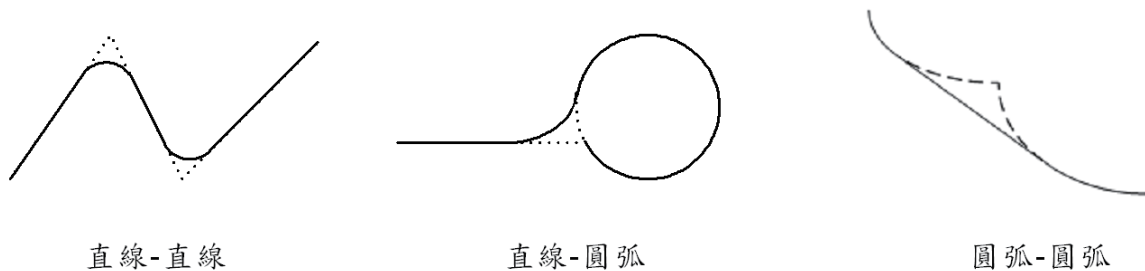


圖 5 直線 - 直線、直線 - 圓弧與圓弧 - 圓弧的平滑運動軌跡圖

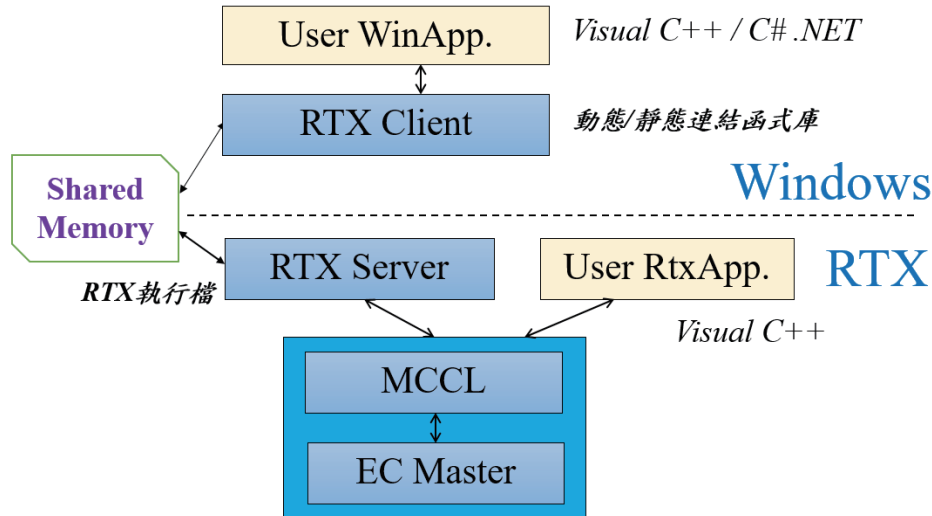


圖 6 EMP-S 與開發應用程式架構圖

期時間 (Cycle time) 最小為 250  $\mu$ s。如圖 6 所示為 EMP-S 與開發應用程式架構圖，RTX Server 與 RTX Client 在系統設計上是採用 Client-Server 的架構，RTX Server 的程式會運行在 RTSS 即時子系統，RTX Client 的程式運行在 Windows 端，雙方會透過共享記憶體 (Shared Memory) 進行資料交換與存取，而這塊共享記憶體會由 RTX 負責進行管理；使用者在 Windows 端能夠使用常見的軟體開發工具，如：Visual C++ 與 Visual C# .NET，開發自己的產品應用程式 (User WinApp.)，須搭配安裝 RTX Runtime 後，即能透過工研院機械所開發的 RTX Client (靜態 / 動態連結函式庫) 與 RTX Server (RTX 執行檔) 進行系統開發，以整體系統的開發難易度上是相對簡單且快速；RTX Server 會對 MCCL 進行下達運動命令控制與資料訊息傳遞；EC Master (EtherCAT Master) 則負責配置和管理 EtherCAT 網絡、週期性資料交換。假若使用者的產品應用，需要更進階的運動控制或即時處理的動作，如：對 I/O 進行控制與存取、正逆向運動學轉換等客製化運動控制功能等需求，則此時使用者必須在 RTX 端進行開發使用者應用程式 (User RtxApp.)，此端的開發須另行購置 RTX SDK 軟體。

