



# 基於 EtherCAT 全數位運動控制技術 於物聯網(IoT)之應用研究

Research on Application of the EtherCAT All - digital Motion Control Technology with Internet of Things (IoT)

周聖鈞<sup>1</sup> 李欣泓<sup>1</sup> 陳響亮<sup>2</sup> 陸品丞<sup>3</sup> 朱玉鳳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部

<sup>2</sup>成功大學 資訊工程學系暨研究所 教授

<sup>3</sup>成功大學 資訊工程學系暨研究所 研究生

## 摘要

隨著物聯網(IoT)時代來臨,工業應用領域也開始整合各種技術而興起新一波工業革命,稱為「工業 4.0」。工業 4.0 當中提倡智慧工廠概念,廠內設備的監控與自動化甚為重要,因此首先必須達到工廠資訊的透明化,經由廠內資訊的交互流通,雲端系統可以即時獲取廠內狀態,整合設備資料與生產訊息,掌握人機物料所有狀況,再經由大數據分析及智慧設備達到自動化控制。但工業自動化控制網路標準繁多,常造成機台設備與雲端系統整合上的困難。

至此,工業技術研究院所開發的 EtherCAT 運動控制平台(EMP),其具有 Real-time 特性之 Ethernet 為基礎,使用者可以透過此平台與 EtherCAT 從站(伺服驅動器、I/O 等)連結,有別於傳統運動控制系統,EMP 不需額外的硬體,只需透過標準網路卡即具備多軸運動控制能力[1]。EMP 直接相容於乙太網路,除整合雲端系統上具有極大優勢外,對於現今生產製造所要求的高即時性亦能兼顧。本文將探討 EMP 在智慧工廠概念中,利用 EMP 易開發且高相容的特性,整合行動化裝置與雲端監控系統,實現 EMP 的行動化應用。

## Abstract

The term "Industry 4.0" refers to the integration of different technologies in industry along with the beginning of the era of Internet-of-Things (IoT). Industry 4.0 enables the concept of "smart factory". Monitoring and automation of cyber-physical systems in the factory are critical. Therefore, factories data should be made transparent through the exchanges of internal knowledge sharing. The cloud system is an internet based computing system that provides shared integrated devices resources and production data to computers and other devices on demand. It can be used to control work efficiency, machine, and material in real-time and achieve automatic control through big data analysis and intelligent devices. However, due to the diversity of automation protocols, the integration between machine and cloud system is difficult. ITRI has developed an EtherCAT Motion Control Platform (EMP) which is based on



real-time Ethernet. Unlike traditional motion control system, user can use EMP to connect with EtherCAT slave which includes servo drive, I/O, etc. The EMP can achieve multiple axes motion control via standard network card.

This paper discusses the implementation of EMP. Cloud monitoring application based on EMP for mobile devices is introduced.

### 關鍵詞

EtherCAT 運動控制平台、無線技術、行動化運動控制平台

### Keywords

EtherCAT Motion control Platform, EMP、Wireless Technology、Mobile Control Platform, MCP

## 前言

現今台灣製造工廠中，現場操作人員必須至機台旁操控使用，受時間與空間的限制，缺乏操控的彈性及行動性。國內外企業為了減少操作人力成本皆已紛紛成立研究團隊進行行動化導入，但在其發展過程面臨企業行動化導入之困難因素，主要於行動化軟體需高度客製化，且缺乏系統整合人員與製造業業者的投入，導致無法於多樣機台上整合固定式操作介面之掌上型自動化系統。

Android 平台之智慧型手機或平板市佔率高於其他行動平台，如應用在工業領域將可大大提升工業生產效率。故本文提出應用 Android 平台之智慧行動裝置[2, 3]，輔以 Google 所提供 Protocol Buffers 作傳輸封包，讓使用者透過智慧行動裝置能在工廠內任一地點達成一對一機台監控。而使用者也可透過智慧行動裝置與機台 Socket Server 建立連接通道，經由該通道進行資料傳輸並取得機台資訊，並利用機台教導功能使用其自行定義之運動控制模組進行機台操作，達到最佳的加工效率。

