

運動控制器的完整方案

陳英敏

一、前言

知名的市場調查與分析的 ARC 公司於 2002 年公開之資料顯示：2006 年全球泛用運動控制市場為 55 億美元(不含伺服馬達及驅動器)，爾後 5 年的年成長率預估為 5.7%，2011 年預估達 78 億美元。其中約 60%是屬於 PC-Based 型。

市場如此龐大，其實一點也不令人訝異，因為各行各業之各式各樣機械之自動化機能所需之最核心的技術永遠跳脫不了運動控制與 I/O 控制的範疇，也就是說主宰機械的控制系統乃是由運動控制與 I/O 控制系統所組成。而 PC 則由於其蓬勃的發展，快速的進步及可靠性之提升而逐漸能擔當起工業控制器的嚴苛角色，其豐富的資源、龐大的使用者群眾及網路接軌能力更將促使 PC-Based 工業控制器成為未來工業控制器之主流。

控制器屬於機械的關鍵零組件，以目前國產機械的控制器市場來說，多半受控於國外廠商的掌握，沒有議價的能力與談判空間，不但造成產品成本的居高不下，喪失產品競爭力，對於新機器功能的研發也有所限制難以突破。有鑑於此工研院機械所不斷的致力於控制器領域的開發與研究，尤其是在運動控制、I/O 控制的領域。從整合運動控制及 I/O 控制之**專用 IC(EPCIO)**的開發、持續推出**EPCIO 系列 PC-Based 運動控制卡**以及**EPCIO Series 運動控制核心軟體**，從上到下，已為 PC-Based 運動控制器之開發者提供了完整方案。

二、超級運動控制專用 IC—EPCIO

由於機械所曾經推出第一代的運動控制 IC 與另一顆 I/O 控制的 IC，也廣泛的在市場上應用，因此在累積多年的經驗之下，加上國內近年來 IC 半導體業的製程能力的進步，使得更強大的功能得以實現在同一顆 IC 裡，導致第二代的 EPCIO ASIC 功能更為齊備度，其設計更符合市場需求及顧客導向。其中 EPCIO 一別以往開發的第一代 IC 僅單獨具有運動控制或 I/O 控制的功能，它是進一步的將運動控制(或位置控制)及 I/O 控制整合於一個晶片內。以 I/O 部份為例，除了原有數位式之 I/O 之外，同時增加類比式 I/O 功能；邏輯閘(GATE)也由一萬提昇至十二萬個；具有六軸控制的功能，數位 I/O 的控制

能力也增加至 800 點。其整體的功能性與整合度均較前一代的 IC 大幅躍進許多，可說晉升至另一階段之技術水準了。第一代與第二代運動控制專用 IC 功能比較表如圖 1 所示。

The Comparison between 1st and 2nd generation motion control ASIC



ASIC



Package	68-pin PLCC	160-pin QFP
Gate counts	10K	120K
Open/Close Loop	1	6
Encoder I/F	1 (24 bits)	9 (32 bits)
ADC I/F	--	8 (12 bits 解析度)
DAC I/F	--	8 (16 bits 解析度)
Digital I/O	--	28 local+768 remote(省配線型)
Interval Timer	--	Built-in
Watch-Dog Timer	--	Built-in
ISA Bus Interface	--	Built-in
Command Buffer	1	64
Control Registers (16bits)	12(R)+12 (W)	114 (R)+182 (W)

圖 1:第一代與第二代運動控制專用 IC 比較表

※EPCIO 有超高整合的特色：

- 內建 ISA-bus 界面
- 六軸伺服馬達開迴路（或閉迴路）同動控制
- 九軸編碼器輸入
- 八組數位轉類比（DAC）界面
- 八組類比轉數位（ADC）界面
- 28 點的近端數位輸出入點
- 768 點的遠端數位輸出入點
- 24Bits 計時器及 16Bits 看門狗計時器

由於 EPCIO 具備強大的功能及超高整合度，幾乎百分之九十五以上的單機控制只需要一顆 EPCIO 就可滿足，如此一來大大的減少了控制器當中使用 PCB 板的數量，不但可使得控制器的硬體體積縮小，亦可以降低成本，增加穩定度與可靠度。以三軸 CNC 車銑床控制器為例，利用 EPCIO 所構成的控制器成本比第一代 IC 所構成的控制器成本減少三分之一，若為五軸 WIRE-CUT 控制器的話，則成本降至二分之一以下。

※此外，EPCIO ASIC 另外具備四項超級強大的獨創性功能：

(1) 超級強大的中斷功能

爲了立即反應控制器內外特定事件之發生，EPCIO 總共擁有多達 83 個 Interrupt 來源，中斷條件可由使用者依應用狀況作彈性設定後，EPCIO ASIC 會隨時監督比較這些中斷條件，一旦條件符合，立即發出中斷信號，這些動作完全由硬體自動執行，因此絕對具即時性。這麼多的中斷功能是全球運動控制專用 IC 所僅見，大幅地減輕使用者花在監督特定事件是否發生之負擔。

