

应用3D打印提升空间能力的有效性研究

马红亮¹ 王琳¹ 特伦斯·卡瓦诺² 雷媛¹

(1. 陕西师范大学教育学院, 陕西西安 710062;
2. 北佛罗里达大学教育与人力服务学院, 佛罗里达州杰克逊维尔 32224)

[摘要] 空间能力是人类智力的重要组成部分,对学业和职业成就有着重要的促进作用和预测价值。为探究3D打印技术对空间能力的提升机制,本研究借鉴工程领域的O-CDIO理念,设计开发了“3D打印教育应用”国际暑期课程,并采用单组前后测准实验方法探索该课程对学生空间能力发展的影响。25名不同学科背景的研究生参与研究。研究表明,基于O-CDIO理念的3D打印课程显著增强研究生的空间能力,特别是较复杂的心理旋转能力;对空间能力较弱研究生的促进效果更为显著;理科与美术专业研究生的空间能力提升较文科生明显。研究建议教师在面对面和在线环境中可采用个别化教学方式以提升学生空间能力有效和全面的发展。

[关键词] O-CDIO;3D打印;空间能力;心理旋转;空间组合

[中图分类号] G434 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1007-2179(2019)03-0113-08

一、引言

随着时代的发展,越来越多的研究将空间能力与数学能力、语言能力并列为现代教育应当赋予人的“三大基本能力”(齐建林等,2003;吴宏等,2014)。空间能力是人类认知发展的重要方面,是智力或能力成份中的重要因素(赵叶珠等,1993)。研究发现空间能力在生物、化学、数学等领域发挥着重要作用,能为学业和职业成功提供潜在的预测价值(Bertoline, 1988; Uttal et al., 2013; Stieff & Uttal, 2015)。美国范德堡大学瓦伊等(Wai et al., 2009)

对“天才项目”(Project Talent)的数据分析发现:空间能力与科学成就密切相关,45%的科学和工程学博士的空间视觉化能力排名在前4%,只有不足1%的博士的空间能力在顶尖水平之下。

在空间能力培养方面,早期许多研究认为空间能力是与生俱来的,无法通过后天的教育加以改变。当前多数研究者认为空间能力的发展是遗传与教育共同的结果,学生的空间能力可以通过后天的教育与训练强化,有效的学习能提高空间能力(Crown, 2001; Rafi et al., 2008)。其中,主修与空间能力密切相关的课程、参加计算机辅助设计课程及培训尤

[收稿日期] 2019-03-29 **[修回日期]** 2019-04-16 **[DOI编码]** 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2019.03.012

[基金项目] 2019年度教育部人文社会科学研究一般项目“网络精准扶贫视域下MOOC在贫困地区中小学创客教育中的应用研究”(19XJA8800);2018年陕西省哲学社会科学基金项目“互联网推动陕西省中小学创客教育城乡一体化发展研究”(2018Q02);2018年陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金资助“基于计算思维培养的创客课程体系共享研究”(2018CSWY003)。

[作者简介] 马红亮,博士,教授,陕西师范大学教育学院,研究方向:网络教育+创客教育;王琳、雷媛,硕士研究生,陕西师范大学教育学院,研究方向:创客教育;特伦斯·卡瓦诺(通讯作者),博士,副教授,北佛罗里达大学教育与人力服务学院,研究方向:创客教育、网络教育。

其能提升学生空间能力(Onyancha & Kinsey, 2008)。近年来,随着3D打印技术的飞速发展及其教育应用的普及,研究者开始关注如何利用3D打印技术提升学生的空间能力。本研究旨在利用3D打印技术,以研究生为对象,借鉴工程教育的O-CDIO(为Observe、Conceive、Design、Implement、Operate的首字母缩写,即观察—构思—设计—实施—运作理念)理念设计开发研究生国际暑期课程,并用实证的方法检验这种课程对研究生空间能力的提升效果,以期探索研究生空间能力培养的有效教学法。

二、文献综述

(一)空间能力内涵

空间能力(Spatial Ability,简称SA)结构复杂,不同研究者对其进行的划分不同。公认的观点是空间能力至少包括空间视觉化能力(Spatial Visualization)与空间定向能力(Spatial Orientation)(Michael et al.,1957)。其中,空间视觉化能力包括心理旋转及对二维或三维客体进行分解及组合及扭曲的能力;空间定向能力包括对所示图形各元素排列关系的理解,随着空间结构方向的变化仍保持定向的能力,以及对观察者自身与所处空间之间关系的思考能力(McGee,1979a)。李洪玉等(2005)将空间能力定义为个体对客体或空间图形在头脑中进行识别、编码、贮存、表征、分解、组合和抽象、概括的能力。其中,图形分解及组合能力、心理旋转能力和空间意识能力属于空间视觉化能力范畴,在空间能力结构中起主要作用(McGee,1979b)。本研究就空间视觉化能力下的心理旋转能力与空间组合能力两个子维度展开研究。

