

基础研究

三维打印个体化导航模板在枕骨髁螺钉固定技术中的应用研究

黄 轩¹, 李凤宁¹, 张 帆¹, 王 琨¹, 陈 智¹, 阳青松², 党瑞山³, 沈洪兴¹, 李 明¹

(1 第二军医大学长海医院骨科; 2 影像科; 3 第二军医大学解剖学教研室 200433 上海市)

【摘要】目的:探讨一种基于三维打印技术制备个体化枕骨髁螺钉导航模板的可行性,并对该方法辅助置钉的准确性和安全性进行评估。**方法:**选取 20 具成人尸体的枕颈部标本,将其 CT 扫描数据导入 Mimics 软件,对枕骨至枢椎水平行选择性三维重建,观察并测量枕骨髁相关解剖结构以确定置钉参数。在计算机三维模型上虚拟枕骨髁螺钉钉道及其导向通道,设计与枕骨后部结构相贴合的阴模,将阴模与导向通道整合后利用三维打印技术成型,制作出枕骨髁模型及对应的个体化导航模板。然后导航模板辅助下分别于模型和尸体标本置入双侧枕骨髁螺钉,并通过解剖观察及 CT 扫描评估置钉准确性。**结果:**枕骨髁的大体形态及毗邻解剖结构个体差异较大,虚拟置钉后测得置钉轴位内倾角、矢状位倾角和进钉点至寰枕关节面的垂直距离分别为 $30.2^{\circ} \pm 6.3^{\circ}$ 、 $8.1^{\circ} \pm 2.6^{\circ}$ 和 $3.69 \pm 0.42 \text{ mm}$ 。根据置钉参数设计并打印出 20 个枕骨髁模型及对应的个体化导航模板,在其辅助下成功置入双侧枕骨髁螺钉共 40 枚,置钉耗时 $(60.1 \pm 9.3) \text{ s}$ 。术后解剖观察及 CT 扫描提示所有螺钉均准确置入枕骨髁内。**结论:**使用 Mimics 软件能够根据 CT 扫描结果利用三维打印技术制作出个体化枕骨髁螺钉导航模板,辅助置钉准确性高,操作简单,为枕骨髁螺钉的精确置入提供了新思路。

【关键词】 三维打印; 枕骨髁螺钉; 导航模板; 熔融沉积快速成型; 聚乳酸

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2014.05.12

中图分类号: R687.3, TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2014)-05-0440-07

An individualized navigation template based on the three-dimensional printing technique: application to the occipital condyle screw insertion/HUANG Xuan, LI Fengning, ZHANG Fan, et al/Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2014, 24(5): 440-446

【Abstract】 Objectives: To investigate the feasibility of establishing an individualized navigation template for occipital condyle screws insertion by using the three-dimensional printing technique, and to evaluate the accuracy and safety of template-assisted condyle screw insertion. **Methods:** Twenty adult occipitocervical specimens were selected to take a CT-scan. After importing original Dicom data into the Mimics software, 3D-models of the craniocervical junction were created, which were used to evaluate anatomic structures related to condyle screws and define the parameters of screw placement. The screw path was determined through the guidance of canal and the cavity model of occipital bone structure, which were assembled together to generate the navigation template with a well-established screw path based on the three-dimensional printing forming technique. Anatomy study and CT-scan were taken to access the position of the screws after the insertion of bilateral condyle screws on cadaveric specimens and 3D-models. **Results:** Significant individual variation of the anatomical structure related to the occipital condyle screw was identified. The axial medial angle, sagittal cranial angle and the distance between entry point and atlantooccipital joint were $30.2^{\circ} \pm 6.3^{\circ}$, $8.1^{\circ} \pm 2.6^{\circ}$ and $3.69 \pm 0.42 \text{ mm}$, respectively. Forty condyle screws were implanted assisted by 20 individualized navigation templates with an average time of $60.1 \pm 9.3 \text{ s}$. Anatomy study and CT-scan showed no intrusion of the vertebral artery, hypoglossal canal, condylar emissary canal or atlantooccipital joint. All screws were completely contained within the condyle. **Conclusions:** The study proves the feasibility of

基金项目:国家自然科学基金资助项目(81372012);长海医院“1255”学科建设计划资助项目(CH125540200, CH125520900)

第一作者简介:男(1984-),主治医师,医学硕士,研究方向:脊柱外科疾病的基础与临床

电话:(021)31161697 E-mail:xuanhuangcn@qq.com

通讯作者:沈洪兴 E-mail:shenhxgk@126.com

using the Mimics software for establishing 3D-models of the occipital condyle and related anatomy structures. The individualized navigation template, designed and generated by the three-dimensional printing technique based on established screw path parameters, is proved to be a feasible, precise and low-cost method, which can be a new alternative to conventional technique for screw placement.

