

3D打印技术在指关节缺损的应用研究进展

林东鑫¹, 何藻鹏^{2,3}, 苏炜炜⁴, 黄文华^{1,3,4}

1. 南方医科大学基础医学院人体解剖学国家重点学科/广东省医学生物力学重点实验室, 广东 广州 510515; 2. 广州医科大学附属顺德医院手足外科, 广东 佛山 528315; 3. 广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515; 4. 南方医科大学第三附属医院骨外科, 广东 广州 510630

【摘要】先阐述了自体移植和传统人工关节置换的优劣势,而后分析了3D打印技术具有术前精确设计模拟解剖形态,术中导航减少出血,以及3D打印假体多孔结构有利于骨长入等优点,但同时3D打印涉及打印材料、伦理以及机械强度差等难题。随着科技的进步以及材料学发展,用3D打印技术打印出来的具有生物活性的人工关节必定是未来骨科发展的新趋势。

【关键词】掌指关节缺损;近侧指间关节缺损;3D打印;人工假体;自体移植;综述

【中图分类号】R318;R684

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)02-0250-04

Research progress of 3D printing technology in finger joint defect repair

LIN Dongxin¹, HE Zaopeng^{2,3}, SU Weiwei⁴, HUANG Wenhua^{1,3,4}

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics/National Key Discipline, Department of Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. Department of Hand and Foot Surgery, Shunde Hospital Affiliated to Guangzhou Medical University, Foshan 528315, China; 3. Guangdong Medical 3D Printing Application and Transformation Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510515, China; 4. Department of Orthopedic Surgery, the Third Affiliated Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510630, China

Abstract: After introducing the pros and cons of autograft and conventional prosthetic joint replacement, the merits of 3D printing technology are analyzed. Although 3D printing technology has the advantages of precise preoperative design to simulate the anatomical shape, intraoperative navigation to reduce bleeding, and 3D printed prosthesis of porous structure to facilitate bone ingrowth, it involves several problems, such as printing materials, ethics and poor mechanical strength. With the advancement of technology and material science, using 3D printing technology to print out bioactive artificial joints will definitely be a new trend in the future development of orthopedics.

Keywords: metacarpophalangeal defect; proximal interphalangeal joint defect; 3D printing; artificial prosthesis; autologous; review

前言

临床上引起指关节缺损的机制有外伤、感染、肿瘤、风湿免疫病、先天畸形等,相关症状表现为关节

疼痛、畸形、活动受限及僵硬^[1]。由于掌指关节承担了36%的手指运动功能^[2],所以指关节的完整性和灵活性对于手功能至关重要。临床上对于膝、髋等大关节人工置换的技术已经日趋成熟,然而对于指关节这类小关节的人工置换,通过临床随访发现,小关节的置换远远未达到负重大关节那样的理想效果。这是由于指关节解剖形态复杂,以及指关节需要承担精细动作所决定的。指关节的复杂形态决定了设计人工假体时应该更加符合指关节的解剖结构,重建指关节的生物力学环境显得尤为重要,理想情况下应该对每一例指关节缺损进行个性化设计,以助于提升患者的生活质量。目前,对于指关节缺损的治疗措施主要包括截肢、关节固定术、硅胶假体置换

【收稿日期】2020-05-02

【基金项目】广东省科技计划项目(2016B090917001,2017B090912006);
深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队(SZSM201612019);佛山市创新驱动助力工程:钟世镇院士专家工作站(2019012);佛山市科技局科技创新项目(2017AG100243)

【作者简介】林东鑫,硕士,研究方向:骨外科、3D打印,E-mail: 523541156@qq.com

【通信作者】黄文华,教授,博士生导师,研究方向:临床应用解剖学、数字医学及3D打印,E-mail: 13822232749@139.com

术、碳素假体置换术和带血管蒂的脚趾关节移植,尽管以上方法均能够有效帮助病人止痛,但是只有人工假体置换和自体移植才有希望帮助病人保持活动能力。人工假体包括了传统的按照尺寸生产的假体以及利用3D打印快速成型技术依照每位患者自身情况设计出的精确假体。本文将指关节缺损的自体移植、人工关节置换与新型技术3D打印指关节加以对比,分析其各自优劣势,并对3D打印技术应用于小关节缺损方面提出展望。

