

# 基于三维激光扫描的颅骨测量与手工测量的比较

惠家明<sup>1,2,3</sup>, 贺乐天<sup>1,2,3</sup>, 王明辉<sup>4</sup>

1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京, 100044;
2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京, 100044; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国社会科学院考古研究所, 北京 100710

**摘要:** 基于三维激光扫描的颅骨测量方法具有无接触、成像快速、易便携操作等优势, 近年来在体质人类学与古人类学等领域发挥着日趋重要的作用。而在该测量技术普及的同时, 其可靠性以及与手工测量的一致性也受到关注。本研究分别以手工方法与激光扫描建立模型法对考古出土颅骨进行测量, 期望以实验手段探讨两种测量结果是否一致。实验结果显示, 上述两种测量方法分别标定的两套测点相互之间吻合情况较好。其中, 有易识别解剖学形态特征的测点吻合程度最优。而在两种测量手段的标点操作方式有所不同时, 其标点位置间距会略有放大。从最终测量结果来看, 两种测量手段所获数据的绝对差值和相对差异程度均较小。个别测量项在配对样本  $t$  检验中表现出了差异显著性, 这应由两种测量结果大小差异的统一偏向性所致。在实际操作中, 此类差异仍在可接受范围内, 适宜混合同时使用。就差异的来源而言, 测量操作方式的不同以及测点间的吻合程度是导致最终测量结果不同的主要原因之一, 而仪器、颅骨表面的激光反射特性、扫描所获三维画面拼合情况等主客观因素也同样不可忽视。

**关键词:** 三维激光扫描; 手工测量; 颅骨测量; 差异检验; 兼容

中图分类号: Q983; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2019)02-0254-11

## A comparison between cranial measurements using three-dimensional laser scanning technology and manual measurements

HUI Jiaming<sup>1,2,3</sup>, HE Letian<sup>1,2,3</sup>, WANG Minghui<sup>4</sup>

*1. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Palaeontology and Palaeoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; 2. CAS Center for Excellence in Life and Palaeoenvironment, Beijing 100044; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710*

**Abstract:** Compared with traditional manual measurements, three-dimensional laser scanning technology is considered a method with better performance in terms of convenience

收稿日期: 2018-04-03; 定稿日期: 2018-09-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB26000000); 国家自然科学基金 (41630102; 41672020) 和中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (132311KYSB20160004) 资助。

作者简介: 惠家明 (1995-), 男, 汉族, 江苏省苏州市人, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所硕士研究生。Email: huijiaming17@mailsucas.edu.cn

**Citation:** Hui JM, He LT, Wang MH, et al. A comparison between cranial measurements using three-dimensional laser scanning technology and manual measurements[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2019, 38(2): 254-264

and efficiency. Although such technology is being utilized in physical anthropology and paleoanthropology in recent years, some questions have emerged. For instance, whether 3D virtual images are acceptable and the measurement values based on them can be compatible with the manual ones. Here, to compare the differences between two measurement systems, we tried to measure skulls by both methods. The results show that landmarks digitized from the 3D virtual image and real skulls overlap basically. Specifically, those landmarks with typical morphology features usually show better goodness of fit, while other landmarks set by two methods in diverse ways tend to separate slightly in comparison. As for the measurement values, most of data generated by traditional manual methods are compatible with those from the 3D virtual image. Although several measurement values show significant differences when undergoing a paired t-test, such differences may have limited practical implications. Besides, the main source of such differences could be the method to set landmarks and the goodness of fit of those landmarks, while other factors like the performance of equipment, the reflectivity of skulls' surface, and the accuracy of alignment of 3D images acquired from scanning cannot be ignored.

**Keywords:** Three-dimensional laser scanning; Manual measurement; Craniometry; Difference test ; Compatibility

## 1 引言

颅骨测量是体质人类学与古人类学研究的重要方法,也是获取颅骨形态信息的主要途径之一。在传统的研究方法中,颅骨测量相关研究要依靠手工测量实现。其完成测量需要配备的工具数量较多而可测项目有限,对于角度的测量操作难度较大,且在操作时不能离开颅骨标本实体。有鉴于此,学术界不断尝试更新测量手段,力求颅骨测量的高效与精准。例如 X 线头影测量法、基于接触式探针的三坐标测量法、投影光栅相位法都先后在颅骨测量领域被应用过,但未能广泛应用<sup>[1-5]</sup>。

近年来,基于激光扫描、数字图像以及计算机图像的三维测量技术发展迅速,推动了颅骨测量方法的更迭变化。其中,三维激光扫描技术推广范围较大,在颅骨测量领域的应用愈加多见。三维激光扫描技术又称“实景复制技术”,通过三角形法、结构光法等手段收集物体表面由激光反射的点云数据,以激光脉冲信号往返所需时间推算对象的距离,从而实现被测物体在计算机中的三维重建<sup>[6-7]</sup>。该技术具有无接触、成像快速、易便携操作等特点,不仅可以测量直线、弧周长与角度,也适合于测量颅骨面积、曲率、不规则断面形态等项目,而此类信息在传统手工测量中是较难获得的。此外,激光扫描及三维重建的颅骨数据可以永久保存,反复使用。

目前,三维激光扫描技术已经被应用在肢骨与脑不对称性分析、头面部形态变异分析、几何形态测量以及法医人类学等方面<sup>[8-21]</sup>。我们应注意到的是,三维激光扫描法在具有诸多优势的同时,其可靠性以及与手工测量结果的一致性也需要进行检验。然而,对于三维

