

# 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

## Introduction of Digital Servo Motion Control and EtherCAT Technology

工業技術研究院 機械所 汪曙峰 吳承學

### 關鍵字

串列式數位伺服運動控制，分散式控制，工業控制自動化乙太網路技術

### Keywords

Digital Servo Motion Control, Distributed Control, Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT)

### 摘要

本文針對了 ProfiNET, SERCOS, SynqNet 等數種業界既有的開放性串列伺服運動控制技術之規格架構、通訊協議、傳輸媒介做一綜觀性之說明簡述，並對新一代以乙太網路架構為基礎的現場匯流排技術 EtherCAT 做了概括性之介紹。

### Abstract

The article presents a survey of fully digital servo control technology and illustrates their system architecture, protocol, and communication interfaces, etc. Moreover, the next generation Ethernet-based field bus system technology, EtherCAT, is introduced in the second half of this article.

## 前言

資訊產業的持續進步與網路通訊技術的大幅提升，使得以即時通訊介面為基礎的新世代工業自動化設備快速而蓬勃地發展。傳統的自動化設備與工具機台所使用的伺服控制技術因面臨了多軸同步與即時性能不佳、解析度不足，並受限於配線繁多及雜訊干擾等問題，因而利用串列式伺服控制透過即時通訊系統，並經由網路媒介傳遞純數位訊號與控制參數，應用於工業自動化控制系統中的各式通訊傳輸協定，遂於近年來逐一被提出。諸如 CANopen、Real-Time Ethernet、SERCOS 而至 EtherCAT 等新一代開放性技術甚或 SSCNET、F2 等自訂之封閉式獨立規格，採用此類串列式伺服控制之通訊協定而應用於工業自動化設備的網路系統是一個共通的趨勢，其主要優點為配線容易、節省成本、抗干擾性、遠端控制，並可發展更高速度高精度的運動控制技術，進而帶動新的控制架構—分散式控制 (Distributed control) 伺服驅動系統。

所謂的分散式控制就是將系統中各個獨立的控制單元，利用串列式伺服運動控制技術的概念加以整合，以取代一個大型的單一控制系統。因此分散式控制有以下之優點[1~3]：

1. 系統中的每個單元均具獨立性，易於模組化的建立與設計，達到更好的系統整合控制效果。
2. 系統的彈性增加，減低系統建構和維護的困難，達到更靈活的系統應用。
3. 系統的強韌性增加，當一控制單元損壞時，不至於影響到整個控制系統。
4. 配合高速之微處理器，建構具平行處理能力的系統，提升整體效能。

## 串列式伺服運動控制通訊協定

有鑑於上述之發展趨勢，全球控制器廠商或是相關學界也都致力於開發具有即時通訊伺服功能的通訊介面和產品。其中如 SERCOS、ProfiNET、SynqNet、Device Net、Ethernet Powerlink、Modbus、CAN bus... 等均是具公開標準或推廣協會所開發之開放式網路通訊協定，然許多世界性之伺服器大廠並不採用此類開放式標準協議，如日本三菱電機 (MITSUBISHI) 的 SSCNET、松下電器 (Panasonic) 的 F2、日本安川 (Yaskawa) 的 MechatroLink... 等仍就採獨立開發而自行定義的封閉式通訊協定。雖然沒有共通的通訊協定標準，但是對於技術需求與目標均是一致的[4]，即期望達到：一、即時性：必須在固定的週期時間內完成傳輸控制命令，因此傳輸週期須達到 0.1ms 至 5ms 以內。二、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。三、抗干擾性：藉由數位傳輸並加入錯誤檢測碼的機制，降低雜訊干擾。

本節將列舉出目前市場上具公開標準、佔有率較高且為開放式架構的幾項串列式伺服控制技術，介紹其架構、規格與通訊傳輸方式。

## PROFINET

現場匯流排 (Fieldbus) 技術提供製程自動化、工廠自動化或移動控制所需的工業通訊。它使用的是銅線材、光纖甚至是無線等各種媒介的工業通訊系統，透過串列傳輸的方式把各式各樣的裝置(如致動器、驅動器、換能器或感測器等)連結到中央控制管理系統。PROFINET 就是利用此種概念，不僅可水平提供應用現場層級的通訊功能，也能夠同時垂直供應跨越好幾個階層的通訊能力。此外，PROFINET 是具備多種電路層 (electrical-layer) 選項的伺服網路標準之一，最常應用於自動化設備的 PROFINET 電路層即為 RS-485 標準通訊介面的改良版，其中增加多項要求以提高資料傳輸效能[5]。

PROFINET 支援下列三種通訊方式：

### 1. TCP/IP 標準通訊

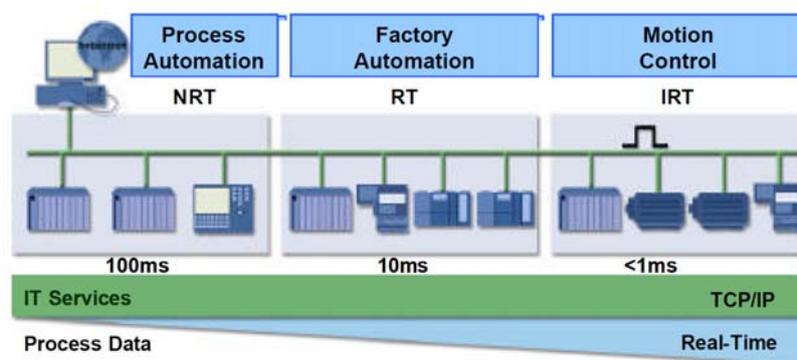
PROFINET 基於工業乙太網技術，使用 TCP/IP 和 IT 標準。TCP/IP 是 IT 領域關於通信協議方面上的標準，儘管其響應時間大約是 100 ms，不過對於工廠控制級的應用來說，這個響應時間就足夠了。

### 2. 即時 (Real Time) 通訊

對於感測器和控制器設備之間的數據交換，系統對響應時間的要求更為嚴格，因此，PROFINET 提供了一個最佳化且基於乙太網第二層 (Layer 2) 的即時通訊通道，通過該即時通道，大大減少了數據在通訊中的處理時間，PROFINET 即時通訊 (RT) 的響應時間是 5—10ms，其中網絡節點(指的即是交換機)也包含在網絡的同步過程之中。同步之交換機在 PROFINET 概念中占有十分重要的位置，因為在傳統的交流機中，要傳遞的訊息必定在交換機中延遲一段時間，直到交換機解譯出訊息的目的位址並轉傳該訊息。這種基於地址的訊息轉傳會對數據的傳送時間產生相當不利的影響。為了解決這個問題，PROFINET 在即時通道中使用一種最佳化的機制來實現訊息的轉傳。

### 3. 同步即時 (IRT) 通訊

在現場級通訊中，對通訊即時性要求最高的是運動控制 (Motion Control)，PROFINET 的同步即時 (Isochronous Real-Time, IRT) 技術可以滿足運動控制的高速通訊需求，在 100 個節點下，其響應時間要小於 1ms，抖動誤差要小於 1 $\mu$ s，以此來保證即時、確定之響應，如圖一所示。



圖一、PROFINET 在各種應用場合中所需之通訊時間

PROFINET 適用於工廠的各種即時要求，為了保證高品質的即時通訊，所有的網路節點必須有很好的同步通訊以保證數據在精確相等的時間間隔內被傳輸；網絡上的所有節點必須通過精確的時鐘同步，實現同步即時乙太網。例如：通過規律的同步數據實現通訊循環的同步，其精度可以達到微秒級。這個同步過程可以精確的記錄其所控制系統之所有時間參數，因此能夠在每個循環的開始實現非常精確的時間同步。如此高精準之同步單純靠軟體是無法實現的，必須依靠網絡第二層中硬體支援，即西門子 IRT 即時同步 ASIC 晶片。

每個通訊周期被分成兩個不同的部分，一個是循環的、確定的部分，稱之為即時通道；另外一個是標準通道，標準的 TCP/IP 數據通過這個通道傳輸。

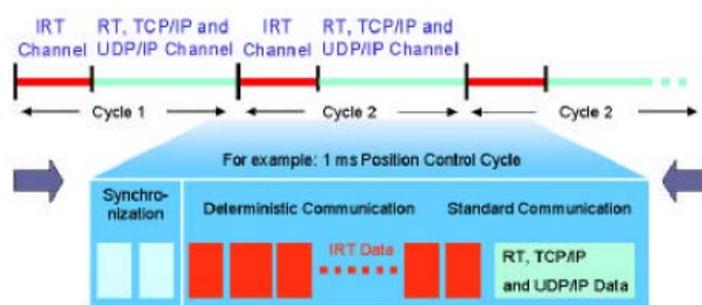


Figure 2.2: IRT communication is broken down into an IRT channel and an open channel.

