

基于反馈控制的多材料零件3D打印精度提升方法

秦敬伟¹,田仕钊¹,郭步超¹,张童²

(1. 华融普瑞(北京)科技有限公司,北京 100096; 2. 山西机电职业技术学院,山西 长治 046000)

摘要:目前3D打印精度提升方法存在打印精度低、打印效果差和校正所需时间长的问题,为此提出一种基于反馈控制的多材料零件3D打印精度提升方法。利用反馈控制算法消除开环操作带来的误差影响,进而控制打印位移平衡,并利用跟踪算法预测出零件的运动轨迹,由此得出零件产品的实际位移误差和旋转角度误差从而进行误差修正,最终对多材料零件进行重构,达到提升多材料零件3D打印精度的目的。实验结果表明:所提方法的打印精度高,打印效果好,校正所需时间短。

关键词:反馈控制;轨迹预测;位移控制;误差校正;3D打印技术

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0140-04

3D Printing Accuracy Improvement Method of Multi-material Parts Based on Feedback Control

QIN Jingwei¹, TIAN Shizhao¹, GUO Buchao¹, ZHANG Tong²

(1. Huarong Purui (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China;

2. Shanxi Vocational and Technical College of Mechatronics, Changzhi 046000, China)

Abstract: To solve the problems of low printing accuracy, poor printing effect and long correction time by present 3D printing accuracy improvement methods, a 3D printing accuracy improvement method of multi-material parts based on feedback control is proposed. By feedback control algorithm, the error influence caused by open-loop operation is eliminated to control the printing displacement balance. Tracking algorithm is applied to predict the motion trajectory of the parts, so as to obtain the actual displacement error and rotation angle error of the parts and correct the error. The multi-material parts are reconstructed to improve the 3D printing accuracy of multi-material parts. The experimental results show that the proposed method has high printing accuracy, good printing effect and short correction time.

Keywords: feedback control; trajectory prediction; displacement control; error correction; 3D printing technology

0 引言

3D打印技术^[1]在各个领域都广泛应用,凭借其自身优势,多数商家均应用此项技术快速且有效地制造相应产品。随着该技术越来越被用户认可,大部分企业拟通过3D打印技术将企业的数字化模型进行转换^[2],可见该技术具有很好的发展前景。不仅如此,3D打印机还具有成本低以及空间占用小的特点。其优点虽多,但精度较低,因此降低了其产品整体的性价比。为突显出3D打印技术的性价比,需进一步提升打印机的打印技术,因此多数研究人员展开3D打印精度提升的研究^[3]。洪海春等^[4]利用建筑成型技术构建模型,定义出3D打印技术中的组装精度以及控制精度的策略,最后得出控制产品的误差方法,根据误差分析出整体产品的校正角度,从而实现3D打印技术精度的提升。BROWN M L等^[5]开发了一种3D打印复杂结构的方法,将结构拆分为带有连接器的部分,

分别打印每个部分,然后在打印后进行结构组装。该方法具有诸如多色打印、框架优化和缩减、打印时间缩减等优点,并可用于绕过打印托盘尺寸限制。以上两种方法没有考虑到多材料零件的运动轨迹会有所不同,导致无法精确提取零件打印误差,同时延长了提取时间,存在打印精度低、打印效果差和校正所需时间长的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出基于反馈控制的多材料零件3D打印精度提升方法。

1 基于反馈控制的位移平衡和位置跟踪

通过研究发现,3D打印精度最主要的影响因素是机器喷口温度以及位移等。现如今3D打印主要利用开环操控方法打印。为降低因开环操控所带来的消极影响,可借用反馈控制算法^[6-7]对多材料零件进行处理。

基金项目:北京市科技计划课题项目(Z191100008019006)

第一作者简介:秦敬伟(1974—),男,江苏睢宁人,高级工程师,博士,研究方向为结构工程、结构动力学。

1.1 3D 打印的位移平衡控制

根据3D打印原理可知,多材料零件的实时位置变化公式为

$$J_{i+1} = N_M b_{i+1} + U_M a_{i+1} + V_M c_{i+1} + U_E (b_{i+1} + c_{i+1} + a_{i+1}) \quad (1)$$

