

教學用開源型可程式四軸機器手臂之研究與開發

林立¹、凌振翔²、宋旗桂*

^{1,2} 國立高雄科技大學機電工程系

*國立高雄科技大學博雅教育中心

摘要

機械自動化技術已漸漸普及於日常生活，從咖啡沖泡、果汁榨取及寵物餵養等，為人們解決了許多瑣碎事務。國內工業 4.0 的轉型讓我們進展到人機協作的新工作模式，大幅提高生產力，越來越複雜的功能要求，對相關人才的培養成為一大考驗。國內機械自動化人才養成的教學過程中，往往因缺乏相關教學設備進行實作，間接削減了學生對機械自動化學習的動機與興趣。本研究為解決上述問題，整合機構設計基本理論、3D 製圖/列印技術及伺服程式控制技術，研發具備智慧顏色識別分類模式、電阻式手動操作模式及馬達角度監控模式之開源型可程式四軸機器手臂，提供師生自行下載、列印與組裝，作為機械自動化基礎控制理論的教學與探討。

關鍵詞：機械自動化、機器手臂、3D 列印、教學

一、前言

機器手臂常被應用於工業中的危險與乏味之工作（焊接、噴漆、裝配與搬運），以提昇產業效能及減少工安意外的發生。全球機器人聯盟(IFR) 2021 年 1 月 27 日公布，新加坡、韓國與日本為全球工業機器人密度最高的前三國家，臺灣在該份報告中排名世界第八，而報告中也指出工業機器人的出貨數量自 2009 年不斷攀升，到了 2018 年甚至是 2009 年的 7 倍，不難看出全球自動化產業興起之趨勢[1]。為使機械手臂在短時間內「熟悉環境」完成產線上的定位架設，Agrawal 等人[2]以不同的閃光燈下拍攝圖像並觀察場景中的陰影、深度邊緣或輪廓，找到粗略的 3D 姿勢，再以姿態估計算法的完全投影公式來細化姿態，從而使機器人能夠拾取物體。Guo Shuai 等人[3]找出並分析影響全向系統運動精度的運動學方程參數，解決參數誤差

的方法包括(1)方程運算，得到相對誤差方程。(2)通過實驗得到系統的位移誤差，並將誤差結果與運動學方程推導相結合，以兩種方法求解幾何參數誤差。(3)通過對比實驗驗證其有效性。

為了滿足機械自動化相關人才的培育與需求，根據教育部統計處統計，2018 年台灣工業類高職學生有 105,365 人，而技專校院入學測驗中心統計之電機與電子群、動機群和機械群統測報考有 28,574 人[4,5]，且根據 yes123 求職網與遠見雜誌合作調查，2018 年工程相關科系(含資訊、電子、電機、機械、材料等)畢業後從事和所學無關之行業者，佔了整體的 40.4%[6]，若在高中職階段有相關的教具使其對機器手臂與控制有基本了解，便可有效提升學生學習動機與興趣，縮短學用落差。對初學者來說，機器手臂之相關控制與機構原理為一抽象概念，本研究研發

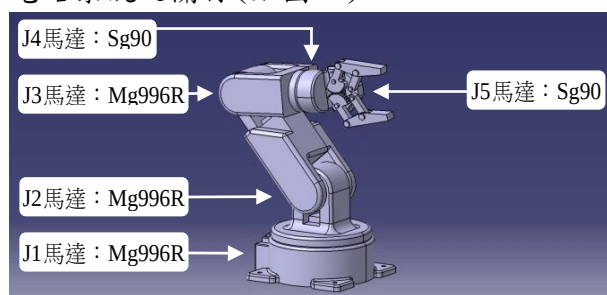
開源型可程式四軸機器手臂，解決國內機械自動化教學設備不足之困境。

顏儒銘[6]提出了 U 型結構機器手臂，結合 3D 列印可以達快速生產之目的。本研究設計之機器手臂參考了 U 型模組化結構的優點，重新設計更結實之凸型模組化結構，改善了 3D 列印所製造之部件存在著因剛性不佳，易於轉折處造成應力集中而損壞的問題。本研究以「低單價」、「易取得」、「易分析」與「易客製」為設計目標，選擇 3D 列印技術與簡易伺服馬達研發開源型可程式四軸機器手臂。

