

基于3D打印技术的水产学科教学实践与探索

李春霖, 刘阳*, 姜腾, 申雅雯, 尹子旭

中国海洋大学水产学院, 山东 青岛

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年3月10日; 发布日期: 2022年3月21日

摘要

3D打印技术在近年来飞速发展, 被广泛应用于各行各业, 在教学中也受到越来越多的重视。本研究设计问卷, 调查桌面级3D打印技术在水产学科教学中的应用现状和需求, 根据调查结果设计3D数字模型, 利用FDM (fused deposition modeling) 熔融沉积成型和LCD (liquid crystal display) 光固化两种桌面级3D打印技术, 打印包括头足纲、腹足纲、海星纲、甲壳纲以及微藻等典型水生生物模型, 对比分析两种3D打印技术的优缺点以及打印不同模型的适用性。结果表明, 上述模型均能够通过3D打印技术实现并进行教学上的应用, FDM和LCD适合打印的模型有所不同。最后提出了3D打印技术在水产学科教学中应用的问题和展望。

关键词

水产学科, 3D打印, FDM, LCD

Practice and Exploration of Aquatic Science Teaching Based on 3D Printing Technology

Chunlin Li, Yang Liu*, Teng Jiang, Yawen Shen, Zixu Yin

College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Feb. 14th, 2022; accepted: Mar. 10th, 2022; published: Mar. 21st, 2022

Abstract

3D printing technology is developing rapidly in recent years, it is widely used in all walks of life and receives more and more attention in teaching. In this study, we design a questionnaire to investigate the application status and demands of 3D printing in aquatic science teaching, and design 3D digital models according to the survey results. We use FDM (fused deposition modeling)

*通讯作者。

and LCD (liquid crystal display) photocuring two desktop level 3D printing technologies to print typical aquatic science biological models including *Cephalopoda*, *Gastropoda*, *Asteroidea*, *Crustacea* and *Microalgae*. We also compare and analyze advantages and disadvantages of these two 3D printing technologies and the applicability of printing different models. The results show that the above models can be realized through 3D printing technology and applied in teaching, and the suitability of FDM and LCD is different. The problems and prospects of the application of 3D printing technology in aquatic teaching are put forward.

Keywords

Aquatic Science, 3D Printing, FDM, LCD

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

3D 打印是在 20 世纪 80 年代出现的一种数字化制造技术,近年来随着研究的深入,其技术成熟性、打印效率和准确度均有所提高[1],尤其是桌面级 3D 打印,在保持价格低廉的同时,性能指标越来越接近工业级 3D 打印[2],推动了 3D 打印技术的普及和在各行各业的应用,其应用的便利性也吸引了广大教育工作者的目光。在教学中,3D 打印技术可以辅助学生进行个性化设计,在制造流程中快速反馈打印结果,对设计进行改进,使学生保持创作的热情和兴趣。也可以打印不同学科专业的各种模型进行应用,例如:在工业设计类专业中用于模型的设计环节,可以提高效率、优化流程[3];在机械、汽车、建筑工程类专业中打印减速器、汽车零件、建筑物模型等具有验证或者实用功能的模型[4];在生物和医疗专业中打印具有较高仿真度的生物模型,例如使用光固化打印技术打印昆虫标本,可以应对目前科研院所和高校中传统昆虫标本种类不全、保存困难、数量稀缺等问题,为昆虫学鉴定和学术科普提供有效的手段[5]。在水产学科专业中,使用桌面级 FDM 熔融沉积成型技术打印人工鱼礁模型,能够很好地完成鱼礁的功能验证以及后续的水阻力实验、流场实验等,改善了实验教学中传统的鱼礁模型制作方法精度低、耗时费力、实验验证效果差等情况[6],提高了实验教学的效果。3D 打印技术还能够将自行设计或扫描得到的金枪鱼、鲨鱼等鱼类数字模型按照一定比例缩放打印,几乎真实完整地还原了鱼体的形态[7],为样品的测量和鉴定工作提供了更多的可能性。

在众多 3D 打印技术类型中,FDM (fused deposition modeling)熔融沉积成型技术和光固化技术属于常用的主流桌面级 3D 打印技术[8]。FDM 熔融沉积成型技术的原理是将热熔性材料加热融化后通过运动控制器按既定轨迹沿喷头挤出,在打印平台上逐层堆叠形成立体模型,其技术门槛低,迭代速度快,设备机械结构简单,材料的成本低、稳定性好,在桌面级 3D 打印技术中占据主要地位[9]。LCD (liquid crystal display)光固化技术是在近年来出现的新型光固化成型技术,其原理是在数字信号控制下,按照切片文件图像信号在固化屏上出现透明区域,紫外光透过透明区域照射光敏树脂使其固化,逐层抬升打印模型,打印精度高,成型速度快,相较于其它光固化成型技术成本极低[10]。

