

控制与决策

Control and Decision

一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法

陈新伟, 范崇山, 孙凤池, 秦岩丁, 王鸿鹏

引用本文:

陈新伟,范崇山,孙凤池,秦岩丁,王鸿鹏. 一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1586–1592.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1844>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于一致性理论的多臂航天器协同控制方法

Cooperative control method of multi-arm spacecraft based on consistency theory

控制与决策. 2023, 38(5): 1430–1437 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1322>

考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制

Robust control for a cable-driven aerial manipulator with joint flexibility in joint space

控制与决策. 2023, 38(4): 971–979 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1893>

基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法

Inverse kinematics solution algorithm of electric climbing robot based on improved beetle antennae search algorithm

控制与决策. 2022, 37(9): 2217–2225 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0107>

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法

陈新伟^{1,3,5}, 范崇山^{2,3}, 孙凤池², 秦岩丁^{3,4}, 王鸿鹏^{3,4†}

(1. 闽江学院 计算机与控制工程学院, 福州 350108; 2. 南开大学 软件学院, 天津 300353;
3. 南开大学 人工智能学院, 天津 300353; 4. 南开大学 深圳研究院, 广东 深圳 518028;
5. 四创科技有限公司, 福州 350108)

摘要: 提出一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法, 以实现移动平台和机械臂两者间位姿标定与机械臂运动学参数标定模型的统一. 机械臂运动学参数标定使用最多的是基于 D-H 参数法, 但 D-H 参数法无法克服相邻关节平行或接近平行时的奇异性问题, 以及建模过程复杂、建模后的模型通用性差等问题. 基于指数积的移动机械臂联合标定方法建模时不会因为关节轴平行而出现奇异性问题, 建模过程简单. 通过对整个系统的运动学方程进行微分运算, 获得末端位姿误差和移动机械臂零位状态旋量误差及关节旋量误差的线性化模型. 利用伴随矩阵方式建立关节旋量理论值与关节旋量实际值的关系, 并通过改变伴随矩阵实现基于最小二乘法的参数辨识计算过程中参数更新. 使用高精度激光跟踪仪作为测量工具, 通过实验验证所提出方法的有效性.

关键词: 指数积 (POE); 移动机械臂; D-H 参数; 联合标定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1844

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



引用格式: 陈新伟, 范崇山, 孙凤池, 等. 一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法 [J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1586-1592.

A joint calibration method of mobile manipulator based on product of exponential

CHEN Xin-wei^{1,3,5}, FAN Chong-shan^{2,3}, SUN Feng-chi², QIN Yan-ding^{3,4}, WANG Hong-peng^{3,4†}

(1. College of Computer and Control Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Software, Nankai University, Tianjin 300353, China; 3. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300353, China; 4. Shenzhen Research Institute of Nankai University, Shenzhen 518028, China; 5. IStrong Technology Co., LTD., Fuzhou 350108, China)

Abstract: This paper proposes a joint calibration method for a mobile manipulator based on product of exponential, to realize the unification of the pose calibration and the kinematic parameter calibration model of the manipulator between the mobile platform and the manipulator. The most used kinematic parameter calibration of robotic arms is based on the D-H parameter method, but the D-H parameter method cannot overcome the singularity problem when the adjacent joints are parallel or nearly parallel, and the modeling process is complicated and the model after modeling is poorly generalized. Therefore, this paper proposes a product of exponential based joint calibration method for the mobile manipulator, which does not cause singularity problems due to the parallelism of joint axes and has a simple modeling process. The method obtains the linearized models of the end position error, the zero position state rotational error and joint rotational error of the mobile arm by differentiating the kinematic equations of the whole system. The method establishes the relationship between the theoretical and actual values of joint spins by means of the concomitant matrix, and realizes the parameter update during the calculation of parameter identification based on the least squares method by changing the concomitant matrix. Using a high-precision laser tracker as the measurement tool, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through experiments.

Keywords: product of exponential (POE); mobile manipulator; D-H parameters; joint calibration

收稿日期: 2021-10-27; 录用日期: 2022-03-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1307601); 国家自然科学基金项目 (61973173, 91848203); 天津市新一代人工智能科技重大专项项目 (18ZXZNGX00340); 工业机器人应用福建省高校工程研究中心 (闽江学院) 开放课题项目 (MJUKF-IRA1904).

责任编辑: 高会军.

†通讯作者. E-mail: hpwang@nankai.edu.cn.

0 引言

移动机械臂由移动平台和安装在移动平台上的机械臂组成,具有在无限空间中的运动能力和机械臂一样的灵活操作的特点,在很大程度上扩展了移动平台和机械臂的性能.本文使用的移动机械臂由轮式差速运动移动平台和6自由度机械臂组成.