1 传统治疗指关节缺损的方法

1.1 自体移植

骨和软骨组织有良好的支撑作用,临床实验证明可以将其用于移植重建关节缺损^[3]。Boulas等^[4]对5例掌指关节缺损采用自体跖趾关节移植,术后平均活动范围达到了74°。但是2年后均出现了严重的并发症,如软骨坏死及关节间隙狭窄。Engkvist等^[5]研究发现自体移植会导致关节疼痛,不能达到良好的功能恢复。Zappaterra等^[6]采用了自体肋软骨移植修复掌指关节缺损。Jung等^[7]用自体髂骨移植修复缺损,术后掌指关节的平均活动范围不令人满意,还出现了骨关节炎。Tsubokawa等^[8]对带血管蒂第二脚趾关节移植至近侧指间关节的长期研究显示,术后平均活动范围为47°,所有患者均有一定程度的伸肌延迟和屈曲痉挛。然而郭恩覃等^[9]认为,带血管蒂的脚趾关节移植是保存骨骺板的唯一办法,对儿童指关节缺损术后手指的发育影响较小。尽管该术式保留了一定的生长潜力,但是其伸肌延迟和屈曲痉挛不可避免,这是该术式所面临的严重问题。总之,自体移植具有良好的组织相容性,但是术后难以避免创伤性关节炎或关节退行性改变的发生。

1.2 人工关节置换

掌骨头桡侧髁比尺侧髁略大,第1掌骨头与其他4指形态不同,其掌侧关节面大于背侧关节面,并且第2、3掌骨头关节面面积明显比其余掌骨头大。而各近侧指骨底在形态、高度、面积上相似,但是各近侧指骨的侧副韧带的起点距离掌骨头关节面桡侧比尺侧远^[10]。掌指关节复杂的解剖形态、生物力学,骨头的小尺寸,以及手精细动作的功能需要等,都对手指基部和中间关节的设计、制造提出了严峻的挑战。自1959年首次报道了掌指关节置换术,人类就在探索人工假体路上大胆尝试,材料学的高速发展也促进了假体材质和功能进一步改善,各种各样的假体被用于临床。从早期的Niebauer-Cutter假体到普通铰链针相连的假体,再到氧化铝、陶瓷和镀膜聚乙烯材料组成的铰链型假体,以及

新型钛碳假体,但都因为其各自的缺陷而没有被普及,甚至已经被淘汰^[11]。20世纪60年代末以来,Swanson硅胶假体关节置换术就被广泛应用于掌指关节缺损以及近侧指间关节缺损的修复重建^[12]。柔软的硅胶垫片起到了止痛和保护关节功能的作用,曾一度被学者们视为治疗指关节缺损的金标准。但是对患者长期随访过程中发现,生物力学上的应力以及硅胶材料的磨损会导致机械应力失效以及材料的降解,从而发生了种植体的骨折或者脱位、感染、炎症性滑膜炎、疼痛复发、僵硬和畸形。

此外,人工关节置换还存在以下几个问题:①内植物形态单一,而非根据患者情况的个性化定制,无法很好地与患者适配^[13]。不利于指关节恢复解剖结构以及生物力学稳定,不利手指功能于恢复。②由于适配性不足导致骨长入不良,易导致骨萎缩和松动^[14],进而发生感染、畸形、滑膜炎、肌腱粘连或断裂等并发症,甚至导致皮肤坏死。③人工关节置换对关节周围组织要求高。④人工关节造价昂贵以及制造周期长,这也是国内尚未普及的主要原因。

2 新型3D打印技术应用于指关节缺损

2.1 3D打印应用于关节缺损

3D打印技术也称增材制造,它是以计算机数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过逐层堆叠打印的方式来构造三维实体的先进技术^[15]。3D打印技术现在已经广泛应用于医学、汽车和建筑等各个领域^[16]。如前述,手指基部和中间关节表面是有生理不对称性的,但是目前大多数设计的人工关节未考虑到这一解剖特性。通过3D打印技术可以克服传统制造工艺的局限,实现个性化解剖结构定制^[17]。王鹏等^[18]通过螺旋CT扫描尸体手掌指关节,获取掌指关节的二维图像信息,再利用相关的转化软件、绘制软件对掌指关节进行三维建模,按照髓内腔设计出髓内柄与髓内腔完全吻合的假体柄,并通过3D打印机打印出假体柄。虽然只是在尸体上面做的实验,还没有找到合适的生物材料以及假体的生物力学测试,但是做到了个性化设计,为未来精准医学的发展提供一个新思路。钟华等^[11]利用聚醚醚酮(PEEK)材料联合3D打印技术打印出掌指关节假体,并进行了移植。虽然该方案只完成了第一步,以皮瓣移植失败而告终,但是3D打印技术联合聚醚醚酮材料打印掌指关节假体为手外科中指关节缺损的修复与重建提供了一种新方法。