(二)3D建模与空间能力培养

越来越多的研究发现,在适当的技术,尤其是2D设计、3D动画、电脑游戏及3D设计等技术的辅助下,空间能力可以被显著提升(Mohler,2001)。已有研究多关注3D建模,涉及3D打印技术的较少。例如,马丁多尔塔等(Martin-Dorta et al.,2008)利用SketchUp建模工具,基于难度梯度式上升任务通过驱动式教学方式培养工程专业大学生的空间能力,研究发现,与传统的纸笔测验相比,基于SketchUp的学习明显提升了学生的空间定向能力,但心理旋转能力提升不显著,他们认为未来研究应聚焦于提

升每个维度的空间能力的技术与学习方式。奥勒姆(Allam,2009)将三维虚拟旋转动画模型作为脚手架辅助工程专业新生的学习,发现学生的空间能力提升明显。然而,该研究中基于计算机辅助设计(CAD)的三维旋转动画仅被当作减轻学生认知负荷的替代工具,并未与学生的工程课程学习建立紧密联系,这也是学生绘图成绩与工具使用无显著相关的主因。扎卡里亚等(Zakaria & Othman,2012)通过AutoCAD软件设计建模活动帮助中学生在三维空间实现思维可视化,提高了学生的空间能力,且发现中等水平空间能力的中学生在三维软件的帮助下表现得与高水平空间能力的学生一样出色。该研究的局限在于缺乏对不同认知水平学习者使用三维建模软件对空间能力提升差异的定量比较。

(三)3D打印与空间能力培养

近年来,随着3D打印技术的普及,研究者开始由单纯的3D建模转向有实体结果输出的3D打印技术。新近研究发现,3D打印(包含3D建模与3D打印输出)对空间能力的培养比单纯的3D建模更有效。黄天麒等(Huang & Lin,2017)认为,传统的三维建模教学方法主要将三维视图作为教学材料,引导学生建构空间认知,但由于学生的空间能力不足以将二维图形转化为三维立体模型,因而限制了这一教学材料的有效性,3D打印技术的引入可使学生通过触摸、视觉等感官通道感知三维图像,从而为学生空间认知能力的发展提供新的途径和方式。例如,孙江山等(2016)设计了面向初中生的3D打印与创意设计课程,发现3D CAD学习能增强中学生空间能力,特别是空间视觉化能力,且空间能力与创造力正相关。

目前关于3D建模和3D打印对空间能力培养的研究多停留在工具使用层面,涉及教学法的研究较少(Kwon,2017),且对大学层次空间能力的培养关注更少。本研究借鉴工程教育领域的最新研究成果——O-CDIO工程教育理念,以研究生为对象,探索该理念指导下的3D打印课程对研究生空间能力的促进作用。研究问题如下:

1) 基于O-CDIO的3D打印课程能否提升研究生的空间能力?

2) 基于O-CDIO的3D打印课程对研究生的何种空间能力提升效果明显?

3) 基于 O-CDIO 的 3D 打印课程对不同水平空间能力研究生的影响有无显著差异?

4) 空间能力的提升机制与研究生的学科背景与先前经验之间有无联系?

三、设计与实施

CDIO 理念近年来在国际工程教育领域影响比较广泛,在航空航天、机电工程等专业和 IT 教育领域应用比较普遍,它融合构思 (Conceive)、设计 (Design)、实施 (Implement) 和运作 (Operate) 于一体,以产品的调研、设计、研发到组织生产的全过程为载体,让学生以主动、实践、多学科知识融合的方式学习,使学生在掌握理论知识的同时,也掌握实践技能 (Crawley et al., 2007)。O-CDIO 是由芬兰图尔库大学 (University of Turku) 塔亚马 (Taajamaa, 2017) 在综合大量文献研究与试点课程实证研究的基础上针对大学生提出的嵌入设计思维的工程教育模型。它在 CDIO 的基础上前置了观察 (Observe) 环节,在自然科学内核的工程教育中加入人本主义色彩。与 CDIO 框架相比,O-CDIO 强调工程前期的观察和设计是实现创新的主要阶段。实施 O-CDIO 教育框架不仅能让学生学习理论的同时掌握实践技能,更强调对学生创造性解决现实问题能力的培养。

