

## 成人桡骨近端形态学对称性的三维偏差分析

孔勇杰<sup>1,2,3</sup>, 黄涛<sup>2</sup>, 王勉<sup>2</sup>, 谭晋川<sup>2</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 黄文华<sup>2</sup>

1. 广州中医药大学, 广东 广州 510006; 2. 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, 广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515; 3. 广州市番禺区中医院骨科四区, 广东 广州 511400

**【摘要】目的:**利用测量三维形态的方法量化验证成人双侧近端桡骨的解剖形态学对称性。**方法:**提取15名正常志愿者的CT平扫来三维重建桡骨近端的解剖结构,并且测量两侧桡骨模型的表面积和体积;然后使用三维偏差分析法可视化和定量地分析两侧桡骨近端模型的解剖对称性。**结果:**两侧桡骨近端体积的平均百分比差异为 $4.43\% \pm 3.90\%$  ( $P=0.595$ ),表面积的平均百分比差异为 $2.79\% \pm 2.41\%$  ( $P=0.321$ )。偏差结果中,最大负偏差的均值 $\pm$ 标准差为 $(-1.14 \pm 0.41)$  mm,最大正偏差的均值 $\pm$ 标准差为 $(1.00 \pm 0.37)$  mm;桡骨近端的非关节面部分是主要的偏差分布区域。**结论:**成人双侧桡骨近端具有满足临床需求的解剖对称性,这为采用健侧桡骨近端形态指导解剖重建治疗桡骨近端骨折提供了可靠依据。在涉及桡骨近端关节面重建的复杂骨折治疗,开展计算机辅助与三维打印技术结合的术前规划将有效增加患者的获益。

**【关键词】**桡骨近端; 三维偏差分析; 解剖学; 形态学

**【中图分类号】**R318;R319

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)09-1124-06

## An anatomical symmetry study of proximal radii in adults using three-dimensional deviation analysis

KONG Yongjie<sup>1,2,3</sup>, HUANG Tao<sup>2</sup>, WANG Mian<sup>2</sup>, TAN Jinchuan<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, HUANG Wenhua<sup>2</sup>

1. Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Engineering Research Center for Translation of Medical 3D Printing Application, Guangdong Provincial Key Laboratory of Medical Biomechanics, National Key Discipline of Human Anatomy, School of Basic Medical Science, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 3. The Fourth District of Orthopedics, Panyu Hospital of Chinese Medicine, Guangzhou 511400, China

**Abstract: Objective** To quantitatively analyze the anatomical symmetry of bilateral proximal radii in adults based on three-dimensional morphological measurement. **Methods** The anatomical data of the left and right proximal radii for three-dimensional reconstruction were extracted from computed tomography scans of 15 normal individuals. After that both bone volume and surface area of the left and right proximal radii models were measured, the anatomical symmetry between the right and left proximal radii were quantified and visualized using three-dimensional deviation analysis. **Results** The mean percentage difference in bone volume between the left and right proximal radii was  $4.43\% \pm 3.90\%$  ( $P=0.595$ ), and that in surface area was  $2.79\% \pm 2.41\%$  ( $P=0.321$ ). The results of the three-dimensional deviation analysis showed that the mean $\pm$ standard deviation of the maximal negative deviation was  $(-1.14 \pm 0.41)$  mm, while that of the maximal positive deviation was  $(1.00 \pm 0.37)$  mm. Moreover, the relatively high deviations were mainly distributed in those regions which were away from the joint facets. **Conclusion** The bilateral proximal radii in adults show an excellent anatomical symmetry, which satisfies the clinical requirements and provides a reliable basis for proximal radial fracture reduction guided by the morphological model of the contralateral proximal radius. In the treatment of complex fractures involving the articular surface of proximal radii, the preoperative planning that combines computer-aided and three-dimensional printing technologies will effectively increase the benefits for the patients.

