

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2013.00600

基于距离误差的机器人运动学参数标定方法

高文斌^{1,2}, 王洪光¹, 姜 勇¹, 潘新安^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据指数积公式中关节旋量坐标的理论值和实际值之间的伴随变换关系, 将机器人运动学方程改写成包含有关节约束条件的等价形式. 对运动学方程取微分得到末端连杆定位误差与关节旋量误差及零位位置误差间的线性化模型. 利用距离精度的定义给出了指数积形式的机器人距离误差模型, 避免了标定过程中坐标测量结果从测量设备坐标系向机器人基础坐标系变换带来的误差. 基于最小二乘法给出了一种机器人运动学参数标定模型. 采用激光跟踪仪作为测量手段完成了一种 5 自由度机械臂运动学参数标定实验. 测试结果表明, 经过参数标定在随机产生的测试点上机器人距离误差的平均值降低了近 3.5 倍.

关键词: 机器人; 指数积法; 距离误差; 参数标定

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-05-0600-07

Kinematic Calibration Method of Robots Based on Distance Error

GAO Wenbin^{1,2}, WANG Hongguang¹, JIANG Yong¹, PAN Xin'an^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the adjoint transformation relationship between the theoretical and actual values of joint twists in the product of exponential (POE) formula, the robot's kinematics equation is transformed into an equivalent form including the joint constraints. The linearized equation describing the relationship between the positioning errors of the end-link and the errors in the joint twists and in the zero position is obtained by differentiating the kinematic equation. With the definition of distance accuracy, the robot's distance error model is set up in POE form, which can avoid the coordinate transformation error from measurement equipment coordinate system to robot's base coordinate system. A kinematic calibration model of robots is presented based on the least-squares method. Finally, a kinematic parameters calibration experiment of a 5-DOF (degree of freedom) manipulator is completed with the help of a laser tracker. The testing result shows that the mean value of the distance errors of the robot is reduced about 3.5 times on the testing points generated randomly after parameter calibration.

Keywords: robot; POE (product of exponential); distance error; parameter calibration

1 引言 (Introduction)

定位精度是机器人的一项重要指标, 制造和安装过程中产生的连杆实际几何参数与理论参数间的偏差是造成机器人定位误差的最主要环节, 一般被视为系统误差. 除此之外, 机器人的定位精度还受到随机误差的影响, 如环境变化、齿轮传动、机械形变等引起的误差. 通过参数标定的方法可实现系统误差的补偿以提高机器人的定位精度^[1-3]. 常见的基于位姿和基于位置的机器人几何参数标定模型都涉及到测量坐标系和机器人坐标系之间的转化问题. 转换过程会引入坐标系的转换误差, 导致问题复杂化. 对于机器人在空间中任意两个不同位置, 虽然它们在测量坐标系和机器人坐标系中的坐标值

是不同的, 但是在两个坐标系中的距离长度是相同的. 利用这个特点引入距离误差来表征机器人的精度, 则在参数标定过程中就可以避免测量结果在两个坐标系间的坐标变换, 使原测量系统的测量精度得到充分利用^[4-8].

基于距离误差概念, 本文给出了一种指数积形式的机器人运动学参数标定模型. 指数积形式的标定模型相较于 D-H 法的标定模型具有两个方面的优点: (1) 指数积模型实现了转动关节和移动关节的统一描述, 具有更好的通用性; (2) 当相邻关节轴线接近平行时, 运动学模型相对关节运动是光滑变化的, 不会出现奇异性问题^[9-11]. 最后, 针对由笔者所在课题组研制的模块化可重构机器人试验系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60905048); 机器人学国家重点实验室自主课题 (RLZ200802).

通讯作者: 高文斌, gaowenbin@sia.cn 收稿/录用/修回: 2012-11-19/2012-01-31/2012-03-29

统 (MRRES) 所搭建的一种 5-DOF 机械臂, 采用激光跟踪仪作为测量手段, 基于距离误差形式的标定模型完成了机械臂参数的标定识别. 测试实验表明, 经标定, 机器人的精度得到了明显提高.

2 运动学变换 (Kinematic transformation)

对于任意给定的 n 自由度机械臂, 指数积形式的运动学模型为^[12]

$$f(\boldsymbol{\theta}) = g f_{E0}(0) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n \theta_n} f_{E0}(0) \quad (1)$$

式中, $f_{E0}(0)$ 表示各关节处于零位时末端执行器相对于基础坐标系的位姿矩阵.