激光扫描方法与手工方法之间的测量结果差异，学界目前还缺少详细研究和验证。虽然一些学者从口腔颌面外科学、人体测量学与法医人类学等角度进行过探讨。但是，此类研究多关注活体与人工模型而非颅骨遗存，其测试的三维激光扫描仪型号在国内并不常见，且缺少与手工测量方法的对比<sup>[22-26]</sup>。上述既有的验证结果对国内体质人类学与古人类学研究的参考价值有限，需要进一步的实证检验。

鉴于这些问题，本研究分别以手工方法与激光扫描建立模型法对考古出土颅骨进行测量，分析比较二者所标定测量点与最终测量结果，期望以实验手段探讨两种测量方法的差异与兼容情况。

## 2 材料与方法

用于实验研究的颅骨标本选自 5 处考古遗址：青海省上孙家寨遗址（9 例）、阳山遗址（4 例）、柳湾遗址（3 例），以及甘肃省玉门火烧沟遗址（11 例）、鸳鸯池遗址（2 例），共计 29 例<sup>[27-30]</sup>。颅骨样品均保存良好，形态基本完整。

依据《人体测量手册》标准，实验首先选取有代表性的、较常用测量点 26 处<sup>[31, 32]</sup>。另选择相关的直线测量项目 18 项、角度测量项目 7 项、弧弦周长测量项目 2 项，共计 27 项（表 1、表 2、表 3 分别罗列了这些项目）。实验具体步骤如下所示：

1) 在颅骨表面标定测量点，进行着色标记，并手工测量各直线、弧弦周长，以及各角度项目，每一项目重复测量三次。

2) 使用 NextEngine® 便携式 3D 彩色激光扫描仪 (Model 2020i Desktop) 沿矢状面与横切面扫描颅骨（每次扫描分为 7 至 10 个子区域片段，精度设置为 Macro 级别，扫描速度设置在标准级别），并在 Scanstudio 软件中拼合扫描画面，获取彩色的三维颅骨数字模型。

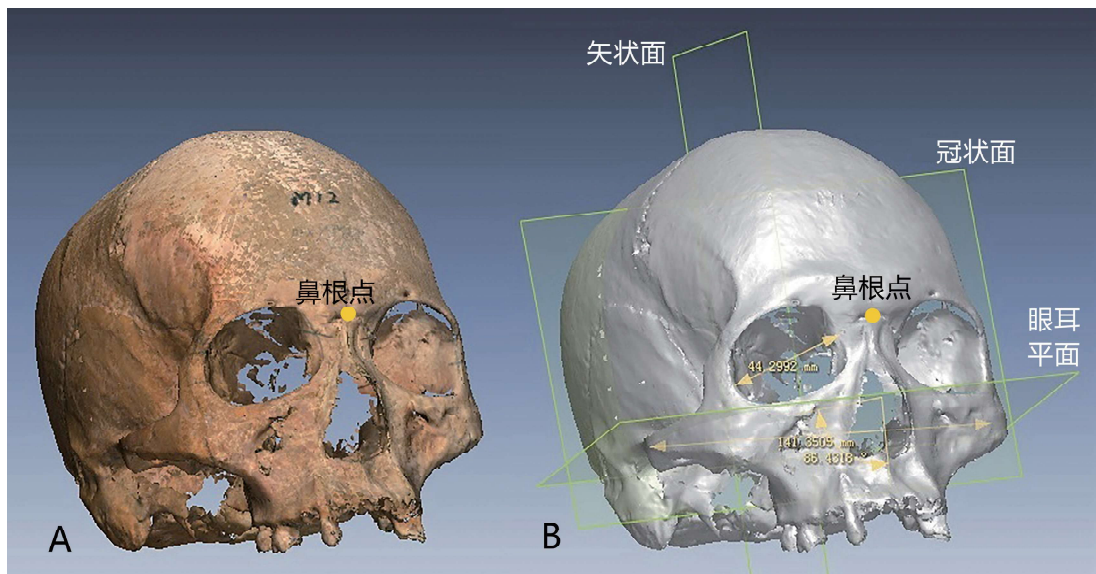


图 1 颅骨三维建模图 (A) 与逆向工程软件中的测量方式 (B)  
**Fig.1 The reconstruction model (B) and measurement in software (B)**

颅骨表面先前着色标定的测量点, 可以非常清晰地三维虚拟数字模型中显示(图 1A)。

3) 使用 Rapidform® XOR3 软件测量三维颅骨模型(图 1)。为了在测量操作时不受先前手工标定的测点影响, 模型设置为只显示表面结构, 隐去颅骨本身的颜色(图 1B), 再重新标点、测量。其后, 恢复颅骨原有色彩, 显示出颅骨手工测点, 并与软件中放置的颅骨模型测量点进行比较, 测定两者之间直线距离。以上测量项目和测点间距均重复测量三次。

在完成上述实验步骤后, 将测量结果在 IBM® SPSS22.0 与 Origin® OriginPro 2018 软件中进行统计分析。参考国内外类似研究的统计方法, 并考虑到每一测量项目的手工数值与激光测量数值之间都存在配对关系, 是同一批颅骨样本两轮测量所得, 适合进行配对样本  $t$  检验, 因而使用该统计方法检验差异<sup>[23,33,34]</sup>。另外, 本文也采用了绝对差值与相对差异这两个指标来衡量差异程度。

