doi:10.11659/jjssx.02E023062

·综 述·

3D打印技术辅助治疗青少年胫骨远端骨骺骨折的临床进展

文小林[1],岳 莹[1],顾靖钏[1],古 浩[1],张爱国[2] (1.南京医科大学附属无锡人民医院儿外科,江苏 无锡 214023;2.无锡市儿童医院骨科,江苏 无锡 214023)

[摘 要] 胫骨远端骨骺骨折是青少年常见的骨折类型。胫骨远端邻近踝关节,此处骨骺脆弱,发生骨折时易损伤骨骺,导致骨骺缺血坏死及骨骼生长障碍,且损伤程度和治疗效果直接影响踝关节的形态和功能,严重影响患儿预后情况及生活质量。因此,受伤后应尽可能达到解剖复位,实现稳定固定。对于胫骨远端骨骺稳定性骨折(如Salter-Harris Ⅰ型或Ⅱ型骨折),可采用保守治疗;而对于不稳定骨折,特别是移位风险较高的Salter-Harris Ⅲ、Ⅳ型骨折,首选手术治疗。但由于青少年骨骼生理特点,胫骨远端生长发育情况不同,需要根据患儿情况制定个体化治疗方案。3D打印技术结合CT、MRI等影像技术可以打印出复杂形状的几何结构以适应个体需求,在胫骨远端骨骺骨折,特别是Salter-Harris Ⅲ、Ⅳ型骨折手术治疗中起到重要作用,能帮助制定个体化手术方案,提高手术成功率,减少远期并发症发生率,极大改善患儿预后情况。本文结合近十年的文献报道,对3D打印技术在青少年胫骨远端骨骺骨折诊疗中的应用研究进展作一综述。

[关键词] 3D打印;青少年;骨骺骨折;胫骨骨折;Salter-Harris分型法
[中图分类号] R683.42 [文献标识码] A [收稿日期] 2023-02-13

Clinical progress of 3D printing technology in treatment of distal tibial epiphyseal fractures in adolescents

WEN Xiao-lin[1], YUE Ying[1], GU Jing-chuan[1], GU Hao[1], ZHANG Ai-guo[2] (1. Department of Pediatric Surgery, Wuxi People's Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, Wuxi Jiangsu 214023, China; 2. Department of Orthopedics, Wuxi Children's Hospital, Wuxi Jiangsu 214023, China)

Abstract: The distal tibial epiphyseal fractures is a common type of fracture in adolescents. The distal tibia is adjacent to the ankle joint, where the epiphysis is fragile and easily damaged when the fracture occurs, resulting in ischemic necrosis of the epiphysis and impaired bone growth, and the degree of damage and treatment effect directly influence the shape and function of the ankle joint, seriously

[通信作者] 张爱国,E-mail:hazag@163.com

舌动作后不能暴露会厌舌面,将喉镜镜头游离进会厌舌根间隙,一般可轻易采集到会厌舌根处的图像。

本研究显示,电子喉镜下端坐位+低头(30°~45°)+伸舌法可完全暴露会厌舌面,临床效果显著,可作为普通端坐位及普通端坐位+伸舌法会厌舌面暴露困难患者的补充检查方法,有一定的临床应用价值。但本研究病例数相对较少,未深入分析原因,尚需进一步临床验证,并加以补充。

[参考文献]