记 $f(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_E & \mathbf{p}_E \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $f_{E0}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{E0} & \mathbf{p}_{E0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. 由

式 (1) 可得末端执行器坐标系原点的运动学方程:

$$\mathbf{P}_E = g \mathbf{P}_{E0} = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n \theta_n} \mathbf{P}_{E0} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{P}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_E \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}_{E0} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{E0} \\ 1 \end{bmatrix}$.

系统误差的存在将导致机器人的实际运动学模型偏离理论模型, 对于指数积模型表现为关节旋量、关节角度初始偏置及零位参考位形的实际值偏离理论值. 关节旋量的理论值和实际值都应满足相应的关约束条件. 对于转动关节的旋量坐标 $\boldsymbol{\xi} = [\boldsymbol{\omega}^T \quad \mathbf{v}^T]^T$, 应满足 $\|\boldsymbol{\omega}\| = 1$, $\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{v} = 0$. 对于伸缩关节的旋量坐标 $\boldsymbol{\xi} = [0 \quad \mathbf{v}^T]^T$, 应满足 $\|\mathbf{v}\| = 1$. 可以证明, 关节旋量的理论值和实际值之间的关系可用某个旋量的指数 $e^{\hat{\eta}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_\eta & \mathbf{p}_\eta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 的伴随变换矩阵表示^[13]. 易知经伴随变换, 关节旋量坐标仍然满足关约束条件要求.

$$\boldsymbol{\xi}^a = \text{Ad}(e^{\hat{\eta}}) \boldsymbol{\xi}^n \quad (3)$$

式中, $\text{Ad}(e^{\hat{\eta}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_\eta & 0 \\ \hat{\mathbf{p}}_\eta \mathbf{R}_\eta & \mathbf{R}_\eta \end{bmatrix}$ 为伴随变换矩阵.

因此实际运动学方程可以写成理论旋量的伴随变换形式

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_E &= g \mathbf{P}_{E0} \\ &= e^{\hat{\eta}_1 \theta_1} e^{\hat{\eta}_2 \theta_2} e^{\hat{\eta}_3 \theta_3} \dots e^{\hat{\eta}_n \theta_n} \mathbf{P}_{E0} \end{aligned} \quad (4)$$

3 距离误差模型 (Distance error model)

3.1 运动学方程线性化

位置误差模型可通过对运动学方程式 (4) 取微分获得

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{P}_E &= (\delta g g^{-1}) g \mathbf{P}_{E0} + g \delta \mathbf{P}_{E0} \\ &= (\delta g g^{-1}) \mathbf{P}_E + g \delta \mathbf{P}_{E0} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{s} = \delta g g^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\omega}} & \mathbf{v} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in se(3), \text{ 可知}^{[13]}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{s} \mathbf{P}_E &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\omega}} & \mathbf{v} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_E \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{p}_E + \mathbf{v} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{p}}_E & \mathbf{I}_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

根据式 (6) 可将式 (5) 改写为

$$\delta \mathbf{P}_E = \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{p}}_E & \mathbf{I}_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (\delta g g^{-1})^\vee + g \delta \mathbf{P}_{E0} \quad (7)$$

式 (4) 中关节角度偏置误差可以归结为旋量误差, 不必单独识别^[13]. 因此 $\delta g g^{-1}$ 可写成

$$\begin{aligned} &(\delta g g^{-1})^\vee \\ &= \left(\left(\frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\xi}} \delta \boldsymbol{\xi} \right) g^{-1} \right)^\vee \\ &= \left(\delta \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{\hat{\xi}_1^{\theta_1}} e^{-\hat{\eta}_1} e^{\hat{\eta}_2} e^{\hat{\xi}_2^{\theta_2}} e^{-\hat{\eta}_2} \dots e^{\hat{\eta}_n} e^{\hat{\xi}_n^{\theta_n}} e^{-\hat{\eta}_n} \right) \right. \\ &\quad \left. \left(e^{\hat{\eta}_n} e^{-\hat{\xi}_n^{\theta_n}} e^{-\hat{\eta}_n} \dots e^{\hat{\eta}_2} e^{-\hat{\xi}_2^{\theta_2}} e^{-\hat{\eta}_2} e^{\hat{\eta}_1} e^{-\hat{\xi}_1^{\theta_1}} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \right)^\vee \\ &= \left(\delta \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{\hat{\xi}_1^{\theta_1}} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{-\hat{\xi}_1^{\theta_1}} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \right)^\vee + \dots + \\ &\quad \text{Ad} \left(\prod_{i=1}^{n-1} e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \cdot \\ &\quad \left(\delta \left(e^{\hat{\eta}_n} e^{\hat{\xi}_n^{\theta_n}} e^{-\hat{\eta}_n} \right) \left(e^{\hat{\eta}_n} e^{-\hat{\xi}_n^{\theta_n}} e^{-\hat{\eta}_n} \right) \right)^\vee \end{aligned} \quad (8)$$