圖二、每一通訊周期分成同步即時通訊與標準 TCP/IP 通訊於通道中傳輸

在即時通道中，為即時數據預留了固定循環間隔的時間框，而即時數據均按固定的次序插入。因此，即時數據就在固定的間隔被傳送，循環周期中剩餘的時間用來傳遞標準的 TCP/IP 數據。兩種不同類型的數據就可以同時在 PROFINET 上傳遞，而且不會互相干擾，實現了 PROFINET 技術對乙太網技術的相容。基於普通乙太網技術的各種網絡服務功能，如 SNMP、HTML 等，也同樣可以在 PROFINET 上運行。使用者在獲得高性能即時網絡的同時，還可以利用乙太網技術和 IT 技術帶來的便利。

由於即時數據在時刻內按順序發送，交換機中會建立一個時間表格，通過該時間表格，交換機就可以知道何時將傳送即時訊息，訊息的轉傳幾乎沒有延遲。如果有發生衝突的危險，標準的 TCP/IP 訊息就暫時保存在交換機中，等下個開放通訊周期再發送。通過使用這種機制，保證了系統響應時間。例如：使用 PROFINET 構建的即時通訊網絡可以在 1ms 的時間周期內，實現對 100 多個軸的控制，其抖動誤差小於 1 $\mu$ s，滿足了運動控制對通訊即時性的要求。

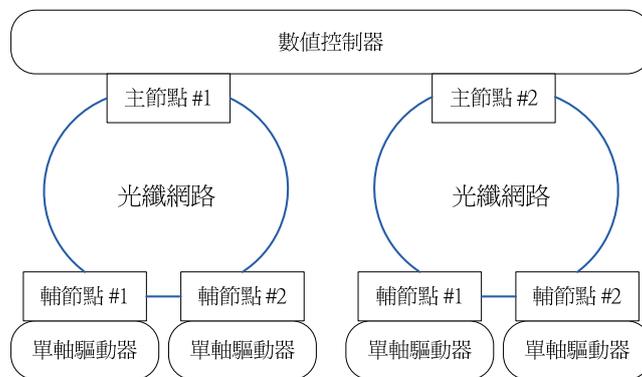
作為國際標準 IEC-61158 的重要組成部分，PROFINET 是完全開放的協議，且 PROFINET 和標準乙太網完全兼容，集成 IRT 功能的交換機和一個普通交換機在平時工作起來是完全一樣的；也就是說，IRT 交換機可以和普通交換機一樣

使用。即便是在使用即時通道，它同樣可以在其開放通道使用其他標準功能。所以，根據環境的需求，自動化組件之間可以通過相同網絡、相同的連接建立不同的通訊鏈路，為用戶的使用提供了極大的方便[6~7]。

## SERCOS

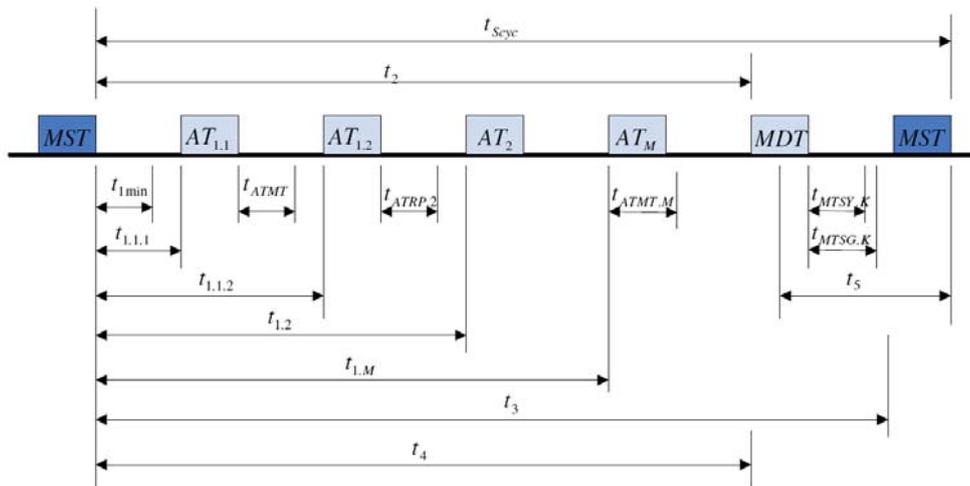
SERCOS 為 Serial Real-time Communication System 之縮寫，在 1987 年時由德國機械工具協會、電氣製造協會及許多工具機與伺服驅動器廠商，針對數位運動控制共通介面所制定的開放式通訊架構，並採用以光纖為傳輸介面的週期式網路通訊協定。1995 年獲 IEC (Institute of Electronic Commerce) 通過成為 IEC-1491 國際標準通訊協定，同年修正編號為 IEC-61491 國際標準[2]。

SERCOS 為一主從式環狀拓撲 (Ring Topology) 網路結構 (如圖三所示)，控制器為主節點，可控制 1 至 254 個位址的輔節點，其中每個輔節點驅動器可以是單軸或雙軸的驅動器，實際在光纖網路上真正能夠控制的輔節點數量，仍需要取決於傳輸週期、傳輸資料量以及網路的傳輸速率。而每個節點在傳送接收資料時，需被限制在設定好的時間插槽內 (Time-slot) 中，且在傳輸週期中是固定且等距，才能夠確保整體網路的通訊品質。SERCOS 採用 IEC-3309 國際標準的高層資料連結控制協定 (HDLC, High level Data Link Control protocol) 之資料封包格式，並以 NRZI (Non Return to Zero Inverted) 方式編碼，可使用 SGS Thomson 所設計之 SERCOS410B 晶片來避免複雜的資料封包設計。



圖三、SERCOS 環形拓撲網路系統架構圖

SERCOS 共分為三種電訊 (Telegram)：主節點同步電訊 (MST, Master Synchronization Telegram)、伺服回授電訊 (AT, driver/Amplifier Telegram)、主節點命令電訊 (MDT, Master Data Telegram)。主節點同步電訊主要以提供網路系統中各節點的時間參考，不包含任何資料或命令；伺服回授電訊 AT 以點對點 (point-to-point) 的方式傳遞，將伺服驅動器的回授數值或資料傳送回給主節點接收；主節點命令電訊 MDT 則以廣播 (broadcast) 的方式，傳送主節點給網路上各節點的驅動命令或控制要求。通訊周期中各個電訊的時序圖，可參考圖四和表一。



圖四、SERCOS 通訊週期時序圖

$t_{Ncyc}$	Control unit cycle time
$t_{Scyc}$	Communication cycle time
$t_{1min}$	Shortest AT transmission starting time
$t_1$	AT transmission starting time
$t_{ATMT}$	Transmit/receive transition time
$t_3$	Command value valid time
$t_4 = t_{Scyc} - t_5$	Feedback acquisition capture point
$t_5$	Minimum feedback processing time
$t_{MTSG}$	Command value proceeding time
$t_{ATAT}$	Transmit to transmit recovery time
$t_{MTSY}$	Receive to receive recovery time
$t_2$	MDT transmission starting time

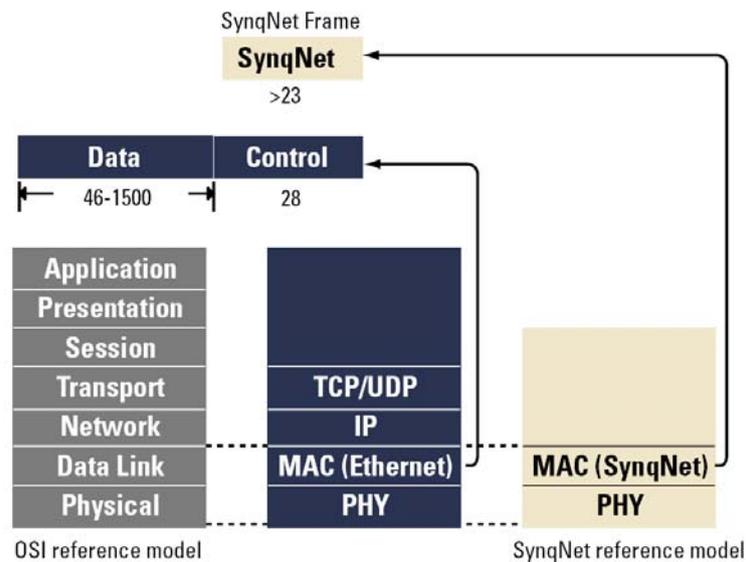
表一、SERCOS 通訊週期時序圖之對照表

## SynqNet

對於機器設備製造商而言，在運動控制上不僅對於性能與價格有極高的要求外，對於傳輸上減少配線的數量與複雜度並增加設計的靈活性亦相當重要。因此為了因應系統應用的要求，網路結構取代傳統連線的方式使得運動控制器與驅動器、周邊 I/O 裝置，利用單一傳輸線即可達到更高階的傳輸速度，加上機器診斷功能和更安全更穩定更有彈性的運動控制[8]。

