

•综述•

三维 CT 成像技术在腕舟骨骨折诊治中的应用

常紫东 邹宾 郭旺 景森浩 梁开鑫 薛超 李永平

摘要 腕舟骨骨折情况复杂,预后差异较大。三维(3D)电子计算机断层扫描(CT)诊断腕舟骨骨折的特异性较高,可精确评估骨折情况,确定螺钉置入位置,预测骨不连发生,新型 3D 模式 I—Space 更能生动展示骨折情况。3D 导航下腕舟骨骨折经皮内固定精确度较高,但手术时间较长;3D 打印体外固定装置经皮固定精确度较高且手术时间较短;3D CT 指导血管化移植治疗腕舟骨骨不连疗效较好,且有利于术前规划和学习;虽然通过 CT 三维重建制作的 3D 打印假体成本较高,但其可恢复原有的解剖结构及力学、生理环境。该文就近年 3D CT 成像技术在腕舟骨骨折诊治中的应用进行综述。

关键词 腕舟骨骨折;骨不连;三维电子计算机断层扫描;诊治

DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2022.06.005

腕舟骨骨折在所有腕骨骨折中发生率位列第一,且由于其特殊的解剖位置及血供等因素,腕舟骨骨折不愈合的发生率为 10%~15%^[1]。早期确诊和坚强内固定有利于腕舟骨骨折的预后,应确保骨折端保持良好对位及腕关节早期功能锻炼。传统 X 线检查中,多达 30% 的腕舟骨骨折被忽视;三维(3D)电子计算机断层扫描(CT)诊断腕舟骨骨折的敏感度(85%~95%)虽不如 MRI 检查(100%),但其特异度(95%~100%)优于 MRI 检查(80%~90%)^[2]。腕舟骨骨不连指骨折后 6 个月内未愈合,可导致驼背畸形及舟骨骨不连进行性塌陷(SNAC)^[1]。腕舟骨骨不连手术治疗的关键是稳定固定骨折端及改善骨周围血运,其目的是最终达到骨性愈合,矫正腕骨畸形,防止腕关节功能丢失及进行性腕关节炎。而腕舟骨骨不连治疗的难点是如何早期发现腕舟骨骨折并及时治疗,如何精准地制定手术计划,避免因腕舟骨特殊的结构形态及骨折类型而造成内固定失效。3D CT 成像技术可精确描绘出骨折线的方向及其与舟骨轴线的夹角,从而可以更科学合理地指导术中螺钉植入方向,以确保内固定的稳定性,其作为一种新颖且不断完善的技术被广泛应用于腕舟骨骨折诊断及治疗。

1 在腕舟骨骨折诊断中的应用

1.1 评估骨折情况

由于腕舟骨特殊的解剖结构,骨折后其发生骨不连的概率较高,因此需在损伤后及时发现且尽早恢复其解剖结构,避免后续的创伤性腕关节炎造成手腕功能不可逆性损失。Schmidle 等^[3]研究发现,3D CT 成像技术可提供精确的骨折信息,如量化排列不良的骨折碎片。Nagy^[4]进一步研究发现,将患侧腕舟骨骨不连 3D CT 成像模型与健侧腕舟骨 3D CT 成像模型进行比较,可计算出骨折碎片移位的具体数据,从而为精确重建腕舟骨提供解剖学规划,为下一步手术计划提供指导。Schmidle 等^[5]则利用 3D CT 成像开发了一种测量技术,该技术使用普通绘制软件上的 3D CT 成像模型的表面标志,评估腕舟骨骨折碎片间的相对旋转情况以指导临床。ten Berg 等^[6]比较腕舟骨骨不连 3D CT 成像模型的高度/长度(H/L)与健康者腕舟骨 3D CT 成像模型的 H/L,认为评估其冠状面 H/L 可为检测舟骨畸形提供有价值的附加信息。

