

# 多传感器点云拼接误差的修正方法

杨玉杰<sup>1,2</sup> 田庆国<sup>1,2</sup> 葛宝臻<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 为了减小激光三维扫描仪多传感器点云拼接误差的影响,提出了一种以圆柱体作为标准物体逐层修正拼接误差的简便方法。对标准物体扫描且拟合出各截面圆心坐标,并利用圆柱体实际半径值求得截面真值圆函数,将每层测量数据向真值圆函数进行平移刚性变换,求得该层的拼接误差和修正值。为了减小随机误差的影响,利用多次重复测量求得平均修正值,并用求出的平均修正值分别对圆柱体、长方棱柱体和石膏人体模特的不同位置的扫描结果进行了修正验证实验。从截面图的直观观察和定量数据测量两方面比较了修正前后的点云拼接效果,结果表明,修正后点云拼接更加光滑平顺,数据测量相对误差有显著降低。

**关键词** 传感器; 误差修正; 平移变换; 三维人体扫描

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0314002

## Correction Technique for Joint Error of Multi-Sensor Point Cloud

Yang Yujie<sup>1,2</sup> Tian Qingguo<sup>1,2</sup> Ge Baozhen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science of Ministry of Education,  
Tianjin 300072, China

**Abstract** In order to reduce the influence of the joint error of three-dimensional (3D) laser scanner's multi-sensor point cloud, a simple method to correct the joint error layer by layer is presented, which is based on a columnar standard detected object. The standard detected object is scanned, and the scanning data are fitted to get each section's coordinate of the circle center. The section's true value circular function is got by using the actual radius of the cylinder. Translational rigid transformation between each layer's measured data and true value circular function is done to get this layer's joint error and corrected value. In order to reduce the influence of random error, repeated measurements are done, and the average corrected value is calculated. Then, some verification experiments are conducted on the measured data of cylinder, cuboid and plaster mannequin, which are placed in different locations. The comparison of stitching result between before and after the correction is made from two aspects of ocular observation and quantified data analysis of sampling sections. The results show that the corrected point cloud can joint together more smoothly, and the relative errors of measured data become lower prominently.

**Key words** sensors; error correction; translational transformation; three-dimensional body scanning

**OCIS codes** 150.4232; 040.1520; 110.6880; 120.5800

收稿日期: 2013-08-28; 收到修改稿日期: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61027012, 61177002)

作者简介: 杨玉杰(1987—),女,硕士研究生,主要从事三维人体扫描方面的研究。E-mail: 450145235@qq.com

导师简介: 葛宝臻(1964—),男,博士,教授,主要从事光电检测与信息处理、激光粒子测量和激光三维彩色数字化技术等方面的研究。E-mail: gebz@tju.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引言

激光三维(3D)扫描技术通常是基于激光三角法<sup>[1]</sup>原理,由位于不同扫描轴上的多个传感器同步扫描并采集被测物体图像,通过图像处理提取光带和预先标定好的数据<sup>[2]</sup>,由多个传感器的点云数据拼接<sup>[3]</sup>为一个完整的三维点云图像,得到被测物体的三维信息<sup>[4]</sup>。由于激光扫描技术多传感器特点和扫描装置的复杂结构,通常情况下得到的物体的三维点云信息会产生误差,误差来源是多样的,一般认为主要为机械装置和光学系统的调整误差、标定误差和光带图像中心的提取误差等,此外,由于原理公式的非线性,物体在不同的扫描位置结果的分辨率不一致,也会导致三维点云出现误差。这些误差可以从两方面表现出来:直观表现在物体扫描结果截面上的点云不能光滑、平滑地拼接在一起;表现在截面定量测量结果与真实数据存在误差。为了补偿扫描误差,目前比较典型的有三种方法:第一种把标准球面和标准平面组合在一起作为参考物体,使用一个线激光扫描器进行扫描,推导出表征误差与扫描深度和投射角度之间关系的经验公式,用其对误差进行修正和补偿<sup>[5]</sup>;第二种把加工的标准平面作为检测物体,用夹持在三维坐标测量机(3D CMMS)上的激光扫描器进行扫描,通过确定内面角、外面角和扫描深度对激光扫描器的系统和随机误差的影响进行校正<sup>[6]</sup>;第三种把5个不同尺寸的块规安装在支架的不同高度上,用人体扫描仪进行测量,然后变换支架在扫描区域的放置位置,再进行测量,最终根据多组扫描数据建立宽度和深度两个方向的误差模型,对扫描结果进行修正<sup>[7]</sup>。

本文从激光扫描仪调试的实际出发,希望寻找一种有效的误差补偿办法,以此来提高激光三维扫描仪的测量精度,而且,所建立的补偿方法能够对整个扫描范围内位于任何位置物体的扫描结果都可补偿。要进行误差补偿,必须有已知尺寸的标准物体,考虑误差补偿必须在扫描仪调试现场使用,因此标准物体既要容易加工且精度高,又要方便运输和安装调整。基于以上考虑,本文选择空心铝合金圆柱体作为标准物体,根据三维扫描仪逐层获取点云的特点,对位于扫描区域中心标准物体扫描且拟合出每层截面圆心坐标,并利用圆柱体实际半径值求得每层截面真值圆函数,将每层测量数据向真值圆函数进行平移刚性变换,求得该层的修正值,而且,采用多次重复测量求平均修正的方法减小随机误差的影响,真正将系统误差补偿修正。实际扫描时,只要

