

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以分散式控制系統為基礎之智慧型元件網路

## Smart Device Networks for Distributed Control Systems

計畫編號：NSC 88-2212-E-009-035

執行期間：87年8月1日至88年7月31日

主持人：成維華教授 (whc@cc.nctu.edu.tw)

執行單位：國立交通大學機械工程學系

### 一、中(英)文摘要

分散式系統的概念與技術已普遍應用於產業界的各層面，在製造與控制領域，以分散式控制系統為基礎之元件網路技術具有低佈線成本、高速資訊傳遞及容易設定維護等優點，是未來的應用趨勢。本計畫主要的研究內容，即在針對元件網路的訊息處理與傳輸機制進行可靠性的分析，探討元件網路的智慧型管理，並設計智慧型元件的架構模型與開發環境，試圖為元件網路加入更高的智慧。本計畫提出同時以靜態與動態的方式分析訊息傳遞效能的評估模型，以及一兼具一般性、擴充能力及應用便利性的智慧型元件設計架構，配合整合性嵌入式系統開發環境與小型實驗用元件網路，發展原型次系統並進行相關的測試。

關鍵詞：智慧型元件、元件網路、分散式控制系統

### Abstract

Industries had already broadly applied concept and technologies of distributed systems. With regard to manufacturing and control, device networks technology based on distributed control system has advantages of low-cost wiring, high-speed data passing, and convenient configuring and maintenance. It's a trend to utilize this technology. The main idea of this project is to bring certain intelligence into device networks by means of analyzing the reliability and performance of message passing as well as constructing a design framework for smart field devices. This project addresses an extended model to

analyze the reliability and performance concerning both effects of static and dynamic evaluations. The proposed framework for designing smart field devices fulfills the demands of generality, expandability and convenience of application. Utilizing the constituted development environment for embedded systems, this project prototypes smart device subsystems while implementing software and firmware resources. Some preliminary testing has been taken, and further experiments will proceed.

**Keywords:** Smart Device, Device Networks, Distributed Control System

### 二、計畫緣由與目的

現今的製造系統為因應多變的產品設計，以及更高效率的生產效能與顧客的嚴苛品質要求，在系統的複雜度及規模大小上不斷增加。於是，製造控制系統中不斷增加的 I/O 接點、感測器與控制元件，大幅提高系統配線及各元件間架線的工程複雜與困難程度，而後續的系統診斷、誤失偵測與維護保養更是不易實施。為達成前述的目標，生產工廠必須花費不少額外的成本，去設計、購置與維護他們的製造控制系統[1]。

於是新的控制網路技術不停地被發展出來，以解決傳統 PLC 控制所面臨的嚴重瓶頸。這些新的控制網路技術或匯流排技術(Bus Technologies)的首要目標，即在有效地減少控制系統的網路架線複雜程度，相對地儘可能增加系統架構的變化彈性，以因應各式各樣應用的挑戰。其中 Fieldbus 技術的應用，大幅簡化了控制系統的架線工程，更促使較低階的或元件層次(Device

Level) 的分散式控制系統(Distributed Control Systems)能夠在生產製造系統上實現[3]。在生產製造系統中，當匯流排所連接處理的受控元件，不是複雜多功能的儀器設備，而是具單一或特定功能之元件或儀器時，這種匯流排網路與控制系統可以歸類為元件網路(Device Networks)[4]。元件層次的 Fieldbus 或元件網路，特別適合與分散式控制系統互相整合，且十分符合實際生產製造系統的需求。

由於科技的進步，元件網路所連接的元件，不僅具備特定的感測或驅動功能，更能視需要回報自己的狀態，或要求其它元件的服務[5]；這類智慧型元件所構成的網路，則稱為智慧型元件網路(Smart Device Networks)。智慧型元件網路上，隨時都有大量的訊息在上面流動，可能是控制器正與某些元件在溝通，也可能是兩個元件在互換資料，如何有效率且迅速地處理這些訊息，而同時能保持其即時性與可靠度，是急待加以解決的重要課題[6]。