SynqNet 是一個高性能、全數位式的開放性同步運動控制解決方案。它採用的是即時、同步數位網路專利技術，可在各種複雜的應用環境中，實現高性能的

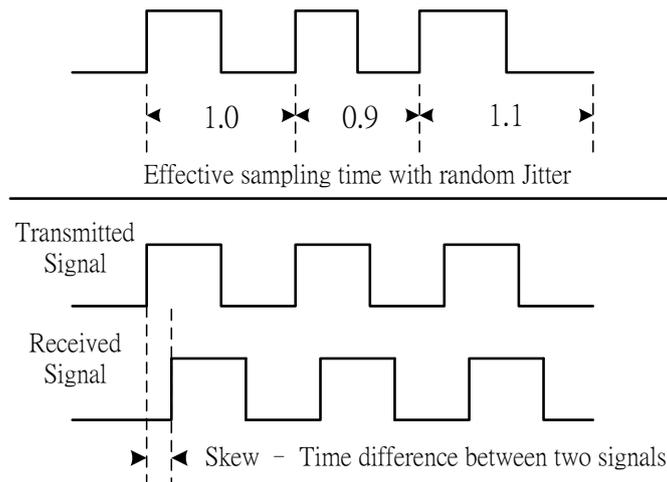
運動控制，確保機器的可靠度。同時，SynqNet 是第一個採 100 Base T(IEEE802.3 標準)網路(如圖五所示)，具有分散式控制的優點，以及優越的性能、容錯、可靠性和故障診斷功能。SynqNet 是由 MEI 公司開發，目前已經被安川電機、Panasonic、Advanced Motion Control、Danaher Motion、Glentek、Sanyo Denki 等多家大型驅動器公司採用。



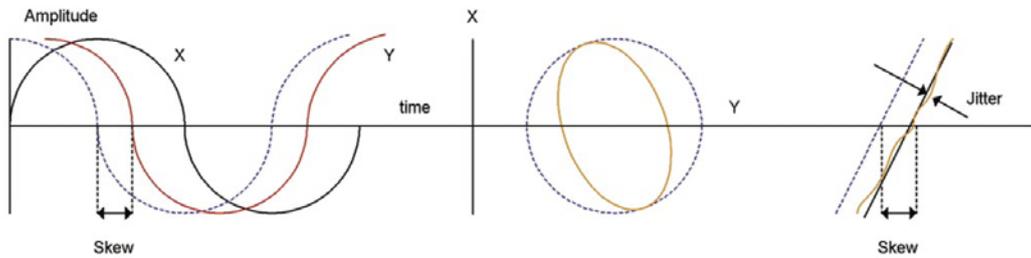
圖五、OSI、IEEE802.3 與 SynqNet 參考模型

高性能運動控制系統的關鍵技術在於將理想的運動曲線轉換成一軸或多軸的伺服驅動命令，利用精確的運動學模型與各種相對應的補償技術來實現。然而無論在精確的模型或是補償，在多軸的運動控制系統中，頻寬、通訊週期、同步性、即時性、安全性與可靠性也都是設計控制系統的關鍵所在。

SynqNet 是如何實現真正多重輸入輸出(MIMO)控制？所有的數位系統均以一個 CLOCK 為基準，在固定的離散時間內對資料進行取樣，而當有多個系統聯結在一起時，就會有多個 CLOCK 存在。無可避免的是，在電磁波干擾下會造成時基抖動(jitter)、發送與接收端之間或是網路節點間的資料傳遞延誤所造成的時脈偏移(skew)等問題(如圖六、圖七所示)，都必須要做有效的控制。SynqNet 使用相位定迴路技術，將從屬網路之獨立 CLOCK 與主網路同步，使得時基抖動問題縮小至小於 1ms；同時，SynqNet 可在硬體中測量系統時脈偏移，並利用演算法進行補償，可將偏移問題降低至 20ns。對於任何數量的節點或網路流量條件，均可獲得改善。

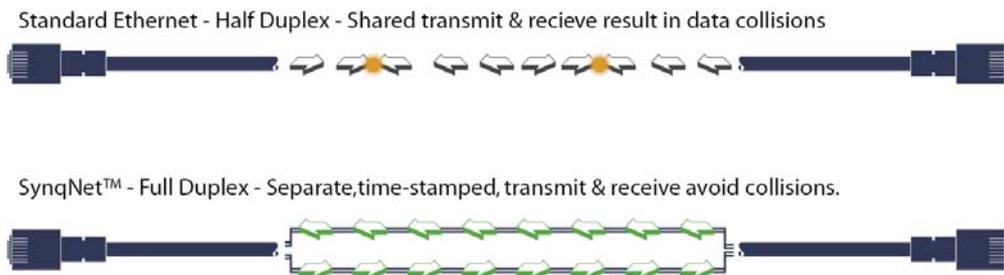


圖六、時基抖動與時脈偏移



圖七、時基抖動與時脈偏移在圓和直線插值的影響

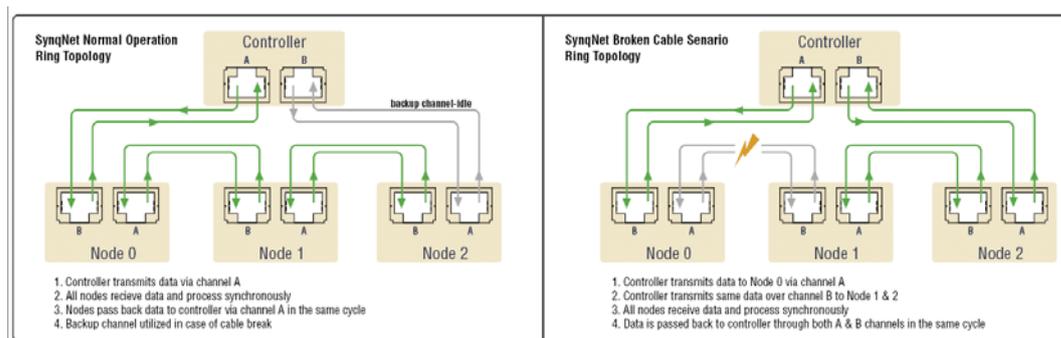
目前多數的半雙工網路，某兩台設備試圖利用同一傳輸介面傳輸資料會有碰撞的現象發生，若網路上的設備數目增加時，碰撞的機會將以指數級增加，導致性能大大地降低(如圖八所示)。SynqNet 設計用來消除 MACD(multiple access collision detection)機制，其採用同步方式，以規則的排程時間方式，將資料傳送至每一設備中。使用全雙工之獨立的接收與發送傳輸介面，避免資料碰撞，並可達到 2x100Mbit 的確定性資料傳輸速率。在四軸時，可達到最短的 25um 週期時間。



圖八、標準網路與 SynqNet

SynqNet 在通訊網路異常、中斷、連接埠鬆弛或任何一個或多個節點故障時，可利用應用程式告知相關問題和相關位置，以便機器改以適當的特殊處理方

式進行回應(如圖九)。同時，每個節點均設有看門狗計時器(watchdog timer)，若主機或整個網路發生意外故障事件時，以可預測、平穩與安全的方式關閉系統。SynqNet 是在商業網路應用上提供此完整的安全性和錯誤容許性(Fault tolerant)。尤其是在高價值設備以及醫療應用中，數位網路容錯功能是非常重要。SynqNet 為支援高性能之網路伺服控制系統而專門設計，提供不減低性能，支援各種驅動裝置之伺服網路而開發，並具有單一網路傳輸、容錯與高抗干擾性之附加優點。



圖九、SynqNet 環狀拓撲之自我修復與錯誤容許機制示意圖

## 工業控制自動化乙太網路技術 EtherCAT

分散式控制在工業控制領域已有相當成熟的發展，諸如上文所介紹的，應用於工業自動化設備的 Profibus、應用於運動控制伺服驅動技術的 SERCOS 以及應用於車輛及工業自動化的 CAN Bus 網路等，網路控制技術在各自的運用用途上各有不同的發展，這些分散式控制應用主要使用 PC 或高速控制器，與通用 I/O 或驅動器等設備透過高速且安全可靠的網路進行連結及控制。Ethernet 過去因先天設計上的因素並不符合使用於即時控制系統，然而因為它的普及且技術已臻成熟，現在此種趨勢改變了，已有許多協定發展在 Ethernet 並應用於工業上，因此，即時乙太網路技術的出現已為工業控制應用帶來了新的氣象。

