

多自由度 3D 打印技术研究进展综述

吴陈铭¹⁾ 戴澄恺³⁾ 王昌凌⁴⁾ 刘永进^{1),2)}*

¹⁾(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

²⁾(北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

³⁾(代尔夫特理工大学 设计工程系及机器人研究所, 荷兰代尔夫特 2628CE)

⁴⁾(香港中文大学 机械与自动化工程系, 香港 999077)

摘要 3D 打印技术使用增材制造方式能够作为传统减材制造方式的一个强有力补充, 推动了设计和制造行业的快速发展。近年来, 机器人学的迅速发展打破了传统 3D 打印机的局限性, 使 3D 打印技术能够更灵活地应用在各行各业, 因此该问题成为了机器人学和先进制造学科交叉的一项研究热点。本文以 3D 打印和机器人手臂运动规划的背景和基础出发, 对近年来多自由度机器人 3D 打印研究进展进行了综述, 详细阐述并分析了以下四个方面的研究进展: (1) 无支撑打印、(2) 快速打印和线框打印、(3) 在已有物体上进行修复或者再制造的包裹打印、(4) 为弥补传统 3D 打印方式无法打印大模型的缺陷而提出的、使用机器人手臂打印大体积模型或大尺寸建筑模型研究。本文最后对目前研究中待解决的问题和可能发展的方向进行了讨论。

关键词 3D 打印; 机器人打印; 增材制造; 多自由度打印; 场打印

中图法分类号 TP18

Recent Progress on Multi-DOFs 3D Printing: A Survey

WU Chen-Ming¹⁾ DAI Cheng-Kai³⁾ Charlie C.L. Wang⁴⁾ LIU Yong-Jin^{1),2)}

¹⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾(Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084)

³⁾(Department of Design Engineering & Delft Robotics Institute, Delft University of Technology, Delft 2628CE, The Netherlands)

⁴⁾(Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077)

Abstract Additive Manufacturing (AM, namely 3D printing) technology enables people to customize and fabricate physical models easily. This technique has been proved to be an essential supplement that can overcome many disadvantages of traditional manufacturing and significantly promote the developments of design and manufacturing in a variety of industries. Although it claims the ability to fabricate highly complex objects such as models with a high-genus number, the tool-paths used in conventional AM are still in a 2.5D manner – that is, materials are accumulated on the top of previously printed planar layers. A multilayer composite gives the result of a physically printed model. This reduction produces many problems that should be considered in the processes of designing and slicing, for instance, overhanging regions and the significant structural anisotropy. Obviously, it

本课题得到国家自然科学基金 (No. 61725204, 61432003) 资助。吴陈铭, 男, 1994年生, 博士研究生, 中国计算机学会学生会员, 主要研究领域为计算机图形学、机器人学。E-mail: wcm15@mails.tsinghua.edu.cn。戴澄恺, 男, 1991年生, 博士研究生, 主要研究领域为计算机图形学、机器人学。E-mail: c.dai@tudelft.nl。王昌凌, 男, 1975年生, 博士, 教授, 主要研究领域为几何计算、计算设计、先进制造和机器人学。E-mail: cwang@mae.cuhk.edu.hk。刘永进 (通信作者), 男, 1977年生, 博士, 教授, 中国计算机学会高级会员, 主要研究领域为计算几何、计算机图形学、计算机辅助设计和模式分析。E-mail: liuyongjin@tsinghua.edu.cn。

is not easy for novice users to take care of all these problems in the absence of expert knowledge. To ensure the success of printing, researchers have contributed their efforts to the development of pre-processing software. However, many parameters are closely connected to 3D printers, and these parameters need to be determined by tedious trial-and-errors. Due to this reason, how to integrate advanced robots with more degrees-of-freedom (DOF) into 3D printing becomes a popular topic as an interdisciplinary research area of robotics and advanced manufacturing. As a highly interdisciplinary research area, robotics is gradually reshaping the paradigm of traditional AM. In the past few years, the prompt developments on fabricating processes and computational techniques have expanded the capability of AM in many aspects. The future of AM lies in robotics, which will provide more flexible motions of material accumulation, integrate human-involved interactions into the process of fabrication, and also make large-scale fabrication possible. A variety of recent works has already made progress towards these goals by designing intelligent robotic devices and algorithms. In this survey, we provide an overview of the recent progress on multi-DOFs AM. We firstly introduce the working principles of traditional AM and multi-DOFs AM. We also compare these two techniques from the perspectives of printing trajectories, difficulty, flexibility, stair-effect, and support structures. Then we elaborate the recently published works regarding multi-DOFs 3D printing from the aspects of mechanical designs, principles and distinct advantages comparing to traditional AM technologies. Specifically, these works are classified into four categories including 1) support-free printing for eliminating additional support structures near the overhanging regions of slices, 2) fast and wireframe printing for rapid prototyping and efficient design iterations, 3) building-around-inserts that can repair or modify existing objects, 4) fabrication methods for large-scale objects to solve the scalability problem and robot-assisted AM in architecture to overcome the problems in contemporary construction (i.e., slow, labor-intensive, dangerous and expensive). This survey also analyzes the disadvantages of current multi-DOFs printing in robot calibrations, motion planning, and the design of working spaces. Finally, several challenging research problems for multi-DOFs printing are given, with discussions on potential future works.

Key words Robotic Printing; 3D Printing; Additive Manufacturing; Multi-DOFs Printing; Field Printing

1 引言

在工业制造领域,制造方式可以分为基于增材、基于减材和基于形变三大类^[1]。3D打印本质是增材制造(Additive Manufacturing, AM),在一些应用场合中也被称作层式制造(Layered Manufacturing, LM)或快速成型(Rapid Prototyping, RP)技术。它通过液体、粉末、塑料等材料逐层累积构造三维模型。3D打印技术的前身可以追溯到上个世纪50年代的照片字形记录技术(Photo-Glyph Recording),该技术通过选择性曝光透明照片药剂生成新的涂层来替换物体的截面层^[2]。最早的3D打印技术由Hideo Kodama提出^[3],从20世纪80年代开始发展至今已经逐渐成熟,打印质量越来越高,设备成本越来越低,成型速度也越来越快。

3D打印的设计过程是首先通过计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机动画

(Computer Animation, CA)软件或三维扫描仪(3D Scanner)建模,再将建模得到的三维数据“分区”成逐层的截面,从而指导打印机逐层打印。打印机通过读取输入文件的横截面信息,用液体状、粉末状或者片状的材料将这些截面逐层地打印出来,3D打印技术能够制造出传统制造方式无法制造的复杂模型^[4]。3D打印具有制造速度快、消耗材料少、制造精度高等特点。对比材料减少式制造技术,3D打印技术能够将制造时间从数天缩短到数小时,并且更擅长精细、复杂的结构。随着3D打印技术的飞速发展与逐步成熟,打印成本已经降到了更低的水平,3D打印机的使用方式也更加简单。在珠宝,鞋类,工业设计,建筑,工程和施工,汽车,航空航天,牙科和医疗产业,教育,地理信息系统,土木工程等领域3D打印都得到了广泛应用。

目前主流的3D打印技术有立体平版印刷技术(Stereo-lithography, SLA)、数字光处理(Digital Light Processing, DLP)、熔融沉积成型技术(Fused

Deposition Modeling, FDM)、选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)。

SLA 技术是最早出现的且应用最广泛的快速成型技术。该方法通过在树脂槽中盛满液态光敏树脂,采用特定波长与强度的激光束或紫外光点快速固化,其成型顺序为点、线、面。其优点为精度高,可以准确地表现平滑的效果。SLA 的缺点主要有:其受成型材料限制,可以使用的材料很少,成型实物强度不够,一般需要在紫外光条件下二次固化。不能多色成型,原材料很贵;DLP 技术与 SLA 技术均是使用特定波长的紫外光对光敏树脂进行固化,唯一的区别在于 DLP 技术使用的是面光源而 SLA 技术使用的是点光源。

FDM 技术通过将丝状、热塑性材料的熔丝从加热的喷头挤出,按照零件的每一层预定轨迹将材料有选择地涂在工作平台上,以固定的速率进行熔融沉积。通过快速冷却形成一层一层的截面。当一层完成后,工作平台下降一个高度或者喷头平台上升一个高度,再成型下一层,直到整个模型成型完毕。其材料可以为热塑性塑料、共晶系统金属、可食用材料。该方法优点为成型精度高、成型实物强度更高、可以彩色成型。该方法最明显的缺点为半熔融状态下的塑料限制了表面精度,其精度不及立体平版印刷技术,与选择性激光烧结精度类似。通常在工业或者商业场合,会通过二次涂蜡等方式对模型进行抛光处理,提升模型的特征细节和纹路。

SLS 技术采用红外激光器作为能源,使用的造型材料多为粉末材料。在加工时,首先将粉末预热到稍低于其熔点的温度,然后在刮平棍子的作用下将粉末铺平,通过计算机控制激光束根据分层截面信息进行有选择性的烧结,一层完成之后再下一层的烧结,全部烧结完成后去掉多余的粉末就可以获得烧结完成的零件。该方法的优点为成型实物比 SLA 方法的成型实物结构强度要高很多,通常可以用来制作结构功能件;其加工的原材料多种多样且性能接近工程塑料材料。而其缺点也比较明显:粉末状物体会造成空气污染,影响操作人员的身体健康,其设备费与加工成本较高。

以上所述的传统 3D 打印模式得到了广泛应用,学术界基于此技术也展开了大量的数字几何处理研究^[4],但仍然存在一些与自由度受限有关的较大瓶颈。近年来,机器人学科的迅速发展为 3D 打印带来了新的机遇和挑战。本文首先在第二节中介绍多自由度 3D 打印所能带来比传统打印更多的好

处。第三节中概述了多自由度打印中的机器人学问题。接着在第四节中详细阐述多自由度机器人 3D 打印的研究进展,包括无支撑打印、快速线框打印、包裹打印、大尺寸打印等,最后本文在第五节总结了目前多自由度机器人 3D 打印存在的问题和挑战,并在第六节对未来可能存在的研究内容和发展方向进行了概括。

2 多自由度 3D 打印的优势

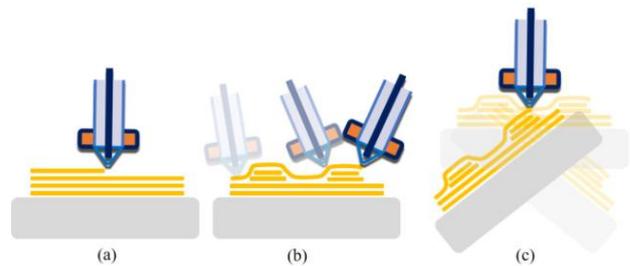


图1 (a)传统的层式 2.5D 打印方式;(b)打印材料挤出机构具有多运动自由度的 3D 打印方式;(c)打印工件具有多运动自由度的 3D 打印方式。

传统 3D 打印模式经过长期发展已经非常成熟,该模式具有设计简单、路径规划容易等优势。目前主流的 3D 打印机按照机构设计可以分为笛卡尔(Cartesian)型和德尔塔(Delta)型两类打印机。笛卡尔型打印机(如 Replicator™等)使用 X、Y 轴平台机构,通过步进电机和传送带在笛卡尔坐标系进行精确定位和打印。德尔塔型打印机(如 DeltaMaker™等)使用了速度更快的德尔塔机器人联动杆进行定位和打印。这两种构型均提供三个自由度(X 轴、Y 轴、Z 轴),但在实际使用过程中,已有绝大多数 3D 打印机都是沿着固定 Z 轴逐层积累构造实体,从本质上来说这种打印方式应该称为“2.5D 打印”更为合适。

表1 传统 3D 打印与多自由度 3D 打印对比

	传统 3D 打印	多自由度 3D 打印
打印轨迹	水平线段	空间线段或曲线
标定难度	易	难
打印灵活性	低	高
阶梯效应	差	较好
支撑材料	较多	较少或无支撑

随着机器人学科近年来的迅速发展,近年来多自由度 3D 打印新模式得到了工业界和学术界的广泛关注。其中研究主要分为两类:一类是针对“2.5D 打印”未充分利用现有打印机三个自由度问题进行

研究,另一类则是研究拥有更多自由度(大于三自由度)的机器人3D打印。因此,本文所描述的“多自由度”3D打印指的是与传统“2.5D”打印方式不同的增材制造技术,图1举出了两种常见的多自由度3D打印的例子。