本計劃的目的，即在對於智慧型元件網路上，如何處理大量即時訊息(Real-Time Events)的問題，進行研究；研究的結果將應用於控制器上，設計具有處理智慧型元件即時訊息能力的智慧型管理軟體。而在元件端，負責處理智慧型元件與元件網路間訊息交換及處理的智慧型訊息中介單元，也是研究的主要重點之一。為了驗證理論與研究的可行性，一個智慧型 DeviceNet 介面次系統亦將被實作出來。而有關於智慧型元件網路處理訊息的能力與效率，以及即時性的相關問題，將經過實驗以做進一步的分析與探討。

### 三、研究方法

#### (一) 背景

智慧型元件網路的發展，是根植於近年來匯流排技術的成熟建立。因此，對於智慧型元件網路的研究，必須從相關的 Fieldbus 與匯流排技術開始進行。

匯流排相關技術的發展，是由產業界的各個公司視不同應用的需求，自行於早期

匯流排標準之上開發具額外功能與規格的產品，或甚至制定新的匯流排規格與相關的產品，逐漸形成所謂的業界標準(de facto Standard)[7]。為了節省計劃的資源投入與限制，本計劃必須縮小研究的範圍，擇定一個業界標準為主要的研究載具。雖然如此，本計劃研究的成果並不因而受到影響，喪失其完整性。

要選定一個業界標準來當研究載具，首先必須考慮個別匯流排技術，其系統開放的程度、相關資訊的取得容易，更重要的是相關零件的來源不虞匱乏，且研發的成本降低，有更多的研究力量會加入，相關技術才有未來發展的前景[8]。DeviceNet 協定架構在開放的 CAN 匯流排協定上，匯流排介面晶片有 4 個國際大廠供應，更有獨立的 ODVA 負責掌管協定的維護及發展，在市場上也漸具決定性的影響力，對開發者更有保障。於是，本計劃擇定以 DeviceNet 協定為主要之研究載具。

#### (二) CAN 匯流排協定與 DeviceNet 協定

DeviceNet 協定是架構於 CAN 匯流排協定之上，而 CAN 協定是個以廣播形式為導向的通訊協定 (Communication Protocol)，其主要為 3 層式的架構[9]，可與國際標準組織(International Standard Organization or ISO)所制定的開放系統連接(Open System Interconnection or OSI)標準的 7 層參考模式(Reference Model)相對應[10]。

CAN 協定的實體層(Physical Layer)與 ISO/OSI 的 7 層參考模式中的實體層相當，負責各個節點間實際 Bit 資料的傳輸，以及實體傳輸介質的定義。藉此特性，DeviceNet 的網路結構(或拓樸，Topology)可以非常地複雜。其中網路的實體結構，具有兩股互相分離的雙絞線，一股做為訊號匯流排，另一股則做為電源匯流排，可提供各元件所需的電源。同時在 DeviceNet 網路上，節點的增加或移除無須中斷網路的電源供應，所以系統的停機時間可以減到最低，甚至例行或緊急的檢修動作，都能夠在線上(Up-Time)執行。

CAN 協定的物件層(Object Layer)及傳

輸層(Transfer Layer)，提供了 ISO/OSI 的 7 層參考模式中網路層(Network Layer)及資料鏈結層(Data Link Layer)所有的功能及服務，如訊框格式(Framing Format)、錯誤偵測與更正、鏈結管理及定義存取方法等。且 CAN 協定使用一種唯一、非破壞性的資料碰撞仲裁機制(Bitwise Arbitration Scheme)，是以 Bit 為單位而同時發送與傾聽的做法，一定會有 1 個發送者能成功送出資料，不會有重送資料而損害傳送速率的情況發生。實務上，CAN 協定由特定的系統晶片負責執行，Intel、Motorola、Philips 及 Siemens 均有提供。

DeviceNet 協定[11]實際是在 CAN 協定上再架構一層應用層(Application Layer)，相對於 ISO/OSI 參考模式的第 7 層(應用層)。在應用層中，定義了一種物件模型(Object Model)，以配合節點的使用。一個節點在邏輯上是許多物件(Objects)的集合，各個物件則提供網路控制元件中特定部份或單元的抽象表示(Abstract Representation)。這種物件模型提供了處理各物件(即元件中特定部份)屬性資料(Attributes or Data)的預定方法及程序，可以方便地參照使用。而一個 DeviceNet 網路僅可以包含至多 64 個節點位址或 MAC IDs(Media Access Control Identifiers)