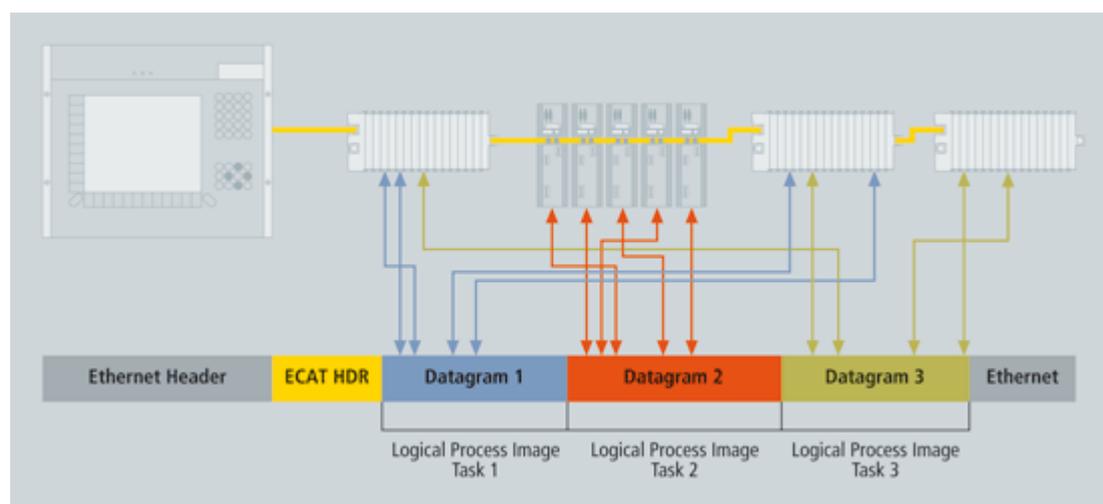
EtherCAT (Ethernet for Control Automation technology) — 乙太網路控制自動化技術最初為德國 Beckhoff 公司所研發的基於乙太網路通訊協議，並應用於自動化與工業控制領域的開放式即時現場匯流排 (Fieldbus) 技術。此技術突破了過去其他乙太網路解決方案的系統限制，具有靈活的拓撲結構，簡單的系統配置，性能優越、操作簡便以及成本低廉等特點，因而使得過去無法選擇使用現場匯流排網路技術的應用領域得以實現採用此項技術，EtherCAT 目前已廣泛運用於機械設計、運動控制等各式自動化與工業領域用途的場合中。

EtherCAT 技術於 2005 年 2 月正式成為 IEC 規範 — IEC/PAS 62407，並整合至國際現場匯流排技術的新一代標準 IEC61158 中，國際標準組織 (ISO) 亦已將 EtherCAT 納入 ISO15745 標準，目前此技術由 EtherCAT 技術協會 (EtherCAT

Technology Group, ETG) [9]負責支援並推廣該技術未來的發展。ETG為一全球化的組織，包括來自機械製造、系統整合、終端用戶及自動化設備技術供應商等等的眾多會員單位，擁有良好的支援能力及對該技術發展前景的保證。

### EtherCAT系統架構與運作原理

EtherCAT 採用主 (Master)/從 (Slave) 式架構，Master 端之主機控制器無需使用昂貴高價的專用硬體介面卡，僅需透過標準乙太網路卡 (Network Interface Controller, NIC) 即可實現，而 Slave 端之從屬設備則採用專屬的硬體控制器晶片。經由標準的乙太網路連接方式與符合 IEEE 802.3 [10]標準的乙太網資料封包格式，EtherCAT 從端設備可於資料封包的電訊報文 (Telegram) 經過其節點時讀取其相對應編址位置之資料，同時，輸入資料同樣在電訊報文經過時插入至報文中(圖十)，而無需接收整個乙太網資料封包，將其解碼後再將過程資料 (Process Data) 複製到各個設備。因此，整個過程中，封包報文的讀取作業將只有幾奈秒的時間延遲發生。

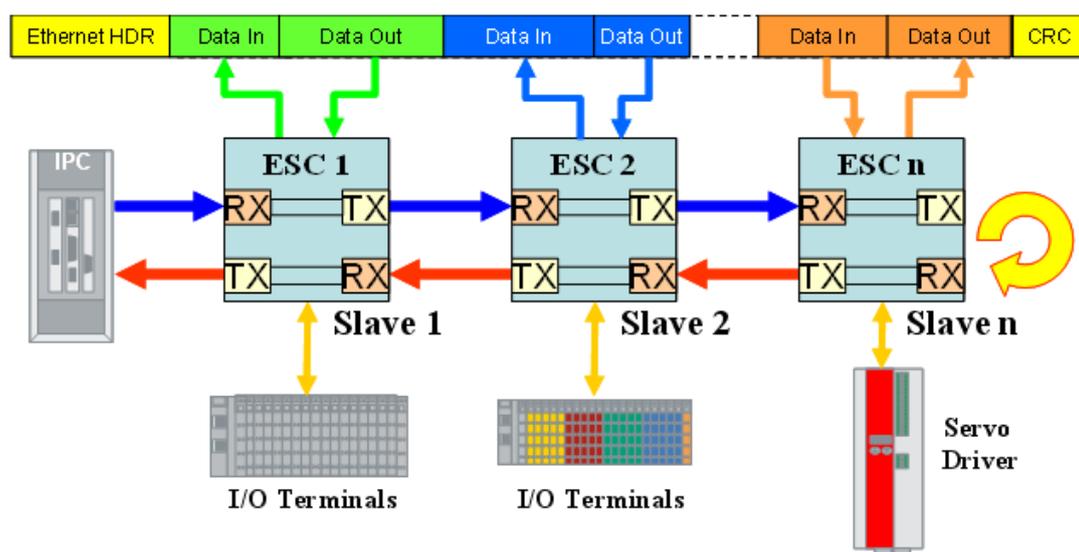


圖十、過程資料插入至 EtherCAT 封包報文中 [9]

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

依據 ETG 技術文件[11]中所描述之 Ethernet 飛速傳輸 (“on the fly”) 運作原理，其具體可假設整個乙太網資料封包結構為一移動中之火車，包含於標準乙太資料封包結構內的 EtherCAT 報文訊框則視為火車之車廂。EtherCAT 報文中的 Process Data 數據可類比為車廂中的乘客，Slave 端的從屬設備在每列列車通過時會適當的提取或插入單獨的乘客 (Bit 資料) 或一組甚至多組乘客。依此方式，當前一站的從端設備接收由主站 Master 端控制器所傳送的乙太網路封包時，將自動串流封包到下一站的從端設備，整列火車將毫不停留的穿過所有 Slave 端的從站設備，由於資料封包持續於各從端設備裝置之間穿梭，因此可同時存在於多組裝置中。而列車在訪問過整個系統最末端的從站後，該從端設備將迴轉此列車，將經

處理過的資料封包數據做為上行電報送返，使其再次穿過所有的從站裝置而返回 Master 端的主站控制器（圖十一）。

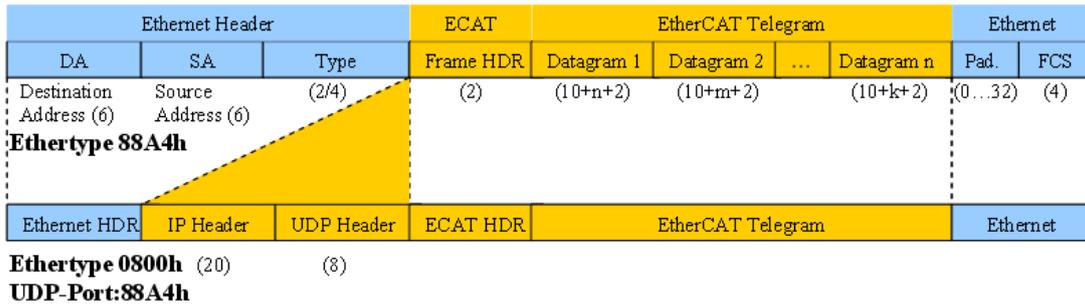


圖十一、EtherCAT 工作原理

相較於上述 EtherCAT 運行原理，對非 EtherCAT 架構的系統來說，若以十個從端裝置為例，欲將不同資料傳送至各個從端設備，則依據以上條件主機必須發送十個不同的封包至各從端設備。但是對使用 EtherCAT 架構之系統而言，則僅是對所有從端設備傳送一個長形封包，而該封包內即包括十組設備各自的資料。然而，若所有從端設備裝置均必須接收相同資料，則將僅傳送單一個短封包，不需對每個從端設備皆發送相同資料的各別乙太網格式封包。從端設備將於封包串流時讀取其相同部份，藉以最佳化資料的傳輸速度與頻寬。依此方式，由於 EtherCAT 乙太網封包訊框大幅合併了需要傳送與接收的設備資料數據，所以 EtherCAT 的有效資料率 (Effective Data Rates) 可達 90% 以上，其 100 Mb/s TX 的全雙工特性得以完全利用，有效資料率可大於 100 Mb/s（即大於 2 x 100 Mb/s 的 90%）。