**Keywords:** proximal radius; three-dimensional deviation analysis; anatomy; morphology

**【收稿日期】**2020-03-20

**【基金项目】**国家重点研发计划(2017YFC1103400);广东省自然科学基金面上项目(2020A151501998);广东省科技计划(2016B090917001, 2017B090912006);深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队(SZSM201612019);佛山市深入推进创新驱动动力工程(2019012)

**【作者简介】**孔勇杰, 硕士研究生, 研究方向: 中医药治疗骨关节疾病、数字医学、3D打印, E-mail: 512234271@qq.com

**【通信作者】**黄文华, 教授, 研究方向: 数字医学、临床应用解剖、医用生物力学、医学3D打印, E-mail: 13822232749@139.com

## 前言

在成年人口中,桡骨近端骨折约占肘部骨折的三分之一<sup>[1]</sup>。虽然对于简单的桡骨近端骨折,可以采用保守治疗或内固定治疗,但复杂的桡骨近端骨折的治疗仍然是骨科医生的一大挑战<sup>[2]</sup>。如果桡骨近端损伤的治疗方法不合适,并且不能恢复肱桡关节的对准,尤其是桡骨头不全,则关节不稳定、术后疼痛、关节活动范围减少、创伤后关节炎和关节软骨侵蚀等并发症和(或)后遗症的出现将难以避免。在大多数情况下,新式的植入物和改良的外科手术技术已使近端桡骨头半径的恢复和切开复位成为可能。但是,在高度粉碎或有骨丢失的开放性骨折的情况下,确定正常的骨几何形状具有较高的挑战性。使用健侧肢体的二维透视对照方法来引导患侧骨折的复位和固定是临床上常用的方法。但是,二维X光透视所得到的健侧桡骨信息仅能提供单平面二维的空间信息,无法完整地反应桡骨近端关节面复杂的三维曲率形态;另一方面,国内外尚无成人桡骨解剖学研究给出较为明确的结论以证实其双侧的解剖对称性<sup>[3-4]</sup>。所以,明确桡骨近端的左右两侧具有形态学上的对称性有利于桡骨近端关节内骨折的解剖重建和功能恢复。在此基础上,使用健侧桡骨三维重建可指导患侧桡骨近端关节内骨折的修复,有助于修复近端关节面原有的曲率形态,恢复桡骨头形态以及桡骨近端轴向对线,并改进近端复杂桡骨骨折的诊断和手术治疗。

计算机技术和医学成像技术的发展以及医学和工程技术的强大结合为人体解剖学研究提供了丰富的技术手段,目前已有许多学者进行了二维和三维骨几何学研究。Depecker等<sup>[5]</sup>开展了相关二维/三维配准研究,并在此基础上进行了骨骼形态学的测量。这些研究依赖于标记物配准,而且未能捕获骨骼结构的整体三维几何形状,从而造成骨骼整体三维结构信息丢失<sup>[6]</sup>。为解决上述问题,工程领域中基于三维偏差分析的方法逐渐被引入到医学形态学研究领域<sup>[7-9]</sup>。此外,得益于三维重建技术和数字医学技术的结合,目前三维打印术前规划在创伤骨科领域得到了广泛的应用。临床上,术前健侧骨骼形态的镜像模型通常被认为是一种理想的参考对象。但涉及关节面的关节内骨折属于较为特殊的损伤类型,对关节面的精准重建有着极高的要求,这一技术理念尚需双侧肢体解剖学对称性的确切证据支持。本研究旨在是评估桡骨近端的解剖对称性,为使用健康侧的桡骨形态引导解剖重建患侧桡骨近端骨折建立理论支撑,从而提升修复桡骨近端关节内骨折治疗水平。

## 1 材料与方法

## 1.1 双侧桡骨近端模型的三维重建和配准

本研究共纳入15名正常志愿者,其中女性4名,男性11名,平均年龄22.8岁,年龄为18~35岁。原始数据来自于0.625 mm层厚的CT平扫(64排螺旋CT, Siemens);扫描时均采用仰卧位,提取每位志愿者521张连续横断面的影像数据,像素为512×512,然后将影像数据以DICOM标准格式保存并导入软件Mimics 14.0(Materialise公司,比利时),提取并分割桡骨外轮廓的图像信息,计算蒙板,得到桡骨模型。对包含桡骨皮质骨信息的STL文件进行下一步处理,在Geomagic Studio 2012(Geomagic公司,美国)中完成桡骨外轮廓三角面片去噪、去特征等数据处理后,对双侧桡骨进行裁剪,得到近端1/3模型用于对比分析。将志愿者身体矢状面设置为参考平面,以此平面镜像处理左侧近端桡骨,获取新的镜像模型。配准是将镜像模型与右侧对照模型作最佳拟合对齐方法的匹配,并使用Geomagic Qualify 2012(Geomagic公司,美国)对配准后的一对模型实施三维偏差分析。具体实施流程图如图1所示。