在水产学科的实验课程中包含很多解剖实验和观察结构等教学内容,为对鱼虾蟹等多种水生生物的组织结构有更好的了解,通常需要借助生物样本或者标本模型。但是生物样本和标本模型的获取、制作过程繁琐,成本较高,并且种类和数量均存在限制,保存和更新也比较困难。上述多项研究表明,桌

面级 3D 打印技术凭借其低成本、高效率、高精度、个性化等优势完全可以在教学中进行应用，但目前关于水生生物模型的制作还比较少。因此本研究使用 FDM 熔融沉积成型和 LCD 光固化两种桌面级 3D 打印技术，探究水产学科中种类繁多，结构复杂的生物样本和标本模型能否通过 3D 打印技术还原，以达到实验教学的目的。

2. 材料和方法

2.1. 3D 打印材料

2.1.1. 3D 建模软件

本研究采用的 3D 建模软件为 Cinema 4D 和 Blender。

Cinema 4D 是由德国 Maxon Computer 开发的一款完整的三维设计软件，其程序多为图形化和参数化的设计，界面简洁、软件易学、上手速度快[11]，具备多边形建模和雕刻建模功能，可以构建生物数字模型并对其进行细节性的修饰。

Blender 是一款跨平台、免费开源的三维软件，集成了全面复杂的功能模块，对设备内存和驱动的需求较低，除了建模功能外，还自带 3D Print Toolbox 插件，是用于 3D 打印的实用工具。二者均能够进行水产学科相关生物模型的制作。

2.1.2. 3D 切片软件

本研究中，FDM 熔融沉积成型技术使用的切片软件为 Cura 14.07，它拥有丰富的打印参数可以设置，例如数字模型的尺寸、摆放位置和角度、打印速度、层厚、壳厚、填充密度、支撑类型和支撑密度等，能够兼容多种机械结构的打印机，切片速度快、切片精度高[12]。

LCD 光固化技术使用的配套切片软件为 Photon WorkShop V2.1.23 x64，同样可以设置数字模型的尺寸、摆放位置和角度、支撑类型和密度等参数，因树脂材料一般为液态，还能对模型进行抽壳和打孔以节省树脂。

2.1.3. 3D 打印设备

本研究使用的 3D 打印机为极光尔沃 Z603S 3D 打印机(图 1(a))和纵维立方 ANYCUBIC Photon Mono 3D 打印机(图 1(b))。

极光尔沃 Z603S 3D 打印机采用发展成熟的 FDM 熔融沉积成型技术，纵维立方 ANYCUBIC Photon Mono 3D 打印机采用新兴发展的 LCD 光固化技术。

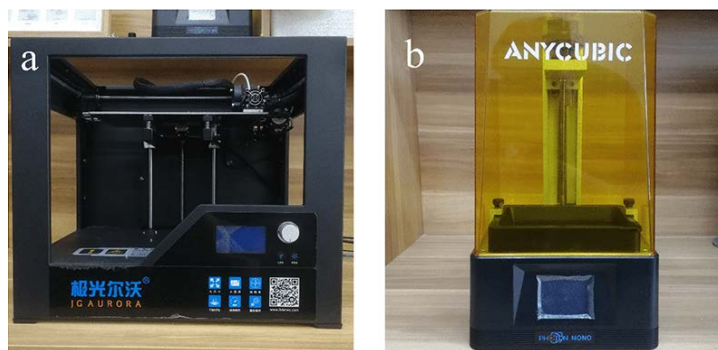


Figure 1. 3D printer: (a) JGAURORA Z603S3D printer; (b) ANYCUBIC Photon Mono 3D printer

图 1. 3D 打印机: (a) 极光尔沃 Z603S3D 打印机; (b) 纵维立方 Photon Mono 3D 打印机

2.1.4. 3D 打印耗材

本研究中, FDM 熔融沉积成型技术采用的打印材料为极光尔沃 1.75 mm 聚乳酸(Polylactic, PLA)材料(图 2(a))。PLA 以淀粉为原料, 经生物发酵产生的乳酸聚合形成, 具备良好的生物降解性、热塑性、力学性能[13]。