### EtherCAT 傳輸協議與資料封包結構

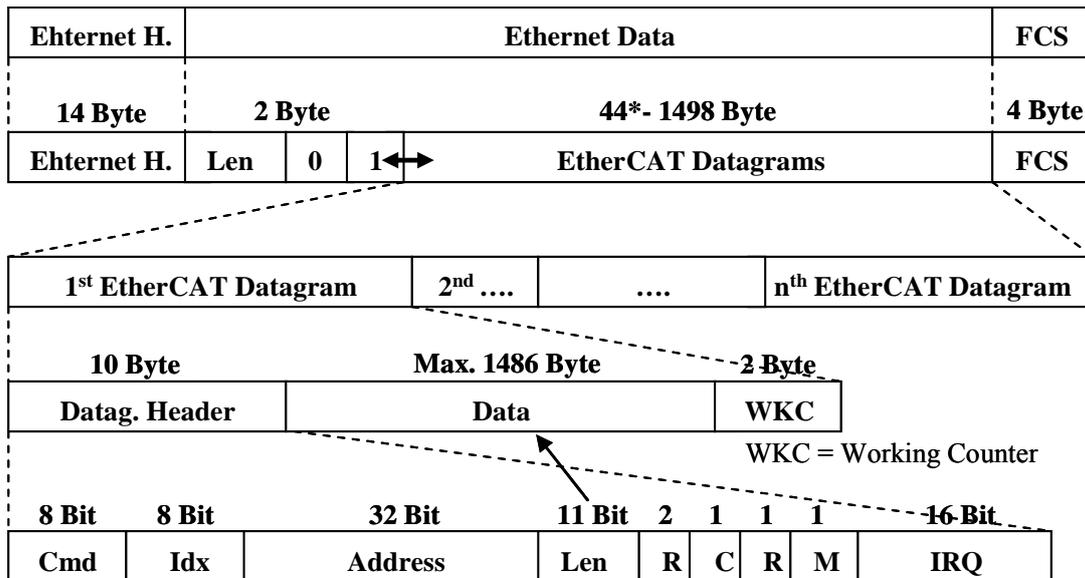
EtherCAT 採用標準的 IEEE802.3 [10] 乙太網封包格式（圖十二），並在封包內使用官方保留的 88A4h 乙太網類型 (Ether Type)。採用此種乙太類型可允許 EtherCAT 將其資訊框封裝在乙太網封包的資料欄位，控制數據可直接寫入標準乙太網封包內傳輸資料，而無需重新定義封包格式。



圖十二、符合 IEEE 802.3 標準的 EtherCAT 封包 [9]

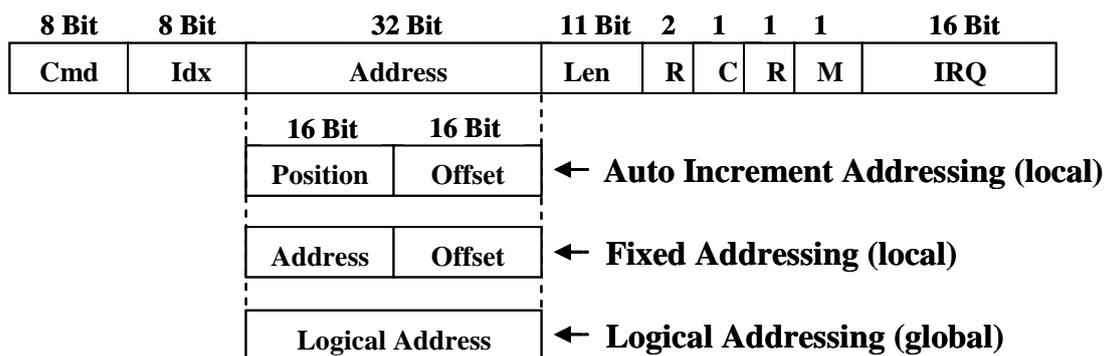
每個 EtherCAT 資訊框皆包含一個訊框表頭 (EtherCAT Frame Header) 以及一至多個的 EtherCAT 指令子報文 (EtherCAT Command / Datagram)，各子報文再由報文表頭 (Datagram Header)、數據資料及工作計數器 (Working Counter, WKC) 等欄位所構成，可全面有效利用大容量的乙太網資料區段，其結構如圖十三所示：

\* add 1~32 padding bytes if Ethernet frame is less than 64



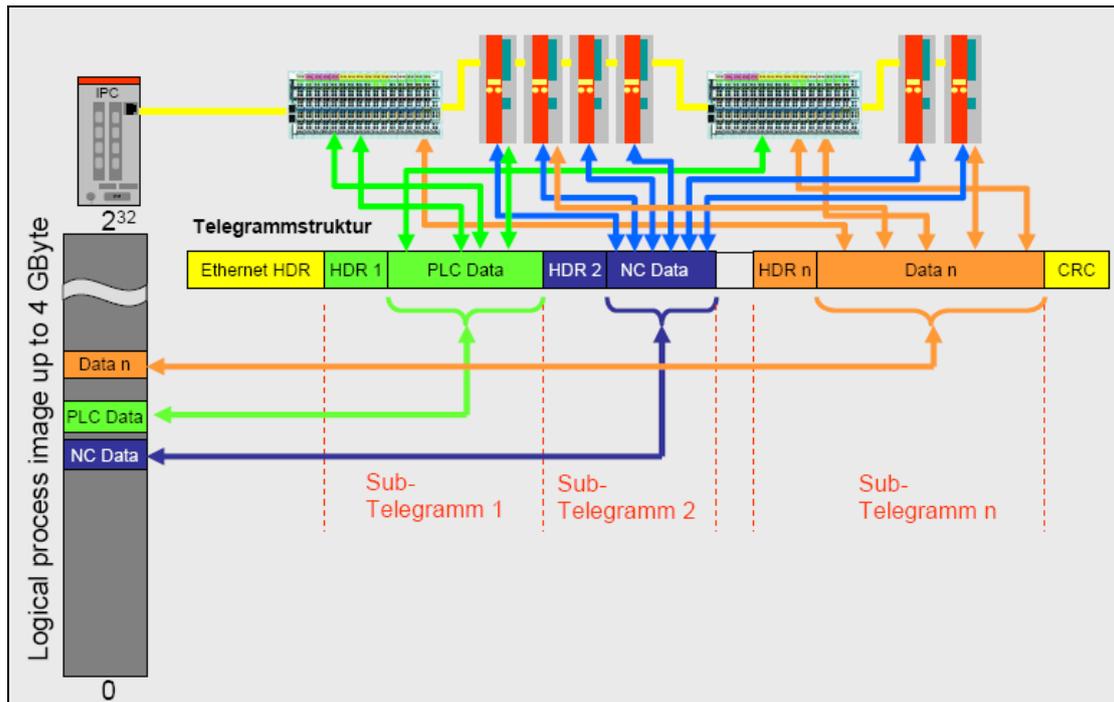
圖十三、Ethernet / EtherCAT Frame Structure [12]

根據 ETG 所定義之 EtherCAT 報文訊框格式[12]，單一 EtherCAT 封包可同時對多個從端節點定址。EtherCAT 資料報文表頭內包含一個 32 位元的位址欄，用以對實體節點進行 EtherCAT 所支援的兩種方式的定址：設備定址 (Device Addressing) 和邏輯定址 (Logical Addressing)。其中設備定址又可分為自增定址 (Auto Increment Addressing) 和固定定址 (Fixed Addressing)。設備定址依其結構可再分為前 16 位元的 Slave 端從屬設備位址及後 16 位元用來定址從端設備內某一具體記憶體空間的偏移量位址 (圖十四)。



圖十四、EtherCAT Addressing [12]

邏輯定址則是借助於 EtherCAT 從端控制器 (EtherCAT Slave Controller, ESC) 中的 FMMU (Field Memory Management Unit) 單元實現從端設備記憶體空間從物理位址到邏輯位址的映射 (圖十五)，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 4Gbyte (即 EtherCAT 報文表頭裏共 32Bit 的位址空間)，所有從端設備可從此 4GByte 空間中讀取數據或者寫入資料。由於資料序列獨立於實體裝置之順序，因此可對從端設備進行任意排序的編址，從端設備之間的廣播 (Broadcast)，多播 (Multicast) 和單獨通訊也得以實現。EtherCAT 由封包報文表頭的 8Bit 命令欄位決定主機對從端設備的定址方式，而報文的資料數據欄長度最大可達 1486 個位元組。所有的 EtherCAT 報文訊框最後都由一個 16Bit 的工作計數器 (WKC) 結束，WKC 用來標幟由 EtherCAT 報文定址到的設備數量。當報文在從屬設備端成功實現資料交換，EtherCAT 從端控制器通過硬體增加 WKC 之值。在 Master 端的主機一側，則經由比較返回報文的 WKC 值和期望的 WKC 值來校驗報文的正確性。



