

機械手臂控制器之可程式系統晶片設計與實現

林穎宏¹ 蔡政哲²

¹長榮大學科技與工程管理學系

²長榮大學資訊管理研究所

711 台南縣歸仁鄉長榮路一段 396 號

摘要

本文應用可程式系統晶片 (system on programmable chip, SOPC) 技術設計與實現一機械手臂控制器以控制機械手臂夾取空間中物體至定點, 控制器控制之裝置包括一六軸機械手臂以執行夾物動作、兩組 CCD (charge coupled device) 模組以擷取物體影像進而判定物體空間座標值。控制器採用 ALTERA 公司的 Cyclone II FPGA 實現, 其中包括: (1) NIOS II 軟核處理器與自定義之 PWM 訊號產生周邊: NIOS II 用以執行物體空間座標定位、物體空間座標值轉為機械手臂中伺服馬達之轉動角度的 D-H 演算法, 此後將轉動角度送至自定義之 PWM 訊號產生周邊以產生 PWM 訊號驅動機械手臂。(2) CCD 控制模組: 此模組使用硬體描述語言設計, 控制 CCD 進行影像擷取, 並將擷取之影像轉換為灰階存至 FPGA 外的 SDRAM 中以供 NIOS II 取用。所實現之控制器經實體測試可達控制機械手臂夾物至定點功能。

關鍵詞: FPGA, 可程式系統晶片 (SOPC), 機械手臂控制器, 影像擷取

Design and Implementation of a Controller for Robotic Manipulator Using SOPC

YING-HONG LIN¹ and ZHENG-ZHE CAI²

¹Engineering & Management of Advanced Technology Department, Chang Jung Christian University

²Graduate Institute of Information Management, Chang Jung Christian University

No.396, Sec.1, Chang Jung Rd., Tainan, Taiwan 711, R.O.C.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a controller using the system on programmable chip (SOPC) technology for controlling a robotic manipulator to fetch an object in space to a fixed position. The controlled devices for this controller include a six-axis robotic manipulator to perform fetching tasks, and two CCD modules for capturing images of the object to determine its coordinates in space. The controller was implemented in an Altera CYCLONE II FPGA that includes: (1) a NIOS II soft processor and customized PWM signal generation peripherals (the NIOS II is used to execute programs for locating coordinates of an object in space, performing a D-H algorithm that transforms coordinates to rotating angles for six servos on the robotic manipulator and, moreover, delivering the rotating angles to customized PWM signal generation peripherals to generate

PWM waves for driving the robotic manipulator; (2) a CCD control module, designed by the hardware description language (HDL), which is used for controlling processes of image capturing, turning the captured images into grayscale, and saving the images into SDRAM outside of FPGA (which also allows NIOS II to gain access). Field tests on the controller achieved the expected function of controlling the robotic manipulator to fetch an object in space to a fixed position.

Key Words: FPGA, SOPC, robotic manipulator controller, image capture

一、前言

由於科技的進步，自動化設備及電腦視覺應用的趨勢逐漸明顯，在工業領域中，利用電腦視覺進行物體空間定位之技術已占有相當重要的角色，主要的優點為非接觸式的測距、目標物可在不受外力影響下取得其位置座標，另一方面，機械手臂是工業上常見的自動化設備，機械手臂的控制需要搭配許多感測器、周邊電路與多軸馬達控制，所以使用現成的微控器或 DSP 晶片實現控制器可能無法滿足設計所需的資源或效能 [8, 10, 13]。

FPGA (field programmable gate array, FPGA) 是一可規劃的邏輯元件，伴隨著半導體製程技術的進步，單一 FPGA 已可容納百萬邏輯閘，使得 FPGA 所能實現的功能愈來愈強，普遍應用於各領域 [11]。FPGA 具有許多 IO 腳位與邏輯資源可使用，具有平行處理之能力，所以使用者可使用單一 FPGA 完成所需之控制系統，相較於 DSP 或微控器，這些特性已引起數位控制應用的注意 [9, 12]。現今，可程式系統晶片 (system on programmable chip, SOPC) 技術發展迅速，其為於 FPGA 上實現的系統設計與軟硬體整合設計技術 [1-2]，使用 SOPC 方式可快速地將智財 (intellectual property) (如處理器、周邊模組及自定義邏輯電路..等) 嵌入一 FPGA 內，並進行軟體設計，以達可規劃之軟/硬體系統的設計。這種設計方式具有設計快速及系統再修改彈性等優點，是許多雛形設計的最佳選擇。