中斷來源包括：

- 9-ch Encoder with Compare Interrupt (馬達實際位置比較)
- 9-ch Encoder with Index Interrupt
- 8-ch ADC with Voltage Compare Interrupt(類比輸入電壓比較)
- 1-ADC Tag Channel Interrupt(類比輸入特定頻道轉換完成)
- 1-ADC Finish One Cycle Interrupt
- 6-axis DDA with FIFO(minimum stock) Interrupt (細運動命令,FMC, 預存器存量不足之中斷)
- 1-DDA Cycle Time Interrupt(線性細插值循環中斷)
- 6-axis PCL with Overflow Interrupt
- 7-point Local Digital Inputs(近端中斷型輸入點) Interrupt
- 8-point Double-Function Digital Inputs(近端多功能中斷型輸入點) Interrupt
- 24-point Remote Inputs(遠端中斷型輸入點) Interrupts
- 2-Remote Transfer Error Interrupt
- 1-ch Timer Interrupt

(2) 超級強大的Latch及Trigger功能

● 9-ch Encoders Counter Latch by 15 Interrupt trigger

9個Encoders Counter 隨時記錄馬達的最新位置，當特定事件發生時，馬達的所在位置是很重要的資料，EPCIO ASIC提供15種可以設定的特定事件的觸發條件並隨時監督比較這些觸發條件，一旦條件符合，立即鎖住Encoders Counter之讀值於特定的記錄器，這些動作完全由硬體自動執行，因此絕對具即時性。

觸發條件包括:9-ch Encoder Index

2-ch ADC Compare(類比輸入電壓比較)

2-point Local Digital Input (近端輸入點)

2-point Remote Input (遠端輸入點)

● 8-ch DAC Pre-Loading Voltage can Auto Output by 32 Interrupt Trigger

8個通道的 DAC皆可以預先設定一個電壓值 (-10伏~+10伏)，當上述32種特定事件的觸發條件發生時，DAC立即自動將預先設定電壓值輸出以驅動周邊裝置作立即反應，這些動作完全由硬體自動執行，因此絕對具即時性。

觸發條件包括:8-ch Encoder Compare(馬達實際位置比較)

8-ch ADC Compare(類比輸入電壓比較)

8-point Local Digital Input (近端輸入點)

8-point Remote Input (遠端輸入點)

(3) 省配線式高速I/O

傳統的I/O配線是每一個I/O裝置皆需2條線與控制器連接，想像800個I/O裝置的控制系統，其配線之複雜度，線材之成本，龐大線路造成之可靠性降低以及未來查線維護之困難度。機械所因此自創一套”主從式高速串列I/O傳輸機制”，以6條8心之電纜取代1600條電線，有效克服上述缺點。實驗顯示〔使用編號 E146924 AWM 2464 VW-1 80C 300V 24AWG LL101096 CSA AWM A/B I/II 80C 300V FT1 24AWG GEI TAI 符合安規且具有隔離網的RS232專用之9芯傳輸線〕：

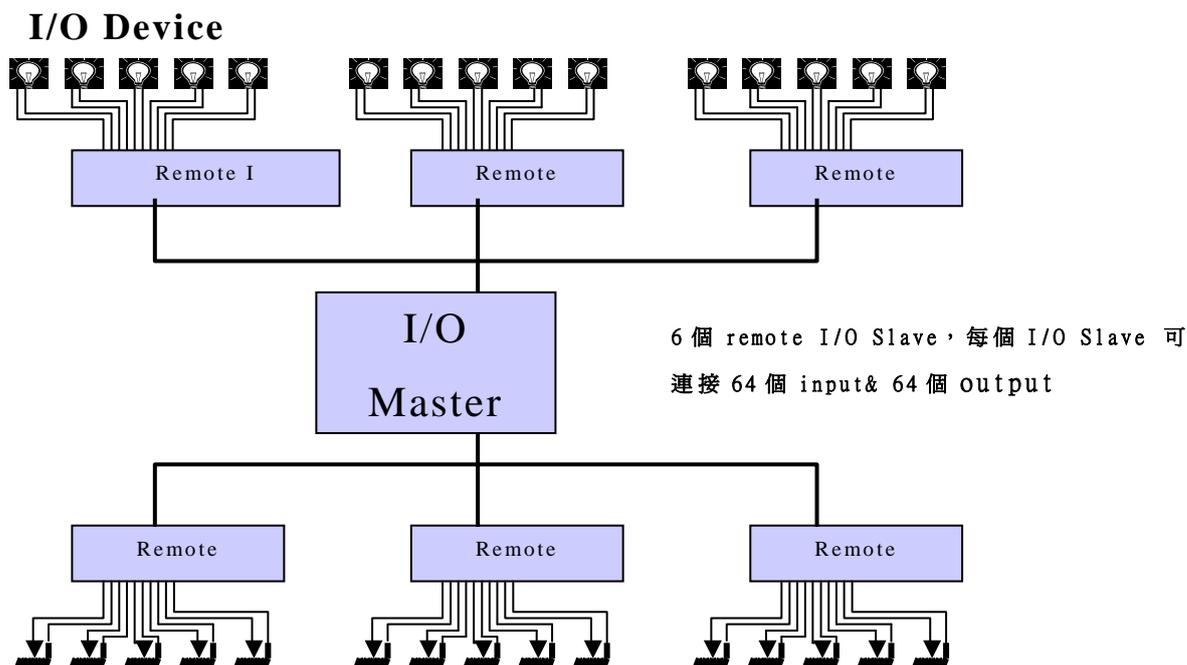
(a)當測試線長 100 m 之最大傳輸率 為650 k clock rate, 換算為Data Update Rate 約150 us 可更新64I/64O 資料一次

