



工業控制自動化乙太網路 技術發展概況

Development Status of Ethernet
for Control Automation Technology

張崇璋

工研院機械所
機電控制整合部

關鍵詞(Keywords)

- 工業控制自動化乙太網路技術
Ethernet for Control Automation Technology
(EtherCAT)
- 串列式數位伺服運動控制
Digital Servo Motion Control
- 分散式控制 Distributed Control

摘要(Abstract)

本文針對工業控制自動化乙太網路技術 (EtherCAT) 進行介紹，包含系統架構、EtherCAT 資訊框、分布時鐘等基本原理解。工研院機械所利用即時性作業系統 RTX，搭配 EtherCAT Master Stack 與現有的運動控制函式庫整合成一

EtherCAT 純軟體控制平台，實現以 EtherCAT 通訊協定完成的串列式伺服運動控制。

In this paper, Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) is introduced, including the basic principle of the system architecture, datagram of EtherCAT, Distribute Clock and so on. MSL of ITRI used real-time operating system RTX, EtherCAT Master Stack and existing motion control library to build a pure software control platform of EtherCAT. Digital Servo Motion Control were implemented with the EtherCAT protocol.

1. 前言

近年來由於網路通訊技術快速的發展，在工業環境的自動化控制及程序控制中應用乙太網路



的相關組件及技術已成為當前工業控制現場總線技術的一個重要發展方向。

傳統現場總線自動化設備面臨了執行運動命令時同動性不佳、即時性不足；安裝機台過程配線過程繁雜且通訊易受干擾等問題，取而代之的機制為利用串列伺服控制技術透過即時通訊系統，並由網路傳遞數位訊號之方式，發展出工業乙太網路(industrial Ethernet)，全球控制器廠商也持續開發具有即時通訊伺服功能的通訊介面[1]，其中開放式網路協定如 Modbus/TCP、Ethernet/IP、Ethernet Powerlink、ProfiNET RT、EPA(Ethernet for Plant Automation)、SERCOS、EtherCAT 以及封閉式網路協定如日本三菱電機(MITSUBISHI)的 SSCNET、松下電器(Panasonic)的 F2、日本安川(Yaskawa)的 MechatroLink，皆在近年來逐一被提出。

與傳統現場總線相比，工業乙太網路總線擁有下列優點：

- 即時性：傳輸速度快，數據包容量大，傳輸距離高，可達成在固定周期完成控制傳輸命令。
- 抗干擾性：利用數位傳輸並加入檢查碼的機制，以確保傳輸過程正確。
- 具有彈性：可選擇非週期性的傳送接收伺服命令、伺服驅動參數與周邊 I/O 資料

2. 串列式伺服運動控制通訊協定

目前，市場中已有的工業乙太網路根據不同的即時性要求與成本考量，所發展出的實現原理大致上可分為以下三種類型[2]：

- (1)基於 TCP/IP 的實現：此種方式仍使用 TCP/IP 通訊協定，利用上層合理的控制來對應通訊中的非確定因素，常見的典型協議為 Modbus/TCP、Ethernet/IP，此方式並不能實現較好的即時性，只適用於對即時性要求不高的工業自動化應用。
- (2)基於乙太網路的實現：此方式仍使用標準未修改的乙太網路通訊硬體，但不使用 TCP/IP 通訊協定進行數據傳輸，而使用一個特定的乙太網路進行資料傳輸。TCP/IP stack 可經由一個時間控制層分配一定的時間來使用乙太網路資源。此類協定主要有 Ethernet Powerlink、ProfiNET RT、EPA (Ethernet for Plant Automation)。
- (3)修改乙太網路的實現：為了獲得響應時間小於 1 ms 的硬即時，通過這種方式對乙太網路協定進行了修改。其從站由專門的硬體實現，在即時通道內由即時 MAC(Media Access Control)接管通訊控制，徹底避免報文(telegram)衝突，簡化通訊數據處理。而非即時數據仍可在通道內按照原來的協定進行傳輸。此方式下的典型協議有 EtherCAT、SERCOS、ProfiNET IRT。

3. 工業控制自動化乙太網路技術 EtherCAT 與系統架構

EtherCAT 是由德國 BECKOFF 自動化公司於 2003 年提出的即時工業乙太網路技術[3]。具有高速和高數據有效率的特點，支持多種設備連接拓撲結構。



EtherCAT 為一主(master)/從(slave)式架構，主站無需使用高價的專用運動控制器，僅需使用標準乙太網路控制卡(network interface controller, NIC)，從站使用專門的 EtherCAT 從站控制器 ESC (EtherCAT Slave Controller)。

從乙太網路的角度來看，一個 EtherCAT 網段就是一個乙太網路設備，接收與發送皆是標準的 IEEE802.3 乙太網路資料封包，但是此種乙太網路設備並不侷限於一個乙太網控制器及相對應的處理器，而是由多個從站所組成，如圖 1 所示，從站如同設備與 I/O 端子可直接處理由主站發送而來的報文，並從報文中提取或插入相關的從站數據，然後將報文傳送到下一個 EtherCAT 從站。最後一個 EtherCAT 從站發回經過處理的報文，並經由第一個從站作為響應報文將其發送給主站。

EtherCAT 主站使用標準的乙太網控制器，傳輸電纜可彈性選擇 100BASE-TX 模式雙絞線電纜，100BASE-FX 塑膠光纖或 E-bus (low voltage

differential signaling, LVDS 低電壓差動訊號傳輸)。通訊控制器完成乙太網路數據的介質訪問控制(media access control, MAC)功能，物理層數據發收器(port physical layer, PHY)實現數據的編碼、解碼和收發。

在 PC 的主站中，通常使用標準乙太網路控制卡，其中網卡晶片包含了通訊控制器與物理層數據發收器。在嵌入式的主站當中，通訊控制器通常嵌入到微處理器中。

EtherCAT 從站通訊控制晶片 ESC 負責處理 EtherCAT 資訊框(datagram)，並使用 Dual Port RAM 實現 EtherCAT 主站與從站的數據交換，各個從站 ESC 按照在環路上的物理位置順序讀寫資訊框。在報文經過從站時，ESC 從報文中提取送給該從站的輸出命令並將其儲存到內部儲存區；輸入數據從內部儲存區寫到相應的子報文中。數據的提取和存入都是由資料鏈結層(data link layer)硬體完成，以確保即時性。