過去，已有許多應用 SOPC 技術於控制器的設計與實現論文發表 [5-7]，本文使用 SOPC 技術以設計與實現機械手臂控制器，展示應用 SOPC 技術於機械手臂控制應用之優點，文中實現一 SOPC 控制晶片執行機械手臂之控制，控制器控制之裝置包含六軸機械手臂以執行夾物動作、兩組 CCD (charge coupled device) 模組以擷取物體影像進而判定空間座標值，SOPC 系統配置包括參部份：(1) NIOS II 處理器用以執行物體空間座標定位、D-H 演算法將物體之座標值轉換為機械手臂中伺服馬達所需之轉動角度；(2) 自定義

之 PWM 訊號產生周邊是以硬體描述語言設計，其功能為產生機械手臂六顆關節伺服馬達轉動所需之 PWM 訊號，此周邊接收來自 NIOS II 處理器所提供之轉動角度後將產生相對應之 PWM 訊號；(3) CCD 控制模組：此模組是以 VHDL (VHSIC hardware description language, VHDL) 設計，其功能為接收來自 NIOS II 處理器之命令以選擇 X-Y 及 Y-Z 平面影像之擷取，並將擷取之影像轉換為灰階存至 SDRAM，以供 NIOS II 處理器使用。

本文所使用之低單價六軸機械手臂如圖 1 所示，其結構是由六顆伺服馬達所組成，伺服馬達規格如表 1 所示，位於關節 1 和關節 2 上的伺服馬達型號為 HS-805BB；關節 3 伺服馬達型號為 HS-645MG；其餘關節之伺服馬達型號均是 HS-475HB。各關節伺服馬達採用週期為 20ms 的 PWM 訊號控制，PWM 訊號其脈波寬度介於 0.9 ms 至 2.1 ms (轉動角度 -45~45 度) 為其最準確之控制轉動範圍，藉由 PWM 訊號脈波寬度的不同，以開迴路方式控制伺服馬達轉動至所需位置。使用之 CCD 模組如圖 2 所示，為友晶科技的 TRDB_DC2 130 萬像素子卡，其內含一 130 萬畫素之 CCD 影像感測元件。使用之 FPGA 為裝置於友晶科技 DE2 實驗板上 ALTERA cyclone II EP2C35F672C6 FPGA，DE2 實驗板如圖 3 所示。



圖 1. 低價六軸機械手臂

表 1. 伺服馬達規格

伺服馬達型號			
	HS-475HB	HS-645MG	HS-805BB
品牌	Hitec		
使用說明	脈波數據	1. 脈波寬度是以 1.5 ms 作為中心（轉動角度 0 度），其延伸範圍為 0.9 ms 至 2.1 ms（轉動角度 -45 至 45 度）。 2. 脈波週期為 20 ms。	
	電壓範圍	工作電壓介於 4.8 至 6.0V 之間。	
	旋轉方向	順時針方向旋轉。	



圖 2. CCD 模組

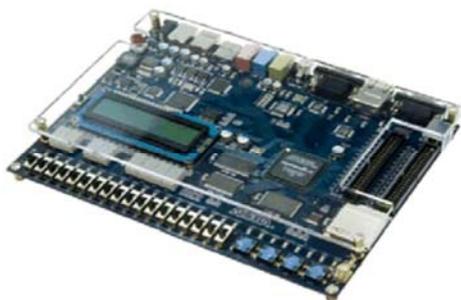


圖 3. DE2 實驗板

二、SOPC 控制晶片之設計

(一) 硬體架構與系統流程

機械手臂控制器之 SOPC 架構如圖 4 所示，CCD 控制模組硬體接收由 NIOS II 發送之控制訊號，可選擇擷取 X-Y 及 Y-Z 平面之影像並轉成灰階，進而將影像由 SDRAM 控制器存入 FPGA 外的 SDRAM，SDRAM 控制器將接收由 NIOS II 發送之控制訊號，將影像讀入至 NIOS II 內進行物體座標定位，產生物體所在之空間座標，NIOS II 中會對此