(b)測試線長 15 m 之最大傳輸率 為3.4 M clock rate, 換算為Data Update Rate 約30 us 可更新64I/64O 資料一次

(c)測試線長 1.5 m 之最大傳輸率 為4 M clock rate, 換算為Data Update Rate 約25 us 可更新64I/64O 資料一次

主從式高速串列I/O傳輸架構圖如下：

Serial Linked I/O Connection



(4) 細運動命令(Fine Movement Command, FMC)預存器(FMC FIFO)

因為視窗軟體(Windows)是一個多工的作業系統，不能像單工的 DOS 作業系統一樣保證良好的即時性能，但 Windows 作業系統因為其他很多優點，勢必成為未來 PC-Based 控制器之主流。為顧及運動控制過程之即時性能，特別為每一軸設計一個細運動命令預存器(FMC FIFO)在 EPCIO ASIC 內部，每個命令預存器可以儲存多達 64 筆細運動命令(FMC)，以每筆 FMC 需要 5ms 之執行時間來估計，64 筆 FMC 之執行時間共為 320ms，也就是，由於 FMC FIFO 的加入，對 Windows 作業系統的即時性能之需求由很嚴苛的 5ms 降低到很寬鬆的 320ms，如此，使用者可以很放心的在 Windows 作業系統下開發應用程式。這道理就好像水庫之儲水可舒解下游用戶之缺水危機一樣。

全球市場至今尚未出現過類似 EPCIO 具有上述超高整合度特性及超級強大的獨創性功能之運動控制專用 IC，對國內機械控制業者勢必是一把逐鹿武林之屠龍寶刀。目前已有 10 家業者完成技術授權，將 EPCIO ASIC 引進到各式各樣的工業控制器裡，2003 年使用量約 6000 顆，隨著業者工業控制器之銷售成長，估計未來 5 年之使用量都會以倍數成長。

三、EPCIO 系列 PC-Based 運動控制卡

爲了降低使用者所需之技術門檻，縮短使用者開發時程，工研院機械所更以 EPCIO ASIC 爲核心，開發一系列 PC-Based 運動控制卡以及 EPCIO Series 運動控制核心軟體。使用者更方便了，只要將 EPCIO 運動控制卡插入 PC，就可以立刻寫應用程式，使用者並不需深入了解控制卡之複雜電路，也不需深入了解運動控制理論中複雜的軌跡規劃、定位控制、即時多工環境、坐標轉換等幕後作業，使用者只要了解此核心軟體之功能並正確呼叫即可快速實現複雜的、高難度的運動控制功能。目前工研院機械所發展 EPCIO 系列 PC-Based 運動控制卡包括：

- EPCIO-405 (ISA bus 四軸定位控制卡，脈衝輸出型)
- EPCIO-400 (ISA bus 四軸定位控制卡，全功能型)
- EPCIO-605 (ISA bus 六軸定位控制卡，脈衝輸出型)
- EPCIO-601 (ISA bus 六軸定位控制卡，全功能型)
- EPCIO-4005 (PCI bus 四軸定位控制卡，脈衝輸出型)
- EPCIO-4000 (PCI bus 四軸定位控制卡，全功能型)
- EPCIO-6005 (PCI bus 六軸定位控制卡，脈衝輸出型)
- EPCIO-6000 (PCI bus 六軸定位控制卡，全功能型)
- EDIO-800 (800 點 I/O master card)
- EDIO-S001 (I/O slave card ，64 點 Sink type Input/64 點 Source type Output)
- EDIO-S003 (I/O slave card ，64 點 Input/64 點 Output，每 8 點一組，可任意安排成 Source type 或 Sink type)

詳情請參閱 <http://www.epcio.com.tw>

四、EPCIO Series 核心軟體

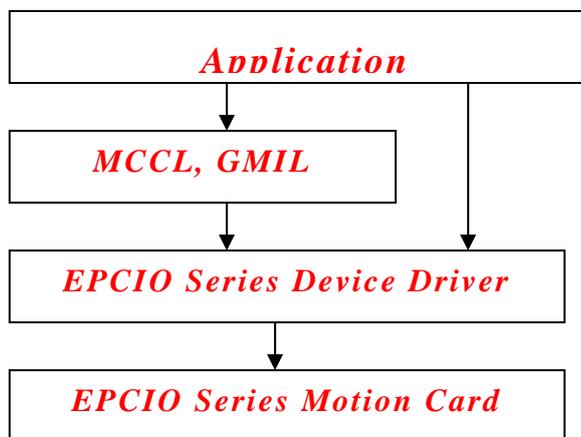
EPCIO Series 核心軟體可支援全系列 **EPCIO Series** 運動控制卡完成精密複雜的運動控制功能，目前共提供了下列三種函式庫：