[1] 李 闯. 电子鼻咽喉镜在耳鼻喉科中的临床应用[J]. 中国医药指南,2017,15(35):93-94. doi:10.15912/j.cnki.gocm.2017.35.075.
[2] 冯 丹. 电子喉镜在耳鼻喉疾病患者中的应用价值[J]. 中国药物经济学,2015,10(9):115-117.
[3] 杨依贤. 电子喉镜检查应用于耳鼻咽喉科健康体检探讨[J]. 医药前沿,2015,5(27):190-191. doi:10.3969/j.issn.2095-1752.2015.27.175.
[4] 林川耀,陆 玲,张 标,等. 电子喉镜在咽喉部肿物活检中的临床应用及病理分析[J]. 中国内镜杂志,2018,24(9):1-6. doi:10.3969/j.issn.1007-1989.2018.09.001.
[5] 田天捷,张自雄,陈发胜,等. 可视喉镜下低温等离子射频治疗多发会厌囊肿[J]. 中国微创外科杂志,2018,18(12):1143. doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2018.12.025.
[6] 刘志锋,江青山,鲁科利,等. 显微镜下CO_2激光与内窥镜下喉剪治疗会厌囊肿的疗效比较[J]. 中南医学科学杂志,2018,46(4):420-423. doi:10.15972/j.cnki.43-1509/r.2018.04.024.
[7] Yoon TM, Choi JO, Lim SC, et al. The incidence of epiglottic cysts in a cohort of adults with acute epiglottitis[J]. Clin Otolaryngol, 2010, 35(1):18-24. doi:10.1111/j.1749-4486.2009.02069.x.
[8] Pattni V, Porter G, Omakobla E. An unusual presentation of an infected vallecular cyst presenting as supraglottitis[J]. BMJ Case Rep, 2013, 2013(4):350-353. doi:10.1136/bcr-2013-009180.
[9] Pulser S, Antippa P. Maneuver to assist examination of the hypopharynx[J]. Head Neck, 1995, 17(5): 389-393. doi: 10.1002/hed.2880170505.
[10] Sakai A, Okami K, Sugimoto R, et al. A new technique to expose the hypopharyngeal space: the modified Killian's method[J]. Auris Nasus Larynx, 2014, 41(2): 207-210. doi: 10.1016/j.anl.2013.10.012.
[11] 祝宝莲,黄月娥,侯 瑾. 电子喉镜下自主抬头前屈法在暴露环后区的临床应用[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2019,54(4):297-299. doi:10.3760/cma.j.issn.1673-0860.2019.04.012.

(编辑:贺绍梅)

affect the prognosis and quality of life of adolescents. Therefore, anatomical reduction should be achieved after injury as much as possible to achieve stable fixation. For stable fractures of the distal tibial epiphysis (such as Salter-Harris type Ⅰ or Ⅱ fractures), the conservative treatment can be used; whereas for unstable fractures, especially Salter-Harris type Ⅲ and Ⅳ fractures with a high risk of displacement, surgical treatment is preferred. However, due to the physiological characteristics of the epiphysis of adolescents, the distal tibia grow and develop differently, the individualized treatment plans should be developed according to the situation of adolescents. 3D printing technology combined with imaging technologies including CT and MRI can print complex shapes of geometric structures to meet individual needs, and play an important role in the surgical treatment of distal tibial epiphyseal fractures, especially Salter-Harris type Ⅲ and Ⅳ fractures, which can contribute to formulating individualized surgical plans, improving the success rate of surgery, reducing the incidence of long-term complications, and greatly improving the prognosis of adolescents. Based on the literature reports in the past decade, this paper reviews the research progress of the application of 3D printing technology in the diagnosis and treatment of distal tibial epiphyseal fractures in adolescents.

Keywords: 3D printing; adolescent; epiphyseal fracture; tibial fracture; Salter-Harris classification

胫骨远端骨骺骨折是青少年骨骺骨折较常见的类型,约占踝部骨折的6%,一旦发生极易造成踝关节周围血管、神经、韧带、肌肉等软组织及生长板损伤,导致骨骺缺血坏死、骨骼畸形愈合,直接影响踝关节的形态和功能[1]。因此,尽可能实现解剖复位、恢复力线、早期恢复踝关节功能对减少并发症有重要意义。青少年骨折治疗需尽可能避免损伤骨骺板,这极大地限制了治疗方案的选择[2]。3D打印技术结合CT、MRI等影像学检查,能打印出骨折部位的复杂几何结构,为手术风险评估及诊断提供参考,其在骨骺骨折的治疗尤其是手术治疗中具有显著优势,有助于根据青少年的生长发育情况和创伤情况制定个体化手术方案,降低不稳定性骨折患儿术后并发症发生率,改善预后[3]。

