

· 论著 ·

心脏 3D 打印模型在不同先天性心脏病手术模拟矫治中的临床应用



全文二维码

聂聪 伍明 侯安兴 陈飞 罗佳文 聂磊 周庆 周文武

湖南省人民医院(湖南师范大学附属第一医院)心脏大血管外科,长沙 410005

通讯作者:周文武,Email:acrophober@163.com

【摘要】 目的 初步总结心脏 3D 打印模型在不同先天性心脏病手术模拟矫治中的临床应用体会。**方法** 以 2016 年 12 月至 2020 年 8 月湖南省人民医院 48 例先天性心脏病患儿为研究对象(其中 15 例法洛四联症患儿为 3D 打印组),收集这 15 例患儿的心脏 CT 血管造影(computed tomography angiography,CTA)资料,制作心脏 3D 打印模型,外科医师在模型上进行手术模拟讨论后再实施真实手术,并比较模拟手术与真实手术的操作体会;另取 12 例法洛四联症常规手术患儿作为对照组,与 3D 打印组手术时间进行比较。**结果** 所有患儿手术顺利,无一例手术过程中死亡;3D 打印组患儿真实手术与术前心脏 3D 打印模型模拟相关性满意,4 例患儿因心脏 3D 打印模型稍高估了肺动脉瓣环直径而修改手术方式;3D 打印组法洛四联症手术的主动脉阻断时间少于对照组[(47.47 ± 9.42) min 比 (55.75 ± 9.00) min, $P = 0.029$]。**结论** 心脏 3D 打印模型能为多种先天性心脏病手术的讨论、模拟提供高仿真平台,通过详细手术模拟能有效缩短真实手术时间。

【关键词】 心脏病/先天性;心脏病/外科学;模型,解剖学;打印,三维

基金项目:湖南省科技厅创新引导计划临床医疗技术创新引导项目(2017SK50501)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202111001-012

Application of three-dimensional printing models for simulating correction of various congenital heart diseases

Nie Cong, Wu Ming, Hou Anxing, Chen Fei, Luo Jiawen, Nie Lei, Zhou Qing, Zhou Wenwu

Department of Cardiovascular Surgery, Hunan Provincial People's Hospital (First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha 410005, China

Corresponding author: Zhou Wenwu, Email: acrophober@163.com

【Abstract】 Objective To employ three-dimensional (3D) printing model for simulating heart correct operation and summarizing its preliminarily experience for improving the surgical outcomes of various congenital heart diseases. **Methods** Cardiac computed tomography angiography (CTA) data of 48 children with various congenital heart diseases were selected for constructing the corresponded 3D printing models. Based on these 3D models, surgeons discussed surgical plans and simulated operative skills preoperatively. The process of real corrective procedure and the simulation were compared. Another 12 cases of tetralogy of Fallot undergoing routine surgery were selected as control group and operative durations were compared. **Results** The operative findings correlated well with the cardiac 3D models and the correlation between real operation and preoperative simulation of 3D printing model was satisfactory. Only 4 children's cardiac 3D printing model slightly overestimated the diameter of pulmonary valve ring. Aortic clamp time was less in 3D group than that in control group[(47.47 ± 9.42) vs. (55.75 ± 9.00) min, $P = 0.029$]. **Conclusion** Cardiac 3D printing model may provide a feasible simulation platform for discussing and simulating surgical procedures. It can shorten operative duration and improve surgical outcomes.

【Key words】 Heart Diseases/CN; Heart Diseases/SU; Models, Anatomic; Printing, Three-Dimensional

Fund program: Hunan Provincial Department of Science & Technology Innovation Guidance Program Clinical Medical Technology Innovation Guidance Project (2017SK50501)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202111001-012

