

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.046

并联机械手冗余最小误差识别及校准实验验证

马广建

(河南省产学研人工智能研究院,河南 郑州 450046)

摘要:针对并联机械手的运动精度,以某三自由度主轴头为例,提出一种基于最小误差模型的运动精度校准方法。通过消除冗余几何源误差,建立包含最少几何源误差的最小误差模型,采用蒙特卡罗法模拟进行几何源误差灵敏度分析,研究各几何源误差对终端精度的相对影响。在此基础上提出粗校准和精校准相结合的分层辨识策略,以实现并联机械手的精度校准。通过校准实验测试表明:所提出的校准方法能够大幅降低并联机械手的终端误差,验证了所提校准方法的有效性。

关键词:并联机械手;运动学校准;误差建模;敏感性分析;误差校准

中图分类号:TP241 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0241-04

Identification of Redundant Minimum Error of Parallel Manipulator and Experimental Verification

MA Guangjian

(Henan Institute of Artificial Intelligence, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aimed at the motion accuracy of redundant driven parallel manipulator, and a three degree of freedom spindle head taken as an example, a motion accuracy calibration method based on minimum error model is proposed. The redundant geometric source error is eliminated to establish the minimum error model including the minimum geometric source error, and the sensitivity of geometric source error is analyzed by Monte Carlo simulation to study the relative impact of each geometric source error on terminal accuracy. On this basis, a hierarchical identification strategy combining coarse calibration and fine calibration is proposed to realize the accuracy calibration of redundant driven parallel manipulator. The calibration experiments show that the proposed calibration method can greatly reduce the terminal error of redundant driven parallel manipulator, and verify the effectiveness of the method.

Keywords: redundant driven parallel manipulator; sports school admission; error modeling; sensitivity analysis; error calibration

0 引言

数控混合五轴加工是解决复杂几何曲面零件的重要途径^[1]。并联机器人作为主轴头高质量加工的重要部件,是实现复杂几何零件加工精度的重要保障。与非冗余驱动形式相比,冗余驱动并联机器人(redundant driven parallel manipulator, RAPM)通常具有更好的灵巧性、更高的刚度和更好的动态性能等相对优势^[2]。采用三自由度 RAPM 作为主轴头进行高质量加工时,必须保证其运动精度。

近年来,冗余驱动并联机器人引起了学术界和工业界的高度关注。机器人运动精度的校准是实现机器人高运动精度的重要手段。YANG 等^[3]根据并联机构逆运动学误差建模理论,提出了一种基于 Matlab 的数值仿真方法,并采用最小二乘

法识别 6 自由度并联机构的结构参数,通过仿真验证了该标定算法的鲁棒性和有效性。ROSYID 等^[4]采用迭代法对混合运动机床和 3-P(Pa)S 并联主轴头进行了误差识别,采用非线性最小二乘算法对机构几何参数进行了估计。周星等^[5]针对 6 关节机器人的标定方法,提出了 5 点优选 TCP 标定优化改进模型,通过仿真和实验验证了该改进算法标定精度的有效性。王宪伦等^[6]在串联机器人单孔标定方法的基础上,通过 MDH 误差建模提出了多孔标定优化方法,该方法通过实验表明具有较高的定位精度。朱衡等^[7]采用粒子群算法对 6 自由度机械臂关节参数进行了标定,该方法具有较好的收敛性,同样通过实验表明该方法在提升标定精度上具有一定的优势。陈爽等^[8]采用 PSO 算法对工业机器人的定位精度进行了优化改进,通过建立 D-H 参数误差模型标定位姿平台两

作者简介:马广建(1964—),男,河南郑州人,硕士,研究方向为人工智能,namoche19670915@163.com。

点之间的绝对距离,有效提升了标定精度。王远东等^[9]针对 3-R2U2S 并联机器人的参数标定,分析了影响机构参数变化的各种误差源,在此基础上建立了机器人运动学误差模型,提出了自动协作原理的参数标定方法,该方法通过实验得到了有效验证。