- (1)**EPCIO Series** 驅動程式函式庫(EPCIO Device Driver Library,EDDL)
- (2)**EPCIO Series** 運動控制函式庫(Motion Control Command Library, MCCL)
- (3)**EPCIO Series** GM 碼解譯函式庫(GM Code Interpreter Library, GMIL)

這三個函式庫皆支援 DOS、WINDOWS 95/98 與 WINDOWS NT/2000/XP 等作業平台。

應用程式設計者可依實際需求合併使用這三個函式庫，也就是除了可以使用運動控制函式庫(MCCL)或 GM 碼解譯函式庫(GMIL)完成所需的運動軌跡控制外，也可以使用驅動程式函式庫(EDDL)直接讀取硬體資訊或設定硬體組態。

下圖為使用者開發應用程式時與各函式庫間的相互關係。



EPCIO Series 核心軟體可以在下列之各種作業系統及各種開發環境下使用，應用程式設計者可依實際需求或習慣彈性選擇

■ 可使用之作業系統

- ✓ DOS
- ✓ WINDOWS 95
- ✓ WINDOWS 98
- ✓ WINDOWS NT
- ✓ WINDOWS 2000/XP

■ 可使用之開發環境

- ✓ Borland C++ (DOS)
- ✓ Visual C++ (VC++)
- ✓ Visual Basic (VB)
- ✓ Borland C++ Builder (BCB)

(1) 驅動程式函式庫(EDDL)

EPCIO Series 驅動程式函式庫(EPCIO Device Driver Library, EDDL)可用來驅動利用 EPCIO ASIC 所設計開發的 ISA-Bus 界面之運動控制卡，包括 EPCIO-400、EPCIO-405、EPCIO-601、EPCIO-605 運動控制卡，亦可用來驅動 PCI-Bus 界面的運動控制卡，包括 EPCIO-4000、EPCIO-4005、EPCIO-6000、EPCIO-6005 運動控制卡。

依功能的不同，提供約 160 個功能強大的函式，大分類如下：

▲Bus Interface	運動控制卡基址，中斷及重致功能設定
▲DDA Control Interface	脈波輸出控制
▲EncoderCounter Interface	編碼器控制
▲Local I/O Control Interface	近端輸出入接點控制
▲Remote Digital I/O Interface	遠端輸出入接點控制
▲ADC Control Interface	類比轉數位輸入控制
▲PCL Control Interface	硬體位置閉迴路設定
▲DAC Control Interface	數位轉類比輸出控制

EPCIO Device Driver 是最貼近運動控制卡硬體及 EPCIO ASIC 之函式庫，其執行將直接改變硬體及 EPCIO ASIC 之功能，使用之前應對運動控制卡硬體及 EPCIO ASIC 之功能全盤了解才可，它提供給技術能力高強的使用者呼叫，可直接對運動控制卡硬體及 EPCIO 晶片作更細微更彈性之操作，可創造出不同於標準 MCCL 之獨特性功能。

(2)運動控制函式庫(MCCL)

為滿足廣泛的應用場合，MCCL(Motion Control Command Library)提供約 250 個功能強大的函式，大分類如下：

(1) 機構參數設定

MCCL 利用機構參數及補償參數來定義使用者的機構平台特性；並依此機構參數規劃相對於邏輯原點的座標系統、座標系統邊界值及各軸的最大安全進給速度。

(2) 一般運動控制

MCCL 提供點對點、直線、圓弧(2-D 或 3-D)、圓運動及 3D(Helico-line)的軌跡規劃；並提供運動空跑、原點復歸、運動延遲、單步/脈衝/連續 JOG、運動暫停、棄置、繼續等動作。軌跡規劃可設定不同的加減速時間、加減速曲線(T/S 型)、進給速度、最大速度與最大加速度；另針對系統需求亦可設定軟、硬體過行程保護、連續路徑、動態強制調整速度及錯誤訊息處理。

(3) 定位控制

使用者可利用 MCCL 設定定位比例增益、可接受的定位誤差範圍，MCCL 也提供定位確認、齒輪齒隙、間隙補償等功能。

在計算每一個插值點的動作前也可觸發中斷服務函式，使用者可自訂此函式的執行內容。

(4) 編碼器控制

回授倍率更動、計數值讀取、計數值門鎖(Latch)、index 觸發與比較值觸發功能。

(5) IO 接點訊號處理

使用者可利用 MCCL 讀取 home 接點與 limit switch 接點的訊號，也可輸出 servo on/off 訊號；另外某些特定接點的輸入訊號可觸發中斷服務函式，使用者可自訂此函式的執行內容。