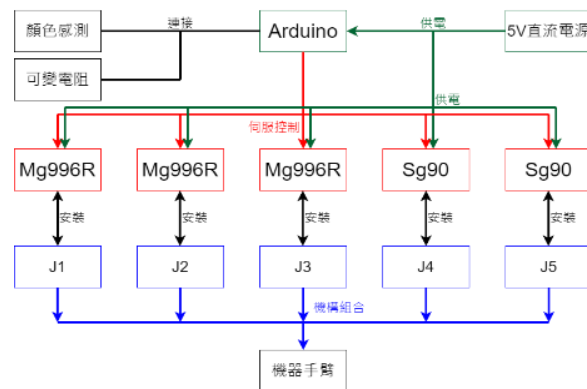
二、系統架構

本研究系統分為兩個部分，分別為機構系統與控制系統，機構系統使用 CATIA 軟體進行設計，其「組立件設計」功能與「數位模型機構運動分析」功能，可以模擬機器手臂動作時的姿態與檢查各構件是否有干涉問題；控制系統使用 Arduino 作為控制器驅動伺服馬達（3 台 Mg996R，供給 4.8V 時扭矩為 9.4kg·cm；2 台 Sg90，供給 4.8V 時扭矩為 1.4kg·cm）。

控制系統使用外部電源供給伺服馬達，除了避免 Arduino 板功率不足，且可以維持伺服馬達的動作穩定。本研究之機器手臂以 CATIA 三維模型機構運動分析進行功能組裝測試(如圖一)，機構系統與電路系統之關係(如圖二)。



圖一：機器手臂外觀



圖二：機構與電路系統圖

三、機構系統設計

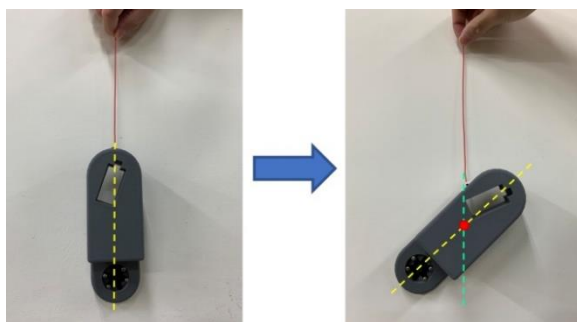
本研究開發之開源型可程式四軸機器手臂為針對初學者設計，為方便學生能分析其機械結構，手臂系統分為「底座」、「大臂」、「小臂」和「夾爪」等四項機構，並分別依功能需求與馬達尺寸進行組裝設計，以避免機構與馬達產生整合誤差。

1. 底座

底座是整個機器人的底部支撐，並以 J1 馬達(Mg996R)提供水平旋轉，需有極強剛性與穩定度。當機器手臂向前平伸時，將對底座連接大臂的 J2 馬達(Mg996R)施以最大力矩，故馬達需提供大於最大力矩之轉矩以驅動整支機器手臂[7]。其最大力矩可由式(1)求得：

$$L_T = F_i \times d_i \quad (1)$$

其中 L_T 為機器手臂空載時之最大力矩、 F_i 為機器手臂各個零組件之重量(不包含底座)， d_i 為馬達軸心與手臂各個零組件重心之距離，三維物體之重心位置可由垂線法求得(如圖三)[8]。



圖三：垂線法

經測量機器手臂各機構件的重量為：

$$F_{\text{底座}}=93\text{g}、F_{\text{大臂}}=70\text{g}、F_{\text{小臂}}=42\text{g}、F_{\text{夾爪}}=21\text{g}、F_{J3\text{馬達}}=56\text{g}、F_{J4\text{馬達}}=F_{J5\text{馬達}}=11\text{g}$$