式中: J 代表多材料零件外荷载; M 代表样本数值结构; N 代表零件质量; V 代表零件阻尼; U 代表零件恢复力; E 代表多材料零件样本; a 代表零件位移; c 代表速度; b 代表零件加速度。

多材料零件的速度计算公式为

$$c_{i+1} = -a_i \frac{2}{\Delta t} - c_i + a_{i+1} \frac{2}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 Δt 代表零件积分时间间隔。

加速度的计算公式为

$$b_{i+1} = \frac{4}{\Delta t^2} \left(c_{i+1} - \Delta t c_i - a_i - b_i \frac{\Delta t^2}{4} \right) \quad (3)$$

经不断推导和计算,生成全新的带有混合体系的反馈控制零件运动方程,其表达式为

$$J_{EQ,i+1} = U_M a_{i+1} + L_{PD} a_{i+1} + U_E (b_{i+1} + c_{i+1} + a_{i+1}) \quad (4)$$

其中参数 L_{PD} 的计算表达式为

$$L_{PD} = 4N_M / \Delta t^2 + 2V_M / \Delta t \quad (5)$$

由于反馈控制方法不能直接计算出零件位移,需要在反馈控制混合体系零件运动方程中添加等效外力进行计算^[8],假设该等效外力为 $J_{EQ,i+1}$,其运算表达式为

$$J_{EQ,i+1} = N_M b_{i+1} + J_{i+1} + c_i \left(V_M + \frac{4N_M}{\Delta t} \right) + a_i \left(\frac{2V_M}{\Delta t} + \frac{4N_M}{\Delta t^2} \right) \quad (6)$$

通过在式(4)中添加等效外力后,生成的方程解即为所需要的零件位移结果。

为保证零件位移的精度,在计算出零件位移结果后还需计算出混合体的平衡方程。在计算过程中已知参数 L_{PD} 是固定值,因此可利用 L_{PD} 检验位移结果是否平衡,得出基于位移的混合体系平衡方程表达式为

$$\frac{J_{EQ,i+1}}{L_{PD}} = \frac{U_M a_{i+1}}{L_{PD}} + a_{i+1} + \frac{U_E (b_{i+1} + c_{i+1} + a_{i+1})}{L_{PD}} \quad (7)$$

通过不断地计算和更新,得出满足式(7)的位移结果即为所要控制的位移,以此保证位移平衡。

1.2 零件轨迹跟踪预测

由于我国3D打印技术多利用开环进行控制,在实际操作过程中由于零件之间摩擦等外界因素导致多材料零件运动出现较大误差,最终呈现的打印效果较差,因此须从根源解决问题,消除误差。首先设置零件运动的每一步为一个单位,对其进行检测后确定零件的位移、速度以及位置,从而预测出零件的运动轨迹^[9]。

假设已知零件的理想运动位置,将其与实际零件运动位置进行比较,得出零件的位置偏差方程式,其表达式为

$$\begin{cases} \Delta o(r_x) = o(r_x) - o^*(q_x) \\ \Delta o(r_y) = o(r_y) - o^*(q_y) \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_x 代表零件在 x 方向上的位移; $\Delta o(r_x)$ 代表 x 方向上理想位置与实际位置的偏差; r_y 代表零件在 y 方向上的位移; $\Delta o(r_y)$ 代表 y 方向上理想位置与实际位置的偏差; $o^*(q_x)$ 代表零件在 x 方向上的理想位置; $o^*(q_y)$ 代表零

件在 y 方向上的理想位置; $o(r_x)$ 代表零件在 x 方向上的实际位置; $o(r_y)$ 代表零件在 y 方向上的实际位置。

利用机器原始理想速度以及零件的所有偏差得出零件的下一步期望速度,其计算表达式为

$$\begin{cases} \bar{v}(r_x+1) = \delta(\Delta o(r_x)) + v^*(q_x) \\ \bar{v}(r_y+1) = \delta(\Delta o(r_y)) + v^*(q_y) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\bar{v}(r_x+1)$ 代表零件在 x 方向上的期望速度; $\bar{v}(r_y+1)$ 代表零件在 y 方向上的期望速度; $v^*(q_x)$ 代表零件在 x 方向上的原始理想速度; $v^*(q_y)$ 代表零件在 y 方向上的原始理想速度; δ 代表零件运动速度的变化量。

