

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

SCARA 機器人運動學分析與模擬

SCARA robot kinematics modeling and simulation

作者：吳宗叡、曾怡翔、林昱辰、王韋彥、李欣諺

系級：機械與電腦輔助工程學系

學號：D0176139、D0135283、D0135398、D0135754、D0135279

開課老師：林浩庭

課程名稱：電腦輔助機構分析

開課系所：機械與電腦輔助工程學系

開課學年：104 學年度 第一 學期



中文摘要

在電腦輔助機構分析課程中，林浩庭老師教授我們如何利用 MATLAB 進行 SCARA 分析正逆向運動學，模擬旋轉軸的運動，而非單純僅僅作為機台的操作者。在這次的課程中我認識到很多機器人控制方面的新知識，如何使用軟體來控制機器人，使機器人做出我們希望他做的動作，還有使用軟體來分析機器人的運動軌跡，讓我們對機器人控制方面有更進一步的了解。

本專題中使用高階程式語言 MATLAB 進行運動路徑演算法的開發與模擬，選用該套軟體就是看中其強大的數值計算與繪圖功能，能清楚表達出最終的模擬結果。專題中我們將推導出 SCARA 運動路徑演算法的開發，並藉由代入螺旋狀運動路徑與正向運動學驗證演算法結果。

近年來由德國提出的工業 4.0 概念席捲全球自動化產業，要達到此目的就必須要有即時的感測與通訊系統，能讓操作者能即時了解生產狀況進行調整。而在過去工業 4.0 發展過程中話語權皆掌握在機器人控制器的大廠手中，因為唯有了解控制器才能實現智能系統(Intelligence system)與網路實體化系統(Cyber Physical System)的概念，達到智慧生產、綠色製造的目的。為突破此框架，本專題開發宗旨為開發機器人運動學與路徑模擬，有了機台運動情形後即能結合控制系統開發出自己的機器人控制器，能完全掌控機器人的運作情形不再被廠商所限制，對將來工業 4.0 發展有一定程度的幫助。

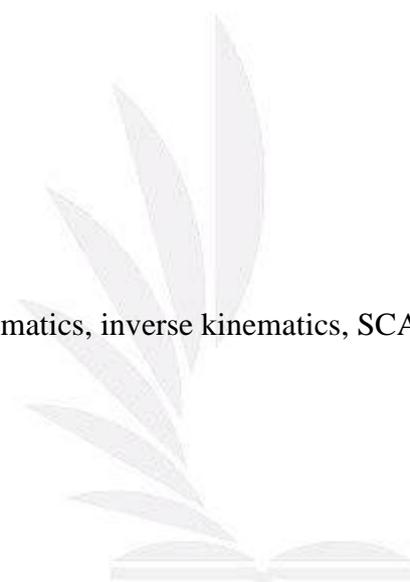
關鍵字：正向運動學、逆向運動學、SCARA 機器人、工業 4.0

Abstract

Institutional analysis in computer-aided courses, Professor Hao-Ting Lin teacher us how to use MATLAB for analysis that SCARA positive and inverse kinematics. No longer serve as a machine operator but can understand the mode of operation of the machine. In this program, I realize that a lot of new knowledge robot control aspects of how to use the software to control the robot, makes us want to do the movements. In this course we have a more in-depth understanding of robot control.

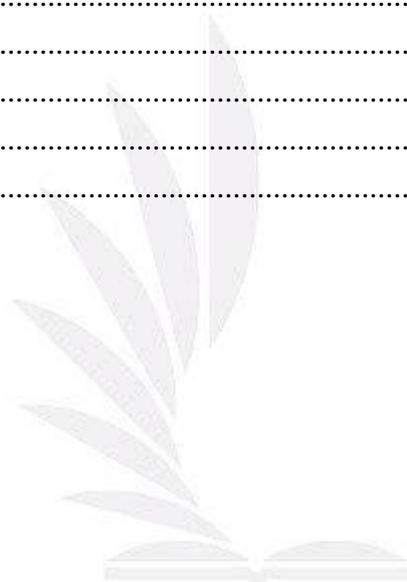
This topic used to develop higher-order programming language MATLAB to develop and simulate the motion path algorithm. Software is a fancy selection sets its powerful numerical calculation and drawing functions, can clearly express the simulation results. Export topic we derive SCARA motion path algorithm, and verification that result by substituting the helical motion path and forward kinematics.