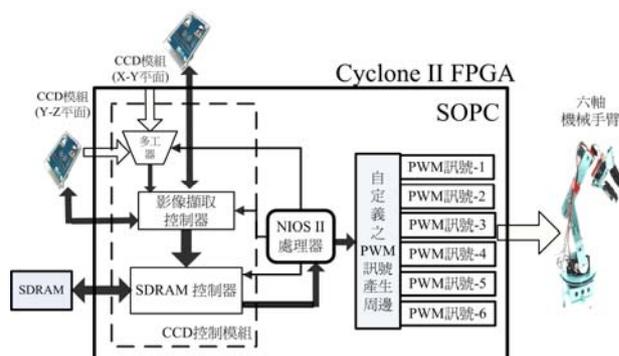


圖 4. 控制器之 SOPC 架構

座標進行 D-H 演算法運算，產生機械手臂伺服馬達所需轉動的角度，此後將此轉動角度送至自定義之 PWM 訊號產生周邊，以產生相對應之 PWM 訊號，便可控制機械手臂達夾物至定點之目的。

圖 5 為控制器之控制流程，首先由 NIOS II 處理器發送訊號控制 CCD 控制模組以擷取 X-Y 平面之影像並存入 SDRAM，之後 NIOS II 處理器將由 SDRAM 中將灰階影像讀入進行物體 X-Y 平面座標定位，此後，NIOS II 處理器再發送控制訊號以控制 CCD 控制模組擷取 Y-Z 平面之影像並存入 SDRAM，之後將灰階影像由 SDRAM 讀入至 NIOS II 處理器，以執行物體 Y-Z 平面座標定位，其中 Y-Z 平面座標之 Y 值即為物體在空間中的高度，即為 Z 軸之座標值。此後將儲存之 X-Y 座標及 Z 座標於 NIOS II 處理器中執行 D-H 演算法，計算機械手臂中伺服馬達所需轉動之角度，將此轉動角度送至自定義之 PWM 訊號產生周邊，以產生相對應之 PWM 訊號，驅動機械手臂開始執行夾取空間之物體，取得物體後，機械手臂便回到終點位置將物體放下，並回到初始位置。

(二) SOPC 硬體模組說明

1. CCD 模組控制

此模組用以控制 CCD 模組執行影像擷取，並將擷取之影像轉換為灰階存至 FPGA 外的 SDRAM 中以供 NIOS II 取用，CCD 控制模組方塊圖如圖 6 所示，此模組使用硬體描述語言設計，為擴充修改友晶科技公司之矽智財所得。CCD 控制模組以 I2C 協定控制 CCD 模組，由圖 6 中的 I2C 模組產生所需的控制訊號，而 CCD data Capture 擷取 CCD 模組所拍攝之影像。當資料擷取後，影像資料為 RAW 格式，此後將所擷取之影像先轉換成 RGB 格式後再轉為灰階影像，