由恒等式 $\delta(e^{\hat{\eta}}) e^{-\hat{\eta}} + e^{\hat{\eta}} \delta(e^{-\hat{\eta}}) = 0$, 易知

$$\begin{aligned} &\left(\delta \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \right)^\vee \\ &= \left(\left(\delta e^{\hat{\eta}_i} \right) e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee + \\ &\quad \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} \left(\delta e^{-\hat{\eta}_i} \right) e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee \\ &= \left(\delta e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \left(\delta e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee \\ &= \left(\mathbf{I}_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^{\theta_i}} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \right) \left(\delta e^{\hat{\eta}_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $(\delta(e^{\hat{\eta}_i}) e^{-\hat{\eta}_i})^\vee$ 可以写成显式表达式形式^[11,14]:

$$\begin{aligned} &\left(\delta \left(e^{\hat{\eta}_i} \right) e^{-\hat{\eta}_i} \right)^\vee \\ &= \left(\mathbf{I}_6 + \frac{4 - a_i \sin a_i - 4 \cos a_i}{2a_i^2} \boldsymbol{\Omega}_i + \right. \\ &\quad \left. \frac{4a_i - 5 \sin a_i + a_i \cos a_i}{2a_i^3} \boldsymbol{\Omega}_i^2 + \frac{2 - a_i \sin a_i - 2 \cos a_i}{2a_i^4} \boldsymbol{\Omega}_i^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{2a_i - 3 \sin a_i + a_i \cos a_i}{2a_i^5} \boldsymbol{\Omega}_i^4 \right) \delta \boldsymbol{\eta}_i \\ &= \mathbf{K}_i \delta \boldsymbol{\eta}_i \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $a_i = \|\omega_i\| = (\omega_{1i}^2 + \omega_{2i}^2 + \omega_{3i}^2)^{1/2}$, $\eta_i = \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_i \end{bmatrix}$,

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_i & 0 \\ \hat{v}_i & \hat{\omega}_i \end{bmatrix}.$$

由式(8)~(10)可得运动学方程线性化模型(式(7))的显式表达式:

$$\begin{aligned} \delta P_E = & \begin{bmatrix} -\hat{p}_E & I_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{\hat{\xi}_1^n \theta_1} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \right) K_1 \delta \eta_1 \\ & + \dots + \begin{bmatrix} -\hat{p}_E & I_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{Ad} \left(\prod_{i=1}^{n-1} e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^n \theta_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \cdot \\ & \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_n} e^{\hat{\xi}_n^n \theta_n} e^{-\hat{\eta}_n} \right) \right) K_n \delta \eta_n + g \delta P_{E0} \end{aligned} \quad (11)$$

由 $\delta P_E = \begin{bmatrix} \delta p_E \\ 0 \end{bmatrix}$, $g = \begin{bmatrix} R_g & p_g \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\delta P_{E0} = \begin{bmatrix} \delta p_{E0} \\ 0 \end{bmatrix}$ 知, 式(11)可简化为

$$\begin{aligned} \delta p_E = & [-\hat{p}_E \quad I_3] \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{\hat{\xi}_1^n \theta_1} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \right) \cdot \\ & K_1 \delta \eta_1 + \dots + [-\hat{p}_E \quad I_3] \text{Ad} \left(\prod_{i=1}^{n-1} e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^n \theta_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \cdot \\ & \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_n} e^{\hat{\xi}_n^n \theta_n} e^{-\hat{\eta}_n} \right) \right) K_n \delta \eta_n + R_g \delta p_{E0} \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 距离误差模型

