

文物数字化三维重建技术研究

屠大维, 兰浩, 张曦*

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

摘要 为了快速实现花瓶等具有回转体性质文物的三维数字化, 提出了一种非接触式测量方法, 并研制了一套文物数字化三维重建系统, 克服了文物三维重建时内腔信息缺失以及纹理畸变的问题。对于内腔, 通过光学镜片改变激光测距仪光束的方向, 结合转台和导轨的运动来获取文物内腔的点云数据; 外形点云由线激光扫描仪结合转台运动来获取; 为减小文物纹理的畸变, 通过相机搭配远心镜头来获取文物不同转动角度位置的纹理图像, 然后把所有角度位置提取的像素依次拼接在一起, 形成完整的外形纹理展开图。最后介绍了对系统测量误差进行标定与补偿的方法。实验结果表明: 此系统可实现对花瓶类文物的三维数字化, 重建精度在 0.5 mm 以内。可满足在博物馆现场对文物进行快速安全三维数字化的需求。

关键词 机器视觉; 三维传感; 线结构光测量; 激光测距仪; 内腔重建; 文物数字化

中图分类号 TH6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.191504

Digital Three-Dimensional Reconstruction Technology of Cultural Relics

Tu Dawei, Lan Hao, Zhang Xi*

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract Herein, a new method for noncontact measurement is presented to quickly digitize vases and other objects with rotary properties. This study develops a cultural-relic digital three-dimensional (3D) reconstruction system, which overcomes the problems of missing inner cavity information and texture distortion in cultural-relic 3D reconstruction. For the inner cavity, the beam direction of the laser range finder is changed by an optical mirror. The point cloud data of the cultural-relic inner cavity is acquired by combining the movement of the turntable and the guide rail. The point cloud data of appearance is obtained by a line laser scanner combined with the turntable motion. High-resolution orthoscopic texture images of the cultural relic at different rotation angle positions are obtained using telecentric lens and a camera to reduce the distortion of the cultural-relic texture. All the extraction pixels are then stitched together to reconstruct a complete appearance texture unfolding. Finally, the method of calibration and compensation for the system measurement error is introduced. Experimental results show that the proposed method can realize the 3D digitization of vases. The overall reconstruction error of the cultural relic is less than 0.5 mm; hence, it can meet the demands of a rapid and safe 3D digitization of cultural relics in the museum site.

Key words machine vision; three-dimensional sensing; line-structured light measurement; laser range finder; inner cavity reconstruction; digitization of cultural relics

OCIS codes 150.6910; 150.1488; 280.3400

1 引言

建立精确的文物三维数字化模型, 对文物保护研究、鉴赏与展示等具有重要意义^[1]。珍贵文物的三维数字化要求比较严格, 并且要保证无损检测的安全性。目前, 文物三维重建的方法主要有摄影测

量技术、三维激光扫描技术和结构光扫描技术等。摄影测量技术基于交汇测量原理^[2-3], 以处理迅捷、成本低廉等特点, 在大范围场景重建领域具有较大优势, 如天津大学的耿欣等^[4]利用摄影测量技术对大型管道进行快速测量与建模, 但摄影测量的点云冗余点较多。基于飞行时间法的三维激光扫描技

收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-04-04; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(51205243)

* E-mail: xizhang@shu.edu.cn

术^[5],以其强大的重建灵活性,可以快速得到被测物体的密集点云,在大范围场景三维重建领域应用广泛,如斯坦福大学 Levoy 等^[6]对米开朗基罗雕塑的数字化处理,我国对三星堆遗址一号祭坑^[7-8]和秦始皇兵马俑二号坑^[9]等遗址的数字化建设,但这些数据集中有很多冗余数据。基于线结构光的扫描技术应用也比较广泛^[10-11],如天津大学的田庆国等^[12]利用线结构光扫描仪获取人体的点云,进而完成对人体特征的测量。浙江大学的任卿等^[13]利用投影编码结构光技术,完成了对金沙玉凿和良渚文物黑陶鼎的三维模型重建,但有时文物表面存在镜面反射和遮挡问题,需进一步优化设计。