利用零件期望速度和实际速度得出零件的速度变化率,其运算公式为

$$\begin{cases} \Delta(r_x+1) = \bar{v}(r_x+1) - v(r_x) \\ \Delta(r_y+1) = \bar{v}(r_y+1) - v(r_y) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta(r_x+1)$ 代表零件在 x 方向上的速度变化结果; $\Delta(r_y+1)$ 代表零件在 y 方向上的速度变化结果; $v(r_x)$ 代表零件在 x 方向上的实际速度; $v(r_y)$ 代表零件在 y 方向上的实际速度。

进而可以得出零件在 x 方向上的实际运行速度;当 $|\Delta(r_x+1)| \leq \Delta^*$ 时,速度公式为

$$v(r_x+1) = \bar{v}(r_x+1) \quad (11)$$

当 $|\Delta(r_x+1)| > \Delta^*$ 时,速度公式为

$$v(r_x+1) = \Delta^* \operatorname{sgn}[\Delta(r_x+1)] + v(r_x) \quad (12)$$

同理,零件在 y 方向上的实际运行速度计算公式如下:

$$\begin{cases} v(r_y+1) = \bar{v}(r_y+1), & |\Delta(r_y+1)| \leq \Delta^* \\ v(r_y+1) = v(r_y) + \Delta^* \operatorname{sgn}[\Delta(r_y+1)], & |\Delta(r_y+1)| > \Delta^* \end{cases} \quad (13)$$

式中: Δ^* 代表零件运动的最大变化速率; sgn 代表符号函数。

根据零件的速度可预测出零件的运动轨迹。

2 3D 打印的误差修正

3D打印的精度提升实质上就是对打印误差的校正^[10]。根据3D打印加工原理得出其中加工误差计算公式,其表达式为

$$\Delta_s = \pm (\Delta_j^2 + \Delta_m^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中: Δ_m 代表位移误差极值; Δ_j 代表实际产品的误差极值。

根据分析可知,3D打印结果的误差修正^[11]就是对其结果进行旋转和平移。当结果符合最小二乘原则时,该结果就是最优结果,即计算出理论结果中 x 和 y 方向上的平移向量以及旋转角度的最优值。

假设某点原始坐标为 (x_i, y_i) ,经过修正后的坐标为 (x'_i, y'_i) ,其中 (x'_i, y'_i) 坐标的计算公式为

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cos \gamma - y_i \sin \gamma + l_x \\ y'_i = x_i \sin \gamma + y_i \cos \gamma + l_y \end{cases} \quad (15)$$

式中: γ 代表旋转角度; l_x 代表 x 方向上的平移向量; l_y 代

表 y 方向上的平移向量。

假设修正后的坐标是多条线段的顶点坐标,在最小二乘法的帮助下,通过所有偏差平方以及最小构造进行匹配得出目标函数,其表达式为

$$H = \min \sum_{i=1}^n [(y'_i - y_i)^2 + (x'_i - x_i)^2] \quad (16)$$

式中 H 代表目标函数。

根据不断推导得出角度误差的极值计算公式为

$$\Delta y = -\Delta x \frac{y}{x^2 + y^2} + \Delta y \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (17)$$

式中 Δx 代表 x 轴上的误差; Δy 代表 y 轴上的误差。

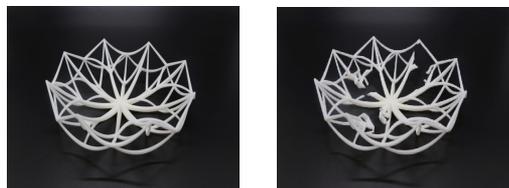
在式(15)的基础上利用平移向量以及旋转角度的最优解得出空间内的坐标,即得到3D打印的整体轮廓^[12],最终对产品的各个曲线进行拟合,确保拟合精度,也保证了各个线段以及曲线的连续性,进而得出精度最高的3D打印结果,以此完成零件3D打印精度的提升。

3 实验结果与分析

为了验证基于反馈控制的多材料零件3D打印精度提升方法的整体有效性,现对所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法进行打印精度、打印效果和校正所需时间的测试。