2.2 3D打印技术应用于指关节缺损的优势

尽管CT、MRI、超声等传统影像手段已经十分成

熟,但是实际的解剖结构往往无法预测。在一些非常复杂和非常规的病例中,对于围手术期的计划和决策是需要空间解剖学定向的,仅凭借手术经验是无法推断出来的^[19]。利用3D打印技术辅助有以下好处:①3D打印技术能在术前打印出根据健侧正常指关节设计出的假体以及患侧残存的骨质,外科医生可以在打印出来的模型上反复进行术前模拟手术^[20],可提前预测到手术风险,准确判断患者病情,选择利于患者日后康复的方案,同时能有效减少术中出血量^[21-22],也能更直观地对患者及患者家属解释手术的方式,减少医患矛盾。②3D打印快速成型技术能精确模拟指关节的解剖学形态^[23],以及生物力学和生理学、运动学特性,最大程度减少由于相对运动和异常应力引起骨松动和骨萎缩,从而导致的植入物骨折和相对运动引起的疼痛。③3D打印可制造出带微孔的假体表面,这些微孔不仅能增加假体与骨表面的接触面积,还能使骨与假体稳定结合,从而减少两者之间的微运动^[24]。④3D打印假体的微孔结构也有利于软组织附着,使骨与假体之间形成更加稳定的结构,并能促进成骨细胞的增殖,为骨长入创造条件,保持骨与假体的长期稳定^[25]。⑤相比于传统的定制人工假体,3D打印假体制造周期更短。⑥3D打印技术可以用于临床教学^[26],有利于年轻医师的手术操作,有利于对医学生的解剖教学,不再局限于枯燥的解剖课本和大体老师,可以更加直观地了解到该术式的核心与精髓,让基础的解剖知识与临床内容有机地结合起来,教学模式更加丰富。

2.3 3D打印技术应用于指关节缺损的不足

①3D打印技术要想将打印出的假体植入人体内仍然缺乏合适的材料,对材料的要求严格,需要考虑到材料远期的并发症,针对年龄以及职业的不同需要考虑使用不同的材料。②对于3D打印技术应用于医学,需要同时具有医学背景和工科背景的高技术人才,不仅需要医学、解剖有熟悉的掌握,还要求对计算机的软件设计有一定的涉猎。③3D打印出来的器官、组织涉及到伦理学的领域。同时,目前我国对于3D打印出来的假体尚没有相关的质检标准,相关的法律文书也不完善^[27]。④由于3D打印技术应用于医学尚未完全普及,对于3D打印实验室,3D打印技术人才的培训,都需要投入大量的资金,这也导致了3D打印假体造价昂贵。⑤3D打印技术通过将原材料逐层叠加并粘连在一起,导致打印出来的假体机械强度和稳定性低于实际的机械强度^[28],并且可能不适合长期使用。Farzadi等^[29]针对3D打印出的假体机械强度不够,提出可以增加3D打印时的层厚。

2.4 3D打印技术应用于指关节缺损的未来展望

精准医疗的提出使得个性化医疗得到更多人的关注,3D打印技术在一定程度契合了这一理念,为临床工作提供了新的治疗和辅助方式。但在指关节缺损治疗方面,3D打印技术应用仍有待深入研究。

3D打印医用生物材料包括金属、陶瓷、光敏树脂、石膏和高分子等材料^[30],一般要运用多种材料共同打印方能实现所打印部件的复杂功能,而材料学方面是一块新的领域,还有待于大力开发。同时,如果要将3D打印出来的组织、器官运用于临床及患者身上,目前仍然面临严峻的挑战。