1 胫骨远端骨骺骨折分型

胫骨远端骨折是青少年长骨骨折中的常见类型,约占长骨骨折的11%,其中20%~30%伴有骨骺损伤[6]。骨骺与骨质尚未完全融合前骨骺钙化区和非钙化区存在薄弱的过渡区,在高能量冲击下易发生分离,导致骨骺受损,增加了晚期创伤性关节炎的发生风险[1]。对于该类型的骨折分型,着重关注骨折线与关节面之间的物理关系,经典的Salter-Harris骨骺骨折分型法将仅存在干骺端和骨骺分离的骨折分为Ⅰ型;骨折线穿过骺板累及干骺端为Ⅱ型;骨折累及整个骨骺为Ⅲ型;骨折线自干骺端起始,斜行向下纵向贯穿干骺端、生长板、骨骺,累及骨化中心为Ⅳ型;单纯的压缩性骺板软骨损伤,易导致骨骺早闭为Ⅴ型;骺板边缘软骨膜环即Ranvier区缺失为Ⅵ型[4]。Ⅰ型及Ⅱ型骨骺骨折较稳定,一般可采用保守治疗,即手法复位后石膏固定患肢。但骨折后骺板间隙增加或移位≥5 mm的Salter-Harris Ⅱ型骨骺骨折建议采用闭合复位内固定手术治疗。Ⅲ型及Ⅳ型骨骺骨折涉及关节面,且伴干骺端移位,骨折断端不稳定,易发生再次移位,增加了复位的难度,对于骺板间隙增加或移位≥2 mm的Salter-Harris Ⅲ型、Ⅳ型骨骺骨折首选切开复位内固定治疗。Ⅴ型损伤少见,其早期X射线表现常呈阴性结果,故往往在发现时已经出现关节畸变等不良结果,因此一旦发现Ⅴ型损伤,应尽快进行手术干预。Ⅵ型损伤多见于草坪切割机使用不当导致的内踝切削伤,治疗困难,多数患儿晚期易并发骨骺早闭,影响步态姿势和生长发育,故除早期积极手术干预减轻损伤外,还需建立长期的跟踪随访,及时处理不良预后。此外,对于单纯手法复位不理想、难以维持解剖复位或伴同侧神经和血管损伤的患者也推荐手术治疗。青少年处于生长发育期,在临床治疗时应考虑其生理解剖结构的特殊性,尽可能保护患儿长骨纵向生长潜力,矫正畸形,恢复关节功能。胫骨远端骨骺骨折易导致骨骺缺血坏死及骨骼生长障碍,损伤程度和治疗效果直接影响踝关节的形态和功能的恢复,严重影响患儿预后及生活质量,因此个体化的治疗对青少年至关重要。3D打印技术因其能高度还原实际骨折模型、提供个体化操作及反复验证操作结果等优点,更适用于涉及关节面的复杂骨骺骨折,其可辅助诊断,完善术前评估,制定手术方案,辅助术中导航,并在必要时规划骨组织重建,极大地提高了胫骨远端骨骺骨折的治疗效果和预后[5]。

2 3D打印技术辅助诊断

X射线及CT均为平面成像,常因软骨不显影、骨折重叠和腓骨遮挡等导致损伤类型评估错误,即使采用薄层CT扫描进行三维重建显示骨折空间位置关系,其展示方式仍然受二维平面限制[6]。而3D打印技术解决了通过平面影像构建骨折三维图像的问题,从而实现更加精准的诊疗。将采集到的CT、MRI等影像数据导入计算机Mimics软件进行骨折重建,再采用Geomagic建模软件使骨折三维立体化,然后选材打印

出1∶1的骨折模型[7-8]。通过3D打印不同骨折切面分析骨折发生机制,可降低胫骨远端骨骺形态不规则的影响,为诊断提供更加直观可靠的视角,弥补了X射线和CT扫描无法在三维空间上对微小骨折或局部骨质损伤进行评估的不足[9-10]。此外,采用薄层CT替代普通CT扫描进行3D打印可进一步减小误差,有利于评估手术风险及手术效果[11-13]。

3 3D打印技术辅助手术治疗

研究发现,胫骨远端骨骺骨折更易发生在12~16岁的青少年[14]。保护骺板的正常生长发育及踝关节功能不受影响是手术的重点。术前通过3D打印模型验证骨折片数量、骨折线走行、有无骨缺损或关节面塌陷等,判断是否需要植骨,便于后续定制个体化手术方案,验证复位效果及可行性,从而提升手术成功率,获得良好的术后效果。