LCD 光固化技术采用的打印材料为纵维立方普通刚性树脂(图 2(b)), 主要材质由树脂聚合物单体、光引发剂组成, 固化波长为 355~410 nm。随着研究的深入和各种添加剂的加入, 光敏树脂贮存稳定性、固化速率、力学性能等特点也在不断优化[14]。

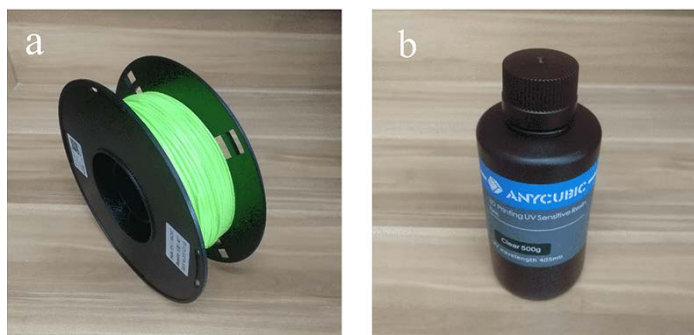


Figure 2. 3D printing materials: (a) PLA; (b) Photosensitive resin
图 2. 3D 打印材料: (a) 聚乳酸; (b) 光敏树脂

2.2. 3D 打印流程

2.2.1. 用户需求分析

本研究结合水产学科课程, 对 3D 打印技术在教学和科研中的应用现状和需求进行问卷调查, 累计收取问卷 92 份。问卷的结果如图 3 所示: 78%的师生对 3D 打印没有了解(图 3(a)), 66%的师生对 3D 建模没有了解(图 3(b)), 96%的师生对 3D 打印有简单或深入的了解兴趣(图 3(c)), 54%的师生认为 3D 打印在课堂或者科研中具有很好的应用前景(图 3(d)), 90%的师生认为 3D 打印会使教学效果更好(图 3(e)), 另外有 77%的师生认为在科研试验中需要借助 3D 模型(图 3(f))。在图 4 所示的统计结果中, 组织、器官、分子、细胞、水产工程设施、微生物、鱼类等海洋生物需求较高。目前, 由于 3D 打印机的精度、打印材料单一以及 3D 建模水平的限制, 本研究主要对多种海洋生物进行建模和打印。

2.2.2. 数字模型设计

本研究采用的建模方法有多边形建模, 雕刻建模和参数化建模三种。多边形建模一般以模型的三视图作为参考, 以简单的几何体为基础, 对几何体的点、线、面等子对象进行编辑和修改, 操作简单、编辑灵活, 理论上可以建立任何模型, 是目前应用最广的建模方法, 所得模型结构鲜明, 需要事先了解建模对象的立体结构[15], 另外其精度一般较低。雕刻建模是一种数字化的雕刻制作方式, 能制作各种生物的基本造型[16], 可在多边形建模的基础上进一步细化, 是制作细节度较高模型的常用方法, 但对电脑配置和建模技术水平要求较高。参数化建模是一种快速的建模方式, 它是以规则的多边形模型为主体, 使用扫描、克隆、放样、布尔运算等工具制作辅助特征, 通过改变参数调整模型的特征, 适用于表面结构有规律的模型, 例如表面具有按规律排列的刺突糖蛋白的冠状病毒。此外还可以使用 3D 扫描仪进行“扫描建模”, 对大小适合的生物模型进行扫描后获取大小相同的数字模型[17]。完成数字模型后, 需导出 STL (STereo Lithography)文件, 在切片软件设置参数、切片处理后进行预览, 并对数字模型缩放比例、摆放角度、调节其他打印参数等进行优化后再打印最终成品。

结合以上建模方法的特点，根据水产生物的特性，本研究提出一套水产生物 3D 模型设计流程，如图 5 所示。

2.2.3. 3D 打印与后期处理

待打印结束，经短暂静置从打印平台上取下模型，对 FDM 熔融沉积成型技术打印的模型，可直接手工剥离支撑，细节部分的支撑可借助斜口钳、刻刀、平头铲刀等工具去除，再进行打磨、抛光、上色、组装等后期处理[18]。对 LCD 光固化技术打印的模型，需佩戴手套、口罩，取模型置于 95%浓度的酒精中浸泡清洗，再使用清水冲洗至无酒精残留，晾干后去除支撑，于紫外线灯下照射完成固化[19]，清洗时间和固化时间与模型的大小和厚度、结构复杂程度等有关。