### 3 结果

#### 3.1 测量点差异比较

在上述实验操作中, 传统手工方法和激光扫描建立模型法分别在颅骨实体及三维虚拟模型上标定了一套测量标志点。通过扫描和软件处理, 手工方法在颅骨标本上标定的测点在虚拟模型上得到了清晰显示。两种方法各自标定的测点之间吻合情况由其间直线距离反映。结果显示, 在 26 项测点中, 有 21 项被两种方法所标定位置的平均间距在 0.0 至 0.50mm 范围内, 占比 80.76%; 另有 5 项测点的平均间距值在 0.51 至 1.00mm 之间, 占比 19.23%(表 1)。

在人体测量学领域, 目前尚无规范标志测点误差的统一标准。而综合参考既有研究可知, 误差值在 1mm 以下时基本可以被视为完全吻合, 或误差可忽略不计<sup>[2][37]</sup>。整体而言,

表 1 手工方法和激光扫描方法标定的测点间距  
Tab.1 Distances between the landmarks set by laser scanning and manual measurements

测点Landmarks	平均距离 $D(\text{mm})$	标准差 $\sigma(\text{mm})$	个数 $n$	测点Landmarks	平均距离 $D(\text{mm})$	标准差 $\sigma(\text{mm})$	个数 $n$
眉间点Glabella	0.59	0.33	28	鼻棘点Nasospinale	0.28	0.19	29
前囟点Bregma	0.21	0.21	28	鼻棘下点Subspinale	0.25	0.33	23
颅后点Opisthocranium	0.74	0.43	29	上齿槽前点Prosthion	0.29	0.29	28
大孔后缘点Opisthion	0.16	0.26	29	左眶外缘点Ectoconchion(L)	0.45	0.34	29
大孔前缘点Endobasion	0.19	0.20	28	右眶外缘点Ectoconchion(R)	0.50	0.33	28
颅底点Basion	0.38	0.32	29	左颧颌点Zygomaxillare(L)	0.28	0.26	28
左颅侧点Euryon(L)	0.62	0.28	27	右颧颌点Zygomaxillare(R)	0.32	0.23	28
右颅侧点Euryon(R)	0.67	0.43	27	左颧额颧点Frontomalare temporal(L)	0.48	0.19	28
左耳门上点Porion(L)	0.39	0.30	29	右颧额颧点Frontomalare temporal(R)	0.58	0.41	29
右耳门上点Porion(R)	0.44	0.32	29	左眶额颧点Frontomalare orbitale(L)	0.18	0.28	29
鼻根点Nasion	0.17	0.25	29	右眶额颧点Frontomalare orbitale(R)	0.33	0.26	29
左颌额点Maxillofrontale(L)	0.33	0.22	29	左颧点Zygion(L)	0.50	0.35	29
右颌额点Maxillofrontale(R)	0.42	0.31	29	右颧点Zygion(R)	0.50	0.30	29

实验结果中两种方法所标志的测量点吻合情况较好。

### 3.2 测量项目差异比较

本研究直观比较了两种测量结果之间差异,并以绝对差值的平均值来反映差异大小(绝对差值=|手工测量值-激光模型测量值|)。结果显示,在总计 20 项直线、弧弦周长测量项目中,除颅周长一项差异达到 0.93mm 以外,其余各项的差异平均水平皆在 0.0 至 0.5mm 区间内(表 2)。相比之下,在角度测量项目中,总面角等 4 个测量项的两种测量结果之间绝对差值在 0.0° 至 1.0° 内,而颧额角与鼻颧角的差异较大,分别达到了 1.34° 和 1.88°(表 3)。

实际上,绝对差值会受到测量值本身大小影响。当测量项数值较大时,其绝对差值也可能被放大,尽管这一差异的占比可能是微小的。因此,本文也计算了两种测量方法获得测量数据的相对差异:[相对差异值=绝对差值/(手工测量值+激光模型测量值)×100%],以排除上述因素干扰。结果显示:就相对差异的比值而言,各直线、弧弦周长与角度测量项两轮测量结果的差异占比均不及总体的 1%,差异比较微小(表 2、表 3)。

此外,在检验了上述测量结果的正态分布情况后,本文将两种测量方法所获结果进行了配对样本 *t* 检验(显著水平设为 0.05)。结果显示,除颅底长等 5 项外,其余 22 个项目的两种测量结果间差异在统计学意义上均不显著。

表 2 手工测量与激光扫描所得颅骨测量结果差异(直线、弧弦周长)  
**Tab.2 Comparison of measurement results of laser scanning and manual measurements (linear distances, circumferences and arc length)**

