

# 基於多重感測之智慧型並聯式機械手臂輪廓軌跡跟隨控制

陳昭雄\* 呂至翔 梁世承

大葉大學 機械與自動化工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

\*chao@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本論文主要解決並聯式機械手臂在受拘束環境下的運動控制問題，使得機械手臂除了能跟隨所要的輪廓軌跡，並且能保持與接觸面固定的接觸力。基於多重感測的應用，本文將整合機械視覺、力量感測器和各軸編碼器的感測資訊，使得並聯式機械手臂能從事與工件接觸的精確輪廓軌跡跟隨控制。首先，推導並聯式機械手臂的順向/逆向運動學、Jacobian 矩陣、奇異點等幾何特性，再透過機械視覺和影像處理技術，規劃機械手臂無奇異點的運動軌跡。為了解決位置和力量混合控制時的耦合問題，將機械手臂端部與加工曲面接觸的工作空間分成兩個次空間，在機械手臂受限制的方向施以力量控制，另外在不受限制的其餘自由度施以軌跡跟隨控制。根據此解耦合的控制架構，本文發展以區間第二型類神經模糊網路系統（Interval type-2 neural fuzzy network, IT2NFN）為基礎的智慧型混合位置/力量控制器，並推導適應性法則，使能線上調整控制系統的所有參數，克服機械手臂所承受的結構性和非結構性的外部干擾，確保整個控制系統的穩定和收斂。最後，利用所建立的 Delta 並聯式機械手臂實驗平台，透過實驗驗證本文所提方法的有效性。

**關鍵詞：**並聯式機械手臂、多重感測器系統、混合位置/力量控制、智慧型強健控制

## Multisensor-Based Intelligent Control for Contour Tracking of Parallel Robots

CHAO-SHIUNG CHEN\*, ZHI-XIANG LU and SHI-CHENG LIANG

*Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University*

*No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 515006, Taiwan, R.O.C.*

\*chao@mail.dyu.edu.tw

## ABSTRACT

The aim of this study was to find a solution to the problem of how to control a parallel robot manipulator in a constrained environment. Parallel robot manipulators must be able to follow the contours of an unknown surface while maintaining a specified contact force. We developed a multisensing technique. We installed a camera on the ceiling of the workspace and mounted a force sensor to the end effector of the manipulator and encoders at each joint of the manipulator. Each joint had three degrees of freedom. Kinematics, the Jacobian matrix, and other geometric characteristics of



the robot were derived. Machine vision and image processing techniques were used to plan the machining trajectories without creating any singular points. The vector map of the workspace was divided into two subspaces: one for controlling the contact force and one for controlling the surface motion. According to this decoupled control strategy, we developed an intelligent hybrid position/force controller for the counter trajectory tracking of parallel robots. This controller is based on an interval type-2 neural fuzzy network (IT2NFN). Weights were adjusted using the adaptive IT2NFN-based control system, which ensured that the system was stable and converged to the expected result. The effectiveness of the proposed model was validated through experimentation on a practical delta parallel robot.

**Key Words:** parallel robot, multi-sensors based system, hybrid position/force controller, intelligent robust control

## 一、前言

在工業用機器人中，並聯式機器手臂具備高剛性、高精度、低慣量、移動速度快、能承受較大負載和成本低等優點，其運動桿件形成一個封閉的結構鏈。並聯式機器手臂能改善傳統串聯式機器手臂懸臂過長、剛性不足、動態頻寬較窄和高速移動時容易產生機構振動等很難突破的根本限制，提供下一代機器人所需的高速和高剛性運動機構。並聯式機器手臂一般應用於高速的物件取放和物料搬運，然而，對於需要與工件接觸的精密加工場合，如工件的拋光、研磨、切削、鑽孔等，單獨的機械手臂位置軌跡控制是不夠的。當機械手臂接觸工件時，急遽的力量變化，將造成加工件的破壞或控制系統的不穩定，因此，必需另外考慮加入機械手臂力量控制的問題。但在機械手臂的運動控制過程中，同時執行位置控制和力量控制是互相抵觸的，因為，各軸驅動器只能執行單一物理量的回受控制，不能同時兼顧位置與力量的回受控制。多感測器系統應用於機械手臂的控制，是機械手臂智慧化的一個重要問題，當期望機械手臂完成更多和複雜的任務，則對機械手臂採取利用多個感測器的控制系統，變得越來越重要，透過多物理量的量測可補償機械手臂在環境中的動態變化和模型的不確定性。但在多感測器機械手臂的控制系統中，個別感測器所量測的資訊可能具備互補性和多餘性，例如利用 CCD 攝影機拍攝機器手臂在空間的姿態，和利用機械手臂個別軸所安裝的編碼器 (Encoder) 量測個別軸的角度，再透過順向運動學計算，也能推導出機器手臂在空間的姿態，因此兩感測資訊為多餘性。但如果利用編碼器與力量感測器來完成機械手臂的精密加工控制，此時兩感測器間提供了互補性。

針對並聯式機械手臂結合多重感測控制的重要參考文

獻分別敘述如下：

### (一) 融合多感測於機械手臂應用研究

機械手臂往往必需在在受拘束的工作空間下，完成複雜的事務，此時機械手臂的端部 (end-effector) 將不可避免地與環境接觸，機械手臂的控制目的是同時可做位置和力量的控制，意即使使機械手臂的端部能跟隨所要的軌跡，且保持與環境接觸的力量。當機械手臂同時做位置和力量回授的控制時，兩者間將造成複雜的交相連和互相干擾問題。現有的文獻解決此問題的方法，主要分成阻抗控制 (Impedance control) [10, 16] 和混合位置/力量控制 [12, 20] 兩種不同的控制策略。Hogan [8] 首先針對機械手臂提出通用和統一的阻抗控制法則，且發展一質量-彈簧-阻尼 (mass-spring-damper) 的回受控制系統。阻抗控制是利用機械手臂端部與環境接觸時所產生的抵抗力，直接回授的控制法則，利用單一的阻抗控制器，能間接控制機械手臂的姿態和各軸的出力。Bonilla 等人 [4] 提出一以視覺為基礎的阻抗控制於機械手臂端部與工作表面接觸力控制的法則，透過視覺與力量感測的融合，達到機械手臂軌跡跟隨的目的。Li 等人 [14] 提出一類神經網路 (Neural network) 阻抗控制器於機械手臂與環境接觸的控制，透過疊代學習法則 (Iterative learning scheme) 讓機械手臂的動態能跟隨所設計的阻抗模型。Xu [23] 提出強健的順滑 (Sliding mode) 阻抗控制法則於高速微夾爪機械手臂的位置和力量控制，此方法讓機械手臂在自由和受拘束運動時能平滑的轉換。然而，阻抗控制器非常依賴端部空間座標和機械手臂各軸參數間的轉換和反 Jacobian 矩陣的運算，當機械手臂的參數不確定或工作空間有奇異點 (Singularity) 時，會造成計算的困難。Raibert 和 Craig [19] 首先針對機械手臂在受拘束的環境下，提出混合位置/力量控制的架構，此架構



