

應用CANopen協定同步運動 控制災害處理機械手臂

鄭時龍／大華技術學院 機電工程系 副教授・張國樑／交通大學 電子控制研究所 研究生

曾文豪／中山科學研究院 二所射導機電組 副組長・黃志航／中山科學研究院 二所射導機電組 組長

CAN網路是一種普遍使用於工業自動控制領域中之通訊網路，CANopen是以CAN網路為基礎之應用層協定，屬於開放性協定。本文藉由CANopen協定，週期性傳送SYNC同步命令機制，應用於多軸馬達同步運動控制，實作六軸機械手臂，並成功應用在移動式災害處理機器人。六軸機械手臂全部採用直流無刷伺服馬達，最大馬達輸出功率為450W，末端機械夾爪致動馬達為90W。操作時，手臂末端可承受40Kg以上荷重。伺服驅動器，經過特別設計將空間體積縮小，平貼隱藏於狹隘機械手臂有限空間中。六個伺服驅動器利用雙絞線串聯在CAN網路中，為分散式運動控制模式。災害處理機器人上位主控電腦，採用60W低耗能之小型防震雙核處理器電腦。其硬體轉換介面全採用USB介面，減輕電腦周邊介面需求與介面複雜性。在操控軟體方面，採用C#語言，每隔80ms，即時計算機械手臂逆向運動資料(Inverse kinematic)，將機械手臂姿態轉換成各關節座標，利用CANopen協定，傳送至伺服驅動控制器並同步驅動各關節運動，快速平穩運行；同時亦可即時更新各軸馬達即時定位資訊與輸出電流。

關鍵字：CAN網路、通訊協定、同步運動控制

1. 前言

目前工業用機器人種類繁多，多軸運動控制為機器人產業一項重要技術特點。高階的運動控制應用，對於控制的即時性與同步性要求越來越嚴格[1]。目前現有的運動控制核心技術解決方案大致可以分為ASIC-Based、DSP-Based、串列網路控制技術3種[2]。ASIC-Based為一種具有運動功能的專用積體電路，進而達到低階或是高階的運動控制。通常運動控制ASIC，穩定度與功能的驗證高，整體的指令集執行速度快，但是，缺乏可程式化能力，無擴充能力，亦無法實現絕對同步的運動控制。高速的DSP-Based或採用RISC或FPGA作為核心處理器的開放式運動控制器，通常搭配高速的記憶體，具有可程式化的能力，使用者可以下載程序控制碼到DSP內部執行，整個控制程序享有即時性的特點。串列網路控制，具有自己的通訊協定，使得主控制器與被控制端(伺服驅動器)可以依通信協定進行資料交換，以做為運動控制或是取得相關伺服資訊回到控制器本端。其通信也會依協定內容做資料交換及更新動作。

災害處理機器人主要由履帶式移動載具與

六軸機械手臂組成。六軸機械手臂運動控制，面臨了多軸同步與即時性能，並受限於配線繁多及雜訊干擾等問題。CANopen通訊傳輸協定是一種開放式網路應用層通訊協定。採用CAN串列式網路通訊傳輸，具有數位信號傳輸、系統完全開放等優點。除了配線容易、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[3, 4]，可以確保機械手臂快速平穩的運行。在工業機器人實際應用中，具有組裝方便、性能高、擴展性強等特點。工業生產中亦有廣闊的發展前景。

2. 履帶式災害處理機器人

如圖1為履帶式災害處理機器人主要機構由區域自走能力載具模組與排除功能致動臂模組組成。

2-1 區域自走能力載具模組

區域自走能力載具模組主要功能為災害處理機器人中六軸機械手臂模組之載具移動平台。移動載具採用履帶式移動設計，履帶內部設計有之

四個接地輪並各自搭配一支壓縮彈簧，接地輪之轉軸，固定於曲柄，曲柄本身帶著接地輪之轉軸可以自由旋轉，但由於受到壓縮彈簧及自走載具本身重量與慣量之約束，曲柄會自動尋找平衡的位置。減輕履帶執行前進，後退與原地轉向運動時過度震動。傳動零組件，透過橡膠履帶之連結與力量傳遞，可以適應崎嶇之路面，確保與地面的接觸，有效傳遞馬達輸出扭矩。