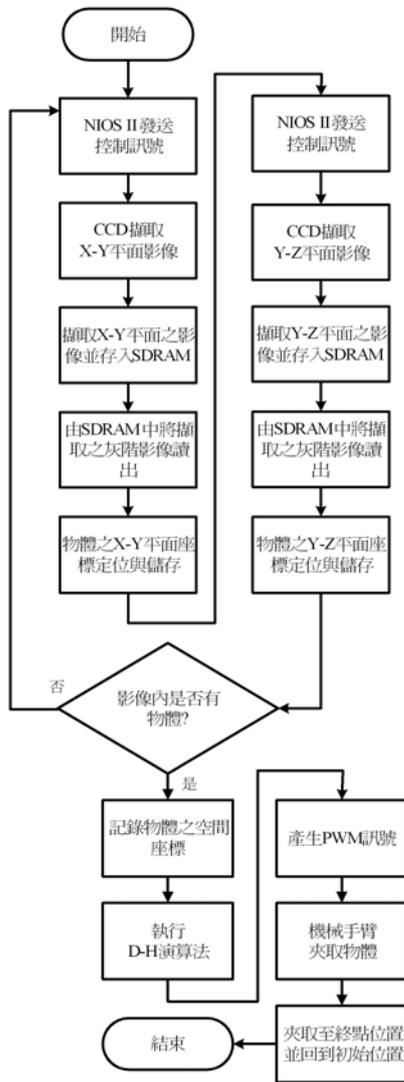


圖 5. 系統流程圖

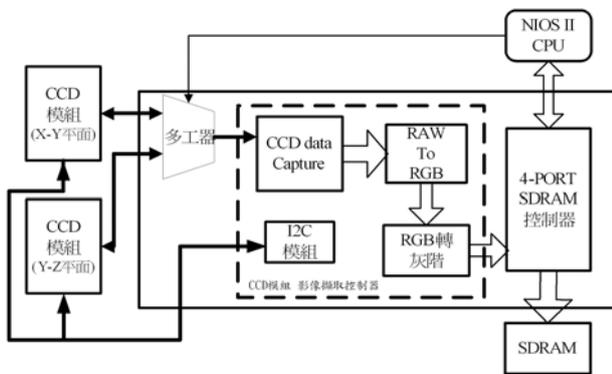


圖 6. CCD 控制模組方塊圖

轉換後的資料經由 SDRAM 控制器存入 SDRAM 中。其中使用一多工器以選擇所要使用的 CCD 模組。SDRAM 控制

器將接收由 NIOS II 處理器發送之控制訊號，此訊號控制 SDRAM 控制器於上升緣時，將儲存於 SDRAM 中的灰階影像讀出至輸出埠，此後，NIOS II 處理器將像素值讀入並進行物體座標定位。

2. NIOS II 系統配置

本文所使用之 32 位元 NIOS II 處理器系統配置如圖 7 所示，其中 Avalon Bus 定義 NIOS II 和周邊進行資料傳輸的規範，SOPC 技術的優點在於使用者可根據需求來調整處理器效能與使用之周邊，所使用之周邊包括 4 個內建 PIO 周邊與 6 個自定義 PWM 訊號產生周邊，分別說明如下：(1) CCD 模組選擇 PIO 周邊：用以指定 CCD 控制模組選擇 X-Y 或 Y-Z 平面 CCD 模組以擷取影像；(2) 影像擷取控制 PIO 周邊：用以控制 CCD 控制模組開始執行影像擷取；(3) 影像讀入 PIO 周邊：作為灰階影像中每個 8 位元像素的輸入埠；(4) SDRAM 讀取控制 PIO 周邊：此 PIO 提供脈波訊號給 SDRAM 控制器以將 SDRAM 中的灰階影像之每個像素讀出。(5) PWM 訊號產生周邊：接收來自 NIOS II 的伺服馬達轉動角度命令，產生相對應所需的 PWM 訊號。上述周邊需透過 Avalon Bus 和 NIOS II 進行資料傳輸。

3. 自定義之 PWM 波形產生周邊

本文以硬體描述語言設計 PWM 波形產生周邊，其為一 Avalon slave 裝置，介面符合 Avalon bus 的規範 [4]。自定義之 PWM 波形產生周邊其架構如圖 8 所示。其中使用兩個 32 位元暫存器：(1) PWM 週期暫存器：因控制伺服馬達所需之 PWM 訊號的週期為 20 ms，且 SOPC 所使用之 clock 為 50MHz，故此週期暫存器存放的值為一百萬，當上數計數器的值達 PWM 週期暫存器所存放的值時，則重置計數器

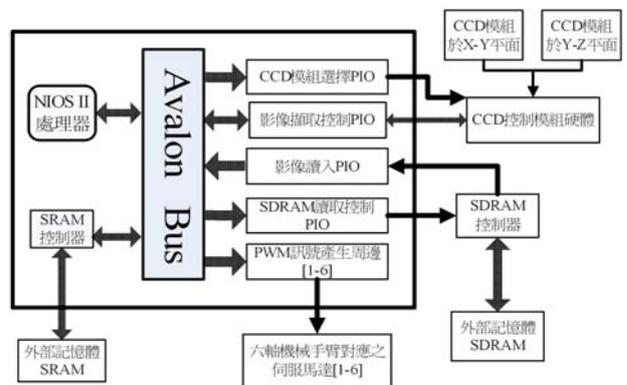


圖 7. NIOS II 系統配置圖

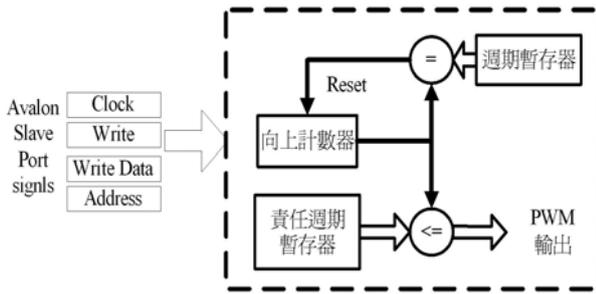


圖 8. PWM 波形產生周邊之架構

的值為零。(2) PWM 責任周期 (duty cycle) 暫存器：此暫存器之值可由 NIOS II 設定，用以控制 PWM 訊號之責任周期，本文藉由測試伺服馬達得知當責任周期於 0.55~0.95 (轉動角度 -45~45 度) 為其最準確之範圍，且 SOPC 所使用之 clock 為 50 MHz，故此責任週期暫存器存放的值介於 55000 至 95000。當上數計數器小於等於責任週期暫存器的值，計數器將繼續累加，並將 PWM 輸出設為 1，反之，PWM 輸出設為 0。