為了實現廠區內 EMP 機台之行動化運動控制功能，本文將介紹三個主要系統架構，包含 WiFi 連網連線機制建置與加密機制、EMP 行動化運動控制伺服器開發 (mobile control platform server, MCP Server) 與實作 MCP 自訂封包。最後，系統實作提供使用者透過智慧平板裝置對 EMP 機台遠端監控，進行運動控制教導與即時機台資訊派送服務。

## WiFi 連線機制建置與加密機制

### 1. 連網環境建置

使用者藉由無線網路和行動裝置進行機台連線與操控，連接至交換器以有線的方式連接至廠區內的 EMP 系統與機台，表 1 為使用之 WiFi 模組規格。

在連線設定上，將使用路由器的動態主機設定協定(dynamic host configuration protocol, DHCP)功能，提供廠區內區域網路的連線。在 EMP 的連線設定方面，將透過伺服器網卡的 MAC 位置，由路由器之 DHCP Server 指定其靜態 IP 並進行綁定。使用者就可以使用智慧型平板，透過 WiFi



表 1 WiFi 模組規格

項目	WiFi AP
相容標準	IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, IPv4, IPv6
傳輸率	300+433 Mbps
加密類型	64-bit WEP, 128-bit WEP, WPA2-PSK, WPA-PSK, WPA-Enterprise, WPA2-Enterprise
支援通訊協定	IPv4, TCP, UDP, DHCP Client, SNMP, SMTP, HTTP, DNS, RADIUS, RFC2217, WPS
運作頻率	2.4 GHz / 5 GHz

無線網路連線至相對應的機台進行 EMP 的遠端監控。此外 EMP 伺服器以外的連線，將使用 DHCP 的動態分配(dynamic allocation)，自動將 IP 位址指派給登入 TCP/IP 網路的 MCP 使用者。

路由器可支援 64 組靜態 IP，即一台路由器可同時配置 64 台 EMP 伺服器。因此在連線配置上，將主要提供 DHCP 功能的路由器之 IP 位置設為 192.168.1.1，並以有線的方式連接 MCP 資料管理伺服器、Radius Server 與 EMP 伺服器。MCP 資料管理伺服器之 IP 位置設為 192.168.1.2，提供無線網路認證服務的 Radius Server 之 IP 位置設為 192.168.1.3，另外在連線 EMP 上，需透過 Switch 擴充使路由器連線至多台 EMP，EMP 連線的範圍則是 192.168.1.4~192.168.1.67 共 64 台，機台操作人員在進入廠區進行機台操作時，必須使用 MCP 之智慧平板連線至場內之路由器，經由區域網路連接至場內的 EMP 伺服器，廠區無線化之網路連線如圖 1 所示。