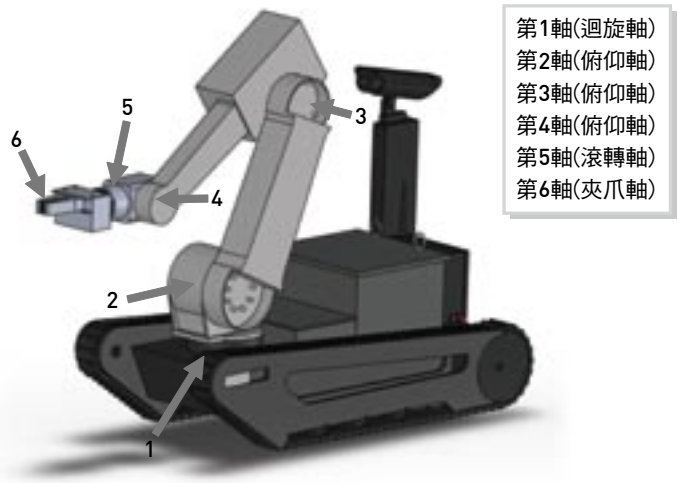
自走載具之傳動機構，為兩側獨立驅動模組。各側之傳動機構零組件，包括有馬達，減速機，驅動齒輪，尾端惰輪，中間惰輪，鋼絲補強之橡膠履帶。履帶左右兩側動力源採用兩顆600W/24V之直流無刷馬達，分別驅動兩側履帶運轉。馬達驅動器提供有開機/關機、啟動/停止、轉矩等控制功能。控制模式可採用手動與自動模式。手動模式命令可由後控制箱面板按鈕操作；自動方式採用傳統DAQ 控制模式，啟動/停止，正/反轉與On/Off切換採用數位訊號。馬達轉矩命令，為0~10V類比信號。移動載具行走能力規格如下：行進速度大於0.6公尺/秒，爬坡能力大於60%。移動載具最大長度小於1100mm；載具最大寬度小於700mm；載具上面裝置六軸機械手臂，在手臂呈摺收狀態下，總高度≤1100mm；載具(含電池模組、行控電腦、感測器)，加上機械手臂後，最大總重量≤250公斤。

2-2 六軸致動機械手臂

本模組主要是機器人的多關節致動手臂機構，用來進行抓取及移動各項物品。致動臂各關節的位置請參考圖一的示意圖。六軸機械手臂由六個旋轉軸(joint)及軸間之剛性連桿所構成。前三軸連桿支撐並控制機械臂，決定了機械臂尾端手腕(wrist)在三度空間的位置；後三軸決定手腕的擺置姿態。第1軸至第5軸設計，採用Harmonic與行星減速機之組合，直結或透過時規皮帶耦合。由於Harmonic有很高之精度與減速比，再搭配伺服馬達專用之行星減速機，可獲得所需要之減速比，充分發揮扭力放大之目標。第六軸，是夾具的自由度，設計目標不同於致動臂的關節模組。夾具之夾爪，必須有反向運動之設計，採用兩顆正齒輪，以實現同步反向運動之設計目標。

機械手臂運動，由六顆伺服馬達驅動。機械手臂動力源從+24VDC鋰鐵電池輸出，經後端電控箱緊急開關繼電器輸出端子，沿機體右側，進入前方控制箱中1KW DC/DC轉換器中。DC/DC轉換器將輸入直流24V電源昇壓至直流48V電源，提供機械手臂電源。六個伺服驅動器與馬達規格如表1所示。六顆微型伺服驅動器，具有CAN通訊網路功能，實現一對雙絞線串接全部伺

服驅動器，免除機械手臂配線複雜，節省安裝維護費用。



- 第1軸(迴旋軸)
- 第2軸(俯仰軸)
- 第3軸(俯仰軸)
- 第4軸(俯仰軸)
- 第5軸(滾轉軸)
- 第6軸(夾爪軸)

(圖1) 災害處理機器人

(表1) 六軸機械手臂致動電器規格

	馬達規格	控制器規格	減速比/編碼器
第1軸	DC 48V/450W 直流無刷 伺服馬達	10A/60V	300/2500
第2軸	DC 48V/450W 直流無刷 伺服馬達	10A/60V	600/2500
第3軸	DC48V/200W 直流無刷 伺服馬達	10A/60V	675/2500
第4軸	DC48V/200W 直流無刷 伺服馬達	10A/60V	960/2500
第5軸	DC48V/90W 直流無刷 伺服馬達	5A/60V	380/2048
第6軸	DC48V/90W 直流無刷 伺服馬達	5A/60V	15/2048