上述電路均於一系統晶片內，其使用的 Les (Logic Elements) 約為 5700 個，其中 CCD 控制模組 (包含影像擷取控制電路) 約為 2800 個，PWM 電路約為 30 個，NIOS II 處理器約為 2870 個。

(三) 軟體控制說明

本文於 SOPC 中使用 uC/OS 作業系統，在此作業系統平台上進行軟體設計，利用 uC/OS 作業系統之訊息郵箱 (Mailbox) 以完成軟體間資料的傳輸，圖 9 為所使用之 Task 與各 Task 間資料傳輸關係圖，使用的 Task 有四個，分別說明如下：

Task1：本文實驗環境為一白色背景與黑色物體，且存於 SDRAM 中的灰階影像為 640×480 格式，故程式中宣告一 640×480 矩陣 Mat 以存放各像素之顏色判定

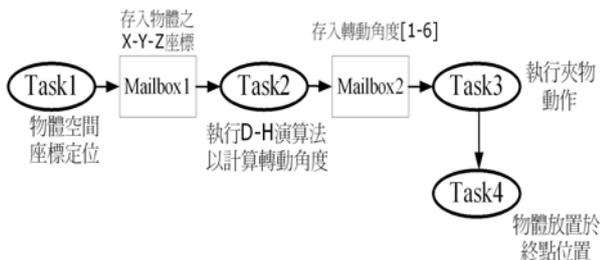


圖 9. Task 間之資料傳輸關係圖

結果，如灰階像素的值小於 128 則判定為黑色，於 Mat 中對應位置存入 1，反之，則存入 0。執行 X-Y 或 Y-Z 平面之物體座標定位虛擬碼如下所示，其中 (j_ave, i_ave) 即為物體之座標：

```

for (i=0;i<480;i++)
for (j=0;j<640;j++)
    {從 SDRAM 讀入[j][i]位置之灰階像素;
    if ([j][i]位置像素<128) then Mat[j][i]=1;
    else Mat[j][i]=0;
    }
}
宣告 j_total=0;i_total=0; num=0;j_ave;i_ave
for(i=0;i<480;i++)
for (j=0;j<640;j++)
    {if (Mat[j][i]=1) then
    {
    j_total= j_total+j;
    i_total= i_total+i;
    num=num+1;
    }
    }
j_ave= floor(j_total/num);
i_ave=floor(i_total/num);

```

經由 X-Y 平面物體座標定位可得物體空間座標之 X-Y 座標值，經由 Y-Z 平面物體座標定位後，取出 Y 座標值可得物體空間座標之 Z 值，將此空間座標存入 MailBox 1 以供 Task2 使用；

Task2：由 MailBox 1 取得 X-Y-Z 座標後，執行 D-H (DENAVIT-HARTENBERG, D-H) 演算法 [3] 以計算伺服馬達應轉動之角度，D-H 演算法介紹如下：為做出可使機械手臂運動的運動學方程式，必須先導出此機械手臂的運動學與逆運動學方程式，也就是一般機械手臂之機構連桿間的數學描述式，根據 D-H 表示法，定義出六軸機械手臂座標系統如圖 10 所示。

本文所使用六軸機械手臂座標系之參數是根據 [3] 所定義，D-H 演算法中各軸之參數值如表 2 所示，其中參數 θ 為機械手臂中，連桿之間的角度；參數 d 表示連桿之間的距離；參數 a 表示連桿的長度；參數 α 值表示連桿的扭轉角度。將六軸機械手臂座標系參數值定義後，接著利用 D-H 演算法推算機械手臂的運動矩陣，以便定義出整個空間座標