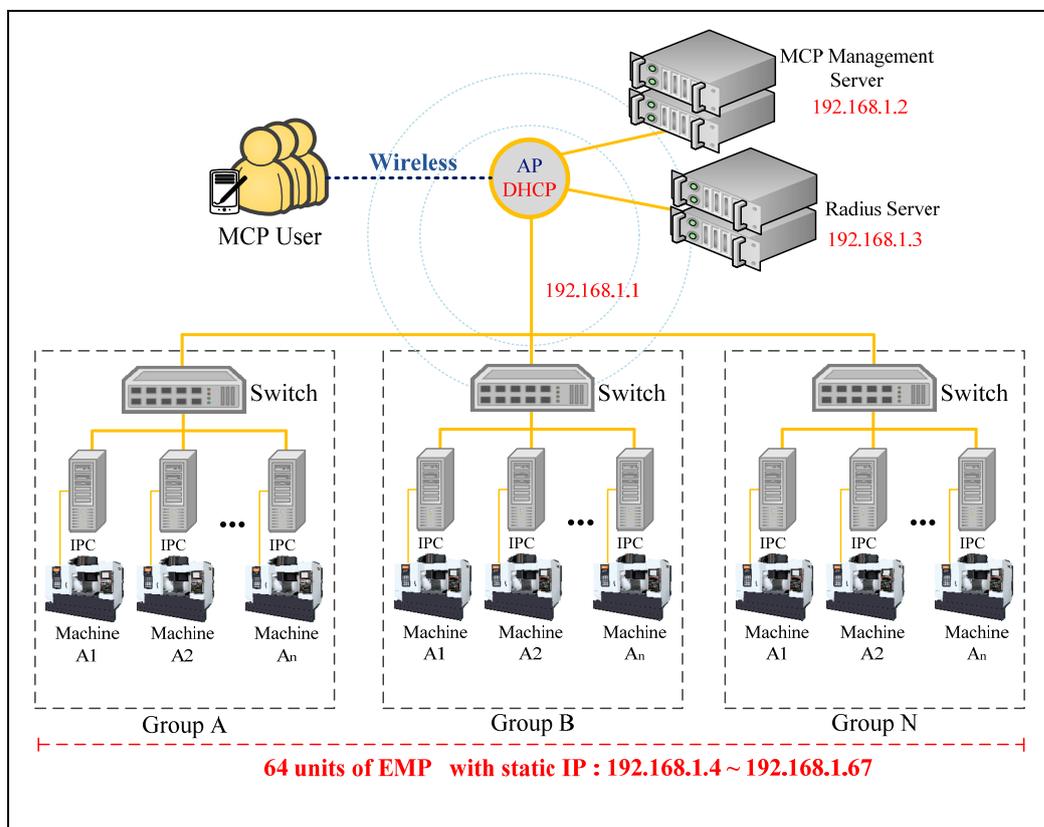


圖 1 廠區無線化之網路連線示意圖



## 2. 無線加密機制

為了提升廠區無線網路的安全性，將採用 WPA2-Enterprise [4]進行廠區資訊的加密，將建置遠端用戶撥入驗證服務伺服器 (remote authentication dial in user RADIUS Server)提供第三方的使用者身分驗證。

RADIUS 伺服器為遠端認證撥接使用者服務，也是目前被廣泛使用的 IETF 標準的 AAA (包含 authentication、authorization 與 accounting)協定，提供網路連接存取的集中驗證(central authentication)以及記錄帳戶資訊(accounting)的功能。RADIUS 協定可以使用一個集中儲存與管理的使用者安全性資料庫，因此讓網路擴充彈性更加容易且安全性亦較高。

在使用者連線的流程中，WiFi AP 會傳送 access-request 訊息給 RADIUS 伺服器，包括了使用者名稱，加密密碼訊息，IP 位址、路由器的 IP 位以及服務類型等資訊，而 RADIUS 伺服器則回應予 access-accept、access-reject 或 access-challenge 三種訊息之一，若完成驗證後，無線路由器還可以送出記錄請求訊息 accounting request，而 RADIUS 伺服器則回應以 accounting response 訊息。

## EMP 行動化運動控制伺服器開發

### 1. 行動運動控制伺服器之功能模組

行動運動控制伺服器的服務主要由 MCP 伺服器所提供，圖 2 為 MCP 伺服器功能模組圖，由下至上分別是運動控制函式庫(MCCL)、管理器(Manager)、行動運動

控制平台服務(MCP Service)，最上層則是 MCP Server 之 UI 介面。Manager 包含 MCCL Manager、File Manager、Msg Manager 和 Mac Param Manager，其中 MCCL Manager 透過 MCCL 運動控制函式庫實作一般運動功能與教導功能；File Manager 提供 MCP Service 工件程式、運動控制、機構參數設定與 MCP 封包解譯和編譯的功能，功能介紹如下：

- MCCL Manager: 透過使用 MCCL 運動控制函式庫，提供一般運動控制與教導模式下之運動控制的功能。
- File Manager: 進行工件程式刪除、輸出與取得工件程式內所有命令的功能。
- Msg Manager: 提供 MCP 封包解譯和編譯的功能。
- MacParam Manager: 提供機構參數設定與讀取機構參數的功能。

在 MCP Service 中，主要由 Command Socket Server 與 status Socket Server 與 MCP 建立連線，依據使用者傳送的封包資訊，透過 Manager 完成 MCP Server 之各項模組，以下將以一般運動控制、運動教導模式、機構參數設定與伺服狀態檢視進行說明。