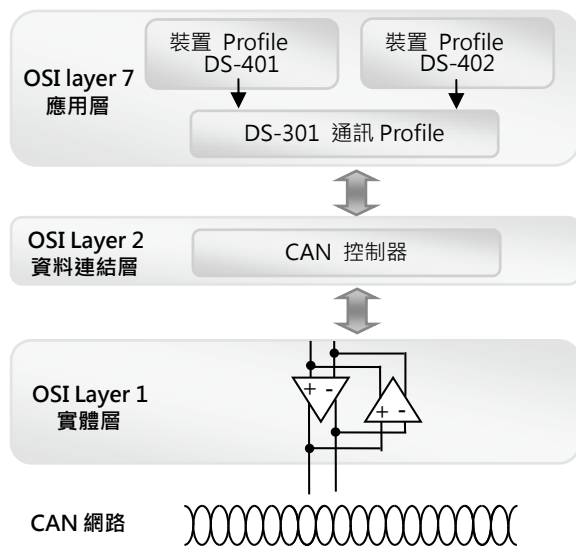
3. CAN 網路

CAN (Controller Area Network)網路[5]類似RS485通信介面，採用簡易的雙線差動式序列匯流排系統。可以取代傳統類比式控制，具有減少大量佈線、增加擴充彈性及容易診斷的好處。CAN 網路特性如下：a)訊息具有優先權(Priority)：訊息在傳遞時，有優先權比較的機制，優先權由訊息ID值決定，優先權越高(ID越低)則可優先獲得網路使用權。b)非破壞性仲裁(Non-destructive arbitration)：在網路上發生訊息碰撞時，優先權較高訊息持續傳送；低優先權訊息停止保持傳送，等待下次網路空閒時(Idle)，重新發送。網路封包不會因碰撞而造成無效傳

送，可以提高網路利用率。c)訊息以廣播方式傳送(Broadcast)：訊息以廣播方式傳送，網路上的Node皆會同時聆聽網路上的訊息，並作因應之處理。d)節點都可主動發送訊息。e)錯誤檢查與錯誤處理：每個節點皆有檢查網路錯誤狀態及處理相關錯誤因應機制。

3-1 CANOpen 通訊協定

如圖2，CAN網路定義了實體層(Physical Layer)及資料連結層(Data Link Layer)這兩層架構，本身並不完整，具體應用問題就需要一個更高層次的協議—應用層(Application Layer)協議來實現。應用層有許多協定在推行，如CANOpen、DeviceNet、Smart Distributed System (SDS)、CAN Kingdom、J1939等應用層協定。CANOpen通訊協定是由CiA (CAN in Automation) 協會所推廣與發展，許多設備製造商皆以此開放式協定加入其產品，在歐洲已是相當普及使用的工業網路。



(圖2) CANOpen 參考模型

CANopen協定是以自動化裝置設備的種類為導向：如I/O模組，編碼器(Encoder)，馬達驅動器(Driver)等皆有其標準協定，總共超過405種規範(Profile)。其可分成通訊規範(Communication Profile)與裝置規範(Device Profiles：CiA DS-4xx)兩類。與本文機器人應用有關的協議規範有2個：DS-301與DS-402。DS-301定義了應用層和通訊規範，DS-402定義了伺服運動控制規範。

3-2 DS-301通訊規範

DS-301[6]是CANopen協議中最基本的協議。通訊規範定義物件庫(OD: Object Dictionary)，物件庫包含產品資料、狀態、參數

與即時資料等。物件庫可透過下列通訊機制資料傳輸。

●服務資料物件(SDO)

SDO操作模式分為客戶(Client)/伺服器(Servo)端兩端，客戶節點對伺服器節點中物件庫資料，進行讀取或寫入。SDO訊息包含了一組COB-ID，可以在客戶/伺服器兩個節點之間做存取的動作。每個物件庫有單一16位元主索引值，假如有需要的話可能會增加多個8位元次索引值。SDO通訊採用一般一問一答通訊模式，訊息發送一定由SDO客戶端開始，並提供傳輸控制碼；每個回傳的訊息由伺服器產生一個回覆訊息，用以確保傳輸的準確性。SDO通訊具較低的優先權，主要用於非即時性資料或大量資料超過8 bytes之傳輸，通常應用於對遠端設備參數設定，屬於非同步傳輸訊息。

