

基于映射图像匹配的子孔径拼接技术

卢丙辉, 陈凤东, 刘炳国, 刘国栋, 戚子文

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为实现微球形貌检测中子孔径数据的快速、准确拼接, 给出基于点衍射干涉原理的微球形貌检测模型, 分析了干涉场横向分辨率的分布规律, 提出基于映射图像匹配的子孔径拼接方法。通过形貌数据的等尺度变换, 实现横向分辨率均匀化, 并将三维点云数据进行降维处理, 映射生成二维图像, 从而将形貌数据的旋转关系转化为图像坐标的平移关系, 再通过图像匹配算法对特征点进行匹配, 得出子孔径坐标系间的对应关系, 从而实现拼接。最后通过仿真实验验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 干涉测量; 微球; 形貌检测; 子孔径拼接; 图像匹配

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0824005

Technology of sub-aperture stitching based on mapping image matching

Lu Binghui, Chen Fengdong, Liu Bingguo, Liu Guodong, Qi Ziwen

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to stitch the sub-aperture data rapidly and precisely in microsphere profile inspection, the model of microsphere surface measurement was given, which was based on point diffraction interference. After analyzing the distribution of interference field lateral resolution in detail, a method of sub-aperture stitching based on mapping image matching was proposed. After equal-scale transformation of profile data, the homogenization of lateral resolution was achieved. The dimension of 3D point clouds data was reduced to a mapped 2D image for transforming the sub-aperture rotation-ship of the profile data to a translation relation on the CCD coordinate system. And the corresponding transformation offset between sub-apertures could be obtained by the feature points matching in ways of image matching algorithm, so the sub-aperture stitching could be realized. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed mapping image matching method for sub-aperture stitching was proved by the simulation experiment.

Key words: interferometry; microsphere; profile inspection; sub-aperture stitching; image matching

收稿日期: 2015-12-15; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275096, 51275120); 哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT.NSRIF201098)

作者简介: 卢丙辉(1982-), 男, 博士生, 主要从事激光干涉表面形貌检测技术方面的研究。Email: miknet0594@163.com

导师简介: 刘国栋(1974-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测技术方面的研究。Email: lgd@hit.edu.cn

0 引言

微小球体是最常用的元器件形态之一，随着微光学、微机械技术的不断发展进步，微球形态的器件应用也越发广泛。如在惯性约束聚变^[1] (Inertial Confinement Fusion, ICF) 实验中，多束高能激光轰击一个直径几百微米的球形燃料靶丸。其表面细微的形貌缺陷都可能引发燃料的不对称压缩，导致聚变反应效率降低甚至打靶实验失败，必须采用高精度的检测手段从大量产品中筛选出合格品。光学干涉测量法^[2]以其高精度、高效率、非接触等优点为微球形貌检测提供了理想的检测方法。虽然干涉测量法具有相对较大的检测范围，但仍很有效，仅为孔径固定的球冠区域。子孔径拼接技术^[3-4]是扩大检测范围的有效手段。因此，将微球进行二维旋转，使检测孔径覆盖微球全表面，再将形貌数据进行子孔径拼接，便可实现微球全表面无遗漏检测。

单次测量获得的形貌数据为三维点云数据。目前，三维点云匹配多采用最近点迭代(ICP)算法，以及多种基于 ICP 原理的改进优化型算法。但此类方法普遍存在运算量巨大、拼接效率低的问题，且易出现收敛极值点错误的情况。而基于图像匹配的数据处理方法具有速度快、准确率高等优点，因此，文中针对微球表面形貌检测中的子孔径数据特点，将形貌数据进行尺度变换，生成映射图像，采用图像匹配的方法获得坐标系对应关系，从而实现子孔径数据的准确、快速拼接。