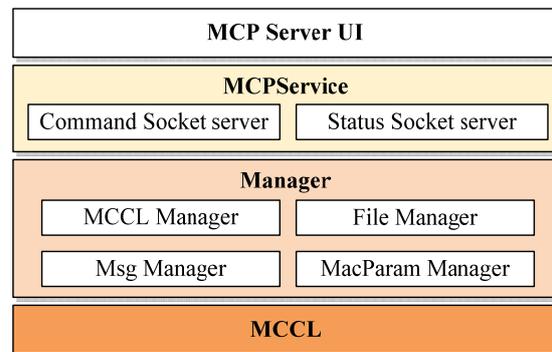


圖 2 MCP 伺服器功能模組圖



### (1) 一般運動控制

在一般運動控制方面，主要實現運動控制函式庫之系統功能、輸出入接點、座標系統、過行程保護、一般運動、任意曲線運動和 JOG 運動的行動化運動控制。使用者經 MCP 發送命令後，將 MCCL 中的指令種類、指令編號與參數設定進行序列化並透過無線傳輸至 MCP Server，透過 MCP Service 之 Command Socket Listener 接收並將封包資訊交由 MCCL Manager 來執行一般運動控制。MCCL 的命令分類依照 IMP Series 中運動控制函式庫參考手冊所定義[5]。在系統執行運動命令前，必須先進行機構的參數設定，包含方向調整參數、馬達最大安全轉速、導螺桿間隙值、齒輪箱減速比及正負方向邊界，再執行 ServOn 啟動伺服，接下來即可經由行動裝置給予運動命令以驅動機台。

### (2) 運動教導模式

在運動教導模組方面，其主要功能可透過行動裝置進行機台運動控制教導，並於機台伺服器端產生工件教導程式，提供使用者記錄控制伺服運動的過程，並可重複部署至其它 EMP 系統上。

在進行教導模式時，MCP Service 會先將使用者所輸入的指令儲存在 Teach Queue 中，其中運動命令以封包的原始位元進行儲存，透過 MCCL Manager 執行運動命令，並記錄每一次運動軸的位置及運動狀態，提供使用者可以回復先前所執行之指令。當教導程式結束時 Teach Queue 將輸出運動指令於 MCP 檔案中。其他使用者透過行動裝置連線至機台時，可以看到教導完之指令檔，當再次執行指令檔時，MCP

Server 會將檔案解析並依序執行 MCCL 函式。此外，當使用者對於 EMP 系統執行教導模式時，MCP Server 便會停止其他使用者對機台有關運動控制的操作，防止教導模式時受到的干擾。本系統開發之教導模式分為以下步驟：

- 使用者可以選擇執行現有的工件程式，或是進行教導模式創建新的工件程式。
- 如果選擇執行工件程式，MCP Service 會透過 File Manager 將工件指令的原始封包從工件程式中讀取出來，並經由 Msg Manager 進行封包的解譯，將指令儲存於 File Queue 中，在透過 MCCL Manager 執行 File Queue 中的運動控制命令；如果使用者進行教導模式，會執行以下步驟：
  - 設置工件程式的檔案名稱及檔案說明，提供其他使用者在進行 EMP 機台操作時，可以清楚知道工件程式之功能。
  - 執行運動控制命令，MCCL Manager 將運動命令儲存於 Teach Queue 中，並記錄運動命令執行前後的伺服位置，提供使用者在刪除指令時回復原有的運動位置。
  - 如果進行指令的刪除，將透過執行 MCCL 直線運動以絕對座標的方式回復各軸原來的位。
  - 結束教導模式，MCP Service 透過 File Manager 將 Teach Queue 中的命令輸出至工件程式，並將建立使用者資訊、工件程式建立時間、工件程式資訊上傳至資料管理伺服器。