Keyword : Forward kinematics, inverse kinematics, SCARA robots, Industry 4.0



目錄

一、動機與目的.....	5
二、文獻回顧.....	6
四、機器人位置與方位的描述.....	9
五、Denavit Harenberg 表示法	11
六、SCARA 座標位置	12
七、SCARA 運動學	14
正向運動學.....	14
逆向運動學.....	14
八、運動學模擬.....	16
SCARA 逆向運動學	17
執行結果.....	18
九、順向運動學驗證.....	19
Work space 執行結果.....	21
十、參考文獻.....	22



圖目錄

圖 1 工業革命之演變.....	6
圖 2 工業 4.0 之範疇.....	7
圖 3 SCARA 機器人自由度示意圖.....	8
圖 4 連桿組合的 D-H 表示.....	11
圖 5 SCARA 機器人 D-H 桿件坐標系.....	12
圖 6 SCARA 機器人上視圖.....	14
圖 7 模擬路徑.....	16
圖 8 X,Y 位置變化.....	17
圖 9 執行結果.....	18
圖 10 順向運動驗證結果.....	21

表目錄

表 1 SCARA 機器人 D-H 參數表.....	12
----------------------------	----



一、動機與目的

本專題主要目的為建立 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm) 機器人之運動方程並進行模擬驗證。機器人是一個綜合的研究領域，其中主要包含電子、機械、資訊、通訊等，而這次專題所教研究的 SCARA 運動學即是機器人作動的基本理論之一，描述機器人的操作必須建立機器人各連桿間的運動關係，來描述位置與姿態(位姿)，位姿描述的方法常見的有:齊次座標法、向量法、旋量法、四元素法、群論等，而目前最常見是齊次座標法也是本專題所選用的方法。最後使用美國 The MathWorks 公司出品之數學軟體 MATLAB 進行數值計算與分析，他有強大的數值運算和圖形功能，能有效率的對 SCARA 進行運動學系統的仿真實現推倒後的結果。有運動學的基礎後就能進行軌跡規劃與模擬，最終導入控制系統進行實機控制。

近年來原已趨於飽和的自動控制產業又掀了新的一波浪潮，世界各國無不全力發展智慧製造，達到智慧生產、綠色製造的目的。在自動產業發展上，SCARA 機器人有著構型簡單卻能保持高精度的特色，其常被應用於消費性電子產品、電子電機、塑膠、包裝、金屬製品等需要進行裝配的產業。SCARA 機器人是一種圓柱座標型工業機器人，相較於其他種類之機器人較為少見，因此本組對其進行運動軌跡的探究。

二、文獻回顧

機器人是指自動執行任務的機器裝置，其目的為模擬出動物或人類的作動，常用於取代或協助一些因環境的關係，人類無法升任的高危險性、高重複性的工作。近年來因機器人產業自動化的趨勢正在蓬勃發展，而傳統機器人僅能重複執行單一的控制，無法依照工作環境的變化做出對應的動作。

90 年代自動化的快速蓬勃發展，僅具有一般功能的傳統機器人的應用已趨於飽和，為因應越來越複雜的操控環境誕生了智慧智慧型機械人，加入感測元件使機器人的作動模式改變成「感測→判斷→致動」，偵測環境資訊的智慧型機器人能運用的範圍越來越廣更貼近現實生活中。這就是近年機器人控制導入工業 4.0 的概念，也因此出現了感測型智能機器人、微型機器人、模塊化的控制設計、雲端大數據的操控，除產業製造上應用領域也擴展至服務類型，發展出用於生活中的服務型機器人，台灣鴻海與日本軟體銀行合作發表的 pepper 即是服務型機器人的代表。

圖1顯示為工業革命之時間流程圖，第一次工業革命起源於18世紀末，是以機器取代人力進行大規模的生產。20世紀初期，由於組裝線的概念加入工業製造中，產生了第二次工業革命，提高生產效率。1970年，融入電子與資訊科技的元素，降低生產成本，邁入第三次工業革命。2013年，物聯網的興起，提升工廠設備，第四次工業革命(工業4.0)也正式來臨。圖2表示工業4.0之範疇，利用資訊科技提供實物層之間的網絡聯繫，並整合人員之間的網絡，達到上下整合與水平聯繫的概念。