测量项 Variables	手工测量 Manual measurements		激光扫描模型测量 Measurements based on 3D laser scanning		绝对差值均 数 (mm) Mean of absolute difference	相对差异 均数 (%) Relative difference	配对 <i>t</i> 检 验 ( <i>p</i> 值) Paired <i>t</i> -test	个体 数 <i>n</i>
	平均值	标准差	平均值	标准差				
	$\bar{X}(\text{mm})$	$\sigma(\text{mm})$	$\bar{X}(\text{mm})$	$\sigma(\text{mm})$				
颅骨最大长 $L_{\max}$ of cranial	178.51	8.22	178.6	8.14	0.23	0.07	0.063	29
颅底长 $L$ of Basis	100.81	6.25	100.95	6.37	0.31	0.15	0.034*	27
枕孔最大长 $L$ of Foramen magnum I	36.57	2.59	36.76	2.58	0.24	0.33	0.405	28
颅骨最大宽 $b_{\max}$ of cranial	135.72	5.05	135.79	5.07	0.26	0.1	0.278	29
上面宽 $b$ of upper face	102.62	4.04	102.63	4.16	0.28	0.13	0.879	28
面宽 $b$ of face	103.84	7.12	103.81	7.07	0.23	0.09	0.568	29
中面宽 $b$ of Middle orbital I	99.75	4.48	99.77	4.48	0.33	0.17	0.839	29
左眶宽 $b$ of left orbital	40.64	1.46	40.70	1.63	0.35	0.43	0.449	29
右眶宽 $b$ of right orbital	41.51	1.73	41.44	1.76	0.28	0.34	0.265	29
两眶宽 $b$ of biorbital	96.10	3.35	95.82	3.31	0.42	0.22	0.001*	29
前眶间宽 $b$ of vordere interorbital breite	18.39	2.15	18.40	2.10	0.27	0.72	0.766	29
鼻宽 $b$ of Nasal	26.26	1.68	26.35	1.74	0.27	0.51	0.208	29
颅高 $h$ of Basi-bregma	135.09	9.88	135.07	9.86	0.28	0.1	0.676	29
耳上颅高 $h$ of Auricular	113.36	5.68	113.63	5.66	0.44	0.19	0.003*	28
上面高 $h$ of upper facial	71.50	4.05	71.48	4.05	0.32	0.22	0.288	27
左眶高 $h$ of left orbital	34.15	1.26	34.38	1.27	0.40	0.58	0.001*	29
右眶高 $h$ of right orbital	34.04	1.17	34.44	1.21	0.47	0.69	0.005*	29
鼻高 $h$ of nasal	55.00	3.26	55.13	3.24	0.32	0.29	0.060	28
颅周 $C$ of horizontal	509.51	19.08	511.66	19.32	0.93	0.09	0.085	26
颅矢状弧 $L$ of Total sagittal arc	363.46	16.38	364.27	16.07	0.43	0.06	0.532	28

表 3 手工测量与激光扫描所得颅骨测量结果差异 (角度)

Tab.3 Comparison of measurement results of laser scanning and manual measurements (angles)

测量项 Variables	手工测量 Manual measurements		激光扫描模型测量 Measurements based on 3D laser scanning		绝对差值 均数 Mean of absolute difference(°)	相对差 异 Relative difference (%)	配对 <i>t</i> 检验 ( <i>p</i> ) Paired t-test	例数 <i>n</i>
	平均值 (°)	标准差 (°)	平均值 (°)	标准差 (°)				
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$				
总面角 Total prognathism	85.09	2.92	85.23	2.62	0.51	0.3	0.731	28
中面角 Middle prognathism I	85.8	2.61	86.04	2.28	0.50	0.3	0.276	27
中面角 Middle prognathism II	86.43	2.97	86.70	2.21	0.73	0.42	0.769	26
齿槽面角 Alveo prognathism I	80.48	6.41	80.01	6.37	0.43	0.25	0.786	27
齿槽面角 Alveo prognathism II	77.22	7.17	76.82	7.03	0.37	0.23	0.292	27
鼻颧角 naso-malar angle	146.94	6.41	146.36	6.45	1.88	0.64	0.165	29
颧额角 zygomaxillary angle	131.30	7.31	131.13	7.01	1.34	0.52	0.592	29

## 4 分析与讨论

### 4.1 两种测量方法的差异程度

如前文所述, 为考察手工测量法与激光扫描建立模型法之间的测量差异, 本研究采用两轮标点位置间距这一指标, 评判测点的吻合情况。另采用了绝对差值、相对差异, 以及配对样本 *t* 检验所示的差异显著性, 作为评判最终测量结果吻合情况的三种指标。

两种方法标定的测点位置之间直线距离显示: 虚拟模型上所标定的测点与手工定点平均差距普遍不超过 0.5mm, 最大为 0.74mm, 这样的吻合情况是可以接受的。实际上在一般的手工测量操作中, 同一颅骨上几次标点的间距, 或不同操作者所标测量点差距都有可能超出 0.5mm。因此, 激光测量与手工测量方法间的标点差异, 甚至可能小于手工测量方法内部的差异。

此外, 本文尝试将 26 种测点按照其吻合情况进行排序 (见图 2)。排序显示, 间距平均值较小的测点普遍居于易识别的解剖结构之上。如鼻根点、前凶点均有鼻额缝、冠状缝与矢状缝作为标点操作时的参考。而颅后点、眉间点、眶外缘点等测点在排序中居高, 其手工测量操作中标点位置也多由目测, 或由测量工具反复试错摸索而得出。可见, 有明显解剖结构特征的测点往往吻合情况最好, 而在两种测量方法中定点操作方式有所不同的测点, 则吻合情况略次之。

就测量项目而言, 可以观察到的是绝对差值与相对差异程度的分析结果基本一致。绝大多数项目的两种测量结果之间差异微小, 绝对差值平均值都在 0.5mm (或 1°) 以下。综合参考既有的颅骨测量研究成果可知, 测量偏差在 0.5mm (或 1°) 以下是可以被接受的<sup>[35-37]</sup>。并且, 在后续的统计检验和群体间比较中, 这样的偏差一般不会对研究结果造成较大影响。当然, 我们也注意到颅周长一项的平均绝对差值达到了 0.93mm。比较来看, 颅周的绝对差值明显较高。但是考虑到成年人颅周测量值普遍可以达到 500mm 左右, 其不及 1mm 的测量差异与总体相比并不显著, 并且相对差异的计算结果也说明了这一点。