本研究将 O-CDIO 教育理念整合到面向研究生的“3D 打印教育应用”暑期课程,同时将 3D 打印的实体模型作为实践材料融入 3D 建模环节。基于 O-CDIO 工程教育理念设计的“3D 打印教育应用”课程分五个学习阶段 (见表一):1) 观察阶段,学习者关注外界或周围对 3D 打印技术的显性和潜在需求,使用调研、原型生成及访谈详细了解现实问题并尝试突破现实问题;2) 构思阶段,学习者思考解决方案及模型,关注创意的生成;3) 设计阶段,学习者通过 3D CAD 软件绘制各种基本模型,学习设计原则,并具象化所构思的模型,不断迭代修改模型;4) 实施阶段,学习者使用 3D 打印机打印设计的作品模型,修改模型并重复打印;5) 运作阶段,学习者向同学和老师汇报最终作品,解释其现实应用的适切性与独特价值。课程持续两周 (10 天),每天 3-4 个小时,共 36 课时。

课程实施教师是来自美国北佛罗里达大学教育技术专业的特伦斯·卡瓦诺 (Terence Cavanaugh)

表一 “3D 打印教育应用”课程活动框架

O-CDIO 阶段	教师	学生
观察 (第 1 天)	指导学生开展需求调研等。	开展系列调研活动,了解现实需求,将非良构问题分解成系列小问题。
构思 (第 2-3 天)	介绍 3D 打印发展历史与应用领域,展示 3D 打印制品及相关实例。	结合自身学科背景,收集相关资料,初步构思 3D 打印作品。
设计 (第 4-6 天)	介绍 3D 模型资源库和学习网站,演示 TinkerCAD、3D Slash 等建模软件。	学习 3D 建模软件,初步设计模型。
实施 (第 7-9 天)	演示完整的 3D 打印流程,解决学生 3D 打印遇到的问题。	创造 3D 打印作品。
运作 (第 10 天)	评价学生作品,并给出针对性修改意见。	提交、展示、分享、反思及改进作品。

博士,全英文授课。课程以“做中学”和“项目式学习”为核心,采用任务驱动的方式由浅入深地开展教学。特伦斯博士每次课讲解时长约 1 小时,剩余 2-3 小时学生自主探索并与同伴交流协作。期间,特伦斯博士和两个研究生助教负责答疑解惑。教学方式采用面对面与线上学习混合的模式,所有课程资料均发布在 Moodle 平台,学生可在课后自主学习,通过 Moodle 系统提交作业和作品。

四、研究方法

(一) 研究对象

本研究以参与 2018 年陕西师范大学研究生国际暑期课程“3D 打印教育应用”的学生为对象。35 名学生自愿报名参加学习,其中 25 名学生 (22 女 + 3 男) 学完课程并参与空间能力前后测,理科和艺术专业 12 人 (教育技术 9 人、计算机科学 2 人、美术 1 人),文科专业 13 人 (特殊教育 5 人、学前教育 4 人、课程教学 2 人、职业教育 2 人)。

(二) 数据收集

本研究采用定量和定性相结合的方法收集数据。定量数据收集方面,研究者采用单组前后测实验设计,使用的空间能力量表由心理旋转量表 (PSVT:R) 和空间组合量表 (ASVAB-AO) 两部分组成。其中,PSVT:R (Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations) 由美国普渡大学盖伊 (Guay) 编制后,经过多番论证与修改 (Wikipedia, 2015),主要用于测试个体对空间旋转后的物体分辨能力。该量表采用可围绕多个轴旋转的三维图形,通过研究

物体是如何旋转的,想象目标物体按照相同方式旋转后呈现的位置形状表征。量表由30道题目组成,每题记1分。ASVAB-AO是美国兵种倾向选择测验(Armed Services Vocational Aptitude Battery)中物体组合(Assembling Objects)部分的空间能力测试,被试需通过连接点联通各独立部分并组合成正确的几何图形。该量表共16道题,每题记1分,有较高的信效度与公平性(Roberts et al., 2000)。此外,我们在前测加入学习者空间能力的之前经验调查问卷。问卷来自于俄亥俄州立大学研究生院奥勒姆的博士论文(Allam, 2009)。该问卷共计11题,采用李克特5点量表计分,分值在11-55之间。先前经验调查问卷显示,修读该课程的学生之前没有3D软件的使用经验,也没有学过3D建模、3D打印,以及与空间能力发展相关的课程。