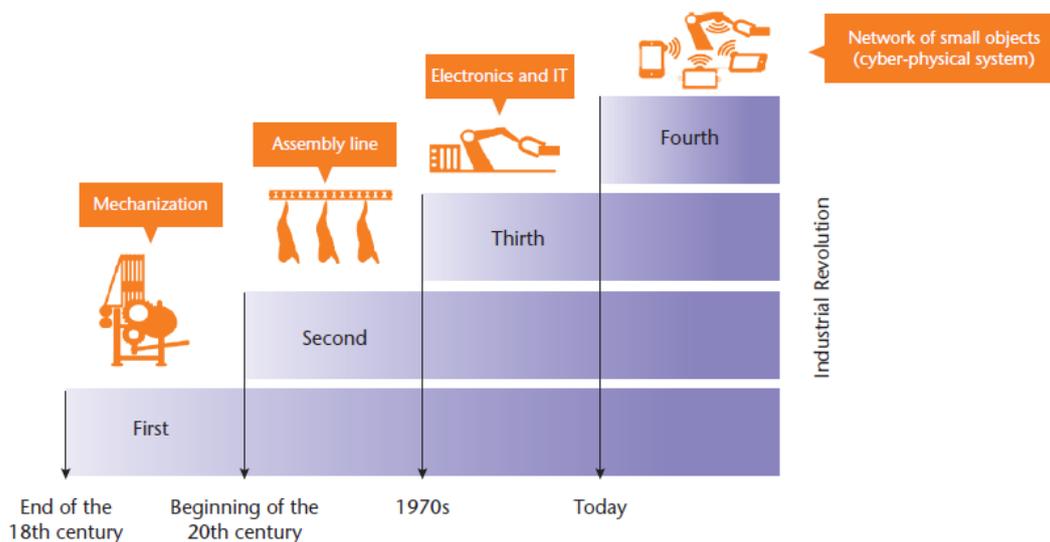


圖 1 工業革命之演變[1]

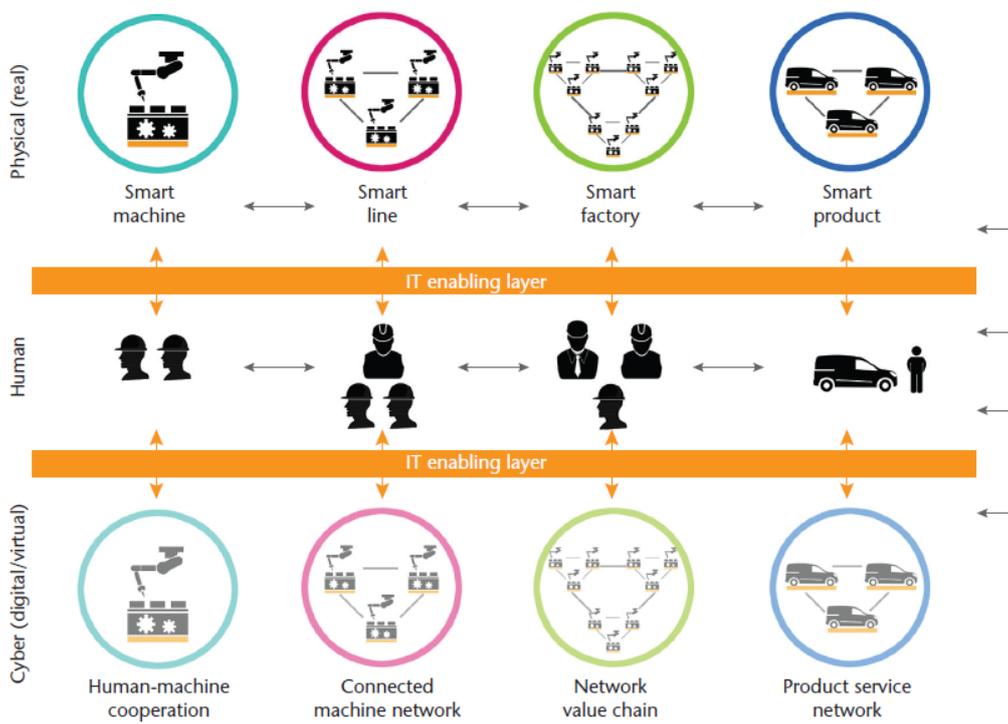


圖 2 工業 4.0 之範疇[1]