在使用移动机械臂系统之前,对系统进行标定是必不可少的环节.其中机械臂运动学参数标定的研究绝大多数是基于D-H模型以及基于D-H模型衍生出来的建模方法.D-H模型最早由Denavit和Hartenberg^[1]于1955年提出,该模型是应用最广泛且一直沿用至今的经典机械臂运动学参数标定模型.一些学者使用D-H模型开展研究,例如:文献[2]提出一种几何辨识方法以估计机械臂D-H模型参数;文献[3]利用D-H模型建立人体腿部的运动学模型;文献[4]提出了一种模块化机器人的D-H参数生成方法;文献[5-6]使用D-H模型参数辨识方法标定机械臂;文献[7]使用D-H模型进行五自由度机械臂逆运动学分析.还有一些学者使用D-H模型衍生出的建模方法开展研究,例如:文献[8]使用改进的D-H模型和微分思想对搬运机器人运动学进行研究;文献[9]提出一种改进的D-H模型,建立机械臂运动学模型.

基于D-H参数建模的优点是使用参数较少,但D-H模型也存在几个问题:1)D-H模型不具有完备性^[10],即4个参数均用于描述沿着或绕着X轴和Z轴的变换关系,忽略了Y轴的变换;2)奇异性问题^[11],即机械臂相邻两个关节平行时,会带来奇异性问题;3)参数的耦合性,即D-H模型中参数具有耦合性,旋转参数变换不同顺序会导致模型变化.一些学者通过增加参数解决奇异性问题,但也导致模型通用性、直观性差等问题^[12-13].针对D-H模型的缺点,文献[14]在1996年提出了基于旋量代数理论建立指数积公式法(product-of-exponential, POE)以解决D-H参数建模中的奇异性问题.近年来,一些学者^[15-18]使用POE法对机械臂标定进行研究:文献[19]使用POE公式对7自由度双臂机器人机型开展逆运动求解研究;文献[20]证明了POE模型的精度和通用性问题;文献[21]研究了POE模型到D-H模型的转换问题.

基于指数积建模方法的优点,本文在使用该数学模型的基础上提出移动平台和机械臂的位姿标定与机械臂运动学参数标定的模型统一方法,实现移动机械臂的联合标定.本文使用Leica AT960-MR激光跟踪仪作为测量工具开展实验.激光跟踪仪使用激光干涉测距、计算机控制、现代数值计算等先进技术,

达到高精度、高效率、实时跟踪测量的目的,常用于高精度的测量工作^[22],例如:精密设备的装配、参数标定^[23]等.

1 模型建立

构建指数积数学标定模型只需要建立系统基坐标系、末端工具坐标系以及中间连杆的旋量表示.针对本文移动机械臂系统,所建立的基坐标系、末端坐标系、中间连杆旋量表示如图1所示.分别是移动机械臂 $\{O_0-x_0y_0z_0\}$ 基坐标系、 $\{O_6-x_6y_6z_6\}$ 末端工具坐标系,以及连杆旋量 $S_i (i = 0, 1, \dots, 6)$.其中: $W_1 = 112 \text{ mm}, W_2 = 104 \text{ mm}, L_1 = 360 \text{ mm}, L_2 = 303.5 \text{ mm}, H_1 = 687 \text{ mm}, H_2 = 118.7 \text{ mm}, H_3 = 110.5 \text{ mm}$.

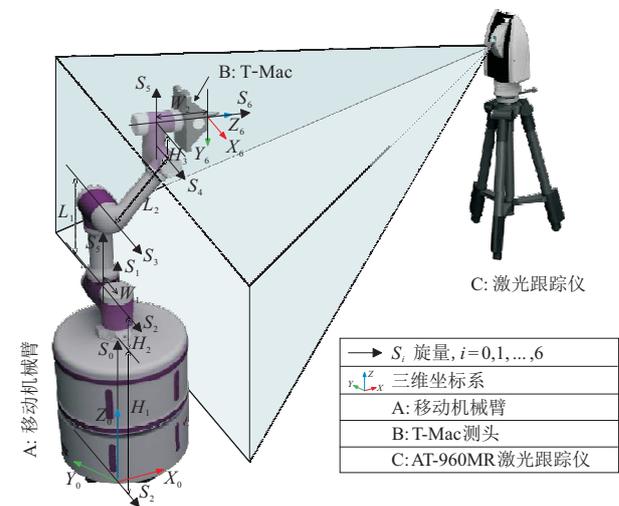


图1 移动机械臂标定模型

1.1 6自由度机械臂运动学指数积模型

6自由度机械臂运动学指数积模型公式为

$$T(\theta) = e^{[S_1]\theta_1} \dots e^{[S_5]\theta_5} e^{[S_6]\theta_6} M. \quad (1)$$

其中: $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_6]^T$ 是关节变量组成的关节向量; $S_j = [\omega_j, \nu_j]^T \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 为对应 j 关节的关节旋量; $e^{[S_j]\theta_j} = \begin{bmatrix} e^{[\omega_j]\theta_j} & * \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$; $*$ = $(I\theta_j + (1 - \cos \theta_j)[\omega_j] + (\theta_j - \sin \theta_j)[\omega_j]^2)\nu_j$, $e^{[\omega_j]\theta_j} = I + \sin \theta_j[\omega_j] + (1 - \cos \theta_j)[\omega_j]^2$, $\omega_j \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 是各关节轴矢量, $[\omega_j]$ 表示 ω_j 的反对称矩阵; ν_j 表示关节轴矢量与关节轴上一点的向量叉积, $j = 1, \dots, 6$; M 是机械臂零位状态时末端在基坐标系下的描述,是一个固定的 4×4 矩阵.矩阵 M 可用某个常旋量 S_{st} 的指数形式表达,进而式(1)改写成

$$T(\theta) = e^{[S_1]\theta_1} \dots e^{[S_5]\theta_5} e^{[S_6]\theta_6} e^{[S_{st}]}. \quad (2)$$