3.1 实验准备

实验过程中,在VS2013与Open GL函数库编程环境下,通过计算机建模软件建模,再将建成的三维模型“分区”成逐层的截面,即切片,从而指导打印机逐层打印。设计软件和打印机之间协作的标准文件格式是STL文件格式。一个STL文件使用三角面来近似模拟物体的表面。目标打印效果如图1所示。



(a) 理想3D打印结果 (b) 实际3D打印结果

图1 目标3D打印效果图

设图1所示的多材料零件是功能梯度实体,该实体是由多种原材料混合而成,则功能梯度实体零件任意一点材料最多由 n 种材料混合而成。多材料零件所有原材料体积总和为1,原材料总体积用 V 表示,则总的多材料三维零件体积计算方法可由式(18)表示。

$$V = \sum_{i=1}^n m_i = 1 \quad (18)$$

式中 m_i 表示第 i 种原材料的体积比例; n 表示材料种类数。

3.2 3D打印效果图

在上述实验设置的基础上,分别打印所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法修正后的结果,将以上几种结

果进行对比,其结果如图2所示。



(a) 所提方法修正后的3D打印结果 (b) 文献[4]方法修正后的3D打印结果



(c) 文献[5]方法修正后的3D打印结果

图2 3种方法经过修正后的3D打印效果图

根据结果可知,未经过修正的打印结果中出现多处曲线和线段的误差。在修正方法的帮助下,3种打印结果精度均得到提升。经过所提方法修正后的打印效果与理想结果无差异,文献[4]方法得出的打印效果虽强于文献[5]方法,但比所提方法要差,文献[5]方法的修正结果最差。因此证明所提方法的修正效果最好。

3.3 校正精度

打印结果另一个有效的评价指标就是比较各方法间的标准差,标准差越小说明方法的精度越高,即精度提升效果最佳。现保证所提方法、文献[4]方法以及文献[5]方法的实验环境相同,比较3种方法的打印结果标准差,结果如表1所示。

表1 不同方法的标准差 单位:%

实验编号	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
1	1.230	2.365	3.214
2	1.203	2.156	3.652
3	1.100	2.456	3.126
4	0.985	2.365	3.541
5	0.954	1.952	3.265
6	0.865	1.987	3.154
7	1.010	2.458	3.254
8	1.012	2.698	3.852
9	1.063	2.487	3.456
10	0.945	2.852	3.520

根据表1可知,10组实验中标准差最小的均是所提方法,其余两种方法的标准差均大于所提方法。因为所提方法在进行精度提升前利用反馈控制对打印运动位移进行控制,并预测出打印机的运动轨迹,完成位置跟踪,继而提升误差精度,从而加强校正精度,因此保证了所提方法的打印精度,并尽可能地降低标准差。

3.4 校正所需时间

在提升打印精度时,不仅需要保证校正精度,还需要

保证校正效率,即尽可能地缩短校正时间。因此得出另一个验证打印精度提升优劣的指标,即在同一精度要求下,校正所需时间最短的即为最优打印精度提升方法。

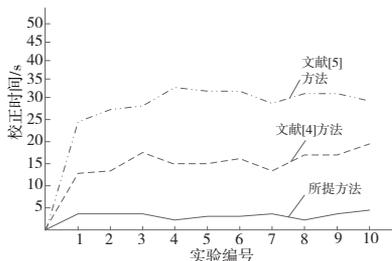


图3 3种方法的误差校正时间

在同一实验环境下,选取10组不同精度要求的实验样本,利用3种方法进行校正,得出校正所需时间最小的即为最优精度提升方法。由图3可知,在每组实验下所需时间最短的校正方法均是所提方法,其余两种方法所需的校正时间均不同程度地高于所提方法,从而得出所提方法的校正效率最高。

3.5 校正结果

现如今的3D打印结果均会存在误差,为加强打印精度,可在实际操作过程中对误差进行校正。但实施过程中会因为各种不确定因素导致不能呈现与理想结果相同的校正效果,因此结果中均会存在较小误差。为得出最接近理想结果的方法,即最优精度提升方法,现在同一环境下利用3种方法对同一产品进行打印,得出实际结果与理想结果之间的误差,误差越小则方法越优。为了使最优方法具有说服力,分别对3种方法的平均误差以及最大误差进行比较,其结果如图4和图5所示。