距离误差是指机器人的实际运动距离与指令运动距离之间的偏差. 机器人末端被测点在基础坐标系中的坐标为 p_B , 在测量坐标系中的坐标为 p_M , 任意两点的距离误差可以表示为^[4,8]

$$\Delta l = |p_{M2} - p_{M1}| - |p_{B2} - p_{B1}| \quad (13)$$

任意两点间的距离误差和位置误差的关系可以表示为^[4,7]

$$\Delta l = \frac{(p_{B2} - p_{B1})^T}{|p_{B2} - p_{B1}|} (dp_2 - dp_1) \quad (14)$$

式中, dp 为某点在基础坐标系中的位置偏差向量.

将式(12)代入式(14)可得距离误差模型, 写成矩阵的形式:

$$\Delta l = Hx \quad (15)$$

式中, Δl 为距离误差, x 为机器人运动学参数误差矢量, H 为参数误差识别雅可比矩阵. x 、 H 如式(16)~(18)所示:

$$x = [\delta \eta_1^T, \delta \eta_2^T, \dots, \delta \eta_n^T, \delta p_{E0}^T]^T \in R^{6n+3} \quad (16)$$

$$H = \frac{(p_{B2} - p_{B1})^T}{|p_{B2} - p_{B1}|} (h_2 - h_1) \quad (17)$$

$$h_j = [J_1, J_2, \dots, J_n, J_{n+1}] \in R^{3 \times (6n+3)}, \quad j = 1, 2 \quad (18)$$

式中,

$$J_i = \begin{cases} [-\hat{p}_E \quad I_3] \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_1} e^{\hat{\xi}_1^n \theta_1} e^{-\hat{\eta}_1} \right) \right) K_1, & i = 1 \\ [-\hat{p}_E \quad I_3] \text{Ad} \left(\prod_{k=1}^{i-1} \left(e^{\hat{\eta}_k} e^{\hat{\xi}_k^n \theta_k} e^{-\hat{\eta}_k} \right) \right) \cdot \\ \quad \left(I_6 - \text{Ad} \left(e^{\hat{\eta}_i} e^{\hat{\xi}_i^n \theta_i} e^{-\hat{\eta}_i} \right) \right) K_i, & 1 < i \leq n \\ R_g, & i = n + 1 \end{cases}$$

3.3 标定模型

设有 m 组式(15)所示距离误差方程, 联立各方程可得到标定方程

$$Y = Mx \quad (19)$$

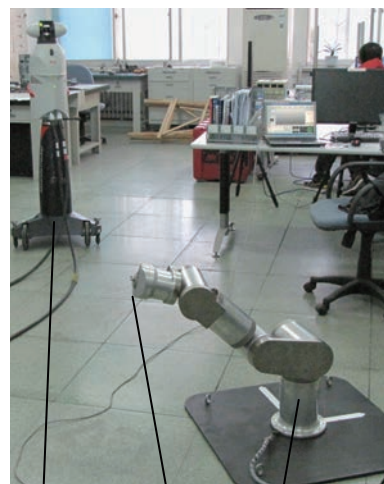
式中, $Y = \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \vdots \\ \Delta l_m \end{bmatrix}$, $M = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_m \end{bmatrix}$.

机器人的参数误差向量 x 可通过最小二乘法求解获得

$$x = (M^T M)^{-1} M^T Y \quad (20)$$

4 标定实验 (Calibration experiment)

标定实验设备如图1所示, 待标定对象为由笔者所在课题组研制的可重构模块化机器人实验系统(MRRES)组成的一种5自由度机械臂. 实验所采用的测量设备为Leica公司的AT901-LR激光跟踪仪, 在2.5m×5m×10m范围内的测量精度为: $U_{xyz} = \pm(10\mu\text{m} + 5\mu\text{m}/\text{m})$, 可以满足标定实验的测量精度要求. 实验时将机械臂放置在激光跟踪仪的工作空间内.



激光跟踪仪 靶球 5自由度机械臂

图1 标定实验设备

Fig.1 Calibration experiment equipments

机械臂各关节均为转动关节, 关节编号及机械臂处于零位时的几何参数如图 2 所示. 根据图 2 和关节旋量坐标的定义可得各个关节旋量坐标的名义值^[12], 如表 1 所示. 根据指数积公式(式(2))可得机器人的理论运动学方程.