先天性心脏病复杂多样,心脏内多种畸形病变往往在病理生理方面相互影响、相互作用,同时心脏病的矫治还可能受到气管、脊柱等邻近器官病变和(或)变异的影响。外科手术矫治心脏病时需全面考虑,既要考虑手术存活率,也要考虑远期效果以及二期手术的问题。法洛四联症、右室双出口、完全性肺静脉异位引流等复杂先心病的手术方案制定是难点,外科医师在手术前需要充分理解心脏病及其邻近脏器的空间解剖结构^[1]。术前心脏病变检查项目一般包括超声心动图、心脏 CT 血管造影(computed tomography angiography, CTA)、MRI 等,这些 2D 平面结构图在部分复杂心脏病的展示方面存在一定的局限性,需要外科医师从个人经验及认识出发,进行思维再构象;而心脏 3D 打印技术是将 CT、MRI 图像通过计算机模拟重建后,将 2D 成像转化为 3D 实物,心脏 3D 模型打印出来后,能够拿在手中,从各个角度观察,且能够采用任意方式切割,从而便于外科医师对心脏解剖结构的进一步理解,有助于制定出更合理的手术方案^[2-3]。本研究旨在探讨以法洛四联症心脏 3D 打印模型为代表的多种心脏病手术模拟的应用经验。

材料与方法

一、研究对象

选取湖南省人民医院 2016 年 12 月至 2020 年 8 月术前使用 Philips iCT 256 层多层螺旋 CT 机行心脏 CTA 检查,且病变典型、心脏病结构清晰的 48 例儿童先天性心脏病患儿作为研究对象。将心脏 CT 影像资料导出为 DICOM 格式,利用柔性光敏树脂在盘古 4.1(V2)打印机打印,获取心脏 3D 打印模型。48 例中男 32 例、女 16 例;年龄(3.8 ± 1.2)岁,体重(13 ± 2.8)kg。术前诊断:法洛四联症 15 例(为 3D 打印组)、房间隔缺损合并右侧肺静脉异位引流 4 例、左室流出道梗阻 3 例、完全性肺静脉异位引流 6 例、右室双出口 13 例、肺动脉吊带 3 例、右室双腔心 4 例。另取同期性别、年龄、体重基本一致的 12 例法洛四联症患儿作为对照组,与上述 3D 打印组 15 例法洛四联症患儿的体外循环时间、主动脉阻断时间进行对比。本研究获湖南省人民医院伦理委员会审批[2019 科研伦理审第(120)号]。

二、心脏 3D 打印模型使用

上述患儿均为择期手术患儿,术前讨论中,手术医师根据患儿病史、体征、术前经胸超声心动图、

术前常规二维 CT 以及三维重建影像明确诊断,并讨论手术方案;同时多角度观察患儿对应的心脏 3D 打印模型,对模型进行适当的切割暴露、测量、组合、缝合等操作,力求术前讨论的手术方案可实物感知。完成模拟讨论后执行真实手术,真实手术过程中,将术中探查的解剖结构与术前心脏 3D 打印模型进行对比。

三、统计学处理

采用 SPSS 16.0 进行数据分析。体外循环时间及主动脉阻断时间采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,两组间比较采用独立样本 t 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、模拟手术与真实手术情况

模拟手术中,3D 打印组 15 例法洛四联症手术方案均为根治性手术。结合心脏 3D 打印模型,拟定室间隔缺损补片的大小、形态,并对修补室间隔缺损的途径[经右心室切口和(或)经右房-三尖瓣环切口]及缝合技术(连续或间断)进行模拟演练;拟定 3 种不同的右室流出道异常肌束、肺动脉瓣处理方案:①无需处理肺动脉瓣及肺动脉,仅经右室前壁疏通右室流出道内异常肌束者(7 例);②右室流出道-肺动脉切开、肺动脉瓣双孔成形增宽(6 例);③不进行肺动脉瓣处理,仅经右房-三尖瓣口疏通右室流出道(2 例)。

真实手术中,3D 打印组体外循环手术时间与对照组相当[(93.87 ± 18.75) min 比(103.00 ± 16.53) min, $P = 0.197$],主动脉阻断时间显著缩短(47.47 ± 9.42) min 比(55.75 ± 9.00) min, $P = 0.029$];并基本参照术前模拟的技术细节修补室间隔缺损。右室流出道-肺动脉瓣的真实手术与术前模拟有 4 例不一致(均为术前模拟的第一种方案,表 1),真实手术中执行方案为肺动脉瓣交界切开成形 1 例(再次转流)、跨瓣环右室流出道-肺动脉主干切开并补片增宽 2 例、反复探查后未改变术前模拟方案(仅钝性扩张肺动脉瓣环)1 例。上述 4 例患儿术后复查结果满意,无明显肺动脉瓣反流,跨肺动脉瓣流速均未超过 2.5 m/s。