機器手臂平伸時，各機構件的重心與底座中心之直線距離 d_i 為：

$$d_{\text{大臂}}=5.9\text{cm}、d_{\text{小臂}}=10.3\text{cm}、d_{\text{夾爪}}=19.3\text{cm}、d_{J3}=11.4\text{cm}、d_{J4}=18.2\text{cm}、d_{J5}=22.7\text{cm}、$$

將上述量測結果代入式(2)，可得機械手臂於空載情形下所需之最小轉矩：

$$\begin{aligned} L_{\text{Total}} = & F_{\text{大臂}} \times d_{\text{大臂}} + F_{\text{小臂}} \times d_{\text{小臂}} \\ & + F_{\text{夾爪}} \times d_{\text{夾爪}} + F_{J3\text{馬達}} \times d_{J3} \\ & + F_{J4\text{馬達}} \times d_{J4} + F_{J5\text{馬達}} \times d_{J5} \end{aligned}$$

(2)

$$\begin{aligned} L_T = & 70 \times 5.9 + 42 \times 10.3 \\ & + 21 \times 19.3 + 56 \times 11.4 \\ & + 11 \times 18.2 + 11 \times 22.7 \\ = & 2.339 \text{ (kg} \cdot \text{cm)} \end{aligned}$$

(3)

已知 J2 馬達(Mg996R)提供 4.8V 電壓可產生最大扭矩 $L_M=9.4\text{kg} \cdot \text{cm}$ ，且機器手臂平伸時，馬達軸心至夾取端距離 $d_g=30\text{cm}$ ，故最大夾取荷重 F_{Max} 為：

$$F_{\text{Max}} = \frac{L_M - L_T}{d_g} = \frac{9.4 - 2.339}{30} = 0.235(\text{kg})$$

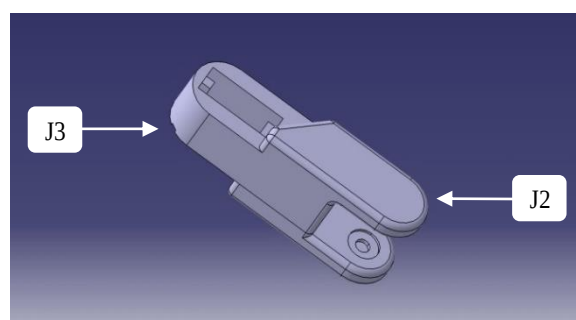
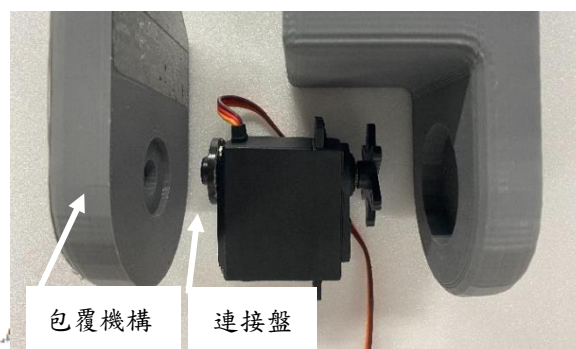
(4)

換言之，當待取物件重量小於 0.235kg 時，本研究之機械手臂可精確完成操作指令。

2. 大臂

大臂是機械手臂負荷最大的機構，可比擬為人體上臂處，其驅動馬達需承受機器手臂最大之震動與荷重，而大臂的驅動馬達需要承受的空載力矩已由式(3)求出。

工業機器手臂通常會安裝減速器，使轉矩提升的同時維持手臂等速運動以增加穩定性。本研究為了解決轉軸穩定性的問題，在馬達上扣合連接盤，再裝入機構中，同時在大臂側邊設計雙邊包覆機構，以組裝成一凸形結構(如圖四)，此雙邊包覆機構，於轉軸運動時可有效改善震動問題。