【Key words】 Three-dimensional printing; Occipital condyle screw; Navigation templates; Fused deposition modeling; Polylactic acid

【Author's address】 Department of Orthopedics, Changhai Hospital, 200433, Shanghai, China

外伤、炎症、肿瘤和畸形等病因均可引发严重枕颈不稳,进而导致高位颈髓损伤等严重后果。对于此类疾病的治疗主要通过前路或后路手术置入内固定器械,连接枕颈两端的骨性结构,从而恢复枕颈部的稳定性^[1]。其中,经后路枕颈固定是目前最为常用的手术方法^[2]。该术式需要在患者的枕骨端及颈椎端分别放置枕骨固定板和内固定螺钉,并以预弯的金属棒进行连接。枕骨端的固定则主要依赖枕外隆凸周围骨性结构的完整,而当患者存在该部位解剖结构异常时,尚无有效的替代方法^[3]。为此,有学者开始研究将枕骨髁作为枕骨端锚定点的可行性,并陆续开展了前路经口寰枕钢板固定^[4]、后路经寰枕关节螺钉^[5]、寰枕关节间融合器置入^[6]和枕骨髁螺钉固定^[7]等新术式。其中,枕骨髁螺钉的操作与椎弓根螺钉相似,且基于该技术进行枕颈固定所获得的生物力学性能基本与现有的固定方法相当,因而受到了广泛关注^[2]。然而,枕骨髁的相关解剖结构较为复杂,采用传统的徒手置钉法极易出现偏差而导致严重的血管神经损伤,限制了该技术的临床推广应用^[8]。近年来,随着三维打印技术在医疗领域的不断发展,有学者开始利用该技术设计可用于辅助颈椎椎弓根及椎板置钉的导向模板,有效保证了螺钉置入的准确性^[9,10]。为此,本研究拟基于三维打印技术,设计并制备一种可用于辅助枕骨髁置钉的个体化导航模板,通过尸体标本验证其可行性,并归纳总结该方法的优势和合理性。

1 材料与方法

1.1 研究对象

选用 20 具成人新鲜尸体标本,男性 14 具,女性 6 具,均为汉族,死亡年龄为(56±12.4)岁(均由第二军医大学解剖学教研室提供)。完整截取标本的颅骨至 C7 节段作为实验对象,保留骨性及周围软组织结构,并行薄层 CT 扫描(Siemens, Germany),排除枕骨髁骨折、骨性结构缺损、占位

性病变或寰椎枕化畸形的标本。

1.2 枕骨髁三维建模及其解剖参数的测量

将 CT 扫描所获得的 Dicom 格式图像(层厚和扫描厚度均为 0.5mm)导入 Mimics 10.01 版软件(Materialise, Leuven, Belgium)。首先,重建枕骨髁的三维解剖模型:使用 Thresholding 工具对骨性结构行阈值分割(分割值设定为 320~1900)后,使用 Region growing 工具行区域增长,形成新蒙板,并以 Edit Masks 工具逐层分离出颅底至枕骨髁的完整结构。使用 Calculate 3D 工具基于蒙板对枕骨髁行三维重建后,由一名脊柱外科住院医师在高年资术者(分别为本文第 2 和 8 位次作者)的指导下,在 Mimics 软件中对双侧枕骨髁置钉的相关解剖参数进行测量:①参照 Ozer 等^[11]所总结的枕骨髁大体形态分类方法,基于枕骨髁三维重建模型进行大体分型,并肉眼观察髁导静脉管和舌下神经管开口等结构的变异情况。②使用 MedCAD 工具建立一个 3.5mm×30mm 的实心圆柱体以代表枕骨髁螺钉。③参照 Lee 等^[12]所报道的方法,在枕骨髁背侧冠状面的中垂线上确定进钉点,根据轴位、冠状位、矢状位和三维重建图像实时调整虚拟螺钉的轴位内倾角和矢状位倾角(图 1a),使内倾角尽可能与枕骨髁长轴平行(图 1b),同时避免侵犯舌下神经管、髁导静脉管和寰枕关节面(图 1c、d)。④虚拟置钉完成后,在三维重建图像上测量并记录进钉点与寰枕关节面的垂直距离以及螺钉的轴位内倾角和矢状位倾角(图 1e、f)。

1.3 枕骨髁螺钉导航模板的设计和制作

按照三步法制备个体化导航模板:①在 Mimics 软件中以虚拟螺钉(实心圆柱体)获得最佳钉道后,锁定钉道的三维空间位置,将其空心化并反向增厚为 5×50mm 的圆柱体,形成枕骨髁螺钉导向通道。②建立一个实心楔形体,通过减集运算使该实心体的腹侧面与颅骨双侧下项线至枕骨大孔后缘间枕外嵴两侧的凹陷性骨面结构完全互