花瓶等具有回转体结构的文物,类型和数量广泛,但受开口形状和尺寸的限制,利用现有的光学测量技术难以获取文物内腔完整的三维形貌。围绕以上问题,本文提出了一种针对花瓶类文物的非接触数字化扫描重建测量方法,可以方便地采集文物内腔与外形的三维点云数据以及无畸变的表面纹理图像,实现了花瓶类文物内腔、外形、表面纹理的数字化扫描重建;同时,采用模块化设计方法,研制了一套可快速拆装便携式测量设备,可满足现场对博物馆珍贵文物的三维数字化需求。最后分析了该方法中三维重建的误差来源,给出了误差补偿的方法。

2 花瓶类文物三维重建原理

2.1 内腔采集原理

采用基于相位式测距的激光测距仪采集文物内腔点云。相位式测距是对发射光波进行正弦调制,通过测量发射光波和接收光波的相位差计算测量距离,原理如图 1 所示,图中下半部分为经正弦信号调

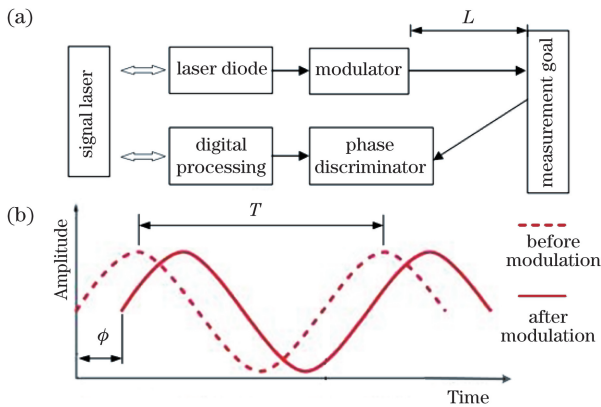


图 1 相位式测距原理图。(a)测距原理过程;(b)相位变化图
Fig. 1 Principle of phase ranging. (a) Principle process of ranging; (b) phase change

制后的光波。其公式为

$$2L = \frac{\varphi c T}{2\pi}, \quad (1)$$

式中: L 为测量距离; c 为光在空气中传播的速度; T 为正弦调制信号的周期; φ 为发射波与接收波的相位差。

内腔扫描示意图如图 2 所示,内腔数据采集前,升高激光测距仪到原点位置(图中虚线位置),此时激光测距仪的激光发射点到转台平面的距离值为 H_1 。将文物摆放到转台的中心位置,激光测距仪向下运动,下降过程中通过距离传感器探测采集杆顶端与花瓶底部间的距离,到达设定距离后导轨停止运动,内腔采集前准备工作完成。此时,花瓶位于激光测距仪的正下方,激光测距仪竖直向下发射激光束,光束经过与转台平面成 45° 放置的反光镜折射后打到花瓶的内腔壁上,完成单次测距工作,输出测量距离值 D 。设 H_3 为激光测距仪激光发射口到采集杆底部镜片上激光反射点的距离,此值为固定值,在安装采集杆底部的反光镜片前,可以先用激光测距仪测量出 H_3 值。将距离值 D 与 H_3 作差,可得到激光反射点到花瓶内腔的距离值 D_1 。 H_2 为激光测距仪位于原点时激光发射点到当前位置激光发射点的距离,其值为导轨的升降高度,可以直接从驱动器中读出。建立内腔测量坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$,原点 O_i 位于转台的回转轴与转台平面的交点, X_i 轴正方向垂直与转台平面竖直向下, Z_i 轴正方向指向里, Y_i 轴方向根据右手定则确定。设转台每旋转角度 $\Delta\alpha$ 后激光测距仪测距一次,并计算距离值 D_1 ,当转台转过一周后,导轨带动测距仪向上移动步长 ΔH 。重复以上采集过程,可以完成对整个花瓶内

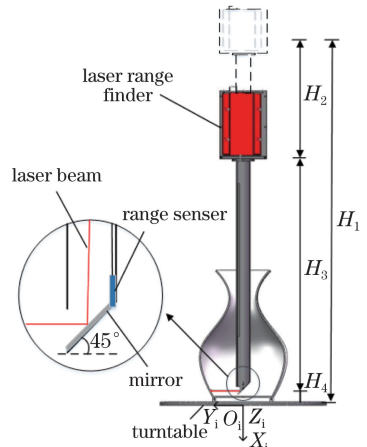


图 2 内腔采集原理图
Fig. 2 Principle of inner cavity acquisition

腔数据的采集。设 H_4 为首次测量点云的 X_i 值, 则 $H_4 = H_1 - H_2 - H_3$ 。根据设定的转台旋转角度 $\Delta\alpha$ 与步长 ΔH , 求得直角坐标系下内腔点云坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 。坐标值的计算公式为

$$\begin{cases} X_i = H_1 - H_2 - H_3 - m\Delta H \\ Y_i = (D - H_3) \sin(n\Delta\alpha) \\ Z_i = (D - H_3) \cos(n\Delta\alpha) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n 为激光测距仪每圈测量次数; m 为直线导轨上移次数。