研究者在课程结束后还对6名学习者进行焦点小组访谈,并将录音转为文本。访谈内容包括基于O-CDIO理念的3D打印课程的学习收获与体验、未来学习意愿和建议等。此外,我们还从空间结构复杂性、创造性、功能性、美观性四方面分析与评价学生3D打印作品,以深入探讨基于O-CDIO理念的3D打印课程对研究生空间能力的促进效果。

五、研究结果

(一) 基于O-CDIO的3D打印课程对研究生空间能力的整体影响

配对样本t检验显示,25名研究生空间能力前后测数值有显著差异($t=2.447, p=0.022 < 0.05$),且后测较前测提升了3.88,说明3D打印课程对研究生空间能力提升显著。这也印证了空间能力可通过后天的练习和训练加以提升。

在3D建模过程中,学习者能自由翻转和旋转物体,改变物体的视角与距离,从而增强对三维旋转的理解。实验结束后的焦点小组访谈中,学生W(空间能力 $SA_{pre}=39$,空间能力 $SA_{post}=40$)表示,在3D建模过程中,利用旋转工具看到了模型背面的形状,其“帮助测试(空间能力后测)时好像也能看到平面上的三维图形背后的信息,更容易想象旋转后的样子”。这表明,三维空间旋转物体和改变对物体的视角与距离的体验能帮助学生心理旋转(PSVT:R)测试中以自身为轴,想象视觉刺激物在立体

空间的旋转全过程。3D建模过程的旋转物体操作将对象隐藏的三维信息显露出来,帮助学习者在脑海中构建完整模型,增强其空间感知,进而有助于改善他们的空间视觉化能力。同时,多数学生将3D建模的作品打印出来,这种实体模型打印激发了他们的兴趣,使学习刺激从最初的视觉媒介转变为“视觉媒介+触觉媒介”。根据信息处理理论,人类通过多种感官刺激感知世界,刺激源的多样性增强了知识的稳定性(Mayer, 1997; Shams & Seitz, 2008)。学习主体在自由旋转和触摸实体模型的过程中习得的三维概念与三维模型构建技能有助于他们将工作记忆转换为长时记忆(Isotani & Mizoguchi, 2010)。之后,在面临测试与问题时,他们可以提取这一经验,在大脑中想象物体旋转的全过程,从而表现出更高层次的心理旋转能力。

在问及课程对空间能力的影响时,大多数同学表示O-CDIO教学框架使其了解了3D建模知识,还让他们训练了空间能力。学生Z($SA_{pre}=24$, $SA_{post}=34$)表示,课程介绍的3D模型应用案例极大地启发了创意生成;应用在线建模软件对大脑中模型进行建构与优化,使其不仅对三维空间概念有了认识,也掌握了3D建模技能;此外,用3D打印机实物化模型是其最期待的,最终成品与最初创意的对比让其对整个设计过程的体会更深刻。

在学生作品中,有位学生将拍下的大雁塔照片导入TinkerCAD在线建模网站,通过摹绘大雁塔的外观将二维平面结构转换为三维立体空间结构,打印出微缩版的立体大雁塔模型。在完成作品的过程中,学生可以从不同视角观察并触摸实体模型,感知其与二维平面图形、三维虚拟模型的差异。这种空间抽象概念与直观经验的交互引导着空间认知,从而将空间认知转化到现实环境,实现空间认知的具身化。

(二) 基于O-CDIO的3D打印课程对不同维度空间能力的影响

研究者对空间视觉能力两个子维度的前后测进行配对样本t检验(心理旋转 $t=2.226, p=0.036 < 0.05$;空间组合 $t=1.555, p=0.133 > 0.05$)后发现,心理旋转能力有显著提升,空间组合能力提升不明显,这说明3D打印课程更有助于培养研究生的心理旋转能力。

为探究为何存在此种差异,我们将学生心理旋转与空间组合能力前后测成绩制成散点图(见图1)后发现:心理旋转成绩主要分布在区域三(前测成绩低、后测成绩高)和区域四(前测成绩高、后测成绩高);空间组合能力测试中绝大多数人的成绩落在区域四(前测成绩高、后测成绩高)。由此可见,一方面,大部分研究生学完课程后,心理旋转能力增加或保持在较高水平,只有极少数学生始终保持在较低水平;另一方面,本课程对空间组合能力的影响可能存在天花板效应,即大多数学生空间组合能力在课程实施前后始终都较高。