#### 5. EMP-Z 與開發應用程式架構

工研院機械所另開發了一嵌入式系統的全

數位運動控制平台：EMP-Z，內建中央處理器 ZYNQ、DDR RAM 記憶體、Flash ROM 記憶體、microSD、連結電腦端網路通訊埠 (Ethernet)、連結 EtherCAT 從站網路通訊埠以及能達到硬即時的作業系統 VxWorks，可以有效解決因作業系統所產生即時性之問題，確保了執行多軸運動控制的即時性與可靠性，控制週期時間 (Cycle time) 最小為 500  $\mu$ s。EMP-Z 整合 MCCL 運動控制函式庫以進行運動軌跡運算，可以有效減輕在電腦端須進行大量運算的負擔，因此對於電腦端硬體效能的要求度較低，只須作簡單的運動控制介面與負責下達使用者命令的人機介面即可。

在 EMP-Z 系統架構上，又區分為 A+ Ethernet 型式與 Standalone 型式兩種，如圖 7 所示為 EMP-Z 與開發應用程式架構圖。A+ Ethernet 型式為 Socket 的 Client-Server 架構，TCP Client 的程式運行在 Windows 端，TCP Server 的程式會運行在 VxWorks 的作業系統，雙方會透過 Socket 進行資料交換與存取；使用者在 Windows 端能夠使用常見的軟體開發工具，如：Visual C++ 與 Visual C# .NET，開發自己的產品應用程式 (User WinApp.)，再透過工研院機械所開發的 TCP Client (靜態 / 動態連結函式庫) 與 TCP Server (VxWorks 執行檔 / 靜態函式庫) 進行產品系統開發，以整體系統的

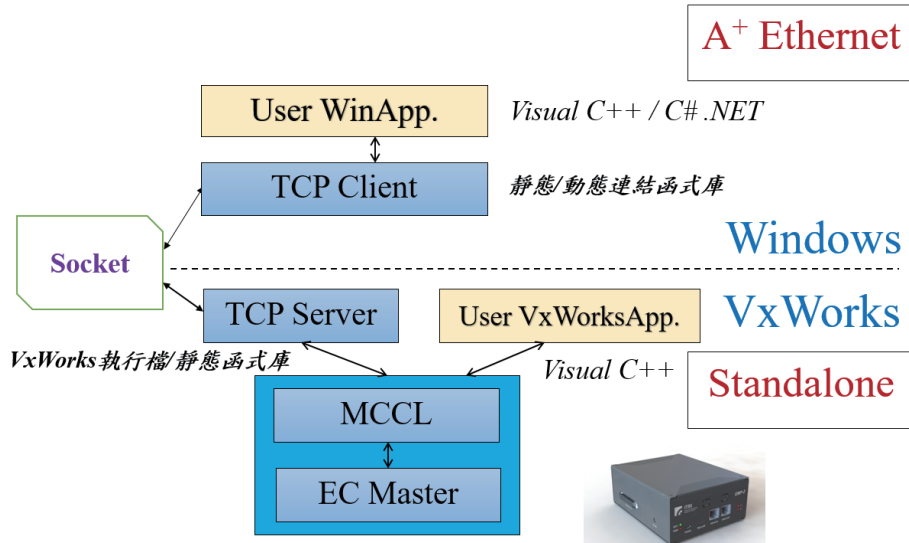


圖 7 EMP-Z 與開發應用程式架構圖

開發難易度上是相對簡單且快速；TCP Server 會對 MCCL 進行下達運動命令控制與資料訊息傳遞，EC Master(EtherCAT Master) 則負責配置和管理 EtherCAT 網絡、週期性資料交換。另一種為 Standalone 型式，假若使用者的產品應用，需要更進階的運動控制或即時處理的動作，如：對 I/O 進行控制與存取、正逆向運動學轉換等客製化運動控制功能等需求，則此時使用者必須在 VxWorks 端進行開發使用者應用程式 (User VxWorksApp.)，

並且將應用程式置入 Flash ROM 或 microSD 執行，此端的開發須另行購置 Workbench 軟體。

#### 6. OPC UA 和 MQTT 於 EMP 之整合應用

順應工業 4.0 的潮流，國內各大廠皆積極推動工廠環境與作業模式的轉型，而虛實整合也成為了核心發展技術，透過整合工廠內各種設備的資訊，經由網路實體系統協助分析、處理與決策，提升產線設備的工作效率、故障排除及數據管理的能力。然而為了實現廠區內的工業自動

