

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.039

多机器人协同制造系统控制与标定技术

张浩松¹, 李鹏程¹, 魏德岚¹, 韦学文¹, 廖文和¹, 江静帆², 田威¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 西北工业大学, 陕西 西安 710129)

摘要:为提升机器人在航空航天增材制造领域的效率,对多机器人一体化增材制造进行研究,开发多机器人控制系统,提出多机器人一体化增材制造系统工作流程。通过双目视觉以及光学显微镜对系统进行标定,并利用两台史陶比尔 TX2-60 机器人进行了打印实验以及精度测试。实验结果验证了该系统的有效性,该标定方法带来的误差对制造过程可以忽略不计。

关键词:多机器人;协同;增材制造;系统标定;控制系统

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0197-05

Control and Calibration Technology of Multi-robot Collaborative Manufacturing System

ZHANG Haosong¹, LI Pengcheng¹, WEI Delan¹, WEI Xuewen¹, LIAO Wenhe¹, JIANG Jingfan², TIAN Wei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract:In order to improve the efficiency of robots in the field of aerospace additive manufacturing, this paper makes research on multi-robot integrated additive manufacturing, develops a multi-robot control system, and proposes the workflow of multi-robot integrated additive manufacturing system. The system is calibrated by binocular vision and optical microscope, and two Staubli TX2-60 robots are used for printing experiments and accuracy tests. The experimental results verify the effectiveness of the proposed system, and the errors made by calibration method in manufacturing process could be neglected.

Keywords:multi-robot; synergy; additive manufacturing; system calibration; control system

0 引言

传统的 3D 打印系统通过数字化设计与控制,能够适应具有复杂几何形状的结构,并且数字化系统能够对打印过程进行监控,保证打印的精度。但是航空航天的复杂制造任务对多种材料一体化打印提出了要求,与传统打印模式自由度受限的矛盾日益突出。因此,亟需开展多材料增材制造一体化的研究,为我国航空航天制造技术提供理论支撑。

多机器人增材制造系统能够完成多个末端的协同打印,各个机器人的末端搭载不同的末端执行器以完成各种材料的打印,这极大地提高了打印的效率和灵活性,因此需要更先进的控制方法、完备的轨迹规划以及更高的工艺要求。

近年来,国内外将机器人系统与增材制造相

结合的研究较多,URHAL 等^[1]提出一种机器人辅助增材制造系统,通过添加额外的自由度来实现打印的多元性,打印的过程中可以实现材料积累方向的改变,无需支撑结构,但是切片算法与机器人 NC 代码的兼容性尚未实现。TIRYAKI 等^[2]提出一种带有移动底座的机器人打印系统,通过底座来扩展机器人的工作范围,从而实现大尺寸样件的打印,但该系统只限于单机器人打印,而且精度有限,不适用于航空航天领域对精度要求高的场合。JING 等^[3]提出了一种无支撑机器人打印系统,通过计算弧长来获得挤出值以实现机器人和挤出系统的同步。但是此系统打印精度受限,而且打印速度有限。朱胜等^[4-5]利用机器人的高柔性控制,对航空航天废旧零部件进行再制造,以实现破损零件的修复,但未对控制技术和标定进行研究。

基金项目:军委科技委基础加强计划重点基础研究项目(2019-JCJQ-ZD-303);国防基础科研计划资助项目(JCKY2021204B045)

第一作者简介:张浩松(1999—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为机器人智能制造,1304207624@qq.com。

因此,迫切需要一种开放性、控制稳定的系统来实现多机器人一体化增材制造。采用倍福工业控制软件 TwinCAT 来实现机器人控制系统的开放性和兼容性的开发^[6],系统控制采用 EtherCAT 总线形式,通过实时以太网技术来降低通信延迟,以实现高性能、高实时性传输,同时采用分布式架构也增加了系统的可拓展性,能够实现与其他自动化设备的集成。

由于控制系统采用多机器人和打印平台共同协作,因此需要标定打印平台和各个机器人之间的位置关系。国内外对机器人标定的研究较为成熟,ZHUANG 等^[7]提出了一种将基座标系与工具标系之间的关系转换成线性关系,利用四元数法对 $AX=YB$ 来求解,但是此方法需要几个测量阶段,经过阶段性误差累积可能会影响标定精度。WU 等^[8]提出了同时将手眼标系、法兰标系以及机器人基座标系的标定转换成 $AXB=YCZ$ 的形式,这种方法避免了误差累积,在精度和效率上都要优于非同时法,但是这种方法计算量大,且工作内容较为繁琐。