将扫描结果的坐标值逐层与各自的修正值相加,就可实现拼接误差修正。

## 2 多传感器点云拼接误差的修正原理

以本课题组研制的激光三维人体扫描仪为例,如图1所示,该仪器包括4根立柱,每根立柱上安装一组传感器,每组传感器由一个线激光光源和上下两个对称分布的CCD构成。4个激光光源位于同一水平面,在人体表面形成一个环带。在同步扫描系统作用下,4组传感器从上到下按一定扫描间隔分层扫描。扫描范围直径为1000 mm、高度为2000 mm,水平分辨率为2 mm,深度分辨率为2 mm,垂直分辨率为4 mm,扫描时间为16.7 s。



图1 三维人体扫描仪

Fig. 1 3D body scanner

假设三维人体扫描仪获得的三维点云坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)$ 。其中 $X_w$ 和 $Y_w$ 是通过CCD采集光带图像经中心线提取得到像面坐标后由标定参数进行变换得到<sup>[8]</sup>。 $Z_w$ 由扫描系统竖直机构得到,得到的三维点云是分层的,同层点云的 $Z_w$ 相同。多传感器拼接误差主要体现在该层的 $X_w$ 和 $Y_w$ 产生的误差,即上下CCD的点云数据不能重合和相邻CCD的点云数据不能光滑地拼接。根据误差理论<sup>[9]</sup>,误差分为随机误差和系统误差。对于随机误差通常采用多次重复测量求平均的方法减小其影响,而对于系统误差通常采用修正补偿方法降低其影响。误差值为测量值与真值之差,而误差值的负数即为修正值。对于 $n$ 次重复测量,所得结果与真值求差再求负数可得 $n$ 个修正值,对其求平均得到平均修正值公式为<sup>[10]</sup>

$$\bar{\beta}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{xi} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{xi} + \delta_{xi}), \quad (1)$$

$$\bar{\beta}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{yi} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{yi} + \delta_{yi}), \quad (2)$$

式中 $\bar{\beta}_x$ 和 $\bar{\beta}_y$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的平均修正值, $\beta_{xi}$ 和 $\beta_{yi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )分别为第 $i$ 次测量时 $x$ 和 $y$ 方向的修正值, $\Delta_{xi}$ 和 $\Delta_{yi}$ 分别为第 $i$ 次测量时 $x$ 和 $y$ 方向

的系统误差,  $\delta_{xi}$  和  $\delta_{yi}$  分别为第  $i$  次测量时  $x$  和  $y$  方向的随机误差。

根据以上论述,修正多传感器的拼接误差时,根据测量值与真值的关系便可以得到每个截面上拼接误差的规律以及平均修正值。1) 确立标准参考物体,由于系统误差不因被测物体的不同而改变,而标准圆柱体的截面为圆,产生误差则变化为椭圆,圆和椭圆的拟合较之方形和不规则形状更为简单,因此,选用圆柱体作为标准参考物体。无误差时,圆柱体每个截面为圆且圆心坐标相同,所以确定圆心的位置  $(a, b)$  后可以利用机械加工得到的半径  $r$ , 得到真值圆函数为

$$x^2 + y^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 - r^2 = 0. \quad (3)$$

2) 找到每层测量值与真值圆函数之间的变换关系。常用的空间变换中<sup>[11]</sup>,刚体变换是一种典型的线性变换,即只有物体的位置(平移变换)和朝向(旋转变

换)发生改变,而不对像素间的相对空间关系作任何改变。将单个 CCD 的单层测量结果作为整体向真值圆函数做刚性变换,所得的平移和旋转参数即为修正值。假设旋转  $M$  角度,横坐标平移  $D_1$ ,纵坐标平移  $D_2$  后能够 and 真值圆函数最接近,有误差的测量值为  $\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}$ ,修正后为  $\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}$ , 则

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos M & -\sin M \\ \sin M & \cos M \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

所以

$$x_2 = (\cos M \times x_1 - \sin M \times y_1) + D_1, \quad (5)$$

$$y_2 = (\sin M \times x_1 + \cos M \times y_1) + D_2. \quad (6)$$

修正后坐标  $x_2$  和  $y_2$  与真值圆拟合函数上相应点之差的平方和称为残差平方和,其值越小,代表拟合程度越好。残差方程为

$$\nu = (\cos M \times x_2 - \sin M \times y_2 + D_1)^2 + (\sin M \times x_2 + \cos M \times y_2 + D_2)^2 - 2a \times (\cos M \times x_2 - \sin M \times y_2 + D_1) - 2b \times (\sin M \times x_2 + \cos M \times y_2 + D_2) + a^2 + b^2 - r^2. \quad (7)$$