由於 DeviceNet 匯流排上訊息傳遞的機制，是結合連接碼與資料而廣播於網路之中。為了避免匯流排中充斥太多的訊息而無法消化，影響到網路頻寬的使用效率，可以利用生產者－消費者的機制(Producer-Consumer Mechanism)獲取最高的效率。這種訊息傳遞是以狀態改變法(Change-of-State Method)的方式完成，可以在最短的時間內完成，而且能夠以一對多的方式傳遞訊息給多個特定或不特定的元件。

### (三) 網路效能的評估

對於元件網路的管理程式而言，如果可以針對所有的元件訊息做一整體的評估，依據不同應用的需求調整各訊息的狀態，則架構其上之分散式控制系統，將能達到最適的控制效率及系統性能。

智慧型的元件網路管理，其關鍵在於能夠正確地評估網路的訊息傳輸效能與狀態。評估的方式可以是靜態(Static)或動態(Dynamic)的運作，其各有不同的特點及應用時機。考量元件網路上訊息傳遞的即時性，優先性較低的元件訊息常會受阻(Blocked)於優先性高的元件訊息，而影響到分散式系統的控制效能。如果在規劃此系統的網路架構時，先行評估其中各元件訊息傳遞的即時性以及整體效能，並據以設計與調整各訊息的參數，而達到系統即時性的要求，此為靜態或離線(Offline)評估的方式。

考慮一元件網路上，某節點須以周期性的方式發送訊息。此元件訊息  $m$  在網路上的傳遞時序可以數個參數來表示，其中  $T_m$  表示訊息發送的周期時間， $J_m$  是指節點(內部)準備訊息妥當所需時間的最大可能變動量， $C_m$  是訊息在網路媒體上的傳遞時間， $W_m$  則為此訊息由備妥到可以送出至網路媒體所等待的時間[12]。於是自節點欲發送元件訊息  $m$ ，至目的節點接收完畢的時間  $R_m$  可表示為

$$R_m = J_m + W_m + C_m。$$

上式中  $J_m$  與  $C_m$  的重要性不高， $W_m$  是影響元件訊息  $m$  傳輸即時性的主要因素，又可以表示為

$$W_m = B_m + \sum_{\forall j < hp(m)} \left[ \frac{W_m + J_j + \tau_{bit}}{T_j} \right] C_j。$$

其中  $B_m$  是等待優先性比元件訊息  $m$  低的元件訊息完成已開始傳送訊息所花的最長時間，即優先性比元件訊息  $m$  低的元件訊息中長度最長的元件訊息  $k$ ，在網路媒體上的傳遞時間  $C_k$ ；而元件訊息  $j$  則是任一具較高優先性(Higher Priority)於元件訊息  $m$  的訊息； $\tau_{bit}$  是每 1 bit 在網路媒體上的傳遞時間。這個式子中兩側均出現  $W_m$ ，右側是指在元件訊息  $m$  等待的時間裏，優先性較高的元件訊息總共所花費的傳輸時間，而這可由疊代的技巧來求得。

上述的訊息傳遞時序分析，計算出某一元件訊息自節點(內部)開始準備到目的節點接收完畢的時間的最差狀況(Worst Case)。於是網路訊息傳輸效能的靜態評

估，可以事先計算每個訊息的最差(傳輸)狀況，判斷是否符合其即時性的需求，如果不能則調整網路的參數(如工作速度)或者各元件訊息的參數(如發送周期)，以達到分散式系統在控制上的要求。

