

# 智慧型運動控制晶片設計介紹

工業技術研究院 機械所 林家慶

## 關鍵詞

運動控制 Motion Control

智慧型運動控制 IMC (Intelligent motion control)

比例-積分-微分 PID (Proportional-Integral-Differential)

定位控制輸入輸出 EPCIO (Exquisite Positioning Control Inputs and Outputs)

伺服迴路 SERVO LOOP

## 摘要

在運動控制設計上運動命令的產生通常比其他方面的控制系統設計重要。因此發展控制技術的主要目的為使受控系統順應運動命令並完成指定的動作。控制理論由比例-積分-微分控制理論發展到可變結構控制理論、模糊控制理論、類神經網路控制理論以及強健控制理論…等等，目的都是為了使受控體找出最佳的控制方法，目前較為成熟且應用在工業上的方法為比例-積分-微分控制。工研院機械所機電控制整合部已開始著手研發 CPU-Based 為主的運動控制卡以符合廣大的業界需求。

## 英文摘要：

The generation of motion command is usually more important in the design of motion control than that of other control systems. The (development of) control technology allows manipulation of systems to follow assigned motion commands and further to complete orders without movement. The control theory develops from proportion-integral-differential control theory to invariable-structure control theory, fuzzy control theory, nerve-network control theory as well as strong control theory. The goals of the progresses are to optimize controlling conditions. At present, the proportion-integral-differential control is well developed

and is often applied in industry. The intelligent machinery technology mechatronics control department started to begin to research and develop the CPU-Based motion control card primarily to meet the general field demand.

## 前言

運動控制是精密加工機械上關鍵的核心技術，其應用範圍包涵了從定位控制或速度控制的產業機械到高精密度的各類CNC工具機，運動控制系統的建立是必須整合各種軟硬體的技術而成的，對於使用者而言，除了對系統的基本功能要求外、成本高低、系統穩定性、使用頻率、保固服務、與其他軟硬體的擴充性和相容性…等等都是評估運動控制系統的因素。另外在實際運動控制系統的考量上不僅要控制各軸位置，同時也要控制各軸的速度。工業上機台之運行是否能遂行，不僅需要控制理論上的性能評估，還必須考量到機台本身實際特性，所以整個運動控制是一個非常複雜的系統。

在一般工業控制上，機械運動通常建構在馬達運動上，而馬達就好比機械系統上的手跟腳，負責機械儀器的定位、運動的速度等等。所以當馬達控制不好，將直接影響機械定位的不精準而使產品的良率下降，早期爲了實現馬達控制需要將控制電路設計在一塊電路板上，其缺點除了使用的零件數目多外、空間大、可靠性低、成本高。但是隨著PC及半導體產業飛快的進步下，製程技術也日新月異，在不用開ASIC的情況下，也都能使用FPGA(可程式陣列)來實現複雜的電路功能。這將大大的改善以往的缺點，也提高馬達的控制性能。工研院機械所機電控制整合部投入運動控制系統研發已久，根據累積多年的相關經驗充分應用國內PC產業的資源，對於新控制系統的研發都朝向晶片化、微小化為指標。以本部門先前開發的EPCIO運動控制晶片為架構基礎上更進一步的研發出多功能且更符合業界需求IMC（智慧型運動控制卡），本文在介紹運動控制晶片的設計技術及探討國內外控制晶片的差異性。

## 運動控制基本架構原理介紹

一個完整運動控制系統包括由控制器（Controller）、驅動器（Drive）、致動元件（Actuator）、受控體（Plant）、偵測器（Sensor）所形成的閉迴路，圖1所示，運動控制系統通常可針對應用需要設計，以控制受控體的位置、速度、加速度或運動軌跡。控制馬達的轉軸位置即是定位控制的唯一目標，運動控制卡計算從PC端所下達的位置命令，以及由編碼器所回饋的實際位置，經過位置控制器（position controller）的演算與補償後，產生所需要的速度命令並傳給下一級的速度控制迴路（velocity controller）。速度命令通常以電壓的形式

輸出，所以不同的電壓代表著不同的轉速命令，而兩個關係是一個線性的關係。當伺服馬達接受速度命令後，會再與編碼器所回饋的速度命令作耦和，產生所需的電流命令當做下一級電流控制迴路（current controller）的輸入。其間的關係可由圖 2 的典型閉迴路控制系統功能方塊表示。

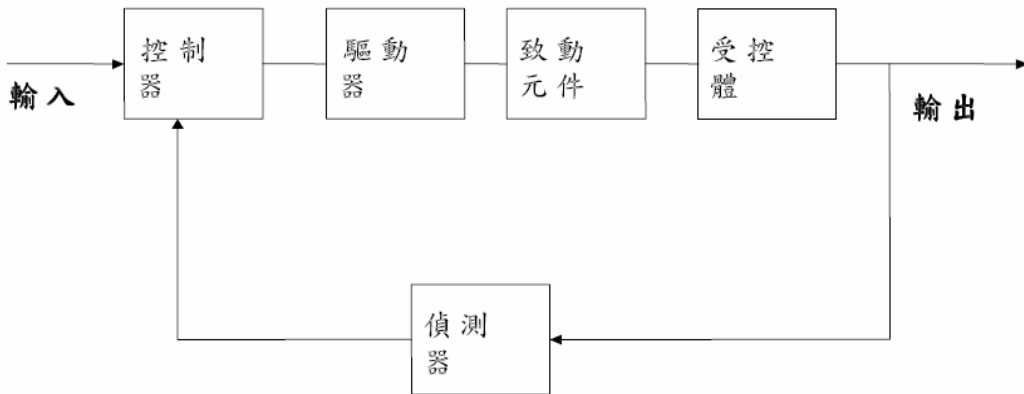


圖 1 閉迴路控制系統方塊圖

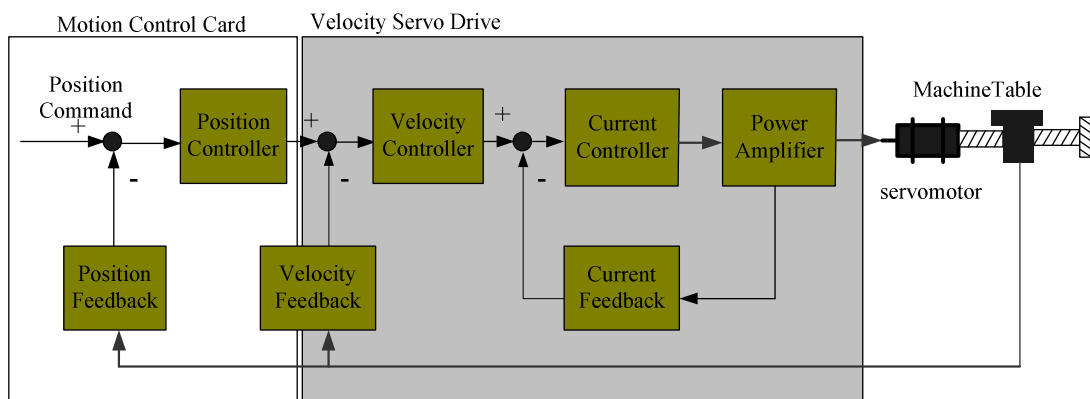


圖 2 典型閉迴路控制系統功能方塊圖

如圖 3 所示是一個典型的閉迴路位置控制系統（close loop position controller）。若要有此控制系統的功能，只要具備有數位轉類比功能（D/A converter）及編碼器回授（encoder feedback）輸入功能的電腦週邊運動控制卡即可。位置控制迴路可以使用 CPU 來運算，CPU 每隔一段時間去讀取編碼器的回授值來獲得馬達實際的位置，並且計算與目標位置的誤差量，經過 PID 控制法做補償計算後，產生相對應的電壓值，再經由數位轉類比（D/A converter）輸出，即可對馬達做轉速和位置的控制。

當目標位置領先馬達實際位置，而且誤差值大時，則產生的正電壓值相對也就大，會使馬達朝向目標值前進，反之，若目標位置落後馬達實際位置，則產生負

電壓使馬達朝向目標值前進。當實際位置等於目標位置時，輸出電壓為零則馬達停止。若採用圖 4 的開迴路控制方式，則 CPU 負責位移脈波量的計算，通常脈波的部份會透過硬體電路來輸出，而位置控制迴路的計算則由馬達驅動器來完成，此時編碼器位置回授只做為監視用途。