為將機械手臂在環境受限制的方向施以力量控制，而在不受限制的其餘自由度施以位置控制，這樣就可以同時兼顧機械手臂的位置和力量控制。Chaudhary 等人 [5]提出一適應性類神經網路 (Adaptive neuro-fuzzy network) 於機械手臂的混合位置/力量控制，推導所有網路參數的調整法則以確保整個控制系統的穩定。Gueaieb 等人 [6]提出強健性智慧型混合位置/力量控制於機械手臂在受拘束環下的軌跡跟隨，利用模糊邏輯系統以近似機械手臂未知的動態模型，再依據此模糊模型設計強健性控制器，確保整個控制系統的穩定。Yin 等人 [24]提出混合位置/力量控制於機械手臂在接觸未知曲面的快速運動控制，推導以力量感測致動為基礎的智能框架 (action-based intelligent frame)，使機械手臂能同時進行位置和力量控制。雖然混合位置/力量控制於機械手臂的應用，獲得相當多成功的例子，但是，如何在受拘束的環境下，使機械手臂能隨時保持位置和力量控制器的穩定，仍是待解的問題。Koch 等人 [11]提出多感測系統於工業用機械手臂的輪廓軌跡跟隨控制，視-在前 (Look-ahead) 的視覺感測器用於導引機械手臂沿著工作空間的輪廓軌跡移動，力量感測器偵測與工件的接觸力用於力量回授，而加速度感測器用於補償力量偵測的慣性力 (Inertial force)，並應用視覺感測器對環境變形量的偵測以能線上修正接觸力的量測。Xiao 等人 [22]提出基於多感測的混合位置/力量控制系統於機械手臂在未知曲面的軌跡跟隨控制，裝在機械手臂個軸的編碼器用於偵測各軸的角度，力量感測器裝於機械手臂腕部用於偵測與工件接觸的力量，CCD 攝影機裝固定在工作空間的頂端用於導引機械手臂的軌跡跟隨，並利用感測資訊的融合以掌控未經校正的工作空間參數。Bellotto 和 Hu [3]針對移動服務機器人提出融合多重感測資訊於未知環境下人的位置感測和跟隨的控制系統，利用雷射感測器偵測人的腳步移動，而利用 CCD 攝影機偵測人的臉部位置，並提出一無損卡爾曼濾波器 (Unscented Kalman filter) 用於連續融合此兩感測資訊，而得到所要跟隨人的實際位置與移動軌跡。Bellakehal 等人 [2]應用視覺與力量感測器於並聯式機械手臂的軌跡跟隨控制，融合視覺感測與各軸編碼器角度感測，而得到準確的機械手臂端部在工作空間的實際位置，藉以發展機械手臂姿態和力量混合控制的法則。

## (二) 智慧型控制於並聯式機械手臂研究

並聯式機械手臂控制系統為多軸耦合、高度非線性和時變系統，也遭受動態系統中各種不確定性的干擾，傳統以受

控系統數學模型為基礎的控制器設計方法，難以達到機械手臂高精度的軌跡跟隨控制。Li 等人 [13]提出適應性同步控制法則 (Adaptive Synchronized Control) 來改善 3 自由度並聯式機械手臂的軌跡跟隨控制，設計一估測動態模型和適應性的參數調整法則來估測機械手臂的動態，並利用順滑控制以確保整個控制系統的穩定。Al-Mallah 等人 [1]提出一強健式的第二型模糊控制器 (Type-2 Fuzzy Logic Controllers, T2FLC) 於機械人的軌跡跟隨，並實驗證明此 T2FLC 比傳統的第一型模糊控制器 (T1FLC) 更能掌控機械手臂不確定性的干擾。Hassanzadeh 等人 [7]提出一基於區間第二型模糊系統 (IT2FLS) 為模型的控制法則，用於掌控並聯式機械手臂複雜的不確定性，並發展計算力矩控制方法 (Computed-torque Control, CTC)，以完成機械手臂精密的軌跡跟隨。Lin 等人 [15]發表一區間第二型類神經模糊網路 (IT2FNN) 控制系統，應用於多軸的線性馬達平台，此 IT2FNN 系統同時具備線上網路結構和參數調整的學習法則，能確保整個控制系統的收斂和穩定性。

針對上述所提的問題，本文提出以多感測為基礎的智慧型混合位置/力量控制系統於 Delta 並聯式機械手臂的高精密輪廓軌跡跟隨控制，使得 Delta 並聯式機械手臂，除了可以從事傳統快速取、放和組裝工件的功能，同時，也可以從事與工件接觸的精密加工任務，如工件的拋光、研磨、切削、鑽孔、攻牙等，讓本文所發展出的智慧型並聯式機械手臂，符合高科技產業的性能需求，成為一自動化工業的利器。

## 二、並聯式機械手臂系統架構

如圖 1 所示為本文所建立的基於多感測智慧型混合力量/位置控制之並聯式機械手臂系統架構圖，以 Delta 並聯式機械手臂為核心的三軸驅動實驗平台，硬體方面包括個人電腦、Delta 機械手臂、伺服控制卡、三軸 DC 無刷馬達驅動器、三軸的編碼器、三軸力量感測器和 GigE CCD 數位照相機。其中 Delta 機械手臂為三軸封閉式機械結構，其運動方式是透過三軸的連桿結構，利用伺服馬達分別同時帶動其三軸的主動臂，使得機械手臂端部進行軌跡跟隨運動。Delta 機械手臂行程為 X 軸：500mm、Y 軸：500mm 和 Z 軸：100mm。伺服控制卡內建 D/A 模組 (D/A module)、A/D 模組 (A/D module) 和編碼器介面單元 (Encoder interface)，可以透過 PCI bus 與個人電腦溝通。CCD 數位照相機固定在並聯式機械手臂的頂端，每秒取像可達 100 次，可以對加工



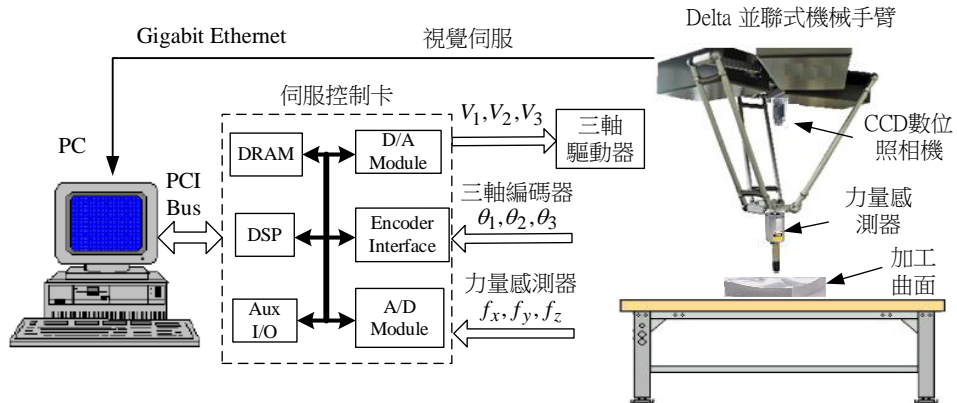


圖 1. 基於多感測智慧型混合位置/力量控制之並聯式機械手臂系統架構圖

曲面取像，透過 Gigabit Ethernet 傳送影像至個人電腦。本文機械手臂控制的動作說明如下：首先 CCD 數位照相機擷取所要加工的影像，並將影像傳送至個人電腦以執行影像處理程式，辨識加工件的輪廓軌跡，電腦根據此輪廓軌跡，規劃出無奇異點的最佳軌跡路徑，透過伺服控制卡的 A/D 模組擷取機械手臂與加工曲面接觸 X、Y 和 Z 軸的力量  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ ，再透過服控制卡的編碼器介面擷取並聯式機械手臂三個主動臂的角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ ，並根據順向運動學計算機械手臂的端部空間位置，利用所發展的智慧型混合位置/力量控制器，分別計算出機械手臂三軸所要補償的控制量，然後透過伺服控制卡的 D/A 模組，即時且同步的分別將控制命令  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  傳輸至三軸的驅動器，以驅動機械手臂運動，使得機械手臂能同時達到與加工面的接觸力量和輪廓軌跡跟隨的控制，完成本文機械手臂在受約束環境下，高精度和高剛性的輪廓軌跡跟隨加工之目的。本文以 Visual C++ 撰寫包括人機介面、視覺伺服、無奇異點的軌跡規劃和智慧型混合位置/力量控制器等程式。