针对以上所提及的3D打印应用于指关节方面的不足,应加大力度开发新型设备,以确保人工关节假体的高孔隙率和尺寸精度,使其更有利于骨长入,符合人体解剖结构,有利于创建一个稳定的生物力学结构,减少骨萎缩和骨松动等并发症的发生;加快制订3D打印人工关节统一标准和治疗指南;加快完善相关人工关节假体的质检标准,伦理学方面的政策以及相关法律法规;加大对3D打印技术的科研投入,建立标准化3D打印实验室,并积极举办3D打印培训班,培养一批同时具备医工技术的优秀人才;加强企业、研究机构、医院的深度配合,建立完善的产学研3D打印体系;3D打印技术应用于指关节缺损将会是骨科革命性的新技术,3D打印出来的人工假体与残存骨质具有极佳的适配性,并且能够增强内植物与骨界面的整合效果。3D打印技术在个性化植入物制造和应用方面具有广阔的前景。随着科技的进步以及材料学发展,用3D打印技术打印出来的具有生物活性的人工关节必定是未来骨科发展的新趋势。

【参考文献】

- [1] 张友乐, 邓久征. Swanson人工关节置换治疗创伤后掌指关节僵硬近期疗效的讨论[J]. 中国修复重建外科杂志, 2011, 25(11): 1312-1313.
- [2] ZHANG Y L, DENG J Z. Discussion of recent outcomes of Swanson prosthetic joint replacement for post-traumatic metacarpophalangeal joint stiffness[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2011, 25(11): 1312-1313.
- [3] ABBOUD J A, BEREDIKLIAN P K, BOZENTKA D J. Metacarpophalangeal joint arthroplasty in rheumatoid arthritis[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2003, 11(3): 184-191.
- [4] 邵新中, 张哲敏, 吕莉, 等. 掌指关节外伤性缺损的治疗策略[J]. 骨科临床与研究杂志, 2017, 2(5): 284-286.
- [5] SHAO X Z, ZHANG Z M, LÜ L, et al. Management strategies for traumatic osteoarticular defects of metacarpophalangeal joint[J]. Journal of Clinical Orthopedics and Research, 2017, 2(5): 284-286.
- [6] BOULAS H J, HERREN A, BÜCHLER U. Osteochondral metatarsophalangeal autografts for traumatic articular metacarpophalangeal defects: a preliminary report[J]. J Hand Surg

