

一种基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法

石怀涛^{1,2}, 张执锦², 祁若龙², 冯大阔³

(1. 沈阳建筑大学高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168;
2. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要 目的 提出一种基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法, 解决现有机器人运动学标定模型中存在的奇异性、参数冗余现象, 以及传统标定方法中测量系统难以实现在线自动标定的难题。**方法** 基于指数积(POE)公式建立正向运动学模型, 对运动学方程取微分建立线性化的运动学误差模型, 并通过最小化处理消除冗余参数, 获得运动学标定方程; 通过安装在机器人末端的双目相机和棋盘式标定板建立基于视觉测量的标定系统, 无需外部设备即可对机器人末端位姿的实际值进行自动测量, 采用最小二乘法对标定方程进行参数辨识。**结果** 对 MOTOMAN-MH80 机器人进行运动学标定仿真, 结果表明: 该方法有效避免了传统模型迭代过程中归一化、正交化的操作, 在参数迭代过程中运动学参数能快速收敛到稳定值, 且在机器人运动学标定补偿前后, 机器人的末端位置和姿态误差都明显降低。**结论** 采用笔者提出的基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法, 能够有效提高机器人的绝对定位精度, 且实现了机器人的在线自动标定, 提升了标定方法的自动化程度。

关键词 指数积(POE); 最小化; 自动标定; 视觉测量; 参数辨识

中图分类号 TU391 文献标志码 A

A Minimal Model and Visual Measurement Method Based on POE Formula for Robot Calibration

SHI Huaitao^{1,2}, ZHANG Zhijin², QI Ruolong², FENG Dakuo³

(1. National Engineering Laboratory of High-grade Stone Material Numerical Control Machining Equipment and Technology, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. China Construction Seventh Engineering Division. CORP. LTD, Zhengzhou, China, 450000)

收稿日期: 2019-06-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703903); 国家自然科学基金项目(51705341, 51675353); 东北大学轧制与自动化国家重点实验室开放基金项目(2018RALKFKT007)

作者简介: 石怀涛(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事机器人标定与动力学建模等方面研究。

Abstract: A minimal model and visual measurement method based on POE formula for robot calibration was proposed to solve the problems of singularity, parameter redundancy phenomenon, as well as difficult to realize on-line automatic calibration. The kinematics equation of differential linear kinematic error model is established, and by minimizing treatment to eliminate redundant parameters, obtained kinematics calibration equation. By installing in the end of the robot binocular cameras draw disc set up calibration system based on visual measurement calibration board, The actual value of robot terminal pose can be automatically measured without external equipment, and the calibration equation is identified by least square method. Kinematic calibration simulation of MOTOMAN-MH80 robot is conducted, and the results show that: This method is effective to avoid the traditional model of normalization and orthogonalization in the process of iteration operation, in the process of parameter iteration kinematics parameters can quickly converge to the stable value, and the robot kinematics calibration before and after compensation, the terminal position and posture error of robot have been significantly reduced. Using a minimal model and visual measurement based on POE formula robot calibration method, can effectively improve the absolute positioning precision of the robot, and realize the on-line automatic calibration of the robot, increase the degree of automation of the calibration method.

Key words: product of exponentials (POE); minimize; automatic calibration; visual measurement; parameter identification

随着机器人应用范围越来越广泛,对于机器人的定位精度有了更高的要求,尤其是机器人的绝对定位精度问题亟待解决。机器人的几何误差是影响自身绝对定位精度的主要因素,包括连杆的制造、装配精度以及运动学误差等。其中影响最大的是运动学误差,因此机器人运动学参数标定成为一种提高机器人绝对定位精度的有效方法^[1]。

运动学参数标定主要分为以下四个步骤:①机器人运动学建模;②末端位姿真实值测量;③运动学参数辨识;④误差补偿^[2]。笔者重点研究运动学标定的前两个步骤,建模就是通过寻找最优函数来描述运动学参数误差,运动学标定模型应该满足:完整性、连续性、最小性^[3]。对于运动学标定建模,DH模型是使用最早、应用最广泛的模型,但是DH模型在相邻关节接近平行时,会产生奇异性问题^[4],为了消除这个问题,很多研究人员采用了MDH模型^[5-6],先后提出了各种具有冗余参数的运动学模型,例如,S模型、CPC和MCPC模型,除了以上模型外,F. C. Park^[7]和K. Okamura^[8]提出一种基于