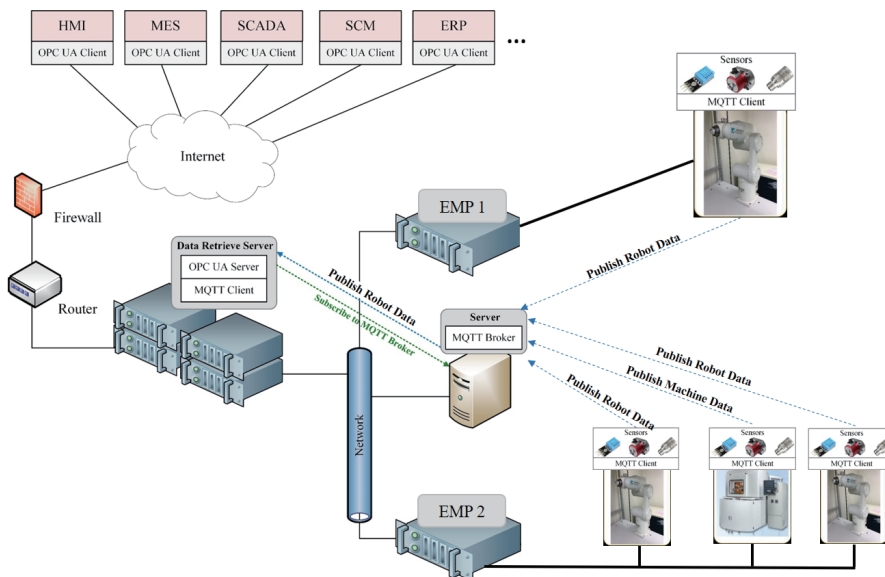


圖 8 EMP 整合 OPC UA 與 MQTT 之應用情境

化，未來勢必將導入更多物聯網設備來協助機台進行串聯與資訊蒐集，因此如何針對不同的應用情境選擇適合的通訊協定，對於系統的執行效率與擴展性也成為了關鍵因素。工研院機械所開發的 EMP 系統搭配兩種通訊協定 OPC UA(Open Platform Communications Unified Architecture) 與 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 形成一個資訊擷取系統 (Data Retrieve Server)，藉以蒐集機械手臂、線切割放電加工機台的數據資訊並傳送至上層的應用如 HMI、MES、SCADA、SCM 與 ERP 系統等，如圖 8 所示為資訊擷取系統的應用情境。

在資訊擷取系統中，主要包含 MQTT Client 與 OPC UA Server 兩個部分，EMP 1 可控制一台機械手臂，EMP 2 可同時控制兩台機械手臂與一台線切割放電加工機；這些設備與感測器架設 MQTT Client，可將機台與感測器資訊發佈至 MQTT Broker，當其他 MQTT Client 設備向 Broker 訂閱該資訊主題後，即可週期性取得機台與感測器所蒐集的資訊參數，然後經由 OPC UA Server 傳送至上層應用中的 OPC UA Client。

OPC UA 以統一的通訊規範解決設備間互通性的問題，MQTT 為輕量級的通訊協定，EMP 結合了這兩種通訊機制以支援不同的應用情境，除了可以透過 Client/Server 架構以 TCP 與 HTTPS 進

行資訊傳輸之外，當工廠中的小型感測器或微控制器需要傳遞資料時，這些設備便可透過 MQTT 的通訊協定，以 OPC UA 相容的方式傳送數據，便可快速達到不同設備間的異質資訊整合，轉型為智慧型工廠。

如圖 9 所示為有兩個 MQTT 的使用設備與一個 MQTT Broker，Client 2 已經與 MQTT Broker 連接著，Client 1 將與 Broker 進行連接、訂閱到中斷連線的過程描述如下：

- 1.Client 1 對 MQTT Broker 發送 "CONNECT" 訊號要求連接。
- 2.MQTT Broker 回傳 "CONNACK" 與狀態碼，若情況無誤便建立連接。
- 3.Client 1 對 MQTT Broker 發送 "SUBSCRIBE" 訊號要求對某主題訂閱。
- 4.MQTT Broker 回傳 "SUBACK" 與主題返回碼，若無誤則 Client 1 會接收到所有該項主題的消息。
- 5.Client 2 向 Broker 執行 "PUBLISH"，向某主題發佈相關消息，MQTT 協定中總共有 3 種 QoS 等級，此處以 QoS 0 作範例。
6. 承流程 5，Client 1 收到所訂閱的主題的新消息發佈。
- 7.Client 1 對 MQTT Broker 發送中斷連線 "DISCONNECT" 的要求。

將 OPC UA、MQTT 兩項協議整合於機械手臂與線切割放電加工機台的應用情境，如圖 10 所示為資料傳送情形與各設備 / 系統之間的互動將描述如下：

1. 機械手臂與線切割放電加工機台 (Robot/WEDM) 為 MQTT Client，在已完成連線的情況下，會週期性的將資料送到 MQTT Broker，包含機台、機械手臂、各感測器等數據資訊。
2. Data Retrieve Server 既是 MQTT Client 也是 OPC UA Server，MQTT Broker 將會傳送各設備所訂閱主題的相關訊息。
3. Data Retrieve Server 在收到由 MQTT Broker

