



—

2018

3D 打印

研究报告

AMiner 研究报告第十一期

—

清华大学(计算机系)－中国工程科技知识中心

知识智能联合研究中心 (K&I)

2018年9月

Contents 目录

1 概述篇

1.1 3D 打印相关概念	2
1.1.1 概述	2
1.1.2 发展历程	2
1.2 3D 打印材料	3
1.3 3D 打印机	4
1.3.1 打印机原理	4
1.3.2 打印机机械结构	5
1.3.3 打印机工艺	6

2 技术篇

1.4 3D 打印优缺点	8
2.1 切片算法	11
2.2 路径规划算法	11
2.3 几何优化问题	11
2.4 结构分析	12
2.5 材料表面效果	12
2.6 变形效果定制	14
2.7 机构设计	15

2.8 自支撑结构设计

2.8 自支撑结构设计	17
-------------------	----

3 人文篇

3.1 AMiner 大数据统计	19
3.2 学者信息	22
3.2.1 国际学者	22
3.2.2 国内学者	32

4 应用篇

4.1 医学	39
4.2 航空航天	39
4.3 军事	40
4.4 建筑	40
4.5 文物保护	41
4.6 艺术	42
4.7 交叉应用	43

5 趋势篇

5.1 生物 3D 打印	45
5.2 多自由度机器人 3D 打印	46
5.3 视觉反馈	49
5.4 金属打印	50
5.5 多机协作打印	50
5.6 打印云平台	50

图表目录

图 1 3D 打印流程概述图.....	4
图 2 Prusa i3 框架结构打印机示意图.....	5
图 3 箱体结构 3D 打印机示意图.....	5
图 4 Delta 三角洲打印机示意图.....	6
图 5 MJF 技术流程示意图.....	7
图 6 CLIP 技术流程示意图.....	7
图 7 利用塑料打印的复杂结构.....	8
图 8 利用木材打印的多孔结构.....	8
图 9 利用细胞打印的人体器官.....	8
图 10 利用金属打印的一次成型零件.....	9
图 11 Ondrej Stava 应力消除算法示意图.....	12
图 12 Weyrich 微平面算法示意图.....	13
图 13 微平面高度场算法示意图.....	14
图 14 材料赋值参数化流程图.....	15
图 15 Song 基于连锁积木的拆分算法流程图.....	16
图 16 3D 打印领域全球顶尖学者分布图.....	19
图 17 3D 打印领域全球顶尖学者迁徙图.....	20
图 18 3D 打印领域全球顶尖学者 h-index 分布图.....	20
图 19 3D 打印领域全球顶尖学者男女构成图.....	21



扫码订阅

摘要

3D 打印，即增材制造技术，于十九世纪末在美国起源，它以计算机三维设计模型为蓝本，通过软件分层离散和数控成型系统，用叠加的方式制造实体产品。近年来，由于市场的成熟及与计算机图形学、机器人学、生命科学、材料科学等领域的结合，3D 打印呈现了越来越丰富的可能性与越来越广阔的前景。

基于大数据时代的背景，文章第一部分介绍了 3D 打印的概念、历史、流程等基本理论，第二部分对 3D 打印常用技术进行了论述，第三部分利用 AMiner 大数据对 3D 打印领域人才概况及相关学者进行了介绍，第四部分对 3D 打印在医学、航空航天、军事、建筑等相关领域的应用情况进行了概述，第五部分根据 3D 打印现状展望了该领域的发展趋势。

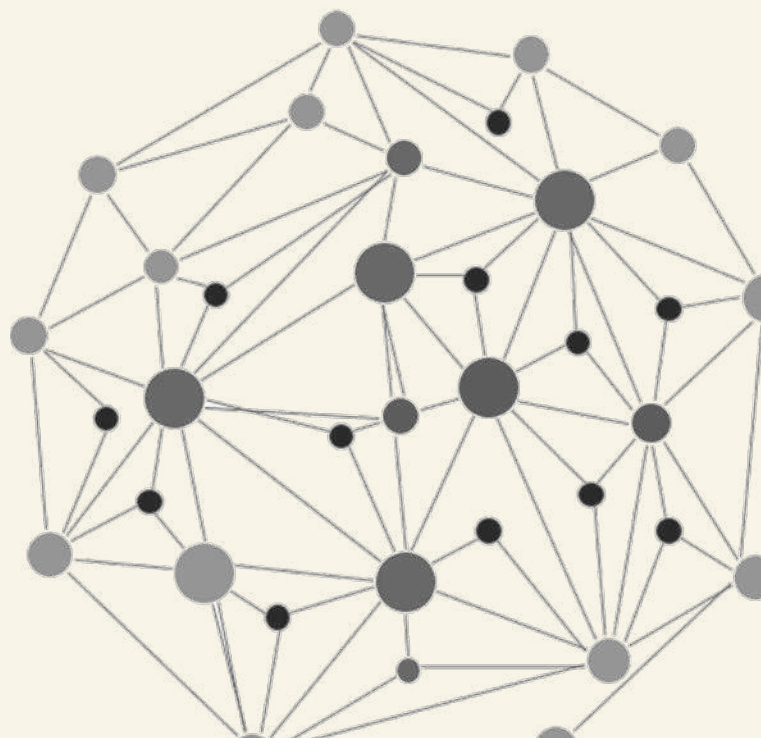
报告（电子版）实时更新，获取请前往：

https://www.aminer.cn/research_report/5c35c8275a237876dd7f1279?download=true&pathname=3d.pdf。

AMiner

1 concept

概述篇



1. 概述篇

本章从发展历程、打印材料、打印机三个方面描述 3D 打印特征，并总结了目前 3D 打印技术整体的优势与不足。

1.1 3D 打印相关概念

1.1.1 概述

3D 打印 (3D Printing)，即增材制造技术，是快速成型技术的一种。以计算机三维设计模型为蓝本，通过软件分层离散和数控成型系统，利用激光束、热熔喷嘴等方式将金属粉末、陶瓷粉末、塑料、细胞组织等特殊材料进行逐层堆积粘结，最终叠加成型，制造出实体产品。与传统制造业通过模具、车铣等机械加工方式对原材料进行定型、切削以最终生产成品不同，3D 打印将三维实体变为若干个二维平面，通过对材料处理并逐层叠加进行生产，大大降低了制造的复杂度。这种数字化制造模式不需要复杂的工艺、庞大的机床和众多的人力，直接从计算机图形数据中便可生成任何形状的零件，使生产制造得以向更广的生产人群范围延伸。

1.1.2 发展历程

3D 打印技术的核心思想于 19 世纪末的美国起源，到 20 世纪 80 年代后期 3D 打印技术发展成熟并被广泛应用。可谓是“上上个世纪的思想，上个世纪的技术，这个世纪的市场”。

1860 年，多照相机实体雕塑 (Photosculpture) 的专利被法国人 Francois Willème 申请。

1892 年，一项采用层合方法制作三维地图模型的专利技术在美国登记。

1992 年，Stratasys 公司推出了第一台基于 FDM 技术的工业级快速成型打印机。

1993 年，美国麻省理工学院 MIT 的 Emanuel Sachs 教授发明了三维打印技术。1995 年，麻省理工的两名学生 Jim Brecht 和 Tim Anderson 的毕业论文选题是便捷快速成型技术。两人把打印机墨盒里面的墨水替换成胶水，成功打印出了一些立体的物品。这是 3D 打印在学术上的首次成功尝试。

1996 年，3D Systems、Stratasys、Z Corporation 公司均各自推出了新一代的快速成型设备，此后快速成型便有了更加通俗的称呼——“3D 打印”。在此之前为研究领域所接受的名词是“快速成型”。

进入 21 世纪，3D 打印技术迅速发展，2005 年，Z Corp.公司推出世界上第一台高精度彩色 3D 打印机 Spectrum Z510，3D 打印由此有了精致的色彩；2009 年，Bre Pettis 创立了著名的桌面级 3D 打印机公司——Maker Bot，并出售 DIY 套件，购买者可自行组装 3D 打印机，将 3D 打印技术进一步推广开来；2015 年，美国 Carbon3D 公司发布一种新的光固化技

术——连续液态界面制造（Continuous Liquid Interface Production, CLIP），利用氧气和光连续地从树脂材料中逐出模型。将 3D 打印速度提升了一个阶段，且可以使用部分生物材料。此外，还有许多 3D 打印技术在汽车制造、首饰设计、食品、艺术、生物医疗、航空航天等领域的成功案例。

可以看出，本世纪大众思维的转变推动了 3D 打印市场的扩大，从而促进了 3D 打印技术的蓬勃发展。

1.2 3D 打印材料

3D 打印所使用的材料均针对 3D 打印设备专门研发，其形态为粉末状、丝状、层片状、液体状等等，与普通材料有所区别。以粉末状打印材料为例，根据打印环境的不同，其粒径一般为 1-100 μm 不等，且一般要求粉末有高球形度。

ABS 塑料：ABS（Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer）为使用最广泛非通用塑料之一，它将丙烯腈、丁二烯和苯乙烯的性能结合起来，具备耐冲击、耐高低温、耐化学药品、无毒无味的特性，此外，其易加工、可二次加工。

PLA 塑料：PLA（Polylactic-Acid）是一种新型的生物降解材料，使用可再生的植物资源（如红薯、玉米）所提炼出的淀粉原料制成。其相容性、可降解性、物理性能、光泽性与抗拉强度良好，适用于各种加工方法，尤其是吹塑与热塑。

工程塑料：工程塑料（Engineering-Plastics）是指被用做工业零件或外壳材料的工业用塑料，耐热性、耐冲击性、抗老化性与机械性能良好，主要用于工业。主要品种有：聚酰胺（尼龙），聚苯硫醚，聚碳酸酯，聚甲醛，PBT，聚苯醚。

光敏树脂：光敏树脂是由高分子组成的胶状物质，由于粘度低、固化收缩小速率快程度高、溶胀小、光敏感性高等特性，成型后产品外观平滑，呈现出透明至半透明的磨砂状。常见的光敏树脂有 somosNEXT 材料、树脂 somos11122 材料、somos19120 材料和环氧树脂。

橡胶类材料：橡胶类材料具备多种级别弹性材料的特性，其硬度低、断裂伸长率高、抗撕裂强度大、拉伸强度大，非常适合应用于要求防滑或柔软表面的领域。3D 打印的橡胶类材料产品主要有消费类电子产品、医疗设备以及汽车内饰、轮胎、垫片等。

金属材料：3D 打印所使用的金属粉末与一般金属不同，要求纯净度高、球形度好、粒径分布窄、氧含量低。目前，应用于 3D 打印的金属粉末材料主要有钛合金、钴铬合金、不锈钢和铝合金材料等，此外还有用于打印首饰用的金、银等贵金属粉末材料。其中钛合金强度高、模量低、耐疲劳性强，广泛应用于航空航天与生物医学。

陶瓷材料：陶瓷材料具有硬度高、密度低、耐高温、耐腐蚀等特性，广泛用于航空航天、汽车、生物医疗等行业。陶瓷颗粒越小，表面越接近球形，陶瓷层的烧结质量越好。由于目

前工艺的局限，复杂的陶瓷打印所需模具复杂、成型困难、成本高，难以广泛应用。

复合型石膏粉末：这是一种全彩色的打印材料，具有易碎、坚固、色彩清晰的特点，成型后外表会出现细微的颗粒效果，外观很像岩石，在表面曲面会出现环状纹理。

蓝蜡和红蜡：采用多喷嘴立体打印技术（MJM），表面光滑，多用于制造蜡模，利用失蜡铸造的原理，用于精密铸造。在珠宝、服饰、医疗、雕塑、艺术等领域广泛应用。

其他材料：细胞材料，在实验室培养出细胞介质，以水基溶胶为粘合剂；食品材料，加热为胶状的砂糖等。

1.3 3D 打印机

1.3.1 打印机原理

3D 打印可以简单地理解为“多层的二维打印”，3D 打印机一般使用特制的材料，基于笛卡尔机械坐标系，按照三维图纸，将其一层层喷涂或者熔结到三维空间中，从而制作出传统制造工艺难以制作的高复杂度产品。3D 打印机主要由高精度机械系统、数控系统、喷射系统、计算机技术组成的机电一体化复杂系统。概括来说，3D 打印机的制造过程一般要经历三维建模、分层切割、打印喷涂和后期处理四个阶段，如图所示：

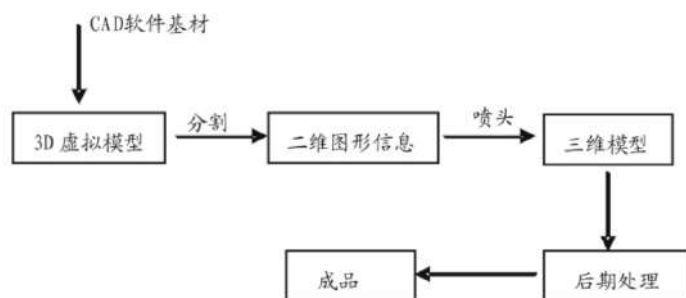


图 1 3D 打印流程概述图

三维建模：分为扫描和手动建模两种。扫描是一种自动建模的方法，即通过 GOSCAN 之类的扫描设备获取扫描对象的三维数据，并自动生成三维模型；手动建模是从零开始，使用三维建模软件，如 Blender、AutoCAD、C4D，在直角坐标系中建立三维模型。目前大部分 3D 打印机均基于 stl 格式设计。

分层切割：由于 3D 打印机不能直接操作 3D 模型，需要通过打印机配备的专业软件将模型文件处理为打印机可识别的描述方式，分为多层薄片，每层厚度由打印材料的属性与打印精度决定。

打印喷涂：打印机按照分层切割的蓝图，将打印材料逐层喷涂或熔结到三维空间中。这一阶段有多种实现方式，较为普遍的方式是先喷一层胶水，再添加粉末，循环往复；或是用

高能激光融合金材料，层层绘制，熔结成产品；比较先进的是连续液态界面制造，利用氧气和光连续地从树脂材料中逐出模型。这一过程根据模型大小、复杂程度与打印材料不同，耗时几分钟到几天不等。

后期处理：打印喷涂结束后一般会有一些粗糙截面与材料毛刺，便需要对模型进行后期处理，包括固化、修整、打磨、上色等。这一阶段与 3D 打印技术关系较小。

1.3.2 打印机机械结构

打印机可以按照其机械结构分为 Pursa-i3 框架结构、箱体结构、Delta 三角洲结构与其他结构。

Pursa-i3 框架结构：Prusa-i3 是 Reprap 打印机 Prusa-Mendel 发展至今的第三代机型，主体为一个矩形龙门架，其与水平方向的杠杆共同负责打印头 z 轴与 x 轴方向的移动，底部水平的打印平台负责 y 轴方向的移动。

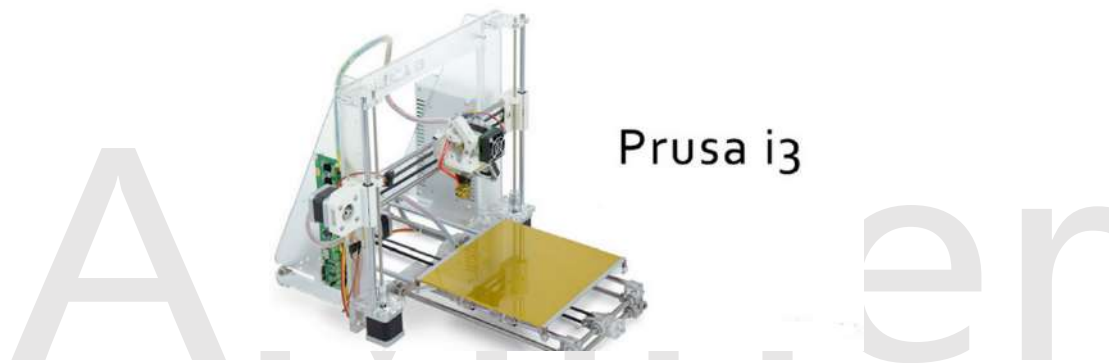


图 2 Prusa i3 框架结构打印机示意图

箱体结构：这是市面上最流行的结构，箱体为打印机工作提供了很好的保护，符合现代家用机的需求。通过电机或传送带带动打印头沿 x y 轴移动，打印平台沿 z 轴上下移动，节约了空间，符合 3D 打印机的工作原理。



图 3 箱体结构 3D 打印机示意图

Delta 三角洲机型：其专业名为并联臂结构，由三个并联臂协同工作，采用一种特殊的插值算法进行坐标定位，对于弧形结构采用多个直线段逼近的方式运算，打印平台固定。三

三角洲机型的运动结构可以分成两种，一种是目前市场上普遍的三棱柱框架结构，以和 Kossel 打印机为代表，偏向实际应用；另一种是并联机械手臂结构，偏向理论数据分析。



图 4 Delta 三角洲打印机示意图

1.3.3 打印机工艺

按照材料形式与工艺实现方法，可将打印机工艺分为如下五大类^[1]：

- a) 粉末或丝状材料高能束烧结、熔化成型，如选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, 简称 SLS)，选择性激光熔化 (Selective Laser Melting, 简称 SLM)。
- b) 丝材挤出热熔成型，如熔融沉积成型 (Fused Deposition Modeling, 简称 FDM)。
- c) 液态树脂光固化成型，如立体光固化成型 (Stereo Lithography Apparatus, 简称 SLA)，数字光处理 (Digital Light Processing, 简称 DLP)。
- d) 液体喷印成型，如三维打印 (Three-Dimension Printing, 简称 3DP)。
- e) 片/板/块材粘结成型，如层叠实体制造 (Laminated Object Manufacturing, 简称 LOM)。

以下为三种较先进工艺的详细介绍：

● MJF (2014)