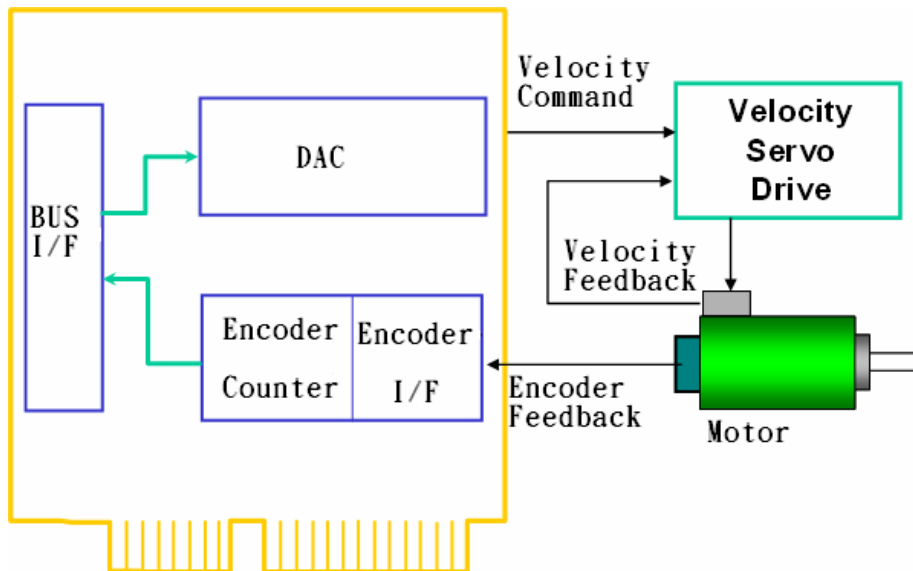


圖 3 閉迴路控制系統圖

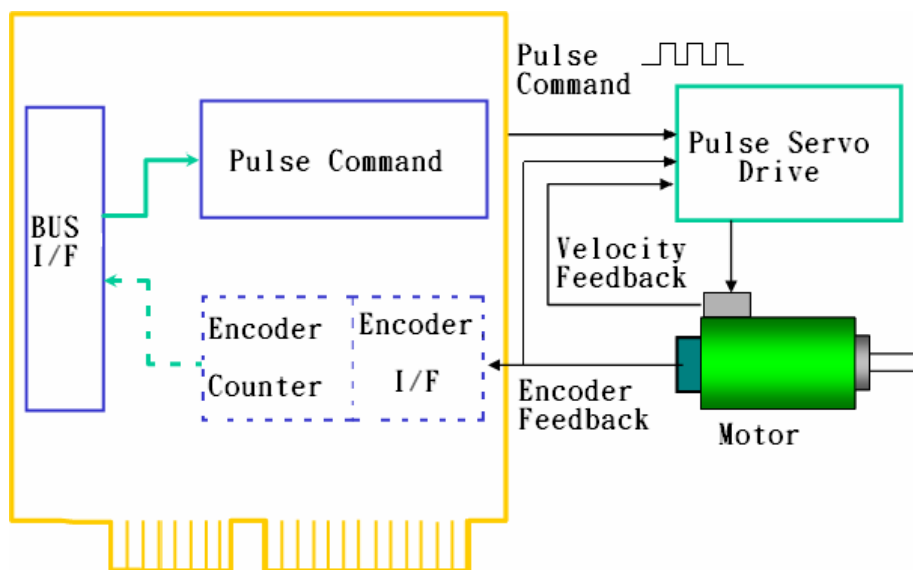


圖 4 開迴路控制系統圖

不管是採用閉迴路控制或是採用開迴路方式，CPU 需提供 1ms 的即時控制能力因此對作業系統都是一個負擔。所以有一部份重複的計算可以交由硬體來做，運動控制晶片就是幫助 CPU 來完成這些重複計算的工作，讓 CPU 可以空出多餘的時間來處理如命令的解譯、軌跡的規劃…等等。

## 控制器基本架構介紹

控制器若以架構來分，目前工業上所見的控制器可以大概分為三種：PLC-Based、PC-Based、以及 CPU-Based 控制器（stand alone 型）。PLC-Based 與 PC-Based 控制器一定得配合運動控制卡。

長期以來，PLC 始終活躍於工業自動化控制領域的主戰場，為各種各樣的自動化控制設備提供了非常可靠的控制應用。其主要原因在於，它能夠為自動化控制應用提供安全可靠和比較完善的解決方案，適合於當前工業企業對自動化應用的需求，但隨著 PC 及網路時代的到來，工業 PC 或 PC-based 控制器由於可以完全融入到網路時代的信息系統中，具有網路系統的基本特性，即具有高性能、低價格、系統開放、豐富的人才基礎等優勢，因此 PC-based 控制器一經出現就具有很強的生命力，發展極為迅猛。有觀點說，PC-based 控制器將取代傳統 PLC-based，當然首先必須解決可靠性及編程問題。近幾年來，這些問題已基本得到解決，PC-based 控制器從外觀到可靠性也都開始可以與 PLC-based 相近。在編程方面，由於 IEC61131-3 編程語言標準的推出和廣泛採用，為 PC-based 控制器的高速發展鋪平了道路。這樣，PC-based 控制器不僅具有 PC 的優勢，也具有傳統 PLC 的優勢。它可無縫地融合到網路時代的信息系統中。

在自動控制領域，PLC-based 技術和 PC-based 技術是當前比較具有代表性的控制技術，兩者的技術起源和發展有較大的差異。PLC(Programmable Logic Controller)產生於上世紀 70 年代初。最早的 PLC 是以替換繼電器系統的角色出現，其主要實現的功能僅僅是邏輯簡單的順序控制功能。PLC 一經出現，就以其高可靠性、小體積和直觀的編程模式而顯示出強大的生命力，成為自動控制領域的「明星」。

PC-based 是一種基於 PC 技術的控制系統。最早的 PC-based 控制系統是以工控機為核心，PC-based 在運算、儲存、和軟體開放性方面具有優勢。PLC-based 和 PC-based 兩者在技術特點上存在明顯區別。PLC 具有體積小、功耗低、抗干擾能力強；具有很高的可靠性，其平均無故障率時間間隔（MTBF）可達 50 萬、甚至 100 萬個小時；具有簡單直觀的編程模式（如梯形圖）。而 PC-based 具有很強大運算能力且具有開放標準的系統平台和 PCI 接口，精美且低成本的顯示技術。但系統的可靠性略差，如性能較好的 IPC 的平均無故障時間間隔約 5 萬小時。PC-based 更多地用於設備運行狀態的監視。相對於 PC-based 而言，PLC-based 具有配置靈活、體積小、適應惡劣環境、抗干擾性強、可靠性高等優點，但在軟體功能及系統開放性等方面比 PC-based 差。當然，隨著計算機技術和控制技術的不斷發展，PLC-based 和 PC-based 都在吸收對方的優點，以適應更多的應用現場。例如，PLC 在包裝設備中的應用遠遠多於 PC-based 在包裝設備中的應用。

隨著 PC-BASED 的工業計算機（簡稱工業 PC，與普通的計算機相比，它具有防塵、防振、抗電磁、耐高低溫等優點）的發展，以工業 PC、I/O 及監控裝置、控制網路組成的 PC-BASED 的自動化系統逐漸成為工業自動化的另一種實現方式。

但是隨著時代的進步，PC-BASED 控制器的潮流愈來愈形蓬勃發展，從最近幾年來的國際性機械展可獲得證實。在 1996 年美國芝加哥「IMTS」以及日本東京「JIMTOF」兩大工具機展中，已可用百家爭鳴來形容。很多人認為具開發性架構 PC-BASED 控制器，未來有可能取代傳統封閉式，專屬性架構的控制器，正如 PC 的浪潮以其排山倒海之勢已逼得傳統電腦巨人日漸式微的先例，如出一轍。

目前傳統產業生產機臺的控制器多半是採用 PLC（可程式化邏輯控制器）配合 Ladder（階梯式語言）所設計的，一般來說這種控制架構有四項特點：

- 一. PLC-BASED 控制器屬於封閉式架構的專屬系統，可選擇性少。
- 二. PLC-BASED 控制器多半採用 Ladder 階梯式語言，當系統小而動作簡單時，確有學習快且程式設計時間短的優點；但是當系統較大或是動作流程複雜時，就會因為 Ladder 語言的特性而不易結構化。
- 三. 人機介面不夠好，除非外購 PLC 專用人機介面模組，否則就只能使用簡單的按鈕（Push Button）或燈號（Light）作為人機介面：
- 四. 最初 PLC-BASED 控制器的誕生就是為了做順序式（Sequence）控制而設計的，因此先天上就比較適合做 I/O 點順序控制，對於馬達運動控制（Motion）或是視覺系統（Vision）等等方面的應用，就會顯得較不適合。這些時候 PC-Base 控制器就非常適合使用了。