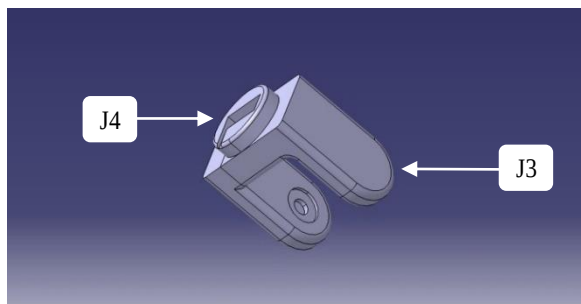


圖四：大臂機構圖

3. 小臂

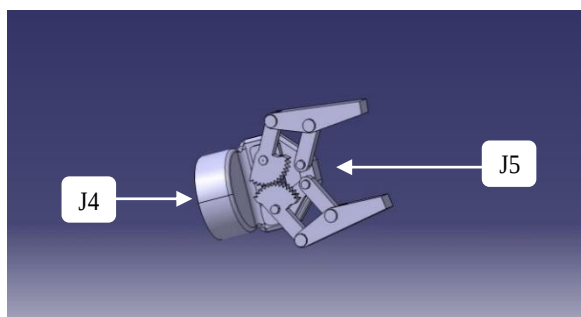
小臂接於大臂末端 J3 處(如圖一、五)，使用 J3 馬達(Mg996R)驅動小臂，前端連接夾爪形成腕關節(J4)，並使用 J4 馬達(Sg90)完成驅動。本機械手臂 J4 處無須

承受力矩，故選擇 Sg90 驅動腕關節。為求腕關節處穩定與抑制震動，同大臂使用雙邊包覆機構設計，可模擬人體手腕朝左右方向旋轉 90 度，以方便規劃夾取軌跡。



4. 夾爪

夾爪為本研究機器手臂之末端機構(如圖一、六)，由式(4)知夾爪端最大荷重為 0.235kg，故夾取軸 J5，使用 J5 馬達(Sg90)驅動夾爪。夾爪設計使用馬達正反轉帶動正齒輪及多連桿機構，使夾爪能開合反復作動。

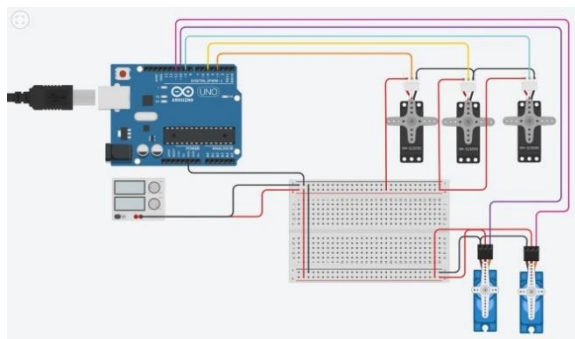


圖六：夾爪機構圖

四、控制系統設計

本研究使用 Arduino Mega 板做為伺服馬達之控制元件，電路設計(如圖七)。除訊號源的提供外，為避免 Arduino 板功率不足，並維持伺服馬達動作穩定，本研究對伺服馬達提供外加 5V 直流電源並將 Arduino GND 接點與 5V 直流電源供應器之負端共同接地。本研究開發之教材為開源型可程式四軸機器手臂，具備智慧顏色識別分類模式、電阻式手動操作模式及馬

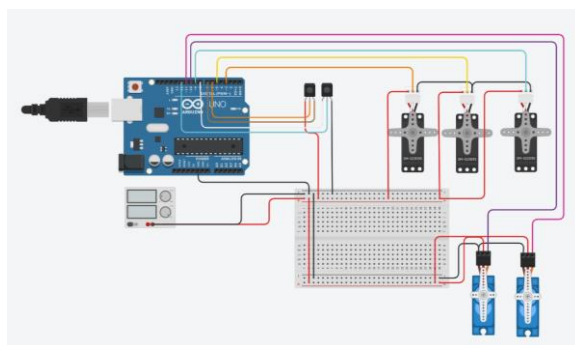
達角度監控模式，著重於機構設計及程式撰寫等機械自動化教學元素，可直接使用伺服馬達做驅動，進行精確的定位控制和路徑控制，可在實作中提高學生學習興趣。



圖七：伺服控制系統圖

1. 智慧顏色識別分類模式

智慧顏色識別分類模式使用 Arduino 顏色感測模組(TCS3200)判斷物品顏色後，可將各種顏色之物件完成分類與歸位。機械自動化的教學應用上，只需將物品貼上顏色鮮豔之標籤，即可使機器手臂自動夾取物品並放於指定處，智慧顏色識別分類模式系統接線圖(如圖八)。