多自由度的打印模式允许更灵活的打印轨迹设计和更丰富的机构设计。举例来说,打印轨迹可以是空间中的任意无干涉路径,而传统3D打印的是在打印方向的切平面内规划轨迹且要求轨迹不可逆;在打印系统上能够安装具有特定功能的装置,如电路布线装置、减材制造装置、视觉反馈装置等。因此,传统3D打印中的一些问题和挑战,如支撑材料过多、可打印模型较小、打印模式单一和交互性差等问题能够通过多自由度3D打印模式解决,表1提供了传统3D打印与多自由度3D打印在部分指标上的对比。

3 多自由度打印中的机器人学问题

对于一个用户给定的三维数字化模型(通常以STL格式文件表示),3D打印系统首先需要对模型进行分析,生成一个满足打印系统要求的最优打印路径(比如无干涉、无奇异解等)。传统基于平面层的3D打印系统通过限定系统在Z轴方向的单调运动(即只能沿着一个方向递增)回避了打印系统与模型的干涉问题。一旦我们充分利用打印系统的三个自由度,甚至扩展到更多自由度时,系统运动复杂度的提升就会引出许多与机器人学相关的问题和挑战,例如如何将给定笛卡尔坐标系的坐标转化为多自由度机器人构型空间的坐标值,该问题属于逆运动学求解的范畴;如何将三维空间直线甚至曲线轨迹生成得到一个满足干涉约束条件的机器人构型空间运动轨迹,该问题属于运动规划的范畴。虽然逆运动学求解、运动规划等问题一直是机器人学领域得到研究人员广泛关注和研究的重点问题,经过几十年的发展已经呈现出大量研究成果。但对于多自由度3D打印领域而言,依旧存在许多值得探讨和优化的空间。

3.1 逆运动学求解

在机器人学中,对于一个构型确定的机器人,逆运动学(Inverse Kinematic, IK)指的是给定机器人末端的位置和姿态,反求出机器人各关节的位置或者角度。笛卡尔型3D打印机构一般由并联的三个电机组成,运动链方程可以简化为简单的一一对应

关系。德尔塔构型的打印机则略微复杂一些,需要分别求解三个直角三角形方程。对于更为复杂的多自由度机器人3D打印系统,其往往由具有多自由度的串联机构组成,比如具有多自由度的机械臂,通常需要使用D-H(Denavit-Hartenberg)模型^[5]对机器人机构进行建模,得到齐次变换矩阵 \mathbf{T} ,再求解复杂的非线性运动链方程。高效的逆运动学求解在机器人学中是一个比较成熟的问题^[6],主要有解析法和数值法两类解法。

解析法首先通过D-H模型确立连杆之间的变换矩阵 \mathbf{T}_{i-1}^i ,确定整个机器人末端与基座的齐次变换矩阵 \mathbf{T}_N^0 (其中 N 为连杆的数量),建立特征约束方程组,再通过几何法、代数法、矩阵法、四元数法等多种方法进行消元求解得到由末端参数表达的各关节角度值的表达式^[7]。数值法一般基于计算当前运动链下构型 \mathbf{q} 的雅克比矩阵 \mathbf{J}_q ,一旦系统D-H参数确定后,很容易得到机器人雅克比矩阵。基于雅可比矩阵的方法对连杆平移和关节角度的瞬时系统变化相对于末端的运动进行线性建模。运用伪逆计算求解得到的雅克比矩阵 \mathbf{J}_+ ,可将工作空间中笛卡尔坐标系下的微分 $\partial\mathbf{x}$ 映射到机器人关节空间 $\partial\mathbf{q}$,从而进行逆运动求解^[7]。在求解过程中,会将一个初始猜测不断进行迭代最终收敛到一定的误差范围内来得到最终需要的结果,基于雅克比矩阵的方法包括雅克比转置法、阻尼最小二乘法(DLS)、基于奇异值分解的阻尼最小二乘法(SVD-DLS)、选择性阻尼最小二乘法等^[8-13]。

解析法相较于数值法具有计算可靠、能够获得所有解的优势,其缺点在于需要处理的方程组为复杂的非线性方程组,需要花费大量时间用于求解方程组,且机器人是否存在解析解的要求严格。一般工业机器人在设计和制造时会考虑逆运动学求解的问题,例如常用的六自由度机械臂通常将前三轴设计交于一点,相当于给复杂的方程增加了限制,降低了求解的复杂度,这类机器人的逆运动学解能够在常数时间内得到。数值法的解法较为灵活、通用,雅克比矩阵可以通过解析法或者有限差分法求得,但数值法需要的运算量更大,不适合实时性要求较高的场合,且数值解依赖于给定猜测值,只能输出一个解。因此,在工业制造场合(如本文所述多自由度机器人3D打印),人们更倾向于使用解析法对逆运动学进行求解。

3.2 运动规划

在根据给定的三维数字模型计算出打印路径

后, 如何使用计算机高效地规划出多自由度机器人无干涉(Collision-free)的路径并且以平滑的运动遍历打印路径、从而完成 3D 打印的过程, 可以归纳为机器人学中的运动规划(Motion Planning)问题。避免干涉的约束决定了一个三维模型的可加工性, 而运动平滑的约束则对应高质量的打印模型表面, 因此, 优化的运动规划方法对于多自由度 3D 打印而言至关重要。现代机器人学中的运动规划方法可以分为以下两类: 基于采样的路径规划以及基于优化方法的路径规划。

为了适用于高自由度的机器人(例如多自由度机器人手臂), 现代路径规划的一个重要发展是提出基于采样的路径规划算法, 具体包括概率路径图法(Probabilistic Road Map, PRM)和快速扩展随机树法(Rapidly-Exploring Random Trees, RRT)。PRM 依赖于用逆运动学求解以及干涉检测采样出目标轨迹中可行的候选方案, 以此来建立路径图, 并使用路径图搜索出满足目标轨迹的最终机器人路径^[14]。RRT 基于 Voronoi 特性从起始点开始在空间中进行扩展, 逐步向外拓展一个树结构^[15]。基于采样的路径规划大大减少了计算复杂度与计算时间。然而相对于早期的完备算法, 基于采样的路径规划算法是概率完备的, 意味着规划算法返回失败的时候, 只能说明会有大概率没有可行路径存在, 而无法保证一定没有可行路径存在。基于 RRT 和 PRM 改进的运动规划算法包括: 适用于“狭窄通道的”PRM 改进算法^[16], 减少采样过程中干涉预处理进行加速的 LazyPRM 算法^[17], 基于采样的路径图树 SRT 算法^[18], 自适应控制 Voronoi 节点的动态域 RRT(Dynamic-Domain RRT)算法^[19], 使用工作空间信息引导树扩展的算法^[20, 21], 根据不同区域的局部特性自适应选择采样策略的 RESAMPL 算法^[22], 基于中轴(medial axis)的 MARRT 算法^[23]等。

现代路径规划的另一个重要发展是提出基于优化的路径规划算法。相对于基于采样的路径规划的目标是找出可行的机器人路径, 优化算法可对给定的目标属性(例如时间, 平顺度)进行优化, 从而达到提高轨迹质量的目的。优化算法一般都是直接对轨迹空间进行非凸优化, 仅通过等式约束来确保起止点的姿态, 并构造不同的目标函数来进行不同目标属性的优化。基于优化的运动规划算法包括 CHOMP^[24]、Trajopt^[25]、ITOMP^[26]等。因为基于优化的轨迹规划通常都是求解非凸问题, 所以会遇到非凸优化的局部最优解问题。运动规划问题还有许

多其它研究成果, 读者可以通过阅读相关综述^[27]进一步了解。

当面临大规模增材制造需求时, 通常人们需要使用自由度更高的机器人以完成制造工作(如轮式移动机器人等)。此类机器人打印系统大多为非完整约束系统(non-holonomic constraints system), 系统的约束方程中带有微分但不可积项。根据 Brockett 必要性原理, 非完整约束系统不能通过连续时不变状态反馈控制器实现任意精度的无误差控制^[28]。因此, 相较于完整系统, 非完整系统运动规划更为复杂。大规模增材制造任务中的运动规划大多可以描述为移动机器人的效应器沿着给定路径的运动规划, 属于在广义坐标(generalized coordinates)空间规划操作空间(operational space)给定轨迹的问题。针对此问题的运动规划包括有自然切分操作器坐标系和移动平台坐标系的 MPEP 算法^[29], 根据路径速度分解方法在约束条件下实时规划的算法^[30], 基于求解带约束连续线性二次最优控制问题的优化控制方法^[31]等。目前, 该问题仍是机器人学研究中一个具有挑战性的研究问题。

3.3 无干涉加工路径规划

运动规划作为机器人学的一项重要的重要内容, 主要是用来寻找给定的一组初始状态和终点状态的无干涉运动。初始状态和终点状态通常是外界到运动规划器的输入。显然, 初始状态 A 和终点状态 B 必须要保证自身是无干涉的, 否则无论运动规划器如何规划, 也无法得到状态 A 到状态 B 这个闭合区间的无干涉运动路径。就本文所述 3D 打印加工而言, 通常需要规划多自由度机器人的笛卡尔路径, 即不仅要指定状态 A 和状态 B 本身, 还需要保证 A 到 B 之间的所有中间状态满足一定加工要求。因此, 多自由度机器人 3D 打印的研究重点在于如何生成充分发挥多自由度机器人提供的额外自由度优势的无干涉路径。

对于一个为发挥多自由度优势而设计的加工路径, 判断其是否自身干涉的直接方法是对这个路径包含的所有状态一一进行干涉检测, 比如使用在机器人领域广泛应用的 Flexible Collision Library (FCL)干涉检测库^[32], 但这种试错搜索并不高效, 通常需要进行不断地试错, 而搜索空间往往很大, 所以试错搜索只能应用在规模很小的场景上。因此, 多自由度机器人 3D 打印的研究中往往将运动干涉约束集成到相应算法中考虑, 如设计并使用无干涉的基础打印形状^[33, 34]、构造干涉依赖图^[35-37]、

简化干涉条件并设计评估函数约束^[38, 39]、基于凸包

的无干涉生成^[40]等方法。

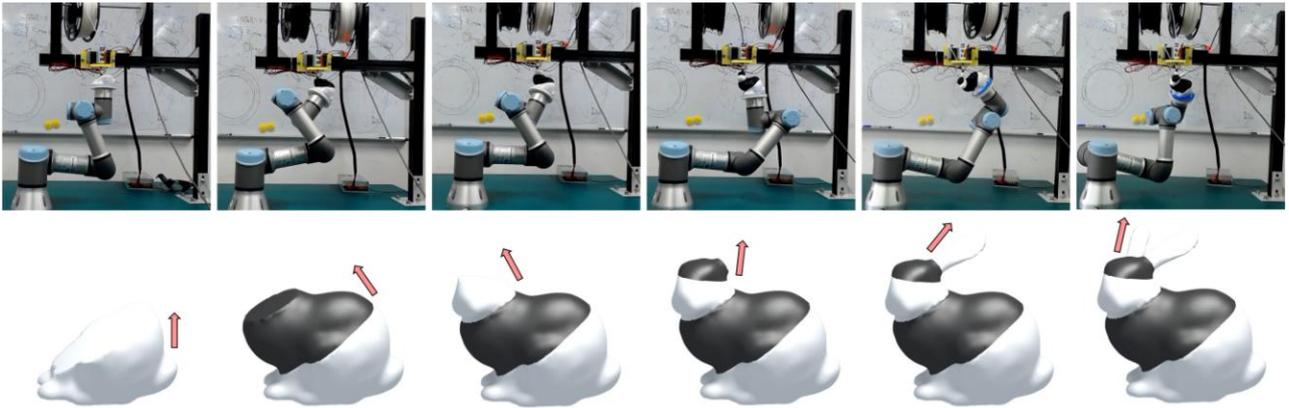


图2 使用六自由度机器人手臂沿着空间平面层打印无支撑兔子模型^[39]

4 多自由度机器人 3D 打印

多自由度机器人 3D 打印指的是使用大于等于三个自由度的机器人进行 3D 打印。近年来随着 3D 打印的迅速发展,传统基于层式的 3D 打印已经不能满足人们的需求,越来越多的研究者将注意力集中在尝试更加自由的 3D 打印方式、从而进一步解决许多传统 3D 打印无法解决的问题上。打印过程中材料堆积的方向直接决定了表面精细程度、应力分布、是否需要支撑材料以及相关的材料物理属性,这些参数的优化与如何进行多方向打印直接相关,因此也引出了如无支撑打印、快速线框打印、包裹打印以及大规模打印等一系列研究内容。