1 微球干涉测量原理

微球表面形貌检测采用点衍射干涉^[5-6]测量原理，如图 1 所示。激光器出射的照明光束经过物镜会聚，在针孔反射镜的小孔处发生衍射，产生理想球面波。其中一部分作为测量光，由显微物镜会聚至微球表面，光束中心与微球同心，另一部分作为参考光。测量光经被测表面反射，携带形貌信息近似原路返回，由针孔镜表面的金属膜层反射转向，与参考光形成干涉。在参考光与测量光之间引入一定的相移量(机械式移相或波长式移相)，并由 CCD 记录多幅变化的干涉图。最后通过数据处理算法处理干涉图得到初相位分布，并将相位信息换算为高度差信息，从

而获得检测区域的形貌特征。

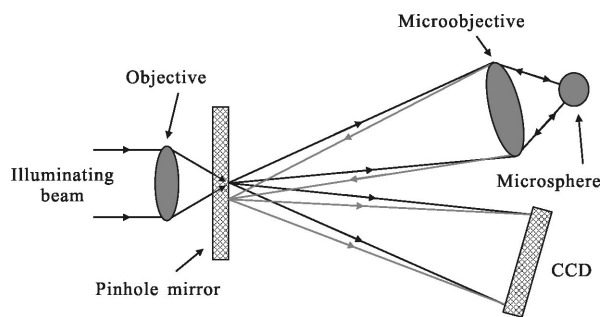


图 1 基本测量原理

Fig.1 Basic measuring principle

检测系统的单次测量范围为固定锥角的球冠区域，锥角的大小由显微物镜的数值孔径决定。孔径过小则检测效率太低，发挥不出该检测方法原有的优势；孔径过大则工作距太小，待测微球的曲率半径受到严重限制。所以，通常选择 0.2~0.5 之间。为了实现微球全表面的无遗漏检测，需要将微球按照一定的角度进行二维旋转扫描，使检测区域覆盖微球全表面，最后将各子孔径的形貌数据进行拼接、融合，从而实现微球全表面形貌检测。

2 子孔径拼接

2.1 横向分辨率分析

无论采用何种的子孔径拼接方法，大体上都可分为两步进行：首先，求出相邻待拼接孔径的相对坐标系对应关系，从而明确重叠区域；第二步，将重叠区域的数据进行融合处理，完成拼接。其中，第一步坐标系间的配准是最困难也是最关键的一步，将直接影响子孔径拼接的准确性，进而影响最终的检测结果。

由微球形貌检测的基本原理可知，带有被测表面形貌信息的球面波通过 CCD 进行采样，形成了球面到平面的映射。将图 1 光路进行等效展开，如图 2

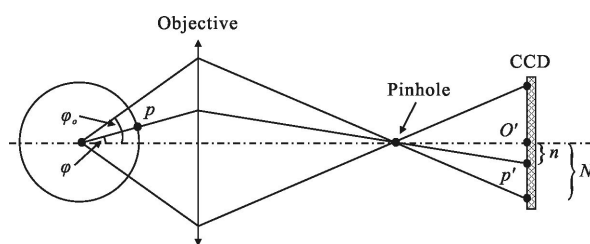


图 2 光路等效展开

Fig.2 Equivalent expanding of light path

所示。其中, p 为检测区域内的任意点; φ 为 p 点对应的孔径角; φ_0 为检测区域最大孔径角, 与数值孔径 NA 相对应, 即 $NA = \sin(\varphi_0)$; n 为 p 点在 CCD 上的对应点距干涉场中心的像素数; N 为干涉场半径对应的像素数。

由图 2 中的几何关系可以得到:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{n}{N} \cdot \tan \varphi_0\right) \quad (1)$$

从而计算出干涉场内每一点像素对应的横向分辨率:

$$\Delta l = R \cdot \left[\arctan\left(\frac{n+1}{N} \cdot \tan \varphi_0\right) - \arctan\left(\frac{n}{N} \cdot \tan \varphi_0\right) \right] \quad (2)$$