补贴合,形成阴模。进一步修整使其宽度达到双侧枕骨髁外侧缘,高度与下项线至寰枕关节面的垂直距离一致。③将上述两步所分别建立的双侧螺钉导向通道和枕骨阴模经计算机处理融合,最终形成带有导向通道的个体化模板(图 2a、b)。将模型保存为 STL 格式后直接传输至三维打印机(FDM-3000,Stratasys),使用聚乳酸为材料打印出各标本的三维模型及对应的导航模板(图 2c)。

1.4 导航模板辅助置钉及准确性评估

首先基于枕骨髁三维打印模型,对导航模板的可操作性进行验证:将导航模板与枕骨髁模型相组合,沿模板上的导向通道在双侧枕骨髁上建立钉道(图 2d)。移除导航模板,以探针确认钉道四壁完整性后,沿双侧钉道拧入规格为 3.5mm×18mm 的椎弓根螺钉(DePuy Synthes Spine),直视下观察并记录螺钉有无穿破枕骨髁皮质的情况(图 2e)。随后基于尸体标本,对导航模板的可靠性进行验证:以尖刀配合骨膜剥离器,以枕外棘为中心,逐层剥除枕骨双侧下项线至枕骨大孔后缘背侧的软组织直至暴露光整的骨面,注意避免破

坏正常骨性结构。将对应的导航模板与之组合,术者一手把持模板以维持其稳定性,另一手依次采用器械沿模板上的导向通道于枕骨髁制备钉道,同法操作对侧(图 2f、g)。移除模板,沿双侧钉道置钉(图 2h)。术中记录每枚螺钉置入的操作时间。置钉过程避免使用透视辅助、球探确认钉道或行钉道修正,以期最真实地反映导航模板的辅助效果。置钉结束后,由术者对寰枕间隙进行解剖,观察螺钉与椎动脉等毗邻结构的位置关系(图 2i)。再次对所有标本行 CT 检查,判断螺钉与髁导静脉管、舌下神经管和寰枕关节面等结构的位置关系。

2 结果

2.1 枕骨髁螺钉的相关解剖学参数

40 个枕骨髁的大体分型结果为,卵圆形 29 个,“8”字形 4 个,肾形 5 个,三角形 2 个。33 个枕骨髁窝内可见髁导静脉管开口,其中 12 例为双侧开口,其余 19 例均单独位于右侧髁窝内。40 个枕骨髁头腹侧均可见舌下神经管开口。基于 Mimics

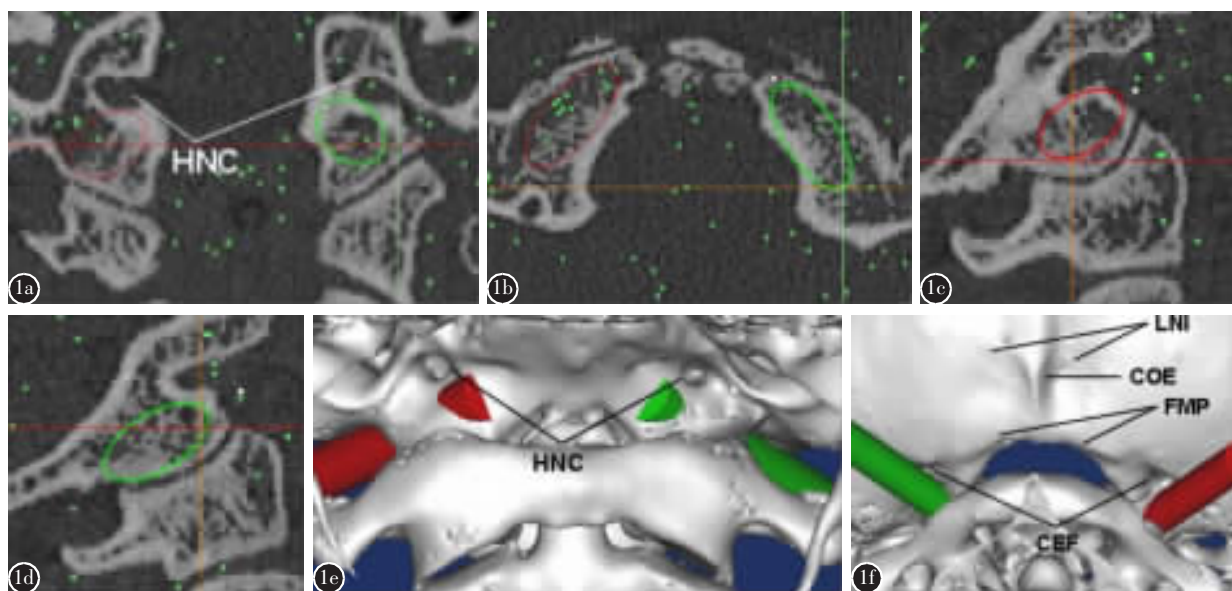


图 1 虚拟置钉及理想钉道相关解剖参数的测量 a~d 通过冠状位、轴位和矢状位图像调整虚拟螺钉的位置,避免侵犯舌下神经管、髁导静脉孔和寰枕关节面 e、f 基于三维重建图像对进钉点与寰枕关节面的垂直距离、螺钉的轴位内倾角和矢状位倾角分别进行测量(HNC,舌下神经管;LNI,下项线;COE,枕外棘;FMP,枕骨大孔后缘;CEF,髁导静脉孔)