4.1 无支撑打印

大部分 3D 打印中都会打印额外的支撑结构以避免悬空打印,例如,熔融沉积式 3D 打印通过挤出机挤出熔融打印材料(通常为 ABS、PLA 材料)层式制造模型,在制造过程中如果当前层有悬空部分,且悬空位置挤出的材料不能粘附在正确的位置,就会造成打印失败。对于复杂模型通常需要打印大量支撑,打印支撑材料不仅需要大量时间,浪费相当体积的材料,还会在剥离的过程中破坏物体表面的细节。然而,支撑材料并非是一定需要的,由于其主要功能为抵消重力对悬空材料的影响,通过多自由度 3D 打印技术在打印过程中改变打印方向能够实现部分模型的无支撑打印。

4.1.1 充分利用三自由度的打印

在打印的过程中改变打印方向这个概念最早是由 Chakraborty 等人提出,作者基于充分利用打印机现有三个自由度的理念提出曲面层熔融沉积(Curved Layer Fused Deposition Modeling, CLFDM)

打印的方法^[33],该方法通过动态改变各层内的 Z 值脱离传统 FDM 制造标准。Allen 等人在三自由度的笛卡尔打印机和 Delta 打印机上实现了该打印方法,Delta 打印机的结果表明该方法能够提升打印模型的表面精细程度,而笛卡尔打印机的结果表明该方法能够显著提升打印速度、降低打印耗时^[41]。Thomas 等人使用在 Delta 打印机上在支架模型顶部使用曲面层熔融沉积曲面来制造壳模型,支架模型的打印路径使用传统的层式切片方法进行规划。作者分别在汽车模型上打印曲面引擎盖、在鞋垫模型上打印曲面表面以及在抛物线圆盘模型

打印最上层表面进行实验验证,实验结果表明通过该方法打印的模型相比于传统层式打印的模型阶梯效应明显减少^[42]。为了避免干涉,此类方法仅能处理能够表示为高度场的曲面,具有一定的局限性。最近 Ezair 等人提出可以根据模型的几何形状生成更加符合其几何结构特点的空间曲线轨迹^[43],该算法的本质是生成覆盖几何实体的曲线完全覆盖,同时算法需要能够满足 3D 打印过程中的约束,如喷头与已有模型的干涉等问题等。该算法能够处理基于三元体(trivariate volumes)表示和基于任意边界表示(B-rep)的任意几何模型的曲线打印路径覆盖问题,并且算法在传统三自由度笛卡尔 3D 打印机上得到了验证。根据模型几何特征进行切片是一种更加自然的切片方式,使用某个方向生成符合模型几何特征的打印路径进行打印,不仅能够提升打印模型的结构强度,降低或者消除支撑材料,还可以提升打印细节的质量。

4.1.2 基于体分割的无支撑打印

Wu 等人提出了 RoboFDM 打印系统以实现无支撑熔融沉积式 3D 打印^[39]。该系统的硬件部分由一台六自由度 UR 机器人手臂和固定在悬臂梁的挤

出机构成，机器人手臂的末端安装水平的打印平台

供挤出的材料粘附，挤出机与机器人手臂的相对位



图3 使用六自由度机器人手臂沿着空间曲面层打印无支撑兔子模型^[44]

置通过在欧氏空间采样机器人手臂有效工作范围来确定，如图2所示。在算法部分，作者提出了由粗到细的二阶段分割及相应的规划算法，从而实现无支撑打印。该算法首先通过提取3D模型的骨架对其进行粗分割，将复杂的三维模型用平面分割成几何结构简单、具有可行打印顺序的子模型集合，再使用含约束的细分割方法对子模型集合中所有不满足无支撑打印条件的模型进行平面分割，最终生成可行的无支撑打印顺序用以打印。使用六自由度机器人手臂进行无支撑打印的方法大幅减少了材料浪费，提升了打印质量，加快了打印过程和后处理的速度。Wu等人通过在笛卡尔打印机上增加两个自由度和视觉反馈监控功能，实现了打印质量更优的基于体分割的无支撑打印^[44]。基于体分割的无支撑打印本质上是将原始模型的打印离散为多个方向打印的组合，在每一段打印过程中仍要遵循传统层式3D打印的要求，因此传统层式3D打印中对打印质量起到至关重要的调平任务需要在不同的分段中协调控制。对每个分段进行使用传统层式3D打印常用的人工调平显然会大大降低多自由度机器人打印的优势。为了解决此问题，该工作在多自由度机器人打印中对机器人进行了预先标定，并在预先标定的过程中对初始模型进行调平，通过误差补偿计算之后每一个打印块的调平距离，从而避免在每个阶段都进行人工调平。

4.1.3 基于层分割的无支撑打印

对于六自由度机器人手臂而言，打印空间曲线轨迹打印显然更能充分利用机器人所提供的更多自由度。Dai等人近期提出了基于曲线轨迹的多自由度机器人手臂无支撑打印系统^[40]，该系统提出了对一般模型生成无支撑切片并进一步生成供机器

人手臂打印的路径算法。对于输入三维模型，系统首先将其分解成一系列有顺序、可制造的曲面层，这些曲面层均需要满足无干涉和自支撑约束条件。由于在空间中搜索一系列满足约束的曲面层切片是一个连续搜索问题，利用现有搜索技术难以高效求解，因此作者通过对输入三维模型进行体素化，将打印空间轨迹近似为打印一系列体素块，同时将曲面层需要满足的约束对应转化为体素需要满足的约束，使三维空间中的连续搜索问题离散化。作者通过在体素空间中定义“打印稳定邻域”(AM-stable-neighbors, ASN)对无支撑约束进行建模，通过计算已打印模型和工作平台的并集的凸包对无干涉约束进行建模。作者提出了基于贪心策略的搜索算法，并在此基础上增加了阴影体素和逆剥离启发策略，大幅提升了算法搜索结果的质量。完成搜索后，作者使用对偶轮廓化方法将体素层转化为曲面层，最终在每个曲面层上生成连续费马螺旋轨迹供机器人手臂打印，如图3所示。

使用多自由度机器人进行无支撑打印充分利用了“冗余”自由度来抵消重力作用下的悬空。其最大的挑战在于如何将无支撑约束与无干涉约束结合起来，这两个约束均与输入模型的几何结构密切相关，因此通过几何算法解决该类问题是目前研究的主流思路。由于无支撑约束是一个强约束条件，处理某些复杂模型时会出现找不到解的情况，因此无支撑算法的适用范围具有一定的局限性，针对该问题，可以考虑松弛无支撑约束条件^[45]，在完全无支撑解难以找到的情况下尽量减少支撑材料可能能够提升多自由度无支撑打印算法的适用范围。我们还注意到近年来通过几何方法生成3D打印内部无支撑填充取得了大量进展^[46-48]，结合使

用多自由度打印技术带来的附加自由度可能能够进一步降低内部无支撑填充材料的体积。

4.2 快速打印与线框打印

随着生产力的迅速发展,制造速度已经成为衡量制造水平的一项重要指标。在同等条件下,3D打印技术所需的制造时间明显少于其它主流的制造技术,但基于目前的打印技术打印一个桌面级尺寸的3D模型仍需要花费较多时间(如使用FDM打印机打印一个 $40\times 30\times 80\text{cm}$ 的模型需要花费约十个小时)。针对此问题研究者开展了大量的研究,如在干涉约束下允许3D打印机在打印方向上进行自由运动,充分利用三个自由度进行路径规划,大幅提升打印速度。在需要快速设计迭代的领域,通过打印实体模型的线框预览模型能够大幅加快从数字设计到实物的速度,针对于打印线框这类特殊模型的多自由度打印系统也得到研究者的广泛关注。

4.2.1 快速打印

3D打印中实际打印过程花费的时间远远超过设计模型和规划路径所需要的时间,因此加快3D打印的打印速度显得尤为重要。如前文所述,目前3D打印技术通常为层式制造,即通过一层一层的制造方式自下而上或自上而下地制造实体模型,这种制造方式在层堆积的方向下是不可逆的。这类路径规划方法无法充分利用3D打印机的三个自由度,因此也被人们称为“2.5D打印”。虽然这种打印方式能够保证打印系统在开环控制下的稳定性,且路径规划很直观、简单,避免了打印机和已打印模型的干涉问题。但这种打印方式会生成许多冗余轨迹,冗余轨迹通常被称作旅行轨迹(travelling trajectory),指的是打印机从一个打印路径行走到另一个打印路径的过程中的轨迹,过多的冗余轨迹将会大幅降低整个实体模型的打印速度。

Samuel等人提出了有别于传统3D打印路径规划的路径规划方法,该方法核心思想是当模型特征在空间中相互之间的距离较远时,允许打印机在Z方向上进行运动和打印^[35,36]。允许Z方向运动的路径规划需要保证当前时刻打印机的运动轨迹与已打印模型是无干涉的,否则打印机将会损坏已打印的部分而造成打印失败。因此,作者提出了基于依赖图(dependency graph)的搜索算法,它在无干涉的前提下最小化旅行轨迹,进一步生成一个充分利用3D打印机三个自由度的打印和运动路径。作者在他们提出的基于贪心算法的基础上,提出了基于

局部搜索的路径规划算法,该方法首先提取模型上的轮廓,同时在这些轮廓上定义其开、闭属性用以描述打印机在此轮廓上运动的起点、终点是否一致。由于这些轮廓打印的先后顺序对能否无干涉的打印是互相影响的,且打印机从开轮廓的起点运动到终点后是不允许逆向返回起点的,因此作者通过在轮廓生成的依赖图上应用局部搜索算法,从而高效生成一个较优的无干涉路径。

通过允许3D打印喷头的运动在Z方向可逆能够在一定程度上减少了旅行轨迹的比例,加快了打印速度。此类方法与传统3D打印的平面切片的本质区别在于切片平面不再是完全平面(complete plane),而是改为使用部分平面(partial plane)。由于3D打印喷头自身尺寸相对于打印模型无法忽略不计,因此避免打印过程中出现3D打印喷头与已打印模型之间的干涉导致部分旅行轨迹无法通过Z方向可逆的方法减少。

4.2.2 线框打印

在需要快速迭代的设计领域中,目前3D打印技术的制造速度仍不能使设计者满意。因此,Muller等人提出通过打印低分辨率的线框模型解决该问题,该系统不再限制打印路径沿着Z方向不可逆的特性,而是可以直接在三维空间中进行打印,改变了传统3D打印的层式打印方式^[34]。

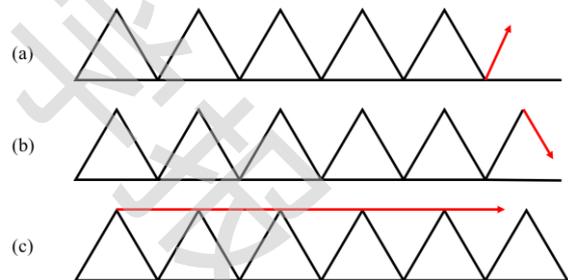


图4 Delta打印机在空间中沿着Z方向上下运动的路径^[34]