4 例房间隔缺损合并右侧肺静脉异位引流患儿于术前模拟时测量房间隔缺损补片大小、形态及补片缝合的路线,真实手术由低年资医师在高年资医师指导下主刀,术中探查及手术实施方案与术前模拟一致。左室流出道梗阻 3 例均为主动脉瓣下隔

膜,其中 1 例合并室间隔肥厚,术前模拟认为仅需切除主动脉瓣下隔膜;真实手术中探查符合术前模拟,予以单纯隔膜切除、未处理肥厚室间隔。右室双腔心 4 例,术前模拟测量计算异常肌束切除范围。

完全性肺静脉异位引流 6 例均为心上型,术前模拟的要点为肺静脉共汇与左房底吻合口大小及吻合路径;术前模拟中认为经左心房顶部切口行肺静脉共汇-左房顶吻合的路径为最佳者有 3 例;真实手术中因主刀个人习惯,前 2 例经双心房切口行肺静脉共汇-左心房后壁吻合,第 3 例经左心房顶切口做上述吻合。

右室双出口 13 例,术前模拟讨论术式均为心内隧道补片双心室矫治,其中有 5 例需扩大室间隔缺损大小,这 5 例中仅 2 例行室间隔缺损扩大,1 例修剪主动脉瓣下肌束,2 例未行室间隔缺损扩大;未行室间隔缺损扩大的 2 例患儿术后主动脉瓣有狭窄、峰值压差 30 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa)左右,目前随访中。

肺动脉吊带 3 例均合并长段气管狭窄及全环状气管软骨,术前模拟均予以长段气管狭窄滑动成形修复术,并对气管游离的长度、范围以及滑动距离

等进行模拟,真实手术中避免了反复多次气管镜检查,按术前模拟游离后予以滑动成形。

二、模型一致性评分

手术后由主刀医师及其中一位助手两人填写心脏 3D 打印模型与患儿一致性主观评分表(表 2),以平均分计。表 2 中项目内容并未要求每枚心脏 3D 模型均以实物形态表达(如房间隔缺损合并肺静脉异位引流者实体模型未显示室间隔结构,肺动脉吊带者实体模型未显示心房、心室结构)。一致性评分结果显示,3D 打印在大体解剖结构、心内重要结构空间位置关系(室间隔缺损与主动脉瓣、三尖瓣的位置关系)上的一致性满意,而在涉及肺动脉瓣形态结构及心内细微结构上,一致性稍有不满意,尤其是在法洛四联症、右室双出口患儿中,其肺动脉瓣叶的形态、交界粘连等重要解剖指标显示欠满意,甚至在个别患儿中未起到参考作用。

三、典型 CTA 三维重建

右位心合并右室双出口患儿(图 1),根据术前的影像三维重建帮助明确患儿室间隔缺损和三尖瓣的关系,模拟和讨论确定心内隧道构建方案,真实手术非常顺利。

表 1 法洛四联症患儿术前模拟和真实方案差距

Table 1 Difference between preoperative simulation and real procedure

病例	术前评估肺动脉瓣 Z 值	术中探查肺动脉瓣 Z 值	真实手术方案	手术方案变更原因
病例 1	-1.7	-2.5	肺动脉瓣交界切开、肺动脉瓣下肌肉游离、瓣环钝性扩张	能顺利停机,但跨瓣流速 >2.5 m/s
病例 2	-1.4	-1.6	钝性扩张肺动脉瓣环	肺动脉瓣叶交界稍有粘连
病例 3	-1.6	-1.9	跨肺动脉瓣补片增宽	肺动脉瓣单瓣畸形
病例 4	-1.7	-1.8	跨肺动脉瓣补片增宽	肺动脉瓣单瓣畸形