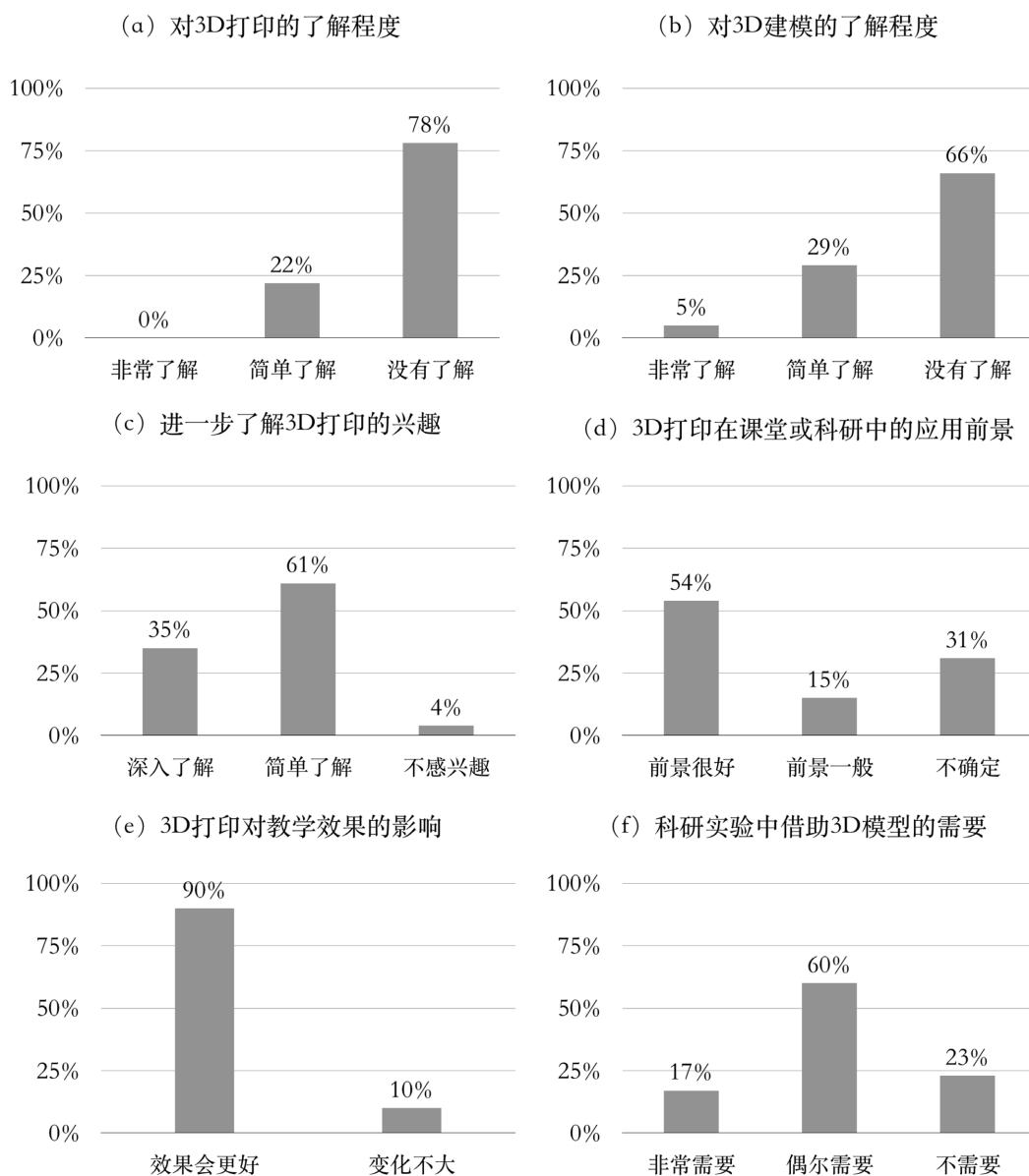


Figure 3. Results of questionnaire survey
图 3. 问卷调查结果

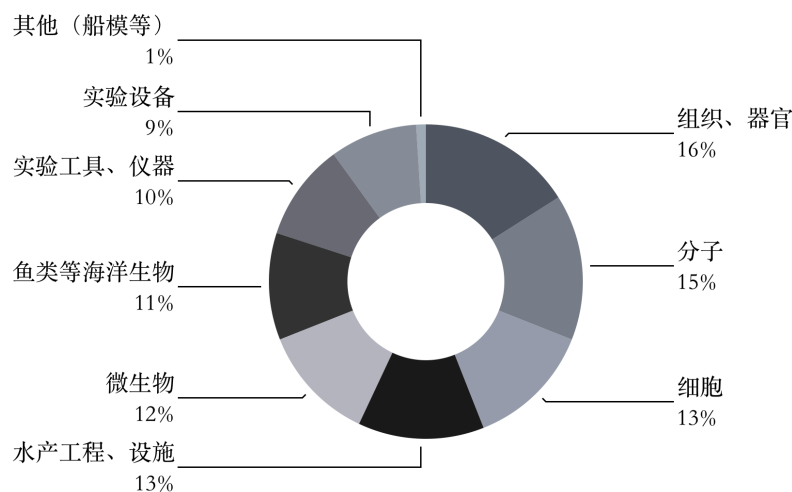


Figure 4. Requirements of 3D printing model

图 4. 3D 打印模型需求

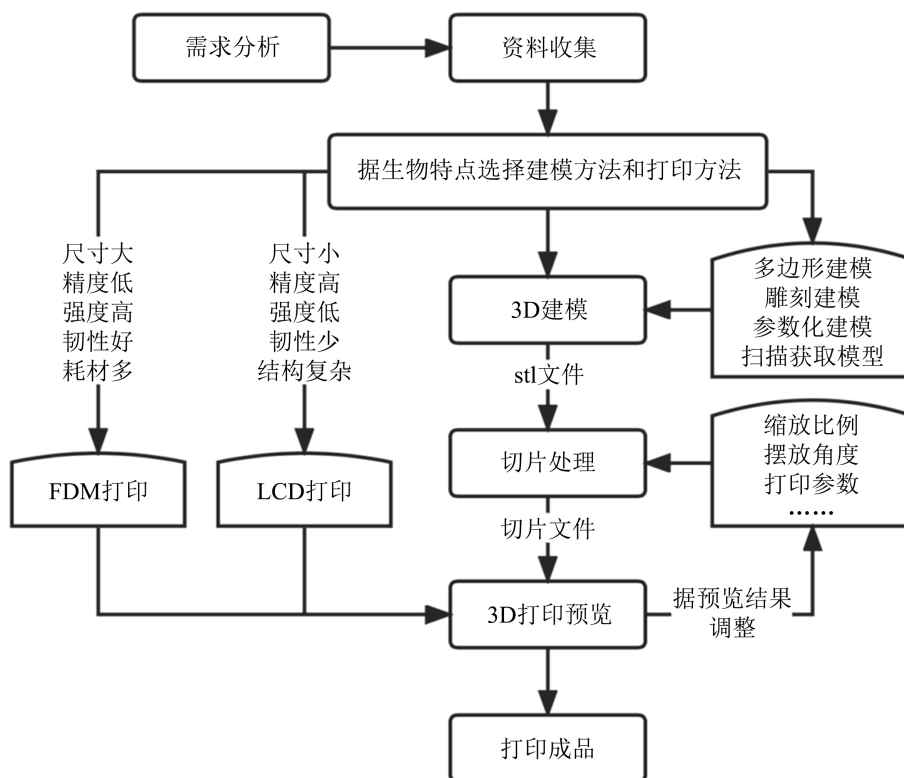


Figure 5. Design process of 3D model

图 5. 3D 模型设计流程

3. 结果

3.1. FDM 打印结果与特点

因技术原理不同, FDM 熔融沉积成型技术打印速度较 LCD 光固化成型速度慢, 相同条件下打印同样大小的模型耗费时间长, 但是打印的过程操作简单, 对环境的影响小。本研究中耗材的价格为 98 元/kg,