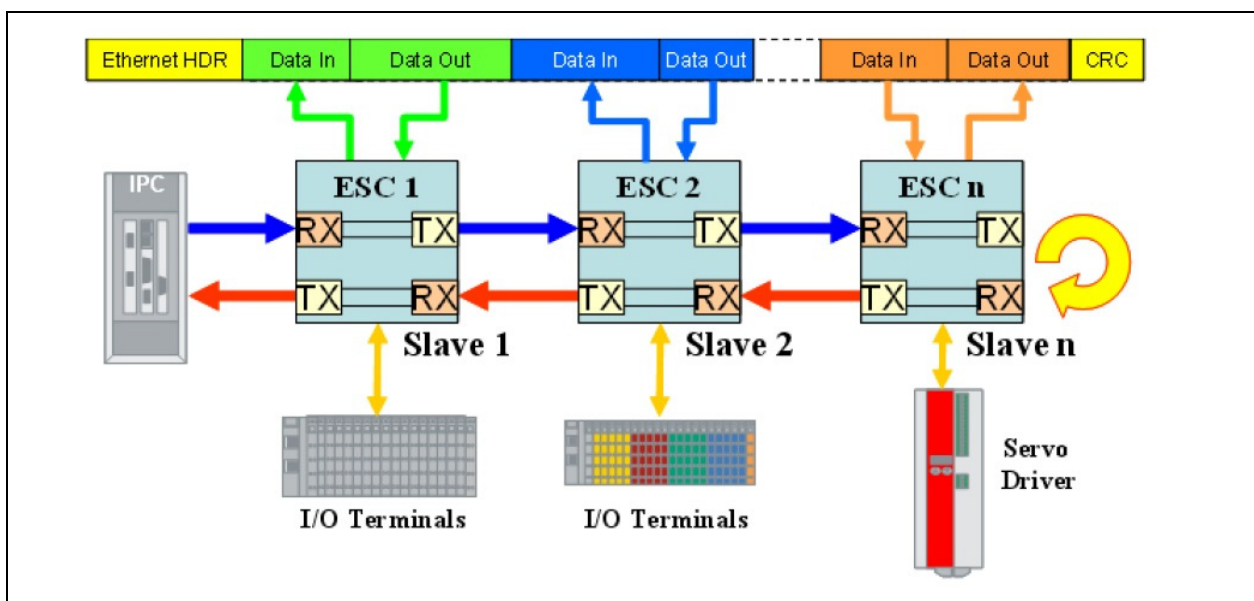


圖 1 EtherCAT 工作原理 [1]

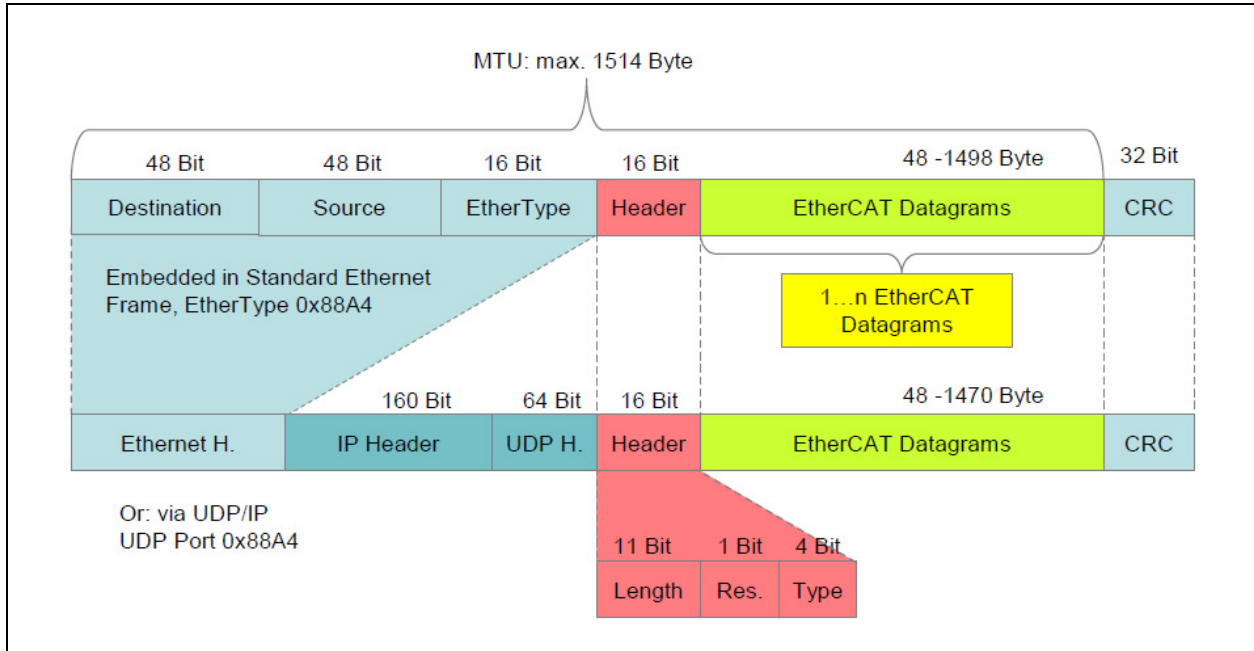


圖 2 符合 IEEE 802.3 標準的 EtherCAT 封包[5]

資料來源：EtherCAT Introduction, <http://www.ethercat.org>

4. EtherCAT 資訊框(Datagram)結構

參考圖 2 與表 1，EtherCAT 封包採用標準乙太網路 IEEE802.3 格式，封包內使用官方所保留的 88A4h 乙太網類型(Ether type)。採用此種乙太網類型優點為可使 EtherCAT 將其資訊框封裝在乙太網封包的資料欄位，控制數據可直接寫入封包內，無須定義新的封包格式。

參考圖 3，每個 EtherCAT 資訊框包含了一個訊框表頭(EtherCAT frame header)與一個至多個 EtherCAT 指令子報文(EtherCAT datagram)，每個子報文包含了報文表頭(datagram header)、數據資料以及工作計數器(working counter, WKC)。其中子報文的工作計數器初值為 0，子報文被從站正確處理後，工作計數器將增加一個增量，主站比

較返回子報文中的 WKC 與預期中的 WKC 相比較判斷子報文是否正確被處理。

表 1 EtherCAT 封包詳細定義

名稱	定義
destination	接收方 MAC 地址
source	發送方 MAC 地址
Ether type	0x88A4h
EtherCAT header	EtherCAT 封包長度，即所有子報文長度總和
EtherCAT datagrams	一個至多個 EtherCAT 子報文
CRC	封包讀取檢查