1.2 确定螺钉置入位置

早期学者利用 3D 模型对舟骨纵轴进行了初步探索。Leventhal 等^[7]针对掌侧入路的螺钉置入理想位置进行 3D 模型研究,比较安全区内最大螺钉长度轴(MSL)与安全区内圆柱最佳拟合轴(CYL),发现螺钉沿 MSL 经舟骨结节置入且不侵犯大多角骨的情况下较沿 CYL 可获得更好的力学表现,此入路最佳起点位于舟骨结节尖端背侧 1.7 mm、桡

基金项目:山西省自然科学基金(201801D121079)

作者单位:030001 太原,山西医科大学第二临床医学院(常紫东、邹宾、郭旺、景森浩、梁开鑫、薛超);030001 太原,山西医科大学第二医院骨科(李永平)

通信作者:李永平 E-mail:liyp328@126.com

侧 0.2 mm 处。Guo 等^[8]对所选取腕舟骨骨折患者的腕部螺旋 CT 数据进行三维重建并计算舟骨表面 3D CT 成像模型上两点之间的距离,得出男性平均长度为 29.3 mm(标准差 1.6 mm),女性为 26.6 mm(标准差 1.8 mm),长轴远端点位于舟骨结节中心,近端点位于舟月突背脊。

研究表明,垂直于骨折线放置的螺钉比沿舟骨纵轴放置的螺钉更具生物力学优势^[9]。有学者以 X 线片上骨折线走行将舟骨骨折分为水平斜行骨折、垂直斜行骨折和横行骨折,而以往横行骨折被认为是最常见的腕舟骨骨折,故传统手术沿舟骨纵轴放置无头螺钉^[3]。但随着 3D CT 成像技术的发展,Luria 等^[10]对舟骨骨折线进行研究,发现腕舟骨骨折的舟骨纵轴与骨折平面之间平均角度为 53°,即多数腕舟骨骨折为水平斜行骨折,因此沿舟骨纵轴放置无头螺钉并非理想位置。Luria 等^[11]就垂直螺钉置入的可行性进行进一步研究,通过 CT 扫描 12 具尸体得到腕舟骨 3D CT 成像模型,认为腕舟骨水平斜行骨折手术中垂直螺钉置入的首选入路为在腕关节屈曲时经近端背侧入路及在腕关节伸展或中立位置时经多角骨(通过掌-桡侧大多角骨)入路,而在腕舟骨横行骨折手术中垂直螺钉置入的可操作入路为在腕关节屈曲或中立位时经近端背侧或经多角骨入路及在腕关节伸展时远端(掌侧到掌桡侧大多角骨)入路,上述入路螺钉均可近似垂直放置(偏差 $<10^{\circ}$)。

1.3 预测骨不连发生

骨折愈合与骨小梁的形成密不可分,骨硬化被认为是不愈合的标志。Schmidle 等^[12]通过分析术中取得的骨折断端标本组织学参数来评估腕舟骨的愈合潜力(BHC),并将其与术前反映骨硬化、骨小梁结构的二维(2D)CT 数据和反映骨折详细位置及供血区的 3D CT 数据进行比较,结果发现具有骨小梁结构且无碎片的腕舟骨骨折断端 BHC 较高,如果骨小梁结构存在且无硬化,则愈合时间明显较短;与其他位置骨不连相比,无血供的腕舟骨近极骨不连 BHC 明显较低且愈合时间较长;在腕舟骨近端和远端骨碎片中较高 BHC 与较快的愈合相关。该研究认为,术前所得的 CT 数据可部分反映腕舟骨骨折的愈合能力,指导术中移植物的选择。Miyamura 等^[13]则比较年龄相匹配的骨愈合组、骨不愈合组及对照组骨折端骨密度的 3D CT 数据,发现骨不连患者腕舟骨远端和近端骨碎片

中的骨密度均有所增加。

1.4 新型 3D 模式

Drijkoningen 等^[14]提出的 I—Space 是一种类似于虚拟现实的全息影像虚拟现实系统,目前临床中应用较少,其优势在于能将 3D CT 成像技术所采集的数据以可视化形式展示,有助于发现隐匿性骨折和进行各种标记点的测量,所得的模型也可用于教学及术前计划制定,有利于改善医师学习曲线,生动展示骨折情况。