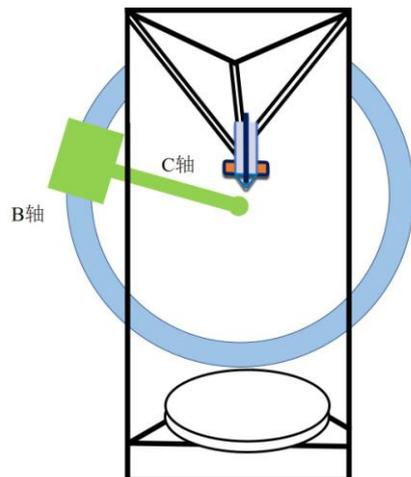


图 5 在传统德尔塔 3D 打印机上增加了两个旋转自由

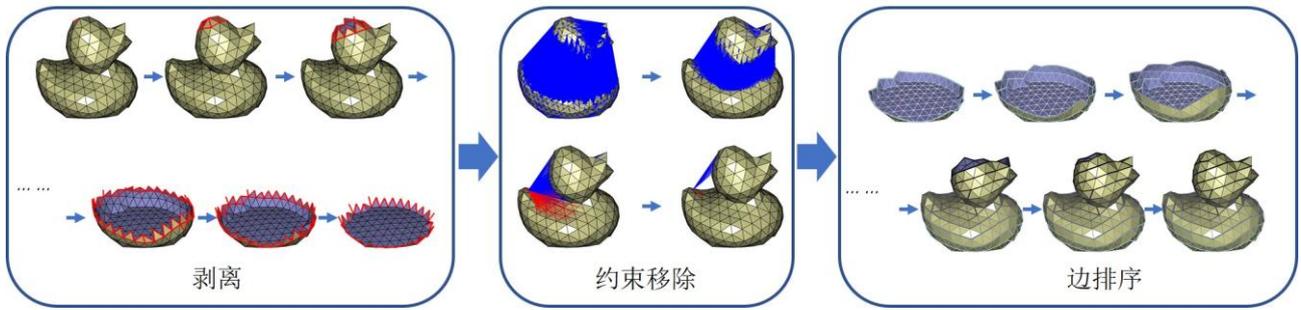
度的五自由度在线打印装置^[49]

图 6 任意线框模型打印算法的示意图。首先模型经过“剥离”算法递归地剥离可以无干涉打印的边，随后移除尽可能多的顺序限制，最后通过边调度算法来生成最终打印的边的顺序（即给多自由度机器人打印路径）^[37]

由于 3D 打印机中的经典机型德尔塔打印机允许打印头能够以非常快的速度在 X 、 Y 、 Z 方向进行运动，线框打印系统基于德尔塔 FDM 3D 打印机的硬件机构，加入水冷降温装置用以快速冷却打印线框模型。由于线框打印仍是三自由度打印机构，为了避免干涉问题，其采用水平切割的方法生成打印路径：首先以一定间隙水平切割 3D 模型，提取每一层的轮廓，紧接着通过 Z 字型(zigzag)的形式填充每两层之间的间隙以避免悬空打印（如图 4 示）。为了避免干涉，在路径规划中既不允许打印头访问已打印的部分，也不允许线框的拉线幅度超过一定阈值。与传统 3D 打印模型相比，3D 线框网格模型的制造速度显然更快，且内部结构能够通过线框展现出来，通过调整线框上线的分布能够很好地展现模型的一些几何特征，如曲率特征。该方法与传统 3D 打印方式相比最多能够加快 10 倍打印速度（速度提升与 3D 模型的几何结构有关，通常为 2.5-10 倍）。

3D 打印整个过程包括前处理、打印和后处理，其中前处理指的是 3D 模型的建模和打印路径规划。近年来，交互式制造领域发展迅猛，越来越多的交互式设计系统被提出供设计师或普通用户使用。这些设计系统能够提供及时有效的反馈结果，帮助用户改进设计，但往往打印过程需要花费大量时间，使设计过程与制造过程不能紧凑衔接起来，因此对于交互制造领域而言，加快打印速度非常重要。Peng 等人受 *wireprint* 的启发，提出了线框打印的快速版在线(*on-the-fly*)打印^[49]。该系统的打印喷头处包含一台水喷雾冷却装置，加快了挤出材料固化的进程。作者指出线框打印的最小单元大小可以通过多角度打印增大，为使系统能够在多个自由的角度对模型进行增量化打印，作者在传统德尔塔 3D 打印机的基础上增加了二个自由度的旋转平台

（如图 5 所示），使得打印系统的自由度由三自由度增加到了五自由度。因此在线打印系统的速度得到了提升，约为线框打印的四倍。

同时，作者提出在交互设计的过程中用户可能会设计出错误的模型，有一些错误是可以直接通过减材操作来修复的，因此在这套系统上还包含加热刀片，用于裁剪模型上不需要的部分。对于增材操作，系统能够创建新的网格和必要的连接结构；对于减材操作，系统能够将用户的输入转化成对应的减材路径；针对干涉问题，该系统能够自动地在后台尝试重排序、调整打印方向和消除干涉部分。

为进一步提高在线打印系统的实用性，Wu 等人在该系统的基础上提出了任意线框模型打印算法^[37]。与普通层式 3D 打印相比，在线五自由度打印系统的路径规划要困难得多，其主要的技术挑战是如何规划出在每个打印时刻打印机与已打印模型无干涉的路径。对于线框模型打印路径规划，问题可以转化为如何选择一个可行打印顺序以打印线框模型上所有的线段或边。可行打印顺序必须满足以下两个条件：（1）支撑条件，即每一个需要打的边必须与之前已经打印好的边连接，不能在悬空的位置进行打印；（2）干涉条件，即在打印边时，打印机的机械部分不能与在该时刻之前打印的边的集合发生任何干涉。除了这两个必须要满足的硬约束之外，打印的路径应尽可能地平滑以保证机械性能得以较好发挥。干涉条件相较于支撑条件更难以满足，Wu 等人的算法首先以干涉条件作为约束进行搜索。算法首先从最后要打印的边开始“剥”模型，构造一个存在无干涉打印方向的边的集合。接着算法将对这些约束编码成干涉弧，从而构造一个有向图，其中每个节点都表示一条边，且每一个干涉弧都表示边的打印先后约束。随后，算法通过局部移除冗余干涉弧以减少约束集的数量，提高了

边排序数量的灵活性。最后，算法通过每次增加一部分边的迭代来对边进行排序。为了保证打印轮廓

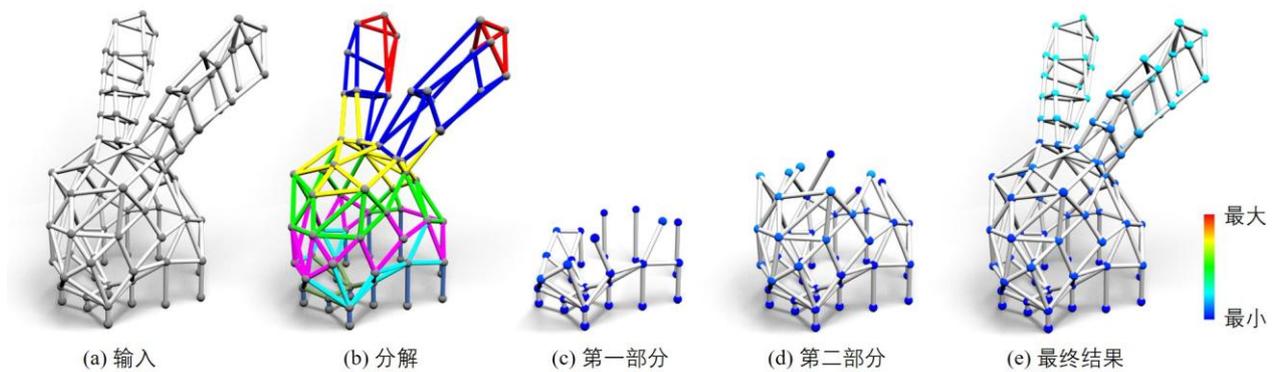


图7 *FrameFab* 算法示意图。首先输入模型 (a)，通过层分解算法分解为八个字层 (b)，随后通过顺序搜索算法得到从下到上每一层打印的顺序 (c-d)，最终通过多自由度机器人打印生成的最终模型 (e)^[38]

足够平滑，作者还在边上定义了一个损失函数，最小化新轮廓的损失问题等价于寻找一个曲面切分对偶图的最小割问题，算法的示意图如图6所示。

工业级机器人手臂具有精度高、控制灵活等特点，Huang 等人研究了使用工业级六自由度机器人手臂打印三维线框模型的方法，作者提出了可供六自由度机器人手臂打印线框模型的高效路径计算算法^[38]。作者在 KUKA KR 10 R1100 六自由度机器人手臂的末端安装了特定的打印装置，该装置与本章前述的几个方法类似，为了使用以 FDM 方式工作的加热、挤出系统，作者使用了与气泵相连的风冷装置用以冷却挤出的打印材料。由于六自由度机器人手臂的灵活性，该系统可以在空间自由地进行平移和旋转打印。除了硬件系统外，作者主要提出了一套基于该硬件系统的路径规划算法，该算法既保证了已打印的线框模型是力学平衡的，又保证了在任意时刻打印的路径与已打印的线框模型是无干涉的。该算法通过局部搜索的方法来优化一个包含力学平衡、干涉等项的目标函数，以求得满足约束条件的打印路径。当线框模型中包含线框的数量比较多时，寻找一个可行的制造路径需花费相当多的时间，为了加快整个算法的运行速度，作者提出带约束的稀疏优化方法，使用交替方向乘子法 (ADMM) 算法^[50]对模型进行层分割，分割得到的子层需满足平衡约束和干涉约束，算法的流程如图7所示。通过层分割分而治之解决搜索问题，局部搜索的范围得到了大幅减小，算法在效率上得到大幅提升。但是该算法在更大模型上的运用（如万级、十万级甚至百万级线框模型），还有待检验。

高自由度机器人带来的自由度一方面为算法设计带来了灵活空间，另一方面干涉检测增加了高效

算法设计的难度。上述方法的应用场景均为比较简单的线框模型打印（通常边的数量都是一千左右），难以应用在一般模型的打印上。所以在线打印也是该技术在一般模型打印的最佳场景——即利用人机交互输入来加快机器人打印的运动规划。

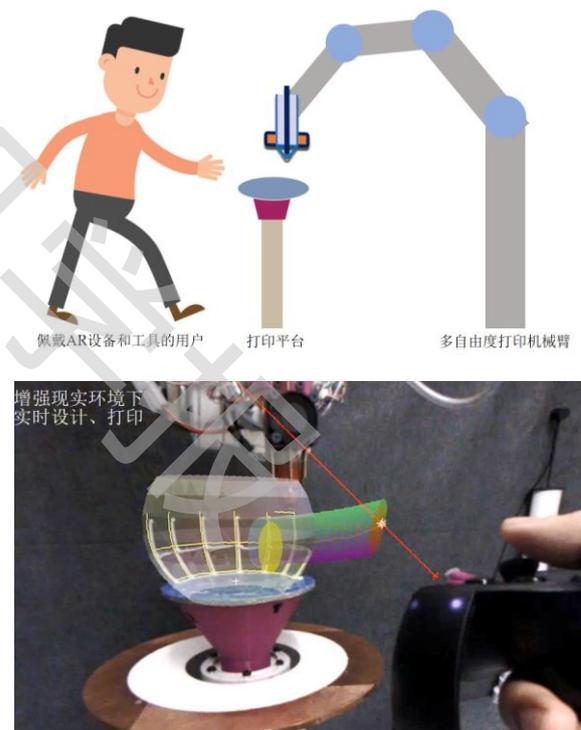


图8 *RoMA* 允许穿戴 AR 设备的用户交互式地与多自由度机器人协作进行模型设计和打印^[51]

随着在线打印技术的迅速发展，设计师能够通过多自由度机器人在线打印预览模型，极大地加快了三维模型的设计迭代速度。由于三维模型是通过二维屏幕进行数字化展示的，往往需要大量的迭代才能通过数字化设计得到理想的三维模型结构。随着虚拟现实技术的迅速发展，Peng 等人提出了一种

名为机器人建模助手(Robotic Modeling Assistant, RoMA)的交互式 3D 打印制造系统^[51], 该系统使用增强现实(Augmented Reality, AR)技术提供交互式驱动, 用户通过头戴 AR 头盔、手持 AR 控制器进行建模设计。与此同时, 一台具有 3D 打印线框模型功能的六自由度机器人手臂 Adept S850 和旋转平台能够在现场同步反馈用户设计的结果。处于对用户交互建模过程中的安全考虑, 在线打印现场被分为三个区域, 分别为六自由度机器人打印系统的设计区域 1、用户进行现场交互建模的设计区域 2 和完全由六自由度机器人打印系统进行打印的设计区域 3。该系统最大的优势是合并了设计与制造的空间, 用户直接在制造平台上边打印、边设计, 并且能够根据已经打印的结果驱动下一步的设计, 直接加快了迭代设计的进程, 如图 8 所示。