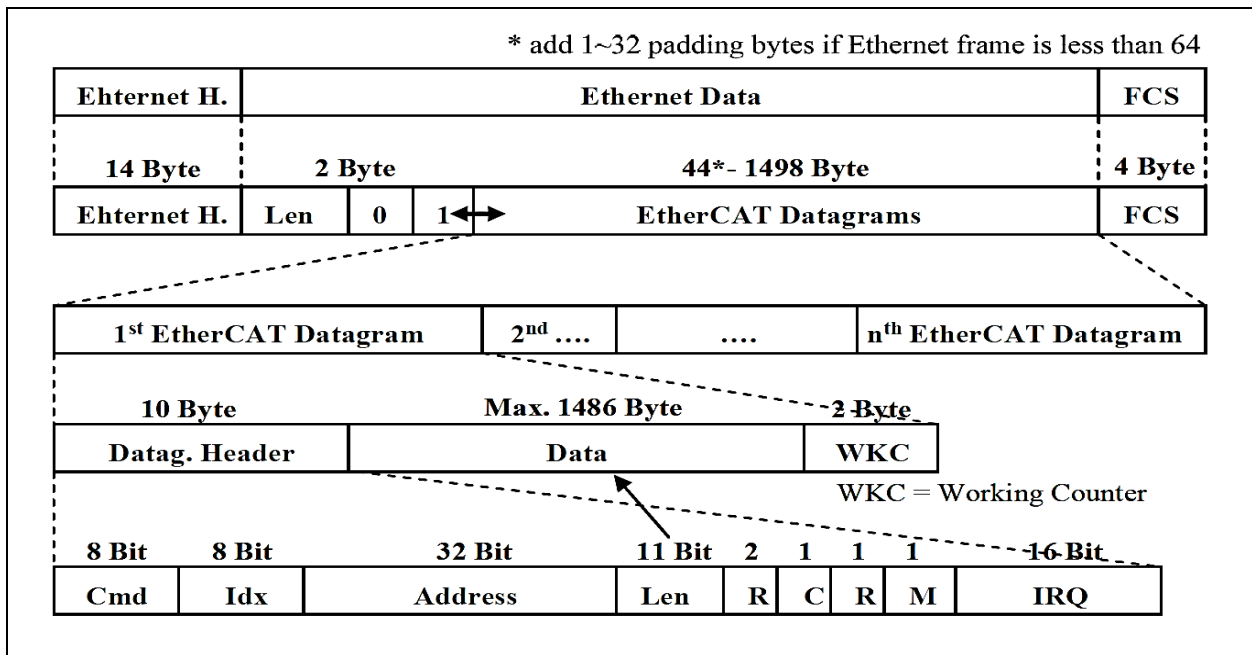


圖 3 EtherCAT 封包結構 [4]

資料來源：EtherCAT Communication Specification, <http://www.ethercat.org>

5. EtherCAT 報文循址與通訊服務

EtherCAT 通訊由主站發送 EtherCAT 封包，透過從站的內部儲存區來實現，EtherCAT 報文使用多種循址方式操作 ESC 內部儲存區，實現多種通訊服務。

EtherCAT 報文表頭中包含 32 位元位址欄，該 32 位元位址欄分為前 16 位元的從站設備位址與後 16 位元的內部儲存區位址。循址方式主要分為設備定址(device addressing)與邏輯定址(logical addressing)。以下將分別說明：

設備定址又分為自增定址(auto increment addressing)和固定定址(fixed addressing)。自增定址為用於啟動階段，此時主站尚未得知從站的設備位置，故發送特定的子報文，使各從站可讀取

由主站發送給該從站的報文，主站可配置站點位址給各從站。固定定址時，從站的位址與其在網段的連接順序無關，位址可以由主站在啟動階段分配給各站，也可以由從站在上電初始化時由本身內部儲存器裝載，然後由主站在啟動階段利用自增定址方式讀取個從站的設備位址並在後續運行中使用。

邏輯定址是利用 FMMU (field memory management unit)實現(圖 4)，FMMU 位於每一個 ESC 內部，FMMU 將從站設備記憶體空間從物理位址到邏輯位址的映射，EtherCAT 封包內的每個子報文皆服務於邏輯過程映像區(logical process image)的某一特定記憶體區域，整個邏輯過程映像區最大可達 4 Gbyte (即 EtherCAT 報文表頭裏共 32 Bit 的位址空間)，所有從站設備可從此 4 GByte 空間中讀取數據或者寫入資料。

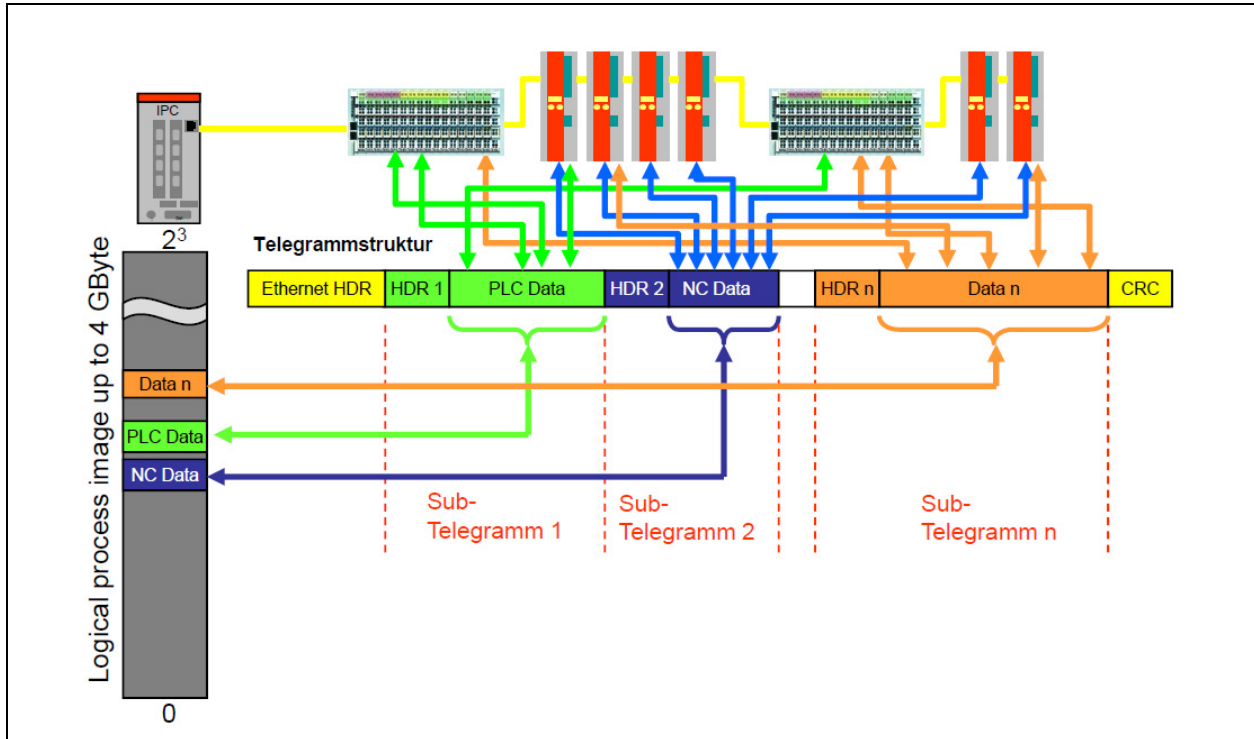


圖 4 從站設備記憶體實體位址到邏輯位址的映射 [5]