多射流熔融技术 (Multi-Jet Fusion, 简称 MJF)，特点是利用两个单独的热喷墨阵列来制造全彩 3D 物体的。打印时，其中一个会左右移动，喷射出材料，另一个会上下移动，进行喷涂、上色和沉积，使成品得到理想的强度和纹理。随后，两个阵列会改变方向从而最大化覆盖面。接着，一种细化剂会喷射到已经成型的结构上。之后会对已经和正在沉积的部分加热。这些步骤会往复循环，直至整个物体以层层堆积的方式打印完成。

MJF3D 打印工艺使用多种粘合剂和固化剂，使用多喷头革新了打印方式，可以实现丰富的纹理细节，融合了以往 3D 打印技术高速度、高强度、高精度的特点。

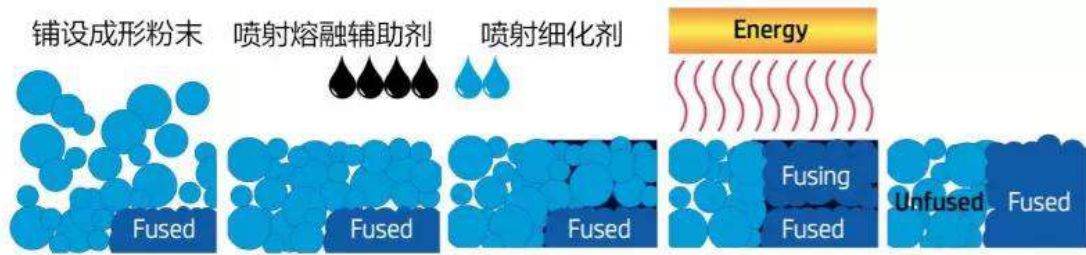


图 5 MJF 技术流程示意图

- **CLIP (2015)**

连续液界面生产工艺（Continuous Liquid Interface Production，简称 CLIP）工作原理是通过操纵光和氧气，将液体媒介中的物体融合在一起，构造出物体的 3D 模型。树脂在紫外线照射下会固化成型，液池下方的投影装置，使紫外线按照打印物件每一层剖面的形状照射液面。与此同时，当打印的某一层完成后，生长平台会向上提起，在刚刚长成的一层树脂上再长出新层。

CLIP 通过使用激光矫正和氧气固化流程，把传统机械的打印方法改变成可调谐的光化学过程，把层层叠加变成一次成型，是一种颠覆性技术。

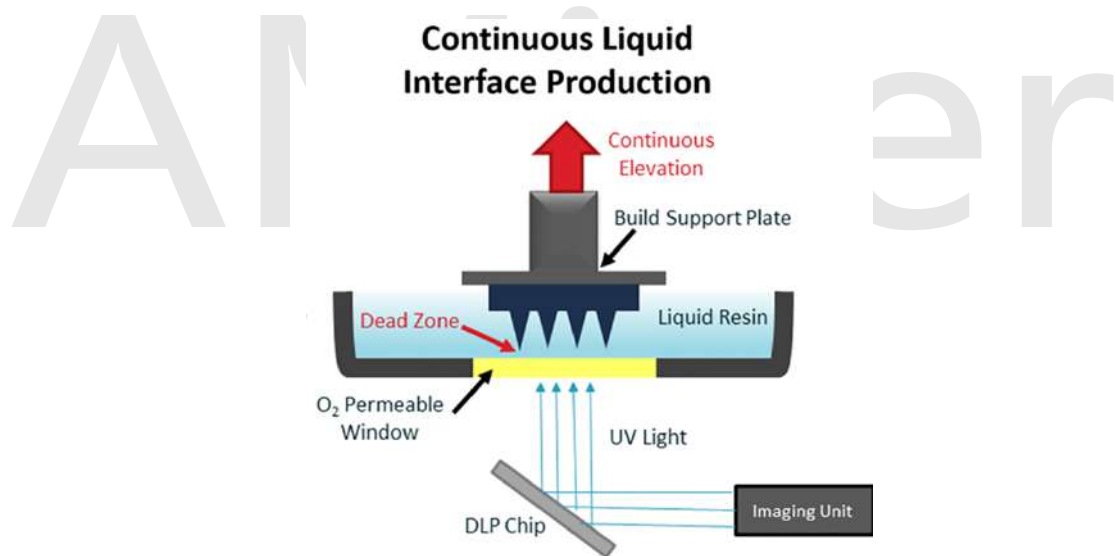


图 6 CLIP 技术流程示意图

- **Nano Particle Jetting (2016)**

纳米金属射流（Nano Particle Jetting）使用的原材料是液态金属。作业开始时，打印机会首先将大分子金属颗粒粉碎成纳米级技术颗粒。粉碎后的金属颗粒会注入 XJet 研发的粘合墨水中，金属不会在墨水中融化，而是形成悬浮物充满整个腔体。之后喷头挤出液态混合物，固化成型，打印产品。最后构建室会通过加热将多余的液体蒸发，只留下金属部分。

纳米金属射流技术可以快速打印出金属部件，该技术具有将金属 3D 打印的速度和打印

量都提升了一个台阶，并且可以实现极高的精度和表面光洁度，真空环境操作简单安全，支撑易拆除。但温度耐受能力较传统金属 3D 打印较低。

1.4 3D 打印优缺点

➤ 优势

3D 打印作为一种新型制造技术，突破了传统制造业技术的几个复杂性难题：形状复杂性、材料复杂性、层次复杂性和功能复杂性。也能减少成本，加速由设计到实现的过程。

形状复杂性：无论任何复杂的形状，只要能够在三维设计软件中设计出来，就能通过 3D 打印技术制造。



图 7 利用塑料打印的复杂结构

材料复杂性：全彩色、异质、功能梯度材料的结构，都可以用 3D 打印技术实现，如下图所示：



图 8 利用木材打印的多孔结构

层次复杂性：传统加工技术难以实现的多尺度（宏、介、微观），如原子打印、细胞打印利用 3D 打印技术都可以实现。



图 9 利用细胞打印的人体器官

功能复杂性：对于结构复杂的零件，3D 打印技术可以实现整体打印成型，避免了将一个复杂零件进行分拆制造后通过焊接成形而带来的质量增大和潜在的质量缺陷，甚至能够取消复杂零部件的装配。如下图所示的组件，通过 3D 打印整体成型。



图 10 利用金属打印的一次成型零件

减少成本：打印复杂的形状不会增加时间与原料成本，一体化成型的制造方法也能减少组装工人的介入，从而缩短供应链，加速制造进程。此外，与传统制造方式相比，3D 打印降低了对工匠的要求，减少了培养工匠所耗费的资源，能更充分地发挥个人的创造力。

3D 打印直接将虚拟的数字化实体模型转变为产品，极大地简化了生产流程，降低了研发成本，缩短了研发周期，减少了资源消耗，使得复杂结构零件的生产成为可能，对面向功能的产品设计具有重大的推进作用。

➤ 不足

3D 打印有着很多传统制造技术不可比拟的优势，但是产品最重要的属性是功能性，现在受材料等因素的限制，3D 打印产品的实用性仍存有疑问。同时也存在知识产权与社会道德的问题。

强度问题：3D 打印可以制造出各种复杂的外形，但是其产品能否达到传统制造产品的强度，3D 打印产品的功能性、力学结构、受力分析等等，都是需要考虑的问题。

精度问题：由于分层制造存在“台阶效应”，每个层次虽然很薄，但在一定微观尺度下，仍会形成具有一定厚度的一级级“台阶”，如果需要制造的对象对精度的要求很高，如何克服这种精度上的偏差就成为 3D 打印需要考虑的问题。

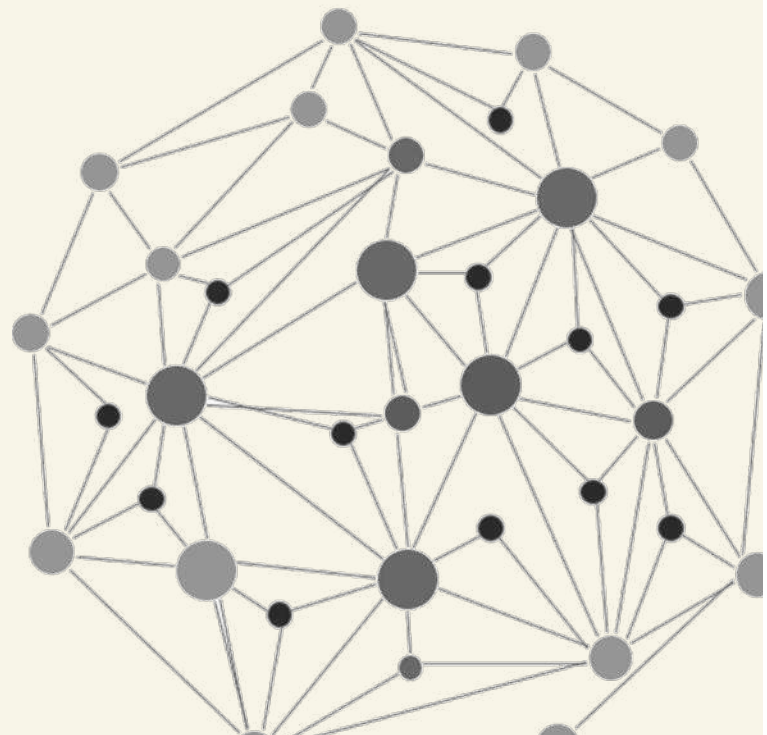
材料的局限：目前供 3D 打印机使用的材料非常有限，只有塑料、橡胶、金属、陶瓷与部分细胞原料等等，其用料大多成本高昂且工艺复杂，日常生活中大部分材料还无法打印。

知识产权：如果高精度的 3D 打印技术普及，大众复制事物的能力会极大提高，现实中的事物会得到更为广泛的传播，如何用法律法规来保护知识产权，仍是需要考虑的问题。

道德伦理：伦斯勒理工学院的博士生 Heather Dewey-Hagborg 通过收集陌生人的 DNA 打印出面部模型，美国在 2018 年将 3D 打印枪支合法化，3D 打印技术在这些方面的应用，会带来信任危机与恐怖主义等一系列的社会问题。

2 technolo

技術篇



2. 技术篇

3D 打印的算法主要包括切片算法与路径优化算法，近年来成果集中在计算机图形学领域的几何优化问题。

(1) 切片算法

1. 网格切片计算，以 STL 格式文件的网格类模型为切片对象。
2. 直接切片计算，直接在原始 3D 模型文件上计算，避免转为 STL 格式的误差。

(2) 路径规划算法

1. 平行扫描，也称为 Z 字路径，在边界内来回扫描，每一段路径均平行。
2. 轮廓平行扫描，填充路径由轮廓的一系列等距线组成。
3. 分形扫描，路径由一些短小的分形析线组成。
4. 星形发散扫描，默认将切片从中心分为两个部分，先后从中心向外填充，填充线互相平行。
5. 基于 Voronoi 图的扫描路径，根据切片轮廓的 Voronoi 图与一定的偏置量，在各边界元素的 Voronoi 区内生成该元素的偏置线，通过连接各个元素的偏置线得到一条完整路径。

(3) 几何优化问题

本质是化整为零，再积零为整。由于打印机打印空间有限，所以打印超出其打印空间的物体必须将其分割为若干块分别打印，最终按照选定的方法组装。通过合理排列各个部分，也可更充分利用打印空间从而提升打印效率。

目前物体分割问题有两种解决思路，一是 Chopper 分割^[2]，该方案采用平面分割的方式，自上而下进行分层，再将层间物块一分为二，分割结果可以根据不同的目标函数与用户引导调整。

二是基于曲率模型的分割^[3]。首先对模型表面进行曲率分析，构建其特征环，并选取合适的特征环，将模型分为若干子模型。但这种方法需要目标表面有明确的特征信息，适用范围有限。对于由多边形面构成的模型，可以用 Chen 等人^[4]提出的多边形面片拆分法，通过表面分割与变形，将 3D 模型分割与变形处理，生成多个面片，利用连接头组装。

➤ 重心优化问题

虚拟环境中，物体可无视重力，随意摆放，但打印输出为实物后就需要遵循物理规律，基于这种状况，Prévoist 等人^[5]提出了重心优化算法：对于站立式，模型与地面接触的点可构成一个支撑多边形，模型重心的投影要落在多边形中；对于悬挂式，要保证模型重心位于吊绳的正下方。通过掏空模型，与模型表面适度变形两种方法达到上述条件，无需其他支撑。

➤ 打印成本优化问题

Wang 等人^[6]结合桁架结构，提出了“蒙皮-刚架（Skin-Frame）”结构以减少材料消耗。内部刚架由细杆与节点构成，刚架间固定连接，力学特征好，质量轻便。通过优化建模，提出了这种迭代优化的方法，从随机的结构出发都可以保证蒙皮体积与刚架体积之和最小，并防止了刚架中的细杆与节点的冗余。该算法还可以优化支撑结构，同样可以在保证强度的基础上减少材料浪费。

（4） 结构分析

➤ 应力消除

Ondrej Stava 提出了应力消除的算法^[7]，依据原有模型创建新模型，使其与原模型外观相同，同时提高其结构强度。该算法通过一个轻量级结构分析解算器，先预设模型可能承受的物理荷载情况，并指定几种外部荷载计算识别原模型的强度问题，运用内部掏空、局部加厚与添加支撑的方法，避免高强度应力区的出现，从而提高模型的结构性能。但对于复杂的模型，这种方法很难保证其真实性与可靠性。

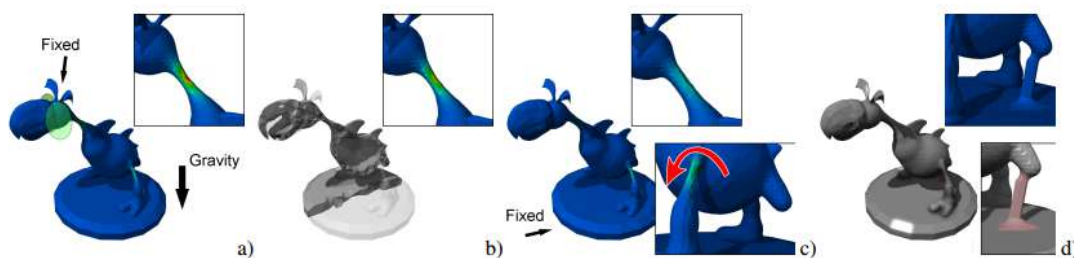


图 11 Ondrej Stava 应力消除算法示意图

➤ 最不利荷载

对于应力消除的弊端，可以通过最不利荷载的算法来弥补^[8]，该方案通过模态分析（Modal Analysis），计算输入模型各阶模态，对模型的每一阶模态，计算提取出相应的薄弱区域；对每一个薄弱区域，通过求解计算其相应的最不利荷载分布；用有限元方法计算在上述荷载分布作用下模型的应力；从而寻找一种最不利荷载的情况，预测物体在不同频率震动时最脆弱的部位，并据此标示出模型的最大变形区域，最终确定结果。

（5） 材料表面效果

➤ 次表面散射效果定制（Subsurface Scattering）

Hasan 等人^[9]测量一组给定材料的次表面散射特性，采用双向表面散射反射分布函数（Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distributional Function, BSSRDF）描述其特征曲线；根据这些曲线，可计算出不同材料与不同厚度组合后的次表面散射特征曲线，可将其称之为正向问题（Forward Problem）；与目标材料外观效果的匹配计算，给定一个材料的期望

散射曲线，通过非线性离散优化算法来确定出各层材料及其厚度，使它们组合出尽可能接近所要达到的目标效果。这个可称其为反向问题（Inverse Problem）。其中，优化算法通过物理约束剔除大量不合适的结果，实现高效地搜索基本材料的可能组合空间；将上述计算结果优化扩展到 3D 模型表面各点，通过调整包裹在模型表面不同厚度的各层材料，来实现目标效果。

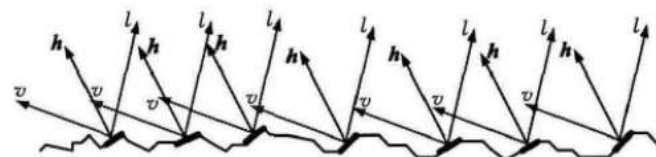
Dong 等人^[10]将此问题称为材料映射问题（Material Mapping），与 Hasan 相同，均采用 BSSRDF 函数来确定材料的次表面散射特性，同时还考虑了材料分布的约束条件（Layout Constraints），对于均匀厚度的情况，Dong 团队采用基于分簇的方法计算有效布局，对于薄厚不均的情况，采用局部散射曲线来初始化分层布局。

Papas 等人^[11]通过不同颜料与基本原料混合来实现不同材料的表面散射效果。

➤ 空间变化反射效果（Spatially Varying Reflectance）

在计算机图形学中，常用 BRDF 函数表示空间变化反射效果，Weyrich 等人^[12]给出了一个基于微平面（microfacet）理论的算法，其根据一个给定的物体表面 BRDF 分布，寻求得到物体微表面倾斜分布的可能结果，再对此分布采用点状方法采样，并以微平面为单元来构建物体表面，然后运用模拟退火方法优化微平面间倾斜连续性及其凹陷深度，最后得到表面高度分布场，实现所要达到的表面反射效果。microfacet 理论基本假设是，表面是由很多微平面（microfacet）组成，这些微平面都很小，无法单独看到；并假设每个 microfacet 都是光学平滑的。

每个 microfacet 把一个入射方向的光反射到单独的一个出射方向，这取决于 microfacet 的法向 m 。当计算 BRDF 的时候，光源方向 l 和视线方向 v 都得给定。这意味着在表面上的所有 microfacet 中，只有刚好把 l 反射到 v 的那部分对 BRDF 有贡献。在图中，我们可以看到这些有效 microfacet 的表面法向 m 正好在 l 和 v 的中间，也就是半角矢量 h 。