### 三、Delta 並聯式機械手臂的幾何特性分析

Delta 機械手臂的幾何特性，包括順向運動學、逆向運動學和 Jacobian 矩陣，可由機械手臂封閉式的幾何結構求出，如圖 2 的 Delta 並聯式機械手臂幾何座標示意圖，其中  $O-xyz$  為在固定板上的垂直座標、 $\theta_i$ ， $i = 1, 2, 3$  代表 Delta 並聯式機械手臂三軸致動臂與固定板之間的夾角和 P 為移動板之中心點位置。反向運動學的目的為給定移動板中心點位置座標  $P(p_x, p_y, p_z)$ ，要反推出 Delta 機械手臂三軸

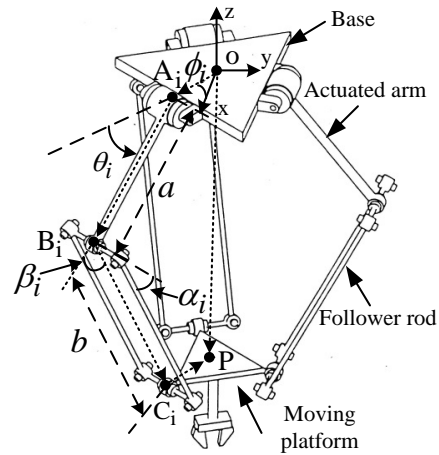


圖 2. Delta 機械手臂的幾何座標圖

致動臂的角度  $\theta_i$ ， $i = 1, 2, 3$ 。由圖 2 中的機構封閉迴路  $O \rightarrow A_i \rightarrow B_i \rightarrow C_i \rightarrow P \rightarrow O$ ，可得下式: [9]

$$A_i B_i + B_i C_i = OP + PC_i - OA_i \tag{1}$$

因此，

$$\begin{bmatrix} a \cos \theta_i + b \sin \alpha_i \cos(\theta_i + \beta_i) \\ b \cos \alpha_i \\ a \sin \theta_i + b \sin \alpha_i \sin(\theta_i + \beta_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中

$$\begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & 0 \\ -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$



從(2)式和(3)式中解聯立方程式，即可求出 $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ 。

而順向運動學為給定Delta 機械手臂三軸致動臂的角度 $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ，要順向求出移動板中心點位置座標 $P(p_x, p_y, p_z)$ 。將(3)式代入(2)式，可得

$$\begin{bmatrix} a \cos \theta_i + b \sin \alpha_i \cos(\theta_i + \beta_i) \\ b \cos \alpha_i \\ a \sin \theta_i + b \sin \alpha_i \sin(\theta_i + \beta_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i & 0 \\ -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h - r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

將(4)式矩陣中每列的方程式平方後相加，可得

$$\begin{aligned} b^2 &= p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2(p_x \cos \varphi_i + p_y \sin \varphi_i) \\ &\quad \times (a \cos \theta_i + r - h) - 2p_z a \sin \theta_i \\ &\quad + (a \cos \theta_i + r - h)^2 + a^2 \sin^2 \theta_i, \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

同時解(5)式的三個聯立方程式( $i = 1, 2, 3$ )，可得到所要的 $P(p_x, p_y, p_z)$ 。

對於Delta機械手臂Jacobian 矩陣的推導，可將(1)式對時間微分而得到

$$\mathbf{v}_p = \boldsymbol{\omega}_{1i} \times \mathbf{a}_i + \boldsymbol{\omega}_{2i} \times \mathbf{b}_i \quad (6)$$

其中 $\mathbf{v}_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$ 為移動板中心點移動速度， $\mathbf{a}_i$ 為 $\overrightarrow{A_i B_i}$ 方向， $\boldsymbol{\omega}_{1i}$ 為 $\overrightarrow{A_i B_i}$ 連桿角速度， $\mathbf{b}_i$ 為 $\overrightarrow{B_i C_i}$ 方向， $\boldsymbol{\omega}_{2i}$ 為 $\overrightarrow{B_i C_i}$ 連桿角速度。將(6)式兩邊乘上內積 $\mathbf{b}_i$ ，可得

$$\mathbf{b}_i \cdot \mathbf{v}_p = \omega_{1i} \cdot (\mathbf{a}_i \times \mathbf{b}_i) \quad (7)$$

將(6)式代入(7)式可得

$$j_{ix} v_{px} + j_{iy} v_{py} + j_{iz} v_{pz} = a \sin \beta_i \sin \alpha_i \dot{\theta}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

將(8)式 $i = 1, 2, 3$ 的三個等式寫成向量矩陣形式：

$$\mathbf{J}_x \mathbf{v}_p = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

因此

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{J}_x^{-1} \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \equiv \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

在(10)式中， $\mathbf{J}$  即為並聯式機械手臂的Jacobian 矩陣。而並聯式機械手臂的奇異點位置發生在使Jacobian 矩陣行列式值為零的地方。

#### 四、多重感測器的整合

本文並聯式機械手臂的多重感測器，為在三軸的主動軸個別裝設編碼器、在機械手臂的端部裝設三軸( $f_x, f_y, f_z$ )的力量感測器和在機械手臂的工作空間頂端裝有CCD攝影機。編碼器所量得機械手臂三個主動軸的角度( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )，可應用於本文智慧型力矩控制器的角度回授控制，也可以利用機械手臂的順向運動學而計算出機械手臂端部的空間位置座標 $(p_x, p_y, p_z)$ 。三軸力量感測器可以偵測機械手臂與加工面接觸時的接觸力，假設接觸點無摩擦力，則接觸力的方向永遠為加工曲面接觸點的法線方向( $\mathbf{N}$ )，如圖3所示。CCD攝影機可以偵測加工的輪廓軌跡，以用於機械手臂的軌跡規劃，另外，透過影像座標和工作空間座標的轉換，也可以得到機械手臂端部的實際空間位置 $(p_x, p_y, p_z)$ 。這三種感測器所感測到的訊號，各有互補性。三個主動軸的角度、端部的接觸力和加工曲面的輪廓軌跡等的感測訊號為互補性，這些感測資訊間互不相干和不重疊，可偵測機械手臂不同物理量的特色，而能直接用於控制器的回授控制。另外，力量感測器所感測的接觸力 $\mathbf{f}$ ，可透過Jacobian 矩陣的計算而反推得到機械手臂三主動軸的扭力輸出值 $\boldsymbol{\tau}$ ，即 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}$ ，此值可做為機械手臂扭力控制器的回授信號。而接觸力的方向 $\mathbf{N}$ ，可以另外透過幾何運算，即 $\mathbf{N} \cdot \mathbf{T} = 0$ ，而得到加工面輪廓軌跡的切線方向 $\mathbf{T}$ ，此切線方向，結合CCD攝影機2D的輪廓軌跡外觀偵測，而能得到機械手臂的輪廓軌跡跟隨方向。另外，編碼器量測的機械手臂角度再經順向運動學所得的端部空間座標，和CCD攝影機所直接量測的端部空間座標，彼此間雖然資訊重疊，但編碼器和CCD攝影機的量測，也多會因雜訊干擾和機械手臂參數的不確定性，造成端部空間位置偵測的誤差。因此，可以用統計學的方法，整合此兩量測資訊以降低端部空間位置量測的誤差。本文透過機械手臂多重感測器融合的科技