代表残差平方和的目标函数为

$$f(M, D_1, D_2) = \sum_{i=1}^n \nu_i^2, \quad (8)$$

式中  $n$  为修正后的点的个数,  $\nu_i$  为第  $i$  个修正后点的残差方程,由此可得一个线性方程组,求解方程。可得系数  $M, D_1, D_2$ 。为了选择采用的刚性变换的类型,任意选取圆柱体测量数据中的某一层的 CCD1 的数据,使用既有旋转又有平移、只有旋转无平移和只有平移无旋转三种刚性变换方法向真值圆函数进行变换,求出修正值  $M, D_1, D_2$  以及变换后坐标与真值圆函数上对应点的残差平方和  $\sum_{i=1}^n \nu_i^2$ , 如表 1 所示。从表中数据可以看出,采用旋转加平移和只平移变换残差平方和相同,而只有旋转变换残差平方和较大,约为另两种情况的 32.952 倍,所以不采用

只旋转变换。为了从残差平方和相同的两种方法中选择一种最有效的,任意选择圆柱和长方棱柱的扫描数据中的一层,分别用两种方法进行修正,修正效果如图 2 和图 3 所示(不同 CCD 的点云分别用不同的颜色显示)。从图中可以看出只用平移变换对两种物体的测量值进行修正的效果都比较好,而既有旋转又有平移的方法对不涉及方向的圆形有比较好的修正效果,但是对于方形,由于涉及方向,修正效果要差于圆形。此外,由于复杂程度不同,只有平移的方法修正时间短于旋转加平移的方法。综合考虑,最终选择用时短且效果好的平移的方法求取每层测量值与真值圆函数之间的变换关系。3) 利用变换关系分别求出多次测量结果的修正值及平均修正值,对扫描结果进行逐层修正。

表 1 不同刚性变换类型求出的修正值及残差平方和

Table 1 Corrected value and residual sum of squares of different rigid transformation types

Rigid transformation type	$M / (^{\circ})$	$D_1$	$D_2$	$\sum_{i=1}^n \nu_i^2$
Rotation and translation	1.211	-0.003	0.002	$1.237 \times 10^{-6}$
Rotation	3.271	0.000	0.000	$4.076 \times 10^{-5}$
Translation	0.000	-0.003	0.003	$1.237 \times 10^{-6}$

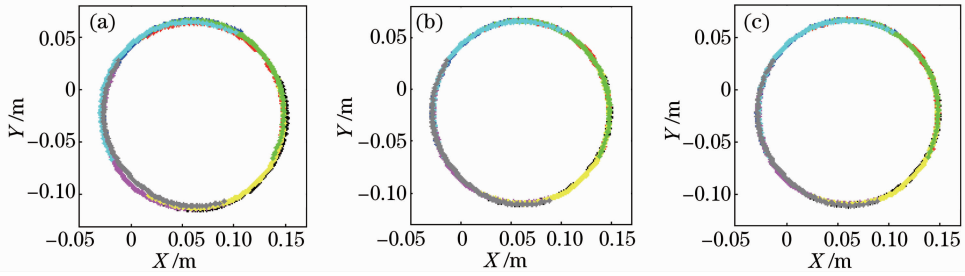


图2 不同刚性变换方法对圆柱截面数据修正效果比较图。(a)修正前;(b)旋转平移修正后;(c)平移修正后  
Fig. 2 Corrected effect comparison chart of cylinder section data with different rigid transformation types.

(a) Before correction; (b) after translation and rotation correction; (c) after translation correction

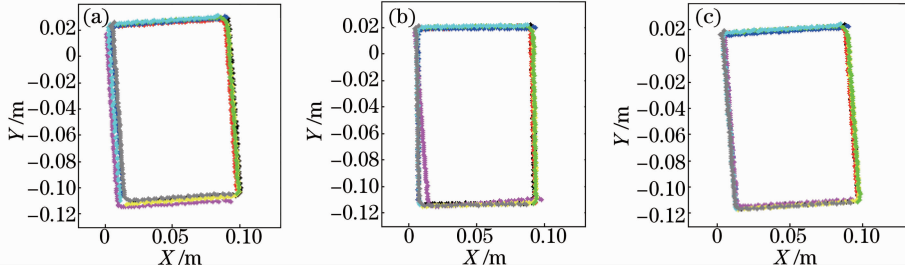


图3 不同刚性变换方法对立柱截面数据修正效果比较图。(a)修正前;(b)旋转平移修正后;(c)平移修正后  
Fig. 3 Corrected effect comparison chart of cuboid section data with different rigid transformation types.