本研究在前人研究的基础上,提出了粗校准和精校准相结合的分层辨识策略,以实现并联机械手的精度校准。最后通过校准实验验证了所提校准方法的有效性。

1 并联机械手最小误差模型

1.1 并联机械手模型

本研究的并联机械手模型如图 1 所示,其后面的拓扑结构为 2UPR&2RPS 的 RAPM。其中,“U”、“R”、“S”、“P”分别代表万向节、转动关节、球形关节和驱动移动关节。它由一个固定底座、一个移动平台、两个相同的 UPR 肢腿和两个相同的 RPS 肢腿组成,主轴头具有 3 自由度。肢腿 1 和肢腿 3 为对称分布的 UPR 肢腿,肢腿 2 和肢腿 4 是两个对称分布的 RPS 肢腿。各肢腿分别与固定基座和移动平台在 A_i 点和 B_i 点相连。

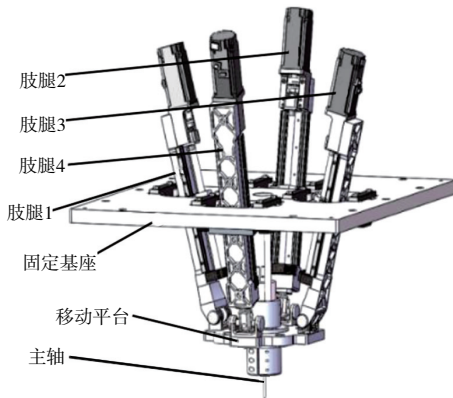


图 1 三自由度主轴头模型示意图

1.2 冗余误差的消除

为了便于误差建模,图 2 给出了 UPR 和 RPS 肢腿中的所有机身固定关节坐标系, $O_{j,i} - x_{j,i}y_{j,i}z_{j,i}$ 定义为第 i 肢腿第 j 个单自由度关节的机身固定坐标系,其中 $z_{j,i}$ 轴与关节轴重合, $x_{j,i}$ 轴与 $z_{j,i}$ 轴和 $z_{j+1,i}$ 轴的公法线重合, $O_{j,i}$ 是 $z_{j,i}$ 轴和 $x_{j,i}$ 轴的交点, $y_{j,i}$ 轴由右手定则确定。对于每个肢腿,全局坐标系 $O-xyz$ 被视为第 0 个关节坐标系,机身固定坐标系 $O'-uvw$ 被视为最后一个关节坐标系,点 A_i 与 $O_{1,i}$ 重合, B_i 与点 $O_{4,i}$ ($i=1,3$) 重合。

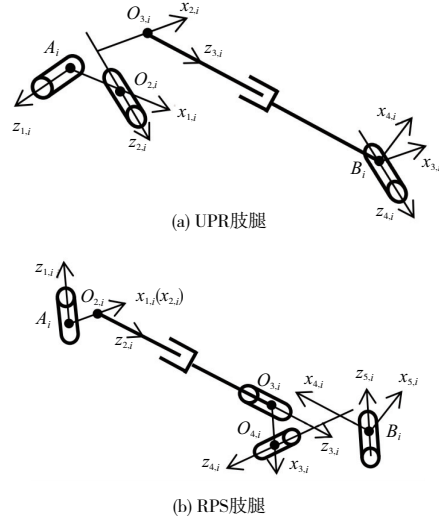


图 2 UPR 和 RPS 肢腿的关节坐标系

利用上述定义,得到了相邻关节与固定坐标系之间的几何关系, $O_{j,i} - x_{j,i}y_{j,i}z_{j,i}$ 相对于 $O_{j-1,i} - x_{j-1,i}y_{j-1,i}z_{j-1,i}$ 的几何误差可表示为

$$\Delta_{j,i} = [\Delta x_{j,i} \Delta y_{j,i} \Delta z_{j,i} \Delta \alpha_{j,i} \Delta \beta_{j,i} \Delta \gamma_{j,i}]^T \quad (1)$$

式中 $[\Delta x_{j,i} \Delta y_{j,i} \Delta z_{j,i}]^T$ 和 $[\Delta \alpha_{j,i} \Delta \beta_{j,i} \Delta \gamma_{j,i}]^T$ 分别表示位置误差和方向误差。如果一个几何源误差依赖于另一个几何源误差,则可以定义为冗余几何源误差。为了简化误差模型,消除几何源误差,本研究提出了消除冗余几何源误差的一般原则^[10]:

- 1) 若第 j 个单自由度关节为移动关节,则 $\Delta z_{j+1,i}$ 为冗余,可合并为 0 偏移;
- 2) 如果 $j-1 \neq 0$, 则第 $(j-1)$ 个关节不是移动关节,由于 $\Delta y_{j,i}$ 和 $\Delta \beta_{j,i}$ 没有包含在变换中,其为冗余的, $\Delta \gamma_{j,i}$ 可合并为关节运动误差;
- 3) 如果 $z_{j,i}$ 轴平行于 $z_{j-1,i}$ 轴, 则 $\Delta x_{j,i}$, $\Delta \alpha_{j,i}$, $\Delta z_{j+1,i}$ 和 $\Delta \gamma_{j+1,i}$ 是冗余的,它们可以合并为 $\Delta x_{j-1,i}$, $\Delta \alpha_{j-1,i}$, $\Delta z_{j,i}$ 和 $\Delta \gamma_{j,i}$ 。

根据上述原理消除冗余几何源误差后,可得 UPR 肢腿的几何源误差为:

$$\begin{cases} \Delta_{1,i} = [\Delta x_{1,i} \Delta y_{1,i} \Delta z_{1,i} \Delta \alpha_{1,i} \Delta \beta_{1,i} \Delta \gamma_{1,i}]^T \\ \Delta_{2,i} = [\Delta x_{2,i} \Delta \alpha_{2,i} 00]^T \\ \Delta_{3,i} = [\Delta x_{3,i} \Delta z_{3,i} \Delta \alpha_{3,i} 00]^T \\ \Delta_{4,i} = [\Delta x_{4,i} \Delta y_{4,i} 0 \Delta \alpha_{4,i} \Delta \beta_{4,i} \Delta \gamma_{4,i}]^T \\ \Delta_{5,i} = [\Delta x_{5,i} \Delta y_{5,i} 0 \Delta z_{5,i} \Delta \alpha_{5,i} \Delta \beta_{5,i} \Delta \gamma_{5,i}]^T \end{cases} \quad (i=1,3) \quad (2)$$

2 实验验证

图 3 所示为粗识别和精识别的实验装置,3 自由度主轴头由 4 个伺服电机驱动,由数控系统

控制。通过将运动数据导入数控系统,可将移动平台调整到目标姿态。在此基础上,利用 AT960 激光跟踪仪进行校准实验,跟踪激光反射点的位置。在测量规划过程中,测量装置应遍历主轴头的所有自由度,且测量的构型应包括易发生最大位置误差的工作空间边界。

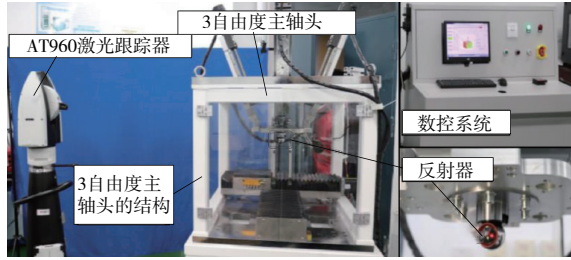


图3 校准实验装置

测量的结构被规划为在 3 个等距平面上等间距的点,在 $z = 200 \text{ mm}$ 平面上, ψ 的范围为 $-25^\circ \sim 25^\circ$, θ 的范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$; 在 $z = 220 \text{ mm}$ 平面上, ψ 的范围为 $-25^\circ \sim 25^\circ$, θ 的范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$; 在 $z = 240 \text{ mm}$ 平面上, ψ 的范围为 $-25^\circ \sim 25^\circ$, θ 的范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。旋转角度的增量步长设为 5° 。

按照平面 $z = 200 \text{ mm}$ 、 $z = 220 \text{ mm}$ 、 $z = 240 \text{ mm}$ 的先后顺序进行测量。以平面 $z = 200 \text{ mm}$ 为例,测量的顺序如图 4 所示,可以看出各坐标轴的位置误差,当 θ 从 -15° 增大到 15° 时, ψ 从 -25° 增大到 25° 。

