# 基于双目视觉动态跟踪的机器人标定\*

应再恩,李正洋,平雪良<sup>†</sup>,蒋 毅,刘开明 (江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要:采用双目视觉动态跟踪技术对自主研发的工业机器人进行运动学标定。区别于以往机器人运动学标 定中复杂模型计算,在此利用双目视觉动态跟踪系统的静态测量和动态跟踪等优势特性来跟踪测量机器人的连 杆参数误差,结合机器人控制系统开放性特点,运用提出的动态标定原理对机器人实施连杆参数测量、辨识、修 正及补偿。实验表明,通过参数反馈补偿,自主研发的机器人的定位误差明显降低,且该方法易于实现,为机器 人精度研究提供了可靠依据。

关键词:工业机器人;标定;定位误差;运动学模型;双目视觉 中图分类号:TP242 文献标志码:A 文章编号:1001-3695(2014)05-1424-04 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.033

## Robot calibration based on binocular vision dynamic tracking

YING Zai-en, LI Zheng-yang, PING Xue-liang<sup>†</sup>, JIANG Yi, LIU Kai-ming (School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract**: This paper used binocular vision dynamic tracking technology in the kinematic calibration of independent research and development industrial robots. The advantages of static measuring and dynamic tracking characteristics of binocular vision dynamic tracking system, which was different from previous complex models, it used to track and measure robot link parameters errors. It proposed a dynamic calibration method, which combined with open characteristics of the robot control system, to implement the robot link parameters measurement, identification, correction and compensation. The experiments show that the positioning error of the independent research and development robot is significantly reduced, by using parameters feedback compensation. Meanwhile, the method is easy to implement, and also provides a reliable basis for the research of robot accuracy.

Key words: industrial robot; calibration; positioning error; kinematic model; binocular vision

## 0 引言

随着工业自动化的发展,机器人在生产中得到了越来越广 泛的应用。一般而言,机器人的重复精度较高,但其绝对精度 较低,这对机器人的使用性能造成很大影响。对于没有标定的 机器人,精度误差可以达到几毫米,因此在很多应用中必须对 机器人进行精确标定。标定是建模、测量、参数识别和误差补 偿几个步骤的集成过程<sup>[1]</sup>。标定的目的就是减小机器人几何 参数误差。该误差表示在运动学模型中,几何参数的名义值与 真实值间的偏差。机器人连杆几何参数的运动学标定涉及测 量坐标系和机器人基础坐标系间的转换问题。有些标定过程 将测量仪的坐标系建立在机器人的基础坐标系上,但这会导致 复杂的坐标系转换,使计算过程复杂,甚至难以求解<sup>[2-6]</sup>。

目前机器人运动学标定的方法主要有圆周点法<sup>[7,8]</sup>和运 动学回路法<sup>[9,10]</sup>。前者是将机器人的关节轴线抽象成一条空 间中的直线,利用关节轴线间的几何关系求出模型中运动学参 数的方法。运动学回路法是运用测量装置获取机器人末端的 位姿,通过求解机器人的运动学方程获得机器人关节参数的方 法。与运动学回路法相比,圆周点法标定过程简单,可操作性强,所以在对机器人标定的过程中被广泛采用<sup>[11]</sup>。

本文采用圆周点法进行标定。运用双目视觉动态跟踪技 术跟踪机器人各个关节独立运动轴线,然后构建并拟合关节轴 线,从而得到运动学模型参数。该方法无须以往众多机器人运 动学模型迭代求解方程等复杂步骤,针对自主研发的机器人控 制系统,由上述方法获得的连杆模型参数能及时反馈给机器 人,实施参数修正及补偿,从而提高机器人定位精度。该方法 具有通用性、随时性、易操作性等优点。

