



工業用機器人校準之研究

A Study on the Calibration of Industrial Manipulators

黃成凱
古有彬
吳忠憲
楊淳宜

工研院智慧機械科技中心
智慧機械技術組
群聚產業創新部

陳俊皓

工研院智慧機械科技中心
智慧機械技術組
群聚產業創新部
經理

關鍵詞(Keywords)

- 校正 Calibration
- 連桿參數 Link Parameters
- 工業機器人 Industrial Manipulators

摘要(Abstract)

工業用機器人的精度受到許多因素影響，如製造誤差、連桿機械性質、外力(包含桿重)或工作環境等因素。雖然機器人的精度可經由一些補償技術改善，但現有的方法大多是針對硬體進行校正。本文提出連桿參數校準及具有極高計算效率之反位移分析方法，以滿足即時控制之需求。

The accuracy of an industrial manipulator is affected by several factors, such as manufacturing

errors, mechanical properties of links, external forces (including mass weight), and the working environment. Although the accuracy can be improved via the calibration process in software, the existing methods are mostly through hardware calibration. The method presented in this paper shows the calibration method of the link parameters and provides inverse kinematic solutions for the manipulator with modified link parameters. The results conclude that the inverse kinematic solutions can be efficiently determined to meet the control requirement of the manipulator.

1. 前言

工業用機器人具有許多優越之特性，但卻受



限於精確度不佳之影響[1]。因此一般工業用機器人要進行工作規劃時，通常以人工教導之方式[2-4]，此法是由操作者引導機器人至欲到達的各個位置，同時記錄其座標。由於大部分工業用機器人之重現度均相當好[5]，所以可以很精確地執行被教導過的動作。但此人工教導之方式，卻使機器人的工作受到限制，如須規劃一個新工作時，則必須停機而後經由繁複的教導與紀錄工作，才可完成規劃。

此情況均由於機器人沒有良好之絕對精度，而衍生的缺失。影響機器人位置精度的重要因素概可分為幾何性及非幾何性之兩種誤差[4][6][7]：

1. 幾何性誤差：包括連桿長度(link length)、連桿扭角(twist angle)、連桿偏位(link offset)、關節位移之起始參考位置(initial position)及機器人安裝的誤差(assembly error)等。
2. 非幾何性誤差：包括順應性(compliance)、齒輪背隙(gear backlash)、解碼器之解析度(resolution)、齒輪方向誤差(direction error)、溫度梯度(temperature gradient)等。

一般而言，尋求改進機器人精度之方法，可分為硬體結構及軟體參數兩方面來調整，但從硬體上進行校準所需之費用與時間遠高於軟體參數之調整。本文提出之方法將以軟體參數進行校正，首先利用機器人各軸角度與量測所得之端效器 End-effector 之位置關係求解非線性聯立方程式，求得實際的連桿參數值與設計的連桿參數值 $a_i, d_i, \theta_i, \alpha_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 之間存在的差異量 $\Delta a_i, \Delta d_i, \Delta \theta_i, \Delta \alpha_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ ($\Delta \theta_i$ 為 0° 位置之誤差)，接著提出校正型運動學取代現有之解析法運動學，以將校正所得之補償參數補償於機器人控

制器提升精度；本文提出之方法進行校正後可降低約 90% 之誤差。

2. 校準理論之數學模式與量測方法

機器人之運動學可由數學模式表示，主要在描述端效器 end-effector 之位置及方位、關節位移與其他固定連桿參數之關係。若不考慮連桿彈性變形等影響較小之變動因素及長期使用機件產生之磨耗，則各連桿可視為理想剛體。在此情況下，機器人最終構型將是初始構型、連桿參數及關節位移量之函數；與運動學相關之數學模式包含正向運動學(forward kinematics)、逆向運動學(inverse kinematics)及參數識別(parameter identification)，其相互關係如圖所示。

機器人之正、反位移分析，皆使用到 D-H 連桿參數 $a_i, d_i, \theta_i, \alpha_i$ 及 D-H 轉換矩陣 A_i 。端效器(或刀具座標系 $x_T - y_T - z_T$)相對於工件座標系 $x_w - y_w - z_w$ 之位置及方位可經由式(1)求得：

$${}^{work}T_{base} A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 {}^{EE}T_{Tool} = E \quad (1)$$

其中 E 為端效器(或刀具座標系)位置與方位之 4×4 轉換矩陣， A_i 為 D-H 連桿參數 $a_i, d_i, \theta_i, \alpha_i$ 組成之

齊次轉換矩陣， ${}^{EE}T_{Tool} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_7 \\ 0 & 1 & 0 & b_7 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 為將座

標由刀具座標系 $x_T - y_T - z_T$ 轉換成座標系 $x_6 - y_6 - z_6$ 表示之平移轉換矩陣(本文為定位精度之校正，故刀具座標系轉換僅考慮平移)， ${}^{work}T_{base}$ 為將座標由基座座標系 $x_0 - y_0 - z_0$ 轉換成工件座

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】404 期・105 年 11 月號

每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011

機械工業雜誌官方網站：www.automan.tw

機械工業雜誌信箱：jmi@itri.org.tw