然而在分散式控制系統或元件網路的實際運作中，可能由於某些原因在不特定的時間發生錯誤的元件訊息傳遞，元件網路具有快速且可靠的錯誤偵測機制來發現這些錯誤的訊息傳遞，而後續的錯誤回復(Error Recovery)必須重新傳送這個元件訊息，於是佔用了額外的網路運作時間。又可能是元件網路上某些節點所傳送的元件訊息，就具有非周期性的特性，會在不預期的時間進行訊息的傳送，並可能對周期性的元件訊息傳遞造成嚴重的影響，而無法符合即時性的需求。因此前述的訊息傳遞時序分析，必須要再將上列的兩項變數考慮進去。錯誤回復的發生須視系統所在的環境而加以估測，在較惡劣的環境中發生的機率愈高，且欲傳送的訊息長度越長亦然。而非周期性元件訊息的發送所造成的影響，則須視實際的系統配置與參數設定加以評估，但可以假設為具一平均傳送周期的元件訊息，列入周期性的訊息傳遞時序分析之中。

錯誤回復與非周期性的元件訊息在靜態的網路效能評估中無法正確地加以計算，但對系統整體即時性的影響卻可能十分巨大，故有必要在線上(Online)進行動態的評估。動態評估的一種方式是針對整體訊息傳遞效能的估測，重點在於量測元件網路訊息負載的容錯(Fault-Tolerating)能力。這是指所有元件訊息佔用網路時間的比率如果越低或維持在一定程度之內，則優先權較低的元件訊息也就愈能夠在時限之內傳送出來。這種整體性的估測並不保證特定元件訊息的即時性，故必須提供另一種動態評估的方式，即個別元件訊息的監控。透過追蹤個別元件訊息的發送，智慧型的網路管理軟體可以在可容忍的時間範圍內要求並取得此元件訊息，避免致命的錯誤發生；然而這種方式可能在短期內，對其它元件訊息的傳遞特性造成不小

的影響，必須事先謹慎評估與設計，應僅針對某些優先權不需太高卻又十分重要的元件訊息。

#### (四) 智慧型元件架構

在分散式控制系統上建構智慧型元件網路，除了網路上傳遞的種種訊息要接受智慧型的管理之外，位於各節點的控制或受控元件(Controlling or/and Controlled Devices)不只要能與在網路其它節點的元件互相交換資料，更要能因應這些資料而作出適當且及時的反應，成為智慧型的元件。對於智慧型元件的架構，除了兼具一般性與彈性，也要考量擴充的能力及應用的便利性，綜合這些特點其實施架構設計如圖 1 所示，包括有三個主要部分，即元件單元(Device Unit)、訊息中介單元(Message Broker Unit)及匯流排介面單元(Bus Interfacing Unit)。

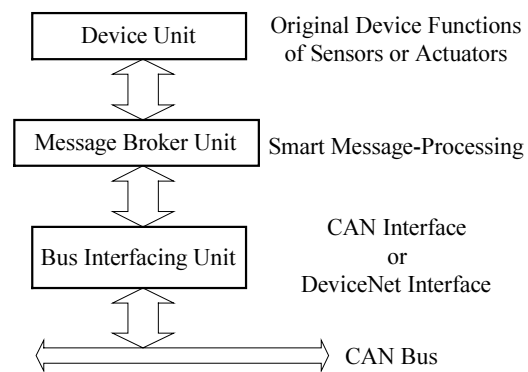


Figure 1. Smart device architecture for device networks.

元件單元具有原來一般感測、驅動元件或設備的功能，把外界的物理量或內部的運算結果轉換為可供讀取的訊號，訊息中介單元接收這些訊號，經特定處理後透過匯流排介面單元，送出元件網路看得懂的、符合一定規格的元件訊息。相反地，匯流排介面單元從元件網路上讀取某個元件訊息，經判斷為本節點元件相關之後，將解讀所得之資料送至訊息中介單元；同樣地，訊息中介單元以特定的方式處理這些資料，視結果把控制訊號通知元件單元，於是其驅動功能將訊號轉換輸出為相當的物理量或送入設備內部作進一步的處理。這個架構的核心即在於訊息中介單元的設計，因為所謂的智慧就表現在其中如