#### 1 双目视觉动态跟踪技术

双目视觉动态跟踪技术的主要功能是自动检测运动目标, 并实现实时跟踪和三维测距。其基本步骤如图1所示。

双目视觉定位系统的基本原理如图 2 所示。利用同一特 征点 P 在左、右两个图像上形成的视差可以测出特征点的深 度信息。

利用摄像机的参数(内参数和外参数)数值,可以将被测 物体表面点的二维图像坐标转换为三维世界坐标系坐标,计算

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2013-07-29 基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011098)

作者简介:应再恩(1989-),男,浙江台州人,硕士,主要研究方向为机电一体化、机器人控制;李正洋(1988-),男,江苏盐城人,硕士,主要研究方向 为机器人控制;平雪良(1962-),男(通信作者),江苏常熟人,教授,硕导,主要研究方向为 CAD、CAM 与机电一体化(ping@jiangnan.edu.cn);蒋毅 (1981-),男,江苏无锡人,副教授,博士,主要研究方向为机电一体化;刘开明(1989-),男,湖南常德人,硕士,主要研究方向为机器人控制.

连杆 i

. 170

公式如下:

$$Z_{c}\begin{bmatrix} U\\ V\\ 0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_{x}} & 0 & U_{0} & 0\\ 0 & \frac{f}{d_{y}} & V_{0} & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T\\ 0^{T} & 1\end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{w}\\ Y_{w}\\ Z_{w}\\ 1\end{bmatrix}$$
(1)

式中:Z。表示物体表面特征点到左、右摄像机光心平面的垂直 距离; $(x_w, y_w, z_w)$ 表示特征点的世界坐标系坐标; $(U_0, V_0)$ 表 示图像中心的像素坐标;(U,V)表示被测点的图像坐标系坐 标;d,和 d,分别表示在水平和垂直方向上相邻像素之间的物 理距离; R 是一个3×3的旋转矩阵; T 是一个平移向量<sup>[12]</sup>。



双目动态跟踪系统配有两个高品质的光学 CCD 和特殊光 源,在操作范围内自动测量反射靶点,系统根据三角测算原理 自动实时计算目标靶点的三维坐标,并将确定的坐标值传递给 软件进行后续处理。该系统在测量范围内测量精度高达 0.022 mm,单点重复性精度达0.045 mm,体积精确度达0.075 mm,动态跟踪速度为30 Hz。

## 2 机器人运动学特性

#### 2.1 机器人运动学特性

本文研究对象是自主研发的6R型工业机器人,其本体结 构如图3所示。机器人具有的自由度为6,且全部为转动关 节。前三个关节 Axis1、Axis2、Axis3 控制着机器人末端手腕的 位置,而后三个关节 Axis4、Axis5、Axis6 控制着机器人末端手 腕的姿态。机器人具体关节结构由回转主体(腰关节)、大臂 (肩关节)、小臂(肘关节)、腕部(腕关节)等几个部分组成。

该机器人连杆系可看做一个开式运动链,它是由一系列连 杆通过转动关节串联而成的。开链的一端固定在基座上,另一 端是自由的。安装工具(或称末端执行器)用于操作物体,完 成各种作业。关节由驱动器驱动,关节的相对运动导致连杆的 运动,使手爪到达所需的位姿。为了研究各连杆之间的位姿关 系,可在每个连杆上固接一个坐标系,然后描述这些坐标系之 间的关系。本文采用 Denavit 和 Hartenberg 两人提出的建立坐 标系方法得到该机器人的运动学模型如图4所示,机器人理论 连杆参数如表1所示。



 $\theta_i/^\circ$  $\alpha_{i-1}/c$  $a_{i-1}/\text{mm}$ d/mm关节角范围/。 A.(90°) ٥o Δ 0 170

表1 机器人理论运动学参数

1	$v_1(90)$	0	0	0	$-1/0 \sim +1/0$
2	$\theta_2(\ -90^\circ)$	- 90°	160	0	$-170 \sim +20$
3	$\theta_3(0^\circ)$	0°	560	0	$-60 \sim +70$
4	$\theta_4(0^\circ)$	- 90°	130	600	$-170 \sim +170$
5	$\theta_5(90^\circ)$	90°	0	0	$-90 \sim +140$
6	$\theta_6(0^\circ)$	- 90°	0	0	$-180 \sim +180$