三、自由度分析

機構的自由度(Degree of freedom)可以被定義為構建位置所需的最少獨立參數。由於機構是由機件以接頭連接而成，因此其自由度可以說是固定前的總自由度，扣除所有接頭的總拘束度(Degrees of constraint)。[2]

常見的機器人機構多為空間坐標系，對空間機構而言，每一根可以動的機件都具有三個自由度，代表著每個機件具有三個平移和三個旋轉，因此空間中機構自由度判別方法可以用下式表示

$$F_s = 6(N - 1) - \sum J_i C_{si}$$

而 SCARA 機器人運動方式很類似手臂的運動，包含肩關節與軸關節來實現水平和垂直運動。此機器人具有四個自由度，其中有三個旋轉另一個為上下移動，全臂在垂直方向的剛度最大，在水平移動的柔性最大，因此廣泛用於裝配作業當中。

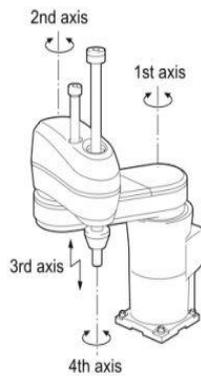


圖 3 SCARA 機器人自由度示意圖[3][1]

四、機器人位置與方位的描述

機器人坐標系名稱一般使用大括號來表示，有坐標系後便須描述上面的點位，表示方式如下範例。在直角坐標系{A}內的 P 點向量 ${}^A P$ 使用 3×1 矩陣來描述空間任一點的位置[6]。

$${}^A P = [P_x P_y P_z]^T$$

描述機器人的方位便於計算使用矩陣進行表示，矩陣內含著坐標系間的變化分量 x、y、z 分量因此又稱為旋轉矩陣，如下例所示。假設某桿件兩端分別為直角坐標系{A}直角坐標系{B}描述兩方位關係。

$${}^A R = [{}^A x_B \ {}^A y_B \ {}^A z_B]^T$$

$${}^A R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^T$$

若對於 x,y,z 做轉角為 θ 的旋轉變換，旋轉矩陣可以表示為

$$R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

統整上述之位置描述與方位描述後，兩相結合即能表示各坐標系之間點的關係，已知某點座標與所屬坐標系即可透過齊次坐標轉換矩陣將該點標示在另一坐標系中。然而此關係在工程數學上為非齊次式，為便於計算習慣將其轉化為等價的齊次式，因此此方式又稱為齊次座標轉換。

$${}^A P = {}^A T^B P$$

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A P_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



五、Denavit Harenberg 表示法

1955 年在 ASME 發表後目前大多數的座標轉換推導大多使用此方法。D-H 方法可用於任何種類之機器人構型，方便描述一個連桿到下一個連桿之間的關係，是一種用齊次座標轉換描述坐標系之間相對位置的方法，因此手臂末端的總轉換可以表示為。

$$T_n = {}^R T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{n-1} T_n = A_1 A_2 A_3 \dots A_n$$

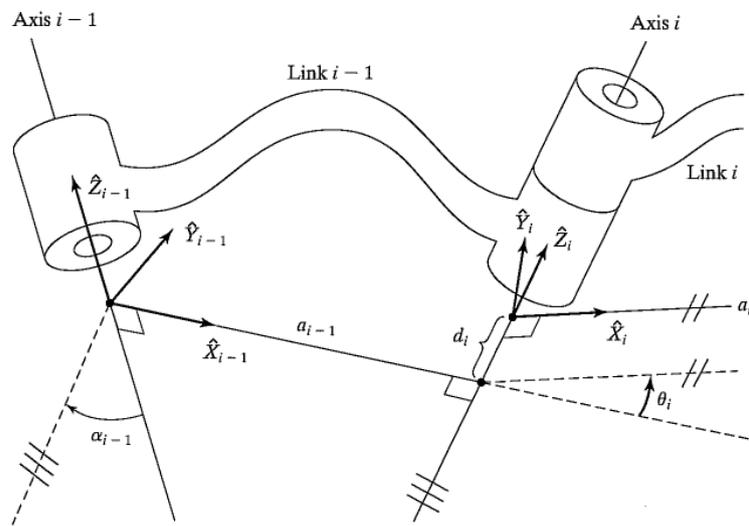


圖 4 連桿組合的 D-H 表示[7]