成本较低。打印的模型尺寸较大、强度和韧性较高、精度较低、表面有明显的层纹。支撑结构与模型连接较为致密坚固，去除时常对模型的表面质量造成影响，通常将不外露的面朝下打印以减少影响。适合打印对表面质量和精度要求不高的装饰性模型和简单的功能性、实验验证模型，可以通过打磨、抛光、上色等后处理改进模型的表面质量，提高模型的仿真度。

使用该技术打印的模型有科达乌贼、秋刀鱼等自主设计的生物模型，以及在网络上获取或自主扫描得到的脉红螺、暗指蟹、角海星等生物模型，为保持完整性采用整体打印，因此打印尺寸较大。在打印过程中，以横截面积较大的一面为底以减少悬空结构，进而减少支撑对模型表面的影响。对科达乌贼的腕足等细长悬空结构，竖直放置比水平放置打印的成功率更高。另外在能够清楚地表达生物结构特点的情况下，对薄弱结构例如鱼类的鳍，按一定比例进行缩放，可以提高打印的成功率，避免打印失败而造成的材料和时间浪费。由图 6 打印结果来看，头足纲、腹足纲、海星纲、甲壳纲等多种形态的海洋生物均可以使用 FDM 熔融沉积成型打印机完成打印，还原度较高。