1.2 移动平台和机械臂基座固定位姿描述模型

移动机械臂系统中,移动平台和机械臂是刚性连接,所以移动平台坐标系和机械臂坐标系两者具有固定的位姿关系.为了准确地找到该位姿关系,同时考虑到与机械臂运动学指数积模型的统一,本文把移动平台视为关节轴0进行建模和标定.由移动机械臂零位状态和关节尺寸参数得到关节旋量 $S_i = [\omega_i, \nu_i]^T$,如表1所示.其中: ω_i 是各关节轴矢量, q_i 是各关节轴上指定点的位置矢量, $i = 0, 1, \dots, 6$; $H_{1+2} = H_1 + H_2, L_{1+2} = L_1 + L_2, W_{1+2} = W_1 + W_2, H_{1+2+3} = H_1 + H_2 + H_3$.

表1 移动机械臂各个螺旋轴坐标表示

i	ω_i	q_i	$\nu_i = -\omega_i \times q_i$
0	(0, 0, 1)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
1	(0, 0, 1)	(0, 0, H_1)	(0, 0, 0)
2	(0, -1, 0)	(0, 0, H_{1+2})	(0.805 7, 0, 0)
3	(0, -1, 0)	($L_1, 0, H_{1+2}$)	(0.805 7, 0, -0.36)
4	(0, -1, 0)	($L_{1+2}, 0, H_{1+2}$)	(0.805 7, 0, -0.663 5)
5	(0, 0, -1)	(L_{1+2}, W_1, H_{1+2})	(0.112, -0.663 5, 0)
6	(0, -1, 0)	($L_{1+2}, W_{1+2}, H_{1+2+3}$)	(-0.916 2, 0, 0.663 5)

为实现移动平台、机械臂两者间位姿描述模型与机械臂运动学参数模型的统一,本文把关节轴0整合到机械臂运动学指数积模型中,即在式(2)的基础上改成

$$T(\theta) = e^{[S_0]\theta_0} e^{[S_1]\theta_1} \dots e^{[S_6]\theta_6} e^{[S_{st}]}, \quad (3)$$

其中 $\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_6]^T$. 后续模型的推导均在该公式的基础上进行.

1.3 移动机械臂联合标定模型

旋量的误差模型可以用旋量微分进行表示,用旋量微分值不断逼近真实误差,若值收敛,则可辨识出参数误差.移动机械臂运动学参数误差模型可通过对式(3)两边同时取微分得到,即

$$\delta T \cdot T^{-1} = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \delta S + \frac{\partial T}{\partial S_{st}} \delta S_{st} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \delta \theta \right) T^{-1}. \quad (4)$$

等式左边表示在基坐标系下末端执行器实际位姿到名义位姿的偏差.其中: $S = [S_0 \ S_1 \ \dots \ S_6] \in R^{6 \times 7}$ 是各个轴旋量组成的旋量矩阵, $\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_6]^T \in R^{7 \times 1}$ 是各轴关节变量组成的整体关节向量.

式(4)说明移动机械臂系统参数误差由关节旋量误差 δS 、关节零位误差 $\delta \theta$ 以及关节处于零位状态时初始位姿变换旋量误差 δS_{st} 组成.文献[24]指出,关节零位误差可归结为旋量误差,并用数学方法证明了这一观点.所以式(4)表达的误差模型可改写为

$$\delta T \cdot T^{-1} = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \delta S + \frac{\partial T}{\partial S_{st}} \delta S_{st} \right) T^{-1}. \quad (5)$$

误差模型(5)左边 $\delta T \cdot T^{-1}$ 的线性表达式整理如下:

$$\begin{aligned} [\delta T \cdot T^{-1}]^V &= [I - \text{Ad}(e^{[\eta_0]} e^{[S_0^s] \theta_0} e^{[-\eta_0]})] K_0 \delta \eta_0 + \\ &\quad \text{Ad}(e^{[\eta_0]} e^{[S_0^s] \theta_0} e^{[-\eta_0]}) [I - \\ &\quad \text{Ad}(e^{[\eta_1]} e^{[S_1^s] \theta_1} e^{[-\eta_1]})] K_1 \delta \eta_1 + \dots + \\ &\quad \text{Ad}\left(\prod_{i=0}^5 e^{[\eta_i]} e^{[S_i^s] \theta_i} e^{[-\eta_i]}\right) [I - \\ &\quad \text{Ad}(e^{[\eta_6]} e^{[S_6^s] \theta_6} e^{[-\eta_6]})] K_6 \delta \eta_6 + \\ &\quad \text{Ad}\left(\prod_{i=0}^6 e^{[\eta_i]} e^{[S_i^s] \theta_i} e^{[-\eta_i]}\right) K_{st} \delta S_{st}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: S_i^n 表示转动关节旋量理论值,与转动关节旋量实际值 S_i^a 的联系可用刚体变换矩阵 $\begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = e^{[\eta]}$ 的伴随矩阵表示,即 $S_i^a = \text{Ad}(e^{[\eta]}) S_i^n$; $K_i = [\delta(e^{[\eta_i]} e^{[-\eta_i]})^V (\delta \eta_i)^{-1}, [\delta(e^{[\eta]}) e^{[-\eta]}]^V]$ 的显示表达式可参见文献[25]所述; $\delta T \cdot T^{-1} = g^a (g^n)^{-1} - I$, g^a 表示机械臂末端实际位姿, g^n 表示机械臂末端理论位姿.