文献报道,3D打印技术辅助手术的骨骺骨折患者在康复优良率、术后疼痛程度、后期并发症发生率等方面均优于传统手术[15]。原因可能是3D打印技术对骨折类型判断更准确,操作的准确性更高,对周围血运、软骨及骨质保护更好。传统手术通常需反复透视调整内固定物位置,以达到解剖复位,因而手术时间长,辐射暴露次数及手术效果均依赖于术者经验[11];若术中术野被遮挡而选择切开骨膜及软组织,也易造成软骨膜环区软骨细胞及血运受损等医源性损伤。3D打印技术辅助探查可标记重要解剖结构及骨折块,拟定复位顺序[8,16-17]。模拟手术时避开踝关节周围主要的神经血管,按预先确定的手术入路置入内固定物,术毕透视以确保实现解剖复位且内固定稳定,有效减少了因反复进退内固定物造成的骨质损伤,降低了周围神经血管刺伤或热灼伤等医源性损伤风险,减少了透视次数,从而缩短医源性辐射暴露时间,降低因术前判断不准确而造成的手术风险[18-19]。Rammelt等[20]研究发现,3D打印技术有助于恢复关节一致性、胫腓骨对位以及复杂的踝关节骨折的联合稳定,更容易达到解剖复位,在辅助手术治疗方面具有更高的安全性;对伴有骨骺损伤的青少年进行术后功能评估也发现,3D组术后功能恢复优良率较传统手术组更高。赵景新等[8]对16例行3D打印辅助胫骨远端骨骺骨折手术的青少年行患肢踝关节功能评估,结果发现所有患者患侧踝关节功能预后均良好,与健侧踝关节功能差异不明显,与上述一致。

术前可视化处理骨折复制品不仅能帮助延展术前设计,还能提高医师操作熟练度及信心[21]。出于对手术室效率的要求和青少年处于生长发育阶段的考虑,手术需要经验更丰富的操作者,限制了年轻医生在手术室获得初步经验的机会。Kang等[11]研究发现,用尸体及合成骨进行训练仍无法完全模拟即将手术的骨折骨,因此,缺乏经验的外科医师倾向于选择3D打印技术辅助骨折手术。Aimar等[10]经调查发现,75%缺乏经验的外科医师明确表示希望在实践中使用3D打印模型,尤其是在处理复杂骨折时,且术前处理骨折模型并安装植入物的机会难得,有助于提高医师手术把控力和手术成功率。此外,3D打印技术还能定制个体化手术器械、植入物或假体,精准评估关节处皮肤缺损,从而提升修复精准度,减少关节处皮肤张力,制定出更具针对性的诊疗方案,提高手术安全性及舒适度[10,20,22],对踝关节开放性骨骺骨折的治疗具有重要意义。

目前,临床上胫骨远端骨骺骨折内固定的材料多选择克氏针、空心螺钉、髓内钉、锁定钢板等,但跨骺固定一般用光滑的克氏针。术中内固定材料的选择需平衡稳定固定和减轻骨骺损伤,达到解剖复位,实现内固定稳定,同时避免骨骺损伤[2]。患儿个体生长发育及骨折细节上的差异,使得内固定材料的选择更注重个体需求,以实现最佳的契合效果。3D打印技术能够辅助术前内固定材料的筛选,规划手术方式,模拟手术过程,并结合骨折块的创伤情况对内固定进行预塑形,减少术中对内固定材料的反复调整和临时塑形,提高复位效率,增加内固定的稳定性[21]。Yang等[17]认为,3D打印技术能明确钢板和螺钉的放置位置,并对其进行预弯,确保复位的准确性和内固定的稳定性。Bagaria等[23]也认为,骨折模型上根据实际操作来筛选最优手术入路、内固定物及其置入方式,可避免选材的主观盲目性。以上研究表明,3D打印技术辅助手术治疗的真正益处在于允许从多个角度触摸和检查骨折,以及验证固定效果的实际可行性。

4 3D手术导航模板

3D手术导航模板是基于3D打印衍生出的手术设计的逆向产物,具有使用简单便捷、定位定向准确、无需反复调整螺钉或克氏针角度及长度、设计个体化等优点,能有效避免医源性损伤,减少术后并发症,适用于踝关节等解剖结构复杂、骨性标志明显的骨关节骨折。Gao等[24]研发了一种辅助置入髓内钉的导航模板,与胫骨结合时可提高髓内钉远端定位的精确性,保护远端组织。Zaleski等[25]将3D导航模板联合定制器械应用于胫骨平台创伤后缺损的患者,通过术后功