●過程資料物件(PDO)

PDO傳輸，主要用來傳輸即時性的資料，一次訊息最多可傳送8個位元組即時資料，優先等級高於SDO傳輸。PDO打破SDO一問一答傳統資料傳輸理念，採用生產(producer)/消費(consumer)概念。每一個CAN網路節點，都可以擔任生產端或消費端，聆聽或傳送節點的訊息，也會判斷接收訊息之後與要處理與否。生產/消費雙方在傳輸前，先在兩端定義好資料接收和發送區域，在資料傳輸時直接由生產端發送相關的資料到消費端的資料接收區即可，減少了傳統問答式的詢問時間，是一種比SDO更有效率的過程數據的通訊模式。

DS-301定義了4組TXPDO及RXPDO，每筆資料長度被限制為1至8位元組。PDO規劃方式是利用SDO動態修改PDO物件庫中兩類參數：通訊參數和映射參數。通訊參數定義該生產端所使用的COB-ID，觸發方式和傳輸模式；映射參數定義了映射PDO傳輸物件庫內容，包含物件庫主索引值，次索引值與傳輸數據長度。PDO觸發方式可以用同步或非同步的方式傳送。同步的PDO是由SYNC訊息觸發；非同步的PDO則是由節點內部設定的條件如計時器或其他外部條件觸發。例如機器手臂操作過程，編碼器位置資料是重要訊息。可以利用PDO映射的方法指定一PDO，映射編碼器位置資料。再搭配上位電腦週期性SYNC同步命令或利用伺服器驅動器端內部計時器，以每隔10~100 ms，快速傳輸伺服器馬達位置即時資料至上位電腦。

●網絡管理(NMT)

CANopen網絡管理是基於主從(Master / Slave)架構進行NMT服務。在主從架構之下，主節點為上位電腦，多個從節點即為伺服器驅動器。每個伺服器驅動器都有自己專屬的NMT狀態，而

主節點可以藉由 NMT 的訊息去控制從節點的操作狀態：初始化、啟動、監控、重新啟動及停止等狀態的切換。NMT 網絡管理實現，分成 a) 節點狀態控制與 b) 節點狀態監控兩部份。節點狀態控制是指主節點通過發出命令，改變從節點的狀態。只有主節點會發送 NMT 節點狀態控制訊息，全部的從節點都必須支援 NMT 的模組控制服務，對於 NMT 的模組控制訊息，從節點並不會發送回應訊息。節點狀態監控是主節點監控各從節點是否在網絡線上正常工作，通常可利用主節點詢問 (Node Guarding) 或從結點定期回報 (Heart beat) 方式，檢測節點能否正常通訊。

3-3 DS-402 裝置規範

伺服運動控制在 CANopen 裝置規範中，定義在 DS-402 規範 [7]。如圖 3，在 DS-402 敘述運動控制模式包含有：起始定位 (Homing) 模式，位置軌跡 (Profile Position) 模式，位置差補 (Interpolated Position) 模式，速度軌跡模式 (Profile Velocity) 模式與轉矩軌跡 (Profile Torque) 模式，每一種操作模式皆透過 SDO 命令設定。



(圖 3) DS-402 伺服運動控制規範

在機器手臂六軸運動控制中，我們首先利用起始定位編碼器模式與近接開關，使機器手臂各軸歸位至起始狀態。DS-402 提供有 32 種不同定位方法，設定定位操作時，馬達執行前進或後退運轉，找尋近接開關位置。當進階開關訊號產生變化時，驅動器會持續或逆向運轉，找尋伺服馬達編碼器 Index 訊號，設定起始位置。起始定位模式操作可以設定馬達運行速度，加速度與定位偏移量 (Offset)。在裝置控制狀態碼中，顯示定位執行/完成等狀態。