(a) Before correction; (b) after translation and rotation correction; (c) after translation correction

### 3 实验及结果分析

为了验证算法能否有效,以图1所示三维人体扫描仪作为检测平台,采用本文的修正算法,分别对铝合金圆柱体、长方体以及石膏人体模特进行修正验证实验。

#### 3.1 平均修正值的确定

标准物体为铝合金空心圆柱体,如图4所示,其高度为2000 mm,横截面圆直径设计值为176.5 mm,实际测量值为176.29~176.38 mm,在整个高度范围内误差为-0.21~-0.12 mm。扫描区域中的三个不同位置如图5所示,把圆柱体放置在中间位置 $s_1$ 处,进行10次重复扫描,其中一次的扫描结果如图6所示。把每层扫描数据进行圆拟合求得圆心坐标,将所有层圆心坐标求平均得到平均圆心坐标,并用圆柱

体加工半径为截面真实圆半径,求得真值圆函数,然后把每层数据向真值圆函数进行平移刚性变换,求得每层的修正值。把重复求得的10组修正值求平均,得到每层的平均修正值。

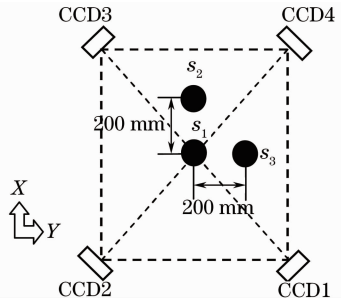


图5 扫描区域中的三个不同位置  
Fig. 5 Three sites in the scanning area

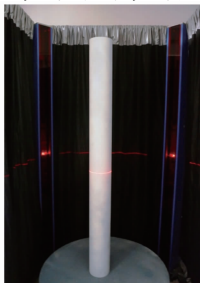


图4 标准圆柱体  
Fig. 4 Standard cylinder

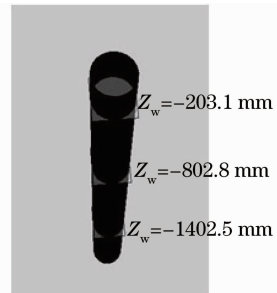


图6 圆柱扫描结果及选取的三个截面  
Fig. 6 Cylinder scanning data and selected three sections

### 3.2 不同位置圆柱体扫描数据修正实验及结果

为了验证 3.1 节求出的平均修正值是否对不同位置的圆柱体扫描数据具有好的修正效果,把标准圆柱体放置在图 5 中的  $s_2$  和  $s_3$  位置进行扫描,并用求得的修正值对扫描结果进行补偿修正。为了对修正前后点云拼接效果进行比较,对  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  三个位置的扫描结果,从第一层开始,  $Z_w$  每隔 200 mm 进行一次抽样,得到 9 个截面的数据,用 Matlab 软件对每个截面数据进行外凸壳法非线性最小二乘<sup>[12]</sup>圆拟合求得直径,结果如表 2 所示,其中  $D$  为直径,  $R_e$  为相对误差。从表 2 中数据看出:  $s_1$  位置补偿前后的相对误差平均值由 3.4%降低为 1.3%;  $s_2$  位置补偿前后的相对误差平均值由 2.9%降为 1.3%;  $s_3$  位置补偿前后的相对误差平均值由 2.9%降为 1.1%。虽然补偿后截面直径的误差有所减小,但与实际值相比仍有 2 mm 左右的误差,且误差总是正误差,即测量值总是大于实际值。分析原因:一是

补偿方法是利用平移刚性变换法将每层测量数据向真值圆函数进行逼近,会有残留误差;二是截面直径的测量是先采用外凸壳法<sup>[13]</sup>测得截面周长,再由周长求得直径,外凸壳法会导致截面直径相对于真实值偏大<sup>[14]</sup>。可以采用内凸壳法和外凸壳法分别测量截面点云的外部轮廓和内部轮廓直径,再求取两个测量值的平均值作为最后测量值,会更接近实际值,表 3 给出了表 2 中  $s_1$  位置处修正后截面直径分别用内凸壳法和外凸壳法求得的测量值及其平均值,可以看出,平均后的结果误差较小,更加接近真实值。

为了直观观察修正效果,给出  $s_3$  位置对应图 6 所示三个截面修正前后的对比图,如图 7 所示,可见看到,修正后多传感器数据的拼接状况明显好转。说明采用 3.1 节得到的平均修正值对不同位置的圆柱体扫描误差的补偿是有效的,其补偿效果与圆柱位置无关。

表 2 三个位置修正前后圆拟合直径对比列表

Table 2 List of circle fitting diameter comparison between before and after correction in three sites

$Z_w$ /mm	Before correction at $s_1$		After correction at $s_1$		Before correction at $s_2$		After correction at $s_2$		Before correction at $s_3$		After correction at $s_3$	
	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%
-0.0	186.1	5.4	179.0	1.4	184.2	4.4	178.6	1.2	184.8	4.7	178.7	1.2
-203.1	183.6	4.0	178.8	1.3	183.9	4.2	179.0	1.4	183.4	3.9	178.6	1.2
-403.0	182.9	3.6	178.6	1.2	182.1	3.2	178.6	1.1	181.8	3.0	178.3	1.0
-602.9	183.7	4.1	178.7	1.3	181.8	3.0	178.8	1.3	182.2	3.2	178.8	1.3
-802.8	182.1	3.2	178.9	1.4	180.8	2.4	179.0	1.4	180.8	2.4	178.3	1.0
-1002.7	181.1	2.6	178.9	1.4	180.7	2.4	178.9	1.4	180.3	2.1	178.5	1.1
-1202.6	181.3	2.7	178.8	1.3	181.1	2.6	178.7	1.2	180.9	2.5	178.2	1.0
-1402.5	181.4	2.8	178.9	1.4	179.7	1.8	178.7	1.2	180.1	2.1	178.4	1.1
-1602.4	180.6	2.3	178.5	1.1	179.7	1.8	178.5	1.1	179.6	1.8	178.3	1.0
Mean	182.5	3.4	178.8	1.3	181.6	2.9	178.8	1.3	181.6	2.9	178.5	1.1