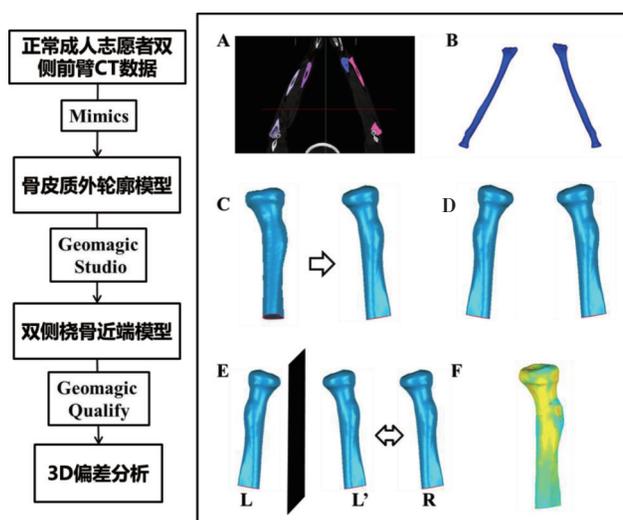


图1 建模分析方法流程图

Fig.1 Flowcharts of modeling and analysis

A: 图像分割; B: 三维重建; C: 模型表面处理; D: 双侧桡骨近端截骨; E: 镜像重建与配准; F: 3D偏差分析

## 1.2 双侧桡骨近端几何模型的三维偏差分析

在Geomagic Qualify软件中,以右侧桡骨近端模型为参考对象,并将原左侧桡骨的矢状面镜像模型作为测试对象,以此进行双侧桡骨近端模型的三维偏差分析,所得的几何偏差量化分析结果反映了测试对象(左侧桡骨近端镜像模型)偏离参考对象(右侧桡骨近端)的程度<sup>[10]</sup>。使用Geomagic Qualify软件

的三维偏差分析功能得到3个参数为主的结果。(1) 双侧桡骨近端模型整体的表面积(Surface Area, SA)和体积(Bone Volume, BV):使用具有计算三维参数的软件Geomagic Quality分别获得左右两侧近端1/3桡骨模型的SA和BV;(2)负偏差和正偏差(极值、均值、均方根值):负偏差是通过对比左侧桡骨近端的镜像模型与对照的右侧桡骨近端向内偏差的距离,正偏差则为向外偏差距离;(3)双侧桡骨近端的三维偏差色谱分布图:设置对应的等值色谱区间得到偏差色谱分布图,用于评价双侧桡骨近端的三维偏差。

### 1.3 统计学分析

使用美国IBM公司的SPSS Statistics 20.0软件进行统计学分析,并选用配对*t*检验来比较左右两侧桡骨近端的SA和BV是否有差异,选取检验水准双侧

$\alpha=0.05, P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

本研究中所得到的15对桡骨近端三维模型的SA和BV的差别如表1所示。其中,桡骨近端模型右侧平均BV为(16 396.22±3 063.21) mm<sup>3</sup>,左侧平均BV为(16 235.45±3 169.06) mm<sup>3</sup>,一组桡骨近端模型的平均BV百分比差异为4.43%±3.90%,最大值为19.82%;右侧桡骨近端模型平均SA为(4 643.02±545.61) mm<sup>2</sup>,左侧平均SA为(4 596.45±586.63) mm<sup>2</sup>,单个志愿者左右两侧桡骨之间的平均SA百分比差异为2.79%±2.41%,最大值为9.69%。双侧桡骨的BV( $P=0.595$ )和SA( $P=0.321$ )比较均无显著性差异。

表1 双侧桡骨近端的BV和SA对比

Tab.1 Comparison of bone volume and surface area between left and right proximal radii