何處理匯流排訊息及感測或驅動訊號的過程，或是如何實行兩端的訊息及訊號的中介交換。

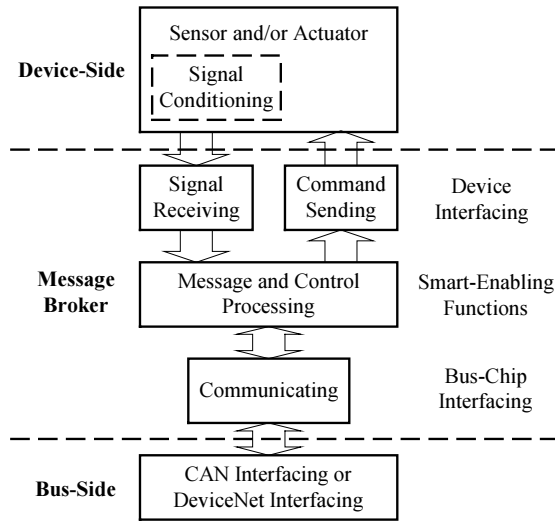


Figure 2. Block diagram of data flow for smart devices.

對於訊息中介單元所主導的訊息交換機制，簡要顯示於圖 2 中並說明於後。在訊息中介單元靠元件端，利用感測訊號接收模組及驅動命令發送模組與元件相接，而實際上包含了實體的介面與韌體的驅動程式(Device Drivers)的互相搭配。這個元件介面(Device Interfacing)部分，是所謂元件相關的(Device Dependent)，需視元件的不同而更換。訊息中介單元的訊息處理模組，則是包含訊息資料的解讀、判斷與控制的處理等遂行智慧功能的模組群，因此具有極高的彈性與智慧能力。第三個部分或匯流排通訊部分，也是元件相關的，與所使用的匯流排協定有關，一但所使用的匯流排協定及控制晶片不同，則訊息中介單元只要更換這個通訊模組即可。

綜觀這個智慧型元件的架構，把控制或受控元件與匯流排網路隔絕及獨立開來，於是如果要使某個元件或設備連接上元件網路，只要定義好元件單元(硬體)的訊號接點，然後抽換訊息中介單元(硬體及韌體)中元件介面的感測訊號接收模組及驅動命令發送模組(韌體)，配合定義好的訊號接點而能處理與元件單元之間的訊號交換即可順利運作。又如果要連接上具另一匯流排協定的元件網路，則更換遵守此匯流排協定的匯流排介面單元(硬體)，然後抽換訊息

中介單元中的匯流排通訊模組(韌體)，此通訊模組能夠配合匯流排介面單元的匯流排協定及控制晶片，經過包裝或解讀而與元件網路互相交換資料。再者，如果此智慧型元件要昇級它的功能，或大幅改變其功能，則只要更換訊息中介單元中的訊息處理模組(韌體)即可。智慧型元件設計的彈性、擴充能力及應用性，此智慧型元件架構都涵蓋了。

#### (五) 智慧型元件網路發展環境

為了驗證前述的理論與設計架構，而且研究相關的開發工具，一個適當的發展環境需要被建構出來。因此本計畫設置了一個實驗用、小規模的 DeviceNet 網路，網路上連結有數具已內建 DeviceNet 協定通訊功能的元件，並以具 PCI 介面的 DeviceNet 掃描卡(Scanner Card)與個人電腦相連，另外亦有一可以很方便地連接上網路去設定各節點參數的 RS-232 模組。而為了從事智慧型元件的早期研發，本計畫也設置了一套嵌入式系統開發環境，其中有具 CAN 匯流排模組與 8051 或 Siemens 微控器的單晶片微電腦基板，並配合週邊開發電路板及程式發展軟體。

#### 四、結論與成果

分散式系統的概念與技術已普遍應用於產業界的各層面，在製造與控制領域，以分散式控制系統為基礎之元件網路技術具有低佈線成本、高速資訊傳遞及容易設定維護等優點，是未來的應用趨勢。本計畫主要的研究內容，即在針對元件網路的訊息處理與傳輸機制進行可靠性的分析，探討元件網路的智慧型管理，並設計智慧型元件的架構模型與開發環境，試圖為元件網路加入更高的智慧。

智慧型元件網路的實施可以分為兩個面向，一是網路上元件訊息的傳遞與處理，一是智慧型元件的設計與開發。對於前者，前人的研究曾提出一個最差狀況的評估模型，但只針對具週期性的元件訊息。本計畫擴充這個模型，另外考慮非週期性發生的元件訊息，包括錯誤回復訊息