Figure 1 Virtual screw placement and evaluation of anatomic structures related to optimal screw trajectory a~d Obtain optimal trajectory for the occipital condylar screw by adjustment of the virtual screw path based on coronal, axial and sagittal CT images e, f The definition of parameters related to screw placement based on 3d-reconstruction images(HNC, hypoglossal nerve canal; LNI, linea nuchae inferior; COE, crista occipitalis externa; FMP, foramen magnum posterior; CEF, condylar emissary foramen)

软件对枕骨髁置钉参数的测量结果显示,40 枚螺钉的轴位内倾角为 $30.2^{\circ} \pm 6.3^{\circ}$,矢状位倾角为 $8.1^{\circ} \pm 2.6^{\circ}$;进钉点位于枕骨髁背侧冠状面的中垂线上,至寰枕关节面的垂直距离为 $3.69 \pm 0.42 \text{ mm}$ 。

2.2 导航模板辅助枕骨髁置钉的验证与评估

经 CT 检查确认 20 具尸体标本的双侧枕骨髁均符合研究要求,分别对其进行计算机重建、设计最佳钉道、构建带导向通道的阴模及三维打印成型操作,制作个体化导航模板,并于其辅助下顺利置入双侧枕骨髁螺钉共 40 枚。实际操作中发现导航模板与枕骨骨性结构表面的嵌合度较好,组合后具有较强的稳定性。单手持持下制备钉道时,导

航模板均未发生松动或移位。置钉的操作耗时为 $60.1 \pm 9.3 \text{ s}$ 。术后对寰枕间隙的解剖观察发现,40 枚螺钉均未对椎动脉的走行造成影响,但其中 32 枚螺钉尾端与椎动脉存在紧密接触(图 2i)。CT 检查提示 40 枚螺钉均完全位于枕骨髁内,无一枚侵犯舌下神经管、髁导静脉管或寰枕关节面(图 3)。