六、SCARA 座標位置

建立 SCARA 機器人運動之數學模型之前，必須先定義每個關節、連桿的稱號，透過上述介紹的齊次座標轉換與 D-H 表示法串連所有構建，建立彼此的關係。如下圖所示，本設計共假設五個座標平面分別為{0}、{1}、{2}、{3}、{4}，其中{0}、{1}、{2}在 Z 軸具有一個旋轉的自由度代表著第一、二、三軸上的旋轉，{3}代表著 SCARA 機器人 Z 軸上的移動 L3，而{4}為 SCARA 機器人的末端執行器(end effector)所在的位置。

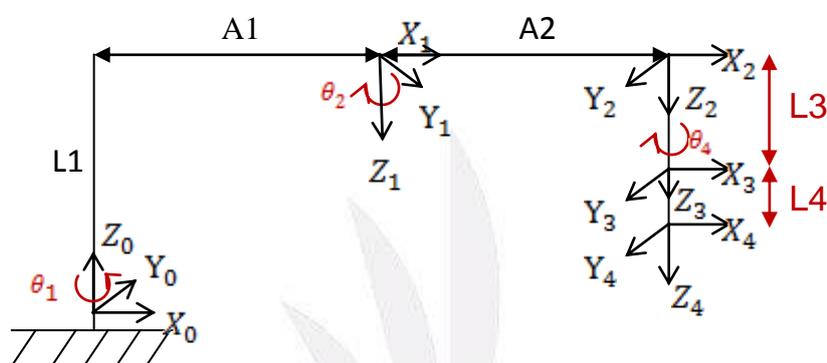


圖 5 SCARA 機器人 D-H 桿件坐標系

D-H 法可用於任何種類之機器人構型，可以方便描述一個連桿到下一個連桿之間的關係，是一種用齊次座標轉換描述坐標系之間相對位置的方法，因此手臂末端的總轉換可以表示為。

Axis	a	α	d	θ
1	A1	180	L1	$\Theta 1$
2	A2	0	0	$\Theta 2$
3	0	0	L3	0
4	0	0	L4	$\Theta 4$

表 1 SCARA 機器人 D-H 參數表

根據表 1 的各連桿關係可以求得變換矩陣，如第四部分提到機器人位置與方位的描述之方法建立關係，變換矩陣 ${}^{n-1}T_n$ 代表著地 n 個平面與前一個 n-1 平面的關係，而本研究所推導的 SCARA 各座標平面之變換矩陣如下。

平面{0}與{1}的變換矩陣

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & A1\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & A1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

平面{1}與{2}的變換矩陣

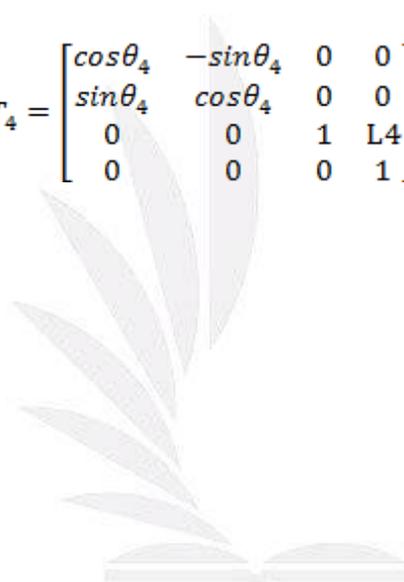
$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & A2\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & A2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

平面{2}與{3}的變換矩陣，可以看出兩者間僅有 L3 移動之關係

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

平面{3}與{4}的變換矩陣

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



七、SCARA 運動學

機器人各連桿間關係瞭解後就能進行到下一步了解其運動時的對應關係，運動學是所有機械運動最基礎的部份也是最為重要的一地方，若運動學推導出模擬解過若出現問題，極可能發生暴衝的情形，造成設備或是人員的損傷。一部機器人運作是否能平順運行其運動學具有決定性的關係。