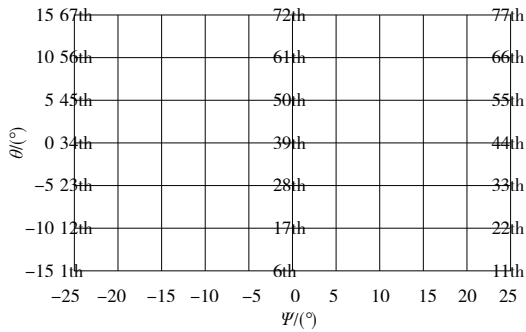
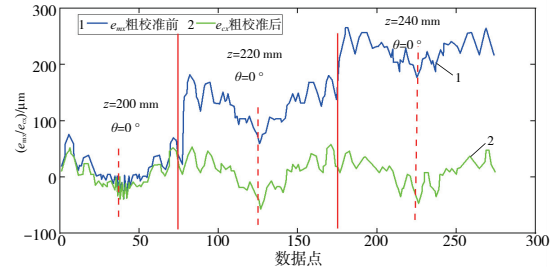
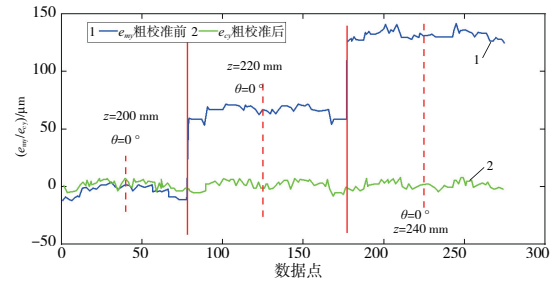


图4 粗校准位置误差的测量

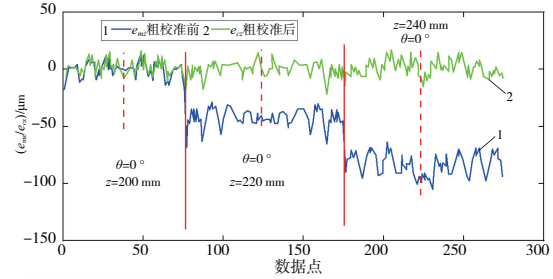
由此得到粗校准前后 3 个坐标轴的位置误差如图 5 所示,其中 e_{mx} 、 e_{my} 和 e_{mz} 分别表示 e_m 沿 x 、 y 和 z 轴的误差分量。从图中可以看出,在每个测量平面上,沿各坐标轴的终端位置误差相对于轴 $\theta = 0^\circ$ 是对称的。同时,在每个测量平面上,各坐标轴上的位置误差相对于轴 $\psi = 0^\circ$ 是对称的。这与 2UPR&2RPS 平行主轴头的对称结构类似。



(a) 粗校准前后x轴方向的误差



(b) 粗校准前后y轴方向的误差



(c) 粗校准前后z轴方向的误差

图5 粗校准前后的位置误差

在粗定标前,位置误差的绝对值是沿每个轴的相邻测量平面之间的步进增量。对于沿 x 轴位置误差 e_{mx} , 在 3 个测量平面的误差范围分别为 $-100 \sim 100 \mu\text{m}$ 、 $0 \sim 200 \mu\text{m}$ 、 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ 。对于沿 y 轴位置误差 e_{my} , 在 3 个测量平面的误差范围分别为 $-25 \sim 25 \mu\text{m}$ 、 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 、 $100 \sim 150 \mu\text{m}$; 对于沿 z 轴位置误差 e_{mz} , 在 3 个测量平面的误差范围分别为 $-50 \sim 50 \mu\text{m}$ 、 $-100 \sim 0 \mu\text{m}$ 、 $-150 \sim -50 \mu\text{m}$ 。3 个测量平面上各轴的位置误差分布是相似的,说明 z 值的增加导致位置误差幅值的增加,但不影响 θ 和 ψ 轴向角构成平面上的位置误差分布,这表明存在初始位置误差,即主轴头中的零偏移。

粗校准后,沿各轴消除了步进增量,即消除 0 偏移。沿 x 轴上的 e_{cx} 在 3 个测量平面上的测量范围为 $-100 \sim 100 \mu\text{m}$, 沿 y 轴上的 e_{cy} 在 3 个测量平面上的测量范围为 $-25 \sim 25 \mu\text{m}$, 沿 z 轴上的 e_{cz} 在 3 个测量平面上的测量范围为 $-50 \sim 50 \mu\text{m}$ 。这也表明该方法有效的。