2 在急性腕舟骨骨折及骨不连手术中的应用

腕舟骨骨折通常首选手术治疗,因为早期手术较石膏固定等保守治疗疗效更好,并能获得较好的早期腕关节功能,对患者生活及工作影响较小^[15]。目前无移位或轻度移位的腕舟骨骨折优先考虑微创经皮内固定治疗,包括标准术式及关节镜辅助术式。而对于发生骨不连的腕舟骨骨折,则考虑植骨内固定,包括取桡骨远端、髂骨等非血管化移植植物,以及取带膝降动脉或膝上内侧动脉的股骨内侧髁、带有回旋髁血管的髂骨皮质骨等游离血管化移植植物及带桡腕动脉的掌侧桡骨远端带蒂血管化移植植物等。如上述治疗均失败,进入不可逆的腕关节炎阶段,为减轻患者痛苦,提高其生活质量及运动能力,不得不采取挽救性手术(姑息性手术),包括桡骨茎突切除术、腕舟骨远端切除术、近排腕骨切除术、四角融合术及腕关节融合术等^[1]。以上术式均可与 3D CT 成像技术结合,使手术精确有效。

2.1 3D CT 导航下经皮内固定

由于腕舟骨较小且形状不规则,骨折线走行情况常较复杂,传统手术常需多次穿针及透视,可能破坏舟骨血运,且增加术中辐射量。虽然 3D CT 导航操作不熟练可能会延长手术时间,但可将无头螺钉更精确地置于理想位置,减少对舟骨血运的破坏及术中辐射。Catala-Lehnen 等^[16]研究认为,3D CT 导航有较高的精确度,可减少舟骨皮质的破坏,但初始扫描辐射量较高,且总时间比传统手术长,费用也较高。Smith 等^[17]采用 3D 锥形束 CT 辅助导航系统辅助治疗腕舟骨骨折,结果表明该系统与传统 2D 导航技术导航下术中导丝放置的中心位置并无明显差异,但该系统导航下尝试钻孔次数较少,且在最佳区域内可供选择的钻孔路径较多,从而能最大化螺钉长度,发挥螺钉长度的生物学优势。Niederwanger 等^[18]研究认为,3D CT

导航应用于腕舟骨骨折手术掌侧入路精确度较高。

2.2 3D 打印体外固定装置经皮固定

Citak 等^[19]研究认为,舟骨夹板作为一种 3D 导航的辅助装置,其自带内置参考标记,便于与 3D 成像设备相结合;舟骨夹板可稳定固定手和手腕,充分将参考标记与舟骨相关联,导航能力佳,可使螺钉放置更精确,且无需使用额外的参考标记。但舟骨夹板与 3D 导航结合使用时,术中仍有辐射风险。Wan 等^[20]探讨采用计算机辅助设计联合 3D 打印个性化导板对腕舟骨骨折微创经皮螺钉内固定疗效的影响,结果发现该装置不仅有助于准确放置螺钉,还可缩短手术时间,减少置入导丝和 X 线照射的次数,减少辐射和对腕骨血供的破坏。Salabi 等^[21]、DeWolf 等^[22]均研究认为,通过 3D CT 数据设计出的 3D 打印靶向装置经皮固定,有辐射少、手术时间短、螺钉位置理想等优势。

2.3 在血管化移植治疗骨不连中的应用

腕舟骨骨折经皮内固定后,骨不连发生率仍较高,对腕舟骨骨不连常采用血管化移植联合内固定治疗。Houdek 等^[23]、Schmidt 等^[24]均将带血管蒂的股骨内侧髁作为供体治疗腕舟骨近端缺血性坏死导致的腕舟骨骨不连,认为以 3D CT 数据建立的 3D CT 成像模型可用于术前规划及学习,精准规划所需皮瓣的形态,选择最合理的取材部位,减少供区损伤及后续可能出现的并发症。Taylor 等^[25]将股骨内侧滑车皮瓣用于治疗腕舟骨缺血性坏死骨不连及月骨缺血性坏死骨不连,将股骨内侧髁皮瓣用于腕骨缺血性坏死后的腕关节融合术,将游离腓骨皮瓣用于治疗桡骨远端骨不连,均取得了较好疗效。