表 2 先天性心脏病患儿 3D 打印模型与患儿心脏一致性主观评分表

Table 2 Consistency score between 3D printing model and patient heart

项目	例数	平均评分
大体解剖		
主、肺动脉直径比,空间螺旋关系	35	4
静脉-心房-心室-动脉节段连接方式	30	4
右心室容积、前壁厚度	35	4
合并畸形(动脉导管未闭、气管畸形等)	48	4
解剖细节		
肺动脉瓣瓣环直径、瓣叶数目及形态	33	2.5
室间隔缺损位置、直径	31	3
室间隔缺损与主动脉瓣、三尖瓣的位置关系	31	4
室间隔缺损与心室内肥厚增生肌束关系	31	3
右心室流出道肌肉肥厚梗阻程度、集中部位	33	3
右心室内室上脊-调节束	33	3

评分标准:完全一致、术前模拟好,计 4 分;基本一致、术前模拟有一定帮助,计 3 分;有差距、术前模拟基本无帮助或帮助不大,计 2 分;不好评判、或未能显示、术前模拟无帮助,计 1 分

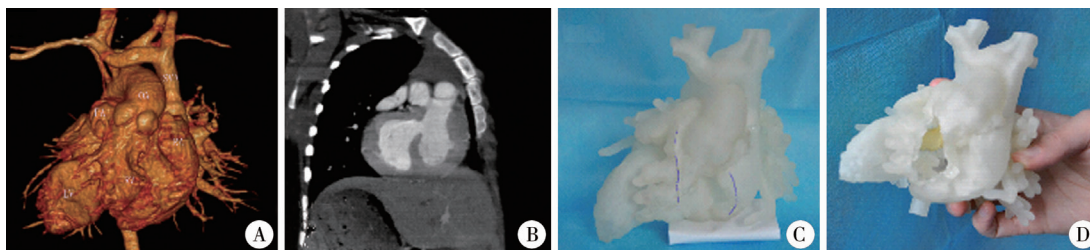


图1 1例右位心合并右室双出口患儿的CT影像以及3D打印模型 A:三维重建后的心脏图像; B:心脏CT矢状面图片显示心内结构; C:3D打印的心脏模型外观,虚线显示模拟手术的心脏切口; D:模拟后的心脏模型,黄色部分为牛心包补片建立的内隧道

Fig. 1 CT image and 3D printing model for a case with dextrocardia and double outlet of right ventricle

讨论

先天性心脏病的种类较多,发病率较高。早期外科手术矫正畸形是患儿长期生存的重要保障。有经验的心脏外科医师依据传统的经胸和(或)食管超声心动图、心脏大血管CTA、MRI及心导管造影等检查,可有效地将上述二维成像重新构画,形成三维空间结构,但这一思维重建的过程受到外科医师个体经验、思维方式等多种因素的影响。而3D打印技术可以把心脏大血管CTA、MRI及超声等二维平面图形转换为三维立体空间结构,所制作的模型是直观具体的实物,有助于外科医生理解心脏的解剖结构,尤其对青年医师作用更明显。

目前在医学领域,3D打印已广泛应用于普外科、骨科、口腔科、神经外科等多领域及手术模拟、临床教学,在心脏大血管外科方面的应用越来越多^[4-14]。花中东等^[15]针对12例复杂的右室双出口患儿构建心脏3D打印模型,术前在实体3D模型上对手术方案进行讨论,并术前评估,减少了手术并发症,改善了手术效果。本研究针对法洛四联症、右室双出口、部分性/完全性肺静脉异位引流等多种相对常见的先天性心脏病构建3D模型,结果显示,以心脏CTA为基础制作的3D打印模型除心脏大体形态重建满意外,对室间隔缺损形态及周边解剖结构的真实还原度也很高,外科医师可依据3D模型,在术前基本确定疏通、清理右室流出道的解剖路径以及技术细节,并可对需切除的异常肥厚心肌组织比例进行比较精确的计算。本研究中3D打印组体外循环转流后用了一定的探查时间验证3D打印模型的一致性,与对照组的体外循环时间无显著差异,但3D打印组在清除右心室流出道肌束方面更加合理,加上助手可提前参考术前模拟结果,对心包片的裁剪工作进行提前规划,因而明显缩短了主动脉阻断的手术时间。本组有1例右位心