校准前后各测量平面误差指标最大值和平均

值如表 1 所示。可以看出在各测量平面,经过两步校准,误差指数最大值和平均值都得到了大幅降低,这也证明了所提出的两步校准方法的有效性。

表 1 校准前后误差指标的最大值和平均值

测量面 z/mm	最大值/ μm			平均值/ μm		
	粗校 准前	粗校 准后	精校 准后	粗校 准前	粗校 准后	精校 准后
200	73.34	55.19	21.20	24.48	21.93	8.48
220	194.39	61.24	17.23	148.01	27.16	7.00
240	304.18	52.62	17.67	274.38	23.92	6.80

3 结语

本研究提出了一种基于最小误差模型的并联机械手运动学校准方法。首先基于并联机械手臂结构特性和各关节相应的坐标系,提出了一种由 0 偏移量粗识别和几何源误差精识别组成的分层识别策略,从而实现并联机械手的精度校准。最后通过校准实验测试表明,所提出的校准方法能够大幅降低并联机械手的终端误差,验证了所提校准方法的有效性。该校准方法也适用于其他类型并联机械手的精度校准,具有一定的普适性。

参考文献:

- [1] 朱大虎,徐小虎,蒋诚,等. 复杂叶片机器人磨抛加工工艺技术研究进展[J]. 航空学报,2021,42(10): 8-30.

(上接第 176 页)

参考文献:

- [1] LAPERRIERE L, GHIE W, DESROCHERS A. Statistical and deterministic tolerance analysis and synthesis using a unified Jacobian-torsor model[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1): 417-420.
- [2] DU J B, HUANG Z T, YANG R Z. Optimization of the motion control mechanism of the hatch door of airliner[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(5): 1173-1186.
- [3] 葛磊,陈双霖. 基于装配关系的公差库建立及在容差分析中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 67-70.
- [4] 陈华. 基于雅克比旋量模型的三维公差分析方法研究及在发动机装配中的应用[D]. 上海:上海交通大学

- [2] 吴锦辉,陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2180-2188.
- [3] YANG L W, TIAN X Z, LI Z L, et al. Numerical simulation of calibration algorithm based on inverse kinematics of the parallel mechanism[J]. Optik, 2019, 182: 555-564.
- [4] ROSYID A, EL - KHASAWNEH B, ALAZZAM A. External kinematic calibration of hybrid kinematics machine utilizing lower-DOF planar parallel kinematics mechanisms [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(6): 995-1015.
- [5] 周星,黄石峰,朱志红. 六关节工业机器人 TCP 标定模型研究与算法改进[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 186-196.
- [6] 王宪伦,胡晓伟. 基于多孔标定法的串联机器人运动学标定研究[J]. 机电工程, 2019, 36(5): 470-474, 500.
- [7] 朱衡,杨东超,常旭,等. 利用粒子群优化方法标定机械臂关节参数[J]. 机械设计与制造, 2021, 365(7): 285-290.
- [8] 陈爽,张桥. 基于 PSO 算法的工业机器人绝对距离自标定方法[J]. 制造业自动化, 2021, 43(4): 30-34.
- [9] 王远东,高洁. 3-R2U2S 并联机器人的机构参数标定法探究[J]. 机械传动, 2020, 44(5): 121-125.
- [10] 张旭祥,沈丹峰,刘夏轩德,等. 含关节间隙的并联机器人运动误差分析[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(1): 91-97.

收稿日期:2023-01-31

学, 2015.

- [5] 仇念尧. 汽车座椅骨架系统功能公差研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [6] 张晓丹. 地铁扶手的稳健优化设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [7] 张黎. 面向机构精度稳健性的起落架容差设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [8] LAFOND P, LAPERRIERE L. Jacobian-based modeling of dispersions affecting pre-defined functional requirements of mechanical assemblies [C]// Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'99) (Cat. No. 99TH8470). Porto, Portugal: IEEE, 2002: 20-25.

收稿日期:2022-12-05