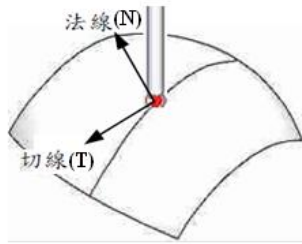


圖3. 加工面接觸力方向示意圖

術，整合這三種的感測訊號，以得到最佳的感測資訊，以應用於所提出的智慧型混合位置/力量控制器的設計。

### 五、以視覺為基礎的機械手臂軌跡規劃

本文以機械視覺擷取加工件的輪廓軌跡，再進行機械手臂無奇異點的軌跡規劃。圖4為本文的視覺影像處理流程圖，各個步驟說明如下：

- (a) 擷取輪廓軌跡影像：透過 CCD 擷取加工件的影像。
- (b) 影像扭曲校正：CCD 的鏡頭為凸透鏡，取像時會造成影像的扭曲，為了得到精確的尺寸，擷取影像的每個像素點，必須做扭曲的校正。
- (c) 影像前處理：消除影像的雜訊、邊緣強化、二值化等。
- (d) 影像分割：分離背景和輪廓軌跡目標物。
- (e) 邊緣偵測：偵測工件輪廓軌跡的邊緣點。
- (f) 影像型態學處理：透過影像型態學的处理以補綴工件的輪廓軌跡。
- (g) 找尋工件的輪廓軌跡：連結工件的輪廓軌跡邊緣點得到工件加工實際的輪廓軌跡。
- (h) 影像座標轉笛卡兒空間座標：透過座標轉換公式，將所找尋到工件的輪廓軌跡影像座標轉成機械手臂實際的笛卡兒空間座標。
- (i) 計算工件輪廓軌跡位置：透過空間幾何的運算得到工件的輪廓軌跡位置。

機械手臂軌跡規劃的目的為找尋避開奇異點的最佳路徑規劃。本文首先利用 NURBS 插值器 [18]來描述工件的輪廓軌跡  $r$ ，軌跡的形狀可由移動 NURBS 的  $(n+1)$ 個控制點  $P_i, i=0, 1, \dots, n$  位置而改變。 $r$ 可以表示成路徑長度  $s$  的函數：

$$\|r\| = a_2 \ddot{s} + a_1 \dot{s} + a_0 \quad (11)$$

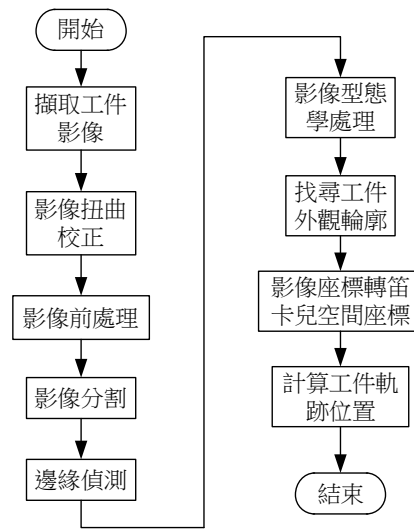


圖4. 視覺影像處理流程圖

其中  $a_2$ 、 $a_1$  和  $a_0$  為機械手臂角度  $q$  和角速度  $\dot{q}$  的函數。機械手臂的奇異點發生在使 Jacobian 矩陣行列值為零處，即  $\|J\| = 0$ 。定義如下的特徵值比值：

$$\text{cond}[J] = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad (12)$$

其中  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  分別為 Jacobian 矩陣  $J$  的最大和最小特徵值 (Eigenvalue)。cond $[J]$  值越小代表越遠離機械手臂的奇異點。考慮機械臂軌跡能避開奇異點且能以最小時間到達目的位置，定義如下的價值函數：

$$E = w_1 \text{cond}[J] + w_2 T_{\text{total}} \quad (13)$$

其中  $w_1, w_2 > 0$  為權重值，且  $w_1 + w_2 = 1$ ， $T_{\text{total}}$  為移動路徑所花費的總時間。因此，機械手臂軌跡規劃的目的，為發現  $r^*$  使能最小化(14)式的價值函數：

$$r^* = \min_{P_i, i=0,1,\dots,n} (w_1 \text{cond}[J] + w_2 T_{\text{total}}) \quad (14)$$

本文利用被控隨機搜尋方法 (Controlled random search, CRS)[21]，在藉由安置 NURBS 插值器的控制點  $P_i, i=0, 1, \dots, n$  位置，而能完成最小化(14)式價值函數的目的。CRS 是一種純啟發式的直接搜索技術，它首先在機械手臂的工作空間裡，均勻分佈取樣一組 NURBS 的控制點，然後以(14)式的價值函數作評斷，隨機搜尋更好的點替換其中當前最差的點來逐漸收斂收尋結果。



## 六、智慧型並聯式機械手臂力矩控制器設計

並聯式機械手臂的數學模型具有不確定性，運動控制時容易遭受外部結構性或非結構性的干擾力影響，本文以區間第二型類神經模糊網路系統 (IT2NFN) 為架構設計機械手臂的強健性力矩控制器。一般第二型的模糊系統較傳統第一型的模糊系統，可用較少的模糊規則數而逼近複雜多變的未知動態系統，而區間 IT2NFN 為結合第二型模糊系統和類神經網路為一體，更能掌握和描述機械手臂複雜的不確定性，且具備學習功能，透過所發展的學習法則，可得到最佳的近似效果。圖 5 為 IT2NFN 結構示意圖，總共分為輸入層 (Input layer)、歸屬層 (Membership layer)、規則層 (Rule layer)、降型態層 (Type-reduction layer) 和輸出層 (Output layer) 五層。IT2NFN 網路所代表的模糊規則如下：

$$\text{Rule } R^j: \text{ IF } x_1(t) \text{ is } \tilde{A}_1^j \text{ and } x_2(t) \text{ is } \tilde{A}_2^j \cdots \text{ and } x_n(t) \text{ is } \tilde{A}_n^j, \\ \text{ THEN } y \text{ is } [\omega_l^j, \omega_r^j] \quad (15)$$

其中  $j = 1, 2, \dots, N$ ， $N$  代表模糊規則數， $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  輸入向量， $y$  是輸出變數， $\tilde{A}_i^j$  是前因端 (Antecedent part) 的模糊集合， $[\omega_l^j, \omega_r^j]$  是後果端 (consequent part) 的中心值區間 (centroid set)。此 IT2NFN 的輸出  $y$  為一區間值  $[y_l, y_r]$ ，可由 Kamik-Mendel 法則求得：[17]

$$y_l = \frac{\sum_{j=1}^N f_l^j \omega_l^j}{\sum_{j=1}^N f_l^j} = \frac{\sum_{j=1}^L \bar{f}^j \omega_l^j + \sum_{j=L+1}^N \underline{f}^j \omega_l^j}{\sum_{j=1}^L \bar{f}^j + \sum_{j=L+1}^N \underline{f}^j} = \mathbf{w}_l^T \mathbf{g}_l \quad (16)$$

$$y_r = \frac{\sum_{j=1}^N f_r^j \omega_r^j}{\sum_{j=1}^N f_r^j} = \frac{\sum_{j=1}^R \underline{f}^j \omega_r^j + \sum_{j=R+1}^N \bar{f}^j \omega_r^j}{\sum_{j=1}^R \underline{f}^j + \sum_{j=R+1}^N \bar{f}^j} = \mathbf{w}_r^T \mathbf{g}_r \quad (17)$$