传统机器人标定方法采用双目相机建立视场,使用追踪模式即可确认各个坐标系位置。由于本文采用的史陶比尔机器人基座标系距离追踪靶标位置较远,双目相机追踪的结果不再具备参考性,因此采用坐标转换来求解机器人基座标系相对位置关系,机器人工具标系则采用侦测手柄和光学显微镜进行标定。经过实验验证,标定精度能够达到 0.14 mm 以内。

1 系统组成和工作流程

1.1 系统组成

系统主要由龙门机床导轨、送料装置、打印转台、3 台史陶比尔机器人、3 个末端执行器、视觉设备、控制器组成,其中两台打印机器人能沿机床横移轴运动。基体打印机器人末端由控制送丝的伺服电机、打印喷头和加热模块组成,在打印平台上完成基体材料打印任务;电路打印机器人末端由 1 个高黏度银浆打印喷头和 1 个激光烧结模块组成,在基体材料上完成电路打印任务;嵌入机器人安装于升降立柱上,末端夹爪在送料区完成功能载荷的夹取,并嵌入打印完毕的基体中,其中打印设备结构如图 1 所示。

系统软件采用模块化方式,主要分为上位层软件模块、运动控制模块、视觉检测模块;上位层

软件模块主要由数据层、算法层、交互层和接口层组成。上位层将机器人数控代码和工艺参数解析为内部指令并发送给运动控制层;运动控制模块主要对各个运动进行实时控制,主要包括机器人、送丝电机、电磁阀、夹爪、机床轴等;视觉检测模块包含双目视觉和激光跟踪仪,主要实现对机器人末端的标定和视觉伺服。

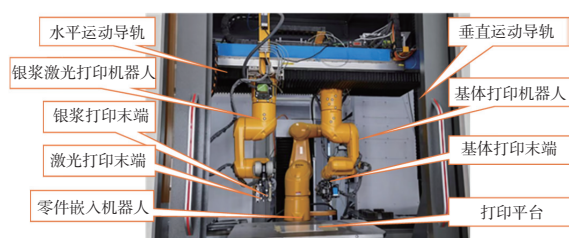


图 1 增材制造系统结构

1.2 工作流程

上位层软件解析离线规划后的机器人数控 NC 代码,按照功能将代码分为调度代码、基体机器人运动代码、电路机器人运动代码、嵌入机器人运动代码。而调度代码主要包含机床升降轴和横移轴的运动指令,并在运行完成之后跳转到其他机器人。每台机器人都有各自的线程,通过主线程的调度来实现各个线程之间的交互。上位层通过 ADS 通信与运动控制层实现数据交互,以实现下发机器人运动点位和打印工艺参数以及接受机器人状态信息和报警信号等。

为了实现机器人的实时控制,用倍福 PLC 软件 TwinCAT3 开发运动控制层。运动控制层主要包含对机器人点位的规划、插补和视觉伺服。为了实现点位下发的连续性,机器人轨迹规划之前用寄存器预先储存点位信息,采用双寄存器交替运行的模式来储存点位。轨迹规划和插补算法在 Simulink 中开发,利用内置功能模块导出为函数块,再集成到 PLC 软件接口中从而实现与 PLC 变量的实时交互;规划器将相邻两个点规划为直线和圆弧,二者交替运行,从而保证轨迹的连续性;直线插补时会给下一段圆弧插补器赋值,同时会给下一段直线圆弧规划器赋值,圆弧插补会给下一段直线插补器赋值,同时圆弧的终点会作为下一段规划的起点,程序实现逻辑如图 2 所示。除此之外,视觉伺服是获取插补得到的理论位姿与双目视觉测量得到的实际位姿,将二者的偏差作为 PID 控制器的输入,经过控制器优化调节之后