表 1 运动学参数
Tab.1 Kinematic parameters

参数	名义值	标定结果	参数	名义值	标定结果
ξ_1	0	0.0036	ξ_5	0	-0.0031
	0	-0.0003		0	0.0052
	1	1.0000		1	1.0000
	0	2.4350		0	-2.4318
	0	2.9313		0	-2.9458
	0	-0.0078		0	0.0076
ξ_2	-1	-1.0000	ξ_6	1	1.0000
	0	0.0043		0	-0.0001
	0	-0.0012		0	-0.0069
	0	-1.2929		0	0.1028
	-301.5	-300.3289		804.5	804.5940
	0	1.9600		0	-1.5382
ξ_3	1	1.0000	p_{E0}	-5	-5.0115
	0	-0.0064		0	0
	0	-0.0000		1011.5	1013.8309
	0	3.0541			
	481.5	480.2213			
	0	-2.2732			

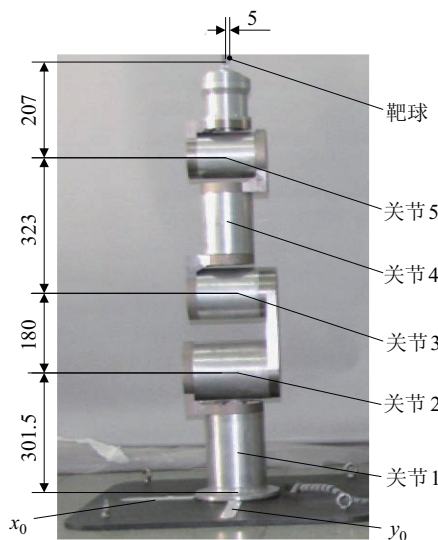


图 2 5 自由度机械臂
Fig.2 5-DOF manipulator

随机产生 28 组关节变量, 为观察方便, 将关节变量圆整成整数. 按照关节变量值控制机械臂运动到指定位姿, 利用激光跟踪仪测量靶球在激光跟踪仪坐标系中的坐标值. 当在测量位姿上靶球被遮挡

时, 可根据被遮挡情况适当地调整关节运动角度以保证测量的实现, 同时记录更改后的关节变量. 关节变量及靶球坐标在测量坐标系中的测量结果如表 2 所示. 根据理论运动学模型, 计算得到靶球在机器人基坐标系中的理论坐标值(表 2).

每两个标定位姿可以确定一个距离误差, 通过标定位姿间的组合可以使被测位姿信息得到充分的利用. 设标定位姿的个数 n 为偶数, 则可得到的组合个数为 $n(n-1)/2$. 因此对于实测的 28 个标定位姿可得到的距离误差的个数为: $28(28-1)/2 = 378$. 在实际的标定计算过程中不必使用所有的距离误差便可实现参数的标定识别, 从便于编程的角度考虑, 标定过程共采用了 42 组距离误差, 产生方式如式(21)所示:

$$\begin{aligned} &(i, i+28/2), (2i, 2i-1), \quad i = 1, 2, \dots, 14 \\ &(4i, 4i-2), (4i-1, 4i-3), \quad i = 1, 2, \dots, 7 \end{aligned} \quad (21)$$

式中, i 为表 2 所示标定位姿的编号.

按照式(21)所示分组情况, 根据表 2 计算得到每组中两点间理论距离和实测距离间的误差向量. 根据标定方程(20), 采用图 3 所示迭代流程完成运动学参数识别. 迭代计算过程中, 从 $k-1$ 步到 k 步按照式(22)、(23)实现参数更新:

$$\xi_i^k = \text{Ad}(e^{\delta \hat{\eta}_i^{k-1}}) \xi_i^{k-1} \quad (22)$$

$$p_{E0}^k = p_{E0}^{k-1} + \delta p_{E0}^{k-1} \quad (23)$$

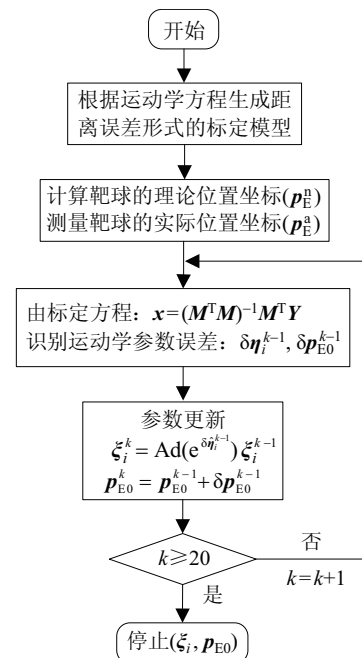


图 3 参数的迭代标定流程

Fig.3 Iterative procedure for parameters calibration

表2 标定位置
Tab.2 Calibration positions

序号	关节角度值/(°)					坐标测量值/mm			坐标理论值/mm		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	x	y	z	x	y	z
1	85	83	-27	-46	-43	372.886	2707.464	-1292.497	-578.8761	149.0983	65.6524
2	0	-24	-37	-57	73	-30.469	2954.893	-493.378	-168.7423	-87.9041	862.9391
3	6	-28	32	-52	-88	-379.154	3176.687	-613.875	190.9283	-286.4470	739.2556
4	-20	35	-19	86	-66	-203.837	2398.405	-681.885	-27.9631	475.7479	681.6536
5	17	39	-19	19	-20	-36.2600	2312.706	-703.471	-198.1176	553.0069	660.2395
6	61	54	-53	97	61	162.220	2440.473	-1096.961	-389.6735	422.1533	267.1701
7	36	17	40	26	-52	-137.656	2909.933	-409.347	-67.1063	-36.9356	944.6974
8	-7	73	57	-55	78	-65.591	2685.101	-624.849	-147.3208	184.6591	736.8674
9	-62	11	77	-87	85	135.877	2805.489	-746.575	-343.6465	50.8061	611.6091
10	90	-82	3	10	-50	-823.499	2947.668	-845.119	619.0351	-32.4596	521.0021
11	-69	46	-55	-13	87	-658.594	2680.316	-805.812	444.0844	225.4959	559.4535
12	-67	29	19	42	-68	-437.741	2649.769	-531.660	218.9855	236.5055	829.2036
13	80	18	-54	57	47	225.218	2646.648	-659.676	-441.5837	204.0231	698.5333
14	-82	-49	-16	-22	14	258.320	2888.847	-520.274	-457.3210	-40.6469	834.6610
15	100	38	64	15	22	-389.855	2837.772	-488.358	177.9615	46.8546	872.7534
16	-14	40	-13	-65	-2	-368.095	2355.503	-614.994	135.7732	526.2271	752.2167
17	-70	-28	77	98	-50	342.125	2883.485	-1040.23	-540.2566	-30.2721	316.2948
18	52	-84	-23	3	-64	-536.753	3189.274	-673.032	346.2712	-289.2297	683.1731
19	-43	62	36	-49	24	-401.081	2590.866	-494.447	181.0767	292.1617	868.8407
20	-101	49	16	-60	54	-544.428	2805.754	-527.238	333.8682	85.3941	835.7696
21	74	2	-72	100	31	225.832	2614.588	-754.502	-442.8725	237.1192	606.2659
22	-29	37	-16	42	-5	-480.063	2412.644	-610.718	246.5489	477.3507	755.7068
23	50	52	76	46	80	-402.345	2865.946	-680.947	196.8267	21.7352	681.1710
24	87	-30	-80	35	16	67.773	2815.404	-523.403	-276.0952	43.1396	830.9081
25	-50	74	-21	61	-49	-618.655	2398.406	-1130.974	388.5217	507.5402	240.0326
26	110	14	-47	18	33	211.118	2969.145	-539.136	-409.8039	-117.1424	812.0422
27	74	-38	-49	1	-32	-118.002	2851.688	-442.180	-90.2301	18.6808	911.8176
28	64	-42	-26	83	45	-515.946	2878.292	-481.125	307.6554	10.9074	880.1698

图4为迭代计算过程中标定点上距离误差模的最大值和平均值与迭代步数的关系图,可知标定过程可快速地收敛到稳定值,标定结果如表1所示。

如表3所示,随机产生32组关节角度作为测试位姿来验证标定结果对距离误差补偿的有效性。对测试位姿简单分组可得到16个距离误差,分组方法为: $(i, i+32/2)$, $i=1, 2, \dots, 16$, i 为测试位姿的编号。如图5所示,测试位姿上16个末端执行器的距离误差模的最大值从6.6142 mm降低到1.2915 mm,提高了近5.1倍;距离误差模的平均值从2.9569 mm降低到了0.6176 mm,提高了近3.5倍。可知,经过参数标定,机器人的精度得到了明显的提高。