合并右室双出口患儿,其右位心和常规的正位心脏正好相反,室间隔缺损和三尖瓣的立体空间构象关系不易理解,而通过3D打印模型,可从任意剖面直接观察心脏内部的空间关系,术前能明确内隧道的可行性及最佳路径,因而手术非常顺利。

然而,心脏3D打印模型在儿童肺动脉瓣瓣环直径、瓣叶形态及数目等方面的真实还原度欠满意,本研究中心心脏3D打印模型对肺动脉瓣直径有高估的倾向,可能是因为随着心动周期的变化,肺动脉瓣环直径及肺动脉瓣叶的位置、形态也在不断变化,因此尽管应用了心电门控技术,所获图像仍可能存在一定的偏差。在重建过程中,需要仔细考虑CTA影像技术、外科解剖、3D相关软件应用技术等多方面因素。由于3D打印技术对肺动脉瓣叶的形态、三尖瓣瓣叶及其瓣下装置缺乏有效的显示,建议在瓣膜性心脏疾患中慎重使用。随着应用经验的积累,3D打印技术在瓣叶以及腱索等结构的还原表现能得到进一步改善。随着打印技术和材料的进步,3D打印模型将能更好地指导临床医师对血流动力学进行直观的理解^[7-10]。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 文献检索为聂聪、伍明、周文武,论文调查设计为聂聪、伍明、周文武,数据收集与分析为聂聪、伍明、周文武、侯安兴、陈飞、罗佳文、聂磊、周庆,论文结果撰写为聂聪、伍明、周文武,论文讨论分析为聂聪、伍明、周文武、侯安兴、陈飞、罗佳文、聂磊、周庆

参考文献

- [1] 周文武,伍明,张志功,等.手术治疗肺动脉吊带合并气管狭窄15例的疗效分析[J].临床小儿外科杂志,2017,16(6):583-587. DOI:10.3969/j.issn.1671-6353.2017.06.013. Zhou WW, Wu M, Zhang ZG, et al. Surgical treatment of pulmonary artery sling with tracheal stenosis in children: a report of 15 cases[J]. J Clin Ped Sur, 2017, 16(6): 583-587. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2017.06.013.
- [2] Valverde I, Gomez-Ciriza G, Hussain T, et al. Three-dimensional printed models for surgical planning of complex congenital heart defects: an international multicentre study[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2017, 52(6): 1139-1148. DOI: 10.1093/ejcts/ezx208.