进一步,式(6)可描述成如下等式的标定模型:

$$y = Jx. \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} y &= [\delta T \cdot T^{-1}]^V \in R^{6 \times 1}, \\ J &= [J_0, J_1, \dots, J_6, J_{st}] \in R^{6 \times 48}, \\ x &= [\delta S_0^T, \delta S_1^T, \dots, \delta S_6^T, \delta S_{st}^T] \in R^{48 \times 1}. \end{aligned}$$

y 表示基坐标系下末端执行器的误差向量, J 是雅可比矩阵, x 是参数误差向量. J 取值为

$$\begin{aligned} J_0 &= [I - \text{Ad}(e^{[\eta_0]} e^{[S_0^s] \theta_0} e^{[-\eta_0]})] K_0; \\ J_m &= \text{Ad}\left(\prod_{q=0}^{m-1} e^{[\eta_q]} e^{[S_q^s] \theta_q} e^{[-\eta_q]}\right) [I - \\ &\quad \text{Ad}(e^{[\eta_m]} e^{[S_m^s] \theta_m} e^{[-\eta_m]})] K_m, \quad m = 1, \dots, 6; \\ J_{st} &= \text{Ad}\left(\prod_{q=0}^6 e^{[\eta_q]} e^{[S_q^s] \theta_q} e^{[-\eta_q]}\right) K_{st}. \end{aligned}$$

在标定实验中,采集 k 组数据,可以得到 k 组方程

$$\begin{cases} y^1 = J^1 x, \\ y^2 = J^2 x, \\ \vdots \\ y^k = J^k x. \end{cases} \quad (8)$$

记 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}^1 \ \mathbf{y}^2 \ \dots \ \mathbf{y}^k]^T$, $\mathbf{J} = [\mathbf{J}^1 \ \mathbf{J}^2 \ \dots \ \mathbf{J}^k]^T$, 联立 k 组方程, 利用最小二乘法可得

$$\mathbf{x} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Y}. \quad (9)$$

2 移动机械臂系统联合标定流程

移动机械臂系统运动学参数标定实验流程如图2所示. 移动机械臂标定过程第1步需要建立系统坐标系: 将 T-Mac 安装在机械臂末端法兰上, 控制移

动平台从 -90° 低速旋转到 $+90^\circ$ 位置, 转动期间每隔 10° 记录一次 T-Mac 位姿, 用这些点拟合出圆和通过圆心且垂直该圆平面的直线, Z_0 轴与该直线重合且方向向上; 同理, 转动机械臂 2 轴, 能拟合出另一个圆和通过圆心且垂直该圆平面的直线, Z_2 轴与该直线重合, 并作 Z_0 轴和 Z_2 轴的公垂线, 公垂线与 Z_0 轴交点为坐标系的原点, X_0 轴沿着公垂线方向且指向 Z_2 轴, 按照右手定则建立 Y_0 轴即可.

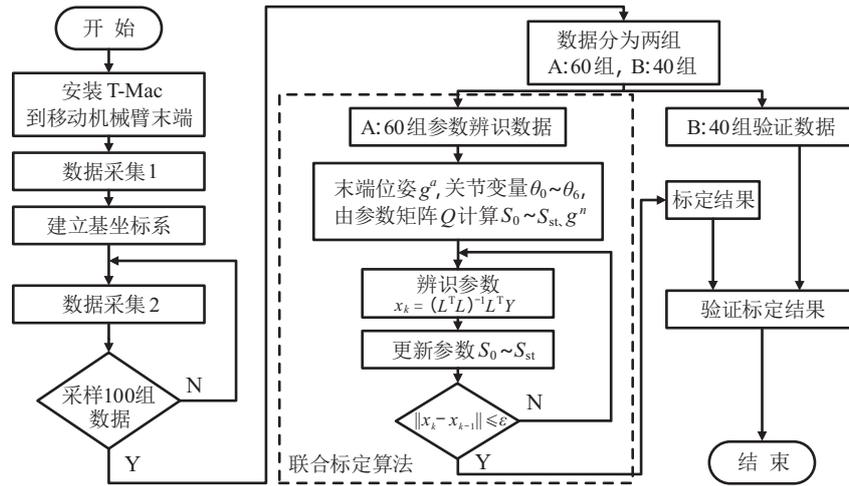


图2 移动机械臂联合标定实验流程

在上一步系统坐标系建立完成的基础上, 移动机械臂标定过程下一步是采集若干组标定数据和实验分析数据: 将 T-Mac 安装在机械臂末端法兰上, 控制移动机械臂运动, 使 T-Mac 位姿均匀分布在移动机械臂工作空间中, 测量 100 组数据, 使用激光跟踪仪记录 T-Mac 位姿. 每组数据包括 T-Mac 位姿以及移动机械臂各个关节轴的角度.