3 讨论

3.1 制作枕骨髁螺钉导航模板的临床意义

La Marca 等^[7]和 Uribe 等^[13]的团队分别于 2008 年先后报道了应用枕骨髁螺钉替代枕骨板固定的新技术。尽管初步结果令人满意,但研究人

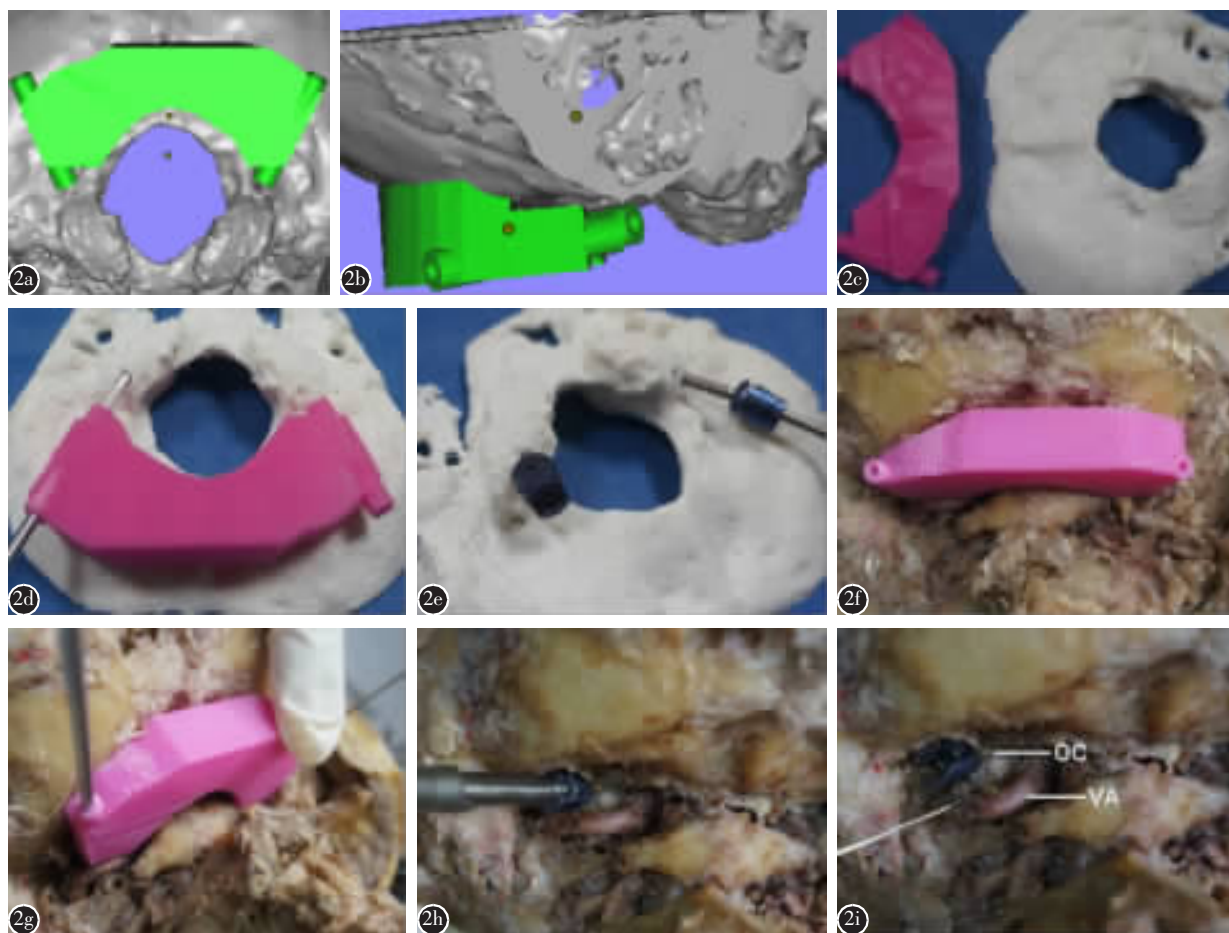


图 2 个体化枕骨髁螺钉导航模板的制备及可靠性验证 a~c 设计并三维打印成型个体化导航模板 d、e 在枕骨髁三维模型上测试导航模板 f~h 导航模板辅助下于尸体标本置入双侧枕骨髁螺钉 i 观察枕骨髁螺钉与其周围血管神经等组织结构的位置关系(OC,枕骨髁;VA,椎动脉)

Figure 2 The preparation and validation of individualized occipital condyle screw navigation templates a~c Design and generate the individualized navigation template by using a three-dimensional printing technique d, e Testify the navigation template on 3D-models of the occipital condyle f~h The placement of bilateral occipital condyle screws on cadaveric specimens assisted by navigation templates i The placement of bilateral occipital condyle screws on cadaveric specimens assisted by navigation templates(OC, occipital condyle; VA, vertebral artery)

员仍谨慎指出,在该技术应用于临床之前,仍需对相关解剖及生物力学性能进行深入研究。为此, Frankel 等^[14]基于尸体标本对枕骨髁置钉开展了影像及应用解剖研究,结果提示枕骨髁所毗邻的重要结构包括其头侧的舌下神经管、尾侧的寰枕关节面以及背侧头端的髁导静脉管和尾端的椎动脉,而枕骨髁的形态及上述毗邻结构也均存在较大个体变异。为优化置钉参数, Lee 等^[12]分析了 157 例患者的三维 CT 图像,提出最佳钉道的轴位内倾角为 $42^{\circ}\sim 43^{\circ}$,矢状位上螺钉头端应指向枕骨大孔前缘最低点,进钉点位于枕骨大孔和枕骨髁交界处水平面与枕骨髁背侧面中垂线交点的偏外 3mm 处。本研究对 40 个枕骨髁标本解剖参数的测量结果提示,枕骨髁形态、髁导静脉管孔和舌下神经管的变异较大,与以往文献^[14-16]报道基本一致。因此,笔者认为,在枕骨髁置钉操作前,应仔细对患者的影像学检查结果进行评估,根据影像资料个体化制定进钉点、螺钉内倾角和头倾角等参数,不盲目照搬文献数据,才能最大限度避免螺钉相关并发症的发生。此外,针对枕骨髁螺钉生物力学性能的研究结果证实,枕骨髁螺钉的固定效

果基本与经寰枕关节螺钉和枕骨板固定技术相当,而其置钉过程对患者体位和颅端骨质结构的要求则相对较低^[17,18],是一种枕颈固定术中可供备选的可靠技术。

基于上述研究结果,枕骨髁螺钉技术在 2010 年首次用于临床,截至目前已有 11 例临床病例报道^[19-21]。然而由于大部分骨科医师对枕骨髁周围复杂的解剖结构相对陌生,使用传统的徒手置钉法失败率较高,因而大部分学者对该技术的临床应用仍持观望态度。为此, Le 等^[19]和 Kosnik-Infinger 等^[20]的团队先后将术中三维影像导航系统用于辅助置钉,以提高置钉的准确性。但由于多维影像导航技术仍较大程度上依赖于术者经验,且术中定位标记步骤繁琐,螺钉准确性容易受术中患者体位变化影响,导航设备的购置和维护费用昂贵,难以普及推广。因此,为了突破枕骨髁螺钉技术临床应用的瓶颈,亟须探索一种实用性强、操作便捷以及费用低廉的辅助置钉方法。