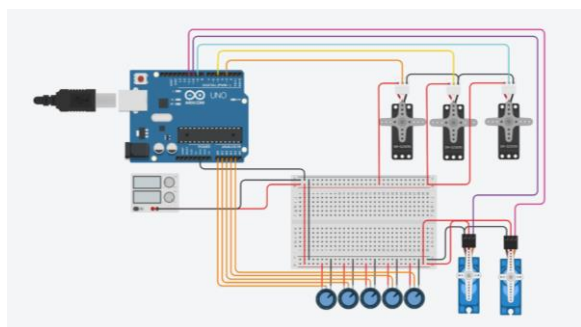


圖八：智慧顏色識別分類模式接線圖

2. 電阻式手動操作模式

電阻式手動操作模式使用 Arduino 之 ADC port(如圖九)，可手動旋轉可變電阻，利用 map 函式讀取可變電阻上之電壓降(如圖十)，轉換為伺服馬達角度並送出

訊號使伺服馬達旋轉至指定角度，在教學上可使學生了解機器手臂運行路徑之機構設計與原理[9]。



圖九：手動模式系統接線圖

```
void loop()
{
  val1 = analogRead(R1);
  val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 179);
  servo1.write(val1); //

  val2 = analogRead(R2); //讀取電位器控制的模擬值 (範圍在0-1023)
  val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 179);
  servo2.write(val2); // 指定伺服馬達轉向的角度

  val3 = analogRead(R3); //讀取電位器控制的模擬值 (範圍在0-1023)
  val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 179);
  servo3.write(val3); // 指定伺服馬達轉向的角度 |

  val4 = analogRead(R4); //讀取電位器控制的模擬值 (範圍在0-1023)
  val4 = map(val4, 0, 1023, 0, 179);
  servo4.write(val4); // 指定伺服馬達轉向的角度

  val5 = analogRead(R5); //讀取電位器控制的模擬值 (範圍在0-1023)
  val5 = map(val5, 0, 1023, 0, 179);
  servo5.write(val5); // 指定伺服馬達轉向的角度
  delay(15);
}
```

圖十：手動模式系統程式碼

3. 馬達角度監控模式

馬達角度監控模式使用 Serial 函式進行資料傳輸與接收(如圖十一)，利用序列阜監控視窗之輸入欄位，可手動鍵入各軸角度，並傳輸至 Arduino，使機器手臂旋轉至該角度，且可即時監控並觀察機器手臂各軸馬達之旋轉角度。

```
#include <Servo.h>
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
int Code;
int SIETA;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.setTimeout(10);
  servo1.attach(3);

  void loop() {
    while(Serial.available()) {
      Code = Serial.parseInt();
      SIETA = Serial.parseInt();
    }
    Serial.print(Code);
    Serial.print(" , ");
    Serial.println(SIETA);
    servo.write(Code);
    delay(200);
  }
}
```

圖十一：馬達角度監控模式程式碼

五、系統整合

本研究在機器手臂軟體與硬體之整合過程中，所遭遇之相關問題皆在本節進行討論。

1. 電阻式手動操作模式異常排除

本研究使用電阻式手動操作模式進行系統測試時，發現 Mg996R 伺服馬達在可變電阻旋轉接近最大值時會有抖動的問題。

為了找出原因，使用 Serial 函式撰寫監控程式(如圖十二)，透過序列阜進行數值觀察(如圖十三、十四)，並使用三用電表(MT-2017N)量測電阻值，發現可變電阻(WH148 B100k)由小至大的調整過程中，當電阻小於 86k Ω 時，序列阜之數值變化量約佔總值 2.3%(如圖十三)，當電阻在 86k Ω 至 95k Ω 間，序列阜之數值變化量約佔總值 24.4%(如圖十四)，但當電阻大於