(6) D/A 轉換功能

使用者除了可利用 MCCL 輸出要求的電壓(-10V ~ 10V)外，並可預先規劃輸出的電壓值，並在滿足觸發條件後自動輸出規劃的電壓。

(7) A/D 轉換功能

使用者可利用 MCCL 讀取輸入的電壓值(-5V ~ 5V 或 0V ~ 10V，-10V ~ 10V 或 0V ~ 20V)，並可設定單一 channel 電壓轉換或特定 channel 電壓轉換或全

部 channel 自動循環電壓轉換。而在完成讀取輸入電壓值後自動執行比較動作，當輸入電壓滿足預設之比較條件時，皆可自動觸發中斷服務函式，使用者可自訂此函式的執行內容。

(8) 計時功能

使用者可設定計時器的計時時間，當啟動計時功能並在計時終了時，將觸發使用者自訂的中斷服務函式，並重新開始計時，此過程將持續至關閉此項功能為止。

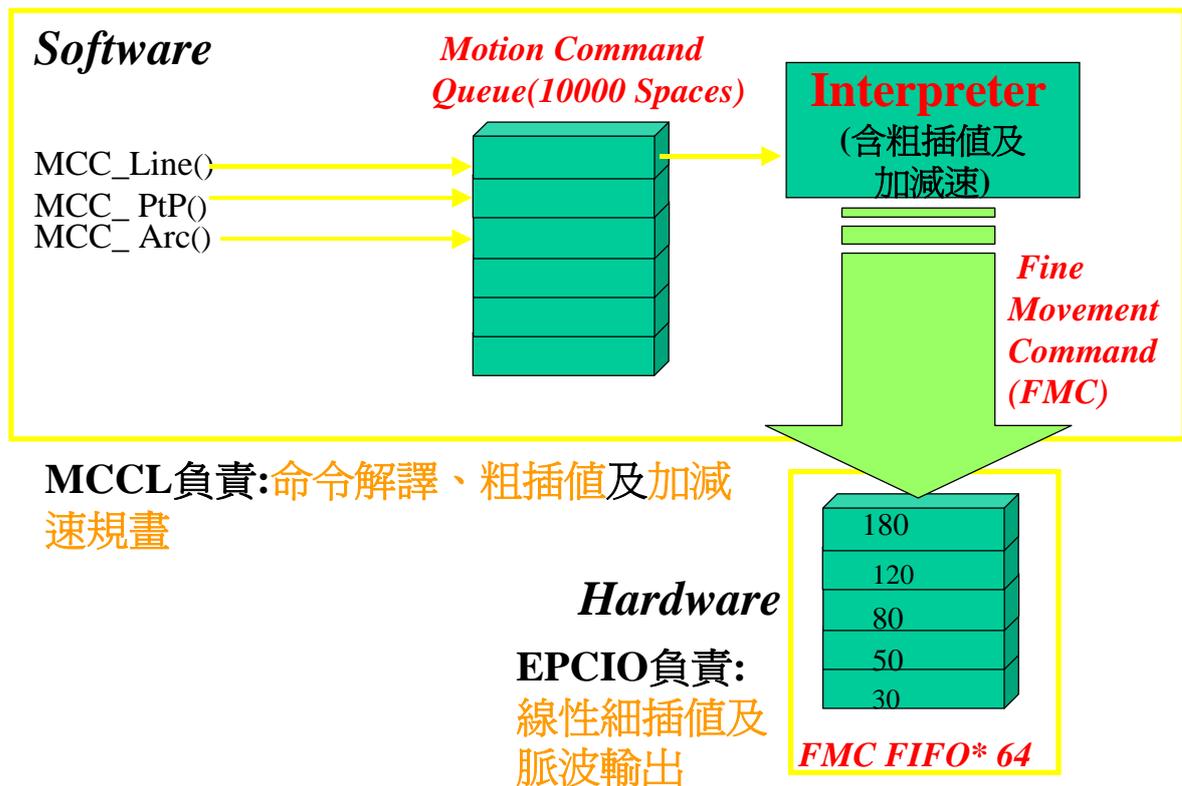
(9) MCCL 也提供 watch dog 的功能。

當 CPU 當機或軟體運作不正常時，watch dog 會自動 RESET 運動控制系統以保護機台安全，並輸出信號，可作提醒或警告操作人員之用。

最重要的是，使用 MCCL 時，使用者並不需深入了解運動控制中複雜的軌跡規劃、定位控制、即時多工環境、坐標轉換等幕後作業，使用者只要了解此函式庫之功能並正確呼叫即可快速開發、整合系統。