2.2 外形采集原理

本研究采用基于三角法测距的线结构光激光扫描仪进行外形点云数据采集。激光三角法测距的原理如图 3 所示, 其中: θ 为入射激光与透镜光轴之间的夹角; O 点为透镜中心; S 与 S_1 分别为测量物的实际尺寸和在 CCD(电荷耦合元件) 成像面上的尺寸; F_1 和 F_2 在光学系统确定后为定值。根据三角形相似原理可得

$$\frac{|AB|}{S_1} = \frac{|BO|}{F_2}, \quad (3)$$

由(3)式可推导出

$$S = \frac{F_1 S_1}{F_2 \sin \theta}. \quad (4)$$

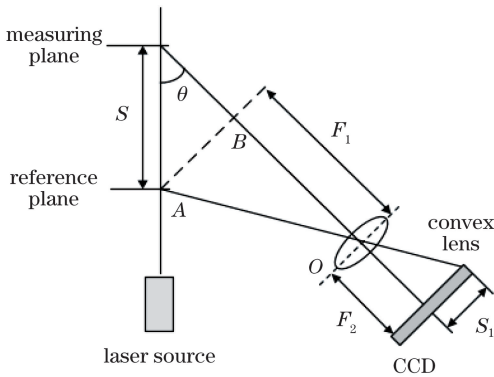


图 3 激光三角法测距原理

Fig. 3 Principle of laser triangulation ranging

为了减小花瓶表面镜面反射与遮挡带来的问题, 采集外形点云时, 采用了 360° 旋转花瓶扫描的方法。外形采集示意图见图 4, 将激光扫描仪安装在可竖直运动的直线导轨上, 位于转台左侧。激光扫描仪自身的坐标系为 $OXYZ$, 其原点 O 与激光发射口的距离为 L_2 , X 轴正方向竖直向下, Z 轴正方向指向激光发射口, Y 轴方向根据右手定则判定。建立外形扫描的坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$, 坐标系原点 O_e 位于转台回转轴与转台平面的交点, X_e 方向竖直向下, Z_e 指向激光扫描仪, Y_e 根据右手定则确定。其中 OXZ 与 $O_e X_e Z_e$ 两个平面共面。 L_1 为 Z 轴方

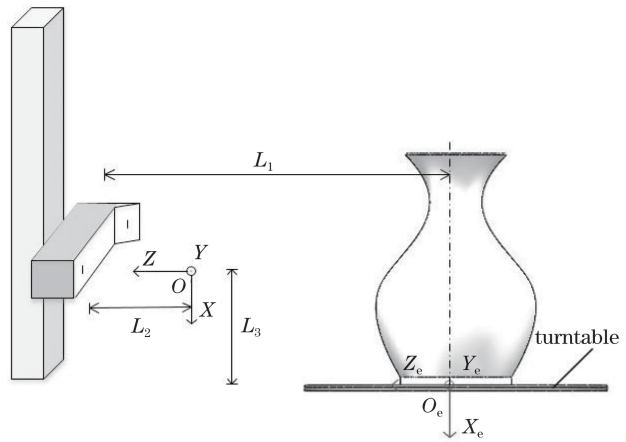


图 4 外形采集原理示意图

Fig. 4 Principle of appearance acquisition

向上激光发射口与原点 O_e 间的距离。 L_1 和 L_2 均为固定值, L_1 值可以预先标定出来, L_2 为激光扫描仪的参数值。

外形扫描时, 转台转动的同时触发激光扫描仪投射激光条采集外形点云, 转台转过一周后完成文物的外形扫描。设 d 为激光扫描仪扫描花瓶外形某点时 Z 方向的坐标值, D_2 为此点在 $O_e X_e Y_e Z_e$ 坐标系下到 X_e 轴的距离, 当转台转过任意角度 α 时, 根据两个坐标系之间的关系可得

$$D_2 = L_1 - L_2 + d. \quad (5)$$

扫描一周后得到的外形点云数据是基于 $OXYZ$ 坐标系的平铺点云, 为方便与内腔点云坐标的统一, 需要将点云转换到 $O_e X_e Y_e Z_e$ 坐标系下, 转换矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 - L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