假如利用平均式的解模糊化，可得

$$y = \frac{y_l + y_r}{2} = \frac{1}{2} (\mathbf{w}_l^T \mathbf{g}_l + \mathbf{w}_r^T \mathbf{g}_r) = \frac{1}{2} [\mathbf{w}_l^T \quad \mathbf{w}_r^T] \begin{bmatrix} \mathbf{g}_l \\ \mathbf{g}_r \end{bmatrix} \quad (18) \\ \equiv \mathbf{w}^T \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{x}, \xi, \sigma)$$

Delta 機械手臂是高速且低慣量的機械手臂，整體的數學模型如下：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (19)$$

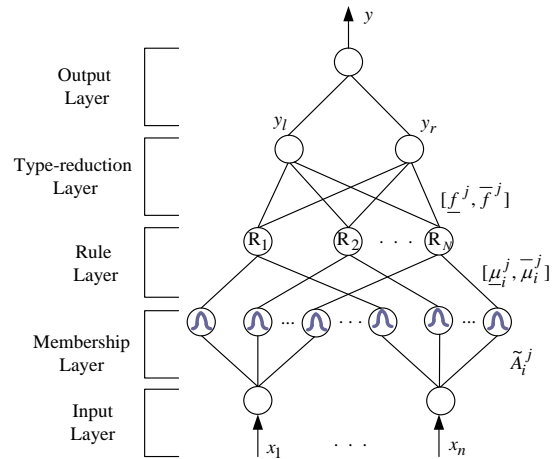


圖5. 區間第二型類神經模糊網路系統IT2NFN架構圖

其中  $\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$  為機械手臂三軸致動臂的角度位置， $\boldsymbol{\tau}$  是三軸致動臂馬達的扭力輸出， $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  是慣性矩陣， $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  是離心力和柯式力矩陣， $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^3$  為重力向量和  $\mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^3$  為外部干擾力。假設  $\mathbf{q}_d(t)$ 、 $\dot{\mathbf{q}}_d(t)$  和  $\ddot{\mathbf{q}}_d(t)$  是機械手臂所要跟隨之軌跡，定義軌跡跟蹤誤差  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$ 。因此，(19)式可改寫如下：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) + \boldsymbol{\tau} \quad (20)$$

其中  $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$  是機械手臂的總和不確定量：

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (21)$$

設計一 IT2NFN 估測器如下：

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{NFN}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = \hat{\boldsymbol{\omega}}^T \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \hat{\xi}, \hat{\sigma}) \quad (22)$$

其中  $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ 、 $\hat{\xi}$  和  $\hat{\sigma}$  分別是 IT2NFN 最佳參數的估測值。因此，可得  $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$  的近似誤差：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\psi = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) - \hat{\boldsymbol{\psi}}_{NFN}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) \\ = \boldsymbol{\omega}^{*T} \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \boldsymbol{\xi}^*, \boldsymbol{\sigma}^*) - \hat{\boldsymbol{\omega}}^T \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}, \hat{\xi}, \hat{\sigma}) + \boldsymbol{\varepsilon}_\psi(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) \quad (23)$$

其中  $\boldsymbol{\varepsilon}_\psi(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$  是  $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{q}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$  最小的近似誤差； $\boldsymbol{\omega}^*$ 、 $\boldsymbol{\xi}^*$  和  $\boldsymbol{\sigma}^*$  是最佳參數值。以 IT2NFN 為基礎的智慧型強健性力矩控制器可設計如下：



$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{q}} - \hat{\boldsymbol{\psi}}_{NFN}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_R \quad (24)$$

其中  $\mathbf{K} > \mathbf{0}$  為線性迴授增益，而  $\boldsymbol{\tau}_R$  為所要設計的強建控制器，以補償近似誤差，確保整個控制系統的穩定。

## 七、智慧型混合位置/力量控制器設計

當並聯式機械手臂的端部與加工件的曲面接觸時，其動態方程式可描述如下：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (25)$$

其中  $\mathbf{J}$  為 Jacobian 矩陣和  $\mathbf{f}$  為機械手臂與曲面的接觸力。機械手臂端部的空間座標  $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$  和各軸角度向量  $\mathbf{q}$  間的 Jacobian 矩陣關係如(10)式所示：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (26)$$

假設加工面的數學方程式為  $\mathbf{z} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ，則機械手臂與加工曲面接觸的受拘束運動如下：

$$\dot{\mathbf{z}} = \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{y}} \dot{\mathbf{y}} \Rightarrow \mathbf{N}^T \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (27)$$

其中  $\mathbf{N} = [\partial \mathbf{z} / \partial \mathbf{x}, \partial \mathbf{z} / \partial \mathbf{y}, -1]^T$  為接觸點的法線向量。再對(27)式微分，可更進一步得到運動的拘束條件如下：

$$\mathbf{N}^T \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{N}^T \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (28)$$

假設機械手臂與接觸曲面間無摩擦差力，則接觸力  $\mathbf{f}$  可表示為  $\mathbf{f} = \eta \mathbf{N}$ 。設計新的力矩控制器如下：

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{u}_{pf} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (29)$$

其中  $\mathbf{u}_{pf}$  為所要設計的混合位置/力量控制器。將(29)式代入(25)式，得

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{u}_{pf} + \eta \mathbf{M} \quad (30)$$

其中  $\mathbf{M} = \mathbf{J}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{N}$ 。因此，(29)式的力矩控制器已將(25)式的機械手臂運動方程式，轉化成在機械手臂端部空間的動態方程式(30)式。將機械手臂的接觸點曲面空間  $\Omega \in R^3$ ，分成沿著接觸點曲面法線方向的次空間  $\Omega_1 \in R^3$ ，和沿著接觸點曲面切線方向的次空間  $\Omega_2 \in R^3$ ，即  $\Omega = \Omega_1 \otimes \Omega_2$ ，希望藉此將機械手臂在拘束環境下，保持與未知曲面接觸的控制器設計問題，順利解耦合成沿著接觸點法線方向( $\Omega_1$ )受拘束的力量控制器  $\mathbf{u}_f$  設計和沿著切線方向( $\Omega_2$ )不受拘束的輪廓軌跡位置控制器  $\mathbf{u}_p$  設計兩種，即  $\mathbf{u}_{pf} = \mathbf{u}_f + \mathbf{u}_p$ 。定義此兩個次空間的集合：

$$\Omega_1 = \{\mathbf{x} \in R^3 \mid [\mathbf{I} - \mathbf{M}(\mathbf{N}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{N}]\mathbf{x} = \mathbf{0}\} \quad (31)$$

$$\Omega_2 = \{\mathbf{x} \in R^3 \mid \mathbf{M}(\mathbf{N}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{0}\} \quad (32)$$

從(30)式和(26)式，可得  $\mathbf{u}_f \in \Omega_1$  和  $\mathbf{u}_p \in \Omega_2$  的動態方程式如下：

$$\dot{\mathbf{N}}\dot{\mathbf{x}} = -(\mathbf{N}\mathbf{u}_f + \mathbf{N}\mathbf{M}\lambda) \quad (33)$$

$$[\mathbf{I} - \mathbf{M}^T(\mathbf{N}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{N}]\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{u}_p \quad (34)$$

此(33)式和(34)式，已將機械手臂端部與加工件曲面接觸受拘束控制的制問題，解耦合成力量控制  $\mathbf{u}_f \in \Omega_1$  和位置控制  $\mathbf{u}_p \in \Omega_2$  的問題。本文智慧型混合位置/力量控制的整體方塊圖，如圖 6 所示。