- [3] Shiraishi I, Yamagishi M, Hamaoka K, et al. Simulative operation on congenital heart disease using rubber-like urethane stereolithographic biomodels based on 3D datasets of multislice computed tomography[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2010, 37(2): 302-306. DOI: 10.1016/j.ejcts.2009.07.046.
- [4] Matsumoto JS, Morris JM, Foley TA, et al. Three-dimensional physical modeling: applications and experience at Mayo Clinic[J]. *Radiographics*, 2015, 35(7): 1989-2006. DOI: 10.1148/rg.2015140260.
- [5] Daemen JHT, Heuts S, Olsthoorn JR, et al. Mitral valve modelling and three-dimensional printing for planning and simulation of mitral valve repair[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2019, 55(3): 543-551. DOI: 10.1093/ejcts/ezy306.
- [6] 白云松, 张学军, 曹隽, 等. 3D 打印模型在儿童先天性脊柱侧凸治疗中的应用研究[J]. *临床小儿外科杂志*, 2020, 19(2): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2020.02.005.
Bai YS, Zhang XJ, Cao J, et al. Clinical efficacy of three-dimensional model in the surgical treatment of congenital scoliosis in children[J]. *J Clin Ped Sur*, 2020, 19(2): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2020.02.005.
- [7] 杨超, 王珊, 李长春, 等. 3D 打印技术在儿童腹膜后神经母细胞瘤血管骨骼化手术中的应用价值探讨[J]. *临床小儿外科杂志*, 2019, 18(5): 376-380. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2019.05.008.
Yang C, Wang S, Li CC, et al. Application of three-dimensional printing technology in vascular skeletal surgery for children with retroperitoneal neuroblastoma[J]. *J Clin Ped Sur*, 2019, 18(5): 376-380. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6353.2019.05.008.
- [8] 宁金波, 姚明木. 3D 打印技术在小儿后天性肘内翻畸形截骨矫形术中的应用[J]. *临床小儿外科杂志*, 2021, 20(10): 941-945. DOI: 10.12260/lxewkzz.2021.10.009.
Ning JB, Yao MM. Application of three-dimensional printing technology during corrective osteotomy for cubitus varus deformity in children[J]. *J Clin Ped Sur*, 2021, 20(10): 941-945. DOI: 10.12260/lxewkzz.2021.10.009.
- [9] Premyodhin N, Mandair D, Ferng AS, et al. 3D printed mitral valve models: affordable simulation for robotic mitral valve repair[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2018, 26(1): 71-76. DOI: 10.1093/icvts/ivx243.
- [10] Loke YH, Harahsheh AS, Krieger A, et al. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease[J]. *BMC Med Educ*, 2017, 17(1): 54. DOI: 10.1186/s12909-017-0889-0.
- [11] 董柱, 张本, 曹一秋, 等. 3D 打印技术在右心室双出口个性化手术中的应用[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2021, 28(4): 441-446. DOI: 10.7507/1007-4848.202004016.
Dong Z, Zhang B, Cao YQ, et al. Application of 3D printing technology in personalized surgery of right ventricular double outlet[J]. *Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2021, 28(4): 441-446. DOI: 10.7507/1007-4848.202004016.
- [12] 赵力运, 范太兵, 李斌, 等. 3D 打印心脏模型在右室双出口术前评估及手术方案制定中的应用价值[J]. *郑州大学学报(医学版)*, 2018, 53(3): 351-354. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6825.2017.08.115.
Zhao LY, Fan TB, Li B, et al. Clinical value of 3D printed cardiac model in preoperative assessment and surgical planning of double outlet right ventricle[J]. *Journal of Zhengzhou University*, 2018, 53(3): 351-354. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6825.2017.08.115.
- [13] Xu JJ, Luo YJ, Wang JH, et al. Patient-specific three-dimensional printed heart models benefit preoperative planning for complex congenital heart disease[J]. *World J Pediatr*, 2019, 15(3): 246-254. DOI: 10.1007/s12519-019-00228-4.
- [14] Wamala I, Brünig J, Dittmann J, et al. Simulation of a right anterior thoracotomy access for aortic valve replacement using a 3D Printed Model[J]. *Innovations (Phila)*, 2019, 14(5): 428-435. DOI: 10.1177/1556984519870510.
- [15] 花中东, 杨新令, 刘凯颀, 等. 应用 3D 打印技术改进远离型右室双出口的外科治疗结果[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2016, 23(6): 532-536. DOI: 10.7507/1007-4848.20160128.
Hua ZD, Yang XL, Liu KY, et al. Application of 3D printing for improving surgical outcome of double outlet right ventricle with non-committed ventricular septal defect[J]. *Chin J Clin Thorac Cardiovasc Surg*, 2016, 23(6): 532-536. DOI: 10.7507/1007-4848.20160128.

(收稿日期: 2021-11-01)

本文引用格式: 聂聪, 伍明, 侯安兴, 等. 心脏 3D 打印模型在不同先天性心脏病手术模拟矫治中的临床应用[J]. *临床小儿外科杂志*, 2022, 21(7): 658-662. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202111001-012.

Citing this article as: Nie C, Wu M, Hou AX, et al. Application of three-dimensional printing models for simulating correction of various congenital heart diseases[J]. *J Clin Ped Sur*, 2022, 21(7): 658-662. DOI: 10.3760/cma.j.cn101785-202111001-012.