有些日本的運動控制IC是把插值運算及加減速功能做死在IC 裡頭，如此作法的優點是應用門檻較低，但因為硬體做死了，只能限制於簡單的應用；爲了使EPCIO能適用於各種高層次的機械控制，特將上述功能細分爲粗插值、加減速及線性細插值。前二者由軟體(MCCL)來達成，EPCIO只作線性細插值及脈波輸出，如此軟硬體相互搭配使得EPCIO不僅能用於簡單應用，對於高精密、高複雜、高彈性的應用案例也可游刃有餘。MCCL是把一個運動命令(Motion Command如:直線、圓弧..等)分解成成千上萬筆對應於各相關軸的細運動命令(Fine Movement Command,FMC)，將這些細運動命令依序填入EPCIO晶片裡各相關軸的FMC FIFO裡(可最多填入 64 筆命令)，EPCIO晶片會自動一筆一筆地提取細運動命令(FMC)，執行線性細插值，最後均勻地在預先設定好的DDA時間內(Interpolation Time)送出細運動命令所規定的脈衝數量。(如下圖所示)

MCCL搭配 EPCIO 卡使運動控制輕而易舉

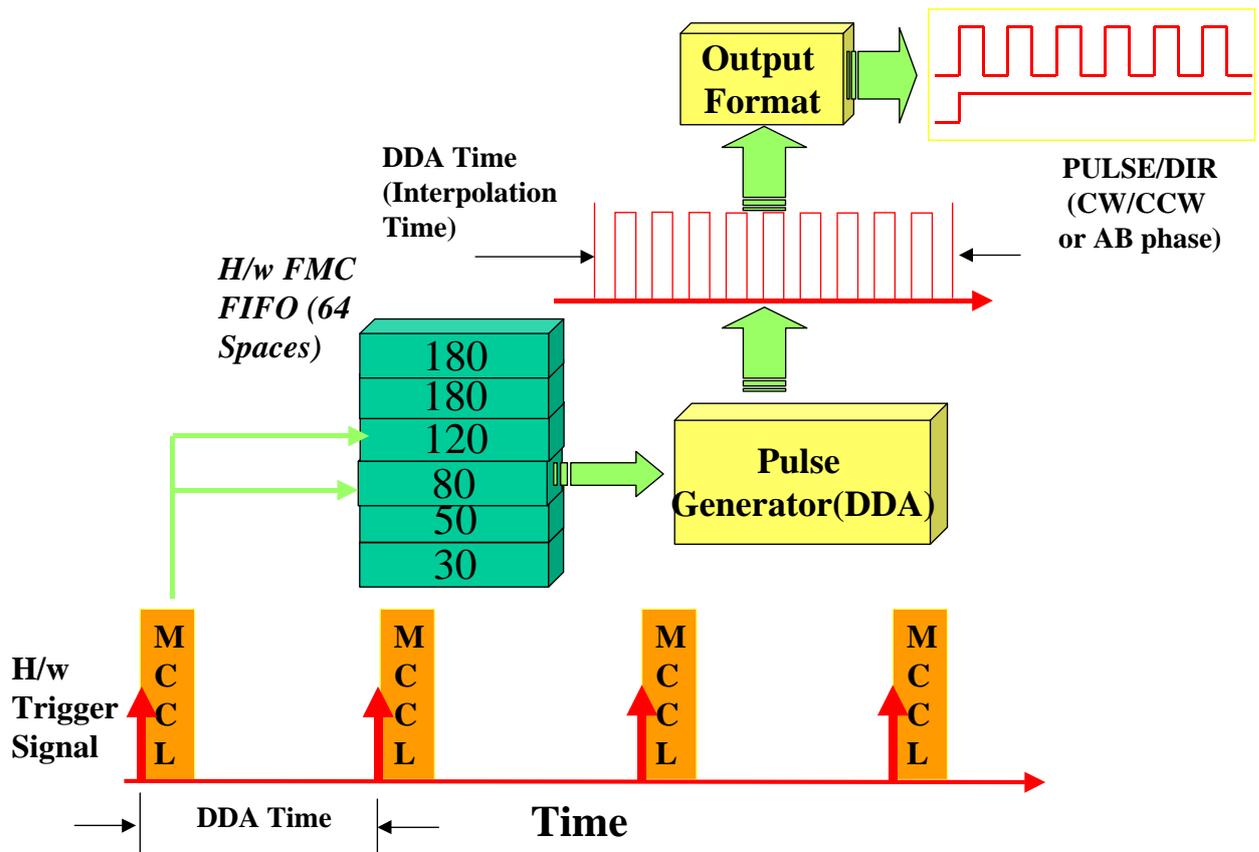


與具備硬體插值及加減速功能之日本運動 IC 相比較，EPCIO 的優點包括：

- 具有較複雜的軌跡規劃功能，例如 3D 圓弧、3D 螺線、電子齒輪、電子凸輪、背隙及齒隙補償功能等。
- 更具彈性的運動控制功能，例如支援更多原點復歸模式與 Limit Switch 碰觸處理機制。
- 更豐富的外界訊號中斷處理機制，包括來自 Timer、Watch Dog、Local I/O、Remote I/O、Encoder 等的訊號。
- EPCIO 可使用在 V Command(位置閉迴路)的系統，並可自行設計控制邏輯。
- 使用者可完全掌握運動命令執行期間的各種資訊，包括目前執行中細運動命令(FMC)的內容與細運動命令(FMC)庫存量，這些資訊提供使用者在設計更複雜系統時的需要(例如 CNC 工具機)。
- 可依實際需要隨時增加或更改軌跡規劃功能