在获取到标定数据的基础上, 下一步是辨识参数: 1) 利用上一步获取的标定数据, 通过激光跟踪仪获得机械臂末端实际位姿 g^a 和记录的移动机械臂各个轴角度; 2) 使用机械臂参数矩阵 Q 计算各个轴理论旋量值 \mathbf{S}_i^n 、 \mathbf{S}_{st}^n 和机械臂末端理论位姿 g^n ; 3) 用机械臂末端位姿值 g^a 、 g^n 计算 \mathbf{Y} , 用各轴旋量理论值为 \mathbf{J} 赋初值; 4) 利用式(9)计算 $\delta \mathbf{S}_{i,k-1}$ 、 $\delta \mathbf{S}_{st,k-1}$; 5) 使用公式 $\mathbf{S}_{i,k} = \text{Ad}(e^{\delta \mathbf{S}_{i,k-1}}) \mathbf{S}_{i,k-1}$ 和 $\mathbf{S}_{st,k} = \mathbf{S}_{st,k-1} + \delta \mathbf{S}_{st,k-1}$ 更新 $\mathbf{S}_{i,k}$ 、 $\mathbf{S}_{st,k}$ 值; 6) 使用 $\mathbf{S}_{i,k}$ 、 $\mathbf{S}_{st,k}$ 为 \mathbf{J} 赋初值; 7) 重复 4)~6) 过程, 直至 $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\| \leq \varepsilon$, 最后, 返回标定结果 $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_6, \mathbf{S}_{st}$. 算法的伪代码如下所示.

算法1 联合标定算法.

输入: $g^a, \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_6, Q, \varepsilon$;

输出: $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_6, \mathbf{S}_{st}$.

- 1) function main()
- 2) $(\mathbf{S}_i^n, \mathbf{S}_{st}^n, g^n) \leftarrow Q, i = 0, 1, \dots, 6$
- 3) $\mathbf{Y} \leftarrow (g^a, g^n)$
- 4) $\mathbf{J} \leftarrow (\mathbf{S}_i^n, \mathbf{S}_{st}^n)$
- 5) while $\|\mathbf{x}_k\| > \varepsilon$ do
- 6) $\mathbf{x}_{k-1} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{Y}$
- 7) $\delta \mathbf{S}_{i,k-1} \leftarrow \mathbf{x}_{k-1}$
- 8) $\delta \mathbf{S}_{st,k-1} \leftarrow \mathbf{x}_{k-1}$
- 9) $\mathbf{S}_{i,k} = \text{Ad}(e^{\delta \mathbf{S}_{i,k-1}}) \mathbf{S}_{i,k-1}$
- 10) $\mathbf{S}_{st,k} = \mathbf{S}_{st,k-1} + \delta \mathbf{S}_{st,k-1}$
- 11) $\mathbf{J} \leftarrow (\mathbf{S}_{i,k}, \mathbf{S}_{st,k})$
- 12) end while
- 13) return $\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_6, \mathbf{S}_{st}$
- 14) end function

3 实验

通过对移动机械臂进行标定实验来验证所提出方法的有效性. 实验平台使用两轮差速运动移动平台和 6 轴机械臂组成的移动机械臂系统. 移动机械臂的标定实验分为仿真实验和真实标定实验, 仿真实验用于验证标定算法的有效性, 真实标定实验用于验证算法在实际应用中的可行性与准确性, 同时完成移动机械臂系统的标定.

3.1 移动机械臂运动学参数联合标定仿真实验

通过对移动机械臂运动学参数进行标定仿真实验,从而验证本文所提出的基于指数积公式的移动机械臂运动学参数联合标定方法的有效性.移动机械臂旋量参数的理论值和标定值如表2所示.移动机械

臂共8个旋量,总计48个参数需要标定,理论上只需末端8个独立的位姿数据即可完成求解.为了保证算法的准确性,仿真实验中随机生成包含移动机械臂各轴转角和对应机械臂末端位姿的100组数据.其中60组数据用于运动学参数的标定,剩下40组数据用于验证标定结果.