POE公式的标定模型,机器人关节轴线(转动关节或移动关节)可以用旋量表示,由于李代数与李群之间的光滑映射,使得这个模型避免了奇异性。Y. Lou等^[9]提出了基于POE公式建立的模型中存在的关节偏置误差可以转化为关节旋量误差,无需识别。R. He等^[10-11]给出三种运动学误差模型,并给出了误差模型的显示表达式,使其更加简单。Y. Wang等^[12]对基于POE公式的标定方法进行了扩展,实现了冗余混合机器人的运动学标定。以上提出的模型满足了完整性与连续性,但仍存在参数冗余的现象,未满足最小性。

测量方式是运动学标定至关重要的一环,传统标定方法中的测量方式主要通过三坐标测量机^[13]、激光跟踪仪^[14]等测量机器人末端实际位姿,存在测量繁琐、测量时间较长、人工参与过多等难题,难以实现自动在线测量。随着机器视觉技术的发展,国内外学者对基于视觉位姿测量的标定方法展开一系列的研究:X. Zhang^[15]采用一个固定位置的立体摄像机和一个附着在机器人末端执行器

上的平面标记实现机器人在线标定。Y. Meng 等^[16]提出了一种只需要参考坐标系上精确标尺长度的标定方法,该方法的不足之处在于每个机器人关节构型都需要已知的长度。DENG Xun^[17]提出了一种将摄像机和激光投影仪安装在机械手上的特殊机器人视觉系统的标定方法。高学海等^[18]提出一种更具通用性的求解目标位姿参数的方法。赵汝进等^[19]提出一种新型基于单目视觉的位姿测量方法,通过建立直线图像匹配函数,无需检测成像直线端点。

以上提及的运动学标定模型中存在奇异性、参数冗余的现象,并且目前的标定方法通常是离线进行的,但运动学参数误差经常随着载荷和周围环境的变化而变化,因此在线独立测量是提高位姿精度必不可少的方式。为了解决上述问题,笔者提出了一种基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法。首先,建立机器人基于视觉测量的标定系统,标定系统无需外部设备即可对机器人末端位姿的实际值进行自动测量;然后建立机器人正运动学模型,在此基础上推导机器人误差模型,并对误差模型进行最小化处理,获得运动学标定方程,标定过程基于最小二乘法对于参数进行辨识;最后,对 MOTOMAN-MH80 机器人进行运动学标定仿真,仿真结果表明笔者所提方法能够有效提高机器人的绝对定位精度。

1 基于视觉测量的标定系统

传统机器人运动学标采取的末端位姿测量方式大多采用激光跟踪仪、三坐标测量机等大型精密仪器,但是传统测量方式存在测量繁琐、测量时间较长、难以实现在线自动标定等难题。为了解决上述问题,通过安装在机器人末端执行器上的双目相机以及棋盘格式标定板共组基于视觉测量的标定系统,能够对机器人实际末端位姿进行自动测量,进而实现在线自动标定。

基于视觉测量的标定系统如图 1 所示。六自由度机器人末端安装有双目相机,下端布有棋盘格式的标定板作为辅助测量工具,可对相机的内外参数进行标定。假设已知标定板的坐标系 C 相对于机器人基坐标系 S 的位姿转化矩阵^S T_C ,通过双目相机与标定板可以确定机器人工具坐标系 E 相对于标定板坐标系 C 的位姿转化矩阵为^E T_C ,从而求得机器人工具坐标系 E 相对于机器人基坐标系 S 的位姿转化矩阵为:^S $T_E = {}^S T_C \cdot {}^C T_E$,即机器人实际末端位姿,该标定系统能够实现机器人的在线自动标定。