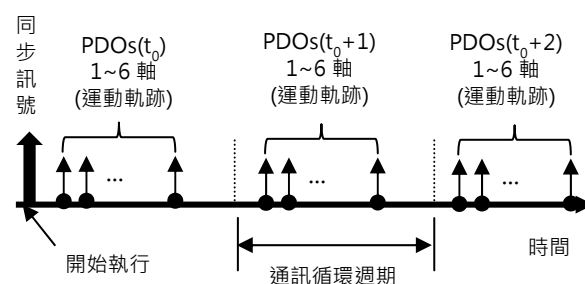
在 DS-402 規範中，與運動路徑有關模式有二：位置軌跡模式與位置插值模式。詳述如下：

● 位置軌跡模式 (Profile Position)

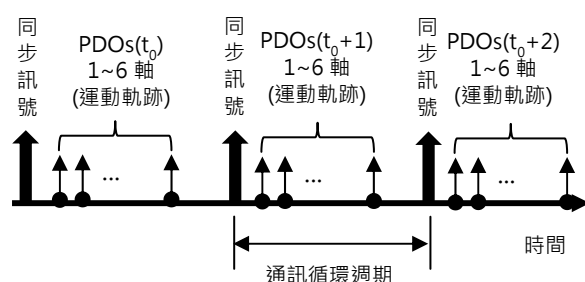
驅動器接受外部目標路徑位置命令後，依據內部已設定速度、加速度等運動參數，由軌跡產生器，運算最佳運動軌跡，依序輸入內部位置控制迴路，使馬達快速運行至目標位置。當下一時刻，外部目標位置輸入時，馬達位置尚未到達前一時刻所設定位置時，DS-402 位置軌跡運動模式提供有兩種不同運行方法選擇。一為驅動器繼續執行前一時刻命令，當到達上一時刻目的位置後，再繼續執行新位置命令；另一方法為驅動器放棄前一個位置命令，以目前運行速度與加速度，改朝向新位置命令運行。雖然方法一，驅動器可確實完成執行應用程式所設定路徑位置，但是到達目標位置後，速度會降為 0，在機械手臂操控應用中，很容易產生抖動現象。方法二雖可以維持運動速度連續，但手臂定位精度較差。

● 位置插值模式 (Interpolated Position)

位置插值模式與位置軌跡模式相比較，輸入路徑位置資料增加時間限制。此模式類似傳統伺服控制中 PT/PVT 模式，較適合多軸運動控制。通常 PT/PVT 模式中，一連串時間資料幾乎固定不變，所以在 DS-420 規範中，時間固定採用參數輸入，路徑資料輸入格式為位置或速度資料，並可透過 PDO 傳輸機制，快速即時傳輸。線性 (linear) 模式運行保證路徑規劃點位置連續但速度值不連續。曲線 (cubic) 模式須輸入位置與速度資料，路徑規劃點，位置與速度值是連續。在多軸同步運動應用中，位置插值模式提供有時間內顯示與外顯示設計，如圖 4 所示。當上位電腦下達 SYNC 同步命令後，位置插值模式開始執行。時間內顯



(a) 同步時間內顯式



(b) 時間外顯式

(圖 4) 同步位置插值運動模式

示模式，依據已設定循環週期時間，採用驅動器內部計時器計時；時間外顯示模式，則需每個循環週期時間，由上位電腦持續下達SYNC同步命令。雖然內顯示利用驅動器內部計時器，可精確運行，但與上位電腦時間同步上，總會有些微小時間差。經過時間累積，非常容易造成路徑資料輸入錯誤發生。外顯式利用上位電腦持續下達SYNC同步命令，容易造成驅動器接收SYNC命令會延遲，驅動器運動控制須完成SYNC命令延遲時，運動位置，速度估算。

4. 機械手臂操控設計與實現

由於六軸機械手臂組裝於履帶式移動平台中，伺服驅動器選擇上，比一般固定平台式，工業用六軸機器手臂設計挑戰為：馬達驅動器體積限制。一般具有高階運動控制之驅動器，體積大部分被散熱片佔據，不容易安裝於機械手臂有限空間中。圖5為自行設計微型驅動器信號轉換板，將驅動器體積縮小至火柴盒一般。第1, 2, 3軸驅動器並排安裝於手臂底部控制箱中；第4, 5, 6軸驅動器安裝近於第四軸微小空間。六個伺服驅動器直接利用機械手臂之鋁合金金屬壁散熱。