能随访及相关影像学资料证实,3D打印技术辅助手术可准确恢复关节的解剖关系,提高手术操作的可重复性,缩短手术时间。Cai等[26]将3D导航系统应用于10例下肢骨骺复杂病变患儿的治疗中,结果显示,3D导航模板避免了定位错误导致的医源性损伤,且胫骨的骨性结构便于定位导板的设计和使用。综上,3D手术导航模板辅助手术能够多点定位骨性标志,有利于保护周围正常骨质,适用于解剖结构复杂的胫骨远端骨骺骨折,可为患者恢复关节稳定性及力线提供基础。此外,3D手术导航模板联合CT、MRI检查能够预测术后骨骺早闭及缺血坏死等不良事件的发生风险,以便及早进行干预[27]。

5 3D打印技术辅助骨折固定(术后及患肢保护)

传统石膏固定负重大且固定时间长,给患者日常活动带来极大的不便;且石膏透气性差,长时间固定易导致患肢皮疹、水泡、皮肤瘙痒等症状。3D打印可以实现即时打印成型,精确的数据建模使石膏能够完全贴合患肢,保证最佳的恢复体位,多孔设计也改善了石膏的透气性;对于关节固定,尤其是下肢负重关节较常规石膏具有更高的佩戴舒适度。Chen等[28]通过分析27例关节骨折且术后采用石膏固定的患者资料发现,3D打印石膏不仅舒适度高,适配性更好,固定也较传统石膏更简易,患者进行功能恢复锻炼时的运动表现也更加活跃。3D打印技术还可将外固定支架或矫形器修改过程数字化,更换支架或矫形器时将测量数据输入计算机可提高适配度,满足个体需求[20,27]。Wang等[29]利用3D数字化技术将踝足矫形器修改过程中的位置可视化和量化,成功地将复杂的生产过程转化为简便的个性化数控修改过程。另外,在3D打印基础上加入时间属性的4D技术能使打印出的物品随外界刺激改变形态或功能,这或许是设计可活动或自主调整外固定形态的突破口[30]。

6 总结与展望

3D打印技术使骨骺骨折的诊疗更加精准,从而提高了胫骨远端骨骺骨折的治疗效果,改善了预后[31]。3D打印技术能够使骨折损伤三维立体化,更易分析骨折发生机制,直观评估胫骨远端骨骺骨折损伤情况,特别是在微小骨折及局部骨骺骨折方面具有较高的诊断特异性和灵敏性;同时,3D打印技术辅助下能探查标记重要解剖结构及骨折块,拟定复位顺序。采用3D打印技术设计的手术导航模板,具有使用简易、定位准确、无需反复调整内固定器械等优点,可以有效减少医源性损伤和放射暴露,降低术前判断错误导致的手术风险和术后并发症发生率。3D打印还可以制作个体化内固定器械和植入物,进行预塑形,以提高手术效率和内固定稳定性,精准评估损伤程度,提高修复精准度,减轻切口张力。这些特点对治疗胫骨远端骨骺骨折具有重要意义。术后采用3D打印技术根据患儿个体需求制作适配度和佩戴舒适度更高的石膏,可替代传统石膏固定。对于不可挽回的骨骺损伤或伴有骨缺损的患儿,后续可用3D打印个性化的植入假体或填充性骨性支架,甚至可以用于打印合成骨代替结构同种异体骨移植来矫正患肢畸形[32]。利用3D打印带有微小孔隙的支架,在孔隙中填塞具有生物活性的材料甚至骨骺细胞,对于骨骺损伤致发育问题的患儿有重大意义[33]。

虽然3D打印技术为青少年胫骨远端骨骺骨折的诊疗及预后提供了全新视角及个体化诊疗思维,但仍存在设备及维护价格高、术前准备时间长、缺乏软组织打印等不足;且其在急诊骨折创伤等方面的应用也存在一定缺陷,需要进一步研究,改善临床疗效。此外,3D手术导航模板目前在胫骨远端骨骺骨折中的应用较少,即使仅对植入支架进行3D打印,支架植入后也会存在骨折愈合速度减慢的问题[34]。因此,对于这一领域仍需进一步研究。随着数字化技术的发展,期望在未来以适宜价格得到3D打印产品,并实现3D打印与骨科机器人结合完成数字化、程序化手术。新兴的4D打印技术因具有四维空间属性可能成为未来的研究热点[30]。

[参考文献]

[1] Park H, Lee DH, Han SH, et al. What is the best treatment for displaced Salter-Harris Ⅱ physeal fractures of the distal tibia?[J]. Acta Orthop, 2018, 89(1): 108-112. doi: 10.1080/17453674.2017.1373496.