Figure 6. Model printed using FDM

图 6. FDM 技术打印模型

3.2. LCD 打印结果与特点

LCD 光固化技术打印时按层固化成型，在相同的横截面积下成型速度较快，完成相同的模型所需的时间较短，但打印流程较为复杂。光敏树脂的价格为 219 元/kg，成本较高，另外由于光敏树脂具有一定的气味和微毒性，在阳光照射下易固化，因此打印环境要保持通风和遮光。打印的模型受到液晶屏大小限制尺寸较小，模型脆弱，强度、韧性较低，从固化平台取下模型极易对其造成损坏。模型精度较高，模型表面光滑，无明显的层纹，对纤细、镂空、复杂的结构也能够很好完成。支撑较易去除且对模型表面的损伤小。对具备复杂结构器官组织、骨骼、分子、微观生物等小规格模型均可以打印。FDM 和 LCD 的打印结果对比见表 1。

本研究中，使用该技术打印的模型主要是微藻。微藻个体微小，肉眼不可见，其在教学演示中的图例多为平面结构，立体结构较难描绘；另外在普通光学显微镜的观察下，由于杂质的存在、微藻的运动、

微藻具有一定透明度等原因也很难全方位观察微藻的立体结构。在这种情况下,根据微藻的结构特点,设计按一定比例放大的模型(图 7)进行打印,可完整呈现微藻的立体结构,便于更加直观地对微藻进行辨认和区分,加深对微藻结构的认识。本研究选取结构特点鲜明的部分微藻进行打印,在打印尺寸较小的情况下,LCD 光固化技术较好的还原了微藻的形态和结构。

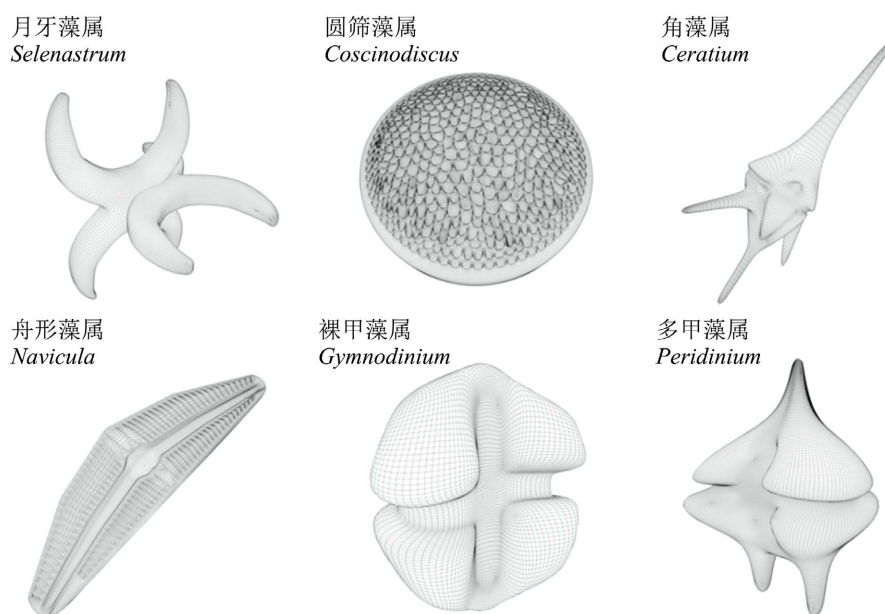


Figure 7. Microalgae digital 3D model
图 7. 微藻数字 3D 模型

Table 1. Comparison of FDM and LCD printing results
表 1. FDM 与 LCD 打印结果对比

	FDM	LCD
打印速度	取决于模型表面积、成型质量、喷头移动速度等,较慢,线长 10~60 mm/h	取决于模型层数和每层光固化时间,较快层高 50 mm/h
操作过程	简单	较复杂
对环境的影响	无毒无气味	微毒有气味
耗材价格	98 元/kg, 成本较低	219 元/kg, 成本较高
成型尺寸	280.180.180 mm 机型多样、尺寸较大	130.80.165 mm 受限于液晶屏,尺寸较小
力学性能	强度和韧性较高	强度和韧性低,易碎
打印精度	层片厚,有层纹,精度低	层片薄,无层纹,精度高
支撑情况	与模型连接致密坚固,易影响表面质量	与模型接触面积小,不易影响模型表面质量