然而 PC 個人電腦（或 IPC，工業用個人電腦）僅是一般用途的汎用型電腦，並無控制專用電腦語言，當我們要把它拿來當作機臺/系統控制器時，就只能拿通用型電腦語言來設計（例如 C/C++、BASIC 或 PASCAL 等傳統語言）。PC-BASE 開發式架構是當前控制器發展的主流趨勢，所謂 PC-BASE 仍是利用個人電腦(PC)為基底，開發附加控制介面卡及相關軟體整合而成之系統；常見之 PC-BASE 控制器，其硬體係利用 Pentium CPU 開發而成的工業級電腦(IPC)為主體，配合相關 I\O 板及運動控制板組合而成，軟體則是在 DOS\Window95\NT\CE\Window2000\WindowXP 等操作系統下發展完成，包括人機介面、程序控制及運動控制軟體等。

所謂開放式架構，即是希望達到硬體能隨使用者需要選用、擴充如 I\O 板、軸卡、伺服系統等；軟體方面則能任意追加、整合如加入網路功能、CAD/CAM 等，而這些皆是以往封閉式控制器所無法達成且不夠便利之處，這也是 PC-BASE 為何能逐步被大家重視，成為市場主流的一大關鍵。

PC-Based 控制器應用範圍相當廣，尤其是需要路徑同步的多軸控制，然而工研院本身所研發之 PC-Based 運動控制卡，採用 EPCIO 運動控制晶片配合自行研發的運動控制函式庫（MCCL），並採用 Windows 作業系統。隨著微處理器速度越來越快，使用 FIFO 的 EPCIO 運動控制卡在使用上解決大部分即時性的問題，但若要做到高速度高精度，必須採用即時性的作業系統（RTOS）才是根本的方法。另外，運動控制演算法程式的實現日益龐大、變數眾多與複雜，將佔用太多 CPU 資源，可知傳統的 PC-Based 系統已是越來越不可行，有鑒於此未來的發展 工研院機械所機電控制整合部 已著手開始研發以 CPU-Based 為主的運動控制晶片 IMC

(Intelligent Motion Control) IC。

何為CPU-Based控制器呢？在這裡先大概的簡述其原理，圖5在控制迴路上CAD/CAM 端為PC端，命令進入控制卡後若不需要PC端的微處理器幫助，便稱為CPU-Based，亦即將微處理器整合進入控制IC或控制卡，而形成所謂stand alone的架構，減輕PC端處理器大量運算的負擔，因此PC部分變成可有可無，僅負責下達使用者命令的人機介面，兩者以匯流排(ISA, PCI, Ethernet)做溝通。若干控制卡為了節省PC端的資源將控制卡上添加DSP或CPU，或是讓控制IC具有解譯簡單運動命令的功能都算是此類控制器。

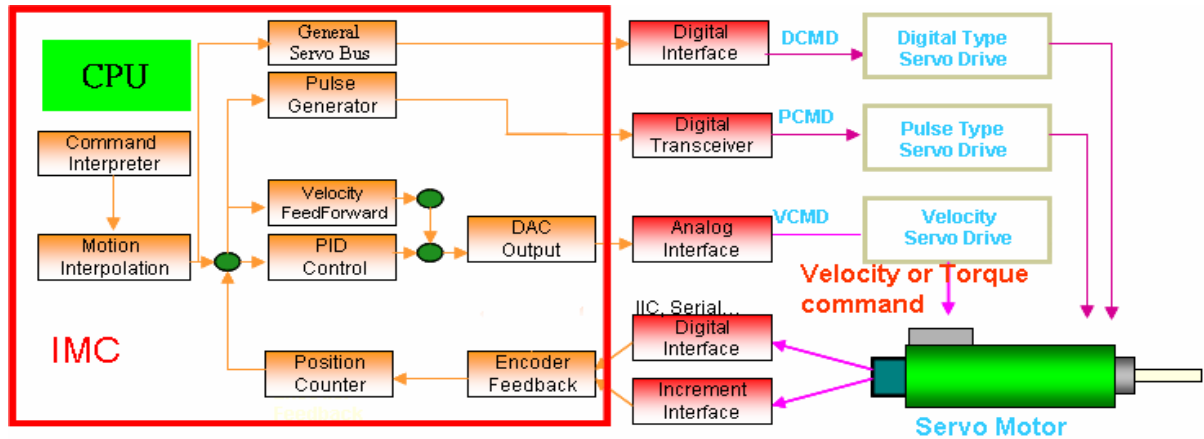


圖 5 IMC 運動控制晶片硬體方塊圖

## 運動控制晶片介紹

IMC運動控制卡為一具有CPU Build-in的運動控制晶片，它內建運動控制所需的機能，除了可單機執行運動控制外，並整合了目前普遍使用的PCI-Bridge橋接器及Ethernet Controller等與外界溝通的介面，可透過PC進行命令下達與監控。

運動控制晶片要處理的工作大概為1. 脈波命令產生器、2. 編碼器回授輸入、3. 位置控制迴路。然而工研院機械所機電控制整合部對於IMC智慧型運動控制卡仍然屬於開發階段，所以運動控制晶片以FPGA進行開發與測試驗證，所選擇FPGA的型號為Virtex-4系列之XC4VFX60-FF672如圖6所示，其中共規劃了10個Banks讓使用者使用，全部共有672 PINS，而可用之I/O PINS有352 PINS，而此顆FPGA內建一顆CPU為PowerPC 405，在運動控制卡上主要功能為運算、命令的解譯、軌跡規劃..等等。

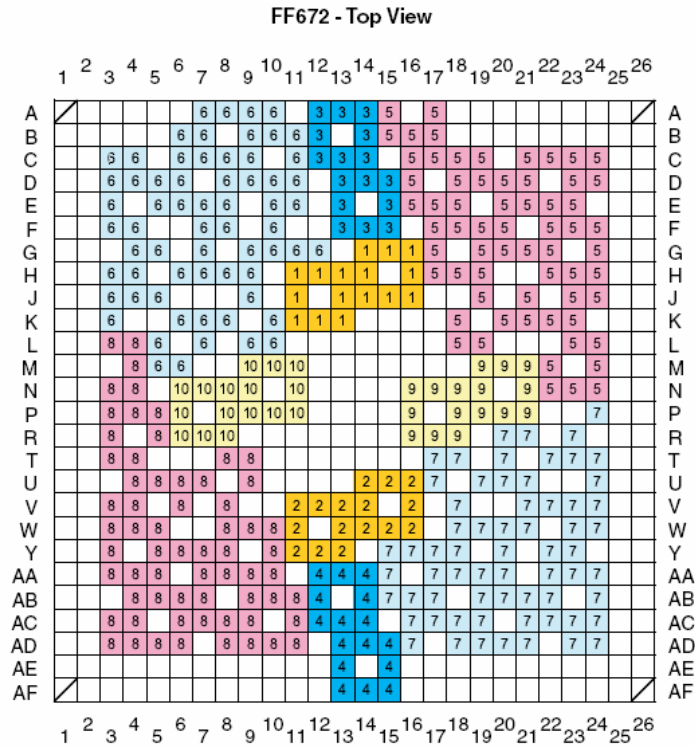


圖 6 XC4VFX60-FF672 Color-Coded SelectIO and Bank Information

在FPGA的設計環境上均IP化，也就是說這些介面都可以在FPGA的整合開發環境中找到並選入專案中。使用者可利用Verilog或VHDL針對專案自行開發設計。接下來將針對目前IMC運動控制卡做進一步的說明，首先先針對控制晶片做說明。

### 1. 脈波命令產生器

由於控制晶片需負責脈波命令的產生，因此必須要有一個脈波命令產生器。此脈波命令產生器負責在單位時間內將所規劃的PULSE量均勻的送出，以下將介紹數位差分分析器 (digital differential analyzer)。如圖7左圖所示為馬達所需運動的軌跡命令圖，CPU在固定的時間內( $\Delta t$ )計算出馬達所需的位移量( $\Delta p$ )，並傳至運動控制卡，運動控制卡接收到如圖7中圖所示，當 $\Delta t$ 越短所計算的軌跡命令越接近目標曲線如圖7右圖所示，然而在不增加CPU的負擔條件下，透過數位差分分析器 (DDA)，可以將命令曲線近逼到目標曲線。