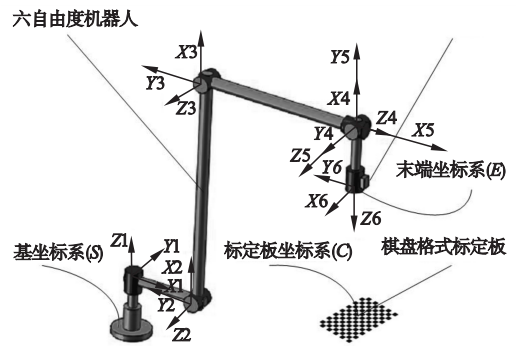


图 1 基于视觉测量的标定系统

Fig. 1 Calibration system based on vision measurement

2 机器人运动学标定方程

2.1 正向运动学

基于指数积 (POE) 公式的标定模型只需要建立基坐标系 S 和工具坐标系 T ,基坐标系相对于工具坐标系的位姿需要用齐次变换矩阵表示,所有的齐次变换矩阵组成一个刚体运动群,这个群的元素表示为

$$f = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{b} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{R} \in \mathbf{SO}(3)$ 是一个特殊的正交矩阵,并且 $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^3$ 。

每个关节轴线都可以用旋量表示,对于一个转动关节,旋量坐标定义为

$$\xi = \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{p} \times \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, \mathbf{w} 为关节轴线在基坐标系单位方向向量; \mathbf{p} 为关节轴线上任意一点在基坐标系中的位置。

定义 \wedge 算子可以使六维向量(或四维)转换为四维矩阵(或三维), $\hat{\mathbf{w}}$ 是 \mathbf{w} 的反对称矩阵。

$$\hat{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

给出 POE 正向运动学公式为

$$\mathbf{f} = \exp(\hat{\xi}_1 \mathbf{q}_1) \exp(\hat{\xi}_2 \mathbf{q}_2) \cdots \exp(\hat{\xi}_n \mathbf{q}_n) \mathbf{g}_{st}(0). \quad (4)$$

其中,

$$\exp(\hat{\xi} \mathbf{q}) = \exp\left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}} \mathbf{q} & \mathbf{v} \mathbf{q} \\ \mathbf{0}^\top & 0 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{b} \\ \mathbf{0}^\top & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对于转动关节:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_3 + \frac{\sin(\|\mathbf{w}\|q)}{\|\mathbf{w}\|} \hat{\mathbf{w}} + \frac{1 - \cos(\|\mathbf{w}\|q)}{\|\mathbf{w}\|^2} \hat{\mathbf{w}}^2. \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = (q\mathbf{I}_3 + \frac{1 - \cos(\|\mathbf{w}\|q)}{\|\mathbf{w}\|^2} \hat{\mathbf{w}} +$$

$$\frac{\|\mathbf{w}\|q - \sin(\|\mathbf{w}\|q)}{\|\mathbf{w}\|^3} \hat{\mathbf{w}}^2) \mathbf{v}. \quad (7)$$

对于移动关节:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_3, \mathbf{b} = q\mathbf{v}. \quad (8)$$

初始变换矩阵 $\mathbf{g}_{st}(0)$ 也可以用指数形式表达:

$$\mathbf{g}_{st}(0) = \exp(\hat{\xi}_{st}). \quad (9)$$

因此, POE 正向运动学模型也可以表示为

$$\mathbf{f} = \exp(\hat{\xi}_1 \mathbf{q}_1) \exp(\hat{\xi}_2 \mathbf{q}_2) \cdots \exp(\hat{\xi}_n \mathbf{q}_n) \exp(\hat{\xi}_{st}). \quad (10)$$

恒等式邻域内指数映射的逆映射成为对数映射, 如果式(1)满足条件: $\text{trace}(\mathbf{R}) \neq -1, 1 + 2\cos(\varphi) = \text{trace}(\mathbf{R})$, 而且 $|\varphi| < \pi$, 则有:

$$\hat{\xi} = \log \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{b} \\ \mathbf{0}^\top & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}} & \mathbf{M}^{-1} \mathbf{b} \\ \mathbf{0}^\top & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{w}} = \log[\mathbf{R}] = \frac{\varphi(\mathbf{R} - \mathbf{R}^\top)}{2\sin(\varphi)}. \quad (12)$$

$$\mathbf{M}^{-1} = \mathbf{I} - \frac{1}{2} \hat{\mathbf{w}} +$$

$$\frac{2\sin(\|\mathbf{w}\|) - \|\mathbf{w}\|(1 + \cos(\|\mathbf{w}\|))}{2\|\mathbf{w}\|^2 \sin(\|\mathbf{w}\|)} \hat{\mathbf{w}}^2. \quad (13)$$

2.2 运动学误差模型

文中的误差模型的建立选取基坐标系作为参考坐标系, 在基坐标系中来描述机器人末端位姿误差, 误差模型为

$$\delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} \delta \mathbf{q} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_{st}} \delta \xi_{st} \right). \quad (14)$$