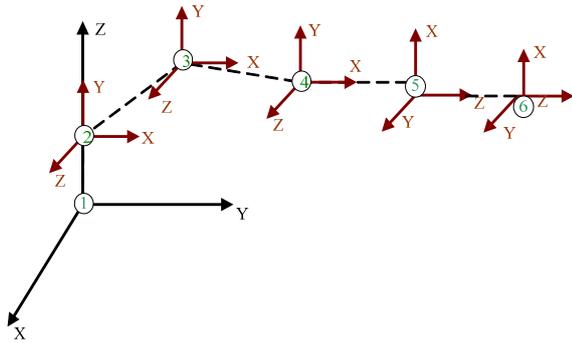


圖 10. 六軸機械手臂之座標系統

表 2. D-H 表示法表示各關節的參數值

#	θ	d	a	α
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	15.0	0
3	θ_3	0	12.05	0
4	θ_4	0	15.0	-90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	0	0	0

與機械手臂關節之間的伺服馬達角度轉換公式。

機械手臂位置與方向座標系統的轉換矩陣表示如下，其中 P_x 、 P_y 、 P_z 為物體所在之 X-Y-Z 座標值， n_i 、 o_i 、 a_k 則是一個物體在固定參考座標系所代表的座標分量， n_i 代表法線向量、 o_i 代表指向向量、 a_k 代表接近向量。每一個單位向量都由各自所在的參考座標系之三成分量表示，是所有機械手臂關節所組合的矩陣，可由此矩陣並根據正、逆運動學求出每顆馬達所需轉動的角度，表示如下：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * {}^4T_5 * {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

定義整個機械手臂的運動矩陣後，接著可利用逆運動推算六顆伺服馬達各自的角度公式解，利用矩陣去左右同乘反矩陣，再比較兩矩陣中各元素來推導反運動學，產生角度的正弦值及餘弦值，各軸關節角度將由矩陣推導求解，求解後即為伺服馬達應之轉動角度並將其存入 MailBox2 以供 Task3 取用。

Task3：將轉動角度由 MailBox2 取出再送至自定義之 PWM 訊號產生周邊，產生對應之 PWM 訊號以驅動機械

手臂，使其執行夾取物體之動作。

Task4：機械手臂執行完夾取空間物體後，執行將物體放置於終點位置，並回到初始位置。

三、實驗環境與結果

本文應用可程式系統晶片設計與實現一機械手臂控制器，實體測試環境如圖 11 所示，各關節伺服馬達於 0 度時為機械手臂的初始位置如圖 11 所示，機械手臂上方架設一 CCD 模組，此模組拍攝平面為 X-Y 平面，右方 CCD 模組之拍攝平面為 Y-Z 平面，手臂可夾取範圍於 X-Y 平面為座標 (40,50) 至 (-40,20)，於 Y-Z 平面可夾取範圍為座標 (50,20) 至 (20,-20)，測試時在空間中放置一個黑色物體，以驗證其夾取空間物體之控制功能，當機械手臂取得空間物體所在座標時，其移動狀況如圖 12 及圖 13 所示，夾取物體後機械手臂將物體放置於一定點如圖 14 所示，經由將物體放置於不同位置的數次測試，在機械手臂可夾取之範圍及 CCD 模組有效拍攝之範圍（座標 (0,0) 至 (640,480)）之交集內均可準確夾取到空間中之物體。執行夾取空間中物體所需之時間（圖 5 系統流程圖中執行一個週期所需時間）平均值約為 2 秒，此所需的時間中包括：影像擷取所需時間、物體座標定位所需時間、D-H 演算法計算所需時間、關節伺服馬達驅動時所需加入之延遲時間、關節伺服馬達轉動所需時間。由於機械手臂的關節伺服馬達於驅動時需採循序方式（即先驅動第一顆馬達後再驅動第二顆...），無法同時驅動以避免機械手臂過大晃動，故需於各馬達驅動時加入一延遲時間（5 ms）。