机器人连杆变换通式为

[	$c\theta_i$	$-s\theta_i$	0	<i>a</i> <sub><i>i</i>-1</sub>	
i - 1 T - 1	$s\theta_i c\alpha_{i-1}$	$c\theta_i c\alpha_{i-1}$	$-s\alpha_{i-1}$	$-d_i s \alpha_{i-1}$	(2)
<i>I</i> <sub><i>i</i></sub> –	$s\theta_i s\alpha_{i-1}$	$c\theta_i s\alpha_{i-1}$	$c\alpha_{i-1}$	$d_i c \alpha_{i-1}$	(2)
l	- 0	0	0	1	

其中:s 表示取角度 $\theta$ 的正弦,c 表示取角度 $\theta$ 的余弦。 将各连杆变换相乘,得到机械手变换矩阵为

$${}^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T^{1}_{2}T^{2}_{3}T^{3}_{4}T^{4}_{5}T^{5}_{6}T$$
(3)

即机器人末端执行器位姿矩阵。

### 2.2 机器人定位误差

机器人几何参数的名义值与真实值间的偏差,  $\Pi \Delta a_i$ 、  $\Delta d_i \, \Delta \alpha_i \, \Delta \theta_i \,$ 分别表示连杆长度偏差、连杆偏置、扭角偏差和 关节角偏差,其中 $\Delta a_i$ 和 $\Delta d_i$ 是由于加工精度及机器人装配时 产生的杆件长度误差; $\Delta \alpha_i$ 是相邻轴线之间的平行度和垂直度 而引起的角度误差; $\Delta \theta$ ,是由于在机器人装配过程中,角度光学 编码器的零位与名义模型中关节旋转零位不重合而产生的零 位偏置误差,这些几何参数误差对机器人末端执行器的定位精 度有很大的影响。

根据机器人几何参数可以得到机器人末端位姿,用 P<sup>n</sup> 来 表示机器人末端法兰盘中心点在机器人基坐标系下的理论位 置,用 P' 来表示实际末端位姿, ΔP 来表示机器人末端位姿的 定位误差。

$$P^{n} = F(a, d, \alpha, \theta) \tag{4}$$

 $P^{r} = F(a + \Delta a, d + \Delta d, \alpha + \Delta \alpha, \theta + \Delta \theta)$ (5)

 $\Delta P = P^r - P^n$ (6)

根据自主研发的机器人控制系统中连杆参数模型,目前阶 段先仅考虑机器人末端 TCP 位置误差。

#### 3 机器人标定原理

在机器人运动学模型的基础上,本文采用圆周点法来测量 机器人实际的连杆参数模型。

标定系统的工作过程如下:

a) 控制机器人第一关节单独运动, 在此运用双目视觉系 统动态跟踪机器人末端执行器上的标志点,得到标志点相对相 机坐标系的三维坐标,这样这些坐标点可以拟合成第一关节 圆,进而可以得出关节电机实际轴线,同时可以计算关节圆的 拟合误差,其原理如图5所示。

b)运用同样方法跟踪测量其他关节独立运动的点坐标, 尽可能测量为数较多末端执行器上跟踪点坐标,以提高后续数 据处理的精确度。

c)然后将跟踪得到的单关节坐标数据分别进行关节电机 轴线和轨迹圆的拟合构建,从而形成实际机器人空间 D-H 参

数模型,得到机器人实际几何参数,最后与机器人理论几何参 数模型进行比对。

d)运用动态跟踪原理,建立机器人基坐标系和 TCP 坐标 系,将识别的实际机器人运动参数反馈到建立的坐标系模型 中,控制机器人运行至空间任意位置,测量机器人 TCP 到达目 标点的三维坐标,与该点理论三维坐标进行对比,运用式(6) 可以得到定位误差,从而验证机器人运动学模型修正前后的机 器人定位精度。