資料來源：EtherCAT Introduction, <http://www.ethercat.org>

從站設備收到一個邏輯定址的 EtherCAT 子報文時，檢查是否有 FMMU 單元位址匹配。若有相符，將輸入類型資料插入 EtherCAT 子報文數據資料的相對應位置，以及從相對應位置抽取輸出類型資料。使用邏輯定址時可以靈活的組織系統，優化系統結構。

6. 分布時鐘(distribute clock, DC)

分布時鐘(distribute clock, DC)可以使所有 EtherCAT 設備使用相同的系統時間，從而控制各設備任務的同步執行，從站設備可以根據同步的系統時間產生同步信號，用於中斷控制或觸發 I/O

點輸出入。支持分布時鐘的從站稱為 DC 從站。分布時鐘具有以下功能：

- 實現從站之間時鐘同步
- 為主站提供同步時鐘
- 產生同步的輸出訊號與中斷
- 利用量測和計算傳播延遲偏移與時鐘初始飄移量，實現精準地同步控制。

分布時鐘機制使所有從站都同步於一個參考時鐘。主站連接的第一個從站做為參考時鐘，參考時鐘提供 EtherCAT 系統時間，並以參考時鐘同步其他設備與主站的時鐘。除此之外，每一個 DC 從站都有本地時鐘，本地時鐘獨立運行。系統啟動時，各從站的本地時鐘和參考時鐘之間有一定的差值，稱為時鐘初始偏移量。



由於 EtherCAT 資料交換於從站設備完全基於純硬體機制，借助於快速乙太網路物理層的全雙工特性與邏輯環狀結構，各從站節點可於 EtherCAT 資料封包通過時使用時間戳記 (timestamp) 量測封包報文離開 (leaving) 與回傳 (returning) 封包間的時間差，透過此方式，主節點時脈可以簡單、精確地確定各個獨立從站節點時脈的傳播延遲偏移 (propagation delay offset)，反之亦然。分散式時脈依據該延遲偏移值進行調整，將可有效降低抖動值 (jitter) 達符合 IEEE 1588 要求、達到小於 1 μ s 的精確性同步控制。

7. 應用層協議

EtherCAT 協議中，非週期性的數據通訊稱為郵件數據通訊 (mailbox)，此郵件數據通訊即時性要求不高，為實現參數交換的標準方式，支持全雙工，雙向獨立通訊及多用戶協議。若需要配置週期性過程數據通訊或其他非週期性通訊服務時，需要使用郵件數據通訊。

使用者決定應用層通訊協議類型後，可藉由 Mailbox 方式由主站告知從站目前所使用之應用層協議，常見的應用層協議如下說明：

(1) CANopen over EtherCAT (COE)：CANopen 最初為 CAN (control area network) 總線控制系統所採用的應用層協議，EtherCAT 在應用層支持 CANopen，做了相對應的擴充。主要功能為利用 Mailbox 訪問 CANopen 對象字典 (Object Dictionary)，實現網路初始化。並使用對象字典映射過程數據，週期性傳送指令數據及狀態數據。

(2) Servo Drive over EtherCAT (SOE)：此為 SERCOS (serial real-time communication specification) 應用層數據接口，用於伺服驅動器控制，EtherCAT 通訊性能非常適合伺服驅動器控制。可使用 SERCOS 數據報文格式配置 EtherCAT 數據報文，週期性傳送指令數據及伺服狀態數據。

(3) Ethernet over EtherCAT (EOE)：EtherCAT 也支持 IP 標準的協議，例如 TCP/IP、UDP/IP。EtherCAT 能分段傳輸標準乙太網路協議數據，並在相關的設備完成組裝，此種作法可縮短週期性數據的通信週期。

(4) File Access over EtherCAT (FOE)：該協議可通過 EtherCAT 上傳下載檔案，使用類似 TFTP (trivial file transfer protocol) 之簡單通訊協定。

8. 狀態機與通訊初始化

EtherCAT 狀態機 (EtherCAT state machine, ESM) 負責協調主站與從站應用程序在初始化與運行時的狀態關係，可參考圖 5，各狀態分別說明如下：

(1) Init (I) — 初始化：初始化狀態定義了主站與從站在應用層的通訊關係。此時，主站與從站應用層不可直接通訊，主站使用初始化狀態來初始化 ESC 的內部儲存區。

(2) Pre-Operational (P) — 預運行：在預運行狀態下，郵件數據通訊被驅動。主站與從站利用郵件數據通訊交換與應用程序相關的初始化參數，在此狀態下不允許數據通訊。

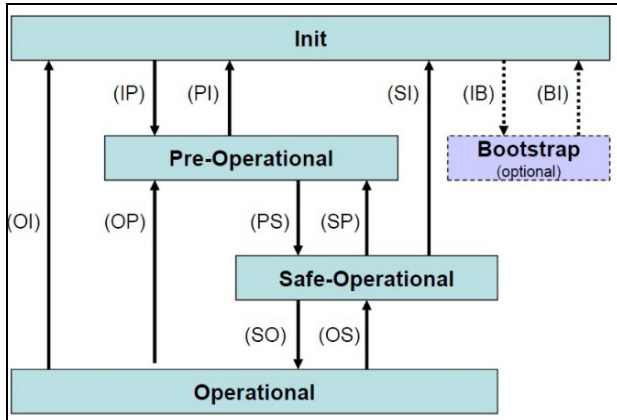


圖 5 EtherCAT 狀態轉換關係 [4]

資料來源：EtherCAT Communication Specification,
<http://www.ethercat.org>

- (3) Safe-Operational (S)—安全運行：在安全運行狀態下，從站應用程序讀入輸入數據，但不產生輸出訊號，設備無輸出，處於安全狀態。此時，仍可使用郵件數據通訊。
- (4) Operational (O) —運行：在運行狀態下，從站應用程序讀入輸入數據，主站應用程序發出輸