- Am, 1993, 18(6): 1086-1092.
- [5] ENGVIST O, JOHANSSON S H. Perichondrial arthroplasty. A clinical study in twenty-six patients[J]. Scand J Plast Reconstr Surg, 1980, 14(1): 71-87.
- [6] ZAPPATERRA T, OBERT L, PAUCHOT J, et al. Post-traumatic reconstruction of digital joints by costal cartilage grafting: a preliminary prospective study[J]. Chir Main, 2010, 29(5): 294-300.
- [7] JUNG M, DAECKE W, BERND L, et al. Reconstruction of phalanx and metacarpal defects by autologous iliac crest transplants after tumour resection with joint involvement[J]. Handchir Mikrochir Plast Chir, 2007, 39(6): 381-387.
- [8] TSUBOKAWA N, YOSHIZU T, MAKI Y. Long-term results of free vascularized second toe joint transfers to finger proximal interphalangeal joints[J]. J Hand Surg Am, 2003, 28(3): 443-447.
- [9] 郭恩章, 季正伦, 赵月珍, 等. 带血管蒂小关节游离移植-第二趾趾关节移植修复掌指关节损伤的初步报告[J]. 第二军医大学学报, 1980(2): 12-14.
- GUO E Q, JI Z L, ZHAO Y Z, et al. Free joint graft of small joint with vascularized tip-a preliminary report on the repair of metacarpophalangeal joint injury by second metatarsophalangeal joint graft[J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 1980(2): 12-14.
- [10] 王力刚, 胡湊. 掌指关节的三维解剖及形态分析[J]. 解剖与临床, 2005, 10(2): 92-94.
- WANG L G, HU Q. 3-dimension anatomy and shape analysis of metacarpophalangeal joint[J]. Anatomy and Clinics, 2005, 10(2): 92-94.
- [11] 钟华, 刘军, 蔡国祥, 等. 掌指关节假体个体化设计与应用: 1例报告[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(20): 3164-3169.
- ZHONG H, LIU J, CAI G X, et al. Individualized design and clinical application of metacarpophalangeal joint prosthesis: a one-case report[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2019, 23(20): 3164-3169.
- [12] FOLIART D E. Swanson silicone finger joint implants: a review of the literature regarding long-term complications[J]. J Hand Surg Am, 1995, 20(3): 445-449.
- [13] LEE S W, KIM H G, HAM M J, et al. Custom implant for reconstruction of mandibular continuity defect[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2018, 76(6): 1370-1376.
- [14] MOHAN RAJ R, PRIYA P, RAJ V. Gentamicin-loaded ceramic-biopolymer dual layer coatings on the Ti with improved bioactive and corrosion resistance properties for orthopedic applications[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 82: 299-309.
- [15] LIU H W, WEN Y P, ZHANG Y K, et al. Computer assisted design and electron beam melting rapid prototyping metal three-dimensional printing technology for preparation of individualized femoral prosthesis[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2015, 29(9): 1088-1091.
- [16] GROSS B C, ERKAL J L, LOCKWOOD S Y, et al. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences[J]. Anal Chem, 2014, 86(7): 3240-3253.
- [17] LI C, CHEUNG T F, FAN V C, et al. Applications of three-dimensional printing in surgery[J]. Surg Innov, 2017, 24(1): 82-88.
- [18] 王鹏, 路来金, 宣昭鹏, 等. 个体化掌指关节假体三维建模及其髓内柄的计算机辅助设计[J]. 吉林大学学报(医学版), 2008, 34(1): 147-149.
- WANG P, LU L J, XUAN Z P, et al. Three-dimensional reconstruction and CAD of intramedullary stem of individual metacarpophalangeal joint prosthesis[J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 2008, 34(1): 147-149.
- [19] SCHMAUSS D, HAEBERLE S, HAGL C, et al. Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-centre experience[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2015, 47(6): 1044-1052.
- [20] 王树辉, 尹同珍, 马红茹. 3D打印模拟精准截骨在治疗儿童发育性髋脱位中的临床应用[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2018, 26(10): 57-59.
- WANG S H, YIN T Z, MA H R. Clinical application of 3D printing to simulate precise osteotomy in the treatment of developmental hip dislocation in children[J]. Chinese Journal of Traditional Medical Traumatology & Orthopedics, 2018, 26(10): 57-59.
- [21] CARTIAUX O, PAUL L, FRANCO B G, et al. Improved accuracy with 3D planning and patient-specific instruments during simulated pelvic bone tumour surgery[J]. Ann Biomed Eng, 2014, 42(1): 205-213.
- [22] MERC M, DRSTVENSEK I, VOGRIN M, et al. A multi-level rapid prototyping drill guide template reduces the perforation risk of pedicle screw placement in the lumbar and sacral spine[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2013, 133(7): 893-899.
- [23] 赵星, 余黎, 陶圣祥, 等. 3D打印技术在严重肱骨远端骨缺损治疗中的应用观察[J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32(12): 1534-1539.
- ZHAO X, YU L, TAO S X, et al. Treatment of severe distal humeral bone defects with three-dimensional printing technology[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2018, 32(12): 1534-1539.
- [24] BRUNELLO G, SIVOLELLA S, MENEGHELLO R, et al. Powder-based 3D printing for bone tissue engineering[J]. Biotechnol Adv, 2016, 34(5): 740-753.
- [25] CHANG B, SONG W, HAN T X, et al. Influence of pore size of porous titanium fabricated by vacuum diffusion bonding of titanium meshes on cell penetration and bone ingrowth[J]. Acta Biomater, 2016, 33: 311-321.
- [26] MULFORD J S, BABAZADEH S, MACKAY N. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: review of current and future applications[J]. ANZ J Surg, 2016, 86(9): 648-653.
- [27] 罗强, 刘德荣, 方欣硕, 等. 3D打印技术在矫形外科的应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2014, 28(3): 268-271.
- LUO Q, LIU D R, FANG X S, et al. Application of three-dimensional printing technique in orthopaedics[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2014, 28(3): 268-271.
- [28] SUWANPRATEEB J. Strength improvement of critical-sized three dimensional printing parts by infiltration of solvent-free visible light-cured resin[J]. J Mater Sci Mater Med, 2006, 17(12): 1383-1391.
- [29] FARZADI A, SOLATI-HASHJIN M, ASADI-EYDIVAND M. Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e108252.
- [30] YAN Q, DONG H H, SU J, et al. An overview of the current state of 3D printing technology for medical applications[J]. Engineering, 2018, 4(5): 729-742.

(编辑:薛泽玲)