3.3. 应用结果

本研究通过问卷调查证明了 3D 打印在水产学科具有应用的可行性和需求。FDM 技术打印的头足纲、腹足纲、海星纲、甲壳纲等水生生物模型,能够对生物的外观和结构进行高度的还原,主要应用在学生活动中、例如生物科普、创意设计竞赛等,还可以应用于特征较鲜明的生物分类中,得到了较好的反响。

在问卷调查中得到的有关浮游生物、脊椎动物学、藻类生理生态、贝类育种、心脏发育与再生等研究领域的模型制作与打印也在一一展开,以满足师生对多类型、小批量、定制化生物模型的教学需求。

LCD 技术打印的微藻,在浮游生物实验课程中进行了应用,更加直观地展示了微藻的结构,并且在之后的反馈和建议中得到快速的修改和优化,满足了师生对于模型的精准需求和教学需要,极大地提高了学生对课程的兴趣,加深了对专业知识的理解。更有学生因兴趣自发成立研究小组对放射虫、有孔虫等原生生物进行研究,并使用 3D 打印技术还原其微观结构,设计了模型十余件,让这些微小的生物进入到肉眼可视的范围内,增加对其的认知和理解。

在应用的过程中,由于 3D 打印属于前沿和先进的技术,能够引起师生进一步了解的興趣。此外,集多种技术为一体的 3D 打印在应用过程中,还使学生了解到数字建模、生物分类学、生物形态学、计算机信息技术、机电控制、材料科学等其他领域的技术知识,有利于学生激发学生的创新思维,提高学生的综合能力,向着创新型、复合型、应用型的新农科人才发展。

4. 讨论

桌面级 3D 打印技术在水产学科教学中的应用仍然面临着许多问题,例如生物 3D 模型的来源问题,对于自行设计模型来说,3D 建模软件具有一定的学习门槛,需要花费大量的时间进行练习;而 3D 扫描虽然花费时间成本较少,但对扫描的物体的大小和是否容易获得具有要求,而且成本较高。在对不同技术类型打印模型的对比中,缺少量化指标,无法精确地对打印结果进行评估。另外 FDM 和 LCD 技术类型的桌面级打印机虽然成本低,但是其打印模型多仅仅用于外观装饰,因为材料的限制无法在更多的场景中进行应用。

从材料上来看,或许随着桌面级别的金属 3D 打印的出现,以往在船舶与海洋工程领域,工业级金属 3D 打印在船用零件生产、更换、修复的应用[20][21]可以更多的出现在教学中,使实验模型的设计和实际更加接近实际情况,例如在船舶设计阶段打印螺旋桨[22]等模型用于验证和改进,加速迭代与优化,缩短研发时间。还可以与其他高新技术结合进行应用,打印定制无人船和无人机的大部分结构部件[23]、以及软体机器人构件[24]、仿生鲫鱼吸盘、仿真鱼类机器人的部件[25]等。与材料息息相关的还有生物本身作为打印材料而进行的应用,鱼糜凝胶[26]、藻类、藻酸盐等水生生物材料和提取物[27]可以开发成生物打印的原材料,3D 打印技术具有与水产学科融合发展的可行性和潜力。

桌面级 3D 打印机正快速向着更高水平的工业级打印机发展[28],随着 3D 打印技术的更新以及其与各个领域的交叉融合,会有越来越多的 3D 打印技术成果融入水产学科的教学流程中,增加课堂和实验过程中的趣味性,提高学生的创新能力和动手实践能力,甚至改革创新传统的教学方式。

5. 结论

本研究探究并总结了 3D 模型设计和打印流程,采用 FDM 熔融沉积成型技术和 LCD 光固化技术对多种海洋生物进行打印,其中 FDM 熔融沉积成型技术成本低、操作简单、成型速度慢,打印模型尺寸较大、强度高、精度低,可对头足纲、腹足纲、海星纲、甲壳纲等常规大小的生物进行打印还原;LCD 光固化技术成本较高、操作略复杂、成型速度快、尺寸小、精度高,表面质量高、强度低,可对微藻等微观生物和结构进行打印。打印的生物模型主要应用在科普展示、辅助教学、创意设计等方面,仍存在获取模型困难、模型评估不准确、材料单一等问题。最后从金属材料 and 生物材料的角度讨论了 3D 打印技术可与水产学科的教学相融合,具有发展的前景和开发的潜力。