Microfacet 与光源方向 l ，视线方向 v ，半角矢量 h

图 12 Weyrich 微平面算法示意图

此方案对于物体表面有一定限制，物体由单一材料构成，不考虑透明情况，限制 microfacet 倾斜角在 65° 以内（可以忽略 microfacet 间的互相遮挡与反射情况），microfacet 边界尽可能连续。从而假定一个物体表面的最终反射效果由物体材料的 BRDF 特性与物体表面的高度场分布决定。

在这种假定下，物体表面总体的 BRDF 可看作是由一些基本 microfacet 的 BRDF 随着

微平面的法向不同而变化，最终的表面总体 BRDF 效果可以看作是由基本 BRDF 的半角分量与每一个微平面法向的球面卷积。大概流程是由所给的高亮形状到微平面分布，再由微平面分布到高度场分布，在得到想要的微平面离散集合后，此时微平面的高度值还未确定，可先对其倾斜角调整优化，使其分布能形成一个相对连续光滑的平面。文中这个过程通过模拟退火优化算法来计算三个能量函数使其最小化来完成。最后，利用上述优化结果，沿着高度方向移动每一个微平面使其分布尽可能连续，得到最终的高度场分布。这一过程可以表示为一个离散的泊松方程来求解。最终的结果可以得到一个近似于 C^0 连续的微平面分布。

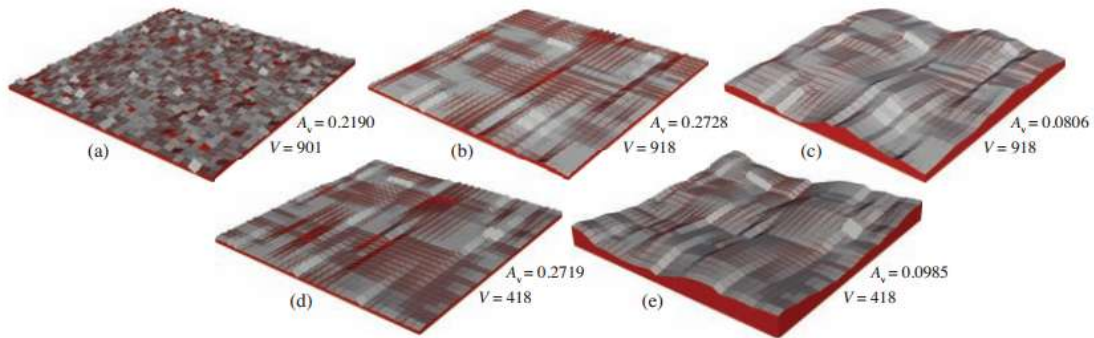


图 13 微平面高度场算法示意图

(6) 变形效果定制

不同材料的联合打印可以使我们能制造等复杂的物体，突破单一材料的局限。Bickel 等人^[13]研究了材料混合打印的问题，即如何在微尺度上，根据基础材料的力学性能曲线，打印出制定力学性能的多元材料混合体。

当前，多材料 3D 打印机在打印对象时需要指定对象内部的每一个要素，如果还需要一定的功能或其他要求时，确定体素的工作极其复杂，很难求解。因此，这一工作就需要采用一定的简化来表示。为了实现这一目标，Chen 等人^[14]采用简化树 (Reducer tree) 方式。这一方式在概念上有些类似 Maya 中的材质网络 (Shader Network)，只不过这里用一些预定义的形状与材料节点给对象所在空间进行合理赋值，实现材料赋值空间的参数化。因此，文中给出一个简化树的树型结构，它有两种类型的子节点：几何节点与材料节点。

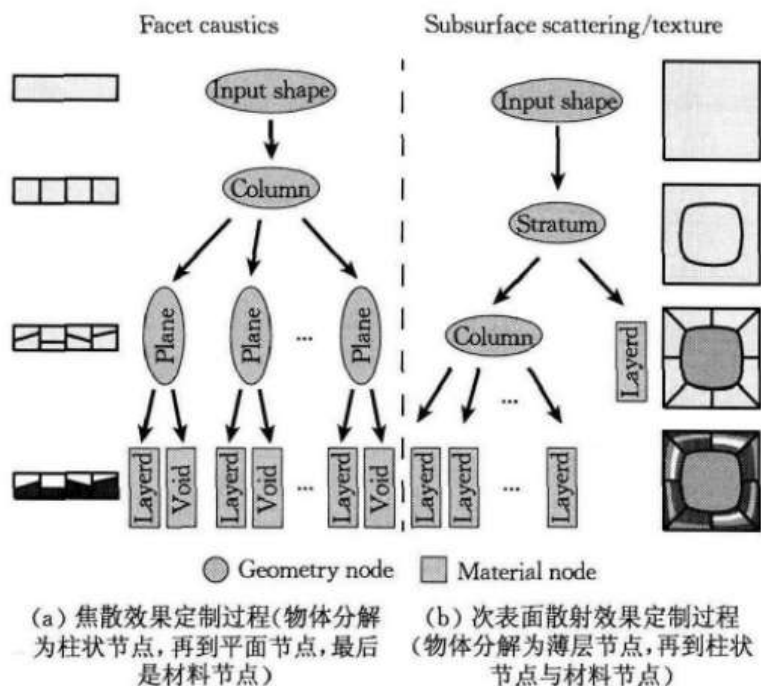


图 14 材料赋值参数化流程图

(7) 机构设计

➤ 积木式机构

积木式机构指由一些块状、片状或板状构件按一定要求组装在一起,构件间互相咬合锁定,最终形成一个稳定的结构。

Xin 等人^[15]基于鲁班锁的原理研究了这一课题:如何根据一个给定的 3D 模型来自动设计生成相应的鲁班锁结构。其原理是先生成一个具有 n 个部件的鲁班锁结构,作为节点(knot),作为模型组合的基础,从单节点结构到多节点结构,从而解决复杂模型的分块问题。以单节点模型为例,先将总体模型划分为 8 个区域,将一个 knot 放在模型内部,将其各个部件沿所在平面的轴向延伸至总体模型边界,并综合考虑各区域贴片问题。贴片生成方法有双面、多面与对称。

Song 等人^[16]基于连锁积木原理研究了相似课题:如何将一个给定 3D 模型分解为一组物块,自动设计生成相应的连锁积木结构。该方法以体素形状的积木模型为处理对象,记为 S ,依次从 S 身上递归抽取部分积木块,将其分解为一个积木块序列 P_1, P_2, \dots, P_n 和 S 中剩下的最后积木块 R_n : $S \rightarrow [P_1, R_1] \rightarrow [P_1, P_2, R_2] \rightarrow \dots \rightarrow [P_1, P_2, \dots, P_n, R_n]$ 。

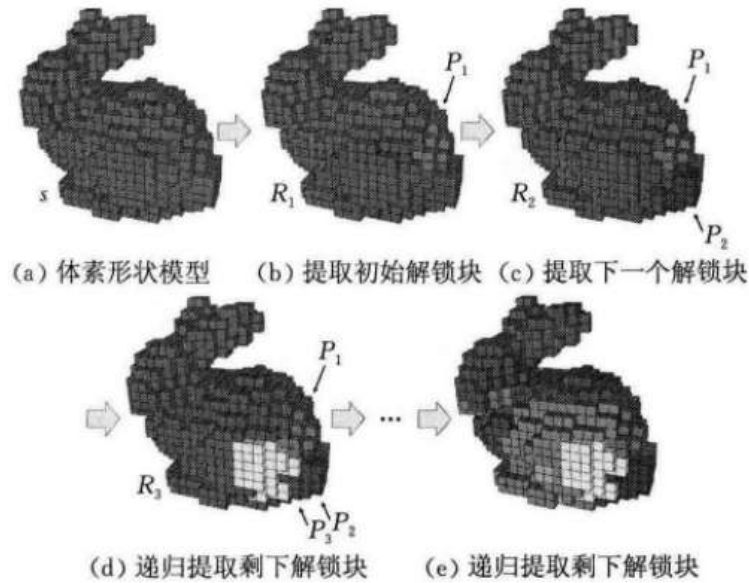


图 15 Song 基于连锁积木的拆分算法流程图

如果每一次分解中，都能保证只有一个积木块组件能取走解锁，而剩下的部分都不能互相解锁，则问题就可递归解决。其中， P_{i+1} 称为解锁块。按照这一策略，文中构造性方法主要可分为两步：（1）提取初始解锁积木块；（2）递归依次提取其他解锁积木块。

➤ 动态玩具机构

Zhu 等人^[17]研究了玩具机构的设计；Coros 等人^[18]研究了机械角色机构运动；而 Ceylan 等人^[19]则研究了基于视频输入的机械机器人设计。其主要方法和流程基本相似，可以总结如下：给定一个运动的输入，可以是一组动画曲线，也可以是一段动画视频，系统会从预定义的部件库中选取合适的部件将其组合，然后再优化这些部件的参数，使整个机构的运动输出与所给运动输入保持一致。

➤ 关节机构

Cali 等人^[20]和 Bacher 等人^[21]就此问题分别作了一些探讨研究，从总体过程来看，两人的方法大体相似，可简要总结如下：首先，将所给模型按一些要求分割为不同组成部分；然后将分割后的模型用合适的关节拼接起来。两人在分割方法与关节处理稍有不同。

➤ 免组装机

免组装机是指在零件设计阶段将组成机构的各个零件组装好，然后一次性直接制造出，免去后续组装工序的机构。这种机构不仅仅是机构设计概念的创新，在更深的意义上，这种理念的存在极大地解放了机构设计的自由度，因为这样设计者无需考虑装配方式与装配空间，同时也能提升三维机构模型创新能力，为现代机械及一体化设备设计、创新和发明提供系统的基础理论和有效方法。

(8) 自支撑结构设计

➤ 自支撑结构曲面设计

现有方法大多是基于推力网络分析方法 (Thrust Network Analysis, TNA) 来处理的。这种方法需要有深厚的结构设计知识基础, 与大量的人工设计计算工作。在这样的背景下, 近年来有一些研究者开始探讨如何利用计算机来处理上述问题, 如 Panozzo 等人^[221]、De Goes 等人^[23]、Liu 等人^[24]及 Vouga 等人^[25]。上述问题可具体表示为: 给定一个曲面, 如何能自动快捷地生成一个与其相同或相近的自支撑结构曲面, 其结构基本元素为三角形或四边形。

➤ RF 结构设计

自支撑结构中, 还有一类 RF (Reciprocal Frame Structures) 结构也很有价值。这种结构由一些 RF 单元互相搭接而成, 每一个 RF 单元与其相邻单元相互支撑, 最终整个结构在外围受到外墙、环梁或锚点的支撑而稳定成形。针对大尺度复杂的 RF 结构设计问题, Song 等人^[26]将其分解为两步, 即先在 2D 构建基本 RF 单元的组合分布, 再通过一个 3D 导轨面将其提升到 3D 空间, 并在保持几何外形条件下, 对杆件的位置优化以提高结构的整体性与稳定性。

AMiner

3 talent

人才篇



3. 人才篇

3.1 AMiner 大数据统计

AMiner 基于 3D 打印领域三个最顶级国际期刊发表的学术论文，ACM T GRAPHIC，IEEE-ASME T MECH 与 J INTEL MAT SYST STR，进行统计。一篇论文如果有多个作者，则每个作者均统计一次，按照近五年（2014-2018）发文量，取发文量数 ≥ 3 的学者（共 315 人），兼顾发文被引用量，进行分析，得出结论如下文所示：



图 16 3D 打印领域全球顶尖学者分布图

这里的学者分布以其所属机构与机构所属地区为依据，不考虑个人的国籍、使用语言与现居地。按大洲来分，北美以 162 人的学者数位居第一，欧洲 83 人，亚洲 69 人，南美 1 人，其他三个大洲均无学者分布。

更进一步，以国家与地区的角度来看，北美学者主要集中在美国（146 人），加拿大仅有 16 人，其他北美国家无分布。美国的学者在东西海岸均有大量分布，东海岸 63 人，主要集中在纬度较高的纽约（16 人）与波士顿（22 人）；西海岸 66 人，主要分布在西雅图（13 人）、旧金山（15 人）与洛杉矶（20 人）。内陆学者又主要分布在低纬度地区。

欧洲学者主要集中在西欧（78 人），东欧仅有 5 人。西欧的学者主要集中在法国（18 人）与德国（25 人），其他各个国家分布较均匀。

亚洲学者主要集中在东亚（51 人），中东地区也有较多学者分布（15 人），东南亚有 2 人，南亚仅有 1 人。东亚学者主要集中在中国（43 人），东部沿海地区优势明显，尤其是北京（11 人）、上海（11 人）、广州（11 人）。韩国 6 人，日本 2 人，新加坡 2 人，印度 1 人。以色列以 11 人的优势在中东占绝对地位。

由上列数据可知，西欧地区与美国在 3D 打印研究领域优势明显，尤其是美国，聚集着

近半数的顶尖学者，占比 46.34%；中国在此领域也占有 13.65%左右的比重，对 3D 打印领域做出了突出贡献；此外，中东地区也有 4.76%左右的学者分布，是不可忽视的力量。顶尖学者基本均集中在发达国家，但有一部分发达国家对此领域贡献不足，如韩国（1.90%）、日本（0.63%）、澳大利亚（0%）。

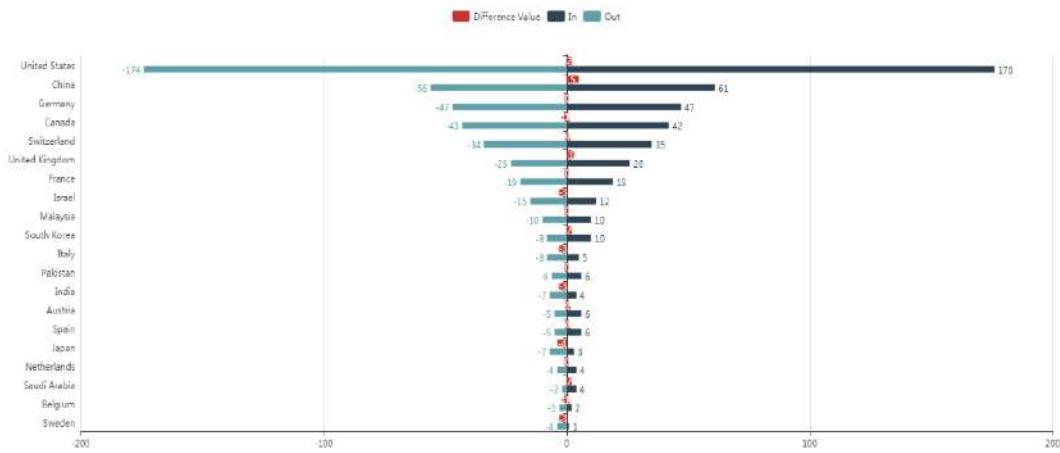


图 17 3D 打印领域全球顶尖学者迁徙图

由上图可以看出，各国 3D 打印领域人才的流失和引进是相对比较均衡的。其中美国是 3D 打印领域人才流动大国，人才输入和输出都大幅领先，且从数据来看，人才流出略大于流入。中国、德国、加拿大和瑞士等国人才流动量落后于美国，中国人才流入量大于流出量。

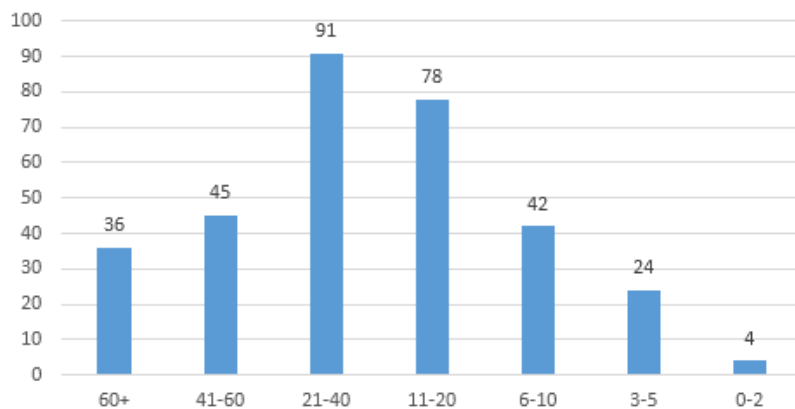


图 18 3D 打印领域全球顶尖学者 h-index 分布图

在上图的统计信息中，全球 3D 打印学者 h-index 多在 21-40 这一区间，约为 28.88%；其次为 11-20 区间，约为 24.76%；最顶尖学者（h-index ≥ 60 ）占比为 11.42%，有相当大的比重。可以看出，在全球顶尖学者中仍有 h-index 较低的学者（h-index 为 0-10），3D 打印领域的研究质量相距较大、研究方向不宽泛。