逆解得到6个关节值发送给机器人,从而实现机器人位姿的实时调整。

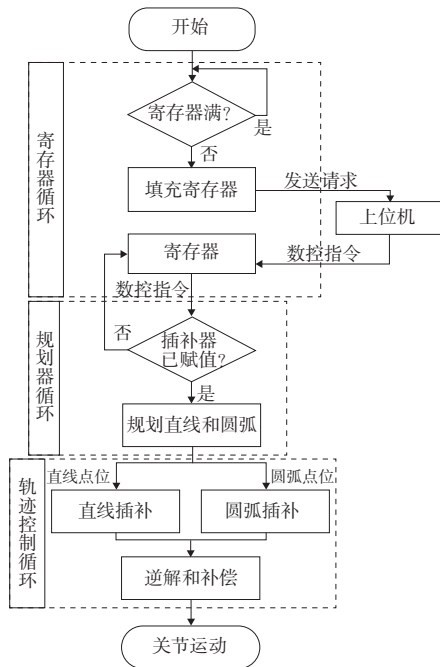


图2 运动控制层系统结构

1.3 通信架构设计

系统的通信方式和拓扑结构将直接决定整个系统的性能、可靠性和扩展性,由于多机器人一体化增材制造系统对系统的性能要求较高,同时还要兼顾对后续功能的集成开发,因此,系统采用显示通信的方式来实现信息交互,通过可视化的形式来传递信息;同时系统采用双通信链路的方式,分别是 EtherCAT 现场总线^[9]、Ethernet(TCP/IP)工业以太网。

系统的硬件拓扑如图3所示,其中 EtherCAT 主要包含通过倍福 PLC 控制的工业设备,主要包含机床导轨、送丝电机、嵌入夹爪、银浆喷头,机器人采用的是外部自动模式,此模式同样是基于 EtherCAT 现场总线实现的。此外,为了保证激光功率的稳定性,采用串口通信来控制激光启停。双目视觉则是采用 Ethernet(TCP/IP)与 TwinCAT 实现数据交互。

2 双机器人系统标定技术

2.1 机器人基坐标系建立

本系统的标定是在双目相机和激光跟踪仪的基础上对双机器人以及打印平台进行标定,具体坐标转换关系如图4所示。

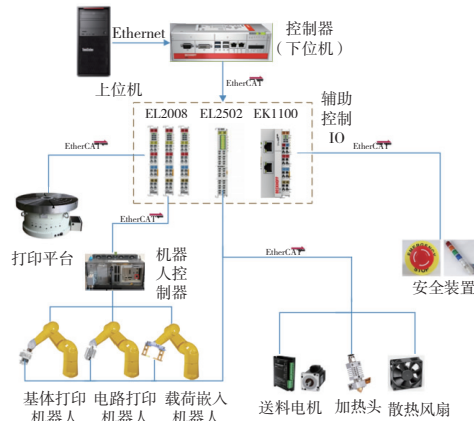


图3 系统硬件拓扑图

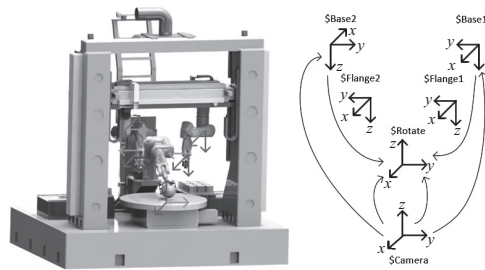


图4 基座坐标系与转台坐标系转换关系

首先让系统处于激光跟踪仪视场范围内,利用光学侦测靶标球建立打印转台平面,以转台中心为坐标原点,建立工件坐标系 \$Rotate\$。

向勇等^[10]使用激光跟踪仪建立机器人基座标系,分别旋转 TX601 机器人一二轴,拟合圆建立机器人基座标系 \$Base1\$,同理建立机器人 2 基座标系 \$Base2\$。则

$${}_{Base1}^{Base1} T_{Rotate} = {}_{Rotate}^{Rotate} T_{Camera} \quad (1)$$

$${}_{Base2}^{Base2} T_{Rotate} = {}_{Rotate}^{Rotate} T_{Camera} \quad (2)$$

2.2 机器人 TCP 坐标系建立

机器人打印末端喷头缺乏明显几何特征,传统视觉侦测手柄采集点位信息的方法不再准确,因此借助光学显微镜来修正 TCP 坐标,具体操作步骤如下:

1) 使用视觉侦测手柄 probe 采集打印末端点位,获取末端初步点位信息;