致 谢

感谢中国海洋大学 SRDP (Student Research Developing Program)本科生研究发展计划(项目号:

202010423276X)提供的研究机会和经费支持。

参考文献

- [1] 马忠波. 3D 打印技术研究现状和关键技术研究[J]. 南方农机, 2021, 52(14): 138-140.
- [2] 董洁, 衡良, 殷国富. 桌面级 3D 打印技术及其发展趋势[J]. 信息技术与标准化, 2015(6): 22-26
- [3] 束奇, 刘敬, 崔运静. 3D 打印技术在模型教学中的实践初探[J]. 高教学刊, 2016(19): 145-146.
- [4] 匡鑫. 3D 打印技术在教具制作与教学中的应用[J]. 南方农机, 2015, 46(12): 64.
- [5] 金光耀, 薛来震, 尹德彩. 5 种检疫性昆虫标本 3D 打印研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(11): 145-152.
- [6] 盛化香, 唐衍力, 黄六一, 温海深. 3D 打印技术在增殖工程与海洋牧场实验教学中的应用[J]. 大学教育, 2021(6): 74-76.
- [7] 黄紫丛, 刘阳, 黄锴妍, 陈艺璇, 谢建民, 刘腾宇. 3D 打印技术在海洋渔业研究中的应用进展[J]. 水产研究, 2019, 6(2): 73-81.
- [8] 嵇萍, 刘泗岩. 桌面级塑料 3D 打印机的发展现状[J]. 科技资讯, 2021, 19(22): 65-68.
- [9] 陈硕平, 易和平, 罗志虹, 诸葛祥群, 罗鲲. 高分子 3D 打印材料和打印工艺[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 54-59.
- [10] 周聪, 郭嘉. 光固化三维打印技术的研究进展及应用[J]. 轻工科技, 2021, 37(4): 116-119.
- [11] 吴平莉. 浅谈三维设计软件 Cinema 4D [J]. 视听, 2019(4): 258-259.
- [12] 叶总一. 基于 Cura 的高质量 FDM 3D 打印控制软件开发[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2019.
- [13] 王超, 陈继飞, 冯韬, 陈文刚. 3D 打印技术发展及其耗材应用进展[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(6): 38-44.
- [14] 何岷洪, 宋坤, 莫宏斌, 李军, 潘道成, 梁子骐. 3D 打印光敏树脂的研究进展[J]. 功能高分子学报, 2015, 28(1): 102-108.
- [15] 杨泽慧, 郑重. 三维动画多边形建模技术探析[J]. 数码世界, 2018(2): 44.
- [16] 常姣姣. ZBrush 数字雕刻直观化建模思路[J]. 艺术科技, 2019, 32(6): 97.
- [17] 牟晓东, 杨鑫芳. 六步实现 3D 打印的“扫描建模” [J]. 电脑知识与技术(经验技巧), 2020(3): 24-26.
- [18] 陈福德, 郑明辉, 杨瑞青. 基于 FDM 成型的产品后处理分析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(13): 125-127.
- [19] 孔祥忠. SLA 光固化 3D 打印成型技术研究[J]. 中国设备工程, 2021(11): 207-208.
- [20] 李雪峰, 潘恒沛, 张先锋, 王世宁. 金属 3D 打印技术的发展与应用探讨[J]. 世界制造技术与装备市场, 2020(4): 21-23.
- [21] 宋俊保. 船舶备件管理的新技术——3D 打印技术[J]. 航海技术, 2018(1): 76-77.
- [22] 刘萧. 3D 打印船舶螺旋桨的标志性意义[J]. 中国船检, 2017(6): 34-37+104-105.
- [23] 肖志文, 杨建明, 石国杰, 陈劲松, 孟伟. 船舶与海洋工程领域的 3D 打印技术现状[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(1): 130-133.
- [24] 王成军, 李帅. 软体机器人研究现状[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(12): 948-955+991.
- [25] 李磊, 文力, 王越平, 王思奇, 王田苗. 仿生软体吸附机器人: 从生物到仿生[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1275-1287.
- [26] 向晨曦, 李钰金, 高瑞昌, 白帆, 汪金林, 赵元晖. 打印参数对未漂洗鲟鱼糜凝胶 3D 打印成型效果的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 1-8.
- [27] 吴春亚, 吴佳昊, 吴喆冉, 李曦光, 黄俊杰, 陈明君. 生物 3D 打印技术的新研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 114-132.
- [28] 田韬毓, 关忻. 桌面级 3D 打印机的技术发展及应用前景[J]. 山东工业技术, 2017(4): 240.