4.3 包裹打印

对于传统 3D 打印而言, 个性化制造是一个由设计至制造的单向过程, 一旦通过 3D 打印机制造了模型, 模型就不能够被修改。如果在设计上有任何改变都需要重新从无到有打印一个新的模型, 这个过程不仅浪费金钱, 而且还浪费时间、材料等。其实在设计迭代过程的背后有一些有用的经验观测, 如: 大部分设计迭代仅会改变模型的小部分, 而主体部分或者占比较大的部分一般不需要进行大的改动。因此, 如何在已打印好的主体模型上进一步的打印更多几何特征是包裹打印领域研究的一个重要问题。同时, 电子、光学元器件等其它有用的功能性模块与 3D 打印结合越来越紧密, 通过多自由度机器人能够沿着多个方向对这些功能性模块进行空间包裹式的打印。

4.3.1 单材料多自由度包裹打印

为了克服传统 3D 打印仅能沿着同一个方向逐层累积材料制造模型的局限性, 做到在破损物体表面进行修复式 3D 打印, Chen 等人提出了使用计算机数控(Computer Numerical Controlled, CNC)多轴运动系统进行 3D 打印^[52], 作者将这种打印方式命名为计算机数控机床累积制造。计算机数控机床累积制造方式与 CNC 制造方式类似, 如图 9 所示: 传统 CNC 制造通过移动机床减去与机床接触的材料, 因此对于给定的物件(W)和朝向 O_i 的机床轨迹 S_i , 构造的形状(M)为 $M = W - \bigcup(T)_{S_i+O_i}$; 与之相反, 作者提出的 CNC 增式制造过程能够将材料增量式地附着在与机床接触的位置, 因此其构造的形状(M)为 $M = \bigcup(T)_{S_i+O_i}$ 。作者提出的计算机数控

机床累积制造打印方式基于 SLA 打印原理, 即通过激光选择性固化光敏树脂, 其与传统 SLA 打印方式最大的不同在于计算机数控机床累积制造系统的打印头是沉浸在光敏树脂液体中的。作者基于五自由度 CNC 原理设计了一台含有高功率紫外 LED (Nichia NCSU033A)的计算机数控机床累积制造原型, 通过大量实验分析了计算机数控机床累积制造系统固化树脂的形状, 分别分析了点、线固化情况力的模型, 该计算机数控机床累积制造系统能够实现物体修复、修改, 还可以在其它材料属性的物体上打印(building-around-inserts)。

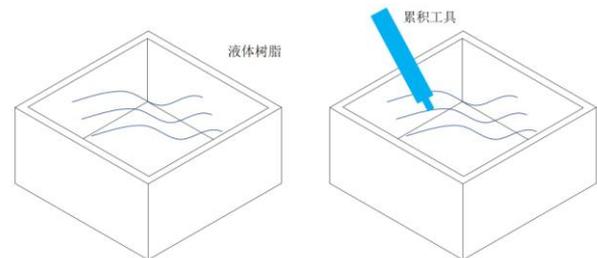


图 9 Zhao 等人提出的计算机数字控制机床增材制造技术^[53]

Zhao 等人使用基于微机电系统(MEMS)的 3D 激光扫描系统设计了自动修复、修改打印物体系统^[53], 该系统使用了^[52]提出的计算机数控机床累积制造作为系统的打印部分, 使用德州仪器公司的双轴模拟指向镜装置 TALP1000B 快速反射点激光, 使用 CCD 摄像头接受激光进行扫描。集成在系统内的 3D 激光扫描系统通过代数点集曲面(Algebraic Point Set Surface, SPSS)拟合和层式深度法线图片(Layered Depth Normal Image, LDNI)表示的方法, 将扫描的点云模型转换成三角网格模型, 根据用户的需求自动规划出用于计算机数控机床累积制造修复、修改打印模型的路径。作者通过修复损坏了一个齿的齿轮对提出的计算机数控机床累积制造系统进行了验证, 同时作者还在塑料茶壶的曲线表面上打印英文字母验证了该机构对塑料物体的修改能力。

为避免重新 3D 打印浪费材料, Tebrich 等人设计并提出了使用五自由度打印系统实现包裹打印^[54]。作者将切削件、五自由度旋转平台和深度相机加到商业 3D 打印机 MakerBot™ Replicator 2X 里。切削件由安装有磨钻头和吸盘的电机组成, 安装在 Replicator 2X 的挤出机附近, 用于移除模型上几部分; 五自由度旋转平台用于解决普通 3D 打印机仅有三个自由度而因干涉约束无法灵活地在物体上打印、切除模型的问题; 深度相机用于标定已有物体, 将实物与计算机程序中的虚拟模型进行对

齐,从而能够生成正确的打印、切除轨迹。该包裹打印系统能够解决以下问题:(1)3D打印过程中出现问题造成打印失败,直接在失败处重新开始打印;(2)设计迭代后直接在上一版设计上进行打印;(3)长期使用物体造成部分损坏后,能够在损坏部分进行修复打印。另一方面,包裹打印一个几何模型需要满足以下限制:(1)物理约束:因打印挤出头大小及其自由度限制,需要修改的区域的周围区域也需要被削除;(2)精度需求:打印头、切削件、3D扫描相机之间需要精确标定,误差控制在毫米级以下;(3)受力平衡:由于打印过程中打印方向会有变化,需要保证旋转物体的受力也是平衡的;(4)移除程度:需要尽可能地保证正确移除物体上的几何结构,本文的切削件能够有较好的移除程度,但仍未达到100%移除的要求。

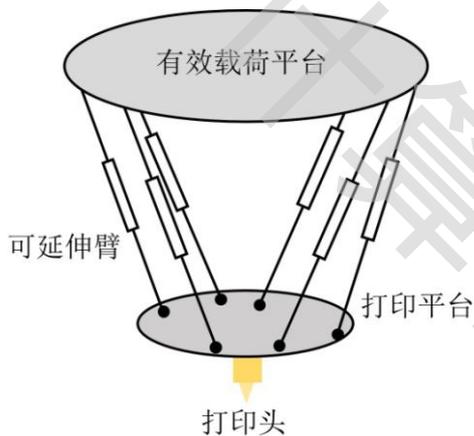


图10 基于Stewart机械结构的FDM 3D打印系统示意图^[55]

虽然工业机器人手臂的精度和刚性十分适合3D打印,但其昂贵的价格限制了其大规模应用。价格低廉的桌面级机器人手臂由于其精度不够无法用于3D打印。因此,Song等人设计了一种成本较低且精度仍满足3D打印要求的Stewart平行运动机构用于多方向3D打印(如图10所示)^[55]。该机构共拥有六个运动自由度,使用了六个可变长支柱以连接装有材料挤出装置的移动平台。在作者设计的原型机构中,共有六个滚珠丝杠线性执行器通过滚珠接头与六边形移动平台相连(类似于德尔塔机构的连接方式),每个电机均安装在作者设计的万向节上从而拥有两个运动自由度。该系统通过一个高性能八轴运动控制板KFLOP和2KSTEP控制,采用GCode作为控制指令来完成路径规划。该打印系统使用FDM方式进行打印,使用0.4mm的挤出机作为打印喷头。整个系统的硬件成本低于1500美元。作者建立了从给定四元数到六个运动轴绝对

位移的运动模型,同时还基于给定移动平台朝向、位移的目标函数设计优化模型,使用迭代更新系统参数的方法实现整个系统的标定。标定问题可以转化为一个非线性优化问题进行优化,作者使用高斯-牛顿法对该优化问题进行求解。此外,集成的激光照相机系统可以校正初始位置的间隙误差,从而确保精确的材料挤出间隙以消除干涉的风险。该多自由度FDM打印系统能够在空间中自由地进行打印,因此可以实现类似于3D打印笔在空间中打印螺旋曲线的功能,还可以在已有的物体表面进行包裹打印。

Gao等人提出了名为RevoMaker的打印系统,该系统的硬件部分基于消费级3D打印机Ultimaker 2进行扩展而成,具体为增加了X方向的夹紧放松装置(CY3R-10-65磁耦合线性气缸)、绕X方向的旋转装置(HerkuleX DRS-0201机器人伺服舵机)以及提供强抓紧力的角运动装置(MHY2-10D气动指)^[56]。首先,需要通过激光切割技术制造一个立方体打印基座,由于该打印基座将保留在打印模型内部作为内部填充材料,需要打印材料容易附着在打印基座表面且不易被剥离,这一点恰好与传统3D打印方式相反。接着,该立方体打印基座需要由人工放置在RevoMaker系统的中心位置,这时气动指为收缩状态以通过面夹紧的方式固定立方体打印基座。通过X方向上以90°为步进角的旋转,系统逐一在立方体基座的四个表面上打印模型,系统会自动地从这四个面上选取两个相反的面打印一对共线、对齐的手柄。完成上述打印后,需要人工将模型从系统上翻转,使打印的一对手柄与伸出的气动指连接夹紧模型,以180°为步进角进行旋转完成最后两个面的打印。为了在输入模型内生成这样的立方体打印基座,作者设计了基于以下两个准则的生成算法:(1)由于亚克力立方体打印基座是空心结构,为了节省材料应生成体积尽可能大的基座;(2)立方体打印基座上的六个子模型所包含的悬空面积应尽可能地少,以尽可能地减少支撑材料体积。作者提出使用粒子滤波算法进行采样,并计算目标函数的值以生成最好的前B个结果供用户进行选择。除了通过亚克力内掏空和降低支撑材料来省材料外,该系统另外一个特点是在打印模型内部亚克力盒中加入功能性模块进行包裹打印,如:电阻、电容、印刷电路板、LED灯、芯片等,模型打印后就具有可以直接使用的机电功能。

4.3.2 多材料多自由度机电打印

3D 打印技术不仅能够用于打印简单的几何模型，还可以用于打印具有机电功能和交互属性的工具。Lewis 等人^[57]指出，通过 3D 打印技术快速制造机电设备能够促进显示、固态照明、可穿戴电子设备、带嵌入式电路的生物学设备的大规模定制应用。

电磁线圈通常由导电性强的材料沿着某个轴用力旋绕构成，最常见的电磁线圈材料为长股金属丝，其布局设计比较复杂，难以与层式 3D 打印相结合。Peng 等人^[58]的研究了结合光原件、扬声器、水力机器人、用于触觉反馈的风动装置的五自由度 FDM 打印系统。该系统不仅能够实现普通 FDM 打印，还能够直接“打印导线”，即在连续打印的 3D 物体上连续地嵌入丝线，例如可以使用铜线来制造能够使电流通过而生成磁场的线圈，另外还可以使用软铁丝来形成具有高磁导率的部件，从而能够将磁场引导到需要的地方。在硬件部分，为了能够使用 3D 打印的方法处理丝线，作者设计了专用的打印头，该打印头包含两个可以围绕中心 FDM 挤出头旋转的送丝机，送丝机可以将丝线运入挤出机顶端的中心，在打印过程中能够根据需要切割线，并重新运送新的丝线。为了增加卷丝的灵活性，作者将该打印头安装到了一个五自由度德尔塔打印机^[49]上，使得打印机能够在各种位置和方向上进行卷绕，并且允许在线圈创建之后在任何位置和方向上进行普通 FDM 打印。该系统打印时首先通过普通 FDM 打印的方法制造结构部件，再使用五自由度打印机将布线（包括线圈）放置在 FDM 制造部件的周围。最后，再次 FDM 打印完成剩余结构部件的制造。该装置能够根据用户的意图定制包含电磁功能的 3D 打印装置，作者在文中展示了几个打印的例子，如：手臂上装载电动促动器的幸运猫模型、六极电机步进定子、磁阻电动机转子和铁磁流体显示器，另外作者展示了如何打印响应用户交互式动作产生小电流信号的输入传感器。使用多自由度 3D 打印机结合机电元件的一体化打印为 3D 打印增加了更多的功能性，同时也为人机交互领域赋予了便捷、快速制造的优势。

4.4 大尺寸打印

限制 3D 打印技术广泛应用的一个主要因素为能够打印的最大尺寸，大部分商业 3D 打印机的最大打印尺寸无法满足用户的大尺寸打印要求。该问题已得到了研究人员的广泛关注，在图形学领域

中，将三维模型分割成一系列满足打印机最大打印尺寸的模型部件后进行打印后再组装的方法得到了广泛的研究，并且取得了重要进展^[59-67]。这些方法大多使用胶水、连接器或者自锁结构对模型进行打印后组装，组装后的模型有较为明显的缝隙（如图 11 所示），不仅影响打印结果的美观性，还带来机械强度等方面的问题。另一种解决该问题的方法通过使用自由度更高的机器人系统进行一体化打印，避免多次打印再组装带来的精度问题，同时也能够大幅提高打印尺寸。