### (3) 機構參數設定模式

MCP server 機構參數設定功能的實作



中，EMP 伺服器的機構參數是以 XML 檔案格式的方式儲存於伺服器本機端，提供使用者伺服軸數、方向調整參數、最大安全轉速、pulse、導螺桿間隙值、齒輪箱減速比、正方向邊界與負方向邊界的參數設定，檔案名稱為 MacParams.xml，透過 MacParam Manager 提供讀取機構參數與設定參數的功能。

#### (4) 伺服狀態檢視

當在啟動 MCP Server 後，會啟動 Status Timer 以每秒向 EMP 伺服器發送 MCCL 的 GetCurPos、GetENCValue、EcatGetInput 與 EcatGetOutput 命令以取得運動、編碼與 IO 狀態，為了防止系統無間斷的讀取伺服狀態，StatusTimer 會在每次執行 MCCL 指令前，確認是否有使用者連接特定通訊埠，當有使用者連線時再繼續執行讀取的命令。

## 實作 MCP 自訂封包

由於 Socket 伺服器使用的 C# 程式語言與行動應用端所採用之 Java 程式語言屬不同開發環境，為解決 Socket 封包中資料物件不同，而導致無法解析封包的問題，所以將透過 Google Protocol Buffer 實作 C# 與 Java 平臺間 Socket 封包的資料傳輸，使機台伺服器可經由 TCP/IP 介面與行動運動控制平臺之間進行封包傳送，行動應用程式能擷取機台狀況與進行遠端運動控制之功能，並經由解析封包以執行 MCCL 指令。

### 1. Google Protocol Buffer 介紹

Google Protocol Buffer 類似於 XML、JSON 等資料表示語言，是一種輕便高效的結構化資料儲存格式，可用於結構化資料的序列化，且擁有傳輸速度快與相容性高等特性。另外 Protocol Buffer 的資料是以二進制數據格式進行傳送，需按照一定的語法定義資料結構，針對不同的資料去定義不同的資料型態。由於本系統需要以統一的方式進行封包資料結構在跨平臺上的序列化與反序列化，故選擇 Protocol Buffer 作為封包實作的開發。

在應用 Google Protocol Buffer 時，必須定義 Proto 檔案，在此檔案中需定義封包所需要的資料型態，透過 Protocol Buffer 編譯器，Proto 檔案可產生相對應 Java 與 C# 的程式碼，並在專案中匯入即可以 Protocol Buffer 進行封包的傳送與接收。

### 2. 自訂封包實作

在自定封包的實作上，為了讓傳輸更快更穩定，制定傳輸的封包大小為 586 bytes，Socket 封包資料格式包含 13 bytes 的標頭(header)和 573 bytes Payload (如圖 3 封包格式設計圖)，長度分別為 13 Byte 與 573 Byte。其中在 Header 設置的部分，由於 Protocol Buffer 在資料序列化後會將參數為 0 的屬性進行優化，從封包 byte 陣列中移除而導致 Header 長度不一致，因此每個欄位皆設置一個 NONE 的保留欄位，下面會對封包格式作說明：