表2 移动机械臂系统运动学参数联合标定结果

旋量	理论值	标定值
S_0	$[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$[0.0021 \ 0.0003 \ 1.0000 \ -0.0050 \ -0.0052 \ 0.0000]^T$
S_1	$[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$[0.0031 \ 0.0005 \ 1.0001 \ 0.0018 \ -0.0006 \ -0.0000]^T$
S_2	$[0 \ -1 \ 0 \ 0.8057 \ 0 \ 0]^T$	$[-0.0101 \ -0.9999 \ -0.0047 \ 0.8074 \ -0.0082 \ 0.0039]^T$
S_3	$[0 \ -1 \ 0 \ 0.8057 \ 0 \ -0.3600]^T$	$[0.0242 \ -0.9998 \ -0.0020 \ 0.8083 \ 0.0203 \ -0.3622]^T$
S_4	$[0 \ -1 \ 0 \ 0.8057 \ 0 \ -0.6635]^T$	$[0.0156 \ -0.9998 \ 0.0086 \ 0.8077 \ 0.0069 \ -0.6654]^T$
S_5	$[0 \ 0 \ -1 \ -0.1120 \ 0.6635 \ 0]^T$	$[-0.0024 \ 0.0024 \ -1.0000 \ 0.1136 \ 0.6706 \ 1.0019]^T$
S_6	$[0 \ -1 \ 0 \ 0.6952 \ 0 \ -0.6635]^T$	$[0.0067 \ -1.0001 \ 0.0038 \ 0.6966 \ 0.0036 \ -0.6621]^T$
S_{st}	$[1 \ 0 \ 0 \ 0.6635 \ 0.5523 \ 0.5397]^T$	$[1.0000 \ -0.0006 \ -0.0018 \ 0.6653 \ 0.5556 \ 0.5378]^T$

为了验证标定方法的稳定性,文中进行了6组对比实验,对每组数据的机械臂末端位姿从位置和姿态两个方面施加不同均匀分布的噪声.6组实验分别是:(a)没有噪声;(b)无姿态噪声,施加 $[-1, 1]$ mm位置噪声;(c)无姿态噪声,施加 $[-5, 5]$ mm位置噪声;(d)施加 $[-0.01, 0.01]$ rad角度噪声, $[-1, 1]$ mm位置噪声;(e)施加 $[-0.001, 0.001]$ rad角度噪声,无位置

噪声;(f)施加 $[-0.01, 0.01]$ rad角度噪声,无位置噪声.通过6组实验表明,本文标定算法在迭代4次后标定结果就达到了稳定值;通过(b)、(c)、(d)、(e)、(f)实验表明,本文的标定算法在噪声干扰的情况下也能快速收敛到稳定值;通过(a)、(b)、(c)和(a)、(e)、(f)对比实验表明,标定精度会随着位置噪声和角度噪声的变大而变低,实验结果如图3所示.

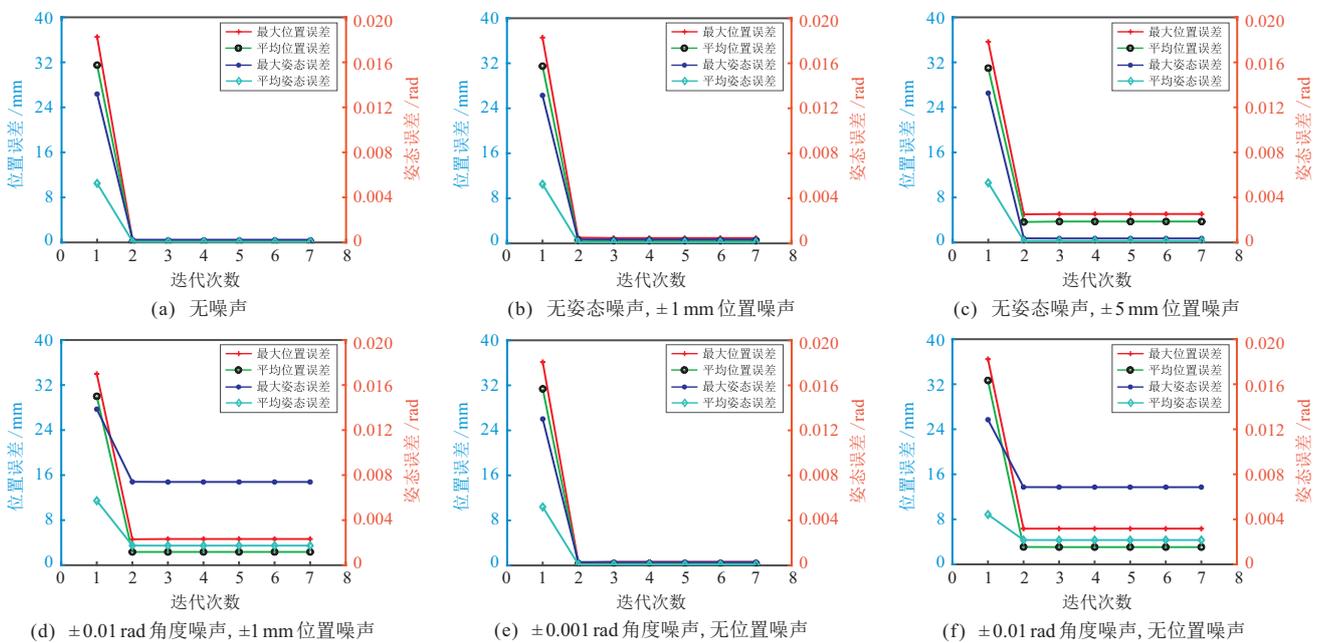


图3 不同噪声下基于指数积模型的标定实验误差

3.2 对比实验

本文使用经典D-H参数建模方法进行标定实验并与所提出的方法进行对比.对移动机械臂系统建立的D-H模型如表3所示.