出數據，從站設備產生輸出訊號。此時，仍可使用郵件數據通訊。

- (5) Boot-Strap (B) —引導狀態：引導狀態為下載韌體所用，主站可以使用 FOE 協議的郵件通訊下載一個新的韌體並傳送給從站。

9. 工研院開發 EtherCAT 純軟體控制架構

工研院為實現 EtherCAT 於各家伺服驅動器與 I/O 裝置，並使用目前工研院機械所所研發並廣泛使用的運動控制函式庫(MCCL, motion control command library)，建構整個 EtherCAT 系統的架構圖(圖 6)，軟體部分由下到上規劃了 Real-Time Kernel/OS、EtherCAT Master Stack、CANOpen over EtherCAT 及 ITRI MCCL 四個模組。

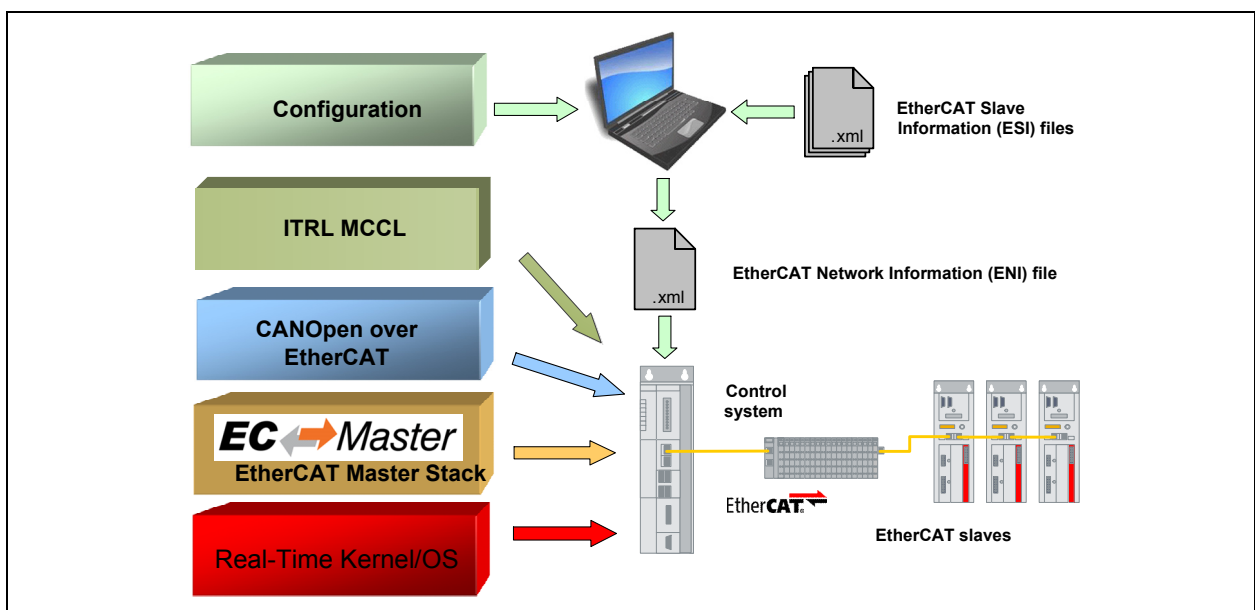


圖 6 EtherCAT 系統架構圖



EtherCAT 系統的規劃以 Soft Motion 為目標，在 PC 上只需要通用的乙太網路卡，而不需要專用的 ASIC 或運動控制卡，並在即時性子系統 Real-Time Kernel/OS RTX 上整合 EtherCAT Master Stack 及運動控制函式庫 ITRI MCCL，提供一個基於 EtherCAT 通訊協定的運動控制函式庫，讓使用者可以在 Windows 的平台，下達運動命令，並且讀取目前命令位置、編碼器回授位置、IO 狀態...等等。

以下分別對 Real-Time Kernel/OS、EtherCAT Master Stack、CANOpen over EtherCAT 及 ITRI MCCL 進行介紹。

9.1 Real-Time Kernel/OS

由於資料在 EtherCAT 網路中交換非常快

速，EtherCAT Master Stack 如果要在 PC 上實現，就必須架構在一個具有 Real-Time 的 OS 當中，目前普遍使用的 OS 仍是以 Windows 為主，基於這樣的理由之下，工研院機械所採用 IntervalZero 公司所發展的 Windows RTX 之即時性子系統。

圖 7 為 RTX 核心架構圖，RTX 提供 Clock、Timer、中斷管理、I/O、記憶體存取等機制，確保任務(task)即時的可靠性；另外提供的物件包含 RTSS Process、RTSS Thread、System Memory、Port I/O 等，所有 RTSS 提供的物件皆能直接與 HAL 溝通，也因此具備直接驅動周邊硬體的能力。在 RTX 2009 之後的版本，有支援對稱多處理組態 (SMP: symmetric multi-processing)，分為兩種操作模式：(1) Shared Mode：RTSS 子系統與 Windows