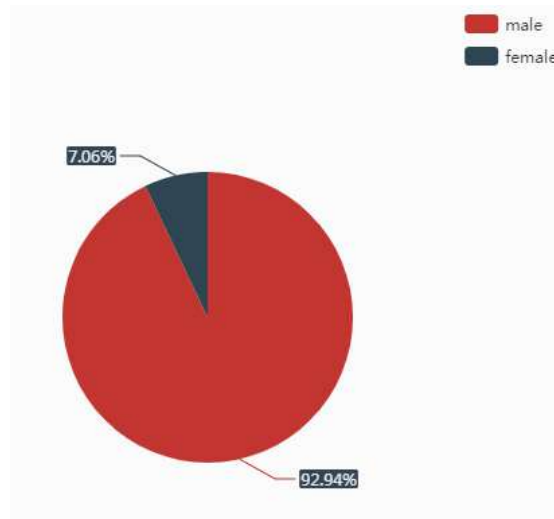


图 19 3D 打印领域全球顶尖学者男女构成图

在上图的统计信息中，3D 打印领域全球顶尖学者男性占绝对优势，约为 92.94%，男性学者掌握者这个领域的话语权。

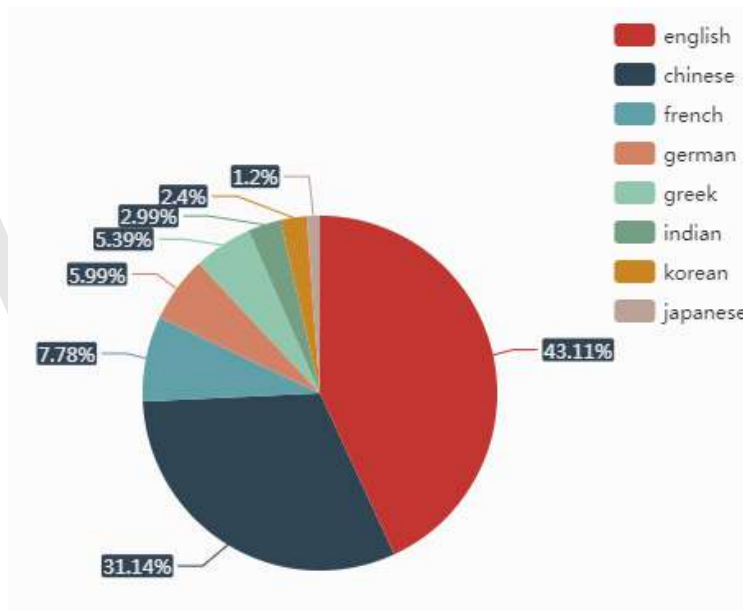


图 20 3D 打印领域全球顶尖学者使用语言比例图

在上图的统计信息中，3D 打印领域全球顶尖学者使用语言以英语和汉语为主，其中英语使用者占 43.11%与美国学者比重相差不大（46.34%）；汉语使用者占 31.14%，远大于中国的学者比重（13.65%），此外，德语、希腊语与印度语也占有一定比重，均为 5%左右。

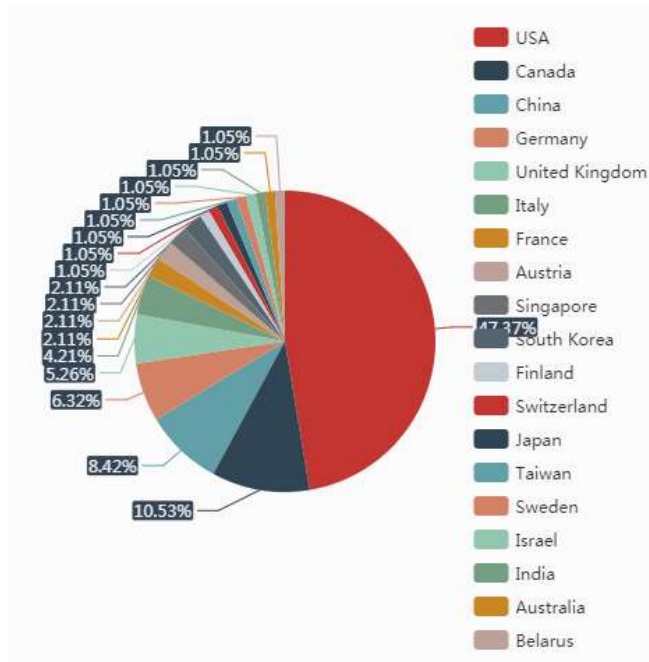


图 21 3D 打印领域全球顶尖学者现居地构成图

在上图的统计信息中，3D 打印领域现居地为美国的全球顶尖学者占了近半数，为 47.37%，其次为加拿大（10.53%）、中国（8.42%）、德国（6.32%）。与图 20（使用语言比例图）对比可知，汉语使用者与现居地在中国的学者差值为 22.72%，绝大部分部分汉语使用者不在中国居住，占使用汉语的学者比重约为 72.96%。

3.2 学者信息

3.2.1 国际学者

- Charlie C. L. Wang



Charlie C. L. Wang

H 30 A 71.86 S 23.91 C 3356 P 189

Professor

Department of Design Engineering, Delft University of Technology

Geometric Modeling Structured Grid Solid Modeling Point Clouds Surface Reconstruction
Energy Minimization Freeform Surface Nurbs Surface

Research Interests

Geometric Modeling Structured Grid Solid Modeling
Point Clouds Surface Reconstruction

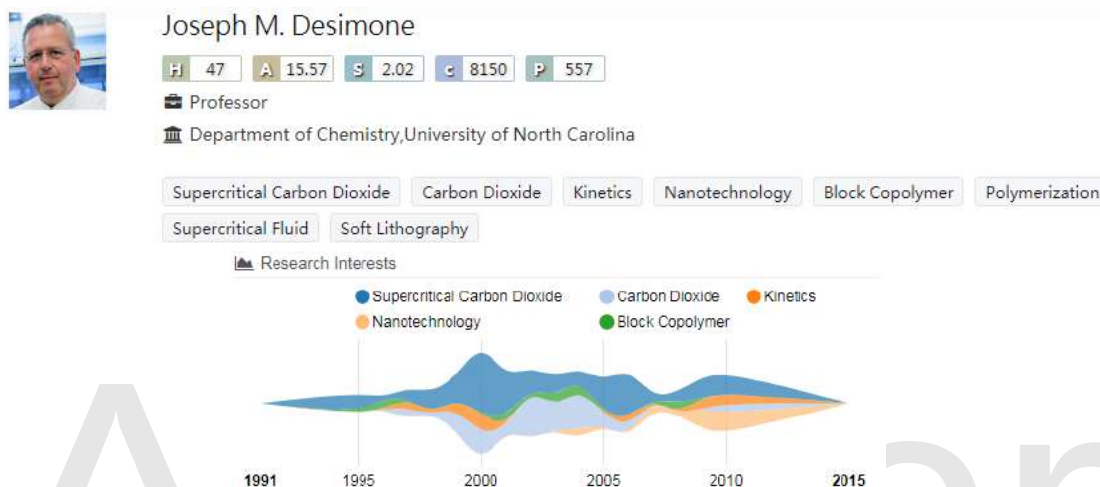


Charlie C.L. Wang 现任荷兰代尔夫特理工大学设计工程系高级制造系的教授和主席。在

此之前，他于 2002 年获香港科技大学机械工程学系博士学位，曾在香港中文大学（中大）担任机械及自动化工程的全职教授/副教授/助理教授。

Charlie C.L. Wang 教授曾获 2016 ASME CIE 研究卓越奖，2009 ASME CIE 年轻的工程师奖，2008 年和 2001 年 ASME CIE 会议的最佳论文奖，2011 普拉卡 Krishnaswami CAPPD ASME CIE 会议最佳论文奖，2013 NAMRI 中小企业优秀论文奖。他是 Computer-Aided Design, IEEE TASE, 以及 ASME JCISE 的编委会成员；ASME (American Society of Mechanical Engineers) 的 Fellow (会士)。

● Joseph M. DeSimone



DeSimone 是北卡罗来纳大学 (UNC) 的 Chancellor's Eminent 化学教授以及北卡罗来纳州立大学 (NC State University) 与北卡罗来纳大学化学系的 William R. Kenan, Jr. Distinguished 化学工程教授。DeSimone 于 1990 年获得弗吉尼亚理工大学 (Virginia Polytechnic Institute And State University) 化学专业博士学位。

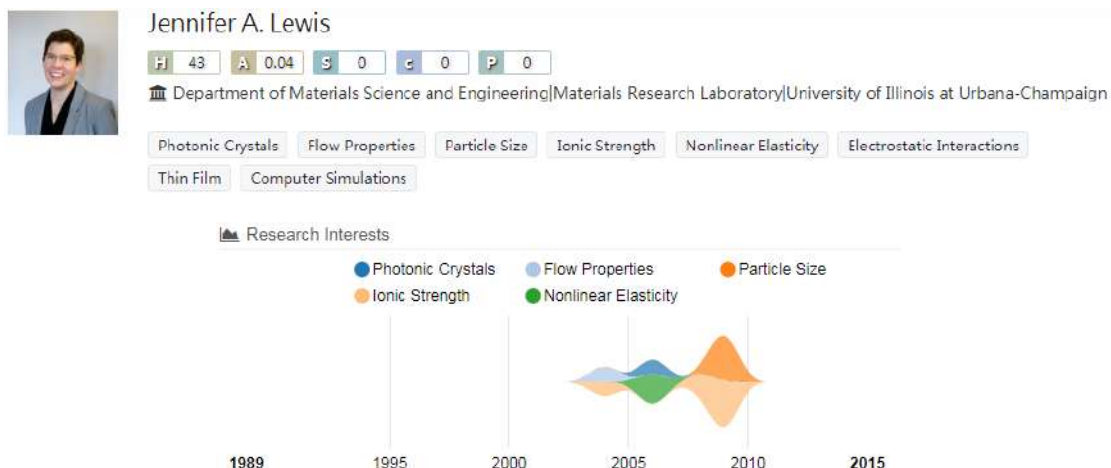
他的研究领域是高分子科学，医学，能源和其他先进技术领域。包括各种癌症在内的疾病的潜在机制，并使用纳米技术来设计更好的治疗方法和疫苗；探索锂离子和锂空气电池的新方法；以及使用 3D 打印制造医疗设备。目前工作的核心是其实验室发明的 PRINT 纳米粒子制造技术，以及新开发的 CLIP 技术。

DeSimone 是北卡罗来纳大学 Lineberger 综合癌症中心成员、纽约 Memorial Sloan-Kettering Cancer Center 助理成员以及北卡罗来纳大学先进材料、纳米科学和技术学院 (Institute for Advanced Materials, Nanoscience and Technology) 和纳米医学院 (Institute for Nanomedicine) 主任。DeSimone 已当选美国国家科学院 (National Academy of Sciences) 和美国国家工程院 (National Academy of Engineering) 院士，这是美国科学家和工程师所能获得的最高荣誉。

DeSimone 曾获 2016 国家技术和创新奖，这是美国在技术进步方面所取得的最高荣誉，2015 年 Kabiller 纳米科学和纳米医学奖，2014 年 IRI 奖章，2014 年迪克森科学奖，2014 年

美国化学学会 Kathryn C. Hach 创业成功奖，2012 年 Walston Chubb 创新奖，2010 美国科学促进会导师奖，2009 年美国国立卫生研究院院长的先锋奖，2009 年北卡罗莱纳州奖，2007 年化学研究理事会协作成功奖，2005 年美国化学学会创意发明奖，杜邦公司 2002 年度工程卓越奖，美国化学学会特拉华分会颁发的 2002 Wallace H. Carothers 奖，以及北卡罗来纳大学颁发的 2000 Oliver Max Gardner 奖。

● Jennifer A. Lewis



Jennifer 是美国哈佛工程与应用科学学院 Wyss 生物启发工程研究所的 Hansjorg Wyss 教授；同时是 Wyss 生物启发工程研究所的核心成员。

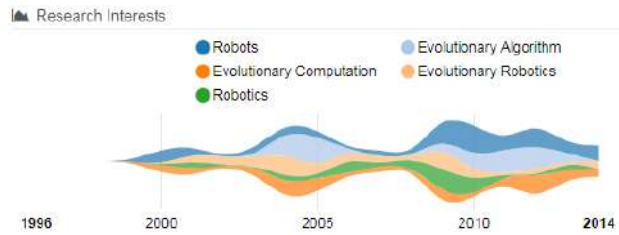
她的主要研究兴趣涉及材料与器件，生物与人造系统，以及能源与环境系统。她通过整合材料合成、复杂流体、微流控、3D 打印，设计制造了在不同尺度上可控成分和结构的材料。

她是 Voxel8 的创始人，是 Electroninks.Inc 的联合创始人，是美国艺术与科学学院成员（2012 年当选），国家工程院成员（2017 年当选），国家科学院成员（2018 年当选）。她还是美国陶瓷学会会员，美国物理学会和材料研究学会的会员。

Jennifer 曾获国家科学基金会总统教职研究员奖（1994 年），斯伦贝谢基金会奖（1995 年），Brunauer 奖和美国陶瓷学会 Robert 2003 Sossman 奖（2003 年，2016 年），材料研究学会奖章（2012 年）和美国化学学会 Langmuir 讲座奖（2009 年）。2014 年，她被“外交政策”杂志评为年度“100 位全球领先思想家”之一。

● Hod Lipson





Hod Lipson 是美国哥伦比亚大学创意机器实验室的总监及工程学教授。Lipson 在 Technion 以色列理工学院 (Technion-Israel Institute of Technology) 机械工程专业获得了理学学士学位 (1989 年) 和博士学位 (1998 年)。

Hod Lipson 的工作重点是进化机器人, 设计自动化, 快速原型制作, 人工生命以及创造可以展示人类创造力的机器。

在 2001 年加入康奈尔大学之前, 他是布兰迪斯大学计算机科学系的助理教授, 麻省理工学院机械工程系的后研究员。其曾获 2017 年机器人艺术大赛第一名 (Robotic Art competition), 2013 年入选 Tau Beta Pi Honor Society 的优秀教员, 2012 年美国国家工程院年度 Gilbreth 讲师, 2011 年福布斯“世界七大数据科学家 (Top 7 Data Scientists In The World)”, 2008 Rapid Prototyping Journal 最佳论文奖, 2008 年教务长杰出奖学金, 2008 年美林教育家奖 (Merrill Educator Award)。2006 ENTRY “机器人领域最重要创新”, 2005 最佳技术奖 (Best-in-Tech, 麻省理工学院技术评定)。

● **Edward T. Samulski**

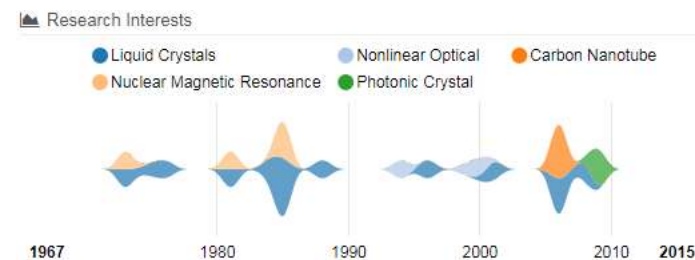


Edward T. Samulski

H 52 A 1.73 S 0 c 12154 P 250

Department of Chemistry | University of North Carolina at Chapel Hill

Liquid Crystals Liquid Crystal Nonlinear Optical Carbon Nanotube Nuclear Magnetic Resonance Photonic Crystal
Biological Systems Smart Materials



Edward T. Samulski, CLIP 创始人之一, 应用化学领军人物。现任卡罗莱纳州化学系荣誉退休教授, 应用科学系主任, 于 2005 年至 2006 年担任国务院高级科学顾问。

他的研究领域涉及液晶、3D 打印、非线性光学、碳纳米管、核磁共振、高分子聚合物等方面。

Edward T. Samulski 教授与 Carbon3D 的 CEO 约瑟夫·德西蒙尼 (Joseph M. DeSimone)、

以及 Carbon3D 的首席技术官亚历克斯·叶尔莫什金 (Alex Ermoshkin) 共同发明了“连续液面生长”(Continuous Liquid Interface Production, 简称 CLIP) 的 3D 打印技术。

他曾获 2017 年 Herman F. Mark 高分子化学奖, 2008 创立 Allotropica Technologies 公司, 2013 创立 Carbon.Inc 公司, 1989 年建立了 UNC 国际公认的高分子化学课程。

● Chee Kai Chua (蔡志楷)

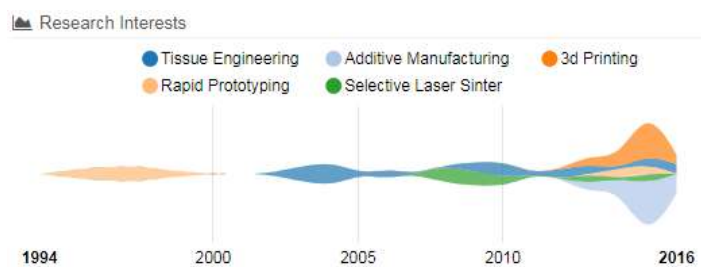


Chee Kai Chua (蔡志楷)

H 28 A 0.21 S 0.03 c 6626 P 75

Additive Manufacturing Tissue Engineering 3d Printing Selective Laser Melting Rapid Prototyping

Selective Laser Sinter Ceramic Tableware Design Methodology



Chee Kai Chua (蔡志楷), 现任新加坡 3D 打印中心执行董事。蔡教授于 1996 年获得南洋理工大学获得博士学位, 于 1989 年和 1985 年获得理学硕士和工程学士 (荣誉) 一等学位。

蔡志楷教授自 1990 年以来一直致力于 3D 打印 (3DP 技术), 研究方向包括几何建模、快速成型、增材制造、3D 打印、逆向工程、生物医学工程设计、组织工程。

他正在进行的研究包括: 使用 3DP 开发新的生物医学应用材料和技术, 如假肢、植入物、医疗装置和组织支架; 选择性激光制造 (SLM) 中金属和陶瓷知识库的开发; 使用 Polyjet 喷墨技术生物制造组织工程支架。

蔡志楷教授荣获 2018 年享有盛誉的国际自由形式和增材制造卓越奖 (FAME) 奖。2014 年, 蔡教授被 Clarivate Analytics 选为 AM 研究领域的顶尖科学家, 并一直保持其作为被引用次数最多的科学家之一的地位。是《3D Printing and Additive Manufacturing》作者之一。

● 陈勇



Associate Professor of Industrial and Systems Engineering and Aerospace and Mechanical Engineering