受试者	性别	BV(左)/mm <sup>3</sup>	BV(右)/mm <sup>3</sup>	BV百分比差异/%	SA(左)/mm <sup>2</sup>	SA(右)/mm <sup>2</sup>	SA百分比差异/%
S1	女	11 586.90	11 352.78	2.06	3 738.28	3 703.26	0.95
S2	男	16 575.91	16 790.25	1.28	4 772.22	4 829.11	1.18
S3	男	20 777.55	17 341.36	19.82	5 525.98	5 037.89	9.69
S4	男	19 186.75	19 601.73	2.12	5 156.64	5 208.68	1.00
S5	男	17 433.47	17 318.02	0.67	4 785.57	4 743.66	0.88
S6	女	12 051.82	12 753.26	5.50	3 797.42	3 965.86	4.25
S7	男	12 816.56	13 061.09	1.87	4 039.70	4 109.69	1.70
S8	男	17 256.88	17 498.98	1.38	4 866.17	4 928.09	1.26
S9	男	17 499.41	16 970.26	3.12	4 884.01	4 815.03	1.43
S10	女	11 661.92	12 868.07	9.37	3 698.08	3 908.13	5.37
S11	男	14 901.20	15 363.59	3.01	4 363.28	4 461.14	2.19
S12	男	21 342.88	23 187.18	7.95	5 395.60	5 686.57	5.12
S13	女	14 961.41	15 524.95	3.63	4 303.79	4 419.14	2.61
S14	男	16 922.05	17 370.93	2.58	4 642.51	4 755.69	2.38
S15	男	18 556.98	18 940.83	2.03	4 977.56	5 073.30	1.89
均值	/	16 235.45	16 396.22	4.43	4 596.45	4 643.02	2.79
标准差	/	3 169.06	3 063.21	3.90	586.63	545.61	2.41

本研究中所得到的15对桡骨近端三维模型的负偏差和正偏差如表2所示。所有桡骨近端模型的平均负偏差为(-0.32±0.22) mm,最大负偏差的均值±标准差为(-1.14±0.41) mm;平均正偏差为(0.29±0.22) mm,最大正偏差的均值±标准差为(1.00±0.37) mm;两侧差别的最大均方根值为0.81。表3的结果显示了三维偏差区间分布频率,所有志愿者的双侧桡骨近端的三维偏差

结果主要在占97.43%的0.0~1.0 mm区间内;此外,偏差区间在1.0~2.0 mm内的分布频率为4.24%;偏差区间在大于2.0 mm内的分布频率仅为0.02%。

图2是使用预先定义的色谱区间来显示左右两侧桡骨近端肘腕关节面的偏差分析结果。低偏差分布是每组桡骨近端模型肘腕关节面的主要特点,并且在关节面区域内都未出现大于1.5 mm或小于-1.5 mm

表2 双侧桡骨近端的正负偏差对比

Tab.2 Comparison of positive and negative deviations between left and right proximal radii

受试者	最大偏差(+)/mm	最大偏差(-)/mm	平均偏差(+)/mm	平均偏差(-)/mm	最大均方根值
S1	0.22	-0.15	0.83	-1.08	0.24
S2	1.17	-0.87	0.15	-0.20	0.22
S3	1.63	-1.45	0.78	-0.29	0.81
S4	0.88	-1.14	0.25	-0.28	0.34
S5	1.16	-0.69	0.23	-0.16	0.26
S6	0.50	-1.13	0.11	-0.28	0.33
S7	1.08	-0.97	0.22	-0.20	0.27
S8	1.04	-0.97	0.25	-0.25	0.31
S9	1.35	-1.01	0.33	-0.26	0.38
S10	0.54	-1.19	0.12	-0.37	0.40
S11	0.97	-1.22	0.16	-0.23	0.27
S12	0.77	-1.78	0.21	-0.40	0.46
S13	1.12	-1.40	0.34	-0.34	0.44
S14	1.47	-1.67	0.15	-0.24	0.32
S15	1.06	-1.47	0.27	-0.30	0.38
均值	1.00	-1.14	0.29	-0.32	0.36
标准差	0.37	0.41	0.22	0.22	0.14

表3 双侧桡骨近端三维偏差的区间分布频率

Tab.3 Frequency distribution of the three-dimensional deviations between left and right proximal radii (%)