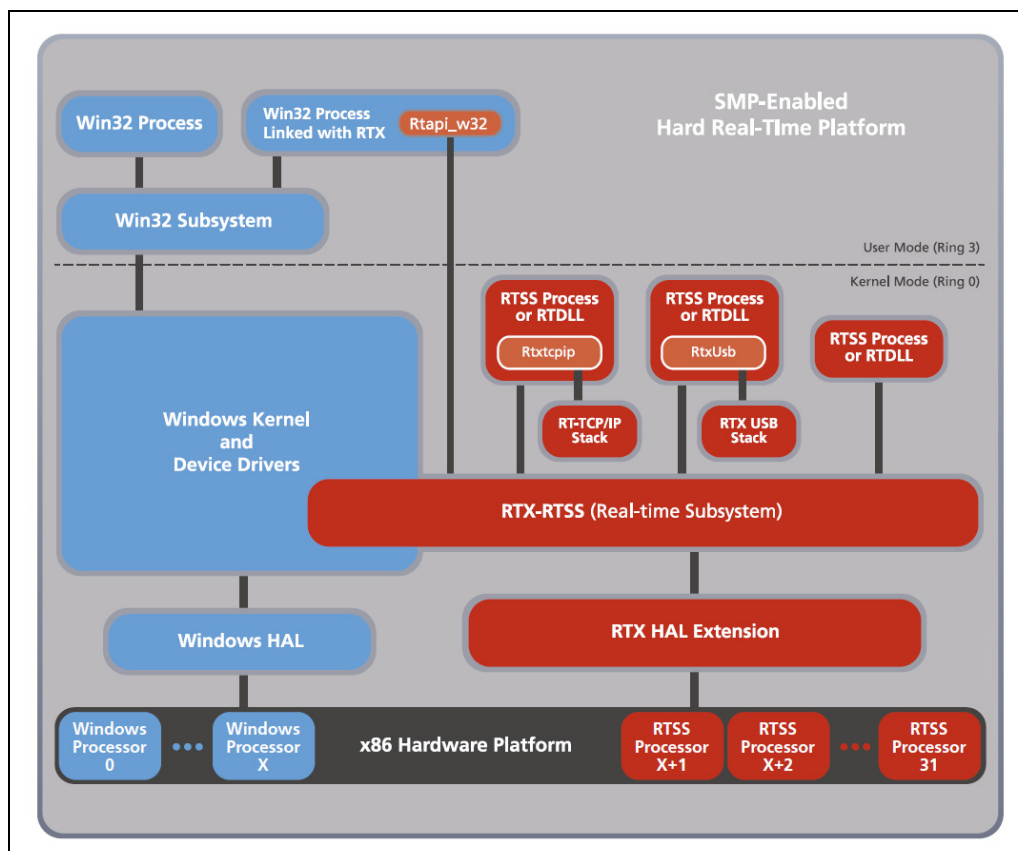


圖 7
RTX 核心架構圖
[6]
資料來源：
RTX2011-Data-Sheet,
<http://intervalzero.com/>



共用一個 CPU 核心；(2) Dedicated Mode：系統核心分割成某些由 RTSS 子系統專用，而其餘的由 Windows 專用。

目前主流的 CPU 為多核心系統，RTX 充分利用 SMP 的優點，支持多核心 CPU；在 Dedicated Mode 當中，可以指定 RTX 程序運行在哪些核心上，以 8 核心的 CPU 為例，Windows 必須使用其中 1 個核心，RTX 可以獨佔剩餘的 1 至 7 個核心。另外 RTX 對於網路的部分，提供了 RT-TCP/IP 的通訊協定，對於新一代全數位伺服網路而言，更具一大優勢。

在建造 RTX 操作環境時，使用者需安裝 RTX 2012 runtime。安裝完成後，選擇 Dedicated 模式，將其中一個 CPU 核心指定給 RTX 使用，並將電腦重新重開機。在該環境中，經過設定，將網路卡掛載至 RTX 底下，此時該網路卡為運作在 RTX

作業系統下，以確保資料傳送的即時性。

9.2 EtherCAT Master Stack

在 EtherCAT Master Stack 的部分，Acontis 公司目前已經開發完成 EtherCAT master 函式庫，支援了許多具即時性的 OS，其中也包含了 RTX 平台。

圖 8 為 EC-Master 的軟體架構圖。由於即時性的作業系統有很多種，為了方便各種平台的移植，Acontis 有針對作業系統這層主要做特別的處理。EC Link Layer 這部分牽涉到硬體網卡的驅動程式，Acontis 對於 Intel 及 Realtek 的網卡 IC 有做最佳化，才能確保 EtherCAT 在實際通訊時可以到達最高的傳輸速率。

往上的部分是主要核心軟體的部分，EC-master 的設計包含了一個狀態機，在 EtherCAT

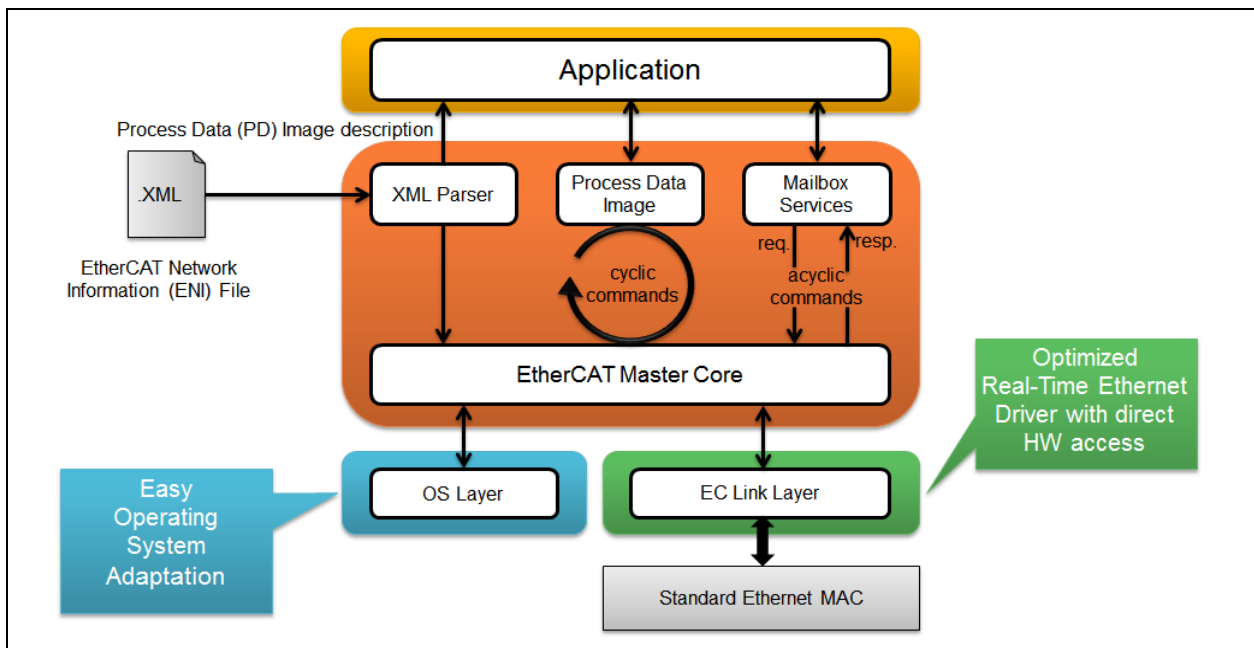


圖 8 EC-Master 的軟體架構圖 [7]

資料來源：<http://www.acontis.com/>



Master Core 這裡去實現，往上有剖析 ENI (EtherCAT network information) 檔案的 XML Parser，Process Data Image 則是負責處理 EtherCAT 封包資料，對於各種 Mailbox 的協定，則是整合在 Mailbox servers 當中。

ENI 檔案為各從站相關於 EtherCAT 通訊的資料，如要產出 ENI 檔案，使用者必須先行安裝 EtherCAT Configurator。在 EtherCAT Configurator 下，選用其他網卡(非掛載在 RTX 底下的網卡)，建立 PC 與伺服驅動器或 I/O 裝置的連線，此時 EtherCAT Configurator 可以掃描到各個從站的裝置。使用者可參考 CANopen 協定中的對象字典，建立各個從站的所需傳輸的 PDO (process data objects)。在每一個循環時間內，封包在各個從站進行傳輸，PDO 為使用者所選擇在封包內所需更新的資料，例如使用者可選擇之對象字典包括 Controlword (6040h)、Target position (607Ah)、Statusword (6041h)、Position actual value (6064h).. 等等。完成以上設定後，選取 Export Configuration