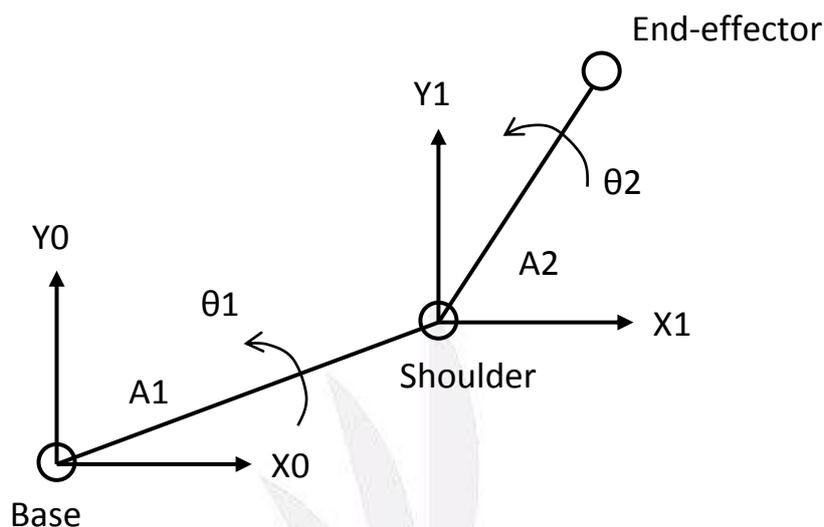


圖 6 SCARA 機器人上視圖

從 SCARA 機器人 2D 上視圖可以很清楚看到其可以簡化為雙連桿之間的運動，由上圖所示，從坐標系 1 至末端執行器的簡化關係，從中即可大概觀察出 SCARA 機器人運作之情形。

正向運動學

正運動學為給定機器人個關節角度計算機器人末端工作點坐標位置與姿態的方法。 [7]

$${}^0T_4 = {}^0T_1(\theta_1) {}^1T_2(\theta_2) {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4)$$

逆向運動學

逆向運動學為透過手臂終端位姿逆推回手臂的各關節運動角度，即正向運動學之逆推。 [7]

$${}^0T_1(\theta_1)^T {}^0T_4 = {}^1T_2(\theta_2) {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4)$$



八、運動學模擬

運動學的模擬我們使用具有強大計算與完整的圖像處理功能的 MATLAB，圖形功能能實現計算結果可視化，讓工程推倒不僅只是冷冰冰的數字。而本報告直接將運算程式碼貼出，直接進行解釋，最下部為運行之結果和政下運動學逆推驗證。

```
clear;clc
```

```
%SCARA 機器人機構參數
```

```
L1=325;
```

```
A1=200;
```

```
A2=200;
```

```
L4=50;
```

位檢查運動學是否完整，辦專題設計一段移動路徑做為測試，其路徑為半徑 100mm 的圓，同時在每一個角度旋轉時 z 軸上升 1mm，執行三個循環，此路徑為一個螺旋狀的圖形，3D 模擬圖形如圖 7，而 X、Y、Z 三軸運動關係如圖 8。

```
t=0:360*3;%移動時間
```

```
px=100*cosd(t)+200;
```

```
py=100*sind(t);
```

```
pz=t;
```