Education

Doctoral Degree, Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology

Master's Degree, Mechanical Engineering, Huazhong University of Science & Tec

Bachelor's Degree, Mechanical Engineering, Zhejiang University

陈勇, 3D 打印系统的先驱和世界领导者, 被认为是美国最优秀的年轻工程师之一。现任南加州大学 (USC) 爱泼斯坦工业与系统工程学系副教授, 南加州大学本科 Fab 实验室的

学术顾问。他于 2001 年在乔治亚理工学院获得机械工程博士学位。在 2006 年加入南加州大学之前，他是 3D 系统公司的高级研发工程师。

陈勇博士的研究主要集中在微尺度和中尺度的增材制造(3D 打印)，特别是建模、分析、合成和优化数字设计和制造。

他曾获 2005 年、2008 年、2011 年和 2012 年 ASME 25 届、28 届、31 届和 32 届年度计算机与工程信息(CIE)会议上获得四项最佳论文奖；2012 年 ASME 年度制造科学与工程大会(MSEC)最佳论文奖；在 2011 年和 2013 年举行的第 39 届中小企业和第 41 届北美制造业研究大会(NAMRC)上分别获得两项优秀论文奖；2010 年第 21 届国际固体自由形态制造(SFF)研讨会优秀论文奖；2013 年第 8 届微加工国际会议(ICOMM)获奖论文 2011 年，他还获得了一家主要的增材制造期刊《快速原型》(Rapid Prototyping Journal)的年度杰出论文奖。

陈勇获得的其他主要奖项包括:2012 年国家自然科学基金会教师早期职业发展奖(Career Development.World)、2008 年美国制造工程师协会(SME)颁发的杰出青年制造工程师奖、2010 年美国机械工程师学会(ASME CIE)颁发的领导力与服务奖，通过 2009 年和 2013 年美国国家工程院(NAE)前沿工程研讨会的邀请。

● Wojciech Matusik



Wojciech Matusik

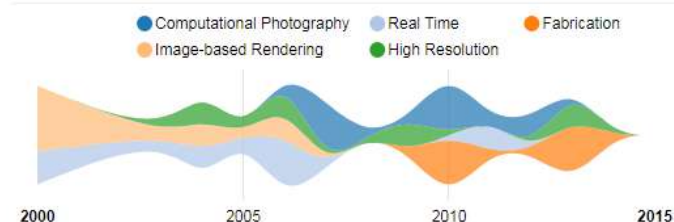
H 32 A 7.65 S 0 c 6064 P 57

Associate Professor

the Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory at MIT

Computational Photography Real Time Fabrication High Resolution 3d Display Image-based Rendering
Image Quality Image Processing

Research Interests



Wojciech Matusik 是麻省理工学院计算机科学和人工智能实验室的电气工程与计算机科学副教授，是 MIT 计算制造集团的负责人，是计算机图形学集团的成员。他曾在三菱电机研究实验室，Adobe Systems 和迪士尼研究苏黎世工作。

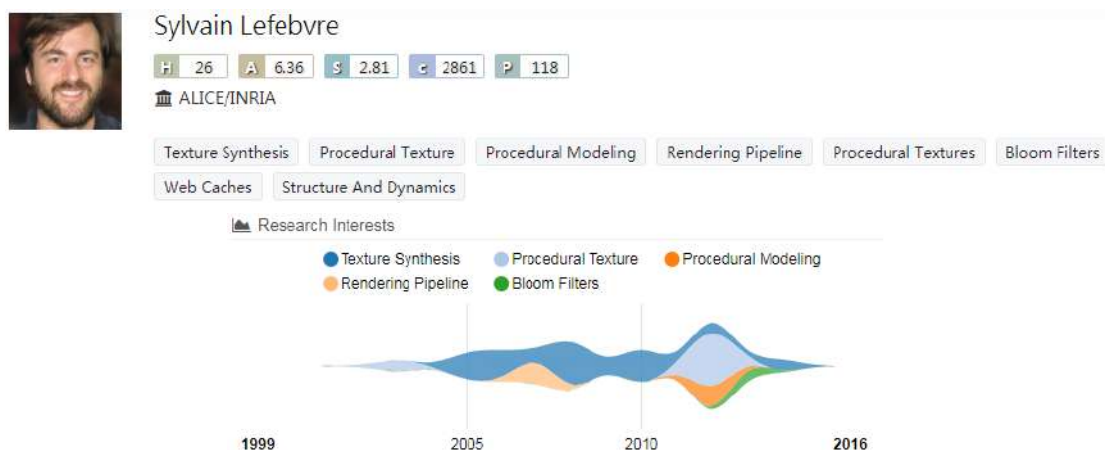
他于 2003 年获得麻省理工学院学习计算机图形学博士学位，于 2001 年麻省理工学院的 EECS 硕士学位，于 1997 年获得加州大学伯克利分校的 EECS 学士学位。

Wojciech Matusik 的研究领域是直接数字制造、计算机图形学和 3D 打印，目前进行的

项目为 CAD 模型的交互式设计优化、多旋翼设计、Simit 语言设计。

他曾获麻省理工学院 EECS - 2003 Sprowls 博士论文奖，他被麻省理工学院的“技术评论”杂志评选为世界 100 强年轻创新者之一，2009 年，他获得了 ACM Siggraph 颁发的重要新研究员奖，2012 年，他获得了 DARPA 青年教师奖，并被任命为斯隆研究员（Sloan Research Fellow，纽约时报）。

● Sylvain Lefebvre



Sylvain Lefebvre, 3D 打印纹理领域的专家。他于 2001 年在 INP Grenoble 获得计算机图形学硕士学位，2005 年在法国国家信息与自动化研究所（INRIA Rhones-Alpes, Grenoble）的 IMAGIS/EVASION 团队获得博士学位，师从 Fabrice Neyre。

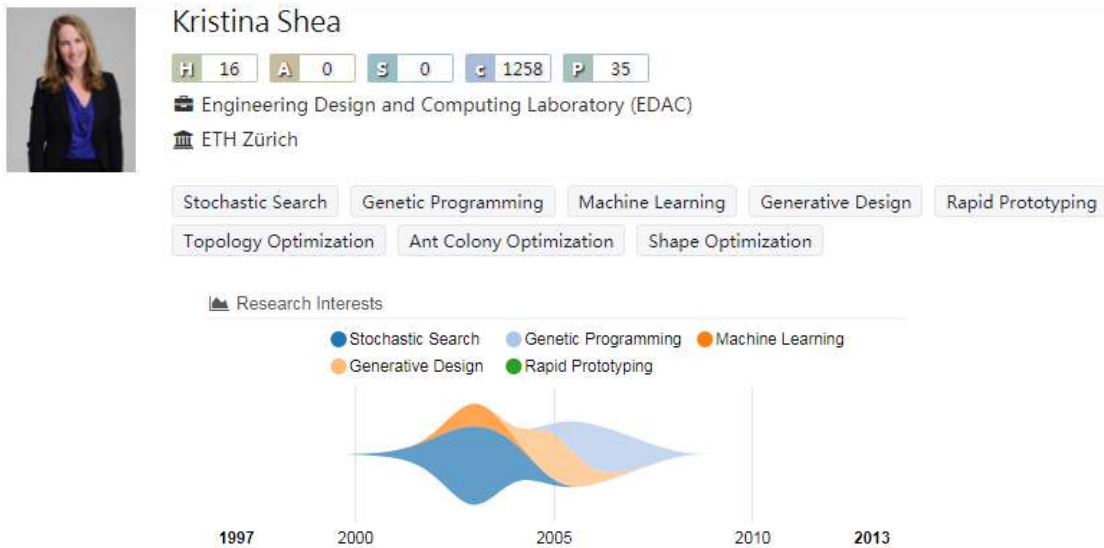
他于 2005 年至 2006 年在美国雷德蒙德的微软研究院担任博士后研究员，并于 2006 年被任命为 INRIA 的永久研究员，加入了 INRIA 索菲亚-安提波利斯（Sophia Antipolis）的 REVES 团队。自 2010 年 1 月起，他与 ALICE 集团（Nancy）合作。

Sylvain Lefebvre 的研究兴趣包括高级纹理，实时纹理合成，快速纹理和建模解决方案，以及用于计算机图形的高级和高效数据结构。2012 年以来，他领导 ERC 资助的 Shape Forge 项目，该项目旨在生成复杂的形状并用于增材制造，以及优化形状以考虑制造和结构限制。

Sylvain Lefebvre 与 H. Hoppe 在实时纹理合成方面的合作打破了重要的新局面。该算法旨在充分利用现代 GPU 的大规模并行体系结构，通过控制添加随机性，提供前所未有的合成速度和新的可编辑性。他推出的基于 Gabor 内核的新型噪声算法，提供强大的光谱控制和滤波功能。此项成果已在该领域的顶级会议上发表（Eurographics, ACM SIGGRAPH, ACM 三维图形和游戏研讨会，EG 渲染研讨会）。

Sylvain Lefebvre 获得 2010 年度青年研究员奖（2010 Young Researcher Award）。

● Kristina Shea

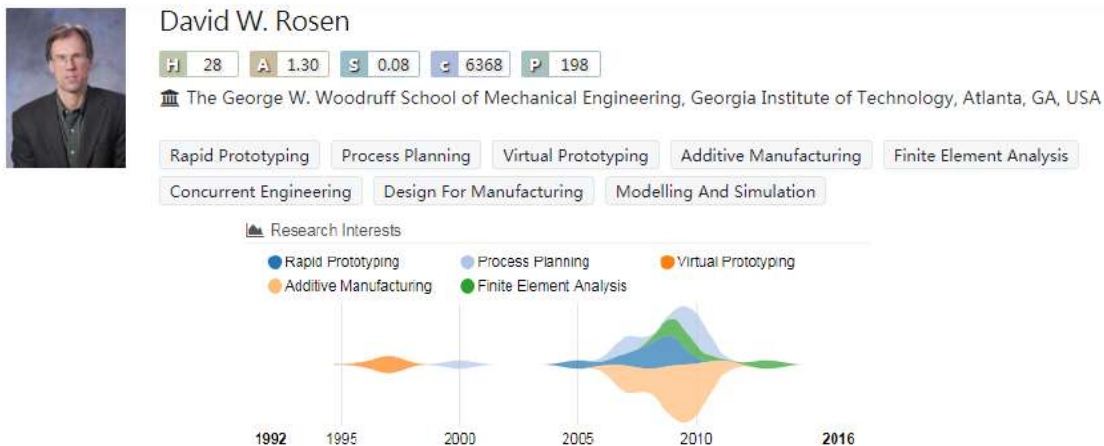


Kristina Shea 是苏黎世联邦理工学院（ETH Zürich）机械与加工工程设计与计算教授，苏黎世联邦理工学院工程设计和计算实验室（EDAC）的负责人。她于 1997 年在美国匹兹堡的卡内基梅隆大学获得机械工程博士学位。

她的研究重点是尖端计算模型的开发，复杂工程系统和产品的优化，增材制造，自动化设计与制造，目前的研究重点是 3D 和 4D 打印方法以及算法设计。

Kristina Shea 曾在瑞士洛桑 EPF，英国剑桥大学和德国慕尼黑技术大学担任学术职务。她还曾在英国伦敦的 Arup 担任高级工程师和顾问，她领导了计算设计和优化方面的专业知识开发，并将她的研究应用于正在进行的建筑设计项目。她在该领域的几个编辑委员会任职，并且是美国机械工程师协会的成员。Kristina Shea 于 2018 年 6 月加入 NCCR Digital Fabrication，担任相关研究员。

● David W. Rosen



David W. Rosen，佐治亚理工学院教授。1992 年在马萨诸塞大学获博士学位。

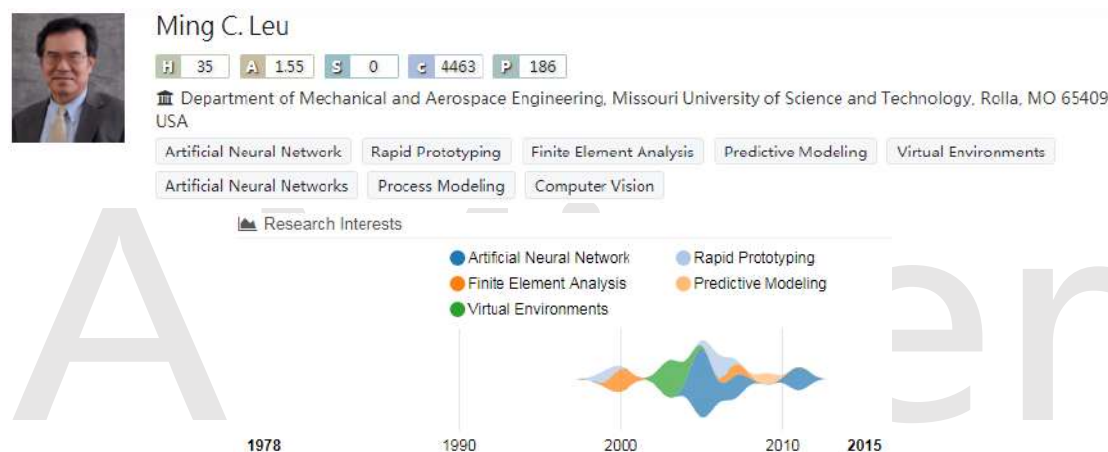
David W. Rosen 的研究兴趣在于计算机辅助设计和制造的交叉。他在 CAD 和制造领域

的研究主要集中在快速原型制造、增材制造及其应用上。

1995年8月, David W. Rosen 博士被任命为佐治亚理工学院快速原型制造研究所(RPMI)的学术主任, 负责开发快速原型制作的教育和研究项目。1998年, 他被任命为 RPMI 主任。曾任美国机械工程师协会计算机和信息工程部主席, 计算机与信息科学工程学院副主编, 计算机工程会议技术计划主席, 伍德拉夫学院教职研究员, 拉夫堡大学(英国)机械与制造工程系客座教授, 计算机协会 Siggraph 实体建模与应用研讨会联合主席。

他曾获美国机械工程师协会 2009 年和 2005 年计算机和信息工程会议最佳论文奖, 2008 年设计制造和生命周期会议最佳论文奖, 1996 年设计理论与方法论会议杰出论文奖, 1992 年计算机工程会议(人工智能和专家系统科)论文奖; 固体自由形态制造研讨会 2008 年和 2005 年杰出论文奖、2007 年最佳演讲奖。

● Ming C. Leu



Ming C. Leu, 密苏里科技大学机械与航空航天工程系杰出教授, 密苏里科技大学智能系统中心主任。他于 1981 年获加州大学伯克利分校机械工程专业博士学位。

他的研究兴趣包括设计和制造自动化领域, 包括增材制造, 快速原型制作, 虚拟原型制作, CAD/CAM, 机器人技术以及机器动力学和控制。

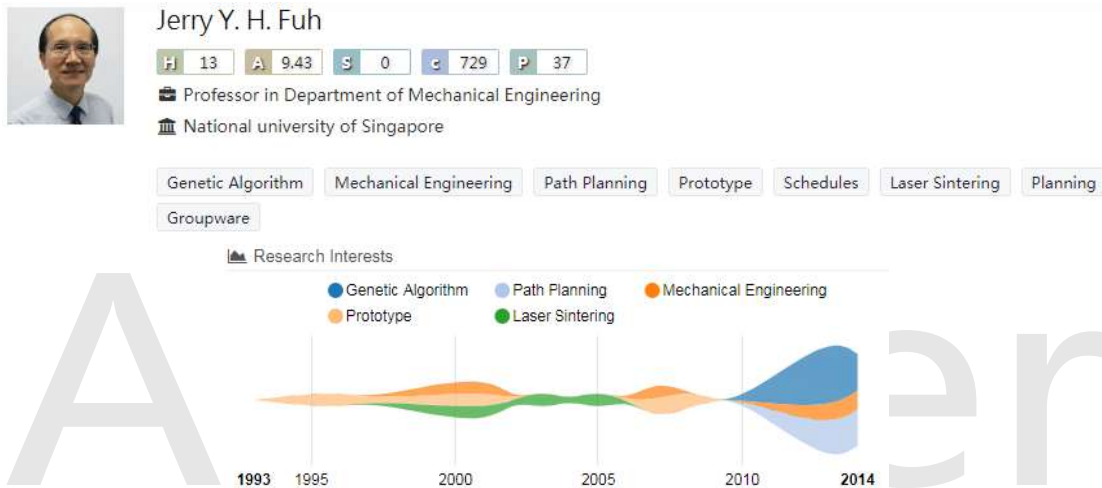
Ming C. Leu 于 2004 年创立了密苏里州 S&T 航空航天制造技术中心, 直到 2016 年 5 月一直担任其董事。他曾任美国国家科学基金会制造机械和设备项目主任, 新泽西理工学院机械工程系制造业国家讲座教授, 曾于 1981 年至 1987 年在康奈尔大学的 Sibley 机械与航空航天工程学院任教。

Ming C. Leu 是虚拟和物理原型期刊 (Journal of Virtual and Physical Prototy) 和制造科学与技术期刊 (Journal of Manufacturing Science and Technology) 编辑委员会成员。他于 2016 年共同组织并共同主持了 NSF CAREER 提案撰写研讨会, 2013 年 NSF 增材制造研究和教育前沿研讨会, 以及 2009 年 NSF-ONR 增材制造研讨会。是 2006 年 NSF 设计, 服务和制造研究会议, 以及 2012 年 ASME/ISCIE 国际柔性自动化研讨会 (ISFA) 主要的组织者和主

席。他曾于 2006 年担任 ASME 国际机械工程会议主席，并于 2005 年担任该会议技术项目主席。他曾担任 ASME 制造业副总裁，ASME 制造工程部执行委员会成员。