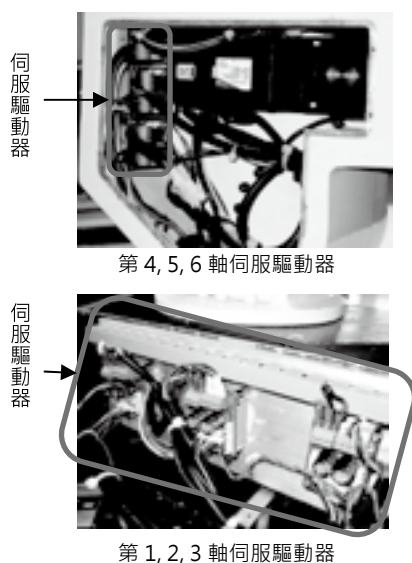
災害處理機器人，操控環境如圖6所示。六軸機械手臂操控採用分散式控制方式，六個驅動器負責各關節軸馬達輸出位置控制。上位電腦採用60W低功耗，雙核心Atom系列處理器之電腦，隱藏於履帶式移動平台控制箱中。上位電腦一方面以每隔80ms取樣頻率，檢知Xbox 360無線操控搖桿中，類比或數位輸入命令，即時計算機械手臂逆向運動(Inverse kinematic)，將機械手臂姿態轉換成六個關節座標，經過CAN網路，

同步傳送至驅動器，操控六軸機械手臂姿態並控制履帶執行前進，後退或轉彎移動。上位電腦亦可透過無線寬頻集線器，將操作人機介面即時資訊，無線網路傳送於外部筆記型電腦。CAN介面卡規格不採用一般PCI介面，改採用USB介面，可以降低上位電腦規格需求與空間。

4-1 人機介面操控軟體設計

人機介面操控軟體提供操控人員操控機器人載具移動、致動臂動作控制、傳送操控訊號至受控端、顯示機器人目前各項感測器的資訊、以及其它相關控制訊息的傳送及接收等。操控軟體開發，採用Microsoft Visual 2008 C#語言。CAN介面卡，在視窗Vista/Win 7作業系統中，驅動軟體只提供基本API副程式，支援底層CAN傳輸，應用層CANopen協定並未支援。如圖7所示，軟體程式開發，須透過CAN API副程式，撰寫應用層CANopen相關程式。CANopen通訊協定軟體開發以C++語言為主，輸出格式為動態函式庫(dll)，內容包含有SDO、PDO與網路管理(NMT)。傳統C/C++語言與C#語言程式所使用記憶體管理方式不同，C#語言無法直接使用傳統C++語言開發動態函式庫，需再透過程式，將資料格式型態(如陣列)，轉換成C#語言使用記憶體格式，輸出另一種形式動態函式庫。

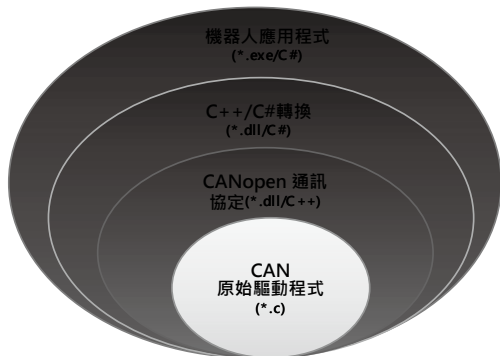
圖8為機器人操控軟體一部份，利用C#語言，結合.Net資源，並呼叫自行撰寫CANopen協定動態函式庫。SDO服務資料物件，可以讀取/寫入機械手臂中6個不同伺服驅動器，所有物件庫資料。圖形右下部分為底層CAN訊息的交換、執行與顯示。圖9為災害處理機器人之人機介面操控畫面，分為驅動器連線狀態區，驅動器狀態