## 八、實驗與結果

本文的 Delta 並聯式機械手臂實際實驗平台圖如圖 7 所示，機械手臂有效行程為 X 軸 500mm、Y 軸 500mm 和 Z 軸 100mm。CCD 攝影機採用 Basler 公司 1/3 吋 130 萬畫素的彩色攝影機，解析度為 1294 × 964。力感測器使用麥思公司的三軸力感測器，型號 MX020-10N，量測範圍  $F_x$ 、 $F_y$ ：±10N、 $F_z$ ：±20N。伺服控制系統為鈦思科技公司的 MicroBox 2200 即時控制平台，內建有 4-ch 32-bit 的編碼器輸入、8-ch 14bit A/D、8-ch 14bit D/A、8-ch 數位輸入和 8-ch 數位輸出，可以搭配 MathWorks 公司的 MATLAB 和 Simulink，以及 Simulink C 程式碼產生器 (Simulink Coder)，進行機械手臂的即時控制。





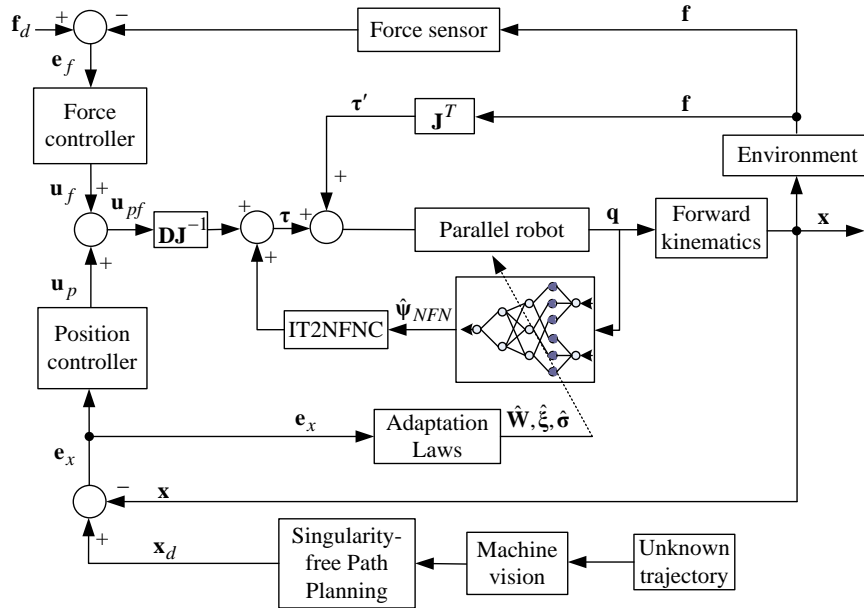


圖 6. 智慧型混合位置/力量控制的整體方塊圖

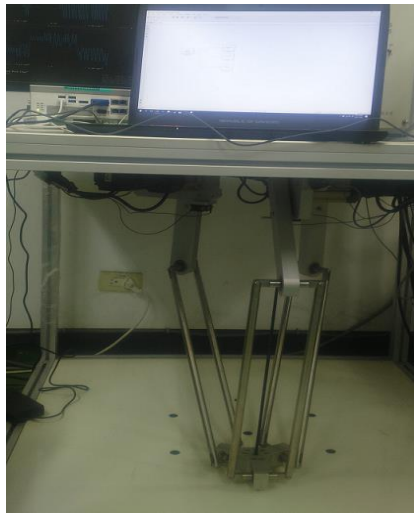


圖 7. Delta 並聯式機械手臂實際實驗平台圖

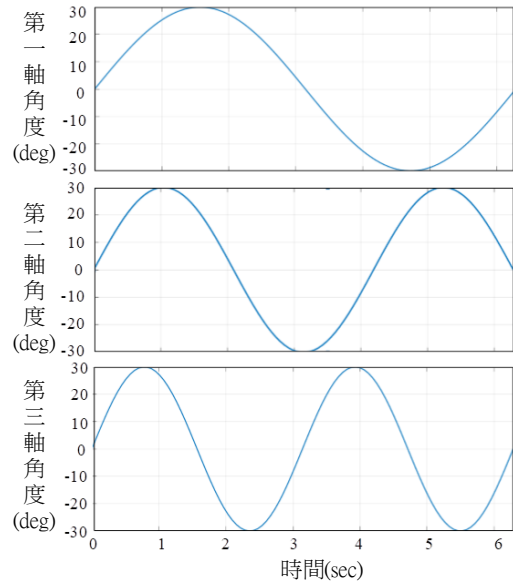


圖 8. 順向運動學機械手臂三軸移動的角度

(一) 順向運動學

給定機械手臂致動臂三軸角度的變化值，透過並聯式機械手臂的順向運動學計算出移動板中心點刀具位置的空間座標。給定第一軸角度為 30 波幅、角頻率為 1(rad/sec)的正弦函式 $\theta_1 = 30 \times \sin(t)$ ，第二軸角度為 30 波幅、角頻率為 1.5(rad/sec)的正弦函式 $\theta_2 = 30 \times \sin(1.5 \times t)$ ，而第三軸角度為波幅 30、角頻率為 2(rad/sec)的正弦函式 $\theta_3 = 30 \times \sin(2 \times t)$ ，其中時間為 0~2π 秒，如圖 8 所示。而順向運動學所計算出的移動平台的空間座標位置，如圖 9 所示。

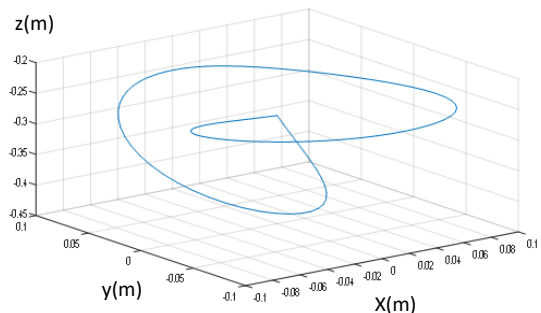


圖 9. 順向運動學機械手臂移動平台的空間位置



## (二) 逆向運動學

給定機械手臂致動臂移動平台中心點的笛卡兒座標位置，透過並聯式機械手臂的逆向運動學計算出機械所臂三致動臂的對應角度。X 軸座標以 0.15m 波幅的餘弦函式  $x(t) = 0.15\cos(t) (m)$ ，Y 軸為 0.08m 波幅的正弦函式  $y(t) = 0.08 \times \sin(t) (m)$ ，Z 軸座標由 -0.25m 至 -0.5m 的線性方程式  $z(t) = -0.25 - 0.0025 \times t (m)$ ，時間為 0~2 $\pi$ 秒，如圖 10 所示。而逆向運動學所計算出的三軸致動臂所相對應的角度，如圖 11 所示。

## (三) 實驗

以下針對本文所提出的方法，進行實際的軌跡雕刻實驗，以驗證本文所提出方法的有效性。首先利用 CCD 攝影機取得所要雕刻的原始影像，如圖 12 (a) 所示，經由影像前處理、影像分割、邊緣偵測和影像型態學處理後，經由連結工件的輪廓軌跡邊緣點得到工件加工實際的輪廓軌跡，如圖 12 (b) 所示。接著如第五節所述的方法規劃機械手臂的加工路徑，首先在輪廓軌跡點附近，以等距離隨機取 40 個 NURBS 的初始控制點  $P_i, i = 0, 2, \dots, 39$ ，並且定義(13)式的價值函數，其中取  $w_1 = w_2 = 0.5$ ，然後在 delta 機械手臂的工作空間裡，以被控隨機搜尋方法搜尋出最佳的控制點  $P_i, i = 0, 2, \dots, 39$ ，以能最小化(13)式的價值函數。NURBS 的 40 個最佳控制點搜尋結果如下：(12.0 -36.5)、(7.5 -47.5)、(-4.5 -46.5)、(-11.5 -38.5)、(-20.0 -42.0)、(-26.5 -40.5)、(-28.5 -31.0)、(-19.5 -13.5)、(-35.5 -18.5)、(-46.5 -16.0)、(-47.5 -5.0)、(-44.0 2.0)、(-48.5 9.0)、(-46.5 18.5)、(-36.5 20.5)、(-20.5 16.0)、(-29.5 27.0)、(-31.0 40.0)、(-22.5 43.5)、(-12.5 43.0)、(-9.0 48.5)、(3.5 47.0)、(8.0 39.5)、(9.0 24.0)、(15.5 36.5)、(29.5 40.5)、(35.5 33.5)、(37.0 24.0)、(45.5 -21.0)、(49.0 15.0)、(43.0 5.0)、(26.5 0.5)、(44.5 -5.5)、(50.5 -15.5)、(46.5 -22.0)、(38.0 -25.5)、(38.5 -33.5)、(37.0 -37.5)、(25.0 -38.5)、(10.5 -23.5)、(12.0 -36.5)