出现这样结果的原因可能在于:心理旋转要求在大脑中构建三维模型,并模拟操纵模型在视觉空间转换的过程,这对空间认知能力有更高阶的要求,基于O-CDIO理念的3D建模与实体打印有助于学生发展这种空间认知能力。空间组合能力只需匹配识别多个二维视图的特征并评估其三维空间关系,将分散的多个对象组合成为整体。日常生活经验对普通的空间组合能力发展就有一定的积极影响,因此学生的空间组合能力自然普遍较高。黄天麒等(Huang & Lin,2017)的研究也发现,日常教学使用的三视图对普通空间能力培养具有一定效用,但对更高阶的空间能力需要通过3D建模与实体模型辅助教学。

焦点小组访谈中,学生S($psvt_{pre} = 10, AO_{pre} = 16; psvt_{post} = 23, AO_{post} = 14$)表示,“空间组合测试题非常简单,只要掌握了解题技巧,基本能做对,但空间旋转测试题要难一点,知道该怎么做,只是在脑海中模拟它的旋转过程还会出错,不是旋转的角度,就是旋转的方向不对。”在回答3D打印课程的学习的影响时,同学S表示,在自主探索3D建模软件的过

程中,Tinkercad在线建模工具的工作平面与“上下左右前后透视工具”帮助其实现x轴、y轴及z轴的360°旋转,在三维立体空间中以不同视角观测屏幕对象的运动轨迹与方向,以构建和完善模型,且这种能力在后测试题中帮助其在面对二维平面的视觉刺激物时,更容易想象出旋转的方向与角度。

(三)基于O-CDIO的3D打印课程对不同水平学生空间能力的影响

本研究依据空间能力前测成绩($SD = 7.04$),将研究生分为高中低三组,并对高分组($n = 8, M = 34.75, SD = 3.33$)与低分组($n = 8, M = 19.50, SD = 5.45$)前后测进行配对样本t检验(见表二),以检验两组前后测有无显著差异。

表二 不同水平的空间能力前后测配对样本t检验

空间能力	前测	后测	t	p
	M ± SD	M ± SD		
高分组	34.75 ± 3.33	35.13 ± 4.58	0.268	0.797
低分组	19.50 ± 5.45	29.13 ± 8.87	2.754	0.028 *

注: * $p < 0.05$ 。

表二显示,高分组前后测差异不显著($t = 0.268, p = 0.797 > 0.05$),低分组空间能力后测分数有显著提升($t = 2.754, p = 0.028 < 0.05$)。由此说明,基于O-CDIO的3D打印课程对空间能力弱的学生的空间能力发展更有效。这一发现不支持胡克(Huk,2006)的研究结论,该研究认为3D模型的使用,增加了低空间能力学生的认知负荷,而高空间能力的学习者能从3D空间模型受益。相反,本研究支持黄天麒等(Huang & Lin,2017)的研究结果,即空间能力训练对空间能力弱的学生提升效果更

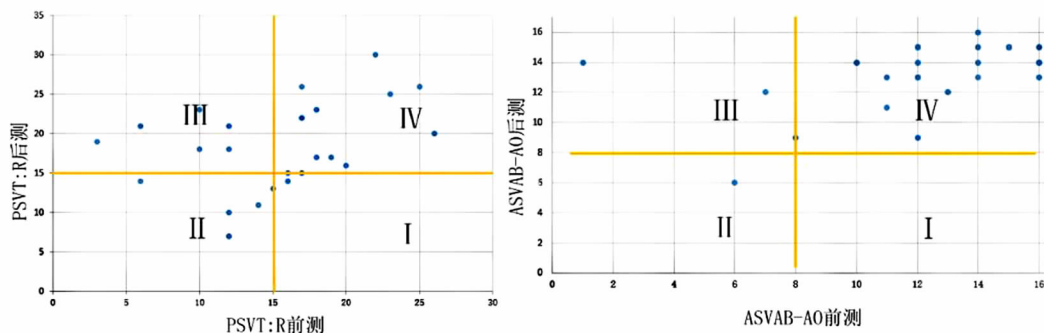


图1 心理旋转与空间组合能力散点图

著。至于为什么高分组空间能力前后测成绩没有显著性提升,原因可能在于天花板效应,即高分组学生普遍得分较高,进步空间相对较小。

为了探究高低分组何种空间能力的提升效果显著,本研究又对高低分组不同类别的空间能力前后测分数进行配对样本 t 检验,结果发现:低分组的心理旋转能力显著提升($t = 2.861, p = 0.024 < 0.05$),空间组合能力并未显著提升($t = 1.388, p = 0.208 > 0.05$)。这说明就空间能力较弱的研究生而言,3D 打印课程对其复杂的心理旋转能力的提升效果更显著。