[2] Zhang SB, Zhang YB, Wang SH, et al. Clinical efficacy and safety of limited internal fixation combined with external fixation for Pilon fracture: a systematic review and meta-analysis[J]. Chin J Traumatol, 2017, 20(2): 94-98. doi: 10.1016/j.cjtee.2016.06.012.

[3] 朱嘉文, 杨 洋, 谭 为, 等. 3D打印技术在儿童骨科的应用研究进展[J]. 中华解剖与临床杂志, 2020, 25(6): 700-704. doi: 10.3760/cma.j.cn101202-20191015-00311.

[4] Blackburn EW, Aronsson DD, Rubright JH, et al. Ankle fractures in children[J]. J Bone Joint Surg Am, 2012, 94(13): 1234-1244. doi: 10.2106/JBJS.K.00682.

[5] Denning JR, Gohel S, Arkader A. Open reduction and internal screw fixation of transitional ankle fractures in adolescents[J]. JBJS Essent Surg Tech, 2021, 11(4): e19.00070. doi: 10.2106/JBJS.ST.19.00070.

[6] Tarallo L, Micheloni GM, Mazzi M, et al. Advantages of preoperative planning using computed tomography scan for treatment of malleolar

ankle fractures[J]. World J Orthop, 2021, 12(3): 129-139. doi: 10.5312/wjo.v12.i3.129.

[7] Huitema JM, van der Gaast N, Brouwers L, et al. Are 3D-printed models of tibial plateau fractures a useful addition to understanding fractures for junior surgeons?[J]. Clin Orthop Relat Res, 2022, 480(6): 1170-1177. doi: 10.1097/CORR.0000000000002137.

[8] 赵景新,马雅昌,韩 栋,等. 3-D打印在青少年胫骨远端骨折累及骺板损伤手术中的应用[J]. 中国修复重建外科杂志,2017,31(10):1195-1199. doi:10.7507/1002-1892.201704103.

[9] Matai I, Kaur G, Seyedsalehi A, et al. Progress in 3D bioprinting technology for tissue/organ regenerative engineering[J]. Biomaterials, 2020,226:119536. doi:10.1016/j.biomaterials.2019.119536.

[10] Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art[J]. J Healthc Eng, 2019, 2019: 5340616. doi:10.1155/2019/5340616.

[11] Kang HJ, Kim BS, Kim SM, et al. Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture?[J]. Biomed Res Int,2019,2019:7059413. doi:10.1155/2019/7059413.

[12] Ferrer-Torregrosa J, Garcia-Vicente S, Fernandez-Ehrling N, et al. Design of a three-dimensional-printed surgical glove for minimal-incision podiatric surgery[J]. J Am Podiatr Med Assoc, 2019, 109(3):207-214. doi:10.7547/17-014.

[13] Belvedere C, Siegler S, Fortunato A, et al. New comprehensive procedure for custom-made total ankle replacements: medical imaging, joint modeling, prosthesis design, and 3D printing[J]. J Orthop Res,2019,37(3):760-768. doi:10.1002/jor.24198.

[14] Yao J, Bai R, Zhao A, et al. The "Hand as Foot model" in Salter-Harris classification of epiphyseal injury in children[J]. Asian J Surg, 2021,44(11):1432-1433. doi:10.1016/j.asjsur.2021.07.034.

[15] Cherkasskiy L, Caffrey JP, Szewczyk AF, et al. Patient-specific 3D models aid planning for triplane proximal femoral osteotomy in slipped capital femoral epiphysis[J]. J Child Orthop, 2017, 11(2): 147-153. doi:10.1302/1863-2548-11-170277.

[16] 黄幼怡,袁 伟. 3D打印技术在足踝外科骨折及畸形类疾病中的应用[J]. 中国组织工程研究,2021,25(3):438-442.

[17] Yang L, Shang X, Fan J, et al. Application of 3D printing in the surgical planning of trimalleolar fracture and doctor-patient communication[J]. Biomed Res Int,2016,2016:2482086. doi:10.1155/2016/2482086.

[18] Li Y, Lin J, Wang Y, et al. Comparative study of 3D printed navigation template-assisted atlantoaxial pedicle screws versus free-hand screws for type Ⅱ odontoid fractures[J]. Eur Spine J, 2021,30(2):498-506. doi:10.1007/s00586-020-06644-9.