及預設即為非週期性發送的訊息。此擴充的模型，是以所謂靜態或離線的方式評估訊息傳遞的效能，並且能夠針對個別的元件訊息進行分析，於是可以應用來先期規劃元件網路上各節點的參數設定。然而非週期性發生的元件訊息不能準確地估測，但又必定會產生，且隨著應用的環境與狀況不同而變化，靜態評估的方式是不足的。因此動態或線上評估的特性需要再加入此模型中，於是利用訊息負載容錯能力的整體性評估及追蹤個別元件訊息的發送，元件網路管理軟體可以具有智慧地處理網路上的訊息傳遞。

而有關此智慧型元件網路管理軟體的實作，應用本計劃設置的嵌入式系統開發環境，已撰寫了部分的程式函式庫，其中包括了 CAN 協定介面及 DeviceNet 物件等，以及訊息傳遞時序分析的邏輯程序，目前能夠在個人電腦端經由掃描卡來運作。

對於智慧型元件的設計與開發，本計畫提出一兼具一般性、擴充能力及應用便利性的實施架構，將智慧型元件的構成分為三個階層性的單元，即元件單元、訊息中介單元及匯流排介面單元。這個實施架構，把控制或受控元件與匯流排網路隔絕及獨立開來，中間透過訊息中介單元來連接，只要配合定義好的訊號介面，無論是更換控制與受控元件，或是需要改變連接的匯流排網路與協定，都能藉由抽換特定的模組或軟體、方便地達成。

而這個架構的實作同樣是在本計劃設置的嵌入式系統開發環境上實施，配合具 CAN 匯流排模組與 8051 微控器的單晶片微電腦基板以及週邊開發電路板，完成 CAN 協定及部分 DeviceNet 協定物件之訊息中介程式，並組合而成 CAN 介面次系統與精簡的 DeviceNet 介面次系統。最後，這個開發版的次系統連結上本計畫設置的小型實驗用 DeviceNet/CAN 網路進行測試，配合同是開發版的網路管理軟體，初步能夠正常的運作；後續更深入的測試將持續地進行，並且擴大實驗用網路的規模，以驗證所提出的理論架構與分析。

## 五、計畫成果自評

項目	綜合評估
研究內容與原計畫相符程度	100% (符合原計畫所提研究內容)
達成預期目標情況	80% (測試階段，部分結果不完整)
研究成果的學術價值	元件網路的基礎研究與設計實作
研究成果的應用價值	部分成果具立即之實用性
是否適合在學術期刊發表	是 (將於近期內投稿)
是否適合申請專利	是 (部分成果將於近期內申請專利)
主要發現或其他有關價值	動靜態兼具的訊息傳遞效能分析及智慧型元件設計架構

## 六、參考文獻

- [1] R. T. McLaughlin, "Control Networks: the Impact on Industry," *Sensor Review*, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 192-193.
- [2] P. L. Schellekens, "A Vision for Intelligent Instrumentation in Process Control," *Control Engineering*, October 1996, pp. 89-94.
- [3] C. Polsonetti, "Device Networks Come in All Flavors," *Control Engineering*, September 1995, pp. 125-130.
- [4] S. F. Frosser and E. D. D. Schmidt, "Smart Sensors for Industrial Applications," *Sensor Review*, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 217-222.
- [5] G. Paula, "Building a Better Fieldbus," *Mechanical Engineering*, June 1997, pp. 90-92.
- [6] A. McFarlane, "Fieldbus Review," *Sensor Review*, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 204-210.
- [7] D. P. Lane, "Sensor Gateway to Fieldbuses," *Sensor Review*, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 211-216.
- [8] Robert Bosch GmbH, *CAN Specification 2.0*, September 1991.
- [9] M. Schwartz, *Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis*, Addison-Wesley, 1987.
- [10] Open DeviceNet Vendor Association, *DeviceNet Specification 2.0*, February 1997.
- [11] K. W. Tindell, H. Hansson, and A. J. Wellings, "Analysing Real-Time Communications: Controller Area Network (CAN)," *Proceedings: Real-Time Systems Symposium*, IEEE Computer Society, 1994, pp. 259-263.