在使用D-H参数模型进行标定过程中,同样采集100组数据:60组数据用于D-H模型参数辨识,40组数据用于验证标定结果和误差分析.图4是使用D-H模型和60组没有噪声的数据获得的标定实验

表3 移动机械臂系统D-H参数表

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
0	0	0	0	0
1	90	0	$H_1 + H_2$	0
2	0	L_1	0	0
3	0	L_2	0	0
4	90	0	$-W_1$	0
5	-90	0	H_3	0
6	0	0	W_2	0

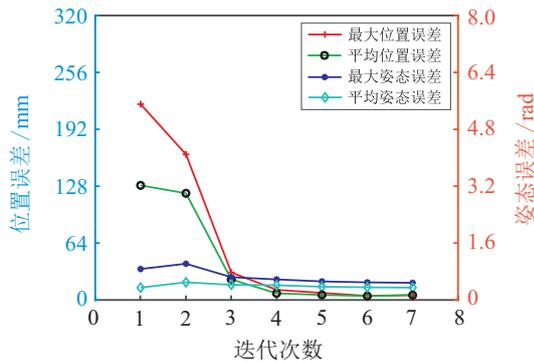


图4 D-H参数法标定实验误差

误差。由图4可知,当末端位置和姿态误差趋于稳定时,末端最大位置误差为5.544 mm,平均位置误差为5.445 mm,末端最大姿态误差是0.4824 rad,平均姿态误差是0.3476 rad。使用指数积模型的标定方法,在没有噪声的情况下标定结果趋于稳定时,位置误差远小于5 mm,姿态误差远小于0.4 rad。并且,即使在有 ± 0.01 rad角度噪声和 ± 1 mm位置噪声时,基于指数积模型的标定方法也能把最大位置误差保证在4 mm上下,把最大姿态误差保证在0.008 rad上下,如图3(d)所示。

经过对基于指数积模型的标定实验和D-H参数建模方法标定实验误差的分析,表明了所述基于指数积的移动机械臂联合标定方法的准确性。

3.3 移动机械臂运动学参数联合标定实验

以上仿真实验的结果表明了基于指数积移动机械臂联合标定方法的有效性。本文进一步在移动机械臂平台上进行真实实验。真实实验中利用绝对位置跟踪仪Leica AT960-MR作为测量工具,获取移动机械臂末端位姿。Leica AT960-MR测量范围是20 m,绝对测距精度是10 μm 。实验步骤如下:1)建立系统基坐标系;2)控制移动机械臂运动并记录各轴转角数值,同时记录移动机械臂末端位姿;3)重复步骤2),共记录100组数据,其中60组用于标定结果,40组用于结果验证和误差分析;4)利用步骤3)获取的60组数据进行参数标定;5)利用步骤4)的标定结果和步骤3)的40组数据进行结果验证和误差分析。实验方

案中步骤1)的操作方法如下:控制移动机械臂移动平台原地转动,记录末端机械臂位姿,利用这些数据拟合出转动圆心和转轴 z_0 ,控制移动机械臂的机械臂2轴转动,记录末端机械臂位姿,利用这些数据拟合出转动圆心和转轴 z_2 ,把转轴 z_2 平移到转轴 z_0 处即可获得 x_0 轴,再利用右手定则确定 y_0 轴即完成系统基坐标系的建立。

采用上述实验方案,移动机械臂运动学参数联合标定实验结果如表2所示。

本文实验场景设置如图5所示。图中左侧是移动机械臂系统及末端T-Mac,中间是用于数据采集的电脑,右侧是Leica AT960-MR激光跟踪仪。

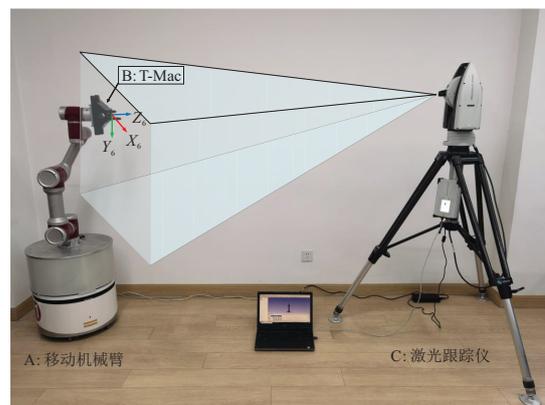


图5 实验场景设置

4 结论

本文提出了基于指数积的移动机械臂联合标定方法:1)该方法建模过程简单,不会因为关节轴平行而出现奇异性问题;2)该方法使用伴随矩阵形式建立了关节旋量理论值与关节旋量实际值的关系,加快了参数辨识计算过程;3)利用激光跟踪仪采集数据,保证了实验数据的高精度。最后通过实验验证了该方法的准确性和稳定性。

参考文献(References)