表 3  $s_1$  位置修正后内、外凸壳法拟合直径及二者平均值

Table 3 Circle fitting diameters of inner and external convex hulls and the mean value of them after correction in site  $s_1$

$Z_w$ /mm	Inner convex hull		External convex hull		Mean value	
	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%	$D$ /mm	$R_e$ /%
-0.0	174.8	-1.0	179.0	1.4	176.9	0.2
-203.1	174.9	-0.9	178.8	1.3	176.9	0.2
-403.0	175.0	-0.8	178.6	1.2	176.8	0.2
-602.9	175.1	-0.8	178.7	1.3	176.9	0.2
-802.8	174.9	-0.9	178.9	1.4	176.9	0.2
-1002.7	174.9	-0.9	178.9	1.4	176.9	0.2
-1202.6	175.1	-0.8	178.8	1.3	177.0	0.3
-1402.5	174.9	-0.9	178.9	1.4	176.9	0.2
-1602.4	175.1	-0.8	178.5	1.1	176.8	0.2
Mean	175.0	-0.8	178.8	1.3	176.9	0.2

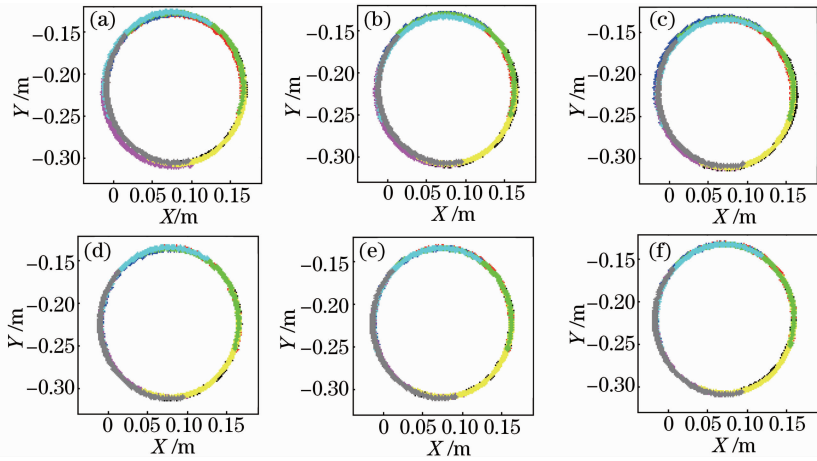


图7  $s_3$  位置圆柱体不同截面修正前后效果对比图。(a)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正前；(b)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正后；(c)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正前；(d)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正后；(e)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正前；(f)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正后

Fig.7 Corrected effect comparison chart of different cylinder sections at  $s_3$ . (a) Section of  $Z_w = -203.1$  mm before correction; (b) section of  $Z_w = -203.1$  mm after correction; (c) section of  $Z_w = -802.8$  mm before correction; (d) section of  $Z_w = -802.8$  mm after correction; (e) section of  $Z_w = -1402.5$  mm before correction; (f) section of  $Z_w = -1402.5$  mm after correction

### 3.3 对长方棱柱体扫描数据修正实验及结果

为了验证平均修正值对长方棱柱体的扫描结果的补偿效果,把截面边长理论值为  $133\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ , 周长  $436\text{ mm}$ , 高  $2000\text{ mm}$  的长方棱柱铝型材放置在图5中的  $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  位置进行扫描,并对扫描结果进行修正。经实际测量,整个高度内铝型材截面长度的误差为  $0.22 \sim 0.30\text{ mm}$ , 宽度的误差为  $0.15 \sim 0.40\text{ mm}$ , 截面周长的误差为  $0.74 \sim 1.40\text{ mm}$ 。图8为长方棱柱铝型材扫描结果的点云图。图8所示的三个截面修正前后外凸壳法求得的截面周长结果如表4所示,其中  $P$  为周长,  $R_e$  为相对误差。从表中数据看出:  $s_1$  位置补偿前后的相对误差平均值由  $3.1\%$  降低为  $1.4\%$ ;  $s_2$  位置补偿前后的相对误差平均值由  $2.9\%$  降为  $1.4\%$ ;  $s_3$  位置补偿前后的相对误差平均值由  $2.8\%$  降为  $1.5\%$ 。结果与圆柱体测量结果类似,也存在一定的正误差,原因也与上面分析一样,对  $s_1$  位置修正后的截面周长,同时采用外凸壳法和内凸壳法

测量的截面尺寸及平均尺寸结果如表5所示,可以看出,平均尺寸更接近真实值。

为了直观观察修正效果,给出图8所示的三个截面修正前后效果对比图,如图9~11所示,可见修正后多传感器数据的拼接状况明显好转。说明采用3.1节得到的平均修正值对不同位置的长方棱柱体扫描误差的补偿是有效的,且补偿效果与长方棱柱位置无关。