(四) 基于 O-CDIO 的 3D 打印课程对空间能力影响的学科背景与先前经验差异

为了检验 3D 打印课程对空间能力的提升在学科背景上是否存在显著差异,研究者对实际参与并完成暑期课程的理科 + 美术组(12 人)、文科组(13 人)进行空间能力前后测的独立样本 t 检验,结果发现:不同学科背景的空间能力前测成绩没有显著性差异,后测有显著性差异,即后测理科 + 美术组的空间能力成绩显著高于文科组($t = 2.193, p = 0.039 < 0.05$)。本研究对两组学习者的空间能力前后测成绩进行配对样本 t 检验后发现,文科组学生的后测成绩没有显著提升,理科 + 美术组后测成绩显著提升($t = 2.856, p = 0.016 < 0.05$)(见表三)。出现这种结果的可能原因是,依据皮亚杰先前经验的观点,理科 + 美术专业可能比文科专业为学生提供了更多接触空间问题的机会。例如,学生学习数学运用直角坐标系的先前经验,对解决空间能力测量的“水平问题”有直接帮助,文科学生较少接触空间能力的训练或练习,导致他们空间能力测试面临更多难题。李杰等(2002)也发现理科 + 美术学生解决空间问题具有特殊优势。为探究何种空间能力的提升效果更显著,我们又对学科背景分组下不同维度空间能力前后测分数进行配对样本 t 检验,结果发现:理科 + 美术组学生心理旋转能力显著提升($t = 2.432, p = 0.033 < 0.05$),空间组合能力并无显著性提升($t = 1.492, p = 0.164 > 0.05$)。这进一步说明就理科 + 美术类研究生而言,3D 打印课程对复杂的心理旋转(PSVT:R)能力提升效果更显著。

访谈结果显示,计算机学院的学生 A($SA_{pre} = 23, SA_{post} = 44$)表示,“虽然之前没有用过类似软件,但是很容易上手,(3D 建模软件的)菜单栏、工具

表三 不同学科背景的空间能力前后测配对样本 t 检验

学科背景	前测	后测	t	p
	M ± SD	M ± SD		
理科 + 美术	27.92 ± 6.83	34.17 ± 5.01	2.856	0.016 *
文科	26.85 ± 7.74	28.54 ± 7.47	0.773	0.454

注: * $p < 0.05$ 。

与其他常用软件布局类似,即使不太明白老师的讲解,也可以自学掌握”。课程教学专业的研究生 B($SA_{pre} = 24, SA_{post} = 16$)则表示,“无论是 3D 建模还是 3D 打印机的使用操作都有难度,因为又是英语教学,所以不太明白老师课堂讲授的内容,在自主探索的过程中总是遇到各种各样的麻烦,平时学习中很少接触类似的软件。”由此可见,O-CDIO 教学框架虽然整体上给了学生实践空间,提升了学生的参与性,但由于英语教学的制约,对于没有相关背景的文科学生,“做中学”与“基于项目的学习”可能增加了他们的认知负荷。本研究对不同学科背景研究生的 3D 打印作品进行分析后发现,理科研究生的作品较贴近现实生活,且结构较复杂,涉及建筑模型、细胞模型等;文科研究生的作品的美观性与创造性较明显,空间结构复杂性与功能性表现较弱,他们的作品通常是小巧精致的创意性饰件,如创意摆件、相框、手机壳等。

对空间能力前后测与先前经验的皮尔逊相关性分析结果表明,3D 打印软件的使用、手绘、运动等先前经验对空间能力的发展影响不大(p 值均大于 0.05),这一结果与奥勒姆(2009)的研究发现不同。奥勒姆研究认为,先前经验与空间能力的高低呈线性相关,其中绘图、建模、运动(运动经验)和音乐(音乐经验)对空间能力有正向显著影响,但运动对空间能力有负向影响。这一差异可能在于我国与西方国家的教育和文化差异,具体原因还需探讨。此外,本研究按先前经验得分高低进行分组,然后对两组空间能力的前后测分别进行独立样本 t 检验发现,两组前测和后测均没有显著差异($t_{pre} = 0.256, p = 0.801; t_{post} = 0.349, p = 0.731$),且配对样本 t 检验发现两组均没有显著提升($t_{前期经验高分组} = 1.958, p = 0.074; t_{前期经验低分组} = 1.507, p = 0.160$),但先前经验得分低的学生后测分值提升更多(先前经验高分组 $M = 3.77$; 先前经验低分组 $M = 4$)。这说明 3D 打印课程对先前经验低分组的学生空间能力提升作用更大,但效果不显著。