圖 13 為所搜尋出加工路徑的控制點和以此控制點所規畫出的加工軌跡路徑。接著設計 IT2NFN 以能線上估測控制系統的總和不確定性  $\psi(q, \dot{q})$  如(22)式，分別在機械手臂的三軸角度空間  $q_1, q_2, q_3$  從 0 deg 到 40 deg 間取 5 個輸入區間的第二型模糊集合，歸屬函數取高斯歸屬函數如圖 14 所式，而在三軸角速度空間  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3$  從 -20 deg/sec 到 20 deg/sec 間也取 5 個輸入區間的第二型模糊集合，如圖 15 所式。初始的 IT2NFN 系統參數先任意選取，然後可以透過適應性法

則線上調整而趨向較佳值。因為是 x-y 兩軸平面的雕刻，雕刻接觸點的法向量為  $N = [0, 0, -1]^T$ ，其為沿著機械手臂 z 軸的方向。因此，機械手臂控制器的設計，可以解耦合成沿

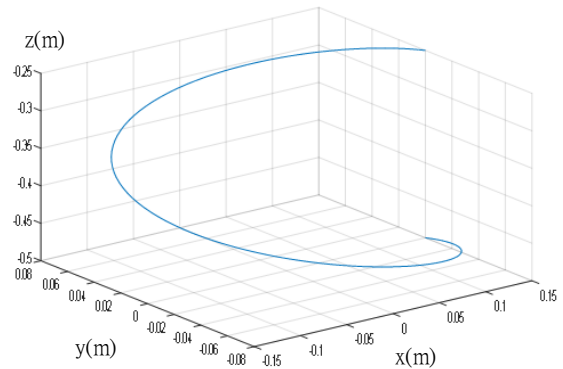


圖 10. 逆向運動學機械手臂移動平台的空間位置

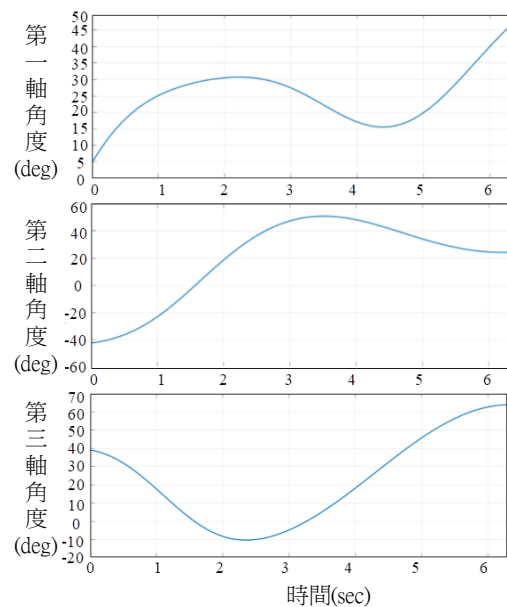
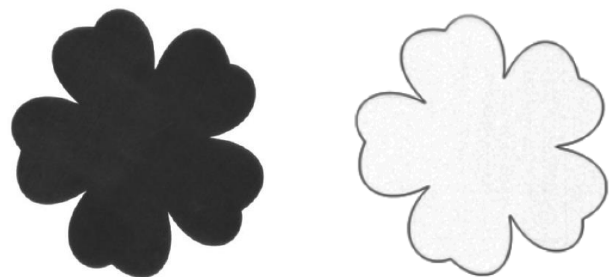


圖 11. 逆向運動學機械手臂三軸移動的角度



(a) CCD 取像後的原始影像 (b) 經影像處理後的輪廓軌跡

圖 12. 影像處理取得所要跟隨的輪廓軌跡



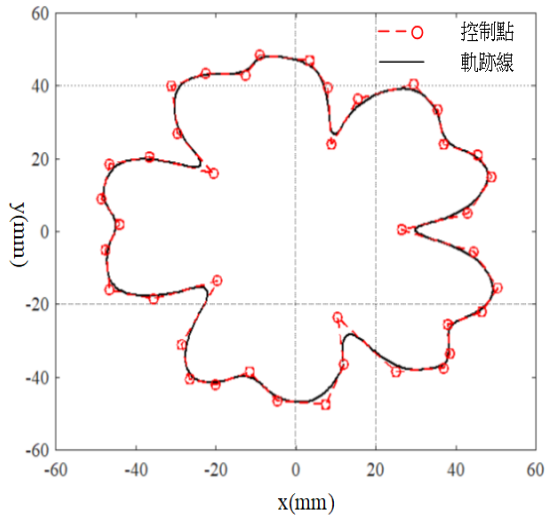


圖 13. 加工路徑的控制點和軌跡線

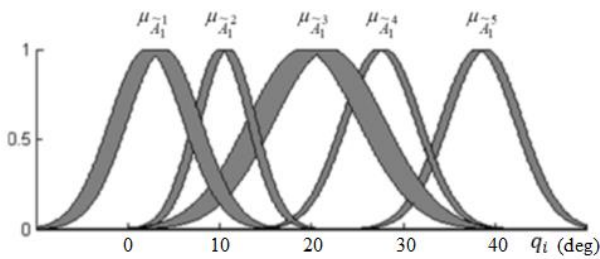


圖 14. 機械手臂的三軸角度空間的第二型模糊集合

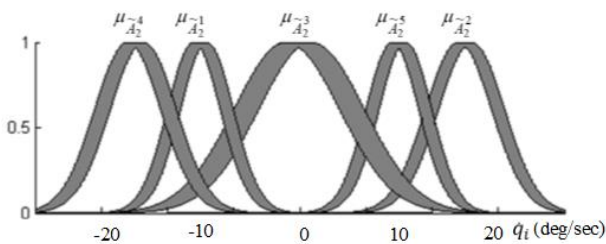


圖 15. 機械手臂的三軸角速度空間的第二型模糊集合

著雕刻接觸點法線方向(z 軸)受拘束的力量控制器 $u_f$ 和沿著切線方向(x-y 軸)不受拘束的輪廓軌跡位置控制器 $u_p$ 兩種的設計。設計 $u_f = k_f e_f$ 和 $u_p = k_p e_p$ 為線性回授控制器，其中 $k_f = 5$ 和 $k_p = [10 \ 0, 0 \ 10]$ 。雕刻接觸點所要的接觸力設為5N，而所要的雕刻軌跡如圖 13。將壓克力板放在 delta 機械手臂正下方  $z=0.9m$  的位置處，利用本文所發展的智慧型混合位置/力量控制器(25)式，進行實際的圖形雕刻實驗。實際結果，如圖 16 至圖 18 所示。圖 16 為機械手臂加工的位置軌跡和接觸力，從圖中可以看出 x-y 軸軌跡的跟隨和 z 軸接