受试者	0.0~0.5 mm	0.5~1.0 mm	1.0~1.5 mm	1.5~2.0 mm	大于2.0 mm
S1	95.10	4.86	0.04	0.00	0.00
S2	97.20	2.73	0.07	0.00	0.00
S3	22.78	54.81	21.97	0.33	0.00
S4	85.48	14.16	0.37	0.00	0.00
S5	94.40	5.41	0.18	0.00	0.00
S6	89.46	7.18	3.36	0.00	0.00
S7	93.86	6.01	0.13	0.00	0.00
S8	90.05	9.82	0.13	0.00	0.00
S9	79.44	20.29	0.28	0.00	0.00
S10	76.80	22.78	0.42	0.00	0.00
S11	92.86	6.99	0.16	0.00	0.00
S12	71.68	26.14	25.50	1.87	0.32
S13	76.15	22.09	1.76	0.00	0.00
S14	92.79	2.88	4.24	0.10	0.00
S15	86.69	10.58	2.73	0.00	0.00
均值	82.98	14.45	4.09	0.15	0.02
标准差	18.42	13.60	8.12	0.48	0.08

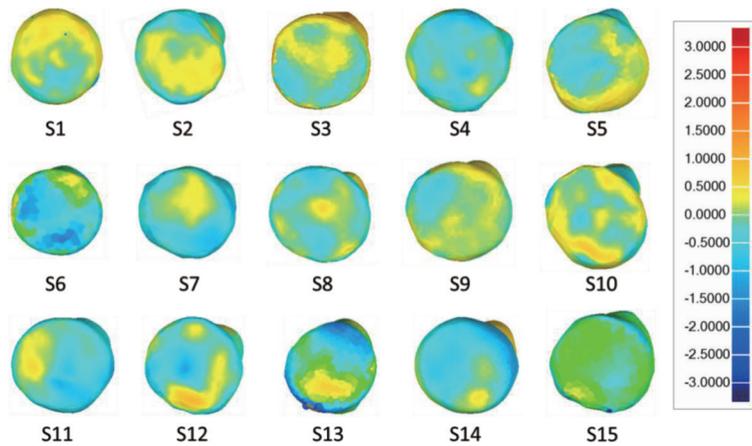


图2 双侧肱桡关节面的三维偏差色谱图(mm)

Fig.2 Three-dimensional deviation color maps of the bilateral humeroradial facets (mm)

的偏差分布。此外,图3的偏差分布图展示了双侧近端桡尺关节面的差异。低偏差分布也是每组桡骨近端模型桡尺关节面的主要特点,并且关节面区域也未出现大于1.5 mm或小于-1.5 mm的偏差分布。上

述分析表明,桡骨近端左右侧关节面的形态曲率表现出贴合的解剖对称性,相对较大偏差区域均在双侧桡骨近端之间的非关节面部分。

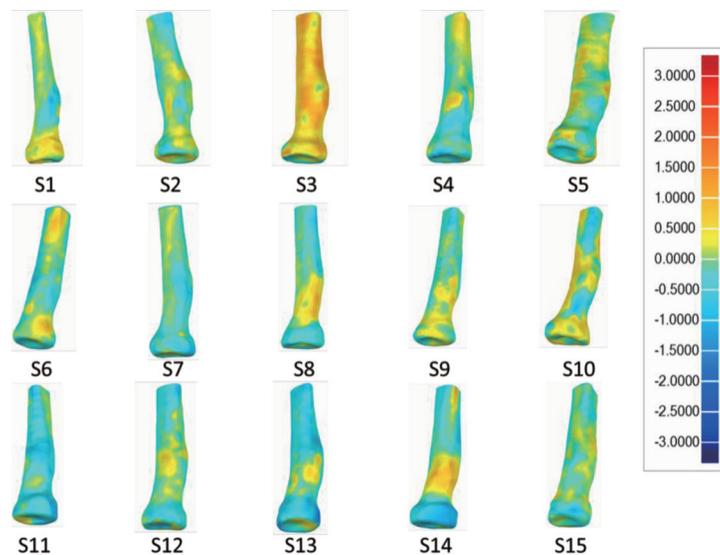


图3 双侧桡尺近侧关节面的三维偏差色谱结果图(mm)

Fig.3 Three-dimensional deviation color maps of the bilateral proximal radioulnar facets (mm)