机器人末端位姿误差可以由实际测量位姿与名义位姿得到, 可以表示为

$$\delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1} = (\mathbf{g}_a - \mathbf{g}_n) \mathbf{g}_n^{-1} = \mathbf{g}_a \mathbf{g}_n^{-1} - \mathbf{I}. \quad (15)$$

如果末端位姿误差足够小, $\delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1}$ 可以表示为

$$\log(\mathbf{g}_a \mathbf{g}_n^{-1}) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{(\mathbf{g}_a \mathbf{g}_n^{-1} - \mathbf{I})^k}{k}. \quad (16)$$

取一阶近似, 式(15)可以写为

$$\delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1} = \log(\mathbf{g}_a \mathbf{g}_n^{-1}). \quad (17)$$

文献[9]指出关节零位误差可以不用单独辨识, 因此运动学参数标定只需要辨识和补偿关节旋量误差和初始位姿变换旋量误差, 因此, 机器人运动学误差模型可以简化为

$$\delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_{st}} \delta \xi_{st} \right). \quad (18)$$

因此, 运动学参数辨识就是求解如式(19)的最小二乘问题:

$$\min \left\| \delta \mathbf{f} \cdot \mathbf{f}^{-1} - \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_{st}} \delta \xi_{st} \right) \mathbf{f}^{-1} \right\|^2. \quad (19)$$

2.3 误差模型最小化

为了能够解决现有模型中的参数冗余现象, 采取对传统的基于 POE 建立的误差模型进行最小化处理, 可以得出在原有误差模型中的六个参数, 其中只有四个是独立的^[20-21], 因此可以选 $\boldsymbol{\eta}_i = [w'_{xi}, w'_{yi}, p'_{xi}, p'_{yi}]$ 和 $\boldsymbol{\eta}_i = [v'_{xi}, v'_{yi}]$ 代替原六参数来描述转动关节和移动关节, 为了能够通过最小化参数 $\boldsymbol{\eta}_i$ 对旋量坐标进行统一描述, 在每个关节建立

辅助坐标系 A_i , 关节轴线作为 Z_i 轴, 通过基坐标系的原点 O 且垂直于关节轴线的线为 Y_i 轴, X_i 轴通过右手法则确定, 如图 2 所示。

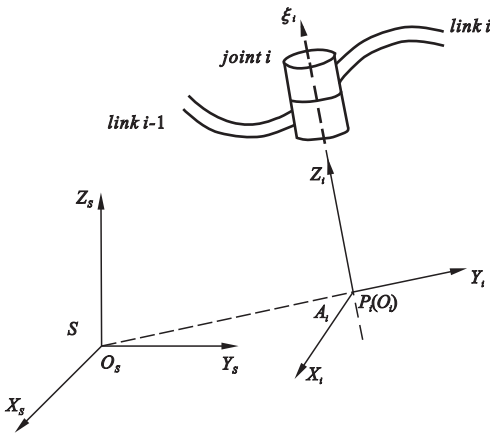


图 2 辅助坐标系

Fig. 2 Auxiliary coordinate system

运动旋量坐标 ξ_i 在辅助坐标系 A_i 中表示为 ξ'_i , ξ'_i 与 ξ_i 之间的关系可以表达为

$$\xi_i = Ad(g_i)\xi'_i. \tag{20}$$

转换矩阵 g_i 可以由旋量坐标 ξ_i 求得, 对于转动关节, 且关节轴线不经过基坐标系原点 O , 基坐标系相对于辅助坐标系的转换矩阵 g_i 可以表示为

$$g_i = \begin{bmatrix} \frac{v_i}{\|v_i\|} & \frac{p_i}{\|p_i\|} & w_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

如果关节轴线经过基坐标系原点 O , 则 p_i 和 v_i 都是零向量, 通过选择向量 $e = [0, 0, 1]^T$ 作为一个旋转轴, 辅助坐标系 A_i 可以由基坐标系绕旋转轴 e 旋转 $\alpha = \arccos([0, 0, 1]w_i)$, 则有:

$$g_i = \begin{bmatrix} I + \hat{e}\sin(\alpha) + \hat{e}^2(1 - \cos(\alpha)) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}. \tag{22}$$