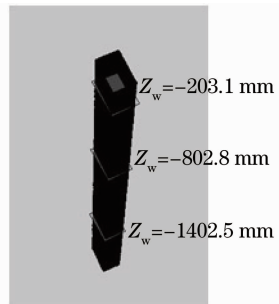


图8 长方棱柱体扫描结果及三个截面

Fig.8 Cuboid scanning data and three sections

表4 三个位置棱柱修正前后外凸壳拟合周长对比列表

Table 4 List of fitting perimeter comparison between before and after correction in three sites

$Z_w/\text{mm}$	Before correction at $s_1$		After correction at $s_1$		Before correction at $s_2$		After correction at $s_2$		Before correction at $s_3$		After correction at $s_3$	
	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$
-203.1	454.5	4.3	442.6	1.5	450.9	3.4	441.3	1.2	453.5	4.0	441.8	1.3
-802.8	449.0	3.0	442.8	1.5	447.6	2.7	441.4	1.2	446.2	2.3	444.7	2.0
-1402.5	445.5	2.2	441.5	1.3	447.3	2.6	443.5	1.7	444.3	1.9	441.4	1.2
Mean	449.7	3.1	442.3	1.4	448.6	2.9	442.1	1.4	448.0	2.8	442.6	1.5

表 5  $s_1$  位置修正后内、外凸壳法拟合周长及二者平均值

Table 5 Fitting perimeters of inner and external convex hulls and the mean values of them after correction in site  $s_1$

$Z_w/\text{mm}$	Inner convex hull		External convex hull		Mean value	
	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$	$P/\text{mm}$	$R_e/\%$
-203.1	424.2	-2.7	442.6	1.5	433.4	-0.6
-802.8	421.8	-3.3	442.8	1.5	432.3	-0.8
-1402.5	422.7	-3.1	441.5	1.3	432.1	-0.9
Mean	422.9	-3.0	442.3	1.4	432.6	-0.8

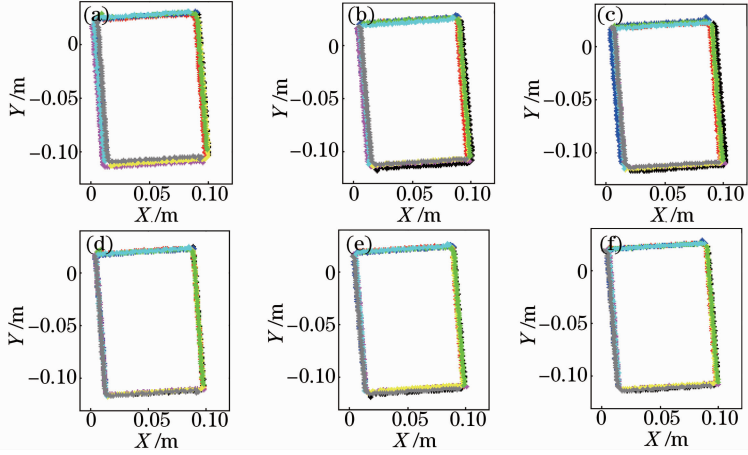


图 9  $s_1$  位置处三层截面修正前后效果对比图。(a)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正前；(b)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正后；(c)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正前；(d)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正后；(e)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正前；(f)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正后

Fig. 9 Corrected effect comparison chart of three sections at  $s_1$ . (a) Section of  $Z_w = -203.1$  mm before correction; (b) section of  $Z_w = -203.1$  mm after correction; (c) section of  $Z_w = -802.8$  mm before correction; (d) section of  $Z_w = -802.8$  mm after correction; (e) section of  $Z_w = -1402.5$  mm before correction; (f) section of  $Z_w = -1402.5$  mm after correction

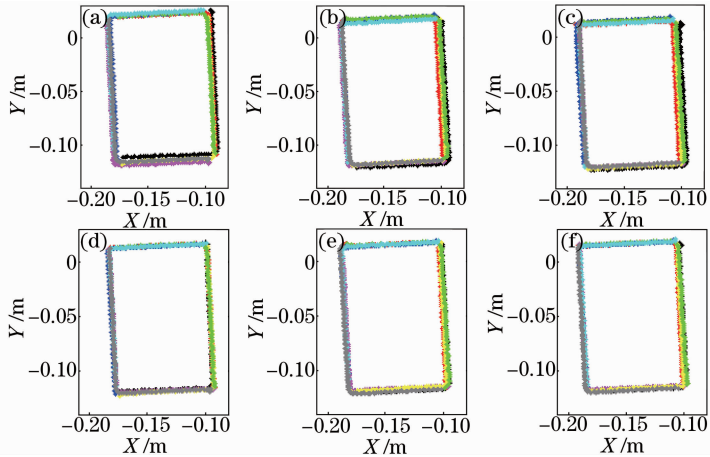


图 10  $s_2$  位置处三层截面修正前后效果对比图。(a)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正前；(b)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正后；(c)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正前；(d)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正后；(e)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正前；(f)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正后