3.2 三维打印技术辅助枕骨髁置钉的可行性

随着近年来数字骨科的快速发展,已有研究者将快速成型技术用于辅助颈椎椎弓根或椎板的

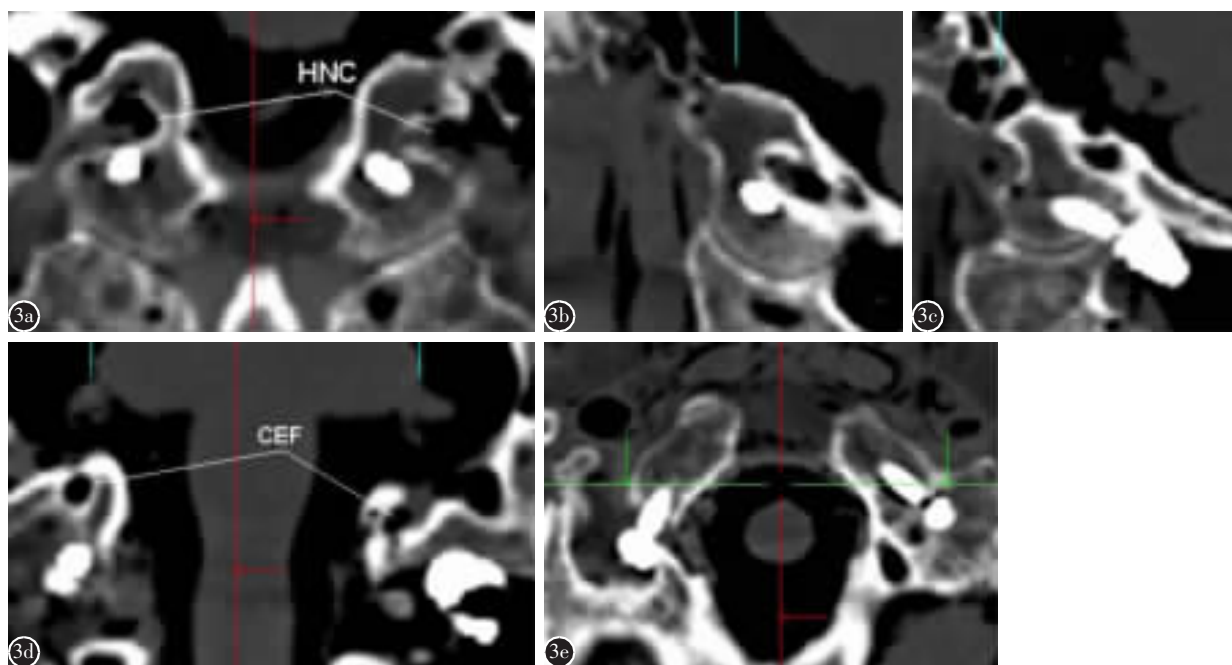


图 3 基于 CT 扫描图像对置钉准确性进行评估 a~d CT 冠状位和矢状位像提示枕骨髁螺钉未侵犯舌下神经管、髁导静脉管孔及寰枕关节面 e CT 轴位像提示双侧枕骨髁螺钉均完全位于枕骨髁内 (HNC, 舌下神经管; CEF, 髁导静脉孔)

Figure 3 The evaluation of accuracy of bilateral occipital condyle screws based on CT images a,d Coronal and sagittal CT images showed that no screw violated the HNC, CEF or occipitoaxial joint; e Axial CT images indicated that all screws were completely contained within the condyle (HNC, hypoglossal nerve canal; CEF, condylar emissary foramen)