### 3 讨论

作为临床上主要出现的骨折类型,桡骨近端骨折有超过30%存在累及肱桡关节。在高度粉碎或有骨丢失的开放性骨折的情况下,确定正常的骨几何形状变得更具挑战性,不当的治疗方式会导致肘关节出现严重的并发症和功能障碍<sup>[11]</sup>。有文献报道,相较于桡骨头切除,对桡骨头粉碎性骨折进行切开复位内固定治疗能获得更满意的稳定性和更好的功能预后<sup>[12]</sup>。对桡骨近端关节面进行精准复位重建是目前创伤骨科极具价值又亟待解决的问题。在骨科手术中,常常使用健侧肢体作为参照模板,但是二维X光透视所得到

的健侧信息仅能提供单平面二维的空间信息,无法给术者提供满意的形态学信息<sup>[13-14]</sup>。随着结果三维打印技术精度和医学影像数据获取精度的不断提高,使得获得高精度的同比例的三维模型成为了可能,从而获得病理状态下的医学模型,以辅助修复重建复杂的骨折手术,这初步反映了三维打印辅助术前规划的优点<sup>[15-16]</sup>。然而,当该技术方案应用于桡骨近端骨折的诊断和治疗时,尤其涉及关节面重建时,准确性要求较高,健侧桡骨近端的镜面形态是否可作为患侧关节面的参考模板是最需要明确的问题。因此,本研究对成人双侧桡骨近端薄层CT图像进行重建和测量,使用三维偏差分析技术评价双侧桡骨解剖对称性,旨在为计算机

辅助精确复位和重建桡骨近端骨折提供可靠的解剖学数据支撑。

本研究三维重建了15对成人桡骨近端,对重建后的模型进行解剖测量,最后采用三维偏差分析模型进行分析。分别对志愿者两侧桡骨近端1/3部分的两个解剖测量参数进行统计学分析,差异均没有统计学差异。实验中左右两侧桡骨SA和BV的平均百分比差别也较小,因此推测成人双侧桡骨近端的形状具有较高的解剖对称性。此外,还使用三维偏差分析的方法量化并比较了两侧桡骨近端的整体几何信息。相对于参考模型(右侧桡骨近端),镜像模型(左侧桡骨近端)的离散点的主要偏差分布集中在0.0~1.0 mm区间,表明两侧桡骨近端总体偏差较小。本研究综合考虑了正偏差和负偏差两方面因素计算得到的均方根值,数值水平也较低,可直接反映双侧桡骨近端模型之间的绝对偏差相对非常小。另外,本研究的三维偏差分析结果也在一定程度上体现了成人的双侧桡骨近端有着较高的形态学对称性,且一些显著偏差区域其偏差也并未大于2 mm,满足手术修复桡骨近端关节面的骨折。基于此,可推测根据健侧手术修复患侧桡骨近端存在较小的三维偏差,不会显著增加远期创伤性关节炎的风险。

偏差色谱图显示了每一对关节表面的偏差分布特征。在近端肱骨桡骨关节面,其总体偏差基本达到关节修复的精度水平,不超过1.5 mm。在近端肱桡关节面,达到微动水平的形态偏差,主要在1.0 mm内,因此肱桡关节具有较低的失稳风险。另外,在偏差色谱图中可见高偏差区域主要集中在两侧桡骨近端的关节面以外的区域并且其分布面积比例相对较低。因此在骨科手术中,患侧桡骨近端的关节内骨折复位运用健侧镜像模型时,非对称区域不会造成显著影响。

本研究的局限性主要为:纳入的样本量较小,尚不能全面反映人群全年龄段的两侧桡骨近端解剖形态。为进一步完善本研究的解剖学观测结论,未来需要纳入更大的样本、多种的劳动模式、不同优势手和不同职业人群。此外,在三维数据模型的数据处理过程中不可避免地会出现一些主观图像分割、骨灰度阈值的选取以及三维模型表面处理所引起的误差。理论上,本研究的建模误差不会对单个志愿者的双侧桡骨模型造成很大的差异,但在随后的群体亚组分析中,应进一步考虑不同群体的骨骼状况,遵循一致的模型处理程序,以减少实验结果的误差。

本研究结果表明成人双侧桡骨近端具有满足临床需求的解剖对称性。在桡骨近端关节内骨折的治疗中,术者利用该形态学特点可构建出更贴近个人患侧桡骨原有形态结构的有效参照模型,从而提高桡骨近端骨折复位中关节面解剖重建的精准度,对患者术后的功