Fig. 10 Corrected effect comparison chart of three sections at  $s_2$ . (a) Section of  $Z_w = -203.1$  mm before correction; (b) section of  $Z_w = -203.1$  mm after correction; (c) section of  $Z_w = -802.8$  mm before correction; (d) section of  $Z_w = -802.8$  mm after correction; (e) section of  $Z_w = -1402.5$  mm before correction; (f) section of  $Z_w = -1402.5$  mm after correction

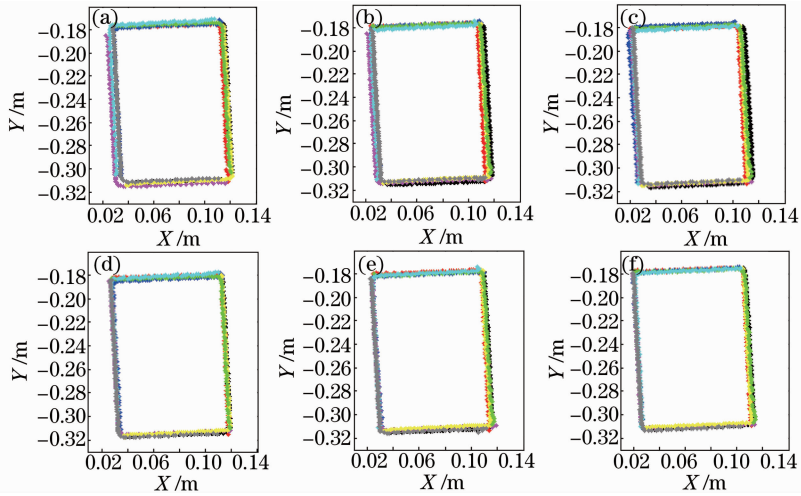


图 11  $s_3$  位置处三层截面修正前后效果对比图。(a)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正前;(b)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正后;(c)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正前;(d)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正后;(e)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正前;(f)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正后

Fig. 11 Corrected effect comparison chart of three sections at  $s_3$ . (a) Section of  $Z_w = -203.1$  mm before correction; (b) section of  $Z_w = -203.1$  mm after correction; (c) section of  $Z_w = -802.8$  mm before correction; (d) section of  $Z_w = -802.8$  mm after correction; (e) section of  $Z_w = -1402.5$  mm before correction; (f) section of  $Z_w = -1402.5$  mm after correction

### 3.4 石膏人体模特扫描数据补偿实验及结果

为了验证平均修正值是否对不规则形状点云的多传感器拼接误差仍然有好的修正效果,对放置在图 5 中  $s_1$  位置的石膏人体模特进行扫描,并对扫描结果进行修正。图 12 为石膏人体模特扫描结果点云图及其选择的三个截面的位置,图 13 为这三个截面的修正前后点云拼接效果对比图。可直观地看出,修正后,上下传感器的点云重合程度变好,相邻传感器点云的拼接较之修正前都更加光滑、平顺。

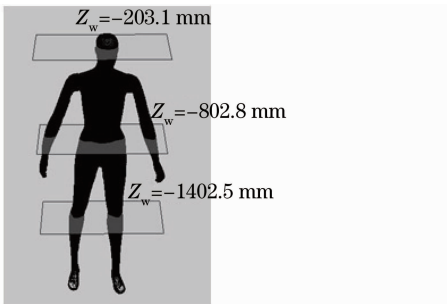


图 12 石膏人体模特点云图及三个截面

Fig. 12 Plaster mannequin data and three sections

## 4 结 论

针对三维扫描结果存在的多传感器点云的拼接误差提出一种修正方法,该方法把已知尺寸的圆柱体作为标准物体,利用其测量数据与真值圆函数平

移变换求得系统误差和修正值,对有误差的扫描结果进行逐层修正,且修正过程中不需要移动标准物体。在理论推导与分析的基础上,通过对不同位置的圆柱体、长方棱柱体的扫描结果补偿实验效果来看,不仅直观观察截面图拼接效果有所改善,而且其截面尺寸测量的相对误差有了显著降低,降低幅度在 50% 以上。通过石膏人体模特扫描结果的修正实验,验证了所提方法对任意截面形状物体扫描结果误差修正的有效性。综合说明补偿方法和补偿效果与扫描物体的位置与形状无关,而且标准物体为空心铝合金圆柱体,能保证高的加工精度,方便使用。所提误差修正方法简单、有效,非常适合用于激光三维人体扫描仪现场使用。

### 参 考 文 献

- Zhuang Baohua, Wang Shaoqing, Jiang Chengzhi, *et al.*. Dependence of the received light power of a laser triangulation displacement sensor on the testing surface inclination and the inclination angle measurement[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(8): 595-600.  
庄葆华, 王少清, 蒋诚志, 等. 激光三角位移计接收光功率与被测表面倾斜的关系及倾斜角测量[J]. 中国激光, 1995, 22(8): 595-600.
- Yu Qian, Zhang Xuping, Zhang Yixi, *et al.*. Novel method for structured light plane calibration in three-dimensional vision measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s108006.  
俞 乾, 张旭苹, 张益昕, 等. 新型三维视觉测量结构光平面标定方法[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s108006.
- Zuo Chao, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. A novel algorithm for