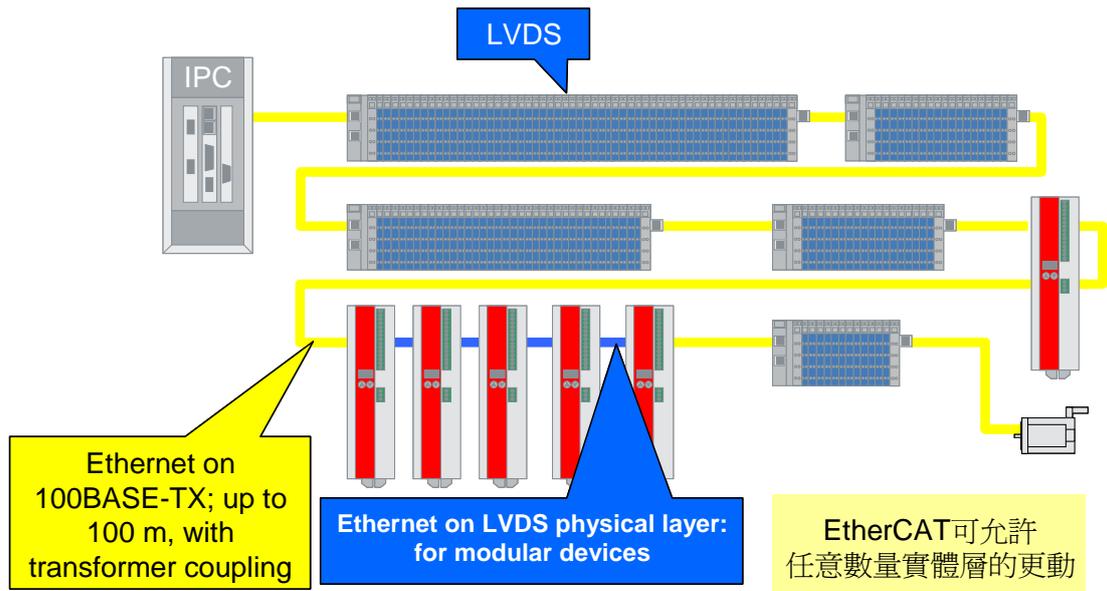
圖十五、從端設備記憶體實體位址到邏輯位址的映射[11]

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

### 拓撲結構與實體層連線

EtherCAT 支援幾乎所有的拓撲類型，依據前述協議的 16 位元設備定址方式，整個網路可以連接達 65535 台設備。除可使用簡單且低成本的線性拓撲結構來取代傳統乙太網常用但價格昂貴的星形結構外，亦可變型為帶分支之菊鏈連接 (Daisy Chain) 架構，較有效的系統連線方法則是線型、分支或樹叉結構的組合拓撲 (圖十六)。

EtherCAT 實體層可選擇不同的電纜以提升連線的靈活性，可採用標準 100BASE-TX 模式雙絞線電纜，100BASE-FX 塑膠光纖或 E-bus (LVDS, Low Voltage Differential Signaling, 低電壓差動訊號傳輸) 傳送信號。專為短距離端點傳輸所開發之 E-bus 模式適用的最大連接距離為 10 米，一般 100BASE-TX 模式下的快速乙太網實體層則允許兩設備之間的最大電纜長度為 100 米。Master 端之主機設備無需專用介面卡，只需使用一般市場上普遍且經濟的標準乙太網路卡 (NIC) 即可實現與任何一台乙太網控制器的連接。因此亦非常適用於小型和中型規模的控制系統，可說為分散式 I/O 開闢了新的應用領域。

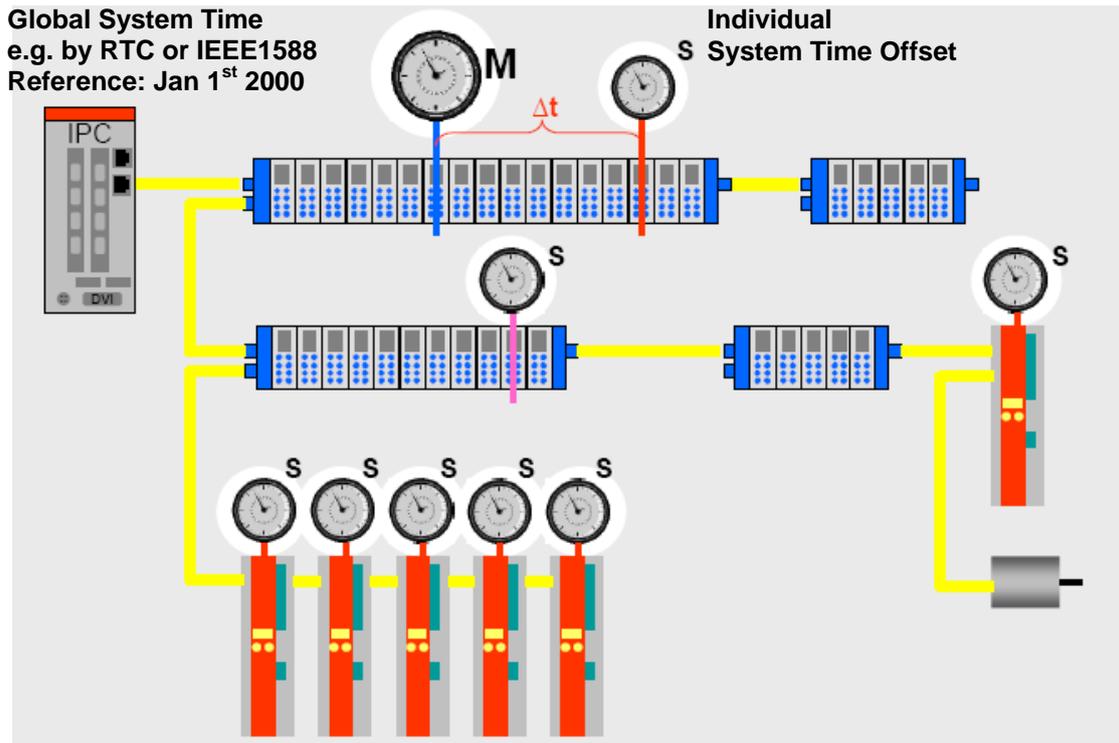


圖十六、靈活的拓撲結構與連線：線型、樹型或星型拓撲 (100BASE-TX 與 LVDS)

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

### 分散式時脈與 EtherCAT 性能

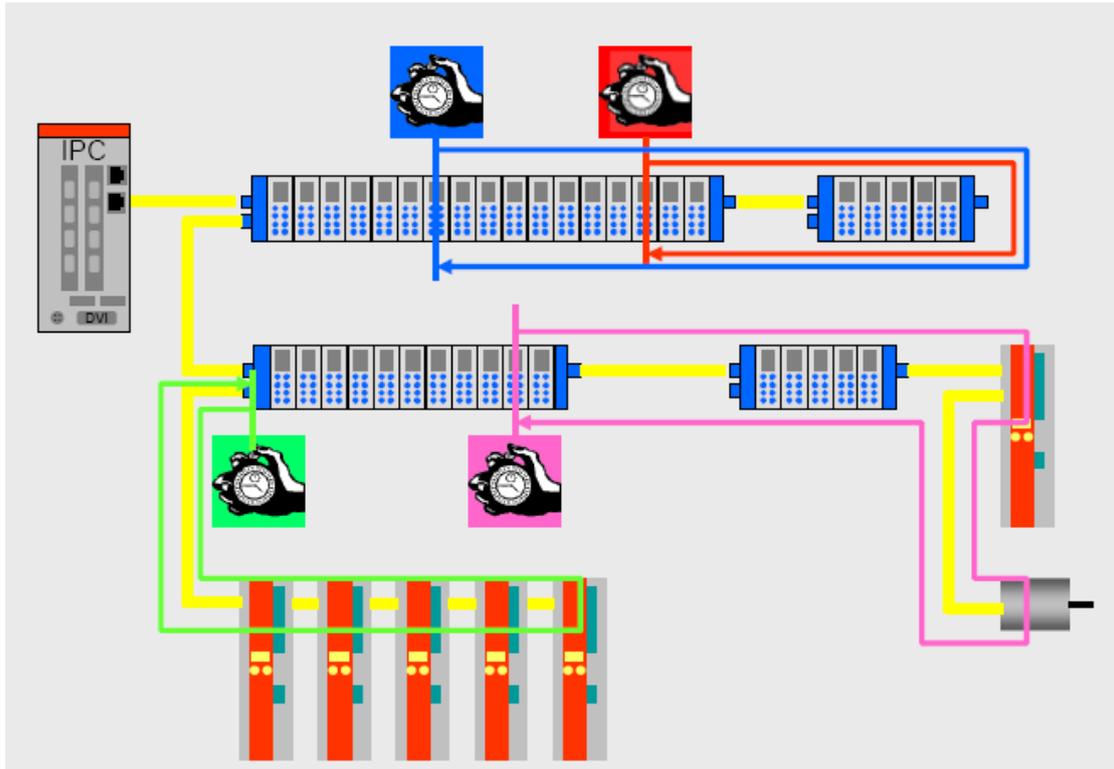
多軸運動控制中常需要數個伺服軸同時執行座標運動之任務，因此精確的同步化作業對於同時動作的分散式處理程序而言格外重要。EtherCAT 透過 IEEE 1588[13]標準的分散式時脈計算法實現同步，從端設備的其中一組將被使用作為主節點參考時脈(Reference clock)，於每次掃描週期中讀取主節點時脈，並由主機控制器傳送特定的同步化電報，更新其他從端設備時脈，藉由 Master 端計算其參考時脈與每個從端設備時脈的時間差，將可得出個別從端設備系統時脈的偏移補償量(Offset Compensation)，依此來達到從端設備的時脈同步化，並提供所有從屬裝置絕對的系統時間與一致同步性 (可達小於 100ns 之差異) (圖十七)。