置钉操作,并证实该技术能够有效保障螺钉的精确置入^[9]。快速成型技术主要基于逆向工程原理,利用实物原型的电子数据,经计算机重建后,使用快速成型设备,将材料逐层精确堆积,重现实物原型。三维打印技术是目前发展最为成熟,也最具前景的快速成型工艺。根据工程和材料学原理的不同,三维打印技术又可进一步分为光固化成型和熔融沉积快速成型(fused deposition modeling, FDM)等种类。Lu 等^[9]将患者的颈椎 CT 扫描数据导入 Mimics 软件,在计算机中重建颈椎三维模型,在 UG Imageware 等软件的配合下,对颈椎三维模型进行虚拟置钉,再设计出能与椎体后部结构嵌合锚定的反向模板,并在模板上建立与虚拟钉道一致的导向通道,最后利用光固化成型技术三维打印机,以工业用光敏树脂制作出个体化导向模板。随后基于尸体标本和临床病例的实验结果验证了导向模板辅助置钉准确性。然而,后续研究发现该方法尚存在部分缺陷^[10]。首先,在模板的设计过程中,操作者除应具备脊柱外科专业知识,还必须熟练掌握多个专业软件,导致该方法的学习曲线较长;而在不同软件间进行档案格式转化,将不可避免造成部分数据丢失,影响成品对实物原型的还原度。其次,在模板的制作过程中,所采用的光固化成型技术主要通过激光或紫外光逐层照射液化状态的光敏树脂使其固化。该过程对设备及工作环境要求高,液态树脂本身易浓缩而不利于成型,其固化过程中又极易收缩而翘曲变形,难以保证成品质量;整个设计和成型过程通常需要 2~3d,无法满足紧急手术的需要;现有的光固化成型设备仍较为昂贵,短期内无法推广普及。最后,在模板的使用过程中,由于光敏树脂具有一定的生物毒性,而术中使用又难免产生碎屑,留存患者体内存在安全隐患。

通过借鉴利用光固化成型技术制作颈椎螺钉导向模板的成功经验,本研究拟对该方法进行改良,设计并制作个体化导航模板,并应用于枕骨髁螺钉技术。具体可概括为:①对模板的设计过程进行改良,利用 Mimics 软件的强大功能,完成虚拟钉道建立及锚定反向模板制作的全过程,直接输出进行三维打印成型,不再需要依赖 UG Imageware 等软件的配合操作。②对模板的制作过程进行改良,不再使用光固化成型设备,改用基于 FDM 技术的桌面打印机,以医用聚乳酸为材料对

模型三维成型。初步研究结果表明,基于 Mimics 软件所建立的枕骨髁三维模型,术者能够在准确评估枕骨髁相关解剖结构的基础上,确定置钉参数,完成个体化置钉导航模板的制作,并将其用于辅助置钉,实现了对所有标本螺钉的精确置入。

3.3 枕骨髁螺钉个体化导航模板的优势与不足

经过改良,本研究方法相比现有的辅助置钉导向模板技术,有一定的优势。首先,在设计模板时,最大程度减少了因多种软件交替操作所导致的数据丢失,打印出的模型还原度更高;模板设计过程所使用的 Mimics 医用软件在日常教学和研究中已得到广泛应用,易于掌握,便于普及。其次,在制作模板时,采用了目前在三维打印领域应用更为广泛的 FDM 技术。该技术可直接将融化后的材料逐层喷打、堆积成型,无需使用激光或紫外光,因而对材料的物理特性要求不高;后处理简单,成型后直接剥离支撑物即可获得实物原型,明显缩短了模板的制作时间(从获得 CT 图像到打印成型仅需约 4h),使导航模板用于紧急手术成为可能;同时,使用基于 FDM 技术的桌面三维打印机,显著降低了成本(每个模板制作仅需约 30 元),术者无需具备相关工程学或材料学的专业知识。最后,在使用模板时,医用可降解聚乳酸作为打印材料,经低温环氧乙烷灭菌后即可于术中使用,提高了临床应用的便携性及生物安全性。此外,与以往研究所采用的徒手或术中多维影像导航辅助枕骨髁置钉技术相比较,本方法在保证置钉精确性的同时,简化了手术操作,减少了术中透视次数,降低了患者的医疗费用负担。

我们在实际操作过程中体会到,影响导航模板精度的最主要因素主要包括建模数据的准确性、打印工艺的可靠性以及嵌合骨质的稳定性。因此,需要进一步对上述三方面重点开展研究和改进。首先,由于 CT 影像数据是模板设计制作的基础,相关检查所导致的辐射危害现阶段仍无法避免,可进一步探索基于 MRI 影像制作导航模板的可行性,但需要提高 MRI 的分辨率以保证模板的制作精度。其次,导航模板成型后导向通道无法改动,一旦因制作过程中数据丢失或材料形变导致误差,难以进行修正;因而针对每个病例可打印 2~3 个导航模板以作备用。在下一步研究中,课题组也将尝试单独设计并制作用于锚定的反向模板,基于打印成型后的实物模型,在反向模板上人

工制备枕骨髁钉道,徒手建立个体化导航模板,以避免打印成型误差的相关问题。最后,导航模板的固定主要依靠与枕外棘两侧下项线至大孔后缘的凹陷性骨面进行锚定,实际操作中需要完整剥离该部位附着的软组织,且对骨质的完整性要求较高,因而目前尚不能用于枕骨后部骨性缺损的病例,需要进一步研究并设计更为合适的模板锚定点。