六、结论与讨论

本研究通过基于 O-CDIO 理念的 3D 打印课程的设计与实施,发现这种教学法引导下的 3D 打印课程:1)对研究生空间能力的培养有积极而显著的影响;2)对研究生较复杂的心理旋转能力提升较明显,对空间组合能力则可能存在天花板效应;3)对空间能力较弱的研究生有显著提升效果;4)对理科和美术专业研究生的空间能力提升效果要优于文科研究生。

综合而言,基于 O-CDIO 理念的 3D 打印课程使研究生在“观察、构思、设计、实施、运作”这一完整的工程产品制造过程中,经历了从二维平面图形创意到 3D 数据模型再到实体产品的过程,其空间能力也在反复转换的过程中得到了提升。课程充分调动了学习者的主动性与积极性,提升了参与度;让学生在实践和项目中学习,加深了对三维空间概念的理解,能不同程度地发展学习者的空间能力,尤其是较复杂的心理旋转能力。

基于 O-CDIO 的 3D 打印课程具有低门槛、高界限、阔空间的特点。低门槛指没有 3D 建模经验与 3D 打印机使用经历的学生也可以轻松学习;高界限指不同空间能力的学习者能根据自身条件自由探索,尤其对空间能力较弱的研究生提升效果更明显;阔空间指不同专业和学科背景的学生能完成类型各异的项目。

具体实施过程中,教师需提供细致的个别化指导与适时促进(尤其是文科生),还可以充分发挥在线教学系统的学习分析和异步互动功能,让不同专业背景的学生的空间能力均得到提升。此外,课程设计可以依据空间能力的前测结果呈现差异化学习材料,如对理工科和美术专业的学习者可呈现抽象的图像化、符号化教学辅助材料,以满足其大脑中加工旋转的认知过程,对文科学习者则呈现具象的教学辅助材料,使其通过动手实践强化三维感知。

本研究的 3D 打印课程采取全英文授课,增加了学习的难度,这可能制约空间能力提升的实际效果。本研究以教育学专业(含教育技术)学生和女生居多,学科和性别因素也可能对空间能力的提升效果产生影响。因此,相应结论还需在更大数量样本中进行验证。此外,未来研究还需探究不同教学框架或策略

下 3D 打印课程对空间能力培养的实际影响。

[参考文献]

- [1] Allam, Y. S. (2009). Enhancing spatial visualization skills in first-year engineering students[D]. The Ohio State University.
- [2] Bertoline, G. R. (1988). The implications of cognitive neuroscience research on spatial abilities and graphics instruction[J]. In Proceedings ICEGDG, Vol. 1:28-34.
- [3] Crawley, E., Malmqvist, J., Ostlund, S., & Brodeur, D. (2007). Rethinking engineering education[J]. The CDIO Approach, 302: 60-62.
- [4] Crown, S. W. (2001). Improving visualization skills of engineering graphics students using simple javascript web based games[J]. Journal of Engineering Education, 90(3): 347-355.
- [5] Huang, T. C., & Lin, C. Y. (2017). From 3D modeling to 3D printing: Development of a differentiated spatial ability teaching model[J]. Telematics and Informatics, 34(2): 604-613.
- [6] Huk, T. (2006). Who benefits from learning with 3D models? The case of spatial ability[J]. Journal of Computer Assisted Learning, 22(6):392-404.
- [7] Isotani, S., & Mizoguchi, R. (2010). Cognitive Load Theory[J]. Psychology of Learning & Motivation, 55(4):37-76.
- [8] Kwon, H. (2017). Effects of 3D printing and design software on students' overall performance[J]. Journal of STEM Education: Innovations and Research, 18(4): 37-42.
- [9] 李洪玉,林崇德(2005).中学生空间认知能力结构的研究[J].心理科学, 28(2):269-271.
- [10] 李杰,赵淑文,朱文彬,努达尔(2002).关于大学生空间能力与所学专业关系的调查研究[J].首都师范大学学报(社会科学版), (2):120-124.
- [11] Mayer, R. E. (1997). Multimedia learning: Are we asking the right question? [J]. Educational Psychologist, 32(1):1-19.
- [12] Martín-Dorta, N., Saorín, J. L., & Contero, M. (2008). Development of a fast remedial course to improve the spatial abilities of engineering students[J]. Journal of Engineering Education, 97(4): 505-513.
- [13] McGee, M. G. (1979a). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences [J]. Psychological bulletin, 86(5):889.
- [14] McGee, M. G. (1979b). Human spatial abilities: Sources of sex differences[M]. New York: Praeger.
- [15] Michael, W. B., Guilford, J. P., Fruchter, B., & Zimmerman, W. S. (1957). The description of spatial-visualization abilities [J]. Educational and Psychological Measurement, 17(2): 185-199.
- [16] Mohler, J. L. (2001). Improving spatial ability with virtual reality: A review of research & applications[J]. WebNet Journal: Internet Technologies, Applications & Issues, 3(1): 28-35.
- [17] Onyancha, R., & Kinsey, B. (2008). The effect of engi-