#### 4 机器人标定实验

利用本文提出的方法对自主研发的 6R 型关节机器人进 行标定实验,并通过测量机器人的实际 D-H 参数,对机器人进 行参数反馈补偿。随后,分别测量设计 D-H 参数下和实际 D-H 参数下的机器人定位误差,再对这两组定位误差进行比较分 析。标定实验主要分为机器人关节坐标系获取、机器人参数识 别、机器人参数反馈补偿、实验结果分析四个步骤。

#### 4.1 机器人关节坐标系获取

机器人关节坐标系获取中涉及到机器人基坐标系,由于采 用高精度的动态跟踪系统,测量过程中发现,第一关节独立旋 转形成的关节电机轴线圆所在的平面能够高精准地代替机器 人本体结构的第一关节所在平面,据此可以进行机器人基坐标 系的构建,建立原则是在机器人初始零位状态下,以第一关节 平面的法线作为基坐标系的 Z 轴方向,第二关节平面的法线 作为基坐标系的 X 轴方向,而 Y 方向则自动生成,符合坐标系 右手定则:Y=Z×X。运用机器人单关节独立运动的方法可以 得到各个关节圆,进而得到机器人各个关节圆空间的实际关 系,最后根据 D-H 建模法可以构建机器人关节坐标系。机器 人参数模型如图 6 所示。



#### 4.2 机器人参数识别

根据前述机器人运动学模型测量方法,得到实际测量的机器人运动学模型参数。由于机器人本体是自主研发的机器人, 有诸多细节因素暂未考虑,这里主要研究机器人连杆参数中的 a和d。由于按照本文D-H建模方法,机器人末端TCP位于第 五关节处,所以暂不计算第六关节(T)的转动参数,前五个关 节。这里分别称为S、L、U、R、B关节。由第3章步骤a)所述 的原理可以得到关节圆拟合误差,如表2所示;由第3章步骤 c)所述的原理可以得到机器人实际几何参数,如表3所示;同 时由测量数据可以得到机器人建立在第五关节处的实际TCP 坐标,如表4所示。数据表格中均采用平均值来对机器人控制 系统进行反馈补偿,此处平均值采用了所有数据去除最大值和 最小值之后的平均值,具有一定的数据反应能力。

#### 4.3 机器人参数反馈补偿

从上述实验结果得出机器人实际的连杆参数,本文结合机

器人控制系统,将识别的参数取平均值反馈给机器人,进而修 正控制系统的机器人运动学模型参数,完成机器人标定过程的 参数反馈补偿。在参数补偿前后,对机器人进行动态跟踪。由 于考虑到机器人实际 TCP 与机器人理论运动学模型中的 TCP 位置存在误差,所以本文对机器人基坐标系和实际机器人 TCP 坐标系分别进行了构建。实际机器人基坐标系与实际 TCP 坐 标关系通过双目视觉系统实际测量结果来动态建立,以达到精 确跟踪机器人。