(圖5) 自行改善微型伺服驅動器體積，平貼於空間狹隘機械手臂金屬壁



(圖6) 無線操控災害處理機器人

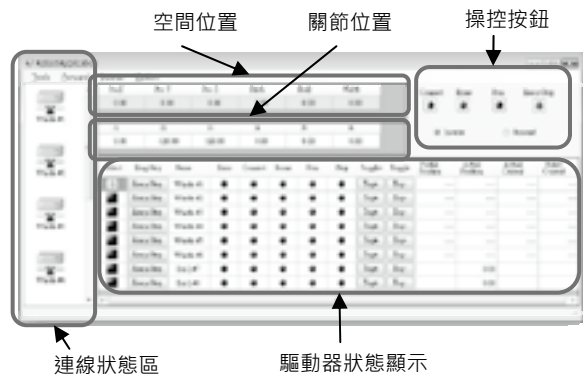


(圖7) CANopen協定軟體開發



(圖8) 利用SDO，讀取設定機械手臂六個伺服驅動器參數資料

顯示，操控按鈕，機械手臂空間位置座標與六個關節座標。當系統送電後，每個CANopen 驅動器節點依NMT網路管理處於初始化狀態，自動進入預操作狀態。上位電腦利用Node Guarding 詢問各驅動器狀態，完成驅動器狀連結。機械手臂操作執行前，SDO將各驅動器操作模式設定為起始定位模式，各關節軸依初始設計，完成機械手臂姿態初始定位。SDO設定各軸TXPDO與RXPDO映射馬達輸出電流與馬達伺服運動命令，並切換運動模式為位置插補模式，執行機械手臂單軸或多軸連動功能操作。圖10分別為機器人實際操作，執行a)各軸起始定位 b)履帶運動位移 c) 手臂抓取物件不同姿態。



(圖9) 應用程式開發

5. 結論

災害處理機器人由履帶式移動平台搭載六軸機械手臂。六軸機械手臂採用450W~90W不同輸出功率無刷伺服馬達與微型伺服控制器等組件驅動。微型伺服控制器體積縮小如火材盒大小，可直接平貼於金屬手臂，降低驅動器散熱問題，提高系統穩定度。微型伺服控制器間採用CAN網路架構，實現一根雙絞線串接全部裝置，節省連接導線、維護和安裝費用。

機器人手臂多軸運動控制，採用高階數位網路通信。CANopen屬於開放式應用層協定，每個伺服驅動器與上位電腦的通信遵循CANopen標準協議，使各伺服驅動器通信網路的初始化、資料的發送和接收得簡單、直接。CANopen提供SYNC同步命令機制與伺服運動位置控制模式，確保機械手臂各軸命令傳送之同步性與六軸同步運動的精度，具有系統穩定性高，使用者操作靈活的優點，並實現機械手臂平穩運行。

同步控制技術建立串列式伺服運動控制技術的研發，提供高性能、高整合性且低成本的高速高精度運動控制。串列式多軸運動控制技術從傳統集中式控制系統，被網路分散式控制系統取代之。各驅動器強大運動控制處理能力，獨立完成

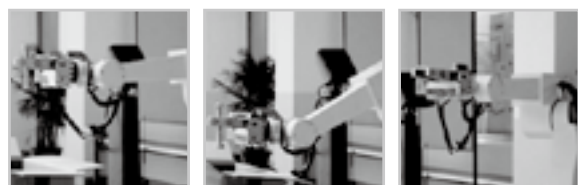
運算及控制，再利用通訊網路來即時分享資料，不僅降低成本、提高可靠性、擴充性、彈性與即時性，在偵錯維修上更為容易。高階多軸運動控制技術並可帶動現有產業機器人跨入關節型、多軸數市場領域。



(a) 各軸起始定位



(b) 機器人位移旋轉



(c) 手臂抓取物件

(圖10) 機器人實際操作

誌謝

本研究承蒙中山科學研究院·研究計畫標案(XB99177P)協助支持·特此致謝。

參考文獻

1. Y. Luo, X. Jiao, W. Ji, and C. Chou, Double motor Synchronizing Drive Control for Pipeline Welding Machine based on CANopen · 2010 IECE, pp. 5174-5177
2. 陳家樂 “發揮產業群聚優勢開創台灣工具機產業新利基” 機械工業雜誌 · 2010.1月
3. 張國樑 · 高速馬達伺服控制網路發展趨勢 · Motor Express · no. 228, 2007, pp. 1-7
4. 張國樑 · 以 CANOpen 協定馬達同步運動控制 Motor Express, no. 219 · 2007, pp. 1-7
5. Wolfhard Lawrenz "CAN System Engineering" from Theory to Practical Applications · Springer · 1997
6. CANOpen, Communication Profile for Industrial Systems based on CAL Draft Standard 301,Version3.0, 96
7. CiA Draft Standard Proposal DSP 402, Version1.0 Device Profiles Drives and Motion Control, 1997