neering major on spatial ability improvements over the course of undergraduate studies [C]. *Frontiers in Education Conference-global Engineering: Knowledge Without Borders*. IEEE.

[18] 齐建林,刘旭峰,皇甫恩,苗丹民,邵永聪,王伟,刘练红,陈静(2003). 五项空间能力测验的结构效度分析[J]. *第四军医大学学报*, (21):1993-1995.

[19] Rafi, A. , Samsudin, K. A. , & Said, C. S. (2008). Training in spatial visualization: the effects of training method and gender [J]. *Educational Technology & Society*, 11(3) : 127-140.

[20] Roberts, R. D. , Goff, G. N. , Anjoul, F. , Kyllonen, P. C. , Pallier, G. , & Stankov, L. (2000). The armed services vocational aptitude battery (ASVAB): Little more than acculturated learning (Gc)!? [J]. *Learning and Individual Differences*, 12(1) : 81-103.

[21] Shams, L. , & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning[J]. *Trends in Cognitivences*, 12(11):0-417.

[22] Stieff, M. , & Uttal, D. (2015). How much can spatial training improve STEM achievement? [J]. *Educational Psychology Review*, 27(4) :607-615.

[23] 孙江山,林立甲,任友群(2016). 3D CAD支持中学生创造力和空间能力发展的实证研究[J]. *中国电化教育*, (10):45-50.

[24] Taajamaa, V. (2017). O-CDIO: Engineering education framework with embedded design thinking methods[D]. Finland:University of Turku.

city of Turku.

[25] Uttal, D. H. , Miller, D. I. , & Newcombe, N. S. (2013). Exploring and enhancing spatial thinking: Links to achievement in science, technology, engineering, and mathematics? [J]. *Current Directions in Psychological Science*, 22(5) : 367-373.

[26] Wai, J. , Lubinski, D. , & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance [J]. *Journal of Educational Psychology*, 101(4) : 817.

[27] Wikipedia (2015). Purdue Spatial Visualization Test: Visualization of Rotations[EB/OL]. [2018-10-11]. https://en.wikipedia.org/wiki/Purdue_Spatial_Visualization_Test:_Visualization_of_Rotations.

[28] 吴宏,汪仲文(2014). 中小学生学习空间能力的构成要素与水平层次及评价指标[J]. *数学教育学报*,23(5):41-45.

[29] Zakaria, F. , & Othman, A. (2012). Effectiveness of AutoCAD 3D software as a learning support tool[J]. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 7(2) : 57-60.

[30] 赵叶珠,林钟敏(1993). 大学生空间思维的性别差异研究[J]. *心理科学*, (2):18-21.

(编辑:魏志慧)

An Empirical Study on Improving Postgraduate Students' Space Ability by Using 3D Printing Courses based on O-CDIO Engineering Model

MA Hongliang¹, WANG Lin¹, Terence Cavanaugh² & LEI Yuan¹

(1. School of Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. College of Education and Human Services, University of North Florida, Jacksonville, Florida, USA)

Abstract: *Spatial ability is a component of human intelligence, and it plays a significant role in promoting and predicting scientific achievements. In the cultivation and development of spatial ability, 3D printing technology has the possibility, although most of the research studies still focus on tool usage. Based on the popular O-CDIO concept in the engineering education field, this research was conducted in an international summer postgraduate course "3D Printing in education", which also analyzed the actual effect of this course on students' spatial ability. Using a mixed method of quantitative analysis and qualitative analysis, it is found that the O-CDIO-based 3D printing course can: 1) significantly enhance the spatial ability of postgraduates, especially the complex mental rotation; 2) significantly promote the development of postgraduates with weak spatial ability; 3) improve the spatial ability of postgraduates majoring in science and arts better than students in liberal arts. Findings also support that individual facilitation in both face-to-face and online environment are necessary to promote students' spatial ability development.*

Key words: *O-CDIO; 3D modeling; 3D printout; spatial visualization; mental rotation; assembling objects*