尽管如此，配对样本 *t* 检验的分析结果却出现了与前两种指标不尽一致的现象。颅底长、耳上颅高、两眶宽、左眶高、右眶高这五项表现出了统计学意义上的显著差异。不过，此类测量项的绝对差值与相对差异却很低。其中，颅底长、耳上颅高与两眶宽的相对差异程度分别仅有 0.15%，0.22% 和 0.19%。左右眶高的相对差异略高，但也仅有 0.58% 和 0.69%。实际上，这一表面上看似矛盾的现象也较容易解释。具体分析每一例颅骨的测量结果可以发现，大部分的颅骨样本的颅底长手工测量值都统一高于三维激光模型的测量结果，而两眶宽则多是三维激光模型测量值高于手工测量值。其余的 3 个测量项也属于这种情况，即两种测量结果的大小差异出现了统一的偏向性，或是手工测量值普遍高于三维模型测量值，或是相反。作者认为，应是这一现象导致了上述 5 类测量项在配对样本 *t* 检验中差异水平显著。

以往的类似研究中，有学者在比对人造面部模型的几种测量手段时也意识到：一些测量结果虽然差异并不大，完全在可接受范围内，却在统计检验（如单因素方差分析）中表现出了差异显著性<sup>[37]</sup>。从实际操作的角度出发，此般差异在实际运用中并不具有意义。换言之，即使配对 *t* 检验证明两种测量方法在某一测量项上存在差异，只要绝对差值与相对差异足够小，其差异程度仍然是可以接受的。

综合而言，在标定测点与最终测量结果两方面，手工测量方法与基于激光扫描的三维模型测量法差异较小。在实际测量操作与后续研究分析中，二者的测量数据是适宜兼容使用的。

#### 4.2 测量差异的来源

关于造成三维激光扫描建立模型法与手工测量方法在标志点及测量结果上的差异，首先要考虑仪器硬件本身。扫描仪的性能缺陷难以避免（包括脉冲时间、分辨率大小、系统噪声等），尽管缺陷往往非常微小<sup>[38-40]</sup>。而手工测量所使用诸类工具同样存在主观和客观缺陷，因而与激光扫描仪之间存在不可忽视的性能差异。

在硬件之外，扫描操作与后续的逆向工程设计软件使用方法也会对测量结果产生影响。颅骨扫描最初所得的是诸多不连续的三维画面，需要在扫描软件中人为拼合。而在拼合过程中，操作者需要在各三维画面中挑选重复部位以选定标志点。标志点的重合情况会直接影响颅骨模型的拼合效果，若不同画面所属标志点间偏差过大则模型会有明显形变，进而影响测量结果。而在本实验中，颅骨在进行扫描之前会预先进行着色标记，因而后续的选定标志点与拼合过程比较易于操作。

实际上，激光扫描所建立模型是由一定数量的点云及各点连结的三角网格组成的。多数的激光三维扫描仪器采集点云数据极为快速，且数据量庞大。以本实验使用的 NextEngine 扫描仪为例，其每秒可获取约 5 万个点云数据，基本可实现颅骨表面全覆盖<sup>[26]</sup>。不过，以颅骨扫描的经验来看，颅骨仍有个别部位上覆的点云偏少。比如在眶缘部分、额骨颧突部分，其转角比较锐利，在扫描时被激光覆盖到的面积较小，最后形成的模型中覆盖的点云也可能偏少；枕骨大孔前后缘则更可能会因为

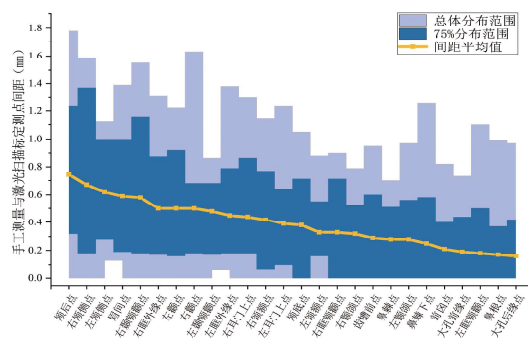


图 2 各测点手工测量与三维激光扫描标点位置差异程度排序（按平均差值大小排序）  
**Fig.2 The goodness of fit of landmarks set by laser scanning and manual measurements (ranked in order of mean values of distances)**

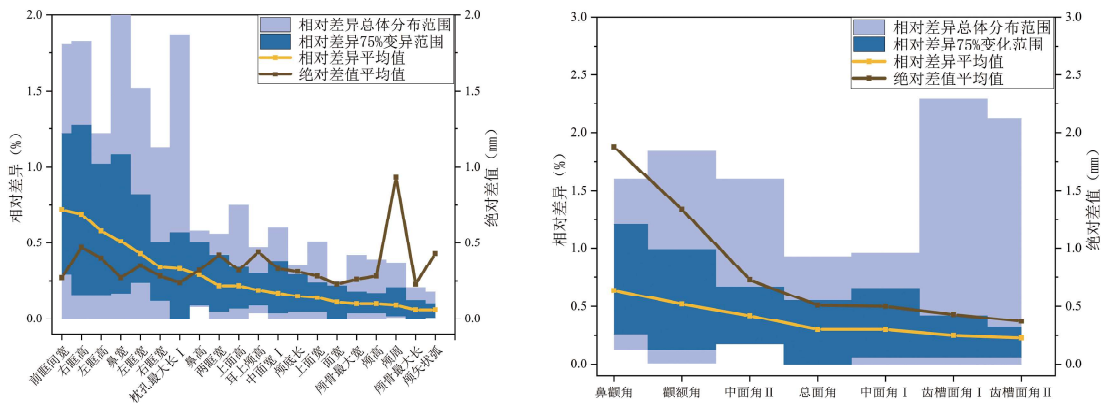


图 3 测量结果差异程度排序 (按绝对差值均数大小排序)