從圖7中圖可以看到DDA Cycle Time (數位差分分析器週期時間)，我們將利用如圖8的方法將脈波在每一個數位差分分析器週期時間均勻的送出，實現步進馬達/伺服馬達定位及控制。以圖8為例如果我們想在192ns內送出3個脈波 (最多)，或送出0個脈波 (最少) 則我們可以看到系統的時脈等於60MHz，所以其系統的時脈時間等於16ns，若時脈除頻器設定為3以及插值時脈解析度設定為2，那我們可以從公式 (1) 可以算得細插值時脈時間等於64ns，再從公式 (2) 推算出插值時間等於192ns，也就是說在插值時間等於192ns會將脈波均勻的送出，所產生的均勻脈波最後會經過解碼器轉換成P/D (Pulse/Direction)，CW/CCW (Clockwise/Counterclockwise) 或A/B的方式輸出，而且每個脈波寬度都近似



50%，在控制步進馬達運轉的時候更為均勻，也讓使用者在參數的設定上更為簡易、方便，利用此方法達到步進馬達或伺服馬達的控制。

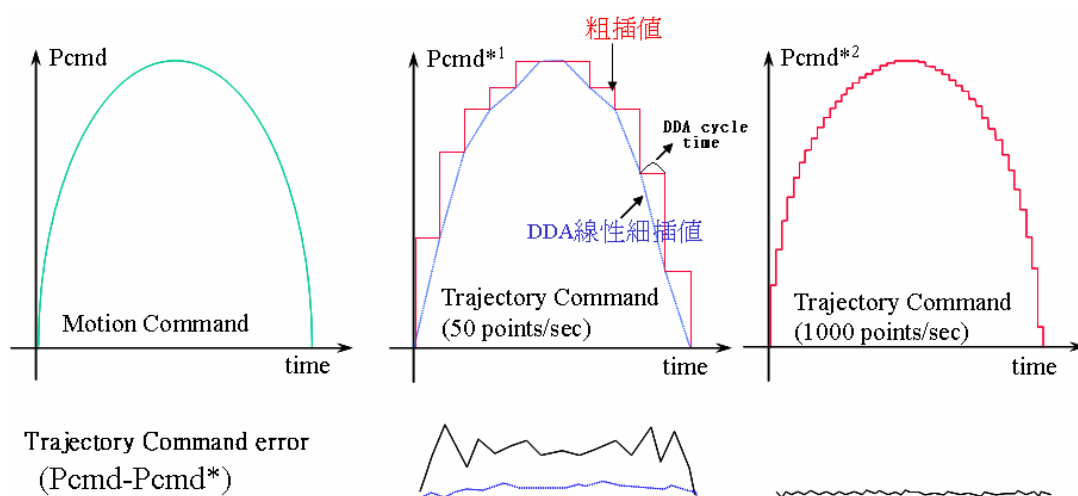
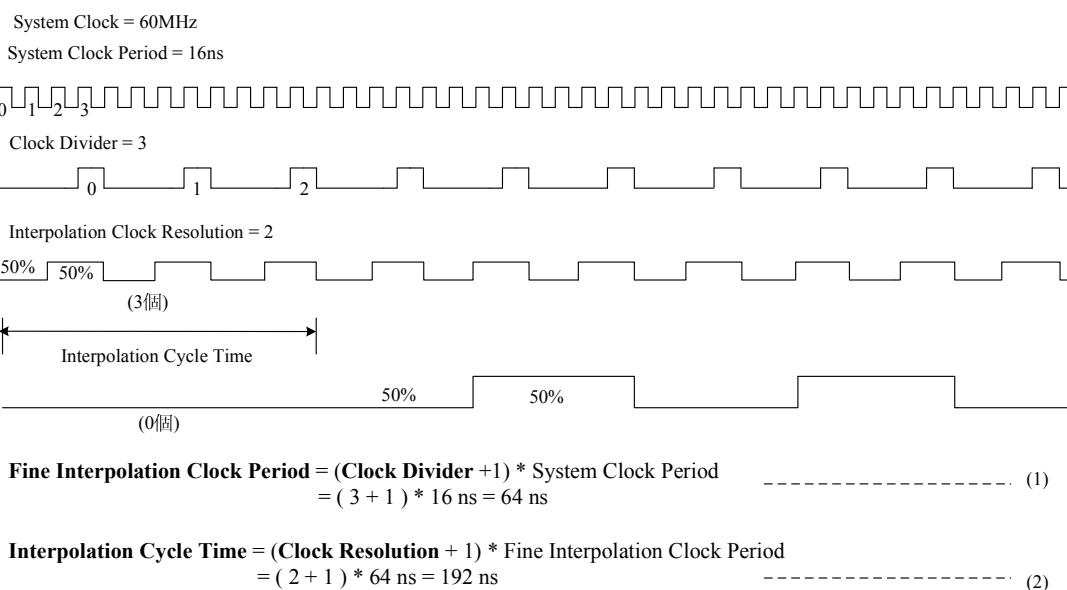


圖7 運動命令目標曲線與規跡曲線



Ps: Interpolation Cycle Time == DDA Cycle Time

圖8

## 2. 編碼器回授輸入

運動控制晶片一般都會有編碼器回授輸入功能，先前提過若運動控制卡採用開迴路方式，則編碼器回授輸入是用來監控馬達的實際位置，另外若採用閉迴路控制方式則編碼器回授輸入就扮演非常重要的角色。

一般而言編碼器回授輸入的訊號可分成三種形式如圖9所示，其中以A/B的方式

輸出最為普遍。當使用A/B的方式輸出時會做4倍頻、2倍頻或是1倍頻的電路解碼，如圖10所示。

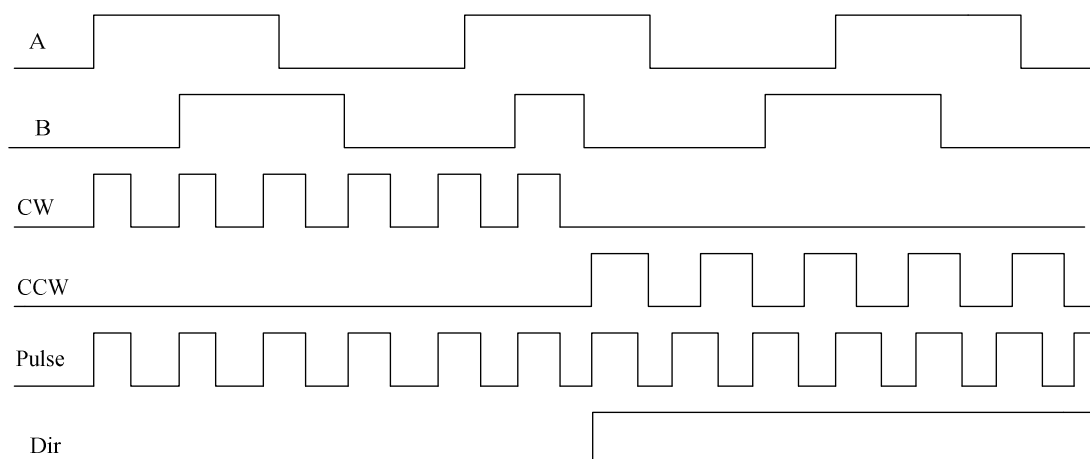


圖9編碼器回授輸入訊號形式

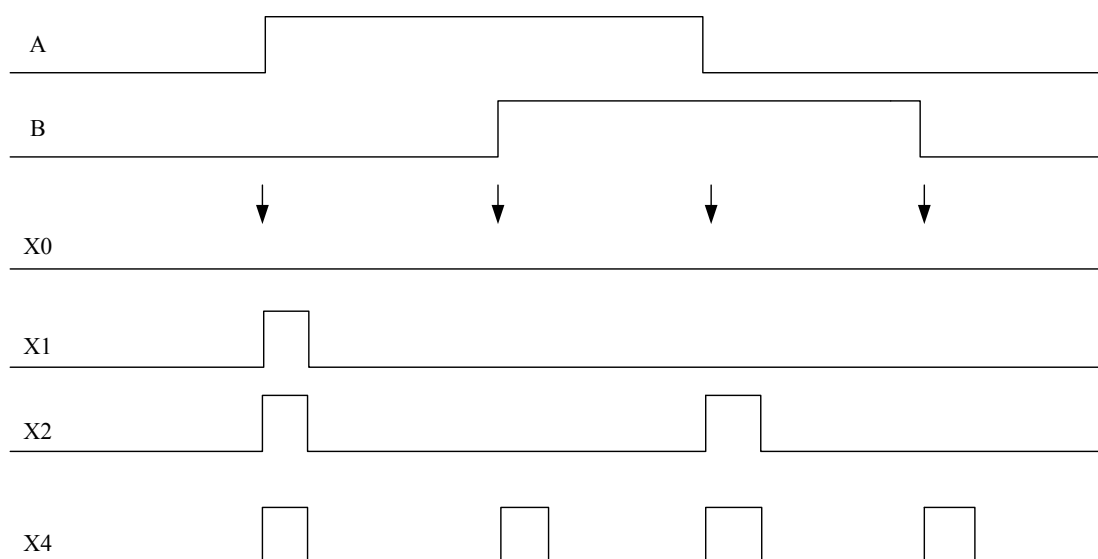


圖10 倍頻圖示

編碼器主要為抗干擾，凸波雜訊為目的。透過編碼器的解譯我們可以了解受控體（馬達）實際上的位置，進而計算與目標位置的誤差量，經過PID控制法做補償計算後，產生相對應的電壓值，再經由數位轉類比（D/A converter）輸出，即可對馬達做轉速和位置的控制。