表2 关节圆拟合误差

	次数	S∕mm	L∕mm	$U/\rm{mm}$	<i>R</i> ∕mm	B∕mm
	1	0.075	0.021	0.014	0.065	0.019
	2	0.055	0.019	0.010	0.058	0.027
	3	0.060	0.035	0.018	0.069	0.024
	4	0.044	0.031	0.020	0.071	0.033
	5	0.042	0.038	0.021	0.098	0.038
	6	0.065	0.038	0.019	0.093	0.038
	7	0.082	0.021	0.018	0.088	0.034
	8	0.035	0.018	0.013	0.074	0.040
	9	0.040	0.016	0.018	0.064	0.029
	10	0.057	0.027	0.018	0.091	0.026
	平均值	0.055	0.026	0.017	0.077	0.031
		表3	机器人实	际几何刻	参数	
-	次数	$A_1$ /mm	<i>A</i> <sub>2</sub> /m	m A	₄₃∕mm	$A_4$ /mm
-	次数 1	A <sub>1</sub> /mm 159.660	A <sub>2</sub> /m 560.3	m A	4 <sub>3</sub> /mm 26. 557	A <sub>4</sub> /mm 600.624
-	次数 1 2	A <sub>1</sub> /mm 159.660 159.778	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3	m A 20 1: 35 1:	4 <sub>3</sub> /mm 26.557 26.672	A <sub>4</sub> /mm 600. 624 600. 698
-	次数 1 2 3	A <sub>1</sub> /mm 159.660 159.778 160.036	A <sub>2</sub> /m 560. 3 560. 3 560. 2	m A 20 1: 35 1: 59 1:	4 <sub>3</sub> /mm 26. 557 26. 672 26. 547	A <sub>4</sub> /mm           600. 624           600. 698           600. 670
-	次数 1 2 3 4	A <sub>1</sub> /mm 159.660 159.778 160.036 160.083	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3 560.2 560.2	m 2 20 1: 35 1: 59 1: 85 1:	4 <sub>3</sub> /mm 26. 557 26. 672 26. 547 26. 572	A <sub>4</sub> /mm           600. 624           600. 698           600. 670           600. 590
-	次数 1 2 3 4 5	A <sub>1</sub> /mm 159.660 159.778 160.036 160.083 159.969	A <sub>2</sub> /m 560. 3 560. 2 560. 2 560. 2 560. 2	m A 20 1: 35 1: 59 1: 85 1: 16 1:	4 <sub>3</sub> /mm 26. 557 26. 672 26. 547 26. 572 26. 614	A <sub>4</sub> /mm           600. 624           600. 698           600. 670           600. 590           600. 613
_	次数 1 2 3 4 5 6	A <sub>1</sub> /mm 159.660 159.778 160.036 160.083 159.969 159.789	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.2 560.2 560.5 560.5	m / 20 11: 35 11: 59 11: 85 11: 16 11: 13 11:	A <sub>3</sub> /mm 26. 557 26. 672 26. 547 26. 572 26. 572 26. 614 26. 227	A <sub>4</sub> /mm           600. 624           600. 698           600. 670           600. 590           600. 613           600. 628
-	次数 1 2 3 4 5 6 7	A1/mm           159.660           159.778           160.036           160.083           159.769           159.789           159.729	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3 560.2 560.2 560.5 560.7 560.5	m 220 1: 220 1: 335 1: 559 1: 559 1: 1885 1: 16 1: 13 1: 220 1:	4 <sub>3</sub> /mm 26. 557 26. 672 26. 547 26. 572 26. 614 26. 227 26. 229	$\begin{array}{c} A_4 / {\rm mm} \\ 600.\ 624 \\ 600.\ 698 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 590 \\ 600.\ 613 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 745 \end{array}$
-	次数 1 2 3 4 5 6 7 8	A1/mm           159.660           159.778           160.036           160.083           159.969           159.789           159.729           159.760	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3 560.2 560.2 560.5 560.5 560.5 560.5 560.6	m / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	A <sub>3</sub> /mm           26.557           26.672           26.557           26.572           26.512           26.512           26.512           26.512           26.512           26.512           26.512           26.512           26.614           26.227           26.229           26.011	$\begin{array}{c} A_4 / \text{mm} \\ \hline 600.\ 624 \\ 600.\ 698 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 590 \\ 600.\ 613 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 745 \\ 600.\ 976 \end{array}$
-	次数 1 2 3 4 5 6 7 8 9	A1/mm           159.660           159.778           160.036           160.083           159.969           159.789           159.729           159.760           160.343	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3 560.2 560.2 560.5 560.5 560.7 560.5 560.6 560.4	m / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	A <sub>3</sub> /mm           26.557           26.672           26.547           26.512           26.614           26.227           26.229           26.011           26.691	$\begin{array}{c} A_4 / \text{mm} \\ \hline 600.\ 624 \\ 600.\ 698 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 613 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 745 \\ 600.\ 976 \\ 600.\ 569 \end{array}$
-	次数 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	A1/mm           159.660           159.778           160.036           160.033           159.769           159.789           159.760           160.343           160.083	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.2 560.2 560.5 560.5 560.7 560.5 560.6 560.4 560.1	m / / 20 1: 35 1: 59 1: 59 1: 16 1: 13 1: 13 1: 20 1: 28 1: 28 1: 03 1: 89 1:	4 <sub>3</sub> /mm           26.557           26.672           26.577           26.572           26.614           26.227           26.011           26.691           26.178	$\begin{array}{c} A_4 / {\rm mm} \\ \hline 600.\ 624 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 613 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 745 \\ 600.\ 976 \\ 600.\ 569 \\ 600.\ 794 \end{array}$
-	次数 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 平均值	A1/mm           159.660           159.778           160.036           160.083           159.760           159.760           160.083           159.760           160.083           159.760           160.083           159.903	A <sub>2</sub> /m 560.3 560.3 560.2 560.2 560.5 560.5 560.5 560.6 560.4 560.1 560.4	m / / / / / / / / / / / / / / / / / / /	4 <sub>3</sub> /mm           26.557           26.672           26.547           26.572           26.614           26.227           26.011           26.691           26.178           26.450	$\begin{array}{c} A_4 / \text{mm} \\ \hline 600.\ 624 \\ 600.\ 698 \\ 600.\ 670 \\ 600.\ 590 \\ 600.\ 613 \\ 600.\ 628 \\ 600.\ 745 \\ 600.\ 976 \\ 600.\ 569 \\ 600.\ 794 \\ 600.\ 670 \end{array}$