图 11 使用数字几何处理将模型分割打印再组装的方法具有诸多不足，如图中所示具有较明显的缝隙

使用多自由度机器人进行大尺寸物体 3D 打印的想法最早可以追溯到上世纪 90 年代^[68]，机器人系统带来空间自由度上巨大的提升使得快速、高效打印制造大尺寸物体成为可能。根据打印对象的不同可以将大尺寸打印分为两类，第一类是扩展传统 3D 打印的机器人大尺寸打印系统，第二类是面向建筑制造的机器人大尺寸打印系统。这两类系统最大的不同在于使用的材料不同，前者使用的仍为传统 3D 打印材料（如 ABS、PLA），后者使用的材料更加复杂，例如使用沙子^[69]、砂浆混合物或胶结材料^[70]、可打印混凝土^[71]、颗粒材料（沙石粉末）^①等，因此后者往往需要更加复杂的预处理和后处理以保证整体的打印质量稳定可靠。

4.4.1 传统 3D 打印的扩展

关于使用机器人来扩展传统 3D 打印规模思路，研究人员提出了一系列方法。基于 DLP 技术的 3D 打印机通常使用步进电机驱动打印机 Z 轴运动，通过透镜将 DLP 光聚焦在光敏树脂表面，比如常见的两种 DLP 打印机为自上而下和自下而上的打印，均需要将紫外光聚焦在光敏树脂的上表面或下表面。DLP 打印机最大可打印模型的体积与投影光源的强度和面积有关，大部分投影仪所提供的光源仅

① D-shape, <https://www.d-shape.com> 2017, 1, 20

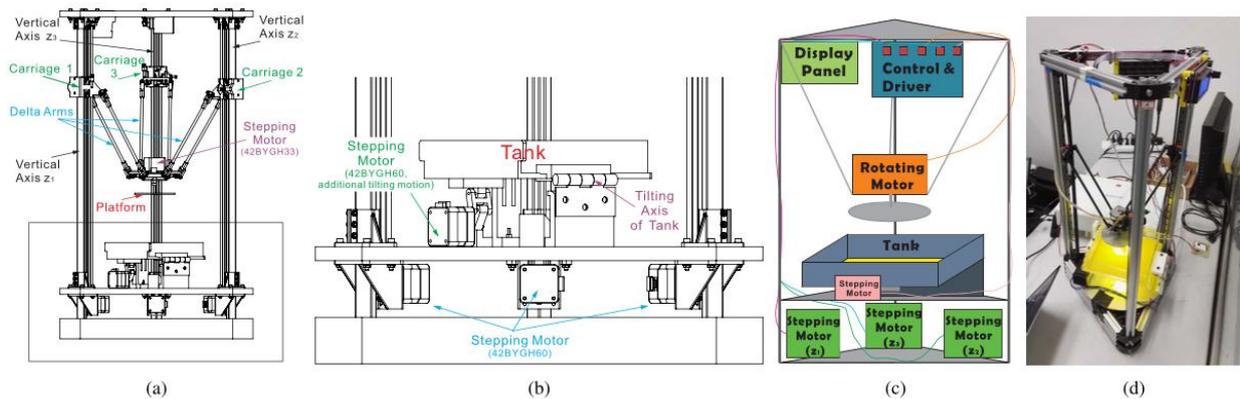


图 12 增加了一个额外旋转自由度的 Delta DLP 打印机^[72, 73]

能打印小模型。虽然已有研究致力于通过将三维模型分解为能适应打印区域的更小部件再进行组装以满足打印较大模型的需求，但组装会导致的部件之间存在缝隙，不仅影响模型的机械强度，还会影响模型的外观。Wu、Yi 等人^[72, 73]提出通过使用德尔塔构型实现大尺寸规模物体的四自由度 DLP 3D 打印。该打印机有三个竖直的 Z 轴 (Z1、Z2 和 Z3)，每根轴上均有一个滑块与滑轨，滑块通过 42BYGH60 步进电机驱动在滑轨上进行运动。除此之外，模型平台的中心还有一个 42BYGH33 步进电机用于旋转模型平台。所有的步进电机均使用 A4988 DMOS 进行控制 (如图 12 所示)。该系统改进了传统 DLP 打印中每层大小的限制，通过 Delta 机器人构型允许打印平台在每一层水平移动拼接小尺寸模型切片得到大尺寸模型切片。同时系统中旋转平台提供的旋转自由度为设计一个满足高效拼接要求的算法提供了可能。在算法层面最大的技术挑战在于如何将大体积三维模型的二维切片分解为块数最小的、大小满足可投影要求的多边形集合，在计算几何中，用最少数量的正方形覆盖一个任意多边形是 NP-Hard 问题。研究人员提出了两种近似优化算法。第一种方法离散采样多边形刚体旋转所有可能的旋转角度，再使用径向基函数拟合成一个角度的连续函数从而近似求解最优值，该算法时间复杂度为 $O(n^3 \log n)$ ；第二种方法使用多边形中轴进行过分割再合并，算法时间复杂度为 $O(n^2 \log^2 n)$ 。由于德尔塔机器人具有较好的扩展性能，例如 ABB IRB 360-6、1600 FlexPicker 的最大可达范围约为 1.6 米^①，所以这类方法为扩展大部分传统 3D 打印机来打印大尺寸模型提供了一个良好的解决方案。

4.4.2 建筑行业的大尺寸 3D 打印

近些年来，3D 打印技术在建筑领域得到了广泛的应用。从应用范围看，目前 3D 打印技术主要应用于现场外预制造 (Off-site prefabrication) 小体积建筑组件，再通过交通运输和人工组装的方式完成最终的建造。现场外预制造的方法虽然充分发挥了 3D 打印方式对组件高度定制化的需求，但其效率相比传统建筑制造并无较大提升，仍然具有劳动密集、危险、造价高昂和建筑构型受限等缺陷。近年来，现场制造 (In situ fabrication) 得到了研究者的广泛关注，面对现场制造过程非结构化、超大规模、高度复杂等特点，传统的三自由度 3D 打印机构难以直接应用在建筑行业，将多自由度机器人 3D 打印应用到建筑制造行业是学术界广泛关注的思路之一。近年来工业界和学术界也提出了一系列的解决方案，如：外轮廓加工系统 (Contour Crafting)^[70, 74-77] 是一种基于挤出砂浆混合物和胶结材料生成平滑的建筑表面结构的多自由度机器人打印系统，该系统能够在建筑现场进行移动，还可以利用其多自由度的特点完成各种复杂的建筑材料安装工作。外轮廓加工系统根据混凝土的水合特性，每一层的建造时间不同，不能保证层与层之间的结合程度，很容易出现“冷结合”的现象，因此 Hack 等人提出了网格浇筑移动打印平台 Mesh Mould^[78] 解决上述问题，该移动打印平台通过多自由度机器人手臂末端的挤出头在空间中打印高分子聚合物，将建筑模板打印成三维网格结构，能够很好地提供加固作用，同时也解决了混凝土材料“冷结合”的问题。然而，高分子聚合物不能提供很好的拉升强度，很难在建筑工业中广泛应用。Yu 等人提出了一种“多线程”机器人 3D 打印的方式，通过借鉴蜘蛛丝这一稳定的生物结构，该“多线程”机器人 3D 打印

^① Irb 360 data sheet a4, <http://new.abb.com/products/robotics/industria-1-robots/irb-360> 2018, 1, 20

可以通过三个喷头同时挤出材料，打印的结构具有极强的稳定性，展示了这种仿生结构在设计、建筑领域的多自由度机器人 3D 打印广阔前景^[48]。

Kumar 等人基于网格浇筑方法提出了金属网格浇筑的升级方案，该方案使用钢丝作为打印材料，极大提升了网格局部和整体以及网格内单元结构的灵活性，作者使用装载在移动机器人平台上的 ABB IRB 4600 六自由度机器人手臂作为打印工具，并设计了能够满足打印钢丝需求的效应器装配在机器人手臂的末端^[79]。

Napp 等人提出使用一个或多个移动机器人使用非晶态材料(Amorphous materials)来近似打印任意的形状结构的系统^[80]，该系统能够在自然灾害时使用机器人快速填充凹陷路面，恢复用于救灾的道路。Jokic 等人提出通过在已打印结构上进行表面移动打印的机器人 3D 打印系统 *Minibuilders*，该系统包含三个拥有传感器和局部定位系统的机器人。该系统首先通过 Base 机器人沿着预定轨迹打印前 10 层材料，再通过依附在已打印结构上的 Grip 机器人进一步打印，最后使用 Vacuum 机器人在打印结构表面进行进一步打印，并消除层式 3D 打印的结构强度问题。

Keating 等人提出了数字化建造平台(Digital Construction Platform, DCP)，该平台使用实时环境数据作为控制依据，能够全自动地在建筑现场打印建筑结构^[81]。该系统为复合臂系统，其中液压、电动机器人手臂装载在履带式移动平台上。DCP 原型系统由一台 2015 Altec AT40GW 升降系统、一台 KUKA AGILUS KR 10 R1100 sixx WP 多自由度机器人手臂和 Leica AT901 激光跟踪系统构成。作者提出了 Print-in-Place (PiP)制造方法对该平台进行评估，即使用喷涂聚氨酯泡沫结合 3D 打印的方式制造用于铸造混凝土结构的模板。该系统具有制造速度快、材料兼容性强、易实现和可制造复杂设计建筑等优点，同时能够提升结构性能，提升建造效率。DCP 技术的建造成本只与材料的消耗量有关，与建筑结构的复杂程度无关，更重要的是通过使用多自由度机器人自动化建造能够减少工人受伤和死亡情况的发生。

目前基于挤出的 3D 打印方式仍是主流，挤出的材料通常为规则材料。但一些在建筑行业中常用的材料（如砖块、石头等）无法通过上述方法进行 3D 打印。由于这类材料具有常用 3D 打印材料无法比拟的坚固性，在建筑中承担着更为重要的作用。

Stroupe 等人设计了使用两个机器人平台 *SRR* 和 *SRR2K* 在室外环境进行砖块打印的系统，每一个机器人上都装配有前向立体摄像机和一个四自由度机器人手臂。同时，装配在夹持器上的三自由度力矩传感器能够辅助机器人拾取、运输和放置材料^[82]。Magnenat 等人提出了使用 *marXbot* 机器人抓取自对准磁铁块，该系统实现了基于里程计、摄像机、激光距离传感器和近距离传感器的即时定位与地图构建，同时使用前置摄像机和近距离传感器为提供拾取和放置砖块提供必要信息^[83]。Helm 等人提出 *dimRob* 打印系统，该系统包含一个装配有操纵器的移动机器人平台，在移动平台上装有一台 2D 线扫描仪和一台 3D 物体检测扫描仪。机器人平台的操纵器为两个真空夹持器用以拾取材料实现现场制造。由于该系统只能通过人工重定位并且没有使用高级传感器和高级控制系统，因此在真实现场建造环境下没有得到较好的应用^[84]。Sandy 等人提出了基于半自主移动建造砖墙平 *In situ Fabricator (IF)*^[85]自主定位的现场制造移动机器人系统，*IF* 系统由移动平台、六自由度机器人手臂 ABB IRB 4600、真空夹持器组成，系统由底座导航模块、机器人手臂运动规划和控制模块、扫描和注册模块构成，能够实现机器人在多个建造点自主移动建造砖块的功能^[86]。Furrer 等人研究了使用带深度视觉系统反馈的机械臂抓取系统堆积不规则石头块的制造方式^[87]。该系统包含一台六自由度机器人手臂、装配在机器人手臂末端的夹持器以及一台 3D 扫描仪。系统能够通过 3D 扫描仪的数据对非结构化石料进行识别，系统能够迭代计算石料的位置和姿态用以自动建造，通过机器人手臂自动拾取、放置实现非结构化石料的稳定堆放。

5 存在的问题和挑战

尽管多自由度机器人在许多方向已经得到了广泛的研究与应用，但该技术仍面临诸多问题与挑战。多自由度机器人的精度问题困扰着该技术在 3D 打印制造领域的广泛应用。虽然多自由度机器人（主要是多自由度机械臂）的重复精度已经非常高（如 KUKA 公司机器人的重复误差大多在 0.1mm 左右），但其定位精度往往与预期值相差甚远，Pollard 等人研究了 ABB IRB 140 机器人手臂应用于 3D 打印的误差情况，实验表明使用该机器人手臂执行直线路径的精度约为 0.67mm^[88]。造成定位