### 3. 位置控制迴路

整個控制環境中，通常連接馬達的負載是隨時變化，但是我們可以透過馬達編碼器的位置回授適時的知道負載變化狀況，並依據變化情況給予修正補償。在工程實際中，應用最為廣泛的調節器控制規律為比例積分微分控制，簡稱PID控制，

又稱PID調節。PID控制器問世至今已有近60年的歷史了，它以其結構簡單、穩定性好、工作可靠、調整方便而成為工業控制主要和可靠的技術工具。當被控對象的結構和參數不能完全掌握，或得不到精確的數學模型時，控制理論的其它設計技術難以使用，系統的控制器的結構和參數必須依靠經驗和現場調試來確定，這時應用PID控制技術最為方便。即當我們不完全了解一個系統和被控對象，或不能通過有效的測量手段來獲得系統的參數的時候，便最適合用PID控制技術。比例積分微分控制包含比例、積分、微分三部分。PID控制器就是根據系統的誤差利用比例積分微分計算出控制量，然而PID控制器是在工業界最廣泛應用的控制器，它是由3種不同的元素所構成的。P就是比例控制器(Proportional control)，比例控制是一種最簡單的控制方式。其控制器的輸出與輸入誤差訊號成比例關係。當僅有比例控制時系統輸出存在穩態誤差(Steady-state error)。較高的 $K_p$ 值可加快馬達系統響應但同時導致系統過衝擊及振盪的不穩定性，它的主要目的是在增快系統的反應時間(rise time)。I就是積分控制器(Integral control)，在積分控制中，控制器的輸出與輸入誤差訊號的積分成正比關係。對一個自動控制系統，如果在進入穩態後存在穩態誤差，則稱這個控制系統是有穩態誤差的或簡稱有差系統(System with Steady-state Error)。為了消除穩態誤差，在控制器中必須引入“積分項”，積分項對誤差取關於時間的積分，隨著時間的增加，積分項會增大。這樣，即便誤差很小，積分項也會隨著時間的增加而加大，它推動控制器的輸出增大使穩態誤差進一步減小，直到等於零。因此，比例+積分(PI)控制器，可以使系統在進入穩態後無穩態誤差。 $k_i$ 值的調整可增加位置精確度，它的主要目的是在消除系統的穩態誤差(steady state error)。D就是微分控制器(Differential control)，在微分控制中，控制器的輸出與輸入誤差訊號的微分(即誤差的變化率)成正比關係。自動控制系統在克服誤差的調節過程中可能會出現振盪甚至失穩。其原因是由於存在有較大慣性的元件(環節)和有滯後(delay)的元件，這就是說，在控制器中僅引入“比例項”往往是不夠的，比例項的作用僅是放大誤差的幅值，而目前需要增加的是“微分項”，它能預測誤差變化的趨勢，這樣，具有比例+微分的控制器，就能夠提前使克服誤差的控制作用等於零，甚至為負值，從而避免了被控量的嚴重地衝過頭。所以對有較大慣性和(或)滯後的被控對象，比例+微分(PD)的控制器能改善系統在調節過程中的動態特性，增加 $K_d$ 值可降低因高加速度而在馬達目標位置產生的來回振盪，它的主要目的是在抑制系統的超越量(overshoot)，也可說是增加系統的阻尼效應(damping)。

在整個運動控制晶片中位置控制迴路的主要功能是接受脈波命令產生器所輸出的命令以及從編碼器所回授(Feedback)的實際位置並經過耦合後產生相對應的速度命令，經由線驅動器驅動馬達轉動。一般驅動器所需的電壓命令屬於類比訊號，因此我們需要一個數位轉類比的轉換器。

此整個控制環境中如圖5所示，額外加入速度命令前饋控制器的原因，速度型的Feedforward可減少命令變化所引起的追隨誤差，主要是為了增加控制系統的

追蹤準確性，因為任何一種實際的受控系統，都會有所謂延遲(Delay)或過衝(Overshoot)的現象產生，而且無論控制器如何設計，都很難消除這種現象，故在目標訊號輸入驅動器之前，先經過前饋控制器的修正，使輸入驅動器(速度迴路)的訊號，比原先設定的目標訊號更加超前，以補償受控系統的延遲現象，或是較為遲緩，以補償受控系統的過衝現象。

## IMC運動控制週邊電路介紹

IMC 運動控制卡為一具有 CPU Build-in 的運動控制晶片，除了將目前在 PC-Based 上與 CPU 間最普遍的匯流排 PCI-Bus 內建於晶片內，同時也將運動控制上所使用的功能也一併整合入此晶片內，包括編碼器回授介面，類比轉數位及數位轉類比介面，運動控制伺服迴路等。

當運動控制卡擁有了脈波產生器、編碼器回授、位置控制迴路功能後運動控制卡就具備了控制的功能了，另外控制晶片還提供了一組匯流排介面(PCI匯流排)。匯流排介面屬於主機板內部的區域匯流排介面，由Intel公司所訂定發表的。它可以與CPU的位址匯流排、資料匯流排、大部分的控制匯流排接腳銜接。PCI匯流排介面運作於32位元/33MHz，相當於傳輸速率為132MB/秒，雖然也有特製的64位元/66MHz的PCI主機板，僅應用於少數高階的伺服器上。除了匯流排介面外在整個控制系統中，往往需要一些運動控制相關的輸出入點，例如Home Sensor輸入點，Limitation Sensor輸入點及Servo On輸出點等等，IMC運動控制卡在此方面就規劃了LOCAL I/O 40點(1channel規劃(OT+, OT-, SEVRO ON, HOME) 4點)，8軸共32點，另外還規劃了8個LED輸出入點總計共40點，這些輸出入點雖然不做為控制迴路的參數，但是攸關控制流程的進行。因此在運動控制晶片的設計中都是必須具備。

IMC運動控制卡在整個系統中不僅僅只有運動控制單元而已，而且還規劃了與外界命令傳輸的通訊單元例如Ethernet、RS232、USB、IIC、SPI..等等，另外對於記憶單元IMC運動控制卡也規劃了例如RAM、FLASH、PROM..等等，如圖11所示為IMC運動控制卡功能示意圖。