然后再将平铺点云拟合合成回转体, 坐标变换矩阵如下

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & D_2 \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & D_2 \cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: L_3 为原点 O 与原点 O_e 在 X 轴方向上的距离值。

为方便内腔点云坐标与外形点云坐标的统一转换, 完成内腔点云数据采集后, 不可变动花瓶在转台的位置, 以保证在采集花瓶内腔与外形时花瓶的位置不变。

2.3 纹理采集原理

一般的相机镜头存在“远小近大”这一视差变

形,对于文物凹凸外形,这会导致拍摄采集的纹理图像失真变形。为此,本研究采用远心镜头来完成纹理信息的采集,图5为物方远心镜头的成像原理图,主光线通过远心镜头在像平面上的成像大小不受物距的影响,采用物方远心镜头的相机,可以确保在一定物距范围内纹理拍摄无视差变形,即成像的放大率为常数。

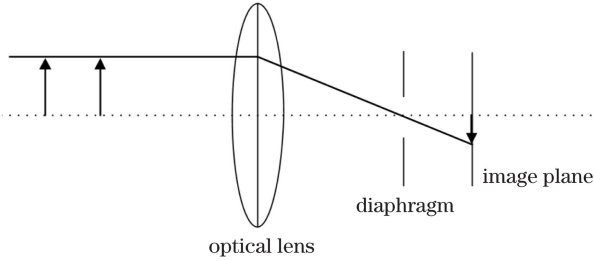


图5 远心镜头原理

Fig. 5 Principle of telecentric lens

在纹理采集过程中,转台每转过设定的角度 β ,触发相机在此角度采集一幅图像,转台转过一周后共采集 $360/\beta$ 幅图像。考虑到远心镜头的视场高度有限,可能小于被测花瓶的高度,所以需要将通过将相机和镜头升高 Δd 后进行第二次采集, Δd 计算公式为

$$\Delta d = \frac{Np}{x}, \quad (8)$$

式中: N 为单幅图像高度方向上的像素个数; p 为单个像素的大小; x 为紧凑型远心镜头的放大倍率。

纹理采集原理如图6所示,每采集一幅图像后取图像正中间的 M 列像素,把获取的所有角度位置的 M 列像素依次拼接在一起,形成整个外形的纹理展开图。其中所取像素列数 M 根据文物瓶身最大

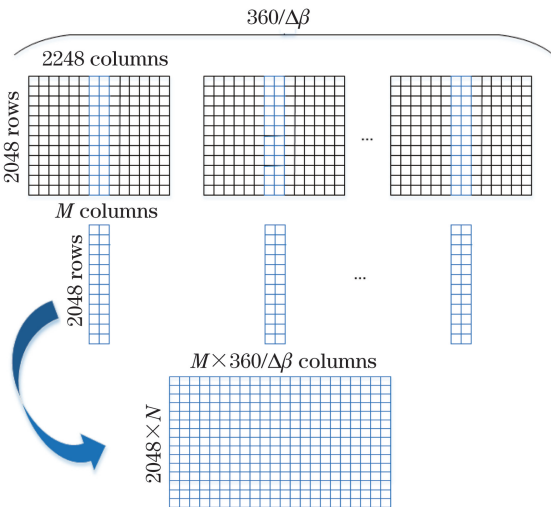


图6 纹理采集原理示意图

Fig. 6 Principle of texture acquisition

处直径 d 和所设置的旋转角度 β 计算得到, d 由2.2节采集的花瓶外形点云处理后得到, M 的计算公式为

$$M = \frac{\pi d \beta}{360x}. \quad (9)$$

3 实验及结果分析

3.1 原型测量系统的研制

根据以上数据采集原理,自行研发了软硬件原型系统,实现了花瓶类文物的三维重建。考虑到测量系统的便携性,采用了模块化设计,可以方便地带到博物馆现场对文物进行三维重建。原型测量系统的实物图如图7所示,按照不同的采集模块可以将文物采集分为内腔采集、外形采集和纹理采集三个部分。测量系统的主要硬件组成部分包括导轨、激光线扫描仪、激光测距仪、远心镜头、相机、转台和传感器等,箱体内部安装了所有运动装置的驱动器以及其他电路。其中旋转平台选用的是台湾台银公司的TMS12,精度为 $\pm 45''/ + 10\%$;导轨采用台湾台银公司的KK6005P-400A1-F0,定位精度为0.02 mm;内腔扫描的测距仪采用德国MIDEKER公司的DD10-PU10FD40-A,测量精度为0.2 mm;外形点云采集的线扫描仪选用加拿大LMI公司的Gocator2340,纹理采集采用加拿大PointGrey公司的BFLY-U3-50H5C工业相机搭配美国OPTO公司的TRRC12096系列紧凑型远心镜头。