File，便可輸出 ENI 檔案。

9.3 CANopen Over EtherCAT

在應用層的部分，如同前述 EtherCAT 所提供的幾種應用層協議，以 CANopen Over EtherCAT 最常被使用，這部分需參考 CiA402 的協定(CAN in Automation [8])。CANOpen 在 Mode of Operation (6060h)共有 8 種模式，其中 CSP (cyclic sync position mode)、CSV (cyclic sync velocity mode)、CST (cyclic sync torque mode)是各家驅動器都必須支援的，下達命令之前，都必須先確定運行模式，目前工研院機械所已經完成 CSP 模式的開發。如圖 9 所示，在 TxPDO 資料的部分，主要有 Controlword (6040h)、Target position (607Ah)，RxPDO 的部分，包含 Statusword (6041h)、Position actual value (6064h)。

另外，CiA402 定義了 15 種回歸原點模式，如圖 10 所示，可以在 Homing Method (6098h)設定，其他相關如 Homing Speeds (6099h)，Homing

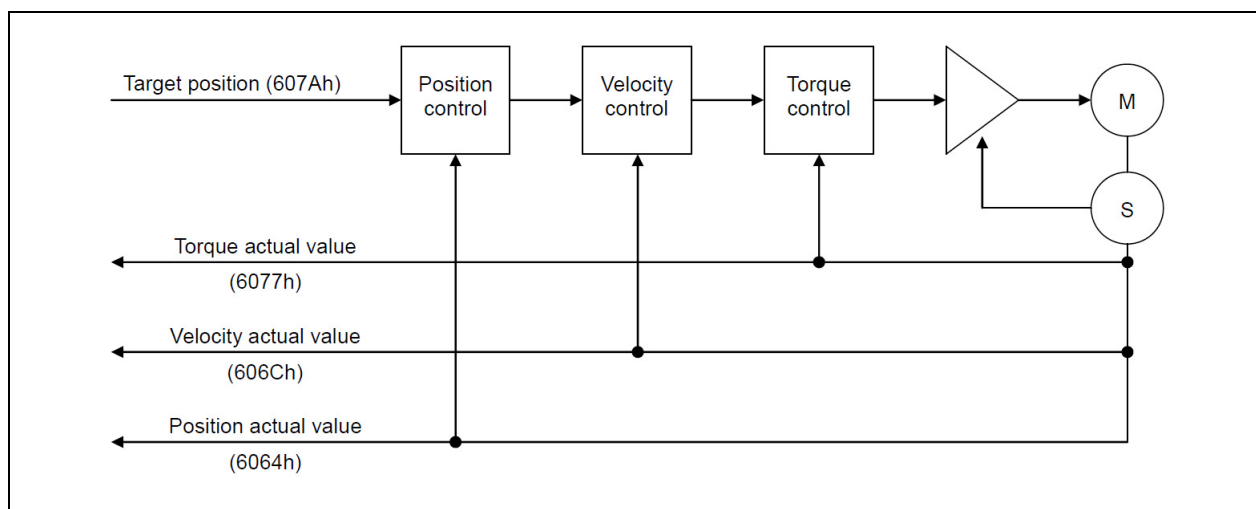


圖 9 Cyclic Synchronous Position Mode [9]

資料來源：ETG6010_V1i0i0_D_R_CiA402_ImplDirective.pdf, <https://www.ethercat.org>

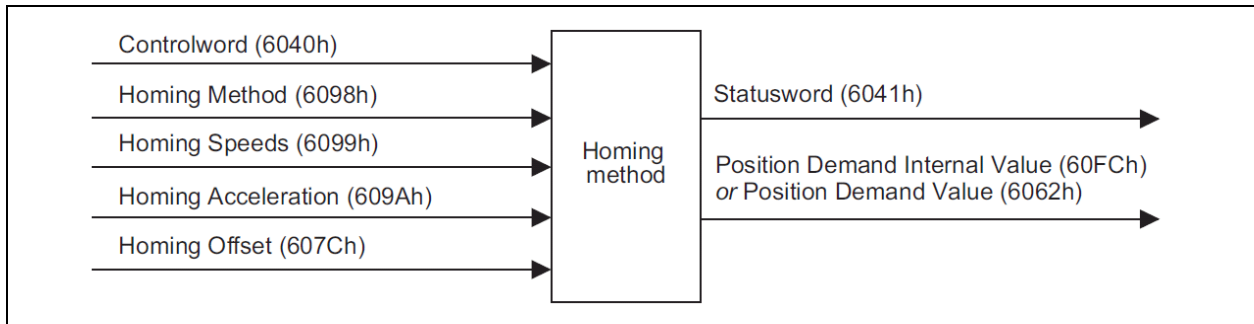


圖 10 Homing Mode [10]

資料來源：Σ-V User Manual EtherCAT (CoE) Network Module_SIEPC72082904A, <http://www.yaskawa-global.com/>

Acceleration (609Ah)也都可以根據需求填入,接著再透過 Controlword 啟動回歸原點,並且可以根據 Statusword 確認回歸原點是否完成。

IO 的控制可以分成兩類,一種是 Servo Driver 上面所提供的 IO,另外一種是獨立的 IO 模組,以 Servo Driver 所提供的 IO 而言,各廠商自行定義相對應的暫存器位址,有些還會加入 Encoder latch 功能;獨立的 IO 模組本身就是一個 EtherCAT Slave,在實際應用上簡易,但無法提供 Encoder latch 的功能。

9.4 ITRI MCCL

由工研院機械所自行開發的運動控制函式庫 (MCCL)在業界已被廣泛利用。在運動控制函式庫 MCCL 的部分如圖 11 所示,MCCL 提供空間中點對點、直線、圓弧、圓、螺線等運動的軌跡規劃函式;除此之外,MCCL 並提供了 16 種原點復歸模式、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設定不同的加/減速時間、加/減速曲線型式、進給速度、最大進給速度與最大加速度;MCCL 也包含軟、硬體過行程