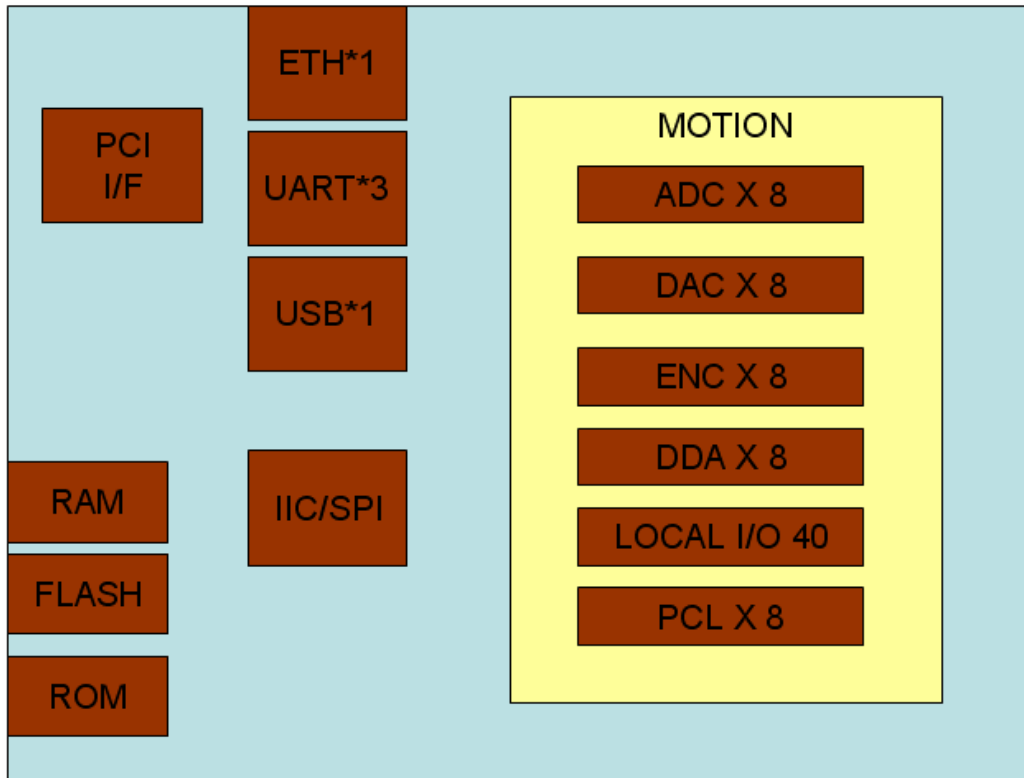


圖11 IMC運動控制卡功能示意圖

下列就 IMC 運動控制卡的通訊單元和記憶單元做簡單的介紹。

(一) 通訊單元

1. Ethernet

乙太網路是各類基本網路形式中最有效率方法之一，其基本傳輸速度為10Mbps(Bit Per Second)。

(1) 型態：對於不同型態的乙太網路，通常會以其編碼的方式來分類成基頻或寬頻。

基頻：是使用數位的信號來當成訊息傳遞的編碼方式。

寬頻：是採用類比的信號，其頻率範圍較基頻寬，而其信號是連續不間斷的，以電磁波的方式流過傳輸媒體。

(2) 早期的乙太網路採用基頻的、較厚的、同軸電纜線即是10-Base-5，後漸漸演進使用較薄的同軸電纜線，即是10-Base-2，現今則較多使用即是10-Base-T的乙太網路型態。

(3) Ethernet是由Intel、Xerox和Digital所共同制定，遵循IEEE 802.3協定的網路硬體標準，它是目前大部份區域網路的標準。採CSMA/CD（偵測碰撞）的通訊協定，其網路型態是採廣播式網路。

(4) Ethernet優缺點：

優點：1. 目前使用最為廣泛。

2. 原理簡單，易於安裝。

3. 不須等待信物，立即傳送，在負載低時延遲很少。

缺點：1. 碰撞發生時造成負載增加，負載大時因碰撞頻繁而造成網路效能降低。

2. 沒有傳送優先等級，沒有品質服務（QOS）的規範，不適合即時（Real Time）的應用，如影像或聲音傳遞時常無法達到連續的效果，影響傳遞品質。

## 2. RS-232 (UART)

UART是一種通用串列數據匯流排，用於非同步通訊。該匯流排雙向通訊，可以實現全雙工傳送和接收。UART首先將接收到的平行數據轉換成串列數據來傳輸。UART通訊介面上的非同步串列埠，能將平行格式的資料轉換成一系列循序的資料，以便於電腦與電腦或電腦與週邊設備之間之通訊，通常個人電腦上用串列埠連接的週邊設備有串列印表機、滑鼠以及外部數據機等等。串列埠和平行埠兩者最大的不同點乃在於其傳遞資料的方式：如果用的是平行連接的方式，則資料以位元組為單位同時由平行埠傳送出去，若採串列埠則資料會轉換成連續的資料位元，然後依序由埠送出，接收端收集這些資料後再將其合成為原來的位元組。

當兩台電腦在遠距離互傳資料時可能就必須真的透過MODEM和電話線所構成的網路，但如果是短距離的連線則可以僅利用一條線即可達到資料互傳的目的。

在串列傳輸的標準下，RS-232 可謂是標準的代表

RS-232 的主要優點有以下幾點：

- a. 基本構造簡單，價格便宜。
- b. 規格之歷史較悠久，配備此介面之裝置相當多。
- c. 傳送方式之複雜度可因應用途而自由選擇。
- d. 備有豐富之應用軟體支援。

## 3. USB

若以USB的字面意思來看，其英文全稱是Universal Serial Bus，而直接翻譯成中文是『通用串列匯流排』。這是由7家包括了Compaq、迪吉多、IBM、英代爾、微軟、NEC以及北方電訊(加拿大)等主要的電腦與電子科技大廠所研發與規劃出來的。USB是一種標準的連接界面，允許把外面的設備與電腦連接時，不必重新配置規劃系統，也不必打開機殼，另外調整界面卡的指撥開關。而連接上電腦時，電腦會自動識別這些周邊設備，並且配附適當的驅動程式，無需使用者再另外重新設定。以下，列出USB的諸多特性與優點：

- a. USB 界面統一了各種周邊設備的連接頭，包含通訊界面、印表機界面、顯示器輸出、音效輸出入裝置、儲存設備等，都採用相同的 USB 界面規格。USB 界面就像是「萬用接頭」，只要將插頭插入，一切就可迎刃而解。
- b. 即插即用(Plug-and-Play)，並能自動偵測與配置系統的資源。再者，無須系統資源的需求。也即是，USB 裝置不需要另外設定 IRQ 中斷、I/O 位址，以及 DMA 等的系統資源。
- c. 具有「熱插拔」(Hot Attach &Detach)的特性，在作業系統的已開機的執行狀態中，隨時可以插入或拔離 USB 裝置，而不需再另外關閉電源。

d. USB 界面規格 1.1 中的 12Mbps 的傳送速度可滿足大部分的使用需求。當然，快速的 2.0 規格，提供更佳的傳輸率。

e. USB 最多可以連接 127 個周邊設備。因為 USB 界面使用 7-bit 的定址欄位，所以 2 的 7 次方等於 128。若扣掉 USB 主機預設給第一次接上的周邊設備使用，還剩 127 個位址可以使用。因此一部電腦最多可以連接 127 個 USB 裝置。它最大的好處是可以在不需要重新開機的情況之下安裝硬體。而 USB 在設計上可以讓高達 127 個周邊設備在匯流排上同時運作，並且擁有比傳統的 RS-232 串列與並列界面快上許多的資料傳輸速度。

USB 在 1995 年由七個電腦與通訊工業領先的公司所組成的聯盟所定義和加以推廣。同一年，該聯盟建立了 USB-IF(實施者論壇，以下簡稱 USB-IF)來加速採用 USB 標準的高質量相容設備的開發。在 1996 年，USB-IF 公佈了 USB 規範 1.0，這是第一個為所有的 USB 產品提出設計要求的標準。1998 年，發佈了 USB 標準的 1.1 規格，1999 年發佈第三個版本的 USB 2.0。隨著 USB 的普及與推廣，USB 的成員一直持續不斷地增加，如今已是非常龐大的推廣組織了。

當前應用 USB 1.1 的周邊設備應用兩種不同的速度：12Mbps(全速)和 1.5Mbps(慢速)。其中，慢速主要是應用於人機界面(HID)上。這是一個用於連接滑鼠、鍵盤、搖桿等設備的 USB 的群組。而儘管當前的 USB 1.1 的最大頻寬速度為 12Mbps，但是主機端應用程式與其它的周邊設備則占據了部分的頻寬。

雖然 USB 號稱可以熱插拔、隨插即用、最多同時連接 127 個裝置等功能。但是其中還是有它的若干缺點，例如熱插拔多次後往往會造成系統不正常當機，以及連接過多的裝置就會導致傳輸速度變慢等問題(USB 的傳輸頻寬是由裝置來共同分享的)。因此，如何改進這些缺點便成為推廣組織所要努力的目標。

USB 2.0 利用傳輸時序的縮短(微訊框)以及相關的傳輸技術，將整個傳輸速度從原本 12Mbps 拉到 480Mbps，整整提升了 40 倍。而在相容性方面，USB 2.0 採用的是往下相容的做法。未來 USB 2.0 仍可向下支援目前各種以 USB 1.1 為傳輸界面的各種周邊產品。不過若是要達到 480Mbps 的速度，還是需要使用 USB 2.0 規格的 USB HUB。當然，各個周邊也要重新嵌入新的晶片組以及驅動程式才可以達到這個功能。而只要低速傳輸需求的周邊(如滑鼠，鍵盤等)，則接上原有的 USB HUB，便可以高低速裝置共存的目的。對於舊有的 USB 1.1 規格設計產品的傳輸速度最高仍僅能維持 12Mbps。