Fig.3 The difference between measurement results(ranked in order of the mean values of absolute differences)

扫描角度问题, 而导致被采集点云偏少。利用 Rapidform® XOR3 等逆向工程软件标定测点时, 测点一般被置于点云内部的三角网格的节点上。因此, 如若测点应处的位置上未被网格节点覆盖, 那么测量点会被置于相离最近的三角网格节点, 可能会偏离手工测量所标位置, 尽管这一距离偏差极小。

我们也应注意到, 在数字三维模型上进行测量时, 其操作方式会与传统手工操作有所不同。举例而言, 利用逆向工程设计软件在颅骨上依次建立法兰克福平面、矢状面、冠状面等参考平面后, 眉间点是由计算冠状面至眉弓中部最远距离得出的; 鼻棘下点则是计算冠状面至上颌骨齿槽上部矢状面外轮廓的最近距离得出的。而在手工测量中, 这一类标点往往由目测所得。同理, 在三维模型上标定眶外缘点等测点时, 也可以利用计算距离的方式替代目测。可以看出, 三维模型的标点方式有别于传统的目测手段。前文的测点吻合情况排序结果也显示, 标点手段在两种方法中有所不同的测点, 其差异程度也会偏大。

上述列举的差异来源虽多, 但可以归为两大类, 即扫描建模过程和测量操作过程。所谓扫描过程带来的差异, 本质上就是颅骨在转化为模型后的变形。然而, 计算机内的虚拟模型并不能直接与实体的颅骨精细对比。所以说, 扫描带来的差异有多大, 对测量结果的影响有多大, 这些问题是无法直接解答的。不过, 我们可以通过测点吻合情况与测量结果差异的关系, 来推断这两类来源对测量结果差异的贡献程度。

如果两种测量手段的测点吻合程度非常好, 而最终测量结果却差异较大, 那么说明扫描建模过程更可能是造成差异的主要来源。因为颅骨模型变形严重时, 即使测点重合得极好, 所获结果仍然与手工测量值相去甚远。而如果测点吻合情况略差, 测量结果差异也偏大, 那么扫描与测量过程都可能是主要来源。这种情况需要进一步实验论证, 让模型上的测量操作也改用原先的手工测点, 这样就排除了测点吻合情况这一因素的干预, 并观察结果变化。若更改测点后, 新的测量结果与手工测量值的差异仍没有变化, 则说明扫描建模是差异的主要来源, 测量操作过程影响较小。而若是改用手工测点后, 差异被极大缩小, 其说明的情况则反之。

对此我们首先可以观察到, 上述实验结果中, 测点吻合程度非常好时, 测量结果的差异也普遍非常小。但是也存在个例: 枕骨大孔前、后缘点吻合情况很好, 而枕孔最大长的相对差异却在排序中有些偏高。这虽有可能说明是扫描过程带来了差异, 但作者认为原因可能在于枕孔最大长本身数值就相对较小, 所以测点看似微小的偏差就会给相对差异程



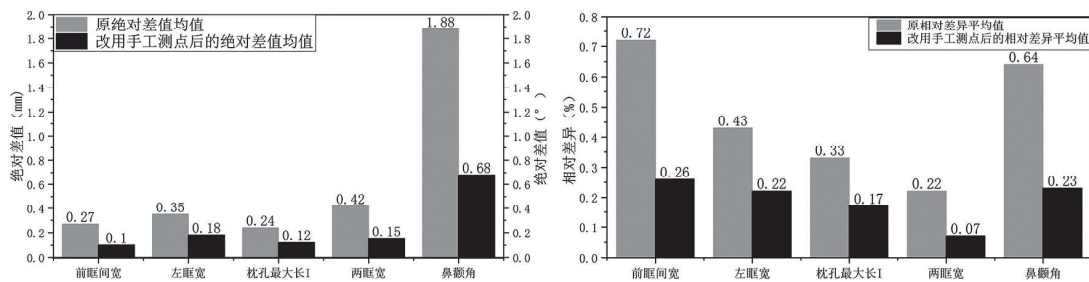


图 4 改用手工测点后测量结果差异的变化

Fig.4 The changes of differences between measurement results after using the same landmarks set manually

度带来较大的偏差，而这需要进一步实验证明。此外，测点吻合程度在排序中略差，且测量结果差异也在排序中偏高的项目更为常见。于是，本研究从中选取了前眶间宽、左眶宽、两眶宽、鼻颧角这四项差异较大、比较典型的项目，加上枕孔最大长一项进行了重新测量。重新测量选择的测点，统一改为模型在彩色模式下显示的着色手工测量点。