通过以上分析可以得出一个 n 自由度机器人的正向运动学模型^[19]:

$$\begin{aligned} f(\eta, q, \xi_{st}) &= \exp(\hat{\xi}_1(\eta_1)q_1) \\ &\exp(\hat{\xi}_2(\eta_2)q_2) \cdots \exp(\hat{\xi}_n(\eta_n)q_n) \exp(\hat{\xi}_{st}). \end{aligned} \tag{23}$$

用四参数的 η_i 代替六参数的旋量坐标

ξ'_i , 从而通过 ξ'_i 与 ξ_i 之间的关系从而代替 ξ_i , 对于转动关节有:

$$\begin{aligned} \xi_i &= Ad(g_i)\xi'_i = Ad(g_i) \cdot \\ &\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} w'_{xi} \\ w'_{yi} \\ \sqrt{1 - w'_{xi}{}^2 - w'_{yi}{}^2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} p'_{xi} \\ p'_{yi} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w'_{xi} \\ w'_{yi} \\ \sqrt{1 - w'_{xi}{}^2 - w'_{yi}{}^2} \end{bmatrix} \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{24}$$

通过以下公式对传统误差模型中的参数进行替代, 其中 $\delta\xi_i$ 可以用 $\frac{\partial\xi_i}{\partial\eta_i}\delta\eta_i$ 代替。

$$\begin{aligned} \frac{\partial\xi_i}{\partial\eta_i} &= Ad(g_i) \frac{\partial\xi'_i}{\partial\eta_i} = \\ Ad(g_i) &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = B_i. \end{aligned} \tag{25}$$

经过最小化处理最终可以得到满足最小性的理想误差模型:

$$\begin{aligned} \delta f \cdot f^{-1} &= A_1 B_1 \delta\eta_1 + Ad(\exp(\hat{\xi}_1 q_1)) \cdot \\ &A_2 B_2 \delta\eta_2 + \cdots + Ad\left(\prod_{i=1}^{n-1} \exp(\hat{\xi}_i q_i)\right) \cdot \\ &A_n B_n \delta\eta_n + Ad\left(\prod_{i=1}^n \exp(\hat{\xi}_i q_i)\right) A_{st} \delta\xi_{st}. \end{aligned} \tag{26}$$

机器人运动学误差模型可以整理为

$$y = Hx. \tag{27}$$

其中,

$$y = [\delta f \cdot f^{-1}]^V, \tag{28}$$

$$x = [\delta\eta_1^T, \delta\eta_2^T, \cdots, \delta\eta_n^T, \delta\xi_{st}^T]^T, \tag{29}$$

$$H = [J_1, J_2, \cdots, J_n, J_{n+1}], \tag{30}$$

$$J_i = \begin{cases} A_1 B_1, & i = 1; \\ Ad\left(\prod_{i=1}^{n-1} \exp(\hat{\xi}_i q_i)\right) A_n B_n, & 1 < i \leq n; \\ Ad\left(\prod_{i=1}^n \exp(\hat{\xi}_i q_i)\right) A_{st}, & i = n + 1. \end{cases} \tag{31}$$

2.4 运动学标定方程

通过提出的基于视觉测量的标定系统对机器人在不同构型下的不同末端位姿进行 m 次测量,可以得到与(27)形式相同的式子:

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^1 \\ J^2 \\ \vdots \\ J^m \end{bmatrix} x = \tilde{J}x. \quad (32)$$

进一步可以得到式(27)的最小二乘解为

$$x = (\tilde{J}^T \tilde{J})^{-1} \tilde{J}^T \tilde{y}. \quad (33)$$

3 机器人运动学标定仿真

通过对 MOTOMAN-MH80 机器人进行运动学标定仿真,验证笔者提出的基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法的有效性。

3.1 建立机器人旋量模型

根据 MOTOMAN-MH80 机器人的标准尺规图,可以建立如图3所示的旋量模型。

各个关节轴线矢量分别为: $w_1 = (0,0,1)^T$, $w_2 = (0,1,0)^T$, $w_3 = (0, -1,0)^T$, $w_4 = (-1,0,0)^T$, $w_5 = (0, -1,0)^T$, $w_6 = (-1,0,0)^T$ 。