	衣4 机奋力	八木埔 IUP 坐4	小
次数	TCP <sub>x</sub> /mm	TCP <sub>y</sub> /mm	TCP <sub>z</sub> /mm
1	-0.958	761.156	686.877
2	-1.002	761.688	686.686
3	-1.146	761.511	686.806
4	-1.320	761.528	686.857
5	-1.023	761.566	687.130
6	-1.074	761.860	686.940
7	-0.814	761.702	686.749
8	-1.178	762.129	686.639
9	-1.237	761.700	687.094
10	-0.936	761.952	686.846
平均值	-1.069	761.688	686.857

a) 在参数反馈补偿之前, 控制机器人到达其工作空间任 意位置点, 运用双目视觉动态跟踪系统对机器人 TCP 进行跟 踪, 测量 TCP 到达工作空间的任意位置坐标,将得到的位置坐 标与机器人控制系统的理论位置坐标进行比对, 可以得到补偿 前的位置误差。 b)然后采用同样跟踪方法,对机器人运动学参数反馈补 偿之后,跟踪测量机器人TCP到达工作空间的任意位置坐标, 可以得到补偿后的位置误差。参数补偿前后定位误差如表5 所示。

#### 4.4 实验结果分析

本文采用动态跟踪测量原理,运用双目视觉动态跟踪系统 对自主研发的机器人进行标定。标定实验结果可以看出:

a)机器人运动学模型中连杆参数的理论值与实际测量值 误差较大,主要体现在 a<sub>3</sub>数据上,设计的名义值是 130 mm,然 后实际动态测量法测得的数据平均值是 126.449 mm,对于此 参数的修正极大提高了机器人的定位精度。 b) 从机器人实际末端执行器的 TCP 坐标数据可以看出, 理论上 TCP 的 x 坐标值是 0, 但是由于诸多影响因素存在, 如 加工误差、装配误差等, 易造成机器人实际末端 TCP 相对机器 人基坐标系的位置误差。本文在跟踪时依靠双目视觉系统的 动态跟踪和动态建模优势, 建立近似于实际机器人基坐标和实 际 TCP 坐标关系。

c)从定位误差数据可以看出,补偿之后机器人的定位精 度得到明显提升,补偿之前机器人的定位精度的平均误差是 3.997 mm,标准方差是0.189;补偿之后定位精度的平均误差 是1.067 mm,标准方差是0.104,平均定位误差提高了3.7倍, 平均误差提高了1.8倍。