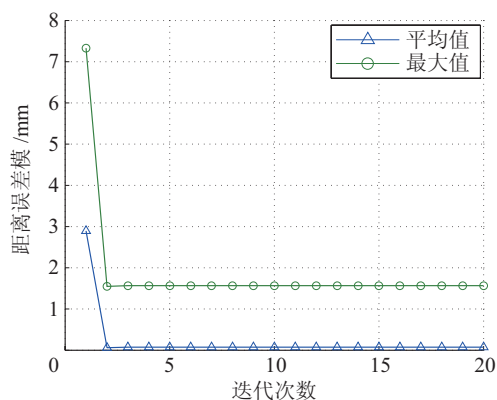


图4 标定过程中距离误差模

Fig.4 Distance errors' module during calibration procedure

表 3 测试位置
Tab.3 Testing positions

序号	关节角度值 / (°)					坐标测量值 / mm			坐标理论值 / mm		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	x	y	z	x	y	z
1	34	70	76	-24	-70	-110.114	2575.304	584.819	-109.7172	295.9782	773.4918
2	10	-24	0	-57	-41	-338.899	3058.664	417.858	143.6447	-174.4368	935.5215
3	-25	63	55	-48	78	-105.401	2732.553	597.305	-105.2399	138.2697	764.0323
4	71	80	-27	89	35	355.923	2527.549	1165.782	-576.3208	323.9034	195.5071
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	72	3	-82	-38	23	298.773	2744.402	768.078	-507.0880	108.2620	586.4379
17	-52	-70	54	40	-70	349.734	3106.901	1089.927	-534.1326	-253.7807	263.7234
18	39	62	88	32	-52	-83.362	2863.927	504.433	-122.9696	7.7633	850.3387
19	65	17	-11	-15	-83	121.915	2649.531	669.332	-335.2743	209.6855	687.3239
20	33	27	-81	-58	-31	-5.941	2372.699	1116.77	-219.8963	499.7508	249.4749
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	-42	-13	6	28	-33	-85.184	2912.04	375.599	-116.3985	-43.5757	978.0797

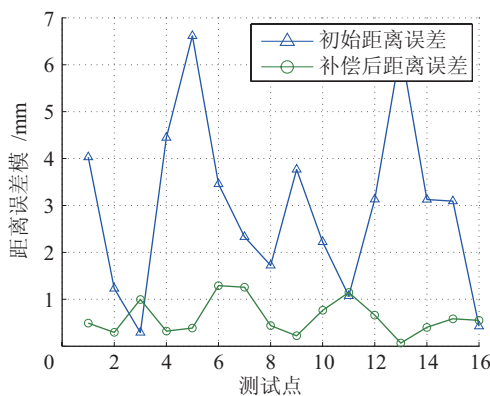


图 5 距离误差模
Fig.5 Distance errors' module

5 结论 (Conclusion)

利用距离误差在不同坐标系中保持不变的特点, 给出了一种指数积形式的机器人运动学参数标定模型, 避免了坐标测量值由测量坐标系向机器人基础坐标系变换带来的转换误差. 给出的标定模型中包含有关节约束条件: 对于转动关节满足 $\|\omega\| = 1, \omega^T v = 0$, 对于伸缩关节满足 $\|v\| = 1$, 在数学上具有更好的一致性. 另外, 在相邻轴线接近平行时指数积模型不会出现奇异性问题, 可通过运动学方程方便地得到标定模型, 相较通过 D-H 参数法建立标定模型的方法具有更好的通用性. 采用激光跟踪仪作为测量手段, 完成了一种 5 自由度模块化机械臂的参数标定. 测试实验表明给出的距离误差标定模型是正确有效的, 经过参数标定, 机械臂的精度得到了明显的提高.