结果显示，在改用手工测点进行测量后，上述 5 个项目的手工测量数值与三维模型测量数值之间的差异明显缩小（图 4）。前眶间宽的相对差异从 0.72% 下降至 0.26%、左眶宽从 0.43% 降至 0.22%、枕孔最大长 I 从 0.33% 降至 0.17%、两眶宽从 0.22% 降至 0.07%、鼻颧角从 0.64% 降至 0.23%。至于绝对差值，上述各项则分别下降了 0.17mm、0.17mm、0.12mm、0.27mm、1.2°。

综上所述，我们观察到测点吻合情况好的测量项，其两种测量值差异也普遍较小。而在测点偏差相对大一些，测量结果差异也偏大时，只要统一改用手工测点，排除测点吻合因素的干预后，测量差异就会极大地下降。虽然有个别测量项（如枕孔最大长）其测点吻合程度较好而最终测量结果差异排序却偏高，但这是测量项本身特点使然，并非扫描偏差所致，且在改用手工测点后差异同样被极大地缩小。显然，这意味着测量结果的差异应该主要来源于测量操作过程，而非扫描过程，尽管后一类因素的影响不能被忽视。

除了上述的一些人为因素之外，如果不同操作者测量习惯不同，对测点的认知有细微偏差，那么是有可能带来测量结果差异的。不过在本研究中，每一测量项目的手工测量值与激光扫描测量值都是同一位操作者的测量结果，因而避免了这一问题。

最后应认识到的是，本研究关注的是激光扫描测量与手工测量之间的差异，而不是误差。误差，是指测量值与真实值之间的差异<sup>[41]</sup>。详尽的真实值在理论上而言是不可知的，各类测量方法只能尝试着尽量趋近于真实值，而手工测量与基于激光扫描的三维模型测量法也不外乎如此。在人体测量学发展的百余年来，各类判别标准与基础数据本质上并不是建立在真实值之上，而是建立在手工测量结果的基础之上。考虑到其已形成了一套非常稳定而复杂的体系，激光测量的结果在尽量接近于真实值的同时，更要考虑能否与现有的手工测量结果一致或接近。在此基础上，激光扫描模型测量结果才有足够应用价值，以及保证激光测量所获结果能与手工测量数据相互混合使用。

## 5 结论

基于激光扫描的颅骨测量与手工测量的对比实验显示, 二者分别标定的测点之间吻合情况整体较好。具体来看, 有易识别形态特征的测点吻合程度最优。而若两种测量手段标点操作方式殊异时, 其标点位置间距会略有放大。就最终测量结果而言, 绝对差值与相对差异两项指标显示两种测量手段所得结果差异较微小。尽管个别测量项在配对样本  $t$  检验中出现了统计学意义上的显著差异, 但此现象应是由差异的统一偏向性所致, 在实际操作应用中并无明显影响。这也意味着, 手工测量与激光扫描测量所获数据之间的差异可以接受, 适合兼容使用。

测量结果差异可知的来源主要有两大类, 其一是扫描建模过程, 包括仪器性能、颅骨反射特性、画面拼合等因素; 其二则是测量操作过程, 包括测点的确立以及测点之间的吻合度。后一类因素对测量差异的贡献是较大的, 而在没有其干预的情况下, 两种测量结果的差异可以被极大地缩小。

最后需要指出的是, 本研究目前只对国内较普遍使用的 NextEngine 激光扫描系统进行了对比实验, 其他类型激光扫描系统与手工测量方法的对比情况未被包括在内。但是, 各类激光扫描仪器和 CT 扫描仪器与本次检验的扫描系统往往有诸多共同之处, 而后续处理的测量软件更是基本一致。因此, 本文的实验与分析结果对于其他扫描测量方法同样具有参考价值。

**致谢:** 本文所使用人骨研究材料由中国社会科学院考古研究所提供。复旦大学博士后魏偏偏、中国科学院古脊椎动物与古人类研究所吴秀杰研究员、张玄与张亚盟同学、首都师范大学侯洁同学为本文写作提供了帮助, 三位审稿人为本文提供了宝贵的修改意见, 在此谨表谢意!

## 参考文献

- [1] Slađek V, Galeta P, Sosna D. Measuring human remains in the field: Grid technique, total station, or MicroScribe?[J]. *Forensic Science International*, 2012, 221(1-3): 16-22
- [2] 曾祥龙, 刘武. 颅骨测量与 X 线头影测量方法的比较研究 [J]. *人类学学报*, 1991, 10(4): 288-297
- [3] 赵悦, 黄克强, 李春山. 西藏那曲地区藏族中小学生恒牙期颅面硬组织的结构特征: 200 例 X 射线头影测量 [J]. *中国组织工程研究*, 2009, 13(48): 9541-9544
- [4] Sholts SB, Flores LM, Walker PL, et al. Comparison of coordinate measurement precision of different landmark types on human crania using a 3D laser scanner and a 3D digitiser: Implications for applications of digital morphometrics *International Journal of Osteoarchaeology*, 2011, 21(5): 535-543
- [5] 周文莲, 吴新智. 现代人头骨面部某些特征的投影栅相位法测量研究 [J]. *人类学学报*, 2001, 20(2): 81-92
- [6] 惠增宏. 激光三维扫描、重建技术及其在工程中的应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002
- [7] 卢波. 激光三维扫描数据的表面重建技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006
- [8] 潘雷, 魏东, 吴秀杰. 现代人颅骨头面部表面积纬度分布特点及其与温度的关系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(8): 1844-1853
- [9] Wu XJ, Maddux SD, Pan L, et al. Nasal floor variation among Eastern Eurasian Pleistocene Homo[J]. *Anthropological Sciences*, 2012, 120(3): 217-226
- [10] 吴秀杰, 潘雷. 利用 3D 激光扫描技术分析周口店直立人脑的不对称性 [J]. *科学通报*, 2011, 56(16): 1282-1287