Ming C. Leu 曾获密苏里大学校长领导奖 (2017 年)，ASME Blackall 机床和 Gage 奖 (2014 年)，ISFA Hideo Hanafusa 杰出调查员奖 (2008 年)，MCASTA 杰出学者奖 (2006 年)，ASME 专项服务奖 (2004 年)，密苏里州 S&T AMAE 学院优秀奖 (2001 年和 2004 年)，NJIT Harlan J. Perlis 研究奖 (1993 年)，NSF 总统青年研究员奖 (1985 年)，SAE Ralph R. Teetor 教育奖 (1985 年) 和 FPRS 木材纸奖 (1981 年)，并在 NJIT 团队获得 CASA/SME 大学领导奖 (1994 年)。他是 ASME 研究员和 CIRP 研究员，是 Sigma Xi，Tau Beta Pi 和 Phi Kappa Phi 荣誉协会的成员。

● Jerry Y. H. Fuh



Jerry Y. H. Fuh 的快速成形技术对精密生物医学发展作出了突出贡献。他是新加坡国立大学机械工程系教授，新加坡国立大学苏州研究院首席研究员。他 1992 年在加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 获得博士学位，在新加坡国立大学机械系任教。

Jerry Y. H. Fuh 多年来致力于快速制造成型技术与 3D 打印的研究，并在该领域做出突出贡献，主要研究领域为制造，3D 生物打印，金属/陶瓷 3D 打印，AM 生物医学应用。2016 年，他和他的同事在 NUS 的支持下建立了一个 3DP 生物医学中心，涉及工程、科学、设计、牙科和医学 5 个不同的院系，促进了 NAMIC，EDB 和大学基金的生物医学和保健研究跨国工作。

Jerry Y. H. Fuh 于 2008 年和 2009 年被选为美国机械工程师协会会士 (ASME fellow) 和国际制造工程师协会会士 (SME Fellow)。同时被邀担任 8 个极具影响力杂志编委会成员，如 IEEE Trans Automation Science and Engineering，Robotics and CIM，Computers in Industry 等。

Jerry Y. H. Fuh 领导的团队于 2005 年获得了新加坡享有盛誉的“新加坡工程协会 (IES) 工程成就奖”。他在制造及设计领域已发表超过 300 篇国际论文，拥有多项国际专利，多次被邀在国际会议上作专题演讲或大会报告，并担任会议的主席。

3.2.2 国内学者

● 孙伟



Wei Sun (孙伟)

教授
清华大学机械工程学院机械工程系
+ 86-10-62798103
weisun@mei.tsinghua.edu.cn
<http://www.me.tsinghua.edu.cn/publish/jpx/6151/201...>

孙伟，生物制造和计算机辅助组织工程领域国际著名学者。他现任清华大学机械工程系教授，国家“千人计划”引进人才。美国 Drexel University（德雷塞尔大学）机械工程与力学系，生物医学工程，科学和健康系统学院 Albert Soffa 讲席教授（Chair Professor）。

孙伟是国际生物制造学会（International Society of Biofabrication）主席；美国机械工程师学会（ASME）制造科学与工程分会生物制造技术委员会首任主席；生物制造（Biofabrication）国际期刊主编，Rapid Prototyping Journal 等 6 个期刊的编委会成员；Natural Materials, Natural Medicine 等 32 个国际期刊的评审专家；美国科学基金会（NSF）、美国国家卫生院（NIH）、中国自然科学基金会（NSFC）、欧盟政府研究基金会、香港政府研究基金会、加拿大科学与工程研究委员会、新加坡科学与工程研究委员会、印度-美国科学技术论坛项目评审专家。

孙伟曾获澳大利亚悉尼大学大学研究员奖（2010 年），德雷塞尔大学工程学院杰出研究奖（2009 年），香港大学 William Mong 研究员奖（2008 年），以及国际汽车工程师协会颁发的 Ralph R. Teetor 教育奖（2003 年）。

孙伟团队得到美国科学基金会（NSF），美国宇航局（NASA），美国联邦航空局（FAA），美国国防部（DoD），美国陆军研究所（ARL）和生物制造企业（强生集团，Therics）等科研经费资助逾 550 万美元，其中作为首席（PI）完成 15 项科研项目，包括美国科学基金会计算机辅助组织工程重点项目。在美国开展了多注射嘴生物沉积系统，用于挤出海藻酸钠水凝胶相混合的肝细胞，微肝组织器官等一系列研究（应用于美国国家宇航局），并涉及对宇航员微重状态下药载体模型研究。

● 李涤尘

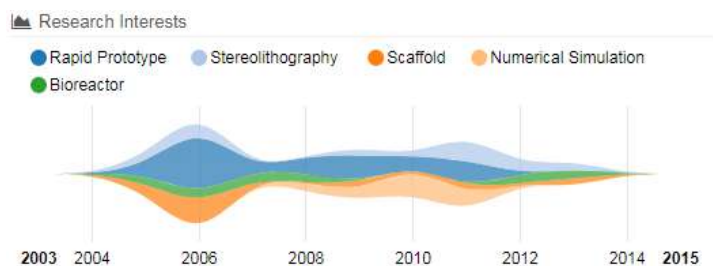


Dichen Li (李涤尘)

H 12 A 0 S 0 C 486 P 131

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University

Rapid Prototype Stereolithography Scaffold Numerical Simulation Bioreactor Laser Metal Direct Forming
Laser Technique Microstructure



李涤尘，西安交通大学机械工程学院，长江学者特聘教授，现任机械工程学院副院长，机械制造系统工程国家重点实验室主任。李涤尘博士在 1989-1993 年于西安交通大学金属材料及热处理专业攻读博士学位。

他的研究方向主要为：快速成型技术，快速成形的新工艺新方法，陶瓷零件快速成型制造，金属零件激光快速成型；生物制造技术，人工定制化假体、骨组织支架和肝组织支架制造技术；复合材料制造技术，基于快速成形的复合材料结构件制造的新方法，纤维铺放技术，光子晶体制造技术。

李涤尘担任中国机械工程学会摩擦学分会人体关节与内植物专业委员会副主任委员，生物制造分会常务理事，ELSEVIER、Taylor & Francis、IOP、Higher Education Press and Springer 编委，《中国组织工程研究与临床康复》杂志首席执行官编委，摩擦学国家重点实验室（清华大学）学术委员会委员，机械制造系统工程国家重点实验室（西安交通大学）学术委员会委员。

他其曾获国家科技进步二等奖 1 项，获得省部级一等奖 2 项，2015 年获得国家技术发明奖二等奖，2007 年入选国家“新世纪百千万工程”计划，2004 年获得第 8 届中国青年科技奖，2005 年获得中国优秀博士后称号，2000 年获高校青年教师奖，获“国务院特殊津贴”。

● 林峰

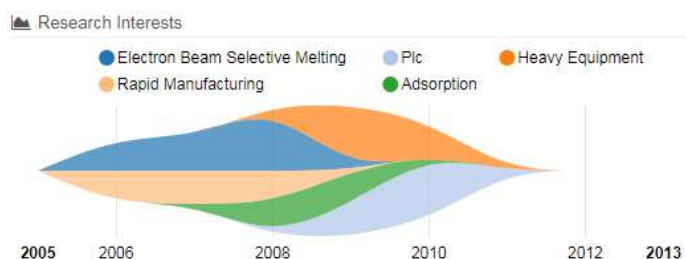


Feng Lin (林峰)

H 11 A 0 S 0 C 400 P 75

清华大学机械工程

Electron Beam Selective Melting Plc Heavy Equipment Rapid Manufacturing Adsorption Hot Extrusion
Ethylene Polymerization Electron Beam



林峰，清华大学机械工程系教授、博导、副系主任，先进成形制造教育部重点实验室副

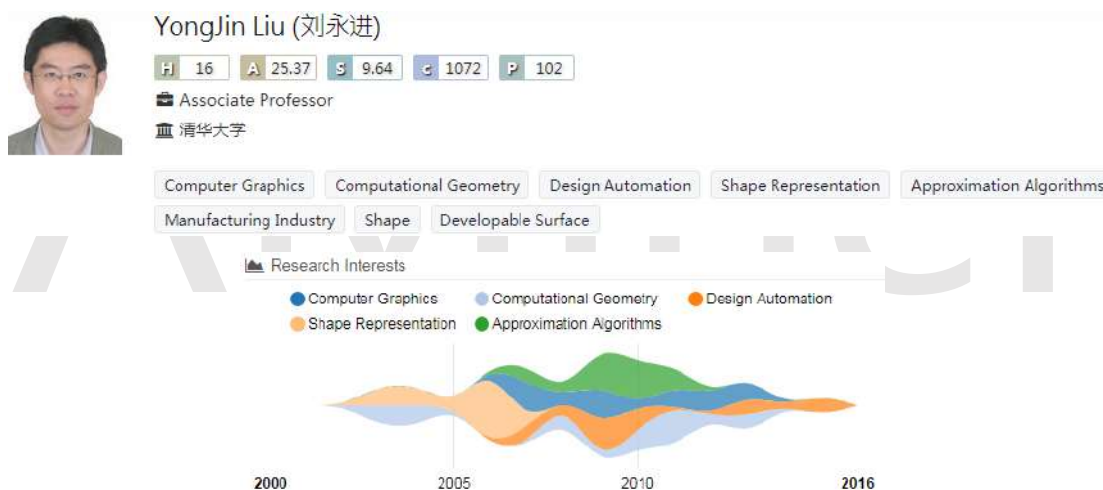
主任，快速成形制造分室主任。

他的主要研究方向包括：重型液压机，重型多向模锻液压机、重型模锻液压机、重型挤压机；预应力缠绕技术，预应力钢丝缠绕重型结构设计制造、预应力碳纤维缠绕高温抗疲劳设计；增材制造，电子书选区融化沉积制造、激光微融覆沉积制造；生物制造，细胞三维受控组装、计算机辅助组织工程。

林峰担任中国机械工程学会特种加工学会快速成形技术委员会副主任委员，塑性工程分会锻压设备专业委员会委员，《Biofabrication》期刊的编委会委员。

他于 2006 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”，曾获 2002 年中国国家科学技术进步二等奖，多功能快速成形制造系统 M-RPMS，2001 年北京市科学技术进步一等奖，2001 年获英国 MCB University Press 的 Literati Club 2001 年快速原型领域“高度推荐”（Highly commended）奖，1998 年中国国家科学技术进步三等奖，1997 年机械工业部科技进步一等奖。

● 刘永进



刘永进，清华大学计算机系长聘教授、博导，人机交互与媒体集成研究所所长。1998 年毕业于天津大学机械电子工程专业，分别与 2000 年和 2004 年获得香港科技大学硕士和博士学位。

他长期从事计算几何、模式识别和计算机辅助设计方面的工作，在数字媒体（包括三维数字几何）的内蕴几何机构表征、3D 打印中的几何优化分析、基于机器人手臂的无支撑 3D 打印等方面取得了重要进展。他提出了一系列工业几何建模与高效处理新方法，拓展了草图驱动的数字媒体处理与认知计算技术体系，近年主要围绕基于脑机接口的情绪识别与交互开展了大量工作。

刘永进曾获得国家杰青基金项目、国家优秀青年基金项目的资助，入选 2011 年度“教育部新世纪优秀人才支持计划”。获得 Symposium on Solid and Physical Modeling (SPM 2014)

在内的四项国际著名期刊会议的最佳论文奖，以及 2011 年国家技术发明奖（排名第三）。

● 王华明



王华明 (Huaming Wang)

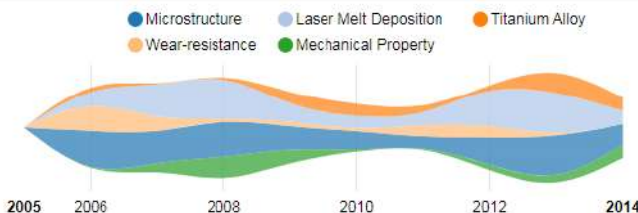
H 10 A 9.40 S 0 c 374 P 79

教授, 博士生导师

北京航空航天大学

Microstructure Laser Melt Deposition Wear-resistance Titanium Alloy Mechanical Property Laser Cladding
Intermetallic Wear

Research Interests



王华明，金属增材制造专家，中国工程院院士，现任北京航空航天大学教授。1983 年毕业于四川工业学院（现西华大学），1986 年获西安交通大学硕士学位，1989 年获中国矿业大学博士学位。

他长期从事大型金属构件增材制造和表面工程技术研究。突破钛合金、超高强度钢等高性能难加工金属大型复杂关键构件激光增材制造工艺、成套装备和工程应用关键技术，开拓机械装备严酷环境关键摩擦副零部件激光熔覆多元金属硅化物高温耐腐蚀耐磨特种涂层新领域，成果在飞机、导弹、卫星、航空发动机等装备研制和生产中工程应用。

王华明是中华“洪堡学者”协会理事，中国金属学会材料科学分会理事，中国光学学会激光加工专业委员会常务委员，中国机械工程学会特种加工分会常务委员，北京机械工程学会副理事长，《摩擦学学报》编委会编委，中国机械工程学会热处理分会常务委员，中国机械工程学会摩擦学分会委员，大型金属构件增材制造国家工程实验室主任、国防科技工业激光增材制造技术研究应用中心主任。

他曾获“国家技术发明一等奖”1 项、部级科技一等奖 3 项、2006 年全国五一劳动奖章、航空报国金奖一等奖、何梁何利科技进步奖、美国联合技术公司容闳科技教育奖等荣誉，被评为教育部“长江学者”特聘教授、国防科技工业有突出贡献中青年专家、北京市总工会教育创新标兵、北京高校优秀共产党员、入选“教育部跨世纪优秀人才计划”、“新世纪百万人才工程国家级人选”等国家级人才计划。2015 年当选中国工程院院士。

● 刘利刚



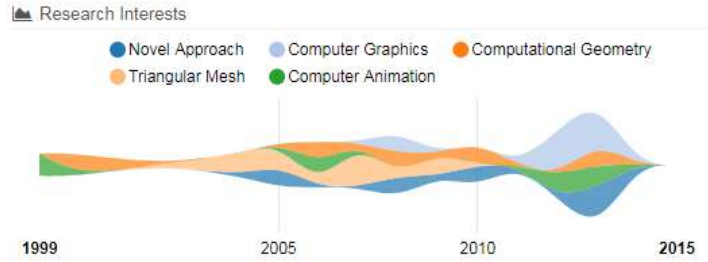
刘利刚 (Ligang Liu)

H 27 A 2.85 S 0 c 2668 P 110

professor

中国科技大学数学学院

Triangular Mesh Novel Approach Geometric Model Point Cloud Computer Graphic Computer Animation
Computational Geometry Least Square



刘利刚，中国科学技术大学教授，博士生导师，中国科学院“百人计划”，中国科学院特聘研究员。


刘利刚教授于 2001 年在浙江大学获得应用数学博士学位；2001 年至 2004 年期间在微软亚洲研究院工作；2004 年至 2011 年期间在浙江大学数学系工作。2009 年至 2011 年期间，在美国哈佛大学进行学术访问研究。

他的研究兴趣包括计算机图形学，3D 几何建模与处理，3D 打印中的几何优化（计算制造），几何处理中的压缩感知和稀疏度优化，形状分析（高级几何处理），图像和视频处理等。

他是国际会议 GMP 2017 大会共同主席，SPM 2014, SGP 2015, CVM 2016, CAD/Graphics 2017 的论文共同主席。学术期刊 IEEE TVCG, IEEE CG&A, CGF, CAGD, The Visual Computer 及《软件学报》编委。

他主持国家自然科学基金项目 4 项，2012 年获得国家自然科学基金“优秀青年基金”项目。曾获得“微软青年教授”奖(2006)、陆增镛 CAD&CG 高科技奖一等奖(2010)、国家自然科学基金二等奖(2013)等奖项。

● 陈宝权



陈宝权 (Baoquan Chen)

25
4.16
0.02
2002
78

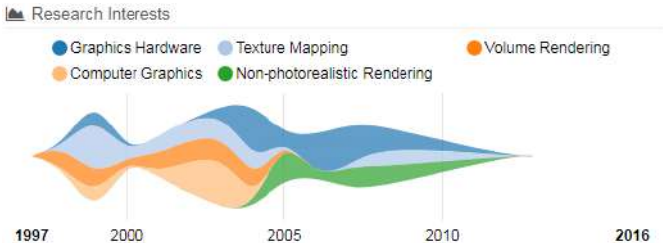
教授

The Center on Frontiers of Computing Studies, Peking University

Graphics Hardware
Texture Mapping
Non-photorealistic Rendering
Computer Graphic
Volume Rendering

Hardware
Level Of Detail
Image Quality

Research Interests



陈宝权，北京大学前沿计算研究中心执行主任，长聘教授，博士生导师，山东大学兼职教授，博士生导师。兼中国科学院深圳先进技术研究院研究员，博士生导师。

他于 1991 年西安电子科技大学获电子工程学士学位、1994 年清华大学硕士学位，1999

年获纽约州立大学石溪分校计算机科学博士。

陈宝权的研究领域为：计算机图形学与视觉，包括大规模场景建模，几何表示和处理，快速渲染，艺术渲染，非真实感绘制（NPR），抗锯齿采样理论；可视化，包括科学、医学和信息可视化；用户界面，包括交互界面的建模，渲染，数据处理；应用，包括建筑物建模，艺术、娱乐设计、信息化分析。

他现任 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 编委，并多次任图形与可视化领域几乎所有重要国际会议的 PC 成员，SIGGRAPHASIA 指导委员会委员、和 IEEEVIS 指导委员会委员，CCF（中国计算机学会）常务理事；曾任 IEEE 可视化会议 2005 年主席、2004 年程序委员会主席、SIGGRAPHASIA2014 会议主席。他曾任 CCF 青工委主任。