1. MessageType: 定義 MCP 封包的功能，其具有 NONE、CMC、SCE、UFC、MCA、MCR、CES、CEE、GM、TM、MP、FC 等 12 種不同資訊類型，各資訊類型

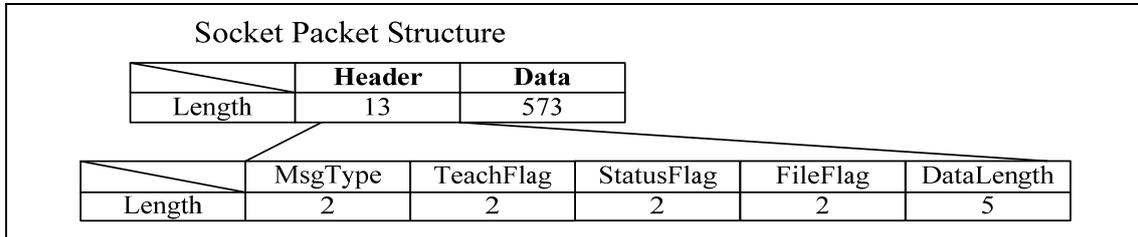


圖 3 封包格式設計圖

表 2 MsgType 內容

MsgType 項目	功能
NONE	保留
CMC	Check machine condition，確認 EMP 運作狀態
SCE	Stop controlling EMP，當使用者結束運動控制時傳送至 MCP Server
UFC	User first connect to MCP Server，當使用者第一次連線機台時傳送
MCA	Motion control - Allow，允許進行機台運動控制
MCR	Motion control - Reject，拒絕進行機台運動控制
CES	Command executed - Succeed，命令執行成功
CEE	Command executed - Error，命令執行錯誤
GM	General Mode，一般運動命令
TM	Teach Mode，教導運動命令
MP	MacParam，參數設置命令
FC	File Command，工件程式命令

分別具有不同的功能，功能如表 2 MsgType 內容所示。

2. TeachFlag：定義教導模式的功能，其具有 NONE、EXECUTE、EXEQUEUE、DEQUEUE、CLEARQUEUE 等 5 種不同資訊類型，各資訊類型分別具有不同的功能，功能如表 3 TeachFlag 內容所示。
3. StatusFlag：定義機構參數設定的功能，其具有 NONE、GETPARAM、SETPARAM 等 4 種不同資訊類型，各資訊類型分別具有不同的功能，功能如表 4 StatusFlag 內容所示。
4. FileFlag：定義工件程式相關操作的功能，其具有 NONE、DELETEFILE、OUTFILE、EXEFILE 等 4 種不同資訊類型，各資訊類型分別具有不同的功能，功能如表 5 FileFlag 內容所示。

表 3 TeachFlag 內容

TeachFlag 項目	功能
NONE	保留
EXECUTE	在教導模式下執行運動控制命令
EXEQUEUE	執行教導佇列裡的命令
DEQUEUE	刪除佇列中的命令
CLEARQUEUE	清除教導佇列

表 4 StatusFlag 內容

StatusFlag 項目	功能
NONE	保留
GETPARAM	取得工件程式列表
SETPARAM	設定機構參數



表 5 FileFlag 內容

FileFlag 項目	功能
NONE	保留
DELETEFILE	刪除工件程式
OUTFILE	建立工件程式
EXEFILE	執行工件程式

MCP 封包 Payload 在 Proto 檔案中參數的定義, 主要分為 MCP command data 和 MCP status data 兩個部分, MCP command data 中用於定義使用者名稱、運動控制命令參數(包含 MCCL 函式類別編號)、工件程式檔案名稱與說明文字與機構參數。MCP status data 為提供機台伺服運動狀態各軸座標位置與編碼器數值。

## 系統實作

### 1. 行動運動控制伺服器

本案行動應用伺服器介面規劃如圖 4 所示, 主要分為伺服器歷史訊息、當前使用者連線資訊、機構參數與伺服運動狀態, 功能如下:

1. 伺服器歷史訊息: 顯示所有的歷史紀錄, 包括伺服器啟動、使用者連線、機構參數更改狀態等資訊。
2. 使用者連線資訊: 提供當前連線至 MCP Server 的使用者資訊, 包括使用者 IP、帳戶名稱與連線時間。
3. 機構參數設定: 提供機構參數設定的功能, 參數數值會與行動應用端同步更新。
4. 伺服運動狀態: 在開啟伺服系統後, 顯示運動機台的運動狀態。