稍前已對 USB 1.1 有相當的瞭解，可是隨著新的 USB 2.0 規格的修訂，或許會感到更新速度得太快。因此以下，特別針對 USB 1.1 與 2.0 規格與特性，作個別條列式的比較與分析，首先，若以 1.x 規格為基礎的話，USB 2.0 多了：

- a. 提供一個較高執行成效的界面。
- b. 運用所存在的 USB 1.1 連接器與全速的纜線。
- c. 設定微訊框的規格，其為 USB 1.x 訊框的 1/8 倍。
- d. USB 2.0 集線器能以裝置-by-裝置為基礎，協調出連接的速度，並且建立出適當的鏈結方式。

- e. 位於下游埠 USB 2.0 集線器能夠支援任何速度的裝置連接上來。  
因此，USB2.0 是以 USB 1.1 規格作為基礎，並加以延伸，其中，包含了：
- a. 具備 USB 1.1 的所有功能。
  - b. 高速訊號模式。
  - c. 偵測高速能力的協定。
  - d. 切入/脫離高速的協定。
  - e. 偵測裝置脫離的機制。
  - f. 嚴謹地符合低/全速規格，但僅針對高速相容的周邊埠。
- 若是要與 USB 2.0 高速裝置相容的話，則：

- a. 需要支援全速信號。
- b. 需要支援至少以全速來作裝置列舉的動作。
- c. 需要符合嚴謹地全速電器的規格。
- d. 決不能支援低速模式。

如表一所示，顯示了 USB1.1 與 2.0 規格之間的相互操作的對應矩陣表。其中，我們知道若要真正地取得 USB2.0 高速的特性，必須採用高速的 USB 主機控制器，高速的裝置，以及高速的集線器。也即是，全部都是高速的規格才可以。

	USB 1.1 Host Controller			USB 2.0 Host Controller		
	No Hub	USB 1.1 Hub	USB 2.0 Hub	No Hub	USB 1.1 Hub	USB 2.0 Hub
Low-Speed Device	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s
Full-Speed Device	12 Mb/s	12 Mb/s	12 Mb/s	12 Mb/s	12 Mb/s	12 Mb/s
High-Speed Capable Device	12 Mb/s	12 Mb/s	12 Mb/s	480 Mb/s	12 Mb/s	480 Mb/s

表一

USB 裝置(USB Devices)顧名思義，就是指各種類型的 USB 周邊。也即是具備某種 function (功能) 的裝置。而依照目前 USB 產品的規格，可以將 USB 裝置分為以下三種類型：

全速裝置(full-Speed Devices)：如 CCD、外接式硬碟等裝置。這些 USB 裝置的傳輸速率最高為 12Mbps/s。

低速裝置(Low-Speed Devices)：如鍵盤、滑鼠等裝置。這些 USB 裝置的傳輸速率最高為 1.5Mbps/s。除了速度低於全/高速裝置之外，低速裝置在某些 USB 的支援上也受限制，例如當主機控制器在執行高速處理動作時，低速裝置是沒有反應的，此點可以避免高速的訊號被送到低速的集線器。



高速裝置(High-Speed Devices)：USB2.0所提出的新規格，也應用在如 CCD、外接式硬碟等裝置。這些 USB 裝置的傳輸速率最高為 480Mbps/s。

由於 USB 最初在設計時，即是為了能夠針對具備如傳輸率，響應時間以及錯誤偵錯等特性之許多不同的週邊類型來加以考量的。而其中，四種資料傳輸的每一個能夠掌握不同的需求。在此，因應不同的周邊裝置的類型與應用，訂定了四種的傳輸類型，分別是控制型傳輸(Control Transfer)，中斷型傳輸(Interrupt Transfer)，巨量型傳輸(Bulk Transfer)以及等時型傳輸(Isochronous Transfer)。其中，需要特別注意的是低速裝置僅支援控制型傳輸與中斷型傳輸而已。

#### 4. IIC

IIC是由飛利浦公司開發的雙線同步匯流排。該匯流排可用來與EEPROM、ADC、DAC和LCD這類慢速元件進行通訊。IIC是一個半雙工、多主匯流排，該匯流排網路有一個或幾個主控元件和很多個從元件。資訊由兩條串列線傳輸：串列數據線(SDA)和串列時脈線(SCL)。由於IIC是一個多主匯流排，因此可能有兩個或更多的主控元件同時試圖存取匯流排，IIC有三種不同的執行模式：低速、快速和高速模式。IIC匯流排設計用於三種數據傳輸速度，每個都具有向下兼容性：低速，數據傳輸率為0到100kbps；快速，數據傳輸率可以高達400kbps；高速，數據傳輸率可以高達3.4Mbps。

#### 5. SPI

同步週邊設備介面(SPI)是由摩托羅拉公司開發的全雙工同步串列匯流排，該匯流排大量用在與EEPROM、ADC、FRAM 和顯示驅動器之類的慢速週邊設備元件通訊。SPI 通訊基於主-從配置有以下4個訊號：MOSI：主出/從入、MISO：主入/從出、SCK：串列時脈、SS：從屬選擇。在SPI傳輸中，數據是同步進行發送和接收的。數據傳輸的時脈基於來自主處理器的時脈脈衝，摩托羅拉沒有定義任何通用SPI的時脈規格。

##### (二) 記憶單元

IMC運動控制卡另外規劃了記憶單元包括了RAM、FLASH、PROM。針對RAM來講，隨機存取記憶體，或稱隨機訪問存儲器(Random Access Memory，簡稱RAM)，是一種在系統中用來暫時保存資料的元件。它可以隨時讀寫，而且速度很快，通常作為作業系統或其他正在運行中的程式之臨時資料存儲媒介。當電源關閉時RAM不能保留資料。如果需要保存資料，就必須把它們寫入到一個長期的儲存設備中(例如硬碟)。RAM和ROM相比，兩者的最大區別是RAM在斷電以後保存在上面的資料會自動消失，而ROM不會。在IMC運動控制卡上規劃了兩顆512M byte最主要的功能是要置入工研院機械所機電控制整合部自行研發的運動控制函式庫、驅動控制函式庫。

針對FLASH來講，IMC運動控制卡上規劃了一顆容量為32Mbit的Flash memory。早期開發的快閃記憶體，在1988年為Intel所發明，有高寫入和擦除時間，但是有完整地址和數據界面、並可以隨機讀取，所以快閃記憶體合適用於儲存代碼不

需要經常更新，例如BIOS或韌體。個人電腦上的主機板會利用NOR型快閃記憶體儲存BIOS資料外，手機、手持裝置也會使用NOR型快閃記憶體來存放系統資料，藉由其高速的讀取速度，滿足手持裝置的開機需求。快閃記憶體不需電力來維持數據的儲存，而且快閃記憶體佔用很少的讀取時間並具有很高的抗震能力。Flash的記憶體是以「頁」的方式排列起來，每一頁有256或512 Byte的儲存空間，和8或16 Byte的輔助空間。現在新出來的chip有些一頁有2048bytes的主要空間和64bytes的輔助空間。輔助空間主要用來存放 ECC (Error Correction Code)，記憶體損壞標記和檔案系統的資料。由這些「頁」，組成區塊(block)。NAND Flash的讀和寫都是以「頁」為單位，刪除則要以區塊為單位。新型態的NAND flash (advance)，頁的容量變大，所以一個頁中會有多個sector。SLC 類型的NAND Flash 允許對同一頁中的各sector作分次寫入的動作，稱作"partial programming"。MLC類型的NAND Flash由於對某sector寫入時，會影響到同一頁中其他sector的內容，所以寫入時，要以頁為單位。