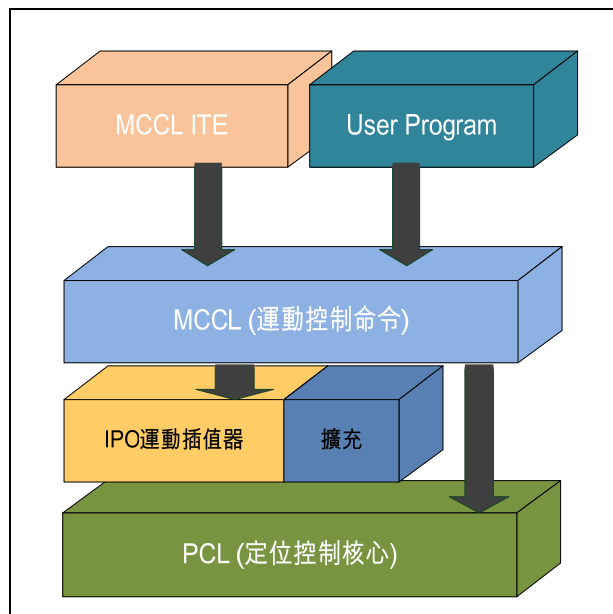


圖 11 運動控制函式庫 MCCL

保護、平滑運動、動態調整進給速度及錯誤訊息處理等功能。

在定位控制方面,使用者可利用 MCCL 設定定位比例增益、定位誤差容許範圍,MCCL 也提供定位確認、齒輪齒隙、間隙補償等功能。

由於 EtherCAT 運動控制系統必須在即時性子系統 (RTX) 底下運行,使用者無法直接撰寫 Windows 視窗程式,為了提供給使用者更方便的



介面，工研院機械所另外發展了 Win32 與 RTX 溝通介面，如圖 12 所示，將所有在 RTX 底下執行的 MCCL 的函式庫對應到 Windows，可以提升使用者再開發及移植時的便利性。圖 13 為 EtherCAT 運動控制系統實際運作的畫面。

路通訊格式為基礎，可相容多種應用層之通訊協定，並可利用簡單的乙太網路控制卡與傳輸線完成硬體架構，增加傳輸的可靠度與確保其即時性，擴充性與使用彈性上也大幅提升。集合以上優點，EtherCAT 已成為開放式網路協定中主流之通訊協定，各家伺服驅動器廠商也相繼開發採用 EtherCAT 通訊協定的驅動器。未來在串列式伺服運動控制領域上，EtherCAT 可預期地將成為此領域中最為廣泛及最易於使用的工業乙太網路通訊格式。

10. 結語

工業自動化控制快速發展，串列式伺服運動控制通訊協定更是百家爭鳴，EtherCAT 以乙太網

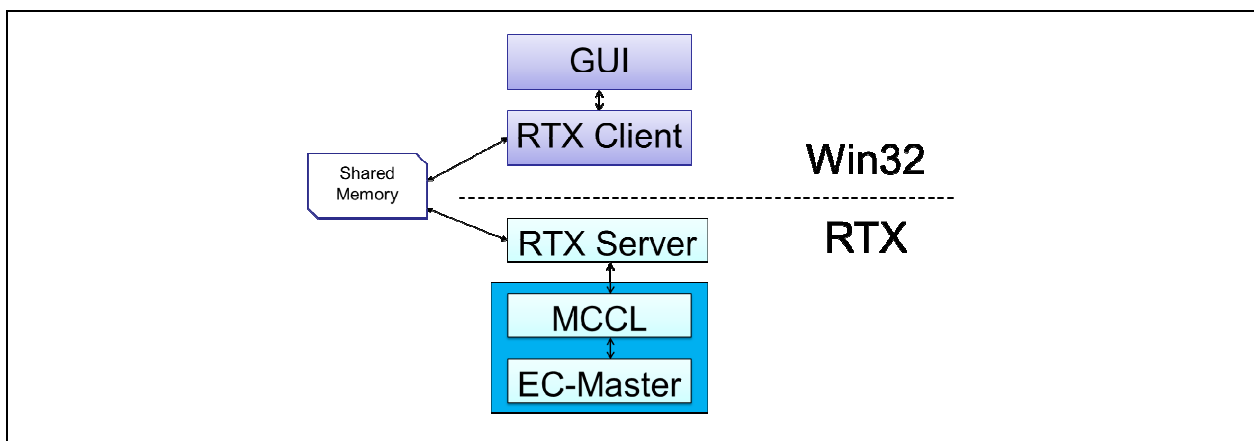


圖 12 RTX 與 Win32 溝通介面

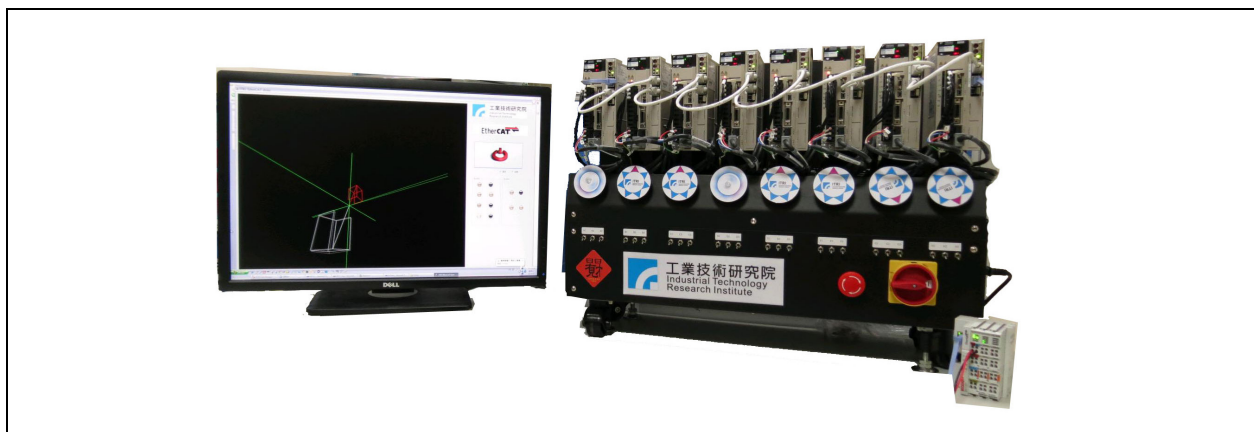


圖 13 EtherCAT 運動控制系統



誌謝

感謝工業技術研究院機械與系統研究所(計畫編號 E353C91230)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] 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，第2-17頁，民國98年4月。
- [2] 郇極、劉絕強，工業乙太網路現場總線 EtherCAT 驅動程式設計與應用，北京航空航天大學出版社，第一版，第1-28頁，民國101年3月
- [3] EtherCAT 技術協會, EtherCAT Technology Group (ETG), <http://www.ethercat.org>
- [4] EtherCAT Communication Specification, <http://www.ethercat.org>
- [5] EtherCAT Introduction, <http://www.ethercat.org>
- [6] RTX2011-Data-Sheet, <http://intervalzero.com/>
- [7] <http://www.acontis.com/>
- [8] Device Profile for Drives and Motion Control, CiA 402
- [9] ETG6010_V1i0i0_D_R_CiA402_ImplDirective.pdf, <https://www.ethercat.org>
- [10] Σ -V User Manual EtherCAT (CoE) Network Module_SIEPC72082904A, <http://www.yaskawa-global.com/>