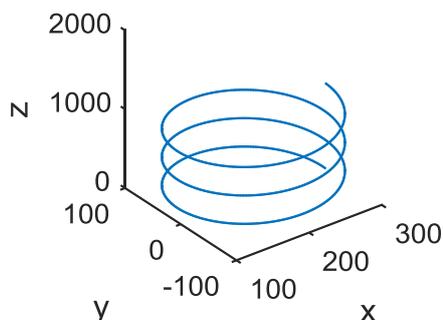


圖 7 模擬路徑

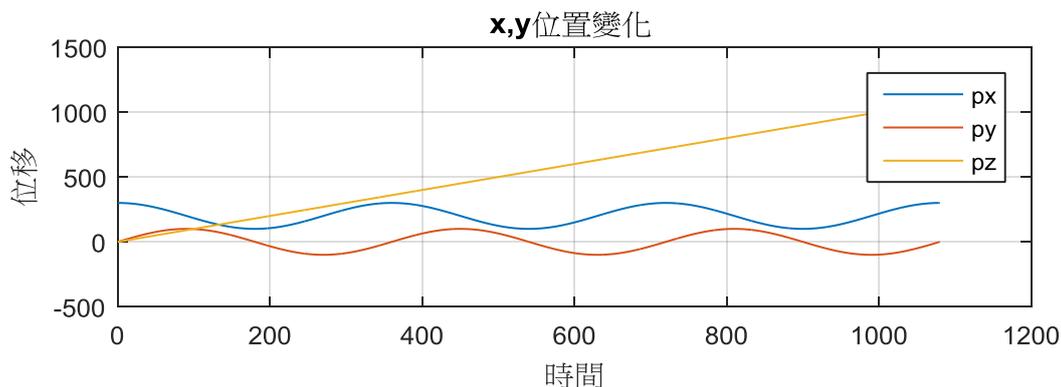


圖 8 X,Y 位置變化

SCARA 逆向運動學

由第七部份 SCARA 運動學所點出的觀念，即能推導出我們所需要的運動學關係，在這部份使用的是逆運動學，因為我們給定的是所期望的路徑座標，希望藉由運動學關係求出各旋轉角的角度變化。本專題所推導的 θ_1 、 θ_2 、 θ_4 關係如下，最終使用 matlab 最擅長的圖形繪製功能呈現所有計算出的結果。

```
theta2=acosd((px.^2+py.^2-A1.^2-A2.^2)./(2.*A1.*A2));

theta1=atan2d((A2.*sind(theta2).*px+(A1+A2.*cosd(theta2)).*py),...

((A1+A2.*cosd(theta2)).*px-A2.*sind(theta2).*py));

L3=L1-L4-pz;

R11=1;R21=0;%終端不做旋轉

theta4=theta1-theta2-atan2d(R21,R11);
```

```

figure(1)

subplot(3,2,1),plot3(px,py,pz), xlabel('x'),ylabel('y'),zlabel('z'),axis square;

subplot(3,2,2),plot(t,px,t,py,t,pz),legend('px','py','pz'),title('x,y 位置變化'),xlabel('時間'),ylabel('位移'),grid;

subplot(3,1,2),plot(t,theta1,'r',t,theta2,'g',t,theta4,'b'),title('SCARA'),...

    legend('theta1','theta2','theta4'),xlabel('時間'),ylabel('旋轉角(度)'),grid;

subplot(3,1,3),plot(t,L3), legend('L3'),grid
    
```