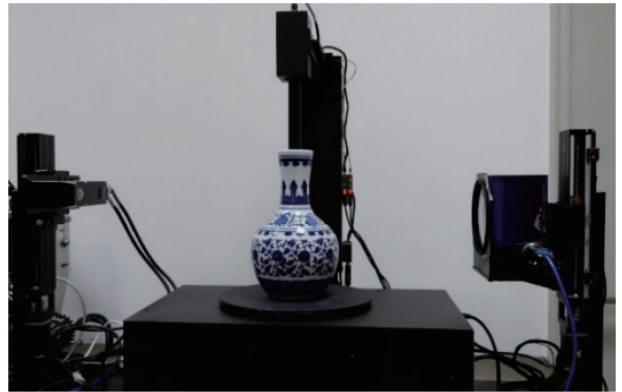


图7 系统实物图

Fig. 7 Prototype of measuring system

本套设备可以无接触地对高度和直径小于400 mm,内腔口径大于30 mm的器型文物进行快速三维数字化,其中数据采集和处理过程均可实现自动化,并且可对每步的数据处理结果进行可视化。文物总体三维模型重建精度在0.5 mm以内,其中外形的重建精度在0.2 mm以内。

3.2 数据采集实验与分析

为了检验上述方法的正确性,进行了文物花瓶三维重建实验。完成数据采集后,再进行点云处理,并完成数据的三角化和纹理映射。其采集、处理与实体化流程如图 8 所示。

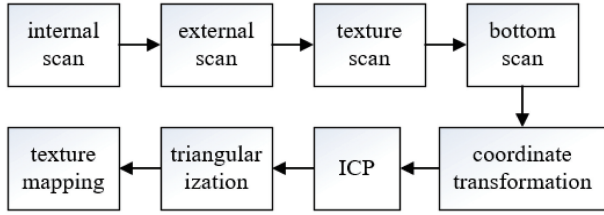


图 8 采集流程图

Fig. 8 Flow chart of acquisition

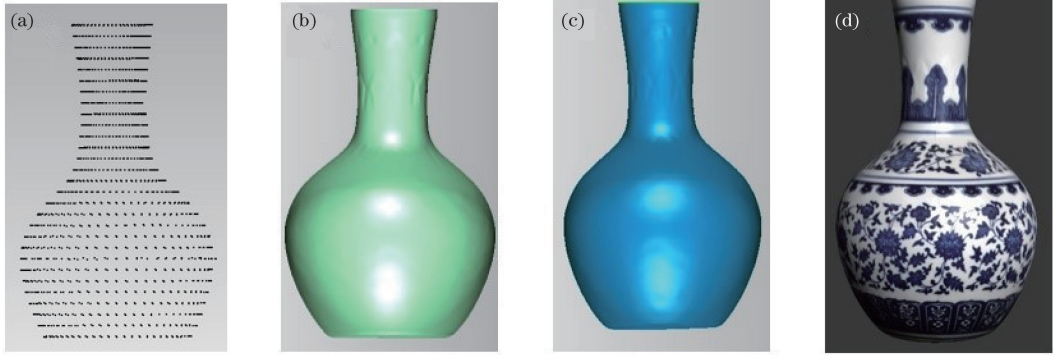


图 9 三维点云与模型。(a)内腔点云;(b)外形点云;(c)三维模型;(d)纹理映射

Fig. 9 3D point clouds and model. (a) Point cloud of inner cavity; (b) point cloud of appearance; (c) 3D model; (d) texture mapping

完成文物三维模型重建后,可以对三维模型作进一步分析,如点云分层、提取轮廓线和模型剖分等。这对文物的研究具有很大意义。实验结果表明,上述原理方法可对回转体类文物内腔、外形和纹理数据进行全方位的数据采集,并完成三维重建,实现对重建模型的数据分析。