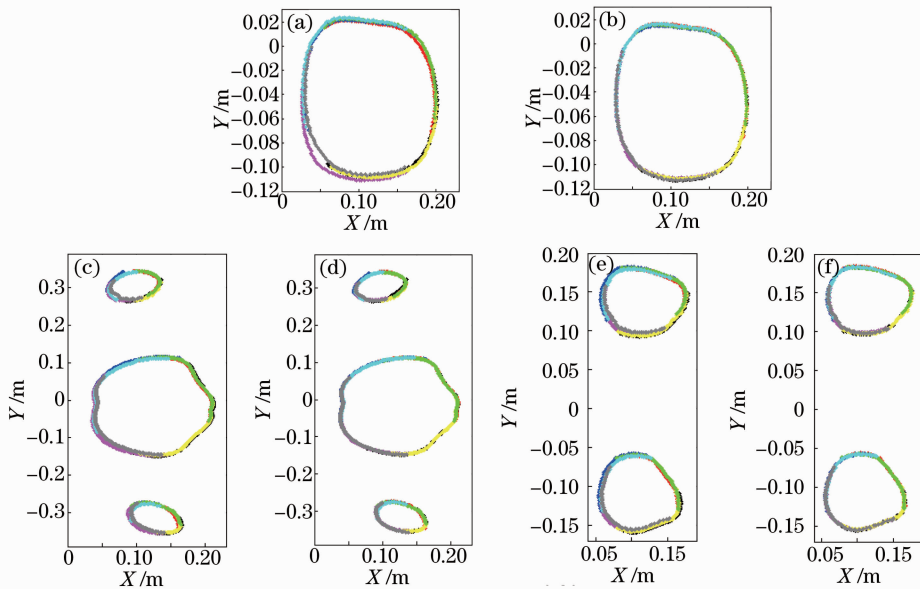


图 13 人体模特示例抽样位置的修正前后效果对比图。(a)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正前;(b)  $Z_w = -203.1$  mm 截面修正后;(c)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正前;(d)  $Z_w = -802.8$  mm 截面修正后;(e)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正前;(f)  $Z_w = -1402.5$  mm 截面修正后

Fig.13 Corrected effect comparison chart of different mannequin sections. (a) Section of  $Z_w = -203.1$  mm before correction; (b) section of  $Z_w = -203.1$  mm after correction; (c) section of  $Z_w = -802.8$  mm before correction; (d) section of  $Z_w = -802.8$  mm after correction; (e) section of  $Z_w = -1402.5$  mm before correction; (f) section of  $Z_w = -1402.5$  mm after correction

registration of point clouds[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214004.

左超, 鲁敏, 谭志国, 等. 一种新的点云拼接算法[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214004.

4 Ge Baozhen, Sun Mingrui, Lü Qieni, *et al.*. Research of a laser 3D body scanning system by light stripe method [J]. J Optoelectronics • Laser, 2003, 14(7): 733-736.

葛宝臻, 孙明睿, 吕且妮, 等. 光带法激光三维人体扫描系统研究[J]. 光电子·激光, 2003, 14(7): 733-736.

5 Xi F, Liu Y, Feng H Y. Error compensation for three-dimensional line laser scanning data [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2001, 18(3): 211-216.

6 Van Gestel N, Cuypers S, Bleys P, *et al.*. A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs [J]. Opt & Lasers in Eng, 2009, 47(3-4): 336-342.

7 Lin Y C, Wang M J J, Chen T. Establishing calibration models and error envelopes of a 3D whole body scanning system [C]. Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems, 2006. 129-134.

8 Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 488-494.

葛宝臻, 李晓洁, 邱实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 488-494.

9 Yang Huilian, Zhang Tao. Error Theory and Data Processing [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1992.

杨惠连, 张涛. 误差理论与数据处理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992.

10 Chen Gongzhen. Estimate and elimination method of constant value system error [J]. Measurement Technique, 2002, (8): 47-49.

陈功振. 定值系统误差的判断及消除方法[J]. 计量技术, 2002, (8): 47-49.

11 Chen Guiyou, Xu Shengnan, Li Zhenhua, *et al.*. Contour-based multisensor image registration with rigid transformation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(7): 1169-1173. 陈桂友, 徐胜男, 李振华, 等. 刚体变换下基于轮廓的多传感器图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7): 1169-1173.

12 Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, *et al.*. Mueller matrix ellipsometer based on nonlinear least squares fitting method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408004.

侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 基于非线性最小二乘拟合法的 Mueller 矩阵椭圆偏仪[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408004.

13 Li Xiuming. Research on Recognition and Assessment of Typical Planar Curves Used in Precision Manufacturing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.

李秀明. 精密制造中典型平面曲线的识别及形状误差评定研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.

14 Tian Qingguo, Ge Baozhen, Du Pu, *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.

栏目编辑: 何卓铭