2) 在平台上双机器人的打印范围之内水平放置光学显微镜,分别移动双机器人末端使打印喷头圆心与光学显微镜圆心重合并记录示教器点位信息;

3) 在离线编程软件 RobotDK 中仿真得到双机器人运动学模型,让机器人末端到达上述点位,根据机器人实际末端位置来补偿理论位置,最终

得到修正后的 TCP 坐标系,如图 5 所示。

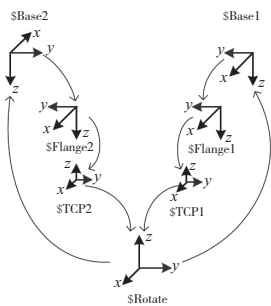


图 5 机器人系统坐标转换关系

根据图 5 有:

$$\begin{matrix} \text{Rotate} \\ \text{Base1} \end{matrix} T = \begin{matrix} \text{Flange1} \\ \text{Base1} \end{matrix} T \begin{matrix} \text{TCP1} \\ \text{Flange1} \end{matrix} T \begin{matrix} \text{Rotate} \\ \text{TCP1} \end{matrix} T \quad (3)$$

$$\begin{matrix} \text{Rotate} \\ \text{Base2} \end{matrix} T = \begin{matrix} \text{Flange2} \\ \text{Base2} \end{matrix} T \begin{matrix} \text{TCP2} \\ \text{Flange2} \end{matrix} T \begin{matrix} \text{Rotate} \\ \text{TCP2} \end{matrix} T \quad (4)$$

下面通过实验初步验证 TCP 坐标系标定结果的准确性:在离线编程软件 RobotDK 对打印范围内的点进行仿真,分别移动双机器人使其到达相同点位并记录法兰坐标系与基坐标系的相对位置关系;使用理论值发送给机器人,改变打印位置测量多组实验数据如表 1 所示。

表 1 TCP 验证结果

单位:mm

实验次序	机器人 1 位置			机器人 2 位置			测量误差
	x	y	z	x	y	z	
1	310.236	223.658	290.256	239.764	-260.236	263.369	0.136 9
2	269.365	256.388	286.367	280.635	-219.365	259.457	0.096 8
3	156.354	139.849	283.118	393.646	-106.354	256.486	0.088 6
4	254.387	108.497	285.125	295.613	-204.387	258.187	0.112 6
5	26.449	254.187	275.334	523.551	23.551	248.312	0.086 2
6	48.598	14.258	274.358	501.402	1.402	246.398	0.059 6
7	78.589	185.378	268.436	471.411	-28.589	240.314	0.089 6
8	171.347	48.569	258.867	378.653	-121.347	230.764	0.096 8
9	271.593	14.457	244.761	278.407	-221.593	216.469	0.076 9
10	78.357	263.749	239.524	471.643	-28.357	211.186	0.083 2

由图 6 实验对比结果证明在机器人打印区域内,经过光学显微镜修正 TCP 坐标系后,双机器人末端标定误差能够达到 0.14 mm 以内。此外,此方法弥补了传统方法的不足,在 TCP 没有明确几何特征时,光学显微镜可以提供更高的分辨率和更精确的观测,对坐标系进行了有效的修正。

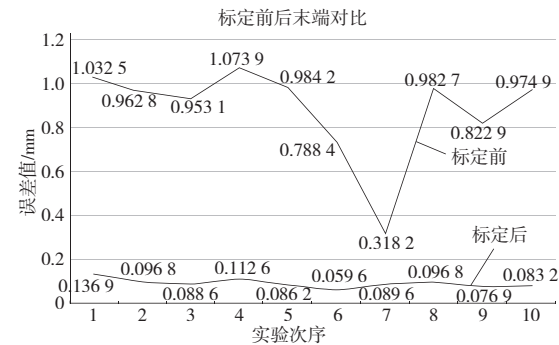


图 6 标定结果对比

2.3 验证模型打印实验

为了验证整个系统标定结果的准确性,选用 PEEK 基体材料和高黏度银浆电路材料来打印验证模型。

设计了 20 mm×6 mm×5 mm 的验证模型对上述标定结果进行验证,通过自研的 CAM 软件对模型进行切片。系统采用熔融沉积的方式进行材料成型,其中基体结构件设有 2 mm 的凹槽,银浆打印喷头的直径也是 2 mm,通过测量最终打印样件的导电性能即可验证标定结果的准确性。