陈宝权曾获 2003 美国 NSFCAREER Award, 2005 年 IEEE 可视化国际会议最佳论文奖；2008 年入选中科院“百人计划”；2010 年获国家杰出青年科学基金资助；2013 年入选国家“百千万人才”工程计划和“中青年领军人才”，2014 年获“中国计算机图形学大会杰出奖”，2015 年度长江学者，入选 973 项目“城市大数据计算理论与方法”首席科学家。

AMiner

4 applicati

应用篇



4. 应用篇

目前 3D 打印的应用十分广泛，这里选取与 3D 打印关系最为紧密的几个领域（医学，航空航天，军事，建筑，文物保护，艺术与交叉应用）进行介绍。

(1) 医学

医学模型在基础科学与临床试验教学中的用途十分广泛，传统方法制造的模型多为石膏，制作周期长且易损坏。3D 打印制作的医学教学用具与医疗实验模型不仅解决了上述问题，还可以根据实际情况，针对特殊患者，快速进行个性化的模型制造。

人体组织器官再生与活体细胞培养是医学上的难题，3D 打印为这一难题提供了新的解决路径。目前已有成功打印无排异反应血管的案例；科研人员制造出能模仿生物细胞特性的水滴，他们把这些水滴通过 3D 打印组装成凝胶状物质，这种物质既能像神经细胞束一样传输电信号，又能像肌肉组织那样弯曲，给修复和缓解器官衰竭带来了新的思路。3D 打印可以打印特定的细胞，真实模拟人体对药物的反应，对于药物研发测试有极大的促进作用。

利用 3D 打印技术制作出的植入物与人体相性更好，解放军第四军医大学第一附属医院 3D 打印的钛合金肩胛骨假体和锁骨假体临床应用为全球首例，骨盆假体临床应用为亚洲首例，北京大学第三医院骨科应用 3D 打印技术人工定制的枢椎椎体，为世界首例。

(2) 航空航天

3D 打印在航空航天领域的优势主要体现在异型复杂结构制造、小批量短周期低成本制造、新材料新结构研制。航空航天领域的金属材料加工要兼顾高强度、高性能、高柔韧性，3D 打印制造可以兼顾尺寸与精细程度，弥补传统制造工艺的不足；飞行器上的部件出现结构问题时，3D 打印的高制造柔性也可以迅速解决问题，弥补了铸造、钣金及焊接工艺的不足；传统制造方法难以成形的复杂结构与复合材料结构，3D 打印技术可以一次整体成型。这三方面的优势不仅能够缩短研制周期、降低成本，而且由于零部件的连接工序减少还会大大提高整体的强度和刚度，延长飞行器的使用寿命。

3D 打印在航空航天领域的应用主要集中在 3 个方面：产品外形验证、直接产品制造、精密熔模铸造。在零部件级，罗尔斯-罗伊斯（Rolls-Royce）公司采用 3D 打印技术制造的 Trent XWB-97 发动机于 2015 年在 A380 上完成实试，欧洲航天局 (ESA) 和瑞士 SWISSto12 公司开发出专门为未来空间卫星设计的首个 3D 打印双反射面天线原型。在整机级，美国太空探索技术 (SpaceX) 公司火箭实验室发布了一台用于低成本太空旅行的 3D 打印世界首款电动火箭发动机-Rutherford 电动发射系统，该系统提供了更为经济可承受的火箭发射方式，大大减少了预射成本。

(3) 军事

3D 打印在军事领域的应用集中在武器装备的研制、武器装备的快速维护、军事医疗、军事航天航空。

武器装备研制：3D 打印高速高精度的特征使其可以用于验证创意与模具制作，或直接打印复杂的配件。美国国防部与工业界联合实施了采用类似立体光刻成型的方法合金结构件快速生产的项目，其生产效率比传统的铁合金加工工艺高 80% 之多。F-15 猎鹰喷气式战斗机铁合金外挂架翼肋备件采用激光 3D 打印工艺，使零件的需求能够在 2 个月内得到快速满足，并最大限度保持飞机的可用性。

武器装备的快速维护：安妮斯顿陆军基地采用激光近净成型成功维修 M1 艾布拉姆斯坦克的燃气涡轮。美国海军水下作战中心 (NUWC) 实施了快速制造与维修 (RMR) 计划，采用选择性激光烧结 (SLS) 等 3D 打印技术进行装备维修。

军事医疗：对于肢体修复，3D 打印技术可用于外周神经管道与合成材料的研发、复合组织移植瓣的构建以及四肢与指趾的组织工程修复；对于骨骼重建，3D 打印技术以打印出颅面合成骨、可植入性软组织，就连难度很大的工程骨组织植入、自体细胞软骨培育也可以完成；对于烧伤治疗，可以通过 3D 打印技术制造用于活体皮肤扩增的计算机控制生物反应器系统，和可促进伤口愈合并减少瘢痕形成的多功能生物支架、组织工程皮肤制品以及用于皮肤再生的人工蛋白生物材料等；对于战创伤等综合症，通过 3D 打印技术制造的可降解弹性聚合支架和特异诱导性生物支架，可以促使血管、肌腱和神经功能尽快得到恢复。

(4) 建筑

3D 打印技术在建筑领域的应用目前可分为两个方面：一是在建筑设计阶段，主要是制作建筑模型；二是在工程施工阶段，主要是利用 3D 打印技术建造足尺建筑 (Full-Scale Buildings)。设计阶段的应用请参考“4.6 艺术”，这里不再赘述，主要描述其在施工阶段的应用。

贝洛克教授发明的“轮廓工艺” (Contour Crafting) 是一项通过计算机控制的喷嘴按层挤出材料的建造技术，通过打印出建筑轮廓，并对轮廓内部进行填充来实现房屋建造。由于它能建造出单曲率和双曲率造型的建筑，因此特别受崇尚自由形式的建筑师的青睐。轮廓工艺目前尚处于试验阶段，研发团队已经对各种不同的材料成功进行了试验，包括塑料、陶瓷、复合材料和混凝土。目前轮廓工艺已经打印出足尺的结构构件，比如内部结构复杂的墙体或中空墙体。

此外还有许多成熟的案例，2010 年，意大利人恩里克·蒂尼 (Enrico Dini) 设计出了一台用于建筑建造的 3D 打印机——D-Shape。荷兰建筑师简加普·鲁基森纳斯 (Janjaap Ruijsenaars) 已经开始尝试利用这种新技术尝试建造一栋模仿莫比乌斯环的单片式景观别

墅(Landscape House)。2015年1月,中国建筑第八工程局有限公司携手盈创打印出世界上最高的3D打印建筑。

Hack 等人^[27]提出了网格浇筑(Mesh Mould)移动打印平台解决上述问题,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。Kumar 等人^[28]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。

目前采用的3D打印材料都是以抗压性能为主,抗拉性能较差,一旦拉应力超过材料的抗拉强度,极易出现裂缝。正是因为存在着这个问题,所以目前3D打印房子的楼板只能采用钢筋混凝土现浇或预制楼板,现场组装。此外,考虑到没有钢筋的抗拉作用,打印材料本身应具有良好的抗裂能力,能抑制本身的干缩和徐变等引起的裂缝。另一方面,材料应有韧性,从结构的安全角度考虑,要防止出现构件的脆性破坏,从构件出现裂缝到构件损坏乃至结构倒塌,应有一定的时间和足够的构件变形量。寻找具有良好抗压、抗拉性能、较强的抗裂性能和韧性,以及较快的初凝时间和较高的初凝强度的复合打印材料是当前3D打印技术在建筑工程施工中应用的关键。

在设计方法上,由于3D打印建筑与传统的钢筋混凝土结构和砌体结构,在材料性能和建造工艺上有较大区别,3D打印建筑还在停留在理论阶段,正在参考借鉴现有规范的基础上研究适合于3D打印建筑的设计理论和设计方法。还存在3D打印建筑的静力计算方案、墙体的折算厚度计算方法以及受压稳定承载力公式、3D打印墙体的高厚比限值、3D打印墙体局部受压承载力计算方法等等问题。

在施工工艺上,由于3D打印施工方法的创新性,还存在诸多问题,主要集中在支撑问题、找平问题与配筋问题三个方面。对于3D打印建筑来说,结构材料自重大,支撑问题尤为突出;目前3D打印房子的墙面比较粗糙,表面凹凸不平,需要后续工作对墙面进行找平、抹灰等处理才能投入实际使用。为了弥补3D打印成品抗拉性能的不足,需要对其进行配筋,但通行的、简便的配筋方法还没出现。

(5) 文物保护

3D打印技术在文物保护领域的应用主要体现在非接触性扫描,与精准复制。因为大多文物具有不可再生性与较高的历史价值,还会伴随着易损性、不稳定性等因素。《中华人民共和国文物保护实施条例》,第四十六条明确指出“复制、拍摄、拓印馆藏文物,不得对馆藏文物造成损害”。所以保证文物的绝对安全是首要条件,3D打印技术可以在不损伤文物的前提下,通过三维扫描仪收集详细的文物数据。并且电子测量后的处理数据速度快,具有很高的精准度。三维扫描技术得到的数据容性较好,可以在最快时间内高效完成复制文物的前

期准备工作。

受到考古工地的空间与发掘时间的限制，一些出土的密封器物可能会转移到实验室中进行开启、记录与研究。所以借助于 CT 扫描技术考古人员就已经预先知道内部的器物状态，并且可以利用 3D 打印预先打印出来进行观察，这为下一步的实验考古提供了依据。在上海博物馆考古部对于青龙镇遗址的考古发掘中，实验室通过对隆平寺塔基地宫出土的套函进行 CT 扫描，就已经知道内部的器物的叠压关系，并且用建模的技术将佛珠底部的银质莲花进行了还原。这样我们就可以根据扫描的状况实现制定文物修复的保护方案。因为获取了三维数据，就可以对文物缺失的部分进行还原、填充与补缺。

灰陶镂空纹豆的修复工作中，修复团队选择了与自然光最为接近的白光扫描仪，在光栅条纹持续 10 分钟投影到灰陶镂空纹豆表面后，借助两个高分辨率 CCD 数码相机对光栅干涉条纹进行拍照。获取灰陶镂空陶豆的数字信息后，再通过熔融沉积成型技术（FDM）进行打印输出。再通过一系列的后续工作，在底模的基础上灌注石膏、砂纸打磨、底色制作、细节绘制。在保证文物绝对安全的前提下进行精细复制。

但这一领域仍有一些问题，比如涉及到一些陶器上的浅浮雕与一些精细的痕迹，3D 打印技术无法做到高精度的复制。目前可使用的打印材料限于光敏树脂、铜、锡、钛等材料，需要进行复杂的后续处理，对于陶土类的文物残缺还不能用类似材质进行直接打印。

(6) 艺术

3D 打印为艺术创作的流程带来了变革的可能，极大缩短了设计与实物间的距离，其小批量、定制化、灵活的特点十分适合艺术设计与制作，在建筑设计、珠宝设计、雕塑设计。传统手工艺领域均有应用实例。目前艺术领域运用 3D 打印技术有两种思路：技术的视觉特征转化为形式语言，技术作为传统工艺的替代手段。

澳大利亚堪培拉艺术家 Gilbert Riedelbauch 在 2000 年，利用最小面积的数学方程创作了系列作品“数学物件”（Mathobjects）。Riedelbauch 先由数学方程在电脑里生成虚拟模型，然后使用 FDM 法打印成实体，再将其浇铸成 S925 或用 K 金电镀。他有意在作品中保留了 FDM 法生成的表面肌理，并将这种肌理类比为手工制作过程中留下的痕迹。美国 Kendall 艺术与设计学院的 Phillip Re—Nato 教授是的系列作品“Anticlast”中，他利用流体模拟设计软件 Realflow 将流体四溅的效果转化为首饰造型，并选择玻璃作为打印材料。这表示数字科技的局限与特征能够激发艺术创意，并且已经拓展了“手工艺”的传统定义。

关于替代手工艺，唐刚与卜俊做了蓝印花布印染的尝试，将蓝印花布制作工艺中的刻版和刮浆技术合并为 3D 打印中的直接成型方式，按照目前现有 3D 打印的技术，可以将按照比例调好的浆通过 3D 打印装置直接在白布上进行打印，直接可以在白布上形成图案，然后可以进行蓝印花布印染的下一步工艺。改良了传统手工艺的步骤。

在 3D 打印改善艺术创作环境的同时也要看到其蕴含的危害，比如单一化、标准化的模型会抹杀制作过程中的缺憾美，商业化的运作模式挤占传统手工艺的生存空间，大众审美的畸形发展等问题。

(7) 交叉应用

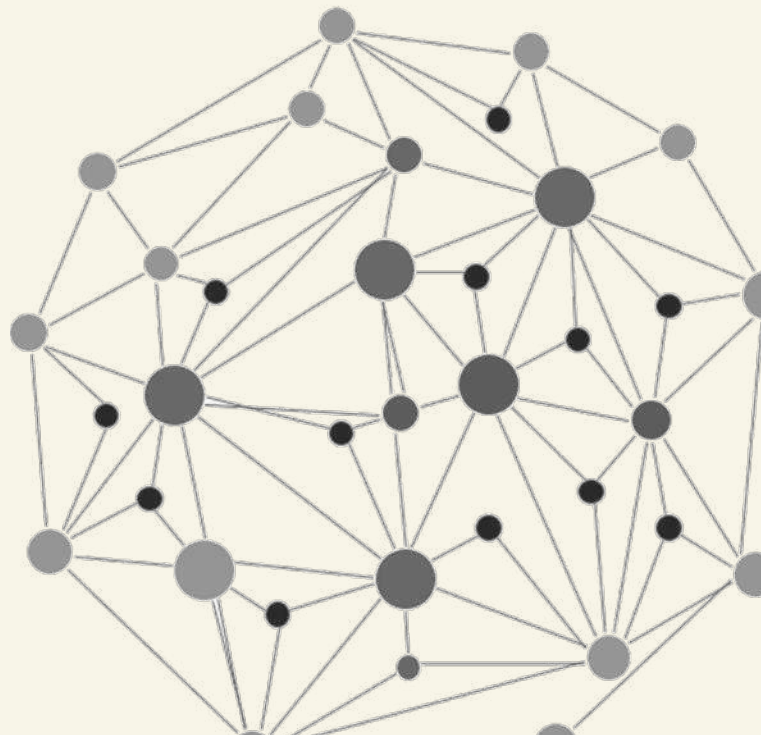
除了在单一领域的应用，3D 打印技术还在许多交叉领域有广泛应用。如军事与医学交叉的战场医疗，军事与航空航天交叉的军用设备制造，建筑与艺术交叉的建筑物设计与建筑模型制作，文物保护与教学交叉的考古教学等等。

此外，3D 打印技术还将许多学科的交叉变得顺畅，如艺术与汽车制造交叉的汽车设计领域，传统模型制作方法难以在制作周期与制作精度之间找到平衡点，而汽车模具对精准度的要求很高，这大大阻碍了从设计到模型的进度。3D 打印的高定制化与高精度度可以将精准的 3D 模型直接打印，免去中间大量模具制作的时间，为汽车设计提供了极佳的思路。

AMiner

5 trend

趋势篇



5. 趋势篇

3D 打印与其相关学科的交叉研究是近年来的热门趋势，其中生物打印与机器人打印前景最为广阔。

1) 生物 3D 打印

生物 3D 打印是将打印的墨水改成含有活细胞的混合物，从而构建活体组织器官。目前生物 3D 打印更多的是应用于硬组织的仿生重建和新型给药装置的制备，但具有生物活性、更复杂的组织器官的重建还处于探索阶段。

目前生物打印技术包括直接喷墨、激光、声波和阀门控制挤压等 4 种不同的打印方式。这些技术在通过改进原有的 3D 打印技术，来确保生物材料和细胞的活性。目前生物打印的应用主要有生物活性支架的 3D 打印，与细胞参与的生物 3D 打印两个方面。

生物活性支架的 3D 打印，利用生物相容性和生物可降解性的打印材料，与高精度高定制化的模型，打印出具有很好仿生硬组织和非血管组织。如 2012 年荷兰一家医院的金属下颌骨植入手术，是世界首例 3D 打印技术的临床应用。其通过对患者已缺损的下颌骨进行模拟，最后用 3D 打印机进行输出，可以得到患者特异的骨骼。打印的骨骼可以保留一些间隙利于周围细胞或神经的爬贴，并且可以特异性地与发声器官相互作用，不会影响听力和发音。

为了将来能够直接通过 3D 打印构造出组织器官，很多 3D 打印的支架应用于细胞的培养，这为细胞和材料的共同打印奠定了基础。细胞在支架上可以存活，并且能够体现比正常二维培养更好的功能。多聚己内酯（Ploycaprolactone，简称 PCL）作为生物打印支架已经可以用于多种细胞的培养。但是这也仅是细胞与支架的二维结合，并没有将材料与细胞进行充分的结合和互作，将来的组织打印也需要将细胞包埋于支架中，这样才能防止细胞的非定向扩散。

细胞参与的生物 3D 打印，理论上可以通过打印技术喷出含有活细胞的特殊材料，逐层组装构建出具有细胞活性的组织器官。经典的组织工程技术是将细胞种植在已成型的三维材料上，即非直接细胞生物 3D 打印。水凝胶成为包裹细胞的首选，目前常用的水凝胶交联方法有物理交联和化学交联，特定波长光刺激和温度改变引起的交联方法被称为物理交联法，通过特定化合物或离子作用引起的交联称为化学交联法。目前的技术已经可以进行皮肤细胞的打印，并且细胞类型可以进一步扩展到成体干细胞、内皮细胞和成纤维细胞等，打印之后可以看到细胞间的相互作用，这些成果为复杂组织打印做了准备。目前的“Block-Cell-Printing”技术可以确保细胞的高效存活。