95k Ω 時，序列阜之數值變化量便恢復至總值的2.3%。由於Arduino輸入至伺服馬達角度訊號的不穩定，進而導致伺服馬達在角度的轉動上造成劇烈抖動。經測試後判斷原因為連接線所存在的背景雜訊干擾，本研究將連接線換成單芯線後即減少數值跳動之頻率。

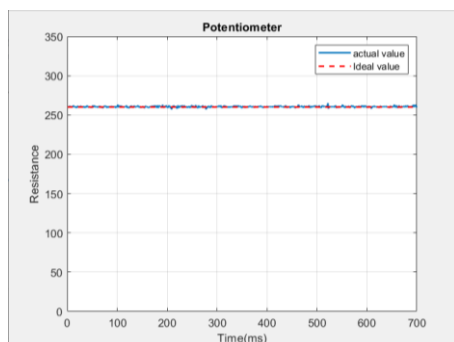
```
const byte RPin = A0;
int R;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

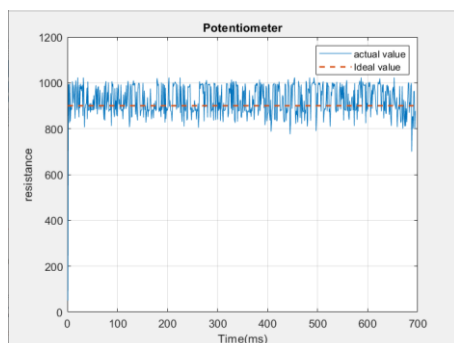
void loop() {

  R = analogRead(RPin);
  Serial.println(RPin);
  delay(500);
}
```

圖十二：Serial 監控程式



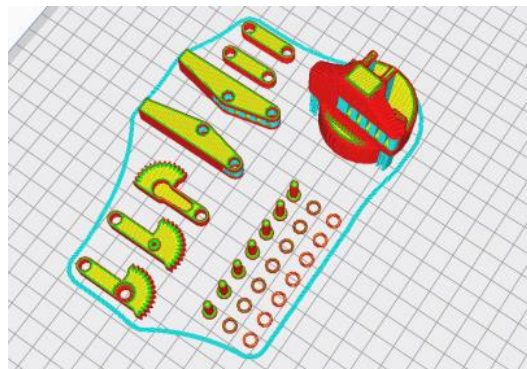
圖十三：25k Ω 時，序列阜之數值變化



圖十四：88k Ω 時，序列阜之數值變化

2. 3D 列印機構異常排除

本研究使用 CATIA 設計機器手臂各部機構後，並將檔案匯入 Cura 切片軟體行轉檔，再輸入至 3D 列印機台中進行列印(如圖十五)。



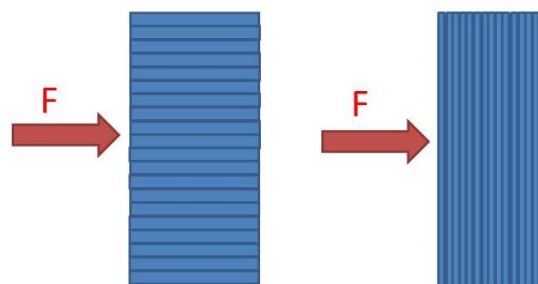
圖十五：Cura 切片預覽

本研究使用熔融擠製(FDM)[10] 3D 列印機台，在試印的過程中發現了兩點問題：(1)大臂的馬達接合處尺寸不合，(2)夾爪連桿扣件易斷裂。

由於列印時支撐材出現在馬達接合面上，導致 3D 列印時與後處理皆易造成誤差。解決辦法為將馬達接合面朝上，可避免支撐材所造成之誤差，並將支撐內部密度降低，減少後處理對工件的損傷。