唯一不同的是因運動控制函式庫(MCCL)會佔用少許 CPU 的使用時間(如下圖所示)。目前以 Pentium3, 900Mhz 的 PC 測試結果, 對於一個 6 軸同動馬達群組, MCCL 只花 35us 就能計算出各軸的下一筆細運動命令(FMC), 以此估算, 使用者大約可以放心的使用 MCCL 來控制 12 個馬達群組(共 72 個馬達)而不必擔心 MCCL 佔用 CPU 的時間太長。

脈波輸出機制



MCCL 搭配工研院機械所開發的 EPCIO Series 運動控制卡使用，每個運動控制卡最多可控制六組馬達 (EPCIO-601/605/6000/6005) 或四組馬達 (EPCIO-400/405/4000/4005)；EPCIO Series 運動控制卡可送出電壓命令 (V Command) (僅 EPCIO-601/6000/400/4000) 或是脈衝命令 (P Command) (全系列產品皆可)，基本的結構如圖.2。

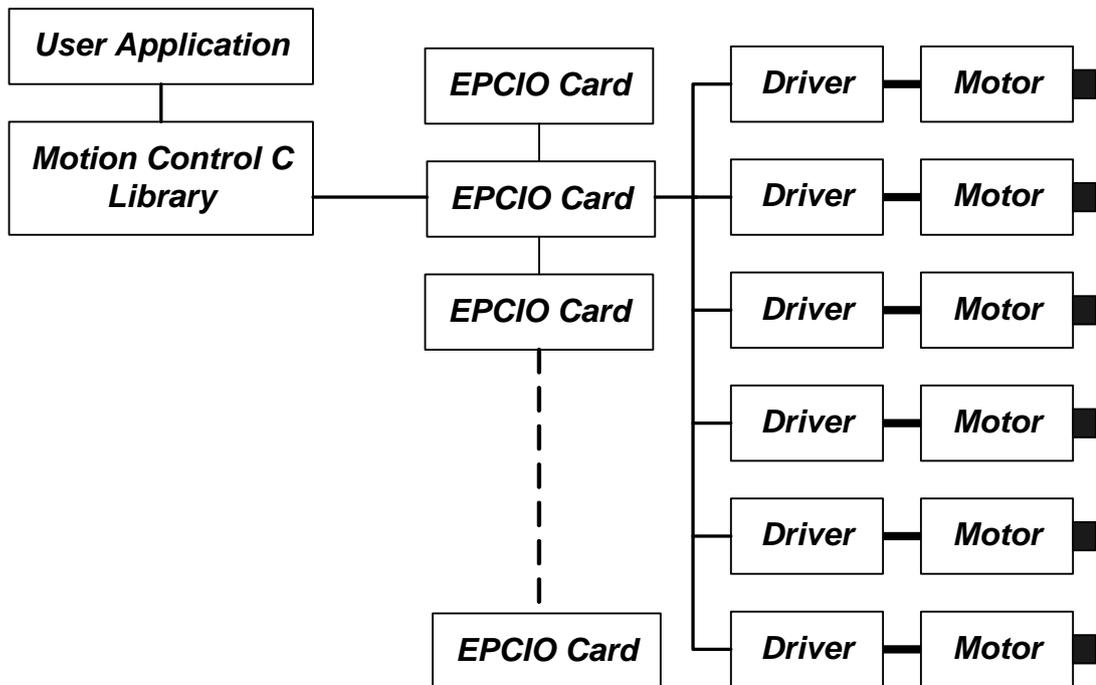


圖.2 MCCL 可支援 12 張 EPCIO 卡

※獨創性的運動群組(motion group)操作概念

此外，針對多軸同動與不同動的不同控制需求，MCCL 更提出獨創性的運動群組(group)操作概念，所提供的函式皆是以 group 為操作對象。每個運動群組(group)皆包含了 X、Y、Z、U、V、W 六軸，每一軸皆可設定為實控軸(該軸之軌跡規劃的結果實際控制同一張 EPCIO Series 運動控制卡上特定 channel 的輸出)或虛控軸(該軸之軌跡規劃的結果並不輸出)。而每張六軸的 EPCIO Series 運動控制卡最多可定義為 1~6 個 group(當定義 1 個 group 時則這個 group 內之每一軸皆可設定為實控軸，但當定義 6 個 group 時則每個 group 內皆只能設定其中一軸為實控軸)，各 group 間相互獨立，並不影響彼此間的運作(這種各軸獨立不同動之運作方式最適合一般產業機器及 IC 產業設備)。但同一 group 內之各軸則皆為同動運作，亦即各軸速度或許不同但一定是同時起動，