细胞来源是生物 3D 打印面临的首要问题，这不仅涉及细胞的存活更涉及细胞的拓展、黏附和功能的发挥，而干细胞则可能解决以上问题。干细胞活力较高，可塑性强，并且在合适的环境下会分化为特定功能的细胞或发挥出相应的功能。这样可以减少打印过程中细胞的

应用，节约打印时间，并且为器官的功能发挥创造了条件。也许在器官打印的过程中可以选择干细胞作为部分来源原料，但具体的比例需要进一步摸索。在确保细胞活力的基础上，生物 3D 打印面临的重要问题就是如何实现打印后支架的功能，如何在支架中看到细胞间的相互作用及特定功能基因的表达。另外面临的主要问题是打印过程中的血管组织的布局和组装，任何一个器官都需要毛细血管网络来进行氧气、细胞因子和能量的供应，也需要进行废弃物的排放。

2) 多自由度机器人 3D 打印

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。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，可以用更优的方案解决传统 3D 打印技术支撑过多、模式单一、速度慢等问题。

多自由度打印中的机器人学问题，主要是逆运动学求解与运动规划问题。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。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，主要有解析法和数值法两类解法。运动规划（Motion Planning）指的是在根据给定的三维数字模型计算出打印路径后，如何规划机器人手臂的运动来高效无碰撞并且以平滑的运动遍历打印路径、从而完成增材制造的过程。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）。

目前机器人 3D 打印仍有许多不足：在机械结构层面，由于织造工差、测量误差、标定误差的存在导致机器人 3D 打印的精度仍存在相当误差；在算法层面，轨迹生成的运算量庞大，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；受限于物理碰撞约束，机器人在 3D 打印的过程中仍有许多空间位置无法到达。

a) 多自由度的无支撑打印

● 充分利用三个自由度

由于传统 3D 打印垂直逐层打印的特点，需要额外打印许多支撑结构，但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。

最近 Ezair 等人^[29]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，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碰撞、支撑材料的生成问题等。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, 还可以提升打印细节的质量。

● 基于体分割的无支撑打印

Wu 等人^[30]提出了 RoboFDM 打印系统以实现无支撑熔融沉积式 3D 打印。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置通过在欧氏空间采样机器人手臂有效工作范围来确定。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。

● 基于层分割的无支撑打印

Dai 等人^[31]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, 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, 这些曲面层需要满足均无碰撞和自支撑约束条件。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碰撞约束进行建模。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。

b) 快速线框打印

传统的打印方式多为“层积式”, 即在 Z 轴方向上的下层打印完成后再打印上层。这种方法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碰撞问题。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。

● 快速打印

Samuel 等人^[32]提出了基于依赖图(Dependency Graph)的搜索算法,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,且机器运动轨迹与已打印模型是无碰撞的。它在无碰撞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碰撞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碰撞路径。

● 线框打印

Wu 等人^[33]的算法首先以碰撞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,构造一个存在无碰撞打印方向的边的集合。接着算法将对这些约束编码成碰撞弧,从而构造一个有向图,其中每个节点都表示一条边,且每一个碰撞弧都表示边的打印先后约束。随后,算法通过局部移除冗余碰撞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。保证每一个需要打的边必须与之前已经打印好的边连接,不在悬空的位置进行打印;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碰撞。

c) 包裹打印

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多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 打印结合起来越来越紧密,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。

在单材料多自由度打印方向,Chen 等人^[34]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。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)。

此外还有 Zhao 等人^[35]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; 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; 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。

在多材料多自由度打印方向, Peng 等人^[36]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,还能够直接打印导电线。该机打印头包含两个可以围绕中心 FDM 挤出头旋转的送丝机构,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。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。

d) 大尺寸打印

目前解决大尺寸 3D 打印的方案有两个方向,在图形学领域的解决方案是,将三维模型分割成一系列满足打印机打印尺寸 of 模型部件,进行打印后再组装;机器人学领域的方法是,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。

Wu、Yi 等人^[37]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。该系统中,3D 打印机通过 Arduino 芯片控制打印机,通过 UART 串口与 PC 连接,通过每一层的水平移动拼接打印一个大模型。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 $O(n^2 \log^2 n)$ 。从而在算法层面,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。由于德尔塔机器人具有较好的扩展性能,例如 ABB IRB 360-6、1600 Flex Picker 的最大可达范围约为 1.6 米,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。

此外,Keating 等人^[38]提出了数字化建造平台 (Digital Construction Platform, 简称 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。提出了 Print-in-Place (PiP) 制造方法,使用两部分喷涂聚氨酯泡沫、结合 3D 打印增材制造的方式制造用于铸造混凝土结构的模板。

3) 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^[39]研究了使用单目视觉传感器估计机器人姿态的方法。Wang 等人^[40]研究了基于视觉的微创手术机器人手臂标定问题。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。

4) 金属打印

当前 3D 打印的材料主要为 ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料)和 PLA(聚乳酸)两种,使用这两种材料打印的物体存在强度差的特点。虽然近年来出现了基于上述材料改进的坚硬材料(如 Maker bot Tough PLA 等),但其本质上还是塑料,应用的场景十分受限。因此,发展金属 3D 打印势在必行。目前金属 3D 打印能够打印主要包括铝合金、钛合金、钴铬合金、不锈钢、铁镍合金等金属,并且存在致密度较低、表面精度较差等问题,尤其是使用金属材料作为支撑材料时十分难以去除。目前金属打印的分类有金属微滴喷射技术与均匀金属微滴喷射沉积两大类。

金属材料喷射和三维实体结构打印方面,还有较多的技术难题需要解决,金属材料熔点高,粘性和表面张力大,部分金属还具有较强的腐蚀性,以往成熟的非金属材料喷射装置及控制方法很难直接用于金属材料的喷射和打印成型,需开发新型耐高温、耐腐蚀的喷射装置。另一方面,在金属微滴喷射沉积过程中,金属微滴铺展、凝固等受到微滴飞行速度、微滴温度、基板温度等多因素的耦合作用,需从实验和理论两方面研究各参数对微滴熔合状态、内部微观组织演变规律等的影响,以保证成型件的外部形貌、内部质量及力学性能。此外,杂质过滤、成型过程监控等也是需要解决的关键技术。

5) 多机协作打印

受限于物理碰撞约束,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。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一个重要研究方向。

6) 人机交互打印

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。

目前已存在高精度高复杂度的工业级 3D 打印机器人,相应算法也日益成熟,如 Huang 等人^[41]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。但碰撞检测增

加了高效算法设计的难度。高自由度打印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。

Peng 等人^[42]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，该系统使用增强现实 (Augmented Reality, 简称 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。

AMiner

参考文献

- [1] Chinese Society of Mechanical Engineers. 3D Printing, Printing Future. Beijing: China Science and Technology Press, 2013(in China)
(中国机械工程学会.3D 打印: 打印未来.北京: 中国科学技术出版社, 2013)
- [2] LuoLinjie, BaranI, Rusinkiewicz S, Matusik W, Chopper: Partitioning models into 3D-printable parts. ACM Transactions on Graphics, 2012,31(6):129:1-129:10
- [3] Hao Jingbin, Fang Liang, Williams RE. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models. Rapid Prototyping Journal, 2011,17(2):116-127
- [4] Chen D, Sitthi-amorn P, Lan J T, Matusik W, Computing and fabricating multiplanar models. Computer Graphics Forum, 2013,32(2pt3):305-315
- [5] Prévost R, Whiting E, Lefebvre S, Sorkine-Hornung, Make it stand: Balancing shapes for 3D fabrication. ACM Transactions on Graphics, 2013,32(4):81:1-81:10
- [6] Wang Weiming, Wang Tuanfeng Y, Yang Zhouwang, et al. Cost-effective printing of 3D objects with skin-frame structures. ACM Transactions on Graphics, 2013,32(6):177:1-177:10
- [7] Stava O, Vanek J, Benes B, et al, Stress relief: Improving structural strength of 3D printable objects. ACM Transactions on Graphics, 2012,31(4):48:1-48:11
- [8] Zhou Qingnan, Panetta J, Zorin D. Worst-case structural analysis. ACM Transactions on Graphics, 2013,32(4):137:1-137:12
- [9] Hasan M, Fuchs M, Matusik W, et al. Physical reproduction of materials with specified subsurface scattering. ACM Transactions on Graphics,2010,29(4):61:1-61:10
- [10] Dong Yue, Lin S, Guo Baining. Fabricating spatially-varying subsurface scattering. ACM Transactions on Graphics,2010,29(4):153:1-153:10
- [11] Papas M, Regg C, Jarosz W, et al. Fabricating translucent materials using continuous pigment mixtures. ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):146:1-146:12
- [12] Weyrich T, Peers P, Matusik W, Rusinkiewicz S. Fabricating microgeometry for custom surface reflectance. ACM Transactions on Graphics,2009,28(3):32:1-32:6
- [13] Bickel B, Bacher M, Otaduy M A, et al. Design and fabrication of materials with desired deformation behavior. ACM Transactions on Graphics,2010,29(4):63:1-63:10
- [14] Chen D, Levin D I W, Didyk P, et al. Spec2Fab:A reducertuner model for translating specifications to 3Dprints. ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):135:1-135:10
- [15] Xin Shiqing, Lai Chifu, Fu Chiwing, et al. Making burr puzzles from 3D models. ACM Transactions on Graphics,2011,30(4):97:1-97:8
- [16] Song Peng, Fu Chiwing, Cohen-Or D. Recursive interlocking puzzles. ACM Transactions on Graphics, 2012,31(6):128:1-128:10
- [17] Zhu Lifeng, Xu Weiwei, Snyder J, et al, Motion-guided mechanical toy modeling. ACM Transactions on Graphics,2012,31(6):127:1-127:10
- [18] Coros S, Thomaszewski B, Noris G, et al. Computational design of mechanical characters.

ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):83:1-83:12

- [19] Ceylan D, Li W, Mitra N J, et al. Designing and fabricating mechanical automata from mocap sequences. ACM Transactions on Graphics,2013,32(6):186:1-186:11
- [20] Cali J, Calian D A, Amati C, et al. 3D-printing of non-assembly, articulated models. ACM Transactions on Graphics,2012,31(6):130:1-130:8
- [21] Bacher M, Bickel B, James D L, Pfister H. Fabricating articulated characters from skinned meshes. ACM Transactions on Graphics,2012,31(4):47:1-47:9
- [22] Panozzo D, Block P, Sorkine-Hornung O. Designing unreinforced masonry models. ACM Transactions on Graphics, 2013,32(4):91:1-91:12
- [23] De Goes F, Alliez P, Owhadi H, Desbrun M. On the equilibrium of simplicial masonry structures. ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):93:1-93:10
- [24] Liu Yang, Pan Hao, Snyder J, et al. Computing self-supporting surfaces by regular triangulation. ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):92:1-92:10
- [25] Vouga E, Hobinger M, Wallner J, Pottmann H. Design of self-supporting surfaces. ACM Transactions on Graphics,2012,31(4):87:1-87:11
- [26] Song Peng, Fu Chiwing, Goswami P, et al. Reciprocal frame structures made easy. ACM Transactions on Graphics,2013,32(4):94:1-94:10
- [27] Hack N, Lauer W V. Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork. Architectural Design, 2014, 84(3): 44-53
- [28] 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 (ICRA), Singapore, 2017: 1707-1713
- [29] Ezair B, Fuhrmann S, Elber G. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models.Computer-Aided Design, 2018, 100: 1-13 Stava, J Vanek, B Benes, N Carr. Stress Relief: Improving Structural Strength of 3D Printable Objects. Acm Transactions on Graphics, 2012, 31 (4) :1-11
- [30] 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 (ICRA), Singapore, 2017: 1175-1180
- [31] Dai C, Wang C C L, Wu C, et al. Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion. ACM Transactions on Graphics (Proc SIGGRAPH), 2018: Conditionally Accepted
- [32] 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 (ICRA), Stockholm, Sweden, 2016: 3625-3631
- [33] Wu R, Peng H, Guimbretière F, et al. Printing arbitrary meshes with a 5DOF wireframe printer. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2016, 35(4): 101-101
- [34] Chen Y, Zhou C, Lao J. A layerless additive manufacturing process based on CNC accumulation. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(3): 218-227

- [35] 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
- [36] Peng H, Guimbretière F, McCann J, et al. A 3d printer for 18 interactive electromagnetic devices//*Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Tokyo, Japan, 2016: 553-562
- [37] 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 (IROS)*, Daejeon, South Korea, 2016: 2155-2160
- [38] 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 (ICRA)*, Singapore, 2017: 1707-1713
- [39] 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 (IROS)*, Daejeon, South Korea, 2016: 3567-3574
- [40] 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
- [41] Huang Y, Zhang J, Hu X, et al. Framefab: Robotic fabrication of frame shapes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2016, 35(6): 224-224
- [42] 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: Accepted
- [43] T Weyrich, P Peers, W Matusik, S Rusinkiewicz. Fabricating Microgeometry for Custom Surface Reflectance. *Acm Transactions on Graphics*, 2009, 28 (3):1-6
- [44] E Sabourin, JH Bøhn, SA Houser. Accurate exterior, fast interior layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 1997, volume 3 (3) :44-52
- [45] PM Pandey, NV Reddy, SG Dhande. Real time adaptive slicing for fused deposition modelling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43 (1) :61-71
- [46] L Luo, I Baran, S Rusinkiewicz, W Matusik, Chopper: partitioning models into 3D-printable parts. *Acm Transactions on Graphics*, 2012, 31 (6) :1-9
- [47] 刘永进.中国计算机图形学研究进展[J].科技导报,2016,34(14):76-85
- [48] 顾奇,郝捷,陆阳杰,王柳,Gordon G .Wallace, 周琪.生物三维打印的研究进展[J].中国科学:生命科学,2015,45(05):439-449
- [49] 罗中明. 3D 打印算法研究及应用[D].北京印刷学院,2015

- [50] 刘利刚,徐文鹏,王伟明,杨周旺,刘秀平.3D 打印中的几何计算研究进展[J].计算机学报,2015,38(06):1243-1267
- [51] 王春香,李振华.STL 模型分层算法的优化及应用[J].机械设计与制造,2013(03):87-90
- [52] 赵保军,汪苏,陈五一.STL 数据模型的快速切片算法[J].北京航空航天大学学报,2004 (04):329-333
- [53] 韩兴国,宋小辉,殷鸣,陈海军,殷国富.熔融沉积式 3D 打印路径优化算法研究[J].农业机械学报,2018,49(03):393-401+410
- [54] 史玉升.3D 打印技术的工业应用及产业化发展[J].机械设计与制造工程,2016,45(02):11-16
- [55] 赵海明. 3D 打印设计与个性化制造技术[D].浙江大学,2017
- [56] 李青,王青.3D 打印:一种新兴的学习技术[J].远程教育杂志,2013,31(04):29-35
- [57] 杜宇雷,孙菲菲,原光,翟世先,翟海平.3D 打印材料的发展现状[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2014,29(01):20-24
- [58] 柳建,雷争军,顾海清,李林岐.3D 打印行业国内发展现状[J].制造技术与机床,2015(03):17-21+25
- [59] 史玉升,张李超,白宇,赵祖焯.3D 打印技术的发展及其软件实现[J].中国科学:信息科学,2015,45(02):197-203
- [60] 朱艳青,史继富,王雷雷,钟柳文,李育坚,徐刚.3D 打印技术发展现状[J].制造技术与机床,2015(12):50-57
- [61] 郭日阳.3D 打印技术及产业前景[J].自动化仪表,2015,36(03):5-8
- [62] 张学军,唐思熠,肇恒跃,郭绍庆,李能,孙兵兵,陈冰清.3D 打印技术研究现状和关键技术[J].材料工程,2016,44(02):122-128
- [63] 王忠宏,李扬帆,张曼茵.中国 3D 打印产业的现状及发展思路[J].经济纵横,2013(01):90-93
- [64] 齐乐华,钟宋义,罗俊.基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术[J].中国科学:信息科学,2015,45(02):212-223
- [65] 杨恩泉.3D 打印技术对航空制造业发展的影响[J].航空科学技术,2013(01):13-17
- [66] 王子明,刘玮.3D 打印技术及其在建筑领域的应用[J].混凝土世界,2015(01):50-57
- [67] 王萍.3D 打印及其教育应用初探[J].中国远程教育,2013(08):83-87

- [68] 卜卫民.3D 打印技术在古代早期陶器复制中的应用[J].工业设计,2018(05):128-130
- [69] 周伟民,闵国全,李小丽.3D 打印医学[J].组织工程与重建外科杂志,2014,10(01):1-3+7
- [70] 陈剑虹,马鹏举,田杰谟,刘振凯,卢秉恒.基于 Voronoi 图的快速成型扫描路径生成算法研究[J].机械科学与技术,2003(05):728-731

AMiner

版权声明

AMiner 研究报告版权为 AMiner 团队独家所有，拥有唯一著作权。AMiner 咨询产品是 AMiner 团队的研究与统计成果，其性质是供用户内部参考的资料。

AMiner 研究报告提供给订阅用户使用，仅限于用户内部使用。未获得 AMiner 团队授权，任何人和单位不得以任何方式在任何媒体上（包括互联网）公开发布、复制，且不得以任何方式将研究报告的内容提供给其他单位或个人使用。如引用、刊发，需注明出处为“AMiner.org”，且不得对本报告进行有悖原意的删节与修改。

AMiner 研究报告是基于 AMiner 团队及其研究员认可的研究资料，所有资料源自 AMiner 后台程序对大数据的自动分析得到，本研究报告仅作为参考，AMiner 团队不保证所分析得到的准确性和完整性，也不承担任何投资者因使用本产品与服务而产生的任何责任。

AMiner