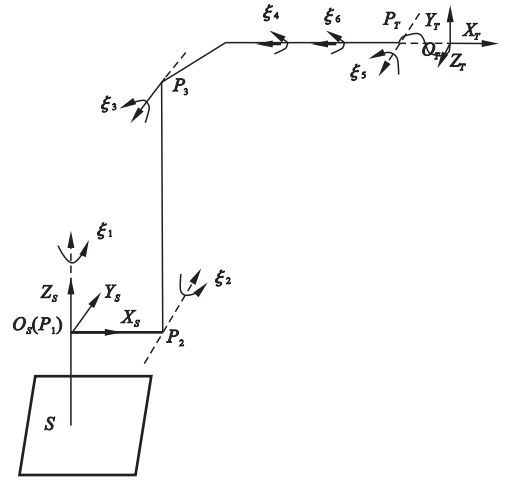


图3 MOTOMAN-MH80 机器人旋量示意图

Fig.3 Schematic spinor diagram of MOTOMAN-MH80 robot

各个关节轴线上指定点的位置矢量分别为: $P_1 = (0,0,0)^T$, $P_2 = (145,0,0)^T$, $P_3 = (145,0,870)^T$, $P_4 = (1\ 170,0,1\ 080)^T$, $P_5 = (1\ 170,0,1\ 080)^T$, $P_6 = (1\ 170,0,1\ 080)^T$ 。由式(2)可得 MOTOMAN-MH80 机器人的运动学参数理论值,因此 MOTOMAN-MH80 机器人的运动学参数理论值和实际值(预设值)如表1所示。

表1 MOTOMAN-MH80 机器人运动学参数理论值与实际值

Table 1 The theoretical and measured values of kinematic parameters for MOTOMAN-MH80 robot

参数	理论值	实际值
ξ_1	$[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$	$[0.005\ 0\ -0.002\ 0\ 1.000\ 0\ 0.029\ 2\ -0.016\ 8\ -0.000\ 2]^T$
ξ_2	$[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 145]^T$	$[-0.0189\ -0.999\ 8\ -0.005\ 0\ 0.0205\ -0.000\ 5\ 145.016\ 5]^T$
ξ_3	$[0\ 1\ 0\ 870\ 0\ -145]^T$	$[0.025\ 6\ -0.999\ 6\ 0.001\ 6\ 870.155\ 9\ -0.148\ 5\ -145.124\ 9]^T$
ξ_4	$[-1\ 0\ 0\ 0\ -1\ 080\ 0]^T$	$[-0.999\ 8\ 0.024\ 3\ 0.000\ 9\ 1.627\ -1\ 080.223\ 7\ 0.346\ 5]^T$
ξ_5	$[0\ -1\ 0\ 1080\ 0\ -1\ 170]^T$	$[0.002\ 7\ -0.999\ 9\ 0.0158\ 1\ 080.170\ 6\ -0.001\ 5\ -1\ 170.324\ 5]^T$
ξ_6	$[-1\ 0\ 0\ 0\ -1\ 080\ 0]^T$	$[-0.099\ 8\ 0.012\ 9\ 0.013\ 1\ 0.355\ 6\ -1080.4292\ 2.690\ 0]^T$
ξ_{st}	$[0\ 0\ 0\ 1\ 384\ 297\ 1\ 006]^T$	$[0.020\ 0\ -0.010\ 0\ 0.010\ 0\ 1\ 383.000\ 0\ 297.034\ 5\ 1\ 006.600\ 0]^T$

3.2 运动学标定仿真

通过以上分析可知, MOTOMAN-MH80 机器人总共需要辨识 42 个参数,至少需要 7 个不同构型下的末端位姿才能辨识这些参数。在仿真过程中,一共随机生成了 100 个末端位姿,其中有 50 个为测量位姿,均使棋

盘格式标定板在相机的可视区域内,另外 50 个为测试位姿,用于验证本标定方法的有效性。MOTOMAN-MH80 机器人的运动学标定模型只考虑了机器人自身运动学参数误差,忽略了基于视觉测量的标定系统中的双目相机的测量误差,由于其测量精度较低,会

影响标定结果。因此,在本次仿真中需要施加随机测量噪声,以提高本次仿真的真实性。假设随机测量噪声的位置量和姿态量分别服从 $[-0.05 \text{ mm}, 0.05 \text{ mm}]$ 和 $[-0.001 \text{ rad}, 0.001 \text{ rad}]$ 的均匀分布。