4 误差与标定

4.1 误差分析与标定方法

由于机械加工误差和装配误差,不能按照设计值严格保证内腔和外形点云坐标系的原点完全重合,在对齐时内外形点云同心度会出现误差。在内腔的测量中,激光束发射点到反光镜上折射点的距离很难通过调整机械结构来严格保证,即 $D_1 = D - H_3$ 中的 H_3 也存在误差,故内腔点云坐标值也会出现误差。基于线结构光的激光扫描仪激光发射点与转台回转中心的距离 L_1 也不能严格保证,所以计算式 $D_2 = L_1 - L_2 + d$ 中存在误差。为了消除在

由于线激光扫描仪的扫描高度有限,对于在 X 方向上大于扫描仪测量范围的文物需要进行两次采集来获取外形完整点云,文物底部也是单独完成采集,所以采集的文物外形点云一般由三部分组成。通过 ICP(iterative closest point)算法配准,可完成外形点云的对齐^[14-15]。借助点云处理软件 Geomagic 对内腔与外形点云作去噪平滑处理并三角化,得到完整的三维模型。所得结果如图 9 所示,图 9(a)为内腔点云,图 9(b)为外形点云,图 9(c)为将内腔和外形点云坐标统一并实体化后的三维模型。借助 VTK 开源库将采集的纹理图片映射到图 9(c)的三维模型上,纹理映射结果如图 9(d)所示。至此完成文物全部信息的三维重建。

内外直径及同心度上的误差,本研究通过标定来补偿回转体文物外形与内腔采集时存在的误差。通过扫描一个内外同轴心且直径已知的高精度圆环形标定物,对内腔与外形的部分点云进行圆拟合,求出测量的半径值。对比标定物的内外径标准值,求出内外测量半径值误差 $\Delta R_i, \Delta R_o$;由两片点云圆心在 Y, Z 轴坐标方向上的差值得到内外点云的相对偏差 $\Delta Y, \Delta Z$ 。 $\Delta R_i, \Delta R_o, \Delta Y$ 和 ΔZ 的计算式为

$$\begin{cases} \Delta R_i = R_i - R_{i1} \\ \Delta R_o = R_o - R_{o1} \\ \Delta Y = C_{yi} - C_{ye} \\ \Delta Z = C_{zi} - C_{ze} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: R_i, R_o 分别为标定物内外径的标准值; R_{i1}, R_{o1} 为标定物内外径的测量值; C_{yi}, C_{zi} 为测量内腔点云的中心坐标值; C_{ye}, C_{ze} 为测量外形点云中心的坐标值。然后将得到的误差值 $\Delta R_i, \Delta R_o$ 和偏差值 $\Delta Y, \Delta Z$ 补偿到三维模型的点云中,完成该设备的标定。

4.2 标定实验与结果分析

因为花瓶文物的真实尺寸未知,为了检验上述标定方法的正确性和精度,采用内外直径及同轴度精度在 0.02 mm 以内的轴套,对该设备进行标定。如图 10 所示,轴套 1 内外直径分别为 50 mm 和 65 mm,轴套 2 的内外直径分别为 40 mm 和 50 mm。



图 10 轴套

Fig. 10 Shaft sleeve

在该设备未标定补偿的情况下多次测量轴套 1 的内外直径,测量结果如表 1 所示。用轴套内外径的真实值减去每次的测量值,可以得到每次的测量误差,计算多次测量误差的均值,可得内外径的误差补偿值 $\Delta R_i, \Delta R_o$ 。将所有误差值 $\Delta Y, \Delta Z, \Delta R_i, \Delta R_o$ 补偿到重建模型的算法中,用标定后的测量系统测量轴套 1 和轴套 2,将结果点云导入第三方软件 Geomagic 中进行圆柱体拟合,验证补偿后点云的直径值。其结果如表 2 所示,标定后的误差在 0.5 mm 以内,满足精度要求。

表 1 标定前数据

Table 1 Pre-calibration data mm

Item	Real	Measured	Error	Mean error
First shaft		62.582	2.418	
sleeve, external diameter	65	62.726	2.274	2.380
First shaft		52.030	-2.030	
sleeve, internal diameter	50	52.180	-2.180	-2.050
diameter		51.960	-1.960	