同時停止(這種多軸關聯同動之運作方式最適合機器人及 CNC 工具機)。

MCCL 能同時控制 12 張 EPCIO Series 運動控制卡，理論上最多能同時使用 72 個 group。

以圖.3 為例，目前使用了兩個 group 與一張六軸的 EPCIO Series 運動控制卡，其中第 0 個 group 的 X、Y、Z 軸軌跡規劃的結果將分別從第 0 張卡的 0、1、2 個 channel 輸出，並忽略 U、V、W 軸軌跡規劃的結果；第 1 個 group 的 X、Y、Z 軸軌跡規劃的結果將分別從第 0 張卡的 3、4、5 個 channel 輸出，並忽略 U、V、W 軸軌跡規劃的結果。

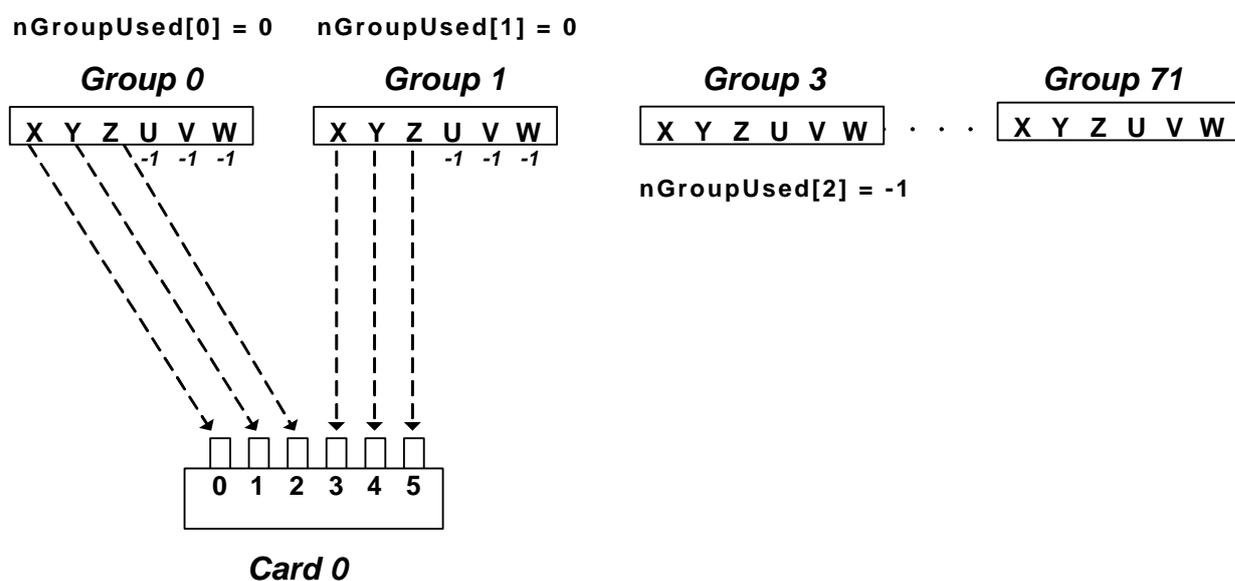


圖.3 Group 參數設定

(3)GM 碼解譯函式庫(GMIL)

GM 碼工件程式解譯函式庫(簡稱 GMIL)使用於 EPCIO Series 運動控制卡，用來解譯與執行 NC 工件程式，GMIL 所支援的程式碼包括 G 碼(40 個)、M 碼(12 個)、F 碼、S 碼及 IO 碼。習慣撰寫 GM 碼 NC 工件程式的使用者，可以透過 GMIL 來控制 CNC 工具機。舊有的 GM 碼 NC 工件程式以及從 CAD/CAM 新產生的 GM 碼 NC 工件程式，同樣也可以透過 GMIL 來控制 CNC 工具機。

五、結語

由於 EPCIO 的彈性很大，可以針對不同機種的特殊需求，做不同的設定，因此並不受限於特定的機種，所應用的領域十分的廣泛、多樣化。再加上軟體設計的搭配，更能切合各機種的功能需求。目前，成功的應用案例包括:線切割放電加工機控制器、黏晶機(Die Bonder)控制器、彈簧機、PCB 板塗錫機、CNC 高速高精度綜合加工中心控制器、拉力測試機、包裝機、全自動光譜檢測機台、智慧型高速點膠機、高爾夫球桿頭焊接機、光纖對光平台(Fiber Alignment System)、機械人控制系統、泛用運動控制器平台、張力控制繞線副機、雙球桿量測平台(球面量測)、自動控制教學實驗平台、精密定位控制實驗平台、CNC 工具機控制器開發、即時影像伺服追蹤控制、倒單擺控制系統、PCB 板塗錫機... 等等，其應用之廣可謂無奇不有，國內機械業者普遍蒙受其利。

我們可以確信 EPCIO 在挾帶低成本、高可靠度、高整合度、低維修的特性之下，與高功能、高彈性的核心軟體精彩搭配，絕對是未來十年運動控制系統不可或缺的重要一環，也將幫助國內機械業者突破現狀、奠定自主技術路線、開創出另一片天空。