本次 MOTOMAN-MH80 机器人运动学标定仿真流程如图 4 所示。

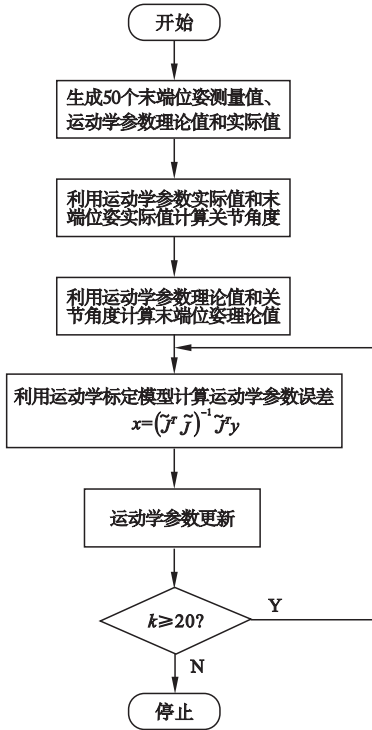


图 4 机器人运动学标定仿真流程图

Fig. 4 The simulation process of robot kinematic calibration

(1) 在基于视觉测量的标定系统下随机生成 50 个附加随机测量噪声的末端位姿,即末端位姿测量值,然后根据机器人旋量模型生成机器人运动学参数理论值,并预设实际值;

(2) 已知机器人 50 个末端位姿测量值与运动学参数实际值,通过机器人逆运动学可以求解出 50 组关节角度;

(3) 利用求出的 50 组关节角度和运动学参数理论值通过机器人正向运动学可计算出 50 个理论末端位姿;

(4) 通过式(33)可以计算出参数误差 x ;

(5) 更新运动学参数;

(6) 预设迭代次数并重复以上步骤,直

到达到最大迭代次数 k 完成本次标定仿真。

在运动学参数标定仿真每次迭代过程中,会更新运动学参数。关节旋量 ξ 和初始位姿旋量 ξ_{st} 更新方法如下:

$$\xi_i = Ad(g_i)\xi'_i(\Delta\eta_i). \quad (34)$$

$$\xi_{st} = \xi_{st} + \Delta\xi_{st}. \quad (35)$$

为了更好地证明笔者提出的标定方法的有效性,计算出 MOTOMAN-MH80 机器人标定补偿前后在随机生成的 50 个测试位姿处的末端姿态误差和末端位置误差,如图 5 所示。在随机产生的测试点上机器人的末端位置和姿态误差都得到了明显的降低,平均值分别由 7.41 mm 和 0.057 rad 降低到 0.051 mm 和 0.004 2 rad。这说明笔者提出的基于 POE 公式的最小模型与视觉测量的机器人标定方法能有效提高机器人的绝对定位精度。

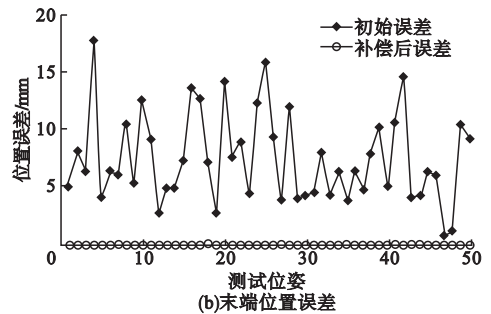
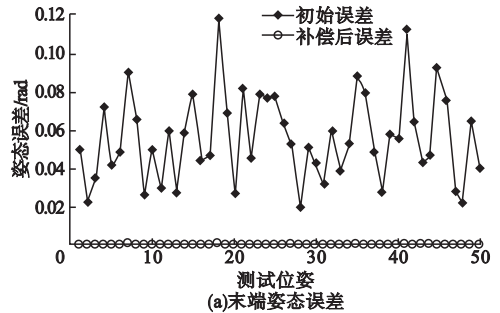


图 5 末端位姿误差

Fig. 5 Terminal pose error

4 结 论

(1) 在机器人基坐标系与棋盘格式标定板坐标系位姿变换关系已知前提下,通过安装在机器人末端的双目相机和棋盘式标定板建立基于视觉测量的标定系统,无需外部设

备即可对机器人末端位姿的实际值进行自动测量,使得本标定方法的适用范围更广泛、实用性更强、自动化程度更高。

(2)使用基于指数积(POE)公式的运动学模型,并对其进行最小化处理,消除冗余参数,满足机器人运动学标定模型的完整性、连续性、极小性的特点,并克服采用 $D-H$ 等建模方法产生的奇异性、建模过程复杂等问题,该模型的参数都是独立的,并且避免了传统模型迭代过程中归一化、正交化的操作。