2.4 在全舟骨置换术中的应用

除血管化移植联合内固定治疗外,全舟骨置换术也是腕舟骨缺血性坏死的治疗方案。Rossello^[26]对 1 例 3D 打印钛制假体全舟骨置换术患者进行研究,随访 1 年,认为全舟骨置换术仅适用于有舟骨结构破坏但未发生腕骨塌陷和腕关节不稳,且尚不必行近端行切除术、腕关节固定术和腕关节置换术治疗的患者。无舟骨重要结构破坏的舟骨骨不连则首选骨移植治疗。当骨不连导致舟骨近端孤立性无菌性坏死时,可考虑腕舟骨部分置换。虽然通过 CT 三维重建制作的 3D 打印假体成本较高,但其可恢复肢体原有的解剖结构及力学、生理环境。

参考文献

- [1] Yeo JH, Kim JY. Surgical Strategy for Scaphoid Nonunion Treatment[J]. J Hand Surg Asian Pac Vol, 2018, 23(4): 450-462.
- [2] Schmitt R, Rosenthal H. Imaging of scaphoid fractures according to the new S3 guidelines[J]. Rofo, 2016, 188(5): 459-469.
- [3] Schmidle G, Kastenberger TJ, Kaiser P, et al. 3D Imaging for the analysis of scaphoid fractures and non-unions[J]. Handchir Mikrochir Plast Chir, 2020, 52(5): 392-398.
- [4] Nagy L. 3D analysis and computer assisted reconstruction for scaphoid non-union[J]. Handchir Mikrochir Plast Chir, 2020, 52(5): 435-440.
- [5] Schmidle G, Rieger M, Klauser AS, et al. Intraosseous rotation of the scaphoid: assessment by using a 3D CT model—an anatomic study[J]. Eur Radiol, 2014, 24(6): 1357-1365.
- [6] ten Berg PW, Dobbe JG, Strackee SD, et al. Quantifying scaphoid malalignment based upon height-to-length ratios obtained by 3-dimensional computed tomography[J]. J Hand Surg Am, 2015, 40(1): 67-73.
- [7] Leventhal EL, Wolfe SW, Walsh EF, et al. A computational approach to the “optimal” screw axis location and orientation in the scaphoid bone[J]. J Hand Surg Am, 2009, 34(4): 677-684.
- [8] Guo Y, Tian GL. The length and position of the long axis of the scaphoid measured by analysis of three-dimensional reconstructions of computed tomography images[J]. J Hand Surg Eur Vol, 2011, 36(2): 98-101.
- [9] Luria S, Hoch S, Liebergall M, et al. Optimal fixation of acute scaphoid fractures: finite element analysis[J]. J Hand Surg Am, 2010, 35(8): 1246-1250.
- [10] Luria S, Schwarcz Y, Wollstein R, et al. 3-dimensional analysis of scaphoid fracture angle morphology[J]. J Hand Surg Am, 2015, 40(3): 508-514.
- [11] Luria S, Badir S, Schwarcz Y, et al. Approach to the perpendicular fixation of a scaphoid waist fracture: a computer analyzed cadaver model[J]. J Hand Surg Am, 2020, 45(3): 203-212.
- [12] Schmidle G, Ebner HL, Klauser AS, et al. Correlation of CT imaging and histology to guide bone graft selection in scaphoid non-union surgery[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2018, 138(10): 1395-1405.
- [13] Miyamura S, Lans J, He JJ, et al. Bone density measurements from CT scans may predict the healing capacity of scaphoid waist fractures[J]. Bone Joint J, 2020, 102B(9): 1200-1209.
- [14] Drijkoningen T, Knotter R, Coerkamp EG, et al. Inter-observer agreement between 2-dimensional CT versus 3-dimensional I-Space model in the diagnosis of occult scaphoid fractures[J]. Arch Bone Jt Surg, 2016, 4(4): 343-347.
- [15] Moon ES, Dy CJ, Derman P, et al. Management of nonunion following surgical management of scaphoid fractures: current concepts[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2013, 21(9): 548-557.
- [16] Catala-Lehnen P, Nüchtern JV, Briem D, et al. Comparison of 2D and 3D navigation techniques for percutaneous screw insertion into the scaphoid: results of an experimental cadaver study[J]. Comput Aided Surg, 2011, 16(6): 280-287.
- [17] Smith EJ, Al-Sanawi HA, Gammon B, et al. Volume slicing of cone-