圖十七、EtherCAT 分散式時脈：偏移與抖動值補償[11]

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

由於 EtherCAT 資料交換於從端設備完全基於純硬體機制，借助於快速乙太網物理層的全雙工特性與邏輯環狀結構，各從端節點可於 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、小於  $1\mu\text{s}$  的精確性同步控制 (圖十八)。



圖十八、分散式時脈量測傳播延遲[11]

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

在性能面上，藉助於從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 協定的處理過程都將在硬體中進行，完全不受協定堆疊 (Protocol Stack) 的執行時間、CPU 性能或軟體實作方式的影響，可在  $11\mu\text{s}$  內處理 256 組數位 I/O、 $30\mu\text{s}$  內處理分布於 100 個節點中的 1000 組數位 I/O，或是在  $50\mu\text{s}$  內以 20KHz 取樣頻率的需求下處理 200 組類比 I/O (16Bit)、在  $100\mu\text{s}$  內更新 100 個帶有命令值和控制資料的伺服控制軸 (Servo-Axis) 的實際位置及狀態 (each 8Byte In+Out) (表二)。

過程資料 (Process Data)	更新時間
256 組分散式數位 I/O	$11\mu\text{s} = 0.01\text{ms}$
1000 組分散式數位 I/O	$30\mu\text{s}$
200 組類比 I/O (16 位元)	$50\mu\text{s} \leftrightarrow 20\text{kHz}$
100 個伺服軸，每軸含 8 位元組輸入與輸出資料	$100\mu\text{s}$
1 個現場匯流排主開道 (Fieldbus Master-Gateway) (1486 位元組輸入與 1486 位元組輸出資料)	$150\mu\text{s}$

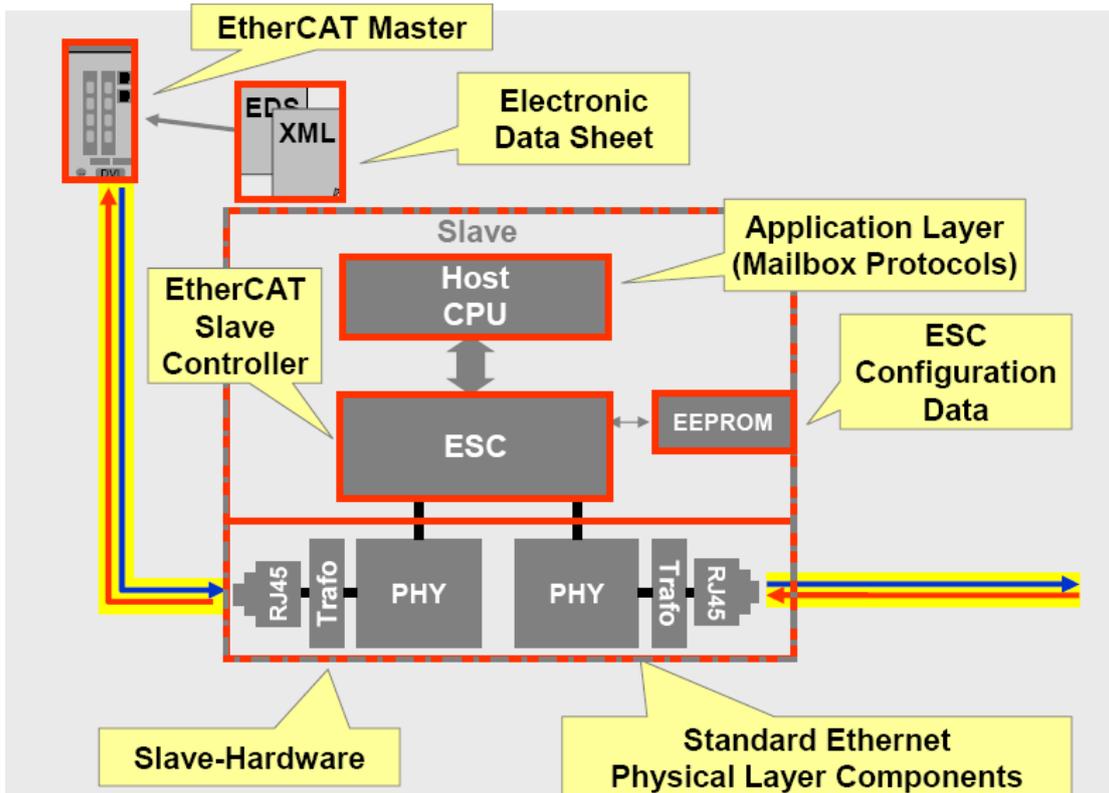
表二、EtherCAT 性能概貌 [9]

## EtherCAT 實現

EtherCAT 技術使用遵循 IEEE802.3[10]標準的乙太網封包結構。這些封包由 Master 端的主機控制器所發送，從端設備只在乙太網封包經過其所在位置時才進行資料的提取和/或插入動作。因此，EtherCAT 主機僅需使用標準的乙太網 MAC (Media Access Controller)，Master 端功能完全由軟體實現。EtherCAT 在單一乙太網封包中最多可執行 1486 位元組的分散式過程資料通訊，不同於其他工業乙太網協定的解決方案是主控制器在每個網路週期中需為各個從端節點處理、發送和接收封包資訊，EtherCAT 系統在一般情況下，主機控制器每週期僅需發送一至兩個封包即可完成所有從端節點的全部通訊，由於當從端週邊設備將資料插入所經乙太網封包內的相應位置時，邏輯位址的映射是透過 EtherCAT 從端控制器 (ESC) 中的 FMMU 產生，而非在主機端處理產生，所以主機作業的複雜性得以降低，並進一步減輕了 CPU 的負擔，可釋出更多系統資源。由此可知，EtherCAT Master 端完全在主機 CPU 中採用軟體方式實現，只需使用一般的 NIC 卡或整合於主機板上的乙太網 MAC 設備即可。

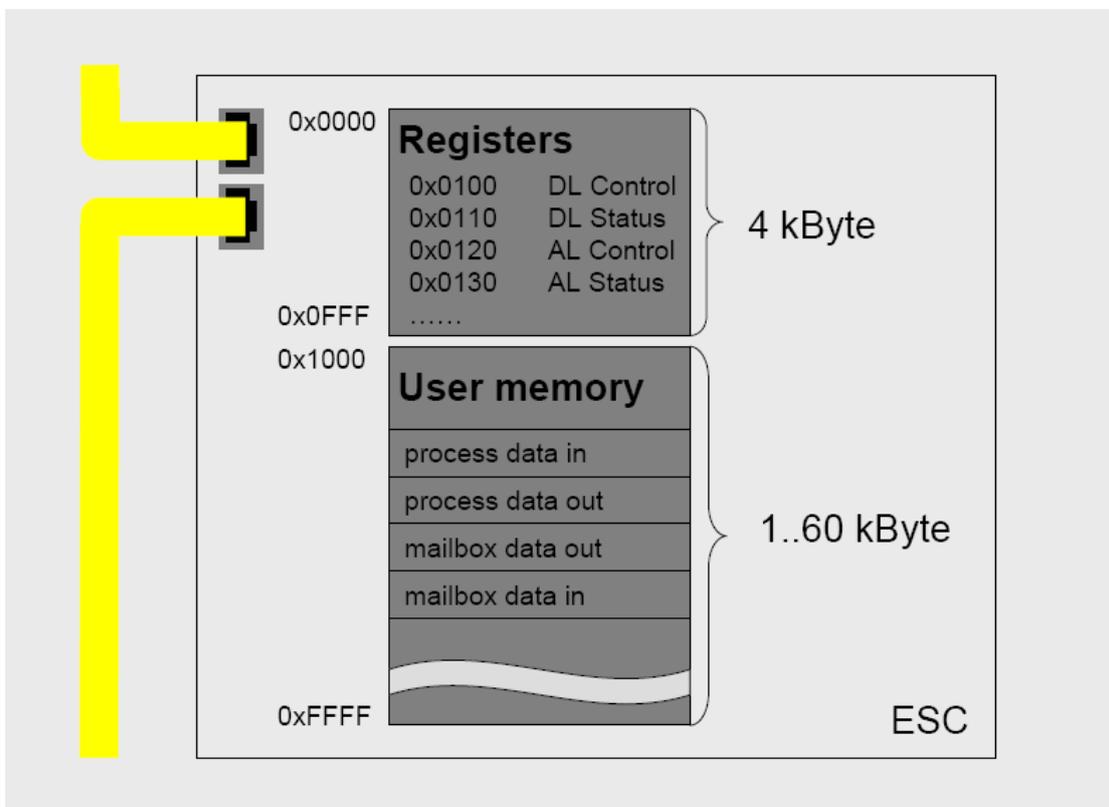
另一方面，EtherCAT 從端控制器 (ESC) 則使用專屬之控制晶片，可透過 ASIC 或成本低廉的 FPGA 實現，以硬體方式利用專用晶片處理過程資料協定，並提供最佳的即時性能。EtherCAT 最多可以連接 65535 個從端節點，依其組成通常可分為不含處理器，僅需要從端控制器自身 I/O 資源即可實現，以及內含處理器用以執行具體應用程式，完成 EtherCAT 應用層功能等兩種從端硬體設備(圖十九)。