- [1] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [2] Zhang T, Song Y T, Wu H P, et al. A novel method to identify DH parameters of the rigid serial-link robot based on a geometry model[J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2021, 48(1): 157-167.
- [3] Strydom M L, Banach A, Roberts J, et al. Kinematic model of the human leg using DH parameters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 191737-191750.
- [4] Choi J, Park D I, Shin H, et al. A new approach to generate the DH parameters of modular robots[C]. The 2nd International Conference on Robotics and Automation

- Engineering (ICRAE). Shanghai, 2017: 37-41.
- [5] Lee J W, Park G T, Shin J S, et al. Industrial robot calibration method using denavit—Hatenberg parameters[C]. The 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju, 2017: 1834-1837.
- [6] 张旭, 郑泽龙, 齐勇. 6自由度串联机器人D-H模型参数辨识及标定[J]. 机器人, 2016, 38(3): 360-370.
(Zhang X, Zheng Z L, Qi Y. Parameter identification and calibration of D-H model for 6-DOF serial robots[J]. Robot, 2016, 38(3): 360-370.)
- [7] Patil A, Kulkarni M, Aswale A. Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters[C]. The IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics. Okinawa, 2017: 688-693.
- [8] Shi Y, Fang J, Weng Z Y. Research on kinematic parameter calibration of handling robot[C]. The 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Yangzhou, 2017: 224-228.
- [9] Guo F Y, Cai H, Gong Y, et al. An improved D-H convention for establishing a link coordinate system[C]. The IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Dali, 2019: 1465-1470.
- [10] 陈庆诚. 结合旋量理论的串联机器人运动特性分析及运动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
(Chen Q C. Research on analyses of motion characteristics and motion control of serial robot combining screw theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.)
- [11] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]. The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio, 1983: 1477-1483.
- [12] 陈根良. 操作机构尺寸与变形误差传递的统一建模方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
(Chen G L. A unified error transmission model of robot manipulators considering both kinematic and deformation errors[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.)
- [13] Wang Z H, Xu H, Chen G D, et al. A distance error based industrial robot kinematic calibration method[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(5): 439-446.
- [14] Okamura K, Park F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula[J]. Robotica, 1996, 14(4): 415-421.
- [15] Mao C T, Chen Z W, Zu H F, et al. An enhanced POE-based method with identified transmission errors for serial robotic kinematic calibration[C]. IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering. Vancouver, 2019: 1568-1573.
- [16] Luo R Q, Gao W B, Huang Q. POE-based parameter calibration for industrial robots considering joint compliance[C]. The 5th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan, 2021: 15-22.
- [17] Wang R C, Yang G L, Zhao H Z, et al. Robot kinematic calibration with plane constraints based on POE formula[C]. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation. Ningbo, 2016: 1887-1892.
- [18] 许杉, 李高峰, 孙雷, 等. 基于末端圆周运动的可变形臂旋量参数快速标定算法[J]. 机器人, 2018, 40(5): 607-618.
(Xu S, Li G F, Sun L, et al. A fast calibration algorithm for screw parameters of a deformable manipulator by using the circular motion of end-effector[J]. Robot, 2018, 40(5): 607-618.)
- [19] Gao X Y, Liu G L, Liao B. Inverse kinematics about a seven-DOF dual-arm robot based on POE formula[C]. 2019 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). Beijing, 2019: 373-379.
- [20] Shen J J, Zhou Y J. Kinematic accuracy analysis of serial manipulator based on POE formula[C]. The 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, 2016: 9547-9550.
- [21] Wu L, Crawford R, Roberts J. An analytic approach to converting POE parameters into D-H parameters for serial-link robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4): 2174-2179.
- [22] Zhou F, Liu Y S, Shen Y D, et al. Study on station planning of dual lugs hole measurement by laser tracker[C]. 2021 International Conference of Optical Imaging and Measurement (ICOIM). Xi'an, 2021: 290-294.
- [23] Conte J, Majarena A C, Acero R, et al. Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5/6/7/8): 1353-1364.
- [24] 高文斌, 王洪光, 姜勇. 一种基于指数积的串联机器人标定方法[J]. 机器人, 2013, 35(2): 156-161.
(Gao W B, Wang H G, Jiang Y. A calibration method for serial robots based on POE formula[J]. Robot, 2013, 35(2): 156-161.)
- [25] Li C, Wu Y Q, Löwe H, et al. POE-based robot kinematic calibration using axis configuration space and the adjoint error model[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1264-1279.

作者简介

陈新伟(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事机器人控制技术、工业视觉系统、移动机器人系统等研究, E-mail: chen_xinwei@126.com;

范崇山(1995—), 男, 硕士生, 从事智能机器人系统、机器人控制的研究, E-mail: csfan@mail.nankai.edu.cn;

孙凤池(1973—), 男, 副教授, 博士, 从事机器学习、智能机器人系统等研究, E-mail: fengchisun@nankai.edu.cn;

秦岩丁(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事医疗与辅助机器人、微纳操作机器人、仿生机器人等研究, E-mail: qinyd@nankai.edu.cn;

王鸿鹏(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事人工智能与智能机器人、虚拟现实与智能仿真、智能医疗与虚拟手术技术等研究, E-mail: hpwang@nankai.edu.cn.