- [11] 吴秀杰, 范雪春, 李史明, 等. 福建漳平奇和洞发现的新石器时代早期人类头骨[J]. 人类学学报, 2014, 33(4): 448-459
- [12] Friess M, Marcus LF, Reddy DP, et al. The use of 3D laser scanning techniques for the morphometric analysis of human facial shape variation[J]. BAR Int Series, 2002, 1049: 31-35
- [13] Deveci M, Oztürk S, Sengezer M, et al. Measurement of orbital volume by a 3-dimensional software program: an experimental study[J]. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2000, 58(6): 645-648
- [14] Slizewski A, Friess M, Semal P. Surface scanning of anthropological specimens: nominal-actual comparison with low cost laser scanner and high end fringe light projection surface scanning systems[J]. Quartar, 2010, 57: 179-187
- [15] Liu W, Jin CZ, Zhang YQ, et al. Human remains from Zhirendong, South China, and modern human emergence in East Asia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(45): 19201-19206
- [16] 魏偏偏, 邢松. 人类股骨断面面积与轮廓形状的不对称性——基于三维激光扫描的形态测量分析[J]. 人类学学报, 2013, 32(3): 354-364
- [17] 魏偏偏. 周口店田园洞古人类股骨形态功能分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016
- [18] 魏偏偏, 张全超, 邢松, 等. 内蒙古和林格尔县土城子遗址人群两侧股骨断面形态的不对称性[J]. 解剖学杂志, 2015, 38(3): 333-336
- [19] 张亚盟, 魏偏偏, 吴秀杰. 现代人头骨断面轮廓的性别鉴定——基于几何形态测量的研究[J]. 人类学学报, 2016, 35(2): 172-180
- [20] 邢松, 张银运, 刘武. 周口店直立人3号与5号头骨形态特征对比及其演化速率所反映的群体隔离[J]. 人类学学报, 2012, 31(3): 250-258
- [21] 税午阳, 周明全, 杜国光, 等. 颅骨三维模型制作和数据库的构建[J]. 中国法医学杂志, 2016, 31(1): 1-4
- [22] 宋杨, 孙玉春, 赵一姣, 等. 牙颌模型三维扫描仪精度定量评价[J]. 北京大学学报: 医学版, 2013, 45(1): 140-144
- [23] 陈俊, 吕培军, 冯海兰, 等. 牙颌模型三维激光扫描系统可靠性研究及与手工测量的比较[J]. 现代口腔医学杂志, 2000, 14(4): 251-253
- [24] Park HK, Chung JW, Kho HS. Use of hand-held laser scanning in the assessment of craniometry[J]. Forensic Science International, 160(2): 200-206
- [25] Fourie Z, Damstra J, Peter O, et al. Evaluation of anthropometric accuracy and reliability using different three-dimensional scanning systems[J]. Forensic Science International, 207(1-3): 127-134
- [26] Sholts SB, Wärmländer SK, Flores LM, et al. Variation in the Measurement of Cranial Volume and Surface Area Using 3D Laser Scanning Technology[J]. Journal of Forensic Sciences, 2010, 55(4): 871-876
- [27] 韩康信. 韩康信人类学文选[M]. 科学出版社, 北京, 2017
- [28] 青海省文物管理处. 青海柳湾[M]. 文物出版社, 北京, 1984
- [29] 任晓燕. 上孙家寨汉墓群族属初探[J]. 青海民族学院学报, 1988, 4: 28-31
- [30] 蒲朝绂, 员安志. 甘肃永昌鸳鸯池新石器时代墓地[J]. 考古学报, 1982, 2: 199-227
- [31] 席焕久, 陈昭. 人体测量方法[M]. 科学出版社, 北京, 2010
- [32] 邵象清. 人体测量手册[M]. 上海辞书出版社, 上海, 1985
- [33] John AR. Mathematical statistics and data analysis[M]. Thomson Brooks/Cole, 2007
- [34] Mustafa D, Serdar O, Mustafa S, et al. Measurement of Orbital Volume by a 3-Dimensional Software Program: An experimental study[J]. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2000, 58: 645-648
- [35] Kouchi M, Koizumi K. An analysis of errors in craniometry[J]. Anthropological Science, 2008, 93: 409-424
- [36] Utermohle CJ, Zegura SL. Intra and interobserver error in craniometry: A cautionary tale[J]. American Journal of Physical Anthropology, 1982, 57(3): 303-310
- [37] Weinberg SM, Naidoo S, Govier DP, et al. Anthropometric precision and accuracy of digital three-dimensional photogrammetry: comparing the genex and 3dMD imaging systems with one another and with direct anthropometry[J]. The Journal of Craniofacial Surgery, 2006, 17(3): 477-483
- [38] Isheil A, Gonnet JP, Joannic D, et al. Fontaine Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2011, 49(1): 16-24
- [39] Fenga HY, Liua Y, Xi F. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system[J]. Precision Engineering, 2001, 25(3): 185-191
- [40] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32-34
- [41] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 中国计量出版社, 北京, 2007