参考文献 (References)

- [1] 李定坤, 叶声华, 任永杰, 等. 机器人定位精度标定技术的研究 [J]. 计量学报, 2007, 28(3): 224-227.
Li D K, Ye S H, Ren Y J, et al. Research on robot's positioning accuracy calibration [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3): 224-227.
- [2] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法 [J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 202-205.
Ye S H, Wang Y, Ren Y J, et al. Calibration of robot kinematic parameters based on laser tracker [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 202-205.
- [3] 任永杰, 郝继贵, 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.
Ren Y J, Zhu J G, Yang X Y, et al. Method of robot calibration based on laser tracker [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-200.
- [4] 周学才, 张启先, 郑时雄. 一种新的机器人机构距离误差模型及补偿算法 [J]. 机器人, 1991, 13(1): 44-49.
Zhou X C, Zhang Q X, Zheng S X. A new model with compensation algorithm for distance errors of robot mechanisms [J]. Robot, 1991, 13(1): 44-49.
- [5] 周学才, 张启先. 距离误差模型在机器人精度研究中的应用 [J]. 机器人, 1995, 17(1): 1-6.
Zhou X C, Zhang Q X. Distance error model in the study on the position accuracy of robots [J]. Robot, 1995, 17(1): 1-6.
- [6] 谭月胜, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 基于旋量理论及距离误差的机械臂标定新方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1104-1108.
Tan Y S, Sun H X, Jia Q X, et al. New manipulator calibration method based on screw theory and distance error [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1104-1108.
- [7] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 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.

- Ren Y J, Zhu J G, Yang X Y, et al. Measurement robot calibration model and algorithm based on distance accuracy[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(3): 198-202.
- [8] 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.
- Zhang T, Dai X L. Kinematic calibration of robot based on distance error[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 39(11): 98-103.
- [9] Okamura K, Park F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula[J]. *Robotica*, 1996, 14(4): 415-421.
- [10] Chen I M, Yang G L, Tan C T, et al. Local POE model for robot kinematic calibration[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(11/12): 1215-1239.
- [11] He R B, Zhao Y J, Yang S N, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(3): 411-423.
- [12] Murry R M, Li Z X, Sastry S S, et al. *A mathematic introduction to robotic manipulation*[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1994.
- [13] Lou Y J, Chen T N, Wu Y Q, et al. Improved and modified geometric formulation of POE based kinematic calibration of serial robots[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 5261-5266.
- [14] Selig J M. *Geometric fundamentals of robotics*[M]. 2nd ed. New York, USA: Springer-Verlag, 2005.

作者简介:

高文斌(1983-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人机构学.
王洪光(1965-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 机器人机构学, 特种机器人及机电一体化技术.

(上接第 575 页)

6 结论与展望 (Conclusion and prospects)

本文设计了一种新型的机器人单元模块——360bot, 它具有一个连续旋转的自由度. 360bot 凭借其特殊结构, 不仅实现了单元模块独立可靠的运动功能, 同时还能构造出丰富的连接面, 从而大大增加了模块组合系统的功能及种类. 本文详细给出 360bot 的机械结构设计, 运用解析法建立了模块的运动学及动力学模型. 提出了 360bot 机器人在多模块系统中模块的拓扑结构表示方法. 论证了单元模块及双模块组合构型的运动性能.

360bot 尚有很多内容值得进一步研究与探索, 如模块间连接结构、通讯设计、多模块重构算法及越障分析等.

参考文献 (References)

- [1] Yim M, Shen W M, Salemi B, et al. Modular self-reconfigurable robot systems [Grand Challenges of Robotics][J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 43-52.
- [2] Yim M, Roufas K, Duff D, et al. Modular reconfigurable robots in space applications[J]. *Autonomous Robots*, 2003, 14(2/3): 225-237.
- [3] Kurokawa H, Tomita K, Kamimura A, et al. Distributed self-reconfiguration of M-TRAN III modular robotic system[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(3/4): 373-386.
- [4] Shen W M, Krivokon M, Chiu H, et al. Multimode locomotion via SuperBot robots[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 2552-2557.
- [5] Ryland G G, Cheng H H. Design of iMobot, an intelligent reconfigurable mobile robot with novel locomotion[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 60-65.
- [6] Wei H X, Cai Y P, Li H Y, et al. Sambot: A self-assembly modular robot for swarm robot[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 66-71.

作者简介:

曹燕军(1991-), 男, 硕士生. 研究领域: 模块化机器人结构设计与分析.
葛为民(1968-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 模块机器人, 移动机械手设计及控制.
张华瑾(1988-), 女, 硕士生. 研究领域: 机器人结构设计, 控制算法.