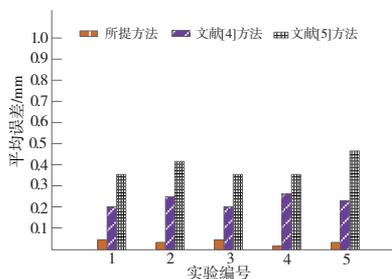


图4 3种方法的实际结果与理想结果的平均误差

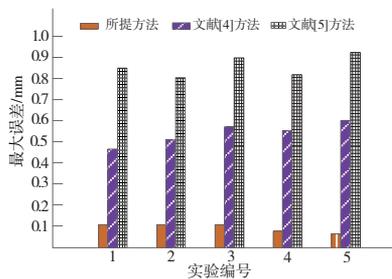


图5 3种方法的实际结果与理想结果的最大误差

分析图4可知,在每组实验中,实际结果与理想结果的平均误差最小的都是所提方法。从图5可知,所提方法最大误差仅仅在0.1mm左右,远远小于其他两种方法的最大误差。

综上所述,所提方法利用反馈控制提升了打印精度,有助于成型精度的提升。

4 结语

由于3D打印技术具有价格低廉、易操作和易推广的优点,因此该技术越来越普及,而如何最大程度地提高产品成型精度,以此彰显产品性价比,是各个商家普遍重视的问题。在所有3D打印机中均具有原理性误差以及加工误差等,经研究发现这种误差是可治理的。本文提出基于反馈控制的多材料零件3D打印精度提升方法。该方法在反馈控制的作用下控制打印位移并预测其运动轨迹,再对打印误差进行校正,实现多材料零件3D打印精度提升,解决了打印精度低、打印效果差和校正所需时间长的的问题,以此提高3D打印成型的几何精度。

参考文献:

- [1] 刘艾青,舒成利,高山行. 3D打印技术的应用对企业创新独占的挑战与对策研究[J]. 软科学,2019,33(4):86-90.
- [2] 张玉芳,关天民,郭侨阁,等. 基于3D打印技术的个性化脊柱侧弯矫形支具数字化设计[J]. 中国组织工程研究,2019,23(36):5824-5829.
- [3] 张敬乙,刘俭涛,高延征,等. 基于泰森多边形图算法生成人工骨小梁的3D打印加工精度及生物力学性能[J]. 中华创伤,2020,36(10):885-891.
- [4] 洪海春,杨文亮,魏宗磊,等. 基于复杂铸件无模复合成形技术高精度铸型组装控制方法研究[J]. 铸造技术,2020,41(10):925-929.
- [5] BROWN M L, HARTLING D, TAILOR H N, et al. Piecewise 3D printing of crystallographic data for post-printing construction[J]. CrystEngComm,2019,21(38):5757-5766.
- [6] 黄辰,曹建农,王时绘,等. 基于协作反馈控制算法的车联网行车安全动态强化模型[J]. 计算机应用,2020,40(4):1209-1214.
- [7] 王涛,王绍宁,王波,等. 基于滑模与状态反馈模糊加权控制的气动伺服焊枪柔性接触研究[J]. 北京理工大学学报,2020,40(4):396-400.
- [8] 王长青,付立春,扎波罗特诺夫·尤里,等. 基于矩阵分解的空间系绳系统不完全反馈控制[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(5):902-911.
- [9] 孙平,孙桐,孙尧. 考虑人机作用力的康复训练机器人各运动轴最优轨迹跟踪预测控制[J]. 北京理工大学学报,2019,39(10):1075-1080.
- [10] 蒋鹏飞,田晓青,姜阳,等. 五轴义齿加工中心位置无关几何误差的辨识与补偿研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(12):1594-1600.
- [11] 丁明,张超,王勃,等. 基于功率波动过程的风电功率短期预测及误差修正[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):2-9.
- [12] 杨鹏. 基于反馈控制的3D打印精度提升技术研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):19-22.

收稿日期:2021-12-24