最後對於PROM來講，IMC運動控制卡上規劃了一顆容量為32M BYTE的PROM最主要的功能是要來置入規劃FPGA電路行為的程式。可規化式唯讀記憶體（英文：Programmable read-only memory, 縮寫為PROM或FPROM）是一種電腦存儲記憶晶片而且斷電後，仍能保留數據的計算機存儲晶元——即非易失性的。EEPROM全稱「電氣可擦拭可規化式唯讀記憶體（Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory）」EEPROM不需要用紫外線照射，也不需取下，就可以用特定的電壓，來擦拭晶片上的資訊，以便寫入新的資料。EEPROM有四種工作模式：讀取模式、寫入模式、擦拭模式、核對模式。讀取時，晶片只需要Vcc低電壓供電。規化寫入時，晶片通過Vpp獲得規化電壓，並通過規化脈衝寫入資料。擦拭時，只需使用高電壓，不需要紫外線，便可以擦拭指定位址的內容。為保證規化寫入正確，在每寫入一塊資料後，都需要進行類似於讀取的核對步驟，若錯誤就重新寫入。由於 EEPROM 的優秀性能，以及在線上操作的便利，它被廣泛用於需要經常擦拭的ROM晶片以及閃存晶片，並逐步替代部分有斷電保留需要的RAM晶片。

下列圖12所示，即是工研院機械所機電控制整合部目前開發的IMC運動控制卡的外觀及各個主要功能位置標式如下：

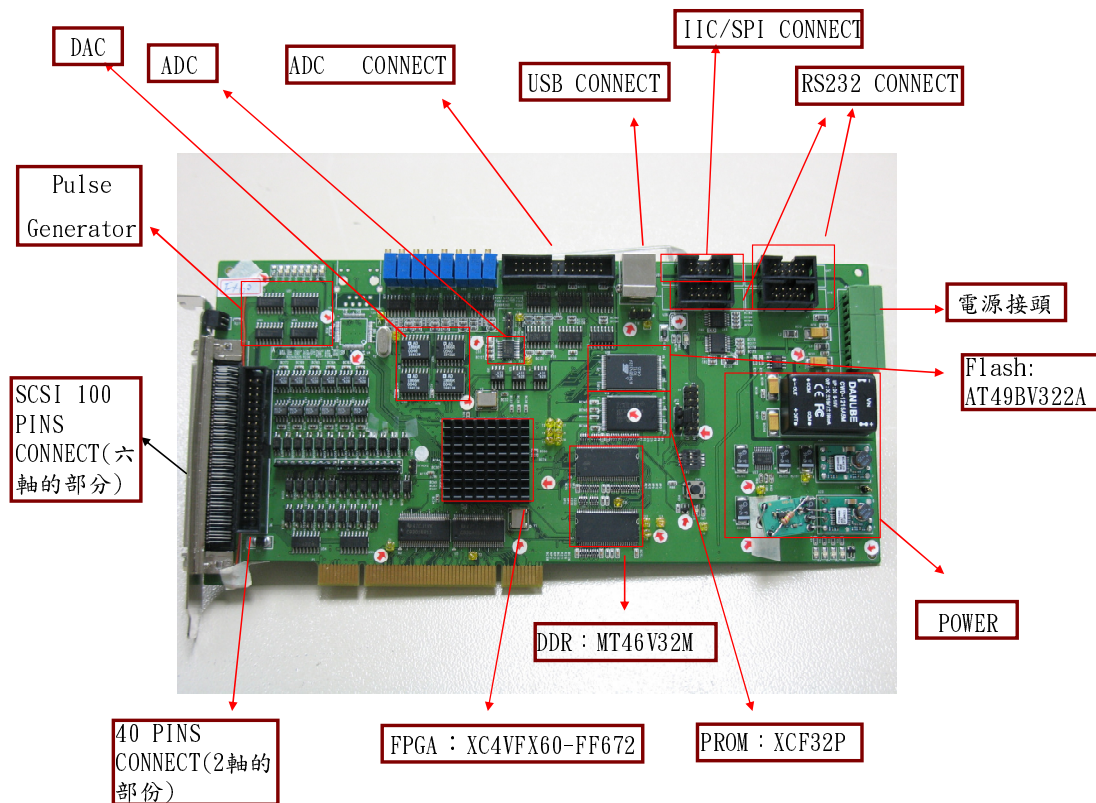


圖12 IMC運動控制卡外觀

## IMC運動控制與現有控制卡之差異

表二所示可大致看出國外的運動控制晶片大部分都以開迴路控制步進馬達或是脈波型伺服馬達為主，一般不具有閉迴路控制功能。工研院機械所機電控制整合部現階段所開發的新一代的運動控制IC，稱為IMC，為新一代CPU-Based控制器之核心。新的IMC具有時脈的提高、電壓下降及功耗降低的優點，過去工研院晶片EPC10以硬體處理之伺服控制迴路將可變的更為複雜及精細，如添加PID控制與前饋控制，甚至因為CPU的內建，可更有彈性的將運動控制函式庫整個置入控制卡的記憶體內，讓IMC內的作業系統可以處理更為複雜的路徑規劃問題。

IMC控制晶片之開發，可以整合原EPC10 ASIC的特性達到高性能、高整合性、高穩定性、低成本之目標。目前EPC10-Based控制器主要定位為中階層級，對一些高階運動控制雖可達到，但是所需的資源大多需要有CPU完成。完成IMC後，可滿足高階運動控制功能需求，可提昇國內控制器層級至中高階。隨著控制器中許多高速串列通訊的選擇出現，IMC運動控制卡在規劃時也整合數位串列傳輸的功能，因此單一控制器可控制軸數會變更大且範圍更廣。此外，IMC擁有兩種不同架構，一為獨立工作的專用型控制器，二為與PC結合構成高性能型控制器。應用彈性極大，未來可適用於CNC工具機、各種產業機械、機器人等控制系統，應用場合最寬廣。

Vendor	Product	Axis	Control Loop	On Chip CPU	Encoder Counter	DAC Interface	ADC Interface	BUS Interface
MIRL	IMC	8	Close	Yes	32bit	16bits x 8	14bits x 8	PCI
MIRL	EPCIO	6	Close	No	32bit	16bit x 8	12bits x 8	ISA
MIRL	MPCL1000B	1	Close	No	24bit	12bit x 1	0	NO
NOVA	MCX305	1	Open	No	32bit	0	0	NO
NOVA	MCX314	4	Open	No	32bit	0	0	NO
COSMO	PNC540	1	Close	No	28bit	1	0	NO
COSMO	PNC620	2	Open	No	28bit	0	0	NO
NIPPON	PCL5022	2	Open	No	28bit	0	0	NO
NIPPON	PCL6045	4	Open	No	28bit	0	0	NO
PMD	MC1401A	4	Close	YES	16bit	16bit x 4	0	NO

表二 國內外運動控制功能比較

## 結語

在PC及半導體產業飛快的進步下，許多數位系統相關應用也隨之飛快的進步。單晶片、數位訊號處理器這些具有高速運算速度下之微控制器不斷的導入分散式控制系統中，使的各式各樣的應用系統逐漸朝向專業分工，其中運動控制系統是一個很好的例子。目前國內廠家所生產之控制器多集中於PC-Based，規模較大的廠商已紛紛推出嵌入式系統，搭配自我品牌的運動控制卡。目前各廠家使用的之運動控制晶片除工研院自行研發之六軸EPCIO晶片之外，多數使用的是美、日、德國所製作之晶片。這顯示台灣雖是IC設計的強國，但設計產業仍固守於光、電、通三大領域，而未跨足它域，這部分仍有待業界大力倡導。

PC-Based架構的控制器在工業界已被使用者所接受，然而CPU-Based控制器的開發把控制器帶入更嶄新的一面，無論對於CNC控制器、半導體設備控制器、或是精密設備的控制器都有

其顯著的幫助。

## 參考資料

1. 陳文泉"工業控制器之運動控制晶片設計技術"2004/6月號/第162期電機月刊 150~158。
2. 劉漢平"淺談輪機機械人的設計"2007/6月號/第198期電機月刊136~149。
3. 李文猶"FPGA-Based泛用型嵌入式運動控制模組設計"2007/8月號/第200期電

機月刊242~251。

4. 李文猶"Nios II-Based嵌入式系統晶片規劃與設計"2007/11月號/第203期電機月刊228~234。
5. 黃偉峰"CPU Based運動控制技術簡介"機械工業雜誌，2006.10月。
6. "EPCIO-6000/6005硬體使用手冊"工研院機械所，2004.6月。
7. 蔡祥益 "伺服迴路與EPCIO"機械工業雜誌，2001.4月。
8. 江修"應用週期及密度可變之DDA架構"，2001.4。
9. 曾遠威"超級運動控制ASIC"機械工業雜誌，1999.4月。
10. 何昌祐"DSP應用於PC-Based運動控制器之技術分析"機械工業雜誌，1998.2月。
11. <http://www.epcio.com.tw/>。
12. <http://www.usblab.idv.tw/>。
13. <http://www.xilinx.com/>。