(3)经运动学标定仿真,在随机产生 50 个测试位姿处,机器人末端位姿精度有了明显提高,验证了笔者所提标定方法的有效性。

参考文献

- [1] SIMMONS-DUFFIN D, STANFORD D, WITTEN E. A spacetime derivation of the Lorentzian POE inversion formula[J]. Journal of high energy physics,2018(7):1-40.
- [2] WANG W, WANG L, YUN C. Design of a two-step calibration method of kinematic parameters for serial robots [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2017, 30 (2):438-448.
- [3] GATTI G, DANIELI G. A practical approach to compensate for geometric errors in measuring arms; application to a six-degree-of-freedom kinematic structure [J]. Measurement science & technology, 2007, 19 (1) :015107.
- [4] CHEN Gang, LI Tong, CHU Ming, et al. Review on kinematics calibration technology of serial robots [J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014, 15 (8) :1759-1774.
- [5] SANTOLARIA J, CONTE J, GINÉS M. Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 66:2087-2106.
- [6] JOUBAIR A, BONEV I A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 77:515-523.
- [7] PARK F C. Computational aspects of the product-of-exponentials formula for robot kinematics [J]. IEEE transactions on automatic control, 1994, 39 (3) :643-647.
- [8] OKAMURA K, PARK F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula [J]. Robotica, 1996, 14 (4) :415-421.
- [9] LOU Y, CHEN T, WU Y, et al. Improved and modified geometric formulation of POE based kinematic calibration of serial robots [C]. IEEE/RSJ international conference on intelligent robots & systems, 2009.
- [10] HE R, ZHAO Y, YANG S, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula [J]. IEEE transactions on robotics, 2010, 26 (3) :411-423.
- [11] HE R, LI X, SHI T, et al. A kinematic calibration method based on the product of exponentials formula for serial robot using position measurements [J]. Robotica, 2014, 33 (6):1-19.
- [12] WANG Y, WU H, HANDROOS H. Accuracy improvement of a hybrid robot for ITER application using POE modeling method [J]. Fusion engineering and design, 2013, 88 (9/10):1877-1880.
- [13] DU G, SHAO H, CHEN Y, et al. An online method for serial robot self-calibration with CMAC and UKF [J]. Robotics and computer integrated manufacturing, 2016, 42:39-48.
- [14] PARK I W, LEE B J, CHO S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2012, 17 (6) :1059-1067.
- [15] ZHANG X, SONG Y, YANG Y, et al. Stereo vision based autonomous robot calibration [J]. Robotics and autonomous systems, 2017, 93:43-51.
- [16] MENG Y, ZHUANG H. Autonomous robot calibration using vision technology [J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2007, 23 (4) :436-446.
- [17] DENG Xun, CHEN Zhong, LIANG Jiahui, et al. Calibration of a robot vision system coupled with structured light; method and experiments [J]. Intelligent robotics and applications, 2014, 8918:256-264.
- [18] 高学海,徐科军,张瀚,等.基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (8) :1479-1485. (GAO Xuehai, XU Kejun, ZHANG Han, et al. Position pose measurement algorithm based on single camera and laser range finder [J]. Chinese journal of instrumentation, 2007, 28 (8) :1479-1485.)
- [19] 赵汝进.一种基于直线特征的单目视觉位姿测量方法 [J]. 光电子激光, 2010 (6) :894-897. (ZHAO Rujin. A mono-vision method of measuring pose based on line features [J]. Journal of optoelectronics laser, 2010, 21 (6) :894-897.)
- [20] 罗继曼,魏泽明,刘思远,等.基于双目视觉原理的混联机器人初始点坐标研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34 (1) :150-157. (LUO Jiman, WEI Zeming, LIU Siyuan, et al. Acquisition and application of the machining initial point coordinate of hybrid robot based on binocular vision principle [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34 (1) :150-157.)
- [21] YANG X, WU L, LI J, et al. A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula [J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2014, 30 (3):326-334. (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)