執行結果

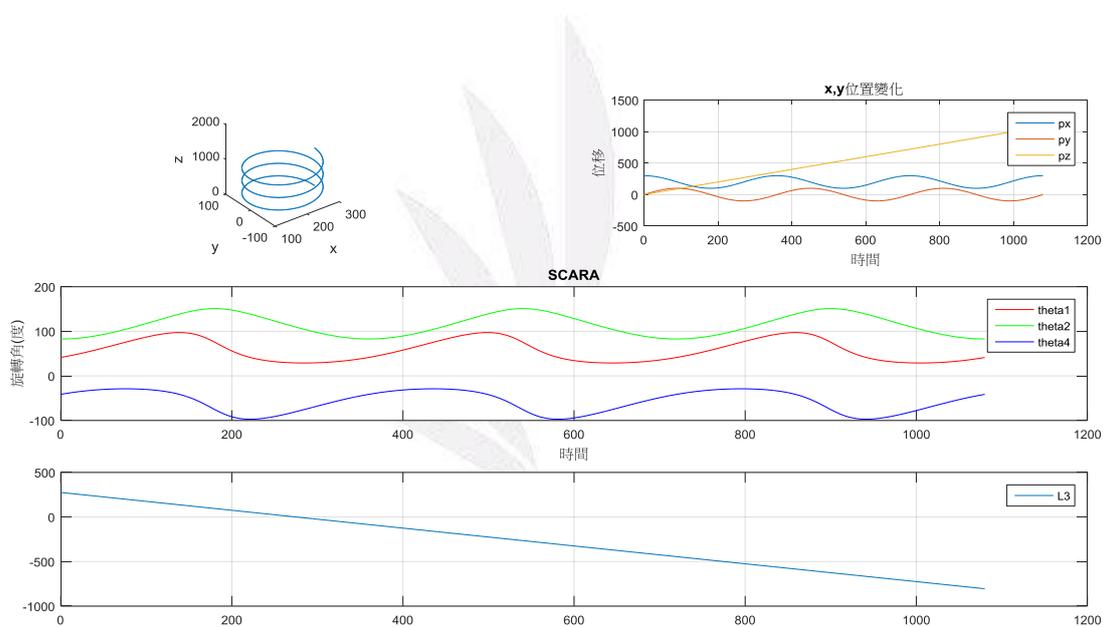


圖 9 執行結果

九、順向運動學驗證

藉由逆向運動學的推導即可求得機構的角度變化，為慎重起見，將逆向運動學所得的結果代入正向運動學進行驗證，若正確輸入的點位與輸出的點位須為相同座標，驗證程式如下，本計畫輸入位置為 $px=300$ 、 $py=100$ 、 $pz=100$ 。

```

px=300;

py=100;

pz=100;

L1=325;A1=200;A2=200;L4=50;

theta2=acosd((px.^2+py.^2-A1.^2-A2.^2)/(2.*A1.*A2))

theta1=atan2d((A2.*sind(theta2).*px+(A1+A2.*cosd(theta2)).*py),...

              ((A1+A2.*cosd(theta2)).*px-A2.*sind(theta2).*py))

L3=L1-L4-pz

R11=1;R21=0;

theta4=theta1-theta2-atan2d(R21,R11)

%正向運動學

T0_1=[ cosd(theta1),sind(theta1),0,A1*cosd(theta1);sind(theta1), -cosd(theta1), 0, A1*sind(theta1);0,0, -1, L1;0,0, 0,1]

T1_2=[ cosd(theta2),-sind(theta2),0,A2*cosd(theta2);sind(theta2),  cosd(theta2), 0, A2*sind(theta2);0,0, 1,0;0,0, 0,1]

T2_3=[ 1, 0, 0, 0;0, 1, 0, 0;0, 0, 1, L3;0, 0, 0, 1]

T3_4=[ cosd(theta4), -sind(theta4), 0, 0;sind(theta4),  cosd(theta4), 0, 0;0,0, 1,L4; 0,0, 0, 1]

T0_1*T1_2*T2_3*T3_4

```

px=300、py=100、pz=100 代入逆向運動學所得的各旋轉軸角度與 L2 變化。

theta2 =

75.5225

theta1 =

56.1962

L3 =

175

theta4 =

-19.3263

所得的逆向運動學結過代入正向運動學進行驗證，各連桿關係如下

T0_1 =

0.5564	0.8309	0	111.2702
0.8309	-0.5564	0	166.1895
0	0	-1.0000	325.0000
0	0	0	1.0000

T1_2 =

0.2500	-0.9682	0	50.0000
0.9682	0.2500	0	193.6492
0	0	1.0000	0
0	0	0	1.0000

T2_3 =

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 175 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

T3_4 =

$$\begin{bmatrix} 0.9436 & 0.3309 & 0 & 0 \\ -0.3309 & 0.9436 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 50.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Work space 執行結果

ans =

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0 & 300.0000 \\ 0.0000 & -1.0000 & 0 & 100.0000 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 100.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

座標位置與輸入相同皆為 $px=300$ 、 $py=100$ 、 $pz=100$ ，因本報告推導之 SCARA 機器人運動學無誤，代入螺旋狀運動路徑結果如下。

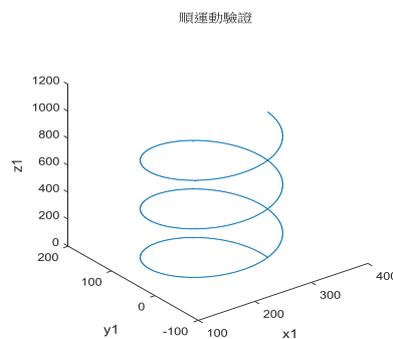


圖 10 順向運動驗證結果

十、參考文獻

- [1] J. Posada, C. Toro, et al, Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet, IEEE Computer Graphics and Application, 2015, 26-40.
- [2] 顏鴻森、吳龍庸，”機構學”，東華書局
- [3] “一篇文章帶您讀懂工業機器人的設計過程”，自動化在線, 23 08 2015. [線上]
- [4] 左富勇、胡小平、謝珂、朱秋玲，“基於 MATLAB Robotics 工具箱的 SCARA 機器人軌跡規劃與仿真”，湖南科技大學機械設備健康維護湖南省重點實驗室.
- [5] S. B. Niku.,” Introduction to Robotics Analysis Systems Applications”, BEIJING: Publishing House of Electronics Industry, 2004,1.
- [6] 張兆成，”基於 SCARA 機器人的運動學動力學”，哈爾濱工業大學
- [7] John J. Craig, “Introduction to Robotics Mechanics and Control”, Pearson Education, 2005