精度误差的原因有很多,通常可以概括为以下几个方面原因:

- 1) 机器人本身在制造过程中存在制造公差,导致前向运动学模型与机器人实际模型不一致;
- 2) 机器人的编码器存在测量误差,在读取机器人姿态时直接引入了误差;
- 3) 安装在机器人上的工具存在标定误差,导致机器人工具实际位置与期望位置的不一致。

在传统 3D 打印中,由误差引起的调平不准确和打印过程中漂移、错位等现象极易导致整个打印过程失败,而多自由度 3D 打印的额外自由度的标定难度更大,因此多自由度 3D 打印系统的标定和误差控制对最终打印模型的质量至关重要。多自由度机器人的运动学和几何标定问题属于机器人学中的经典问题,感兴趣的读者可以阅读相关经典参考文献^[89, 90]。

标定方法只能在某种程度上减少误差,目前大部分多自由度 3D 打印通过标定后,精度仍较传统 3D 打印的精度相差甚远。在许多其它工业领域,闭环控制的应用极大提升了精度,因此将闭环控制方式应用到多自由度 3D 打印中是提升打印精度的必经之路。目前传统 3D 打印机上的闭环控制研究还处于比较初级的阶段^[91],虽然该问题在多个 3D 打印社区中均得到了广泛关注^①,但由于开发成本较高且收益较低的原因,研究和开发的进展比较缓慢,仅有少量研究成果涌现,如 Makerbot 公司研发的智慧型喷头 Smart Extruder+^②用于检测熔融材料流的挤出情况、基于电机运动控制的闭环方法^[92]、基于视觉反馈的高精度 3D 打印系统^[93, 94]等。由于多自由度 3D 打印近几年才得到广泛研究,该问题目前的研究也才刚刚开始^[44]。由于多自由度 3D 打印的精度相比于传统 3D 打印的精度要低,可以预见未来会有更多的闭环控制方法被应用在多自由度 3D 打印中。

此外,多自由度机器人 3D 打印面临的一个重要问题是轨迹生成的计算量问题。由于大部分机器人都是在其 C-Space (构型空间)进行规划^[95],而 3D 打印需要在笛卡尔空间内生成由运动轨迹(如

直线段、曲线段等),因此需要在笛卡尔空间进行大量的插补计算,在计算的过程中还需要保证生成轨迹的平滑程度、插补误差控制等因素。

受限于物理干涉约束,机器人在 3D 打印的过程中仍有许多空间位置无法到达,因此单个机器人能够制造的场景是有限的。部分复杂的模型在使用单个机器人的条件下无法完整打印制造出来,机器人在 3D 打印场景的灵活性仍有待探究。

6 可能发展的方向

视觉反馈: 现有的多自由度机器人打印,尤其是移动平台的大规模打印,需要非常精准的定位系统。制造误差、标定误差和传感器误差这三大误差严重阻碍了机器人在高精制造领域的应用,因此使用外部传感器提升机器人的精度近年来得到了研究者的重视,如文献[96-98]中一系列研究基于深度图像作为输入估计了机器人关节的位置,针对深度相机在恶劣室外等环境无法工作的问题,Ortenzi 等人研究了使用单目视觉传感器估计机器人姿态的方法^[99]。Wang 等人研究了基于视觉的微创手术机器人手臂标定问题^[100]。不论是通过固定机械链结构的机器人还是移动机器人平台,实现高精度定位需要使用视觉等外部传感器辅助定位,如何通过视觉反馈解决多自由度机器人 3D 打印中遇到的精度问题可能是一个有趣的研究方向。

生物 3D 打印: 再生医学主要研究对于人体已经发生病变的组织、器官的治疗,采用修复、替换或者再造的医疗策略治疗传统医疗手段无法治愈的先天性遗传缺陷疾病和后天获得的退行性疾病。3D 生物打印通过打印干细胞等组成的“生物墨水”,并诱导其分化、生长,近年来该方向取得了大量的进展^[101]。由于生物器官具有复杂的三维结构,在使用 3D 打印技术进行器官再造时,需要考虑不同区域不同时期细胞的分布、组织特定的生长方向等问题,因此通过多自由度机器人 3D 打印技术进行空间自由、时间离散的打印是比较符合器官再造要求的方式。如何使用多自由度机器人辅助构建生物器官内部复杂的分支血管网络以及在器官三维构型内分布多种细胞是值得深入研究的一个重要方向。

空间打印: 在航天领域,3D 打印因其灵活、高效等优势受到了广泛关注。在太空舱内,宇航员能够通过 3D 打印制造或修复日常工具;在太空舱

① Closed-loop control for low-cost 3d printers, <https://www.element14.com/community/thread/30891/1/closed-loop-control-for-low-cost-3d> 2018, 7, 3

② Smart extruder+, <https://www.makerbot.com/3d-printers/smart-extruder/> 2018, 7, 3

外, 通过运输原材料到太空进行现场打印能够大幅降低航天飞船发射体积和发射成本^[102]。近年来, 许多国家已经开始了相关的研究工作, 如美国国家航空航天局 NASA 于 2013 年提出了 *SpiderFab* 概念原型, 该系统包含多个高自由度机器人手臂用以灵活、精准的 FDM 打印, 通过在太空轨道上使用该系统进行在线制造能够解决 NASA 发射卫星时遇到的体积限制问题^[103]。2016 年, 美国国家航天局和美国国家实验室在国际空间站安装了一台由美国 *Made In Space* 公司制造的 AMF 空间打印机并开展相关空间 3D 打印实验^①。在无重力或微重力环境下, 不管是 3D 打印材料还是 3D 打印方式都与地面重力环境差别很大, 如何使用灵活的多自由度机器人在太空中进行打印可能是一项具有重要意义的研究方向。

多机协作打印: 机器人因自身结构限制, 在空间中存在一些位置无法到达, 尤其是安装在机器人效应器上的工具尺寸较大或环境较为复杂时, 机器人遇到无法到达位置的概率会大幅提升。Yoshikawa 等人在 1985 年提出了机器人可操作性分析 (Manipulability Analysis) 的概念^[104], Vahrenkamp 等人基于^[104]扩展了实际情况中出现的约束情况, 能够用于多自由度机器人 3D 打印中的工具设计和环境构建^[105]。然而通过以上方法仅能在设计构造阶段提高机器人在打印过程中的灵活性, 并不能从根本上解决问题。多机协作打印的方式将大幅提升整个打印系统的灵活性和自由度, 同一个位置机器人能够以更多的方式到达, 因此多机协作的打印系统可能也是未来的一个重要研究方向。

7 总结

随着机器人时代的到来, 多自由度机器人及充分利用多自由度的相关算法将为 3D 打印带来新一轮技术发展。由于软硬件等因素的限制, 多自由度 3D 打印本身仍存在许多值得进一步研究的问题。目前的多自由度 3D 打印方式解决了诸多传统层式 3D 打印方式的一些问题, 还有许多尚未得到解决的问题等待着研究者进一步探索。

致谢 感谢康奈尔大学 (Cornell University) 图形学与视觉研究组 Rundong Wu 博士提供本文使用的图 6, 感谢麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology) 数字结构研究组 Yijiang Huang 博士提供本文使用的图 7, 感谢康奈尔大学 (Cornell University) 计算与信息科学系 Huaishu Peng 博士提供本文使用的图 8。同时感谢编辑部和审稿人对本文的宝贵建议!

参考文献

- [1] Kalpakjian S, Schmid S R. Manufacturing engineering and technology. New Jersey, USA: Upper Saddle River, 2014
- [2] John M O. Photo-glyph recording, USA, 1956, 12, 25
- [3] Kodama H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Review of scientific instruments, 1981, 52(11): 1770-1773
- [4] Liu Ligang, Xu Wenpeng, Wang Weiming, et al. Survey on Geometric Computing in 3D Printing. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1243-1267 (in Chinese)
(刘利刚, 徐文鹏, 王伟明, et al. 3d 打印中的几何计算研究进展. 计算机学报, 2015, 38(6): 1243-1267)
- [5] Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. ASME Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221
- [6] Murray R M, Sastry S S, Li Z. A mathematical introduction to robotic manipulation. Florida, USA: CRC Press, 1994
- [7] Craig J J. Introduction to robotics: Mechanics and control. New Jersey, USA: Upper Saddle River, 2005
- [8] Balestrino A, De Maria G, Sciacivico L. Robust control of robotic manipulators. IFAC Proceedings Volumes, 1984, 17(2): 2435-2440
- [9] Wolovich W A, Elliott H. A computational technique for inverse kinematics//Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, USA, 1984: 1359-1363
- [10] Baillieul J. Kinematic programming alternatives for redundant manipulators//Proceedings of the 1985 IEEE International

① Additive manufacturing facility unprecedented access to the iss national lab for iterative design, <http://madeinspace.us/projects/amf/> 2018, 1, 20

- Conference on Robotics and Automation. St. Louis, USA, 1985: 722-728
- [11] Wampler C W. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1986, 16(1): 93-101
- [12] Nakamura Y, Hanafusa H. Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1986, 108: 163-171
- [13] Buss S R, Kim J-S. Selectively damped least squares for inverse kinematics. *Journal of Graphics tools*, 2005, 10(3): 37-49
- [14] Kavraki L E, Svestka P, Latombe J C, et al. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(4): 566-580
- [15] Kuffner J J, Lavelle S M. Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning//*Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA, 2000: 995-1001
- [16] Hsu D, Latombe J C, Motwani R. Path planning in expansive configuration spaces//*Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, USA, 1997: 2719-2726
- [17] Bohlin R, Kavraki L E. Path planning using lazy prm//*Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA, 2000: 521-528
- [18] Plaku E, Bekris K E, Chen B Y, et al. Sampling-based roadmap of trees for parallel motion planning. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(4): 597-608
- [19] Yerzhova A, Jaillet L, Simón T, et al. Dynamic-domain rrts: Efficient exploration by controlling the sampling domain//*Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, 2005: 3856-3861
- [20] Tang X, Lien J-M, Amato N M, et al. An obstacle-based rapidly-exploring random tree//*Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, USA, 2006: 895-900
- [21] Diankov R, Ratliff N, Ferguson D, et al. Bispaces planning: Concurrent multi-space exploration//*Proceedings of the Robotics: Science and Systems*. Zurich, Switzerland, 2008: 21
- [22] Rodriguez S, Thomas S, Pearce R, et al. Resampl: A region-sensitive adaptive motion planner //Akella S, Amato N M, Huang W H, et al. *Algorithmic foundation of robotics vii*. Berlin, Germany: Springer , 2008: 285-300
- [23] Denny J, Greco E, Thomas S, et al. Marrt: Medial axis biased rapidly-exploring random trees//*Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Hong Kong, China, 2014: 90-97
- [24] Ratliff N, Zucker M, Bagnell J A, et al. Chomp: Gradient optimization techniques for efficient motion planning//*Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan, 2009: 489-494
- [25] Schulman J, Ho J, Lee A X, et al. Finding locally optimal, collision-free trajectories with sequential convex optimization//*Proceedings of the Robotics: science and systems 2013*. Berlin, Germany, 2013: 1-10
- [26] Park C, Pan J, Manocha D. Itomp: Incremental trajectory optimization for real-time replanning in dynamic environments//*Proceedings of the 22nd International Conference on Automated Planning and Scheduling*. Atibaia, Sao Paulo Brazil, 2012: 207-215
- [27] Lavelle S M. *Planning algorithms*. Cambridge, UK: Cambridge university press, 2006
- [28] Brockett R W, Others. Asymptotic stability and feedback stabilization. *Differential geometric control theory*, 1983, 27(1): 181-191
- [29] Oriolo G, Mongillo C. Motion planning for mobile manipulators along given end-effector paths//*Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, 2005: 2154-2160
- [30] Bianco C G L, Ghilardelli F. Real-time planner in the operational space for the automatic handling of kinematic constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 730-739
- [31] Gifftthaler M, Farshidian F, Sandy T, et al. Efficient kinematic planning for mobile manipulators with non-holonomic constraints using optimal control//*Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Singapore, 2017: 3411-3417
- [32] Pan J, Chitta S, Manocha D. Fcl: A general purpose library for collision and proximity queries//*Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Saint Paul, USA, 2012: 3859-3866
- [33] Chakraborty D, Aneesh Reddy B, Roy Choudhury A. Extruder path generation for curved layer fused deposition modeling. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(2): 235-243
- [34] Mueller S, Im S, Gurevich S, et al. Wireprint: 3d printed previews for fast prototyping//*Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*. Honolulu, USA, 2014: 273-280