表5 参数补偿前后定位误差

z         误差/mm         误差/mm           286.620         3.621         0.857           36.610         3.981         1.084           519.910         3.928         1.012           86.080         3.877         0.945           47.570         3.990         1.079           40.100         3.825         1.003           96         30         4.106         1.091
86. 620         3. 621         0. 857           36. 610         3. 981         1. 084           19. 910         3. 928         1. 012           86. 080         3. 877         0. 945           47. 570         3. 990         1. 079           40. 100         3. 825         1. 003           96         30         4. 106         1. 091
336.610       3.981       1.084         519.910       3.928       1.012         586.080       3.877       0.945         447.570       3.990       1.079         440.100       3.825       1.003         596       30       4.106       1.091
19.910       3.928       1.012         86.080       3.877       0.945         47.570       3.990       1.079         40.100       3.825       1.003         96 390       4.106       1.091
86.080         3.877         0.945           447.570         3.990         1.079           440.100         3.825         1.003           496.390         4.106         1.091
47.570       3.990       1.079         40.100       3.825       1.003         96.390       4.106       1.091
40.100         3.825         1.003           96.390         4.106         1.091
<u>96 390 4 106 1 091</u>
4.100 1.001
40.060 4.343 1.191
56.050 3.878 1.128
23.010 4.112 1.175
4.025 1.074
91.330 4.084 1.115
4.067 1.028
32.210 3.786 0.948
3.997 1.067
) 5 7

## 5 结束语

在自主研发工业机器人进程中,涉及到机器人的精度问题,本文采用动态跟踪和动态建模法,依靠双目视觉动态跟踪 技术,对机器人进行运动学标定,在分析机器人理论运动学参 数的基础上进行修正补偿,从而提高机器人定位精度。本文设 计的实验方案,易于测量出多项机器人运动学参数。动态侦测 独立关节运动构建关节轴线的方法能够避免因机械本体结构 误差或接触测量造成的测量误差,具有很高的可靠性,而且本 文所设计的实验方案在机器人精度测量方面具有很好的实 用性。

## 参考文献:

- 王东署,迟健男. 机器人运动学标定综述[J]. 计算机应用研究, 2007,24(9):8-11,39.
- [2] 任永杰,郑继贵,杨学友,等.利用激光跟踪仪对机器人进行标定 的方法[J].机械工程学报,2007,43(9):195-200.
- [3] 任永杰.测量机器人本体标定技术研究[D].天津:天津大学精仪 学院,2007.
- [4] 齐立哲,陈磊,王伟,等.基于正交试验法的工业机器人定位误差 测量[J].中国机械工程,2013,24(6):720-723.

- [5] 张铁,戴孝亮.基于距离误差的机器人运动学标定[J]. 华南理工 大学学报:自然科学版,2011,39(11):98-103.
- [6] 陈钢,贾庆轩,李彤,等.基于误差模型的机器人运动学参数标定 方法与实验[J].机器人,2012,34(6):680-688.
- [7] 任永杰, 郑继贵, 杨学友. 基于距离精度的测量机器人标定模型及 算法[J]. 计量学报, 2008, 29(3):198-202.
- [8] OTIERBACH R, GERDES R. Camera and robot hand/eye calibration using a three-dimensional calibration objects [C]//Proc of the 25th International Symposium on Industrial Robots. Hannover: IEEE Press, 1994:741-748.
- [9] ELATTA A Y, LI Pei-gen, FAN Liang-zhi, et al. An overview of robot calibration [J]. Information Technology Journal, 2004, 3(1): 74-78.
- [10] MENG Yan, ZHUANG Han-qi. Autonomous robot calibration using vision technology [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007,23(4):436-446.
- [11] 解则晓,辛少辉,李绪勇,等.基于单目视觉的机器人标定方法
   [J].机械工程学报,2011,47(5):35-40.
- [12] KUCHI M, FUJISWA N, TOMATSU S. Performance of a PIV system for combusting flow and its application to a spray combustor model [J]. Journal of Visualization, 2005,8(3):269-276.