[19] Aman ZS, DePhillipo NN, Peebles LA, et al. Improved accuracy of coronal alignment can be attained using 3D-printed patient-specific instrumentation for knee osteotomies: a systematic review of level Ⅲ and Ⅳ studies[J]. Arthroscopy, 2022, 38(9): 2741-2758. doi: 10.1016/j.arthro.2022.02.023.

[20] Rammelt S, Bartonicek J, Kroker L. Pathoanatomy of the anterolateral tibial fragment in ankle fractures[J]. J Bone Joint Surg Am, 2022, 104(4):353-363. doi:10.2106/JBJS.21.00167.

[21] Bizzotto N, Tami I, Santucci A, et al. 3D printed replica of articular fractures for surgical planning and patient consent: a two years multi-centric experience[J]. 3D Print Med, 2015, 2(1): 2. doi: 10.1186/s41205-016-0006-8.

[22] Zhang Y, Weng Q, Gu Y, et al. Calcaneal fractures: 3D-printing model to assist spatial weaving of percutaneous screws versus conventional open fixation-a retrospective cohort study[J]. Int Orthop, 2021, 45(9):2337-2346. doi:10.1007/s00264-021-05094-2.

[23] Bagaria V, Chaudhary K. A paradigm shift in surgical planning and simulation using 3D graphy: experience of first 50 surgeries done using 3D-printed biomodels[J]. Injury, 2017, 48(11): 2501-2508. doi:10.1016/j.injury.2017.08.058.

[24] Gao Y, Wang H, Tu P, et al. A novel dynamic electromagnetic tracking navigation system for distal locking of intramedullary nails[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2021, 209: 106326. doi:10.1016/j.cmpb.2021.106326.

[25] Zaleski M, Hodel S, Fürnstahl P, et al. Osteochondral allograft reconstruction of the tibia plateau for posttraumatic defects-a novel computer-assisted method using 3D preoperative planning and patient-specific instrumentation[J]. Surg J (N Y), 2021, 7(4): e289-e296. doi:10.1055/s-0041-1735602.

[26] Cai H, Cai H, Wang Z. Application of 3D printing navigation system in pediatric epiphyseal complex lesion surgery[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2023, 28(1): 2174045. doi: 10.1080/24699322.2023.2174045.

[27] Yuan BJ, Stans AA, Larson DR, et al. Excision of physeal bars of the distal femur, proximal and distal tibia followed to maturity[J]. J Pediatr Orthop, 2019, 6: e422-e429. doi: 10.1097/BPO.0000000000001349.

[28] Chen L, Xiong Y, Mi B, et al. A novel instant 3-dimensional printing system for postoperative fracture patients: a comparative cohort study[J]. Med Sci Monit, 2021, 27: e928240. doi: 10.12659/MSM.928240.

[29] Wang JZ, Lillia J, Farhan M, et al. Digital mapping of a manual fabrication method for paediatric ankle-foot orthoses[J]. Sci Rep, 2021,11(1):19068. doi:10.1038/s41598-021-98786-z.

[30] Chen X, Han S, Wu W, et al. Harnessing 4D printing bioscaffolds for advanced orthopedics[J]. Small, 2022, 18(36): e2106824. doi: 10.1002/smll.202106824.

[31] Zheng P, Xu P, Yao Q, et al. 3D-printed navigation template in proximal femoral osteotomy for older children with developmental dysplasia of the hip[J]. Sci Rep, 2017, 7: 44993. doi: 10.1038/srep44993.

[32] Hassanajili S, Karami-Pour A, Oryan A, et al. Preparation and characterization of PLA/PCL/HA composite scaffolds using indirect 3D printing for bone tissue engineering[J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl,2019,104:109960. doi:10.1016/j.msec.2019.109960.

[33] Mondschein RJ, Kanitkar A, Williams CB, et al. Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds[J]. Biomaterials, 2017, 140: 170-188. doi: 10.1016/j.biomaterials.2017.06.005.

[34] Lim JX, He M, Chong A. 3D-printed poly-lactic co-glycolic acid (PLGA) scaffolds in non-critical bone defects impede bone regeneration in rabbit tibia bone[J]. Biomed Mater Eng, 2021, 32(6): 375-381. doi:10.3233/BME-216017.

(编辑:龙小芬)