### 2. 行動運動控制平台

行動運動控制平台, 主要分為 MCP 登入畫面、機台選擇、工件程式、教導模式和機構參數設定分別如圖 5 至圖 9 所示。

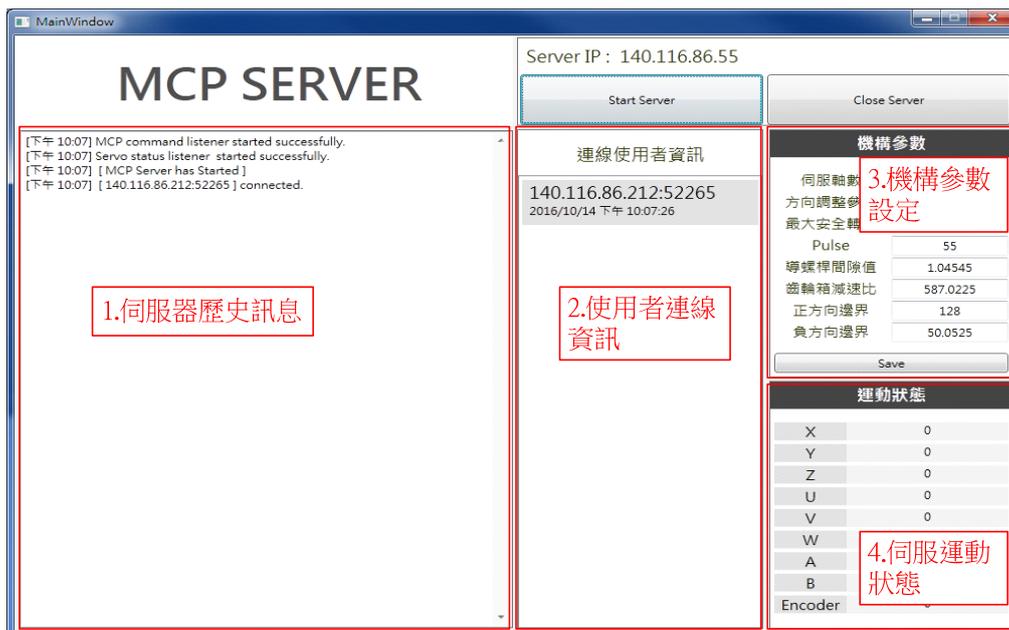


圖 4 行動應用伺服器之機構參數設定頁面



圖 5 MCP 登入畫面



圖 6 機台選擇



圖 7 工件程式



圖 8 教導模式



圖 9 機構參數

## 結論

本文以 EMP 之行動化運動控制架構設計與軟硬體系統為主要目標，成果如下所述：

1. 以 WiFi 無線網路技術進行多 EMP 伺服器連線與規劃，以 DHCP 的功能透過無線 AP 分配虛擬 IP 至已連接的 EMP 伺服器，能同時控制多台機台，讓使用者藉由本系統所開發 MCP 系統，即可連線至相對應的機台，進行運動控制教導的功能。
2. 架構 MCP 資料管理伺服器，供機台操作人員於系統登入時的使用者認證、機台資訊更新、工件程式管理服務的功能，其中雲端資料中心包含製造廠區資訊、EMP 機台資訊、使用者資料、EMP 使用者操作紀錄、錯誤資訊紀錄與工件程式資訊。
3. 開發智慧平板之行動化運動控制系統功能模組，實現 EMP 遠端操控之功能，透過 Socket 通訊機制與 MCP Server 進行連線，實現主動、即時、穩定與可靠之預警資訊派送服務。

隨著 EtherCAT 運動控制技術的進步，

在便利的擴充性與使用彈性等方面皆有大幅度提升，並且在偵錯維修上也將更為容易。期許本技術的開發，能推動並提升國內相關產業技術。

## 誌謝

感謝工業技術研究院機械與系統研究所(計畫代號 G353C91230)的支持，使本論文得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] 許明景，“工業控制網路及其在 Windows 平臺上的發展與應用”，電機月刊，114 期，183-195 頁，2000 年 06 月。
- [2] Ma, Li, Li Ma, Y. Zhou, K. Liao, S. Liu, J. Qiao, Z. Han, and J. Wang, “Design and implementation of controlling pc wirelessly by android mobile based on C/S mode,” *International Journal of Control and Automation*, vol. 7, no. 7, pp. 157-166, 2014.
- [3] H. Kang, D. Kim, J. Kang, K. Kim, “Real-time motion control on android platform,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 72, pp. 196-213, 2016.
- [4] 陳響亮、王欣如、陳韻堯，“基於 Wi-Fi 之無線化廠區雲端機台遠端監控平臺設計”，2013 台灣網際網路研討會(TANET'2013)，台中市，台灣，2013 年 10 月。
- [5] 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。