觸點的力量控制誤差皆很小。而圖 17 為機械手臂三軸角度的所要軌跡和實際軌跡圖，其機械所臂三軸角度的跟隨誤差也很小。圖 18 為機械手臂實際的雕刻圖案，比較圖 12 和圖 18，兩者圖形完全吻合，驗證本文所發展方法的有效性。

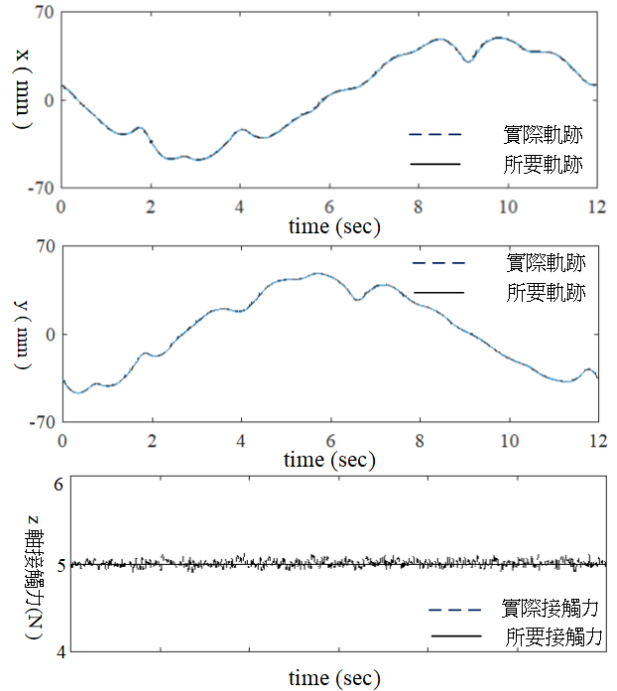


圖 16. 機械手臂加工的空間軌跡和接觸力

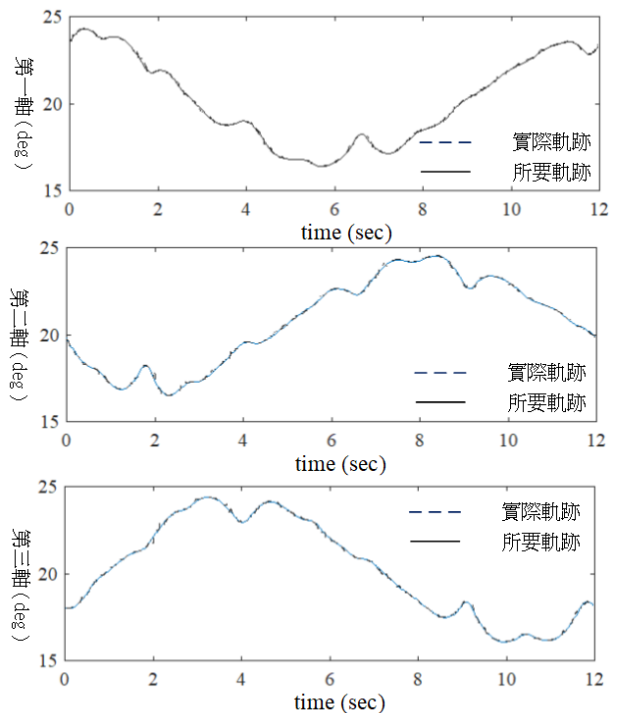


圖 17. 機械手臂三軸的角度





圖 18. 實際的雕刻圖案

### 參考文獻

1. Al-Mallah M. M., M. M. Ali and M. T. Al-Khawaldeh (2022) Obstacles avoidance for mobile robot using type-2 fuzzy. *Robotics*, 11(130), 1-22.
2. Bellakehal, S., N. Andreff, Y. Mezouar and M. Tadjine (2011) Vision/force control of parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, 46, 1376-1395.
3. Bellotto, N. L. and H. S. Hu (2009) Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 39(1), 167-181.
4. Bonilla, I. L., M. R. Mendoza, E. J. Gonz'alez, C. C. Olivares and A. L. Flores (2012) Path-tracking maneuvers with industrial robot manipulators using uncalibrated vision and impedance control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 42(6), 1716-1729.
5. Chaudhary, H. S., V. K. Panwar, N. Sukavanam and R. D. Prasad (2014) ANFIS PD+I based hybrid force/position control of an industrial robot manipulator. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2(2), 107-112.
6. Gueaieb, W., F. D. Karray and S. L. Al-Sharhan (2007) A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12(2), 109-125.
7. Hassanzadeh, H. R., M. R. Akbarzadeh, A. Akbarzadehb and A. Rezaeib (2014) An interval-valued fuzzy controller for complex dynamical systems with application to a 3-PSP parallel robot. *Fuzzy Sets and Systems*, 235, 83-100.
8. Hogan, N. (1985) Impedance control: An approach to manipulation: Part I theory, part II-implementation and part III-applications. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 107, 1-24.
9. Hsu, K. S., M. Karkoub, M. C. Tsai and M. G. Her (2014) Modelling and index analysis of a Delta-type mechanism. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K Journal of Multi-body Dynamics*, 218(3), 121-132.
10. Kim, S. H., J. P. Kim and J. H. Ryu (2014) Adaptive energy-bounding approach for robustly stable interaction control of impedance-controlled industrial robot with uncertain environments. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 19(4), 1195-1205.
11. Koch, H. K., A. D. König, A. W. Seitz, K. Kleinmann and J. Suchý (2013) Multisensor contour following with vision, force, and acceleration sensors for an industrial robot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(2), 268-280.
12. Kubo, R. and K. Ohnishi (2006) Hybrid control for multiple robots in grasping and manipulation. *Proceedings of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 367-372.
13. Li, M. Y., Z. L. Liu, M. F. Wang, G. B. Pang and H. Zhang (2022) Design of a parallel quadruped robot based on a novel intelligent control system. *Applied Sciences*, 12 (4358), 1-16.
14. Li, Y. N., S. S. Ge, Q. Zhang and T. H. Lee (2013) Neural networks impedance control of robots interacting with environments. *IET Control Theory and Applications*, 7(11), 1509-1519.
15. Lin, F. J., P. H. Chou, P. H. Shieh, and S. Y. Chen (2009) Robust control of an LUSM-based X-Y-θ motion control stage using an adaptive interval type-2 fuzzy neural network. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(1), 24-38.
16. Love, L. J. and W. J. Book (2004) Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics*, 34(1), 159 - 165.
17. Mendel, J. M. (2001) *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
18. Piegl, L. and W. Tiller (1997) *The NURBS Book*, 2nd Ed., Springer, Berlin.
19. Rabert M. H. and J. J. Craig (1981) Hybrid position/force



- control of robot manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102, 126–133.
20. Sakaino, S. and T. M. Sato (2011) Precise position/force hybrid control with modal mass decoupling and bilateral communication between different structures. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(2), 266-276.
21. Stock M. and K. Miller (2003) Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: Application of linear delta robot. *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 125(2), 292-301.
22. Xiao, D., B. K. Ghosh, N. Xi and T. J. Tarn (2000) Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(4), 635-645.
23. Xu, Q. S. (2015) Robust impedance control of a compliant microgripper for high-speed position/force regulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 1201-1209.
24. Yin, Y. H., Y. Xu, Z. H. Jiang and Q. R. Wang (2012) Tracking and understanding unknown surface with high speed by force sensing and control for robot. *IEEE Transactions on Sensors*, 12(9), 2910-2916.

收件：112.03.03 修正：112.03.14 接受：112.03.29