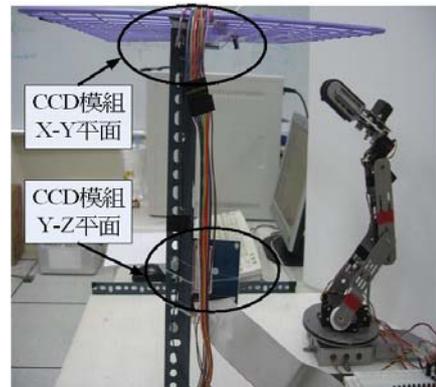


圖 11. 控制器實體測試環境

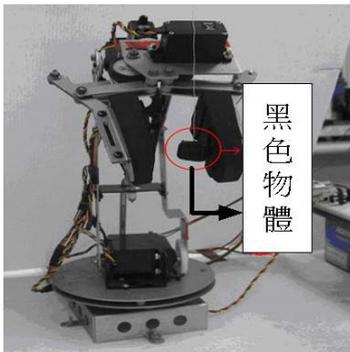


圖 12. 機械手臂到達物體位置

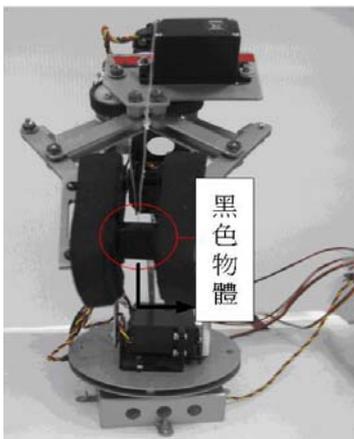


圖 13. 機械手臂夾取空間物體

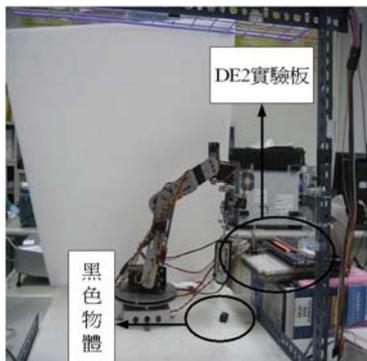


圖 14. 機械手臂將物體放置於一定點

四、結論與討論

本文以 SOPC 技術設計與實現一機械手臂控制器，控制機械手臂自動夾取空間的物體，經過多次的模擬與測試，已完成一基本的平台雛形。所完成之系統可自動辨識空間物體

之座標，並將此座標轉換為機械手臂伺服馬達之轉動角度，驅動機械手臂完成夾物至定點之功能。在實體測試發現，當空間物體位於拍攝畫面之邊緣位置時，CCD 模組拍攝之成像會呈現歪斜，導致物體座標定位誤差而夾不到物體，其原因為 CCD 模組上之鏡頭是以凸面鏡製成，導致在畫面邊緣之空間物體在座標定位上產生誤差，故本文在實體測試上，必須將物體置於限定之範圍內，方可準確的夾取空間物體。

參考文獻

1. 周立功等編著 (民 95)，SOPC 嵌入式系統基礎教程，北京航空航天大學出版社，北京。
2. 周立功等編著 (民 95)，SOPC 嵌入式系統實驗教程 (一)，北京航空航天大學出版社，北京。
3. 孫富春、朱紀洪、劉國棟等著 (民 99)，機器人學導論—分析、系統及應用，電子工業出版社，北京。
4. 徐光輝、程東旭、黃如等編著 (民 95)，基於 FPGA 的嵌入式開發與應用，電子工業出版社，北京。
5. 黃國勝、童文宗 (民 96)，以 SOPC 建構嵌入式智慧型機器人，國立中正大學電機工程研究所碩士論文。
6. 蔡清池、吳政叡 (民 97)，四輪全方位導覽機器人之適應性動態移動控制與 SoPC 實現，國立中興大學電機工程研究所碩士論文，台中。
7. 龔應時、楊氏原 (民 97)，以 SoPC 為基礎關節型機械手臂之類神經自調式 PID 控制器之研製，南台科技大學電機工程系碩士論文，台南。
8. Kabuka, M, P. Glaskowsky and J. Miranda (1988) Microcontroller-based architecture for control of a six joints robot arm. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 35(2), 217-221.
9. Kung, Y. S., K. H. Tseng, C. S. Chen, H. Z. Sze and A. P. Wang (2006) FPGA implementation of inverse kinematics and servo controller for robot manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China.
10. Lin, C. Y. and Y. P. Chiu (2008) The DSP based catcher robot system with stereo vision. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Xian, China.
11. Rodriguez-Andina, J. J., M. J. Moure and M. D. Valdes (2007) Features, design tools, and Application domains of

-
- FPGAs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(4), 1810-1822.
12. Xu, M., W. Zhu and Y. Zou (2008) Design of a reconfigurable robot controller based on FPGA. Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing, Beijing, China.
13. Yasuda, G (2000) Microcontroller Implementation for Distributed Motion Control of Mobile Robots. Proceeding of International workshop on Advanced Motion Control, Nagoya, Japan.
- 收件：99.04.12 修正：99.07.28 接受：99.09.29