由切片能够生成工件坐标系下的 NC 代码,根据离线软件得到的坐标系转换关系,将工件坐标系下的数控代码转换成机器人坐标系下的数控代码,最终导入控制系统实现样件打印。样件模型、实际打印样件以及内部结构如图 7 所示。

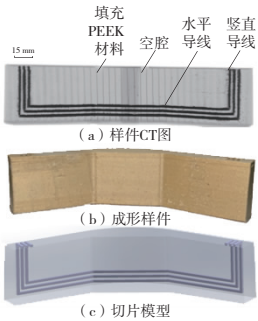


图 7 打印模型对比图

样件成功完成打印且3条导线均能导通,平均电阻率为 $35.1\text{ m}\Omega$,如图8所示。实验验证了该系统的可行性以及稳定性,同时此标定方法能够完整地实现机器人系统坐标系的标定,且精度能够达到精确制造的要求。这表明本文所提出的标定方法在实际应用中是有效的,能够保证机器人在生产制造中的精度,为精密制造领域提供了可靠的技术支持。

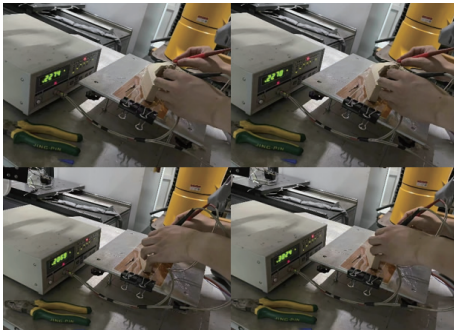


图8 电阻值测量示意图

3 结语

本文针对机器人在增材制造领域的应用,开发了一种集多机器人控制、多执行末端控制、视觉控制于一体的多机器人增材制造系统,提出了多机器人协同一体化打印工作流程。本系统通过EtherCAT和Ethernet协议以确保多执行端之间的实时性和同步性,拓扑结构的设计能够很好地优化通信效率和降低延迟,同时可以提高制造系统的灵活性、效率和整体性。提出了一种基于多种视觉设备的机器人系统标定方法,并设计了样件进行多机器人协同打印,双机器人经标定后协同误差能够达到 0.14 mm 以内。由于航空航天样件尺寸较大,因此后续需要进一步设计大尺寸样件并测试打印精度。

参考文献:

[1] URHAL P, WEIGHTMAN A, DIVER C, et al. Robot

assisted additive manufacturing: a review [J]. *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, 2019, 59: 335-345.

- [2] TIRYAKI M E, ZHANG X, PHAM Q C. Printing-while-moving: a new paradigm for large-scale robotic 3D printing [C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau: IEEE, 2019: 2286-2291.
- [3] JING X S, LV D P, XIE F B, et al. A robotic 3D printing system for supporting-free manufacturing of complex model based on FDM technology [J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2023, 50(2): 314-325.
- [4] 朱胜. 柔性增材再制造技术 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 1-5.
- [5] ZHU S, LI C, SHEN C D, et al. Microstructure and performance characteristics of parts produced via GMAW surfacing rapid forming [J]. *Advanced Materials Research*, 2010(97/98/99/100/101): 4024-4027.
- [6] 张良. 基于TwinCAT关节型机器人控制系统研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [7] ZHUANG H Q, ROTH Z S, SUDHAKAR R. Simultaneous robot/world and tool/flange calibration by solving homogeneous transformation equations of the form $AX = YB$ [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(4): 549-554.
- [8] WU L, WANG J L, QI L, et al. Simultaneous hand-eye, tool-flange, and robot-robot calibration for comanipulation by solving the $\mathbf{AXB} = \mathbf{Y CZ}$ problem [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(2): 413-428.
- [9] 周亮, 刘凯, 吴洪涛, 等. 基于EtherCAT的6-UPS并联机器人控制系统设计 [J]. *机械制造与自动化*, 2023, 52(4): 156-159, 172.
- [10] 向勇, 田威, 洪鹏, 等. 双机器人钻铆系统协同控制与基坐标系标定技术 [J]. *航空制造技术*, 2016, 59(16): 87-92.

收稿日期: 2023-11-17