從端控制器內部擁有最大 64kByte 的區域位址空間，並區分為供內部暫存器與 DRAM (Dual Ported RAM) 使用 (圖二十)。其中前 4k Byte (0x0000-0x0FFF) 作為暫存器空間，其餘後面的 60kByte (0x1000 開始) 則供 DRAM 做資料交換使用。從端控制器提供 SPI、8/16 Bit 並列微處理器介面 ( $\mu$ Controller Interface) 以及 32Bit 的並列數位 I/O 等幾種 PDI (Process Data Interface) 介面供應用程式或 I/O 進行對記憶體的存取，從端控制器則借助內部的 SyncManager 來控制記憶體的存取。PDI 介面與主機交換數據資料有兩種形式，一種是交握方式 (Handshake Mode (Mailbox Type))，當一方寫入資料到定義的記憶體時，只有完成最後一個位元組的寫入，另一方才能開始從定義記憶體中讀出數據，且只有在讀出定義記憶體的最後一個位元組數據後，才能再重新寫入資料。另一種是緩衝區方式 (Buffer Mode)，任何一方在任何時間皆可訪問經由此方式所定義的記憶體，並取得最新的數據資料。



圖十九、EtherCAT Slave Structure

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

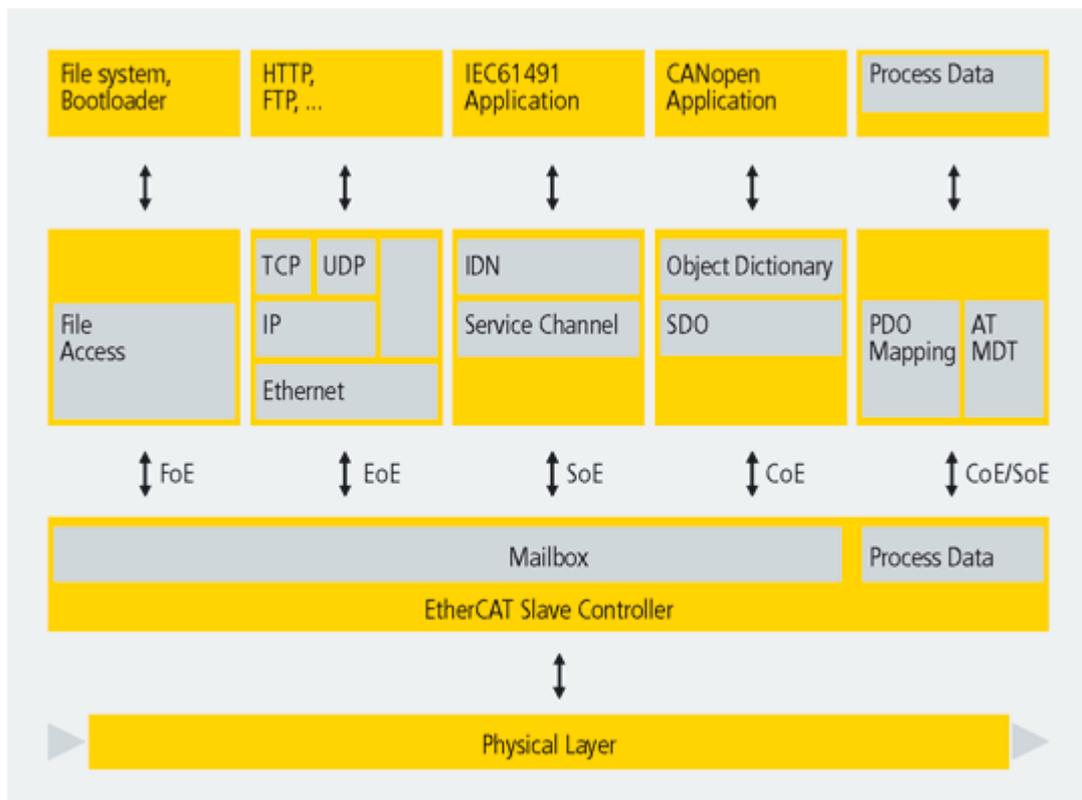


圖二十、Local Address Space of ESC [12]

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

## 開放性與相容性

EtherCAT 另一項特色是不僅完全相容乙太網，且在設計之初便具備良好的開放性特徵，可在相同的物理層網路中包容其他基於乙太網路的服務和協定，EtherCAT 亦整合了 SERCOS (IEC61491)、CANOpen 等相關的協定，將其性能損失降到最小，並讓系統整合上更具彈性，因此使用者無須再重新學習新的協定，只需了解現有 SERCOS、CANOpen 及 TCP/IP 架構即可。此項特性有效協助使用者與設備製造商可容易地完成現有 Fieldbus 技術到 EtherCAT 系統的轉移。



圖二十一、EtherCAT 與多種設備協定 (Device Profiles) 並存架構[9]

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

## 結語

串列式伺服運動控制技術的進步，將使得傳統集中式控制系統逐漸被改採分散式控制架構之系統取代，此項趨勢不僅僅是究因於降低成本的考量，對於可靠度的提高，即時性能的改善，以及更為便利的擴充性與使用彈性等方面皆有大幅度的躍昇，並且在偵錯維修上也將更為容易。

而現今自動化分散式控制紛紛轉向應用 Ethernet 的技術來發展，主要是著重於其高速、成本低廉 (ASIC 晶片約為 5 歐元以下) 以及協定 (TCP/IP) 廣為人知之特性。EtherCAT 技術擁有傑出的通訊能力，接線配置簡單，並對其他協議

開放，性能上則突破傳統 Fieldbus 的限制，達到了新的技術標準—可於 30 $\mu$ s 內更新 1000 組分散式 I/O 資料的優異性能，最大化地利用了乙太網路所提供的巨大頻寬，是一種即時性能優越且成本低廉的網路技術。因此，未來在工業及自動化控制領域上，將是跨入結合分散式串列伺服控制與 Ethernet 技術所發展的即時通訊網路蔚成主流之時代。

## 參考文獻

- [1] 江瑞民，”以SERCOS網路為基礎之多軸控制系統的規劃與分析”，碩士論文，國立交通大學控制工程研究所，民國81年6月
- [2] 謝政昌，高性能即時網路運動控制器之研製，碩士論文，國立交通大學電機與控制工程研究所，民國88年6月
- [3] 陳柏菁，以即時網路為基礎的運動控制技術之研究，碩士論文，國立交通大學電機與控制工程研究所，民國88年6月
- [4] 黃怡日敦，”PC-Based SSCNET 運動控制系統與發展趨勢”，機械工業，pp. 247-253，民國92年9月
- [5] “PROFIBUS工業網路介紹”，電子工程專輯，民國96年12月
- [6] PROFINET Technology and Application System Description
- [7] <http://www.autooo.net/autooo/gongyeyitaiwang/jishu/2007-09-19/14537.html>
- [8] <http://www.synqnet.org>
- [9] EtherCAT技術協會, EtherCAT Technology Group(ETG), <http://www.ethercat.org>
- [10] IEEE 802.3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications
- [11] EtherCAT Introduction, <http://www.ethercat.org>
- [12] EtherCAT Communication Specification, <http://www.ethercat.org>
- [13] IEEE 1588-2002: IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control System