- [35] Lensgraf S, Mettu R R. Beyond layers: A 3d-aware toolpath algorithm for fused filament fabrication//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden, 2016: 3625-3631
- [36] Lensgraf S, Mettu R R. An improved toolpath generation algorithm for fused filament fabrication//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Singapore, 2017: 1181-1187
- [37] Wu R, Peng H, Guimbreti ère F, et al. Printing arbitrary meshes with a 5dof wireframe printer. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 101-101
- [38] Huang Y, Zhang J, Hu X, et al. Framefab: Robotic fabrication of frame shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(6): 224-224
- [39] Wu C, Dai C, Fang G, et al. Robofdm: A robotic system for support-free fabrication using fdm//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Singapore, 2017: 1175-1180
- [40] Dai C, Wang C C L, Wu C, et al. Support-free volume printing by multi-axis motion. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(4): 134
- [41] Allen R J A, Trask R S. An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 78-87
- [42] Thomas L-J, Robert A, Richard T. Curved layer fused filament fabrication using automated toolpath generation. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3(4): 236-243
- [43] Ezair B, Fuhrmann S, Elber G. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3d models. *Computer-Aided Design*, 2018, 100: 1-13
- [44] Wu L, Yu M, Gao Y, et al. Multi-dof 3d printing with visual surveillance//Proceedings of the SIGGRAPH Asia 2017 Posters. Bangkok, Thailand, 2017: 6
- [45] Hu K, Jin S, Wang C C L. Support slimming for single material based additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2015, 65: 1-10
- [46] Wu J, Wang C C L, Zhang X, et al. Self-supporting rhombic infill structures for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 2016, 80: 32-42
- [47] Xie Y, Chen X. Support-free interior carving for 3d printing. *Visual Informatics*, 2017, 1(1): 9-15
- [48] Wang W, Liu Y J, Wu J, et al. Support-free hollowing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 24(10): 2787-2798
- [49] Peng H, Wu R, Marschner S, et al. On-the-fly print: Incremental printing while modelling//Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. San Jose, USA, 2016: 887-896
- [50] Boyd S, Parikh N, Chu E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1-122
- [51] Peng H, Briggs J, Wang C-Y, et al. Roma: Interactive fabrication with augmented reality and a robotic 3d printer//Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Montréal, Canada, 2018: 579
- [52] Chen Y, Zhou C, Lao J. A layerless additive manufacturing process based on cnc accumulation. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, 17(3): 218-227
- [53] Zhao X, Pan Y, Zhou C, et al. An integrated cnc accumulation system for automatic building-around-inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(4): 432-443
- [54] Teibrich A, Mueller S, Guimbreti ère F, et al. Patching physical objects//Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. Charlotte, USA, 2015: 83-91
- [55] Song X, Pan Y, Chen Y. Development of a low-cost parallel kinematic machine for multidirectional additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(2): 021005
- [56] Gao W, Zhang Y, Nazzetta D C, et al. Revomaker: Enabling multi-directional and functionally-embedded 3d printing using a rotational cuboidal platform//Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. Charlotte, USA, 2015: 437-446
- [57] Lewis J A, Ahn B Y. Three-dimensional printed electronics. *Nature*, 2015, 518: 42-43
- [58] Peng H, Guimbreti ère F, Mccann J, et al. A 3d printer for interactive electromagnetic devices//Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. Tokyo, Japan, 2016: 553-562
- [59] Luo L, Baran I, Rusinkiewicz S, et al. Chopper: Partitioning models into 3d-printable parts. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 129
- [60] Hu R, Li H, Zhang H, et al. Approximate pyramidal shape decomposition. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(6): 213
- [61] Vanek J, Galicia J A, Benes B, et al. Packmerger: A 3d print volume optimizer. *Computer Graphics Forum*, 2014, 33(6): 322-332
- [62] Chen X, Zhang H, Lin J, et al. Dapper: Decompose-and-pack for 3d printing. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(6): 213
- [63] Song P, Fu Z, Liu L, et al. Printing 3d objects with interlocking parts. *Computer Aided Geometric Design*, 2015, 35-36: 137-148

- [64] Yao M, Chen Z, Luo L, et al. Level-set-based partitioning and packing optimization of a printable model. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(6): 214
- [65] Herholz P, Matusik W, Alexa M. Approximating free-form geometry with height fields for manufacturing. *Computer Graphics Forum*, 2015, 34(2): 239-251
- [66] Song P, Deng B, Wang Z, et al. Cofifab: Coarse-to-fine fabrication of large 3d objects. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 45
- [67] Attene M. Shapes in a box: Disassembling 3d objects for efficient packing and fabrication. *Computer Graphics Forum*, 2015, 34(8): 64-76
- [68] Andres J, Bock T, Gebhart F, et al. First results of the development of the masonry robot system rocco: A fault tolerant assembly tool. *Autom Rob Constr XI*, 1994, 11: 87-93
- [69] Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in construction*, 1997, 5(5): 427-437
- [70] Khoshnevis B, Hwang D, Yao K-T, et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2006, 1(3): 301-320
- [71] Lim S, Le T, Webster J, et al. Fabricating construction components using layered manufacturing technology//*Proceedings of the Global Innovation in Construction Conference*. Loughborough, UK, 2009: 512-520
- [72] Wu C, Yi R, Liu Y-J, et al. Delta dlp 3d printing with large size//*Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Daejeon, South Korea, 2016: 2155-2160
- [73] Yi R, Wu C, Liu Y J, et al. Delta dlp 3-d printing of large models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(3): 1193-1204
- [74] Khoshnevis B, Bukkapatnam S, Kwon H, et al. Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials. *Rapid Prototyping Journal*, 2001, 7(1): 32-42
- [75] Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 2004, 13(1): 5-19
- [76] Hwang D, Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting//*Proceedings of the 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Jeju, South Korea, 2004: 301-307
- [77] Yeh Z, Khoshnevis B. Geometric conformity analysis for automated fabrication processes generating ruled surfaces: Demonstration for contour crafting. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, 15(5): 361-369
- [78] Hack N, Lauer W V. Mesh-mould: Robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design*, 2014, 84(3): 44-53
- [79] Kumar N, Hack N, Doerfler K, et al. Design, development and experimental assessment of a robotic end-effector for non-standard concrete applications//*Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Singapore, 2017: 1707-1713
- [80] Napp N, Nagpal R. Robotic construction of arbitrary shapes with amorphous materials//*Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Hong Kong, China: 438-444
- [81] Keating S J, Leland J C, Cai L, et al. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*, 2017, 2(5): eaam8986
- [82] Stroupe A, Okon A, Robinson M, et al. Sustainable cooperative robotic technologies for human and robotic outpost infrastructure construction and maintenance. *Autonomous Robots*, 2006, 20(2): 113-123
- [83] Magnenat S, Philippsen R, Mondada F. Autonomous construction using scarce resources in unknown environments. *Autonomous Robots*, 2012, 33(4): 467-485
- [84] Helm V, Ercan S, Gramazio F, et al. Mobile robotic fabrication on construction sites: Dimrob//*Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura, Portuguesia, 2012: 4335-4341
- [85] Dörfler K, Sandy T, Gifftthaler M, et al. Mobile robotic brickwork - automation of a discrete robotic fabrication process using an autonomous mobile robot //Reinhardt D, Saunders R, Burry J ed. *Robotic fabrication in architecture, art and design 2016*. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2016: 204-217
- [86] Sandy T, Gifftthaler M, Dörfler K, et al. Autonomous repositioning and localization of an in situ fabricator//*Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stockholm, Sweden, 2016: 2852-2858
- [87] Furrer F, Wermelinger M, Yoshida H, et al. Autonomous robotic stone stacking with online next best object target pose planning//*Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Singapore, 2017: 2350-2356
- [88] Pollard D, Herrmann G, Ward C, et al. A comparison of fdm structural layouts and implementation of an open-source arm-based system. *MATEC Web Conference*, 2018, 167: 03002
- [89] Roth Z, Mooring B, Ravani B. An overview of robot calibration. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(5): 377-385
- [90] Veitschegger W K, Wu C H. Robot calibration and compensation.

- IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(6): 643-656
- [91] Li Xuan, Mo Hong, Li Shuangshuang, et al. Research Progress on 3D Printing Technology Process Control Problem. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(7): 983-1003 (in Chinese)
(李轩, 莫红, 李双双, et al. 3d 打印技术过程控制问题研究进展. *自动化学报*, 2016, 42(07): 983-1003)
- [92] Benjamin W, Duane S, Mark G. Low-cost closed-loop control of a 3d printer gantry. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(5): 482-490
- [93] Minardi J, Tran J. Closed-loop 3d printing incorporating sensor feedback, USA, 2017, 2, 23
- [94] Sitthi-Amorn P, Ramos J E, Wangy Y, et al. Multifab: A machine vision assisted platform for multi-material 3d printing. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(4): 129
- [95] Choset H M. Principles of robot motion: Theory, algorithms, and implementation. Massachusetts, USA: MIT press, 2005
- [96] Bohg J, Romero J, Herzog A, et al. Robot arm pose estimation through pixel-wise part classification//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China, 2014: 3143-3150
- [97] Widmaier F, Kappler D, Schaal S, et al. Robot arm pose estimation by pixel-wise regression of joint angles//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden, 2016: 616-623
- [98] Garcia Cifuentes C, Issac J, Wüthrich M, et al. Probabilistic articulated real-time tracking for robot manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 577-584
- [99] Ortenzi V, Marturi N, Stolkin R, et al. Vision-guided state estimation and control of robotic manipulators which lack proprioceptive sensors//Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Daejeon, South Korea, 2016: 3567-3574
- [100] Wang Z, Liu Z, Ma Q, et al. Vision-based calibration of dual rcm-based robot arms in human-robot collaborative minimally invasive surgery. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(2): 672-679
- [101] Zhang Z, Wang X-J. Current progresses of 3d bioprinting based tissue engineering. *Quantitative Biology*, 2017, 5(2): 136-142
- [102] Williamson M. Building a rocket? Press 'p' for print... *Engineering & Technology*, 2015, 10(2): 40-43
- [103] Hoyt R P, Cushing J I, Slostad J T, et al. Spiderfab: An architecture for self-fabricating space systems//Proceedings of the AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. San Diego, USA, 2013: 5509
- [104] Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms. *The international journal of Robotics Research*, 1985, 4(2): 3-9
- [105] Vahrenkamp N, Asfour T, Metta G, et al. Manipulability analysis//Proceedings of the 2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Osaka, Japan, 2012: 568-573

WU Chen-Ming, born in 1994, Ph.D. student. His research interests including computer graphics and robotics.



DAI Cheng-Kai, born in 1991, Ph.D. student. His research interests including computer graphics and robotics.

Charlie C.L. Wang, born in 1975, Ph.D.,

professor. His research interests including geometric computing, computer-aided design, advanced manufacturing and intelligent robotics.

LIU Yong-Jin, born in 1977, Ph.D., professor. His research interests including computational geometry, computer graphics and pattern analysis.

Background

Additive Manufacturing (namely 3D printing) has been used in many aspects of our daily life including engineering design, architecture construction, engineering proofing, biomedical treatment, etc. 3D printing technology has many advantages comparing to traditional manufacturing methods. For instance, it lowers the cost, speeds up the manufacturing process. Most

importantly, 3D printing can fabricate complicated objects which are difficult for others. In recent years, the prosperous developments of robotics offer many possibilities for 3D printing. Due to that, the problem of intergrading advanced robotics into 3D printing becomes a hot research topic of the intersection of robotics and manufacturing disciplines. Many

efforts have been devoted to this topic. Much interesting hardware and software have been designed which strongly expanded the range of applications of 3D printing. In this paper, we offer a detailed survey with regards to the multi-DOFs 3D printing. We classify the novel approaches and techniques into four categories from different angles of view including support-free printing, fast wireframe printing, building-around-inserts, large-scale printing, which expects to provide a full view for researchers and engineers. There still have many challenging problems that are awaiting further explorations, as well as potential research topics, which have been discussed at the end of this paper.

This work is supported jointly by The Natural Science Foundation of China under Grant No. 61725204, 61432003.

计算机学报