5 结 论

针对花瓶等回转体类文物,提出了一种非接触式三维数字化的方法,并介绍了测量系统的结构与工作原理,完成了对具有回转体性质文物的整体三维模型重建。进一步对模型进行剖分、提取母线、提取分层数据,完成了对重建文物模型的数据分析。最后针对设备中机械加工及装配带来的误差进行了

表 2 标定后数据

Table 2 Post-calibration data mm

Item	Real value	Measured	Error	Mean error
First shaft		64.868	0.132	
sleeve, external diameter	65	64.909	0.091	0.116
First shaft		50.340	-0.340	
sleeve, internal diameter	50	50.290	-0.290	-0.330
Second shaft		49.852	0.148	
sleeve, external diameter	50	49.912	0.088	0.119
Second shaft		39.650	0.350	
sleeve, internal diameter	40	39.730	0.270	0.337
diameter		39.610	0.390	

分析与补偿。实验结果表明:该设备对文物的整体重建精度在 0.5 mm 以内,其中外形的重建精度在 0.2 mm 以内。测量装置采用模块化设计,方便运输,可满足对博物馆文物进行现场三维数字化的需求。

参 考 文 献

- [1] Wang R S, Ren H E, Qiu Z W. A survey on the technology on cultural relic 3D reconstruction [J]. Science & Technology Information, 2007(34): 334, 433.
王若苏,任洪娥,邱兆文. 文物三维重建技术综述 [J]. 科技信息, 2007(34): 334, 433.
- [2] Xu J, Jiang S P, Yang L H, *et al.* Digital photogrammetry for thermal deformation of satellite structures in normal environment [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2667-2673.
许杰,蒋山平,杨林华,等. 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2667-2673.
- [3] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515004.
王珊,徐晓. 基于双目单视面的三维重建 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515004.
- [4] Geng X, Qu X H, Jiang W, *et al.* Rapid measurement and modeling technologies of large pipes and their application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 338-343.
耿欣,曲兴华,江炜,等. 大型管道快速测量与建模技术研究及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 338-343.
- [5] Chen S C, Dai H Y, Wang C, *et al.* Method for filtering dense noise from laser scanning data [J].

- Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 062801.
- 陈世超, 戴华阳, 王成, 等. 激光扫描数据的密集噪声剔除方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 062801.
- [6] Levoy M, Ginsberg J, Shade J, *et al.* The digital Michelangelo project[C] // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, July 23-28, 2000, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 2000: 131-144.
- [7] Liu J T, Zhang A W. The application of 3D digital in sanxingdui ruins [J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition), 2007, 28(4): 68-71.
- 刘江涛, 张爱武. 三维数字化技术在三星堆遗址中的应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(4): 68-71.
- [8] Liu J T, Zhang A W, Zang K. The application of 3D digital in archaeology [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(4): 654-657.
- 刘江涛, 张爱武, 臧克. 三维数字化技术在考古中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(4): 654-657.
- [9] Song D W, Hu G Y. Leica HDS is used in the digital project of the No. 2 pit of Qin terra-cotta army[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006(6): 69-70.
- 宋德闻, 胡广洋. 徕卡 HDS 应用于秦俑二号坑数字化工程[J]. 测绘通报, 2006(6): 69-70.
- [10] Long X, Zhong Y X, Li R J, *et al.* 3-D surface integration in structured light 3-D scanning [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(4): 477-480.
- 龙玺, 钟约先, 李仁举, 等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 477-480.
- [11] Yang P B, Deng L J, Chen Y, *et al.* Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204004.
- 杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204004.
- [12] Tian Q G, Ge B Z, Du P, *et al.* Measurement of human figure size based on laser 3D scanning [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 84-88.
- 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 84-88.
- [13] Ren Q, Diao C Y, Lu D M, *et al.* Three-dimensional reconstruction of cultural relics based on structural light[J]. Dunhuang Research, 2005(5): 102-106.
- 任卿, 刁常宇, 鲁东明, 等. 基于结构光的文物三维重建[J]. 敦煌研究, 2005(5): 102-106.
- [14] Wei S B, Wang S Q, Zhou C H, *et al.* An iterative closest point algorithm based on biunique correspondence of point clouds for 3D reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0515003.
- 韦盛斌, 王少卿, 周常河, 等. 用于三维重建的点云单应性迭代最近点配准算法[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0515003.
- [15] Wang X, Zhang M M, Yu X, *et al.* Point cloud registration based on improved iterative closest point method[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 2068-2077.
- 王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2068-2077.