总之,本研究基于改良三维打印技术成功制备了枕骨髁螺钉导航模板。经尸体标本验证,个体化导航模板可有效避免解剖变异对置钉操作的影响,辅助术者准确置入枕骨髁螺钉。通过进一步临床应用的检验,有望为提高枕骨髁螺钉技术的精确性和安全性,提供一种可供选择的新方法。

4 参考文献

- Kalani MA, Ratliff JK. Considering the diagnosis of occipitocervical dissociation[J]. Spine J, 2013, 13(5): 520-522.
- Theodore N, Kalani MY, Sonntag VK. Occipitocervical fusion [J]. J Neurosurg Pediatr, 2013, 12(5): 532-533.
- Ahmed R, Menezes AH. Management of operative complications related to occipitocervical instrumentation [J]. Neurosurgery, 2013, 72(2): 214-228.
- Cai X, Yu Y, Liu Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of occipitocervical fixation using an anterior occiput-to-axis locking plate system: a pilot study[J]. Spine J, 2013. [Epub ahead of print].
- Lee KM, Yeom JS, Lee JO, et al. Optimal trajectory for the atlantooccipital transarticular screw[J]. Spine, 2010, 35(16): 1562-1570.
- Jeszczynski D, Fekete TF, Lattig F, et al. Intraarticular atlantooccipital fusion for the treatment of traumatic occipitocervical dislocation in a child: a new technique for selective stabilization with nine years follow-up[J]. Spine, 2010, 35(10): E421-E426.
- La Marca F, Zubay G, Morrison T, et al. Cadaveric study for placement of occipital condyle screws: technique and effects on surrounding anatomic structures [J]. J Neurosurg Spine, 2008, 9(4): 347-353.
- Le TV, Dakwar E, Hann S, et al. Computed tomography-based morphometric analysis of the human occipital condyle for occipital condyle-cervical fusion [J]. J Neurosurg Spine, 2011, 15(3): 328-331.
- Lu S, Xu YQ, Chen GP, et al. Efficacy and accuracy of a novel rapid prototyping drill template for cervical pedicle screw placement [J]. Comput Aided Surg, 2011, 16 (5): 240-248.
- Hu Y, Yuan ZS, Spiker WR, et al. Deviation analysis of C2 translaminar screw placement assisted by a novel rapid prototyping drill template: a cadaveric study [J]. Eur Spine J, 2013, 22(12): 2770-2776.
- Ozer MA, Celik S, Govsa F, et al. Anatomical determination of a safe entry point for occipital condyle screw using three-dimensional landmarks[J]. Eur Spine J, 2011, 20(9): 1510-1517.
- Lee JO, Buchowski JM, Lee KM, et al. Optimal trajectory for the occipital condylar screw [J]. Spine, 2012, 37 (5): 385-392.
- Uribe JS, Ramos E, Vale F. Feasibility of occipital condyle screw placement for occipitocervical fixation: a cadaveric study and description of a novel technique[J]. J Spinal Disord Tech, 2008, 21(8): 540-546.
- Frankel BM, Hanley M, Vandergrift A, et al. Posterior occipitocervical (C0-3) fusion using polyaxial occipital condyle to cervical spine screw and rod fixation: a radiographic and cadaveric analysis [J]. J Neurosurg Spine, 2010, 12 (5): 509-516.
- San Millán Rufz D, Gailloud P, Rüfenacht DA, et al. The craniocervical venous system in relation to cerebral venous drainage[J]. Am J Neuroradiol, 2002, 23(9): 1500-1508.
- Bulsara KR, Asaoka K, Aliabadi H, et al. Morphometric three-dimensional computed tomography anatomy of the hypoglossal canal[J]. Neurosurg Rev, 2008, 31(3): 299-302.
- Uribe JS, Ramos E, Youssef AS, et al. Craniocervical fixation with occipital condyle screws: biomechanical analysis of a novel technique[J]. Spine, 2010, 35(9): 931-938.
- Takigawa T, Simon P, Espinoza Orías AA, et al. Biomechanical comparison of occiput-C1-C2 fixation techniques: C0-C1 transarticular screw and direct occiput condyle screw [J]. Spine, 2012, 37(12): E696-E701.
- Le TV, Burkett C, Ramos E, et al. Occipital condyle screw placement and occipitocervical instrumentation using three-dimensional image-guided navigation [J]. J Clin Neurosci, 2012, 19(5): 757-760.
- Kosnik-Infinger L, Glazier SS, Frankel BM. Occipital condyle to cervical spine fixation in the pediatric population [J]. J Neurosurg Pediatr, 2014, 13(1): 45-53.
- Bekelis K, Duhaime AC, Missios S, et al. Placement of occipital condyle screws for occipitocervical fixation in a pediatric patient with occipitocervical instability after decompression for Chiari malformation[J]. J Neurosurg Pediatr, 2010, 6 (2): 171-176.

(收稿日期:2014-02-28 修回日期:2014-04-02)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 彭向峰)