夾爪連桿扣件是較精密之工件，防止斷裂之辦法為：

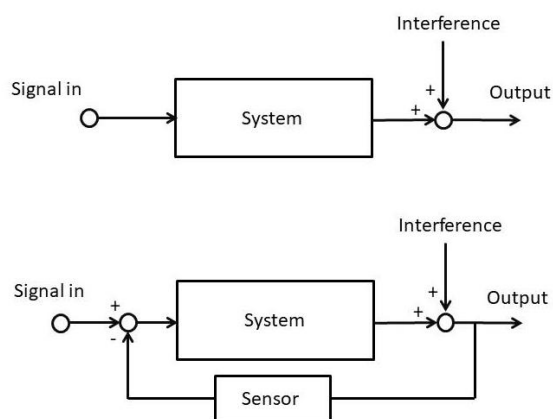
1. 將工件內部填充率提高以增強其強度
2. 翻轉工件，使其加法製造時接合處與應力垂直(如圖十六)
3. 降低列印速度，讓接合時間延長增加工件硬度
4. 提高噴頭溫度，使接合處可充分接合



圖十六：應力對 3D 列印件接合處示意圖

3. 伺服馬達位置控制

以精密伺服運動控制而言，一般皆使用位置迴路控制，而為求系統之穩定與精度，大都安裝相關感測器進行閉迴路(close-loop control)控制(如圖十七)。



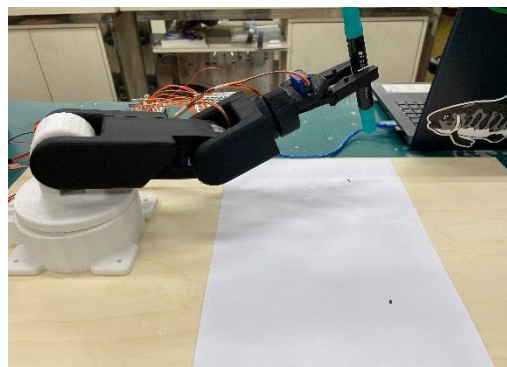
圖十七：開迴路與閉迴路

本研究將控制訊號由 Arduino 直接送入各個伺服馬達，再將伺服馬達之作動角度進行前後比對與補償後，分段送入各個伺服馬達中，使機械手臂精確的運動到指定位置。本研究有效以程式控制的方式取代感測器完成機械手臂的開迴路控制(open-loop control)設計[11]，大幅減少製造成本的同時，亦兼顧機械手臂的準確度。

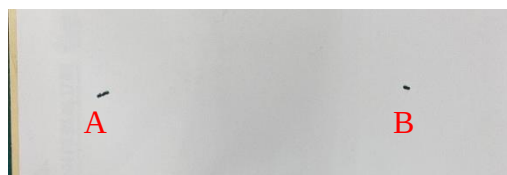
六、實際測試

本研究之機器手臂主要做為機械自動化相關課程的學習教材，為模擬產線精密製造之應用，本研究對機器手臂進行精度誤差測試(如圖十八)。測試方法為撰寫機器手臂控制程式，使其在相距 18cm 之 A、B 兩點執行往復運動，同時記錄每次運動之落點位置並量測其誤差範圍。測試結果如下：(1)往復 10 次之 A 點最大誤差直徑為 8mm、B 點最大誤差直徑為 3mm(如圖十九)。(2)往復 100 次之 A 點最

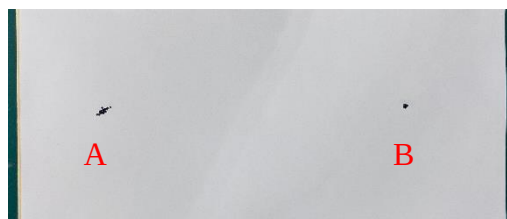
大誤差直徑為 9mm，B 點最大誤差直徑為 4mm(如圖二十)。此測試精度可充分支持一般機械自動化教學上之需求。



圖十八：精度誤差測試示意圖



圖十九：往復 10 次測試結果



圖二十：往復 100 次測試結果

七、結論

本研究整合機構設計基本理論、3D 製圖/列印技術及伺服程式控制技術，研發開源型可程式四軸機器手臂，具備智慧顏色識別分類模式、電阻式手動操作模式及馬達角度監控模式，其 2 點往復誤差僅 4-9mm (往復 100 次)，有效提供機械自動化相關教學之需求。考量教具製作及取得的便利性，本研究採用之構件皆以 3D 列印方式製作，驅動件為 Mg996R 伺服馬達 3 顆和 Sg90 伺服馬達 2 顆，其精密度在工程應用上雖嫌不足，但在教學應用上已足夠