- beam computed tomography images for navigation of percutaneous scaphoid fixation[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2012, 7(3): 433-444.
- [18] Niederwanger C, Widmann G, Knoflach M, et al. Kirschner wire placement in scaphoid bones using intraoperative CT-guided stereotaxy[J]. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2013, 22(3): 165-170.
- [19] Citak M, O'Loughlin PF, Kendoff D, et al. Navigated scaphoid screw placement using customized scaphoid splint: an anatomical study[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2010, 130(7): 889-895.
- [20] Wan SX, Meng FB, Zhang J, et al. Experimental study and preliminary clinical application of mini-invasive percutaneous internal screw fixation for scaphoid fracture under the guidance of a 3D-printed guide plate[J]. Curr Med Sci, 2019, 39(6): 990-996.
- [21] Salabi V, Rigoulot G, Sautet A, et al. Three-dimensional-printed patient-specific Kirschner-wire guide for percutaneous fixation of undisplaced scaphoid fractures: a cadaveric study[J]. J Hand Surg Eur Vol, 2019, 44(7): 692-696.
- [22] DeWolf MC, Hartov A, Fortney TA, et al. Three-dimensional printed targeting device for scaphoid fracture fixation[J]. Hand (NY), 2022, 17(1): 134-140.
- [23] Houdek MT, Matsumoto JM, Morris JM, et al. Technique for 3-Dimensional (3D) modeling of osteoarticular medial femoral condyle vascularized grafting to replace the proximal pole of unsalvageable scaphoid nonunions[J]. Tech Hand Up Extrem Surg, 2016, 20(3): 117-124.
- [24] Schmidt M, Holzbauer M, Kwasny O, et al. 3D Printing for scaphoid-reconstruction with medial femoral condyle flap[J]. Injury, 2020, 51(12): 2900-2903.
- [25] Taylor EM, Iorio ML. Surgeon-based 3D printing for microvascular bone flaps[J]. J Reconstr Microsurg, 2017, 33(6): 441-445.
- [26] Rossello MI. A case of total scaphoid titanium custom-made 3D-printed prostheses with one-year follow-up[J]. Case Reports Plast Surg Hand Surg, 2020, 7(1): 7-12.

(收稿日期 : 2022-07-08)

(本文编辑 : 李圆圆)

本刊有关文稿中法定计量单位的书写要求

- (1) 单位名称与单位符号不可混合使用, 如 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{天}^{-1}$ 应改为如 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。
- (2) 组合单位符号中表示相除的斜线多于 1 条时, 应采用负数幂的形式表示, 如 ng/kg/min 应采用 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 的形式。
- (3) 组合单位中斜线和负数幂不可混用, 如前例不宜采用 $\text{ng/kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 的形式。
- (4) 在首次出现不常用的法定计量单位时用括号加注与旧制单位的换算系数, 下文再出现时只列法定计量单位。
- (5) 正文中时间的表达, 凡前面带有具体数据者应采用 d、h、min、s, 而不用天、小时、分钟、秒。统计学符号 P 、 t 、 r 等一律用斜体字母。