能恢复具有重要意义。在涉及桡骨近端关节面重建的复杂骨折治疗中,开展计算机辅助与三维打印技术结合运用的术前规划将有效增加患者的获益。

## 【参考文献】

- [1] RIES C, MULLER M, WEGMANN K, et al. Is an extension of the safe zone possible without jeopardizing the proximal radioulnar joint when performing a radial head plate osteosynthesis? [J]. J Shoulder Elbow Surg, 2015, 24(10): 1627-1634.
- [2] MADSEN J E, FLUGSRUD G. Radial head fractures: indications and technique for primary arthroplasty [J]. Eur J Trauma Emerg Surg, 2008, 34(2): 105-112.
- [3] VROEMEN J C, DOBBE J G, JONGES R, et al. Three-dimensional assessment of bilateral symmetry of the radius and ulna for planning corrective surgeries [J]. J Hand Surg, 2012, 37(5): 982-988.
- [4] ROSENBLATT Y, ATHWAL G S, FABER K J. Current recommendations for the treatment of radial head fractures [J]. Orthop Clin North Am, 2008, 39(2): 173-185.
- [5] DEPECKER M, BERGE C, PENIN X, et al. Geometric morphometrics of the shoulder girdle in extant turtles (Chelonii) [J]. J Anat, 2006, 208(1): 35-45.
- [6] ZHANG K Y, WIKTOROWICZ-CONROY A, HUTCHINSON J R, et al. 3D morphometric and posture study of felid scapulae using statistical shape modeling [J]. PLoS One, 2012, 7(4): e34619.
- [7] MANDELLI F, GHERLONE E, GASTALDI G, et al. Evaluation of the accuracy of extraoral laboratory scanners with a single-tooth abutment model: a 3D analysis [J]. J Prosthodont Res, 2016, 61(4): 363-370.
- [8] 周光辉,陈莉,孙英媛,等.基于体素的颅面部锥形束CT三维重叠准确性及可靠性评估[J].中华口腔医学杂志,2016,51(8):475-479.  
ZHOU G H, CHEN L, SUN Y Y, et al. Accuracy and reliability of three-dimensional craniofacial cone-beam CT superimposition method based on voxel registration [J]. Chinese Journal of Stomatology, 2016, 51(8): 475-479.
- [9] VANDEWEGHE S, VERVACK V, DIERENS M, et al. Accuracy of digital impressions of multiple dental implants: an *in vitro* study [J]. Clin Oral Implants Res, 2016, 61(1): 366-374.
- [10] KOMEILI A, WESTOVER L M, PARENT E C, et al. Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis [J]. Spine J, 2014, 14(6): 973-983.
- [11] RING D, QUINTERO J, JUPITER J B. Open reduction and internal fixation of fractures of the radial head [J]. J Bone Joint Surg Am, 2002, 84: 1811-1818.
- [12] IKEDA M, SUGIYAMA K, KANG C, et al. Comminuted fractures of the radial head. Comparison of resection and internal fixation [J]. J Bone Joint Surg Am, 2005, 87: 76-84.
- [13] ZHANG K Y, WIKTOROWICZ-CONROY A, HUTCHINSON J R, et al. 3D morphometric and posture study of felid scapulae using statistical shape modeling [J]. PLoS One, 2012, 7(4): e34619.
- [14] PARR W C, WROE S, CHAMOLI U, et al. Toward integration of geometric morphometrics and computational biomechanics: new methods for 3D virtual reconstruction and quantitative analysis of finite element models [J]. J Theor Biol, 2012, 301: 1-14.
- [15] 黄华军,张国栋,欧阳汉斌,等.基于3D打印技术的复杂胫骨平台骨折内固定手术数字化设计[J].南方医科大学学报,2015,35(2):218-222.  
HUANG H J, ZHANG G D, OUYANG H B, et al. Internal fixation surgery planning for complex tibial plateau fracture based on digital design and 3D printing [J]. Journal of Southern Medical University, 2015, 35(2): 218-222.
- [16] 吴章林,林海滨,张国栋,等.3D打印应用于髌臼骨折数字化设计的实验研究[J].中国临床解剖学杂志,2014,32(3):248-251.  
WU Z L, LIN H B, ZHANG G D, et al. The application of 3D printing technique in the research of acetabular fractures [J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2014, 32(3): 248-251.

(编辑:谭斯允)