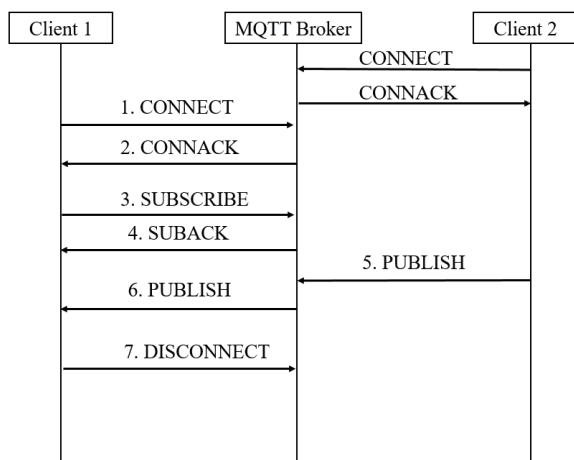


圖 9 Client 與 MQTT Broker 連接、訂閱到中斷連線的過程



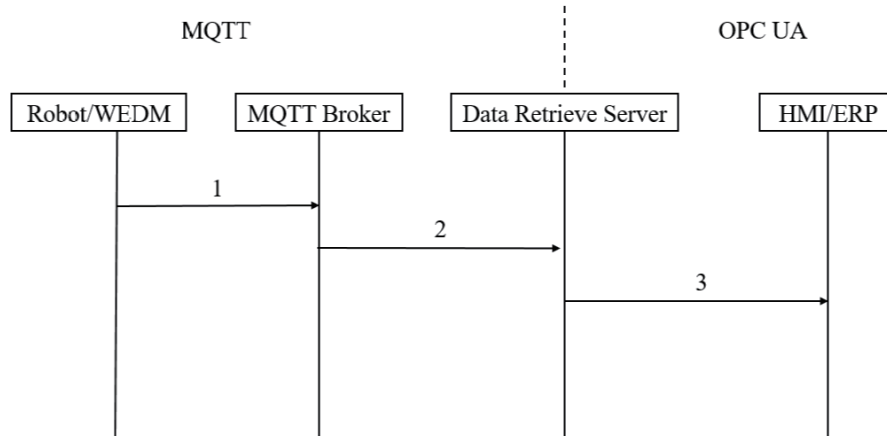


圖 10 OPC UA、MQTT 整合應用於機械手臂與機台的資料流

傳送的資料後，透過 OPC UA 協定以及 Internet 週期性的更新資料至 HMI/ERP 等雲端設備，藉此可達到遠端監看與資料彙整分析的目的。

## 結論

智慧製造的概念對工廠的製造流程帶來極大的改變，EtherCAT 通訊技術勢必在協助產能的提升或是加工流程的無人化上扮演關鍵的角色。EtherCAT 將繁複的配線簡化為一條網路線便能達成資料與控制訊號的傳遞，為工業 4.0 的智慧工廠奠定了基礎；工研院機械所針對此趨勢開發全數位運動控制平台 EMP，此項創新技術建立了國產高速、高精度運動控制的標準規格，為一套完全自主化的控制核心技術，提供國內產業界在精密運動控制技術領域高性能、高整合性的解決方案，不僅能夠提昇國內控制器業者與精密機械設備廠商的技術水準，並建構國內自主的控制器零組件產業。

EMP 可以搭配 OPC UA 與 MQTT 等開放式通訊協定，輕易地實現工廠設備間的水平整合，並與 ERP、MES 或雲端服務等上層系統進行設備與製程資訊的傳輸與交換，協助工廠更有效的進行數據分析及應用，帶動整體製造產業邁向更自動化與智慧化的境界。

## 誌謝

感謝工業技術研究院機械與機電系統研究所 (計畫編號 H453REE140) 的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] *IEEE 1588-2002: IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control System*
- [2] 陸品丞, 李宜靜, 李宜玲, “工業 4.0 通訊技術於運動控制系統之應用與趨勢,” 機械工業雜誌, 434 期, 8-21 頁, 2019 年 05 月。
- [3] 李桂銘, “EPCIO 即時性運動控制函式庫介紹與實作,” 機械工業雜誌, 349 期, 29-37 頁, 2012 年 04 月。
- [4] 汪曙峰, 吳承學, “串列式數位伺服運動控制及工業控制自動化乙太網路技術簡介,” 機械工業雜誌, 313 期, 1-16 頁, 2009 年 04 月。
- [5] EtherCAT Introduction, <http://www.ethercat.org>
- [6] <https://www.epcio.com.tw/>
- [7] [https://intervalzero.com/assets/RTX643.7/RTX64\\_37ProductBrief.pdf](https://intervalzero.com/assets/RTX643.7/RTX64_37ProductBrief.pdf)
- [8] <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>