作為機械自動化相關控制理論之驗證。

本研究之重點與價值在於提供教學現場開源之機械手臂，師生可輕易的以 3D 列印製作手臂各部組件，配合伺服馬達的安裝(4 軸、5 組伺服馬達)，輔以 Arduino 開發板及感測器(色彩感測器、可變電阻等)，或直接撰寫伺服馬達旋轉角度於程式中，即可使機械、電機、機電、資訊等相關控制學門的學生，從實作中學習機械手臂的控制原理。並可以此為基礎，提供教師或學生開發專題應用或從事相關研究(如伺服馬達與手臂結構之負載測試、連桿機構運動理論驗證與實作等)。

本研究未來可延伸設計多軸機器手臂並提供多樣化的控制程式，進而改善國內機械自動化的教學現況及提供自動化設備廠商做為產品設計的模擬機具。本研究成果所衍生之相關 3D 圖檔(.CATPart)、控制程式(.ino)及材料清單已存放於 Google 雲端(<https://reurl.cc/dWY2qk>)，供相關領域先進下載運用。

八、誌謝

感謝教育部邀請本研發成果於國立高雄科學工藝博物館「技職新視界」展出。

參考文獻：

- [1] Robot Race: The World's Top 10 automated countries. IFR, 2021/1/27.
檢自：<https://reurl.cc/eOOagb>
- [2] Agrawal, Amit, et al. "Vision-guided

robot system for picking objects by casting shadows," The International Journal of Robotics Research, Vol. 29, No. 2-3, 155-173 (2010)

- [3] Guo Shuai, Jin Yi, Bao Sheng, Xi Feng-Feng. "Accuracy analysis of omnidirectional mobile manipulator with mecanum wheels," Advances in Manufacturing, Vol.4, No.4, 363-370 (2016)
 - [4] 教育部統計處(2021/06/30)。高級中等學校專業群(職業)科學生及畢業生數-依學科類別查詢(107 學年)。檢自：
<https://stats.moe.gov.tw/qframe.aspx?qno=MQAxADMA0>
 - [5] 107 學年度四技二專統一入學測驗群(類)別報考人數統計。檢自：
<https://www.tcte.edu.tw/four/majtype107.php>
 - [6] 李建興，55.4%上班族學非所用，技職學用落差高於普大(2018/02/23)。檢自：
<https://www.google.com.tw/amp/s/www.gvm.com.tw/article/amp/42808>
- 顏儒銘，"3D 列印技術應用於創新多軸機器手臂之機電整合設計與實務"，國立臺北科技大學機械工程系碩士論文，台灣 (2016)。

Research and Development of Open Source Programmable Four-axis Robotic Arm for Teaching

Li Lin¹, Zhen-Xiang Ling², Chi Kuei Sung*

**^{1,2} Department of Mechatronics Engineering, National Kaohsiung University of Science
and Technology**

***Center for Innovation and Entrepreneurship Education, National Kaohsiung
University of Science and Technology**

Abstract

Mechanical automation technology has gradually become popular in everyday life, from coffee brewing, juice extraction, pet feeding, etc., to solving many trivial tasks for humans. The transformation of domestic Industry 4.0 has allowed us to progress to a new operating mode of human-machine collaboration, which has significantly increased productivity. The requirements of more complex functions have become a primary challenge for talent cultivation. In the teaching process for domestic mechanical automation talent cultivation, the lack of related teaching equipment for practical has indirectly reduced students' motivation and interest in Mechanical automation learning. This research integrates the fundamental theory of mechanism design, 3D drawing/printing technology, and servo-programming technology to solve the above issues, and develops an open source programmable four-axis robot arm with intelligent color recognition and classification mode, resistive manual operation mode, and motor angle monitoring mode. It can be downloaded, printed, and assembled by teachers and students for teaching and exploring the basic control theory of mechanical automation.

Key words : Mechanical automation, Robotic arms, 3D printing, Education