式中: R 为被测微球的半径。对于直径 2 mm 的微球, 检测区域最大有效数值孔径 NA 取 0.4, 干涉场半径像素数 N 取 500 时, 各像素的横向分辨率如图 3 所示。可以看出, 干涉场内各像素的横向分辨率是不均匀的, 越靠近干涉场边缘, 分辨率就越高。图 3 中, 干涉场中心位置的横向分辨率约为 $0.87 \mu\text{m}$, 而边缘的横向分辨率为 $0.73 \mu\text{m}$ 。这就导致了微球表面同样尺度的形貌特征在干涉场的不同位置呈现的尺度有所差异。所以, 通常情况下, 要将 CCD 上每个像素点计算出的高度差还原回实际的空间坐标系, 形成三维点云, 然后再应用迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 等算法进行三维空间的点云数据拼接。此过程运算量极大, 耗时长, 拼接效率较低。

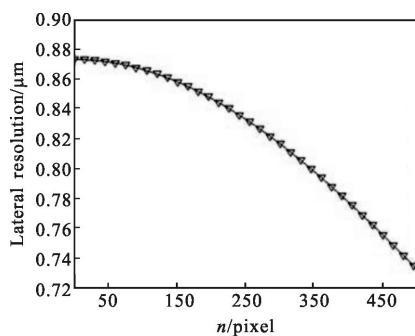


图 3 干涉场内像素的横向分辨率

Fig.3 Pixel lateral resolution of the interference field

2.2 等尺度变换

为了实现子孔径数据的快速拼接, 文中提出采用等尺度映射变换的方法, 以干涉场中心分辨率为基准, 以降低干涉场边缘分辨率为代价, 以球面上被测点到球冠中心的弧长为变换依据, 将三维点云数

据进行降维处理, 映射回像素空间, 得到横向分辨率均匀的平面形貌数据。映射变换过程如下:

首先, 计算形貌数据平面映射展开后最大直径对应的像素数 N' , 如公式(3)所示:

$$N' = R \cdot \varphi_0 / \Delta l_{\max} \quad (3)$$

式中: Δl_{\max} 为原干涉场中心的横向分辨率。对于 N' 范围内的每一像素点 (x', y') , 其到中心的像素数为 n' , 则得到 (x', y') 在实际形貌数据中对应的孔径角 β :

$$\varphi = n' \cdot \varphi_0 / N' = n' \cdot \Delta l_{\max} / R \quad (4)$$

然后, 将公式(4)代入公式(1)中, 得到点 (x', y') 在 CCD 像面中对应的 n 值:

$$n = [\tan(n' \cdot \Delta l_{\max} / R) \cdot N] / \tan \varphi_0 \quad (5)$$

由于映射变换的点之间具有相同的方位角, 所以通过 n 可以计算出映射的每一像素点 (x', y') 在 CCD 上对应的像面坐标 (x, y) :

$$\begin{cases} x = n \cdot \cos \theta + x_0 \\ y = n \cdot \sin \theta + y_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ 为 (x', y') 对应的方位角; (x_0, y_0) 为干涉场中心像素坐标。

由于计算出的 (x, y) 坐标通常为小数, 所以最后采用图像处理中的双线性插值算法得到映射像素点 (x', y') 对应的高度差 $h'_{(x', y')}$, 如公式(7)所示:

$$h'_{(x', y')} = (1-q) \cdot (1-p) \cdot h_{([x], [y])} + (1-q) \cdot p \cdot h_{([x]+1, [y])} + q \cdot (1-p) \cdot h_{([x], [y]+1)} + q \cdot p \cdot h_{([x]+1, [y]+1)} \quad (7)$$

式中: $[x]$ 、 $[y]$ 为 x 、 y 取整; $p = x - [x]$; $q = y - [y]$; h 为原干涉场中各像素对应的高度差。对 N' 范围内的所有像素点进行上述映射变换, 便可得到横向分辨率均匀的平面展开后的形貌特征。

2.3 映射图像匹配

对于等尺度变换后的形貌数据, 其形貌特征的像素表现已经与在干涉场中的位置无关, 此时将高度信息进行归一化, 并映射为图像的灰度值, 便可得到具有形貌特征的灰度图像, 再采用图像处理算法将子孔径的映射图像进行特征匹配, 就可以直接获得两者坐标系的对应关系。坐标系平移后, 将重叠区域的数据进行融合, 最简单的方法可以采取均值运算, 从而完成子孔径数据的拼接。映射图像各像素点的灰度值为:

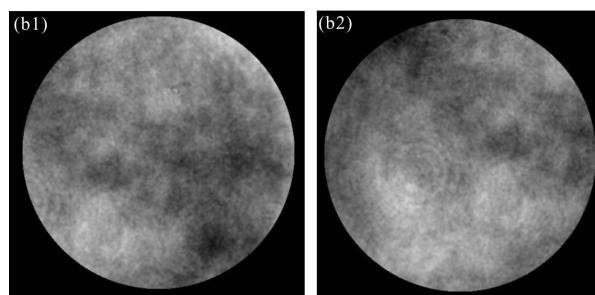
$$d_{(x', y')} = \frac{h'_{(x', y')} - h'_{\min}}{h'_{\max} - h'_{\min}} \quad (8)$$

式中: h'_{\max} 和 h'_{\min} 分别为测得高度差的最大值和最小值。

图像匹配^[7]的方法种类繁多,各有所长。文中采用基于尺度空间图像局部特征描述的 SIFT^[8](Scale Invariant Feature Transform)算子提取图像特征点。该算法在尺度空间寻找极值点,提取出位置、尺度和旋转不变量等高度显著特征,在母数庞大的数据库中容易辨认且误判率低。采用 K-D Tree^[9](k-dimension tree)索引方法提高匹配效率,实现特征点快速匹配。随机抽样一致性^[10](RAMSAC)是最有效的离群点剔除算法之一,对于高错误率样本仍然有很好的效果。文中对于特征点的匹配出现误匹配的情况在所难免,所以采用 RAMSAC 算法剔除错误匹配点,获得准确的坐标系转换关系。

3 仿真实验

由于实验装置尚未构建完成,缺少旋转扫描机构,所以文中采用软件仿真对提出的基于映射图像匹配的子孔径拼接方法进行验证。有效检测孔径(NA)设为 0.36,检测光波长 λ 设为 532nm,微球半径 1.5 mm,两子孔径间对应微球旋转角度 23°,生成的子孔径数据如图 4 所示。其中,图 4(a)为子孔径的



(b) 子孔径映射图像

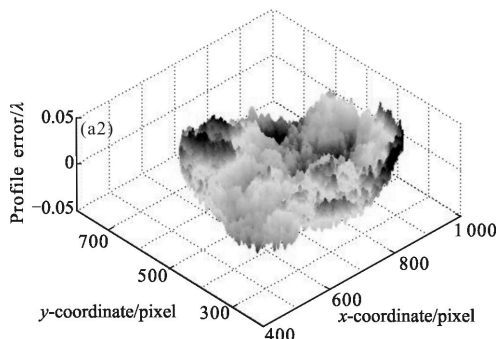
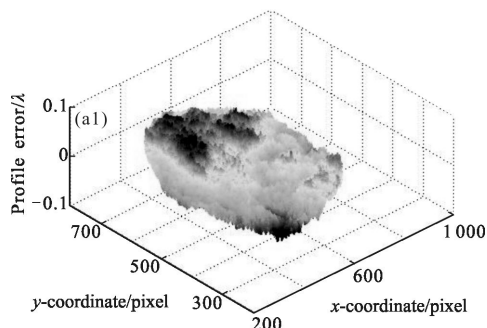
(b) Mapped images of sub-apertures

图 4 子孔径数据

Fig.4 Data of sub-apertures

形貌数据,其形貌误差 PV 值和 RMS 值分别为 0.103 4 λ 和 0.020 7 λ 。经换算,等尺度变换后的子孔径区域半径为 252 像素,应用公式(8)将形貌数据换算为灰度数据,映射生成的子孔径灰度图像如图 4(b)所示,灰度值范围为 0~255。

采用 SIFT 算子提取到的图像特征点如图 5 所示。图中给出了特征点的位置,以及对应的特征向量。由于生成的映射图像特征较为明显,提取到的特征点较多,在图像中显示得较为密集。



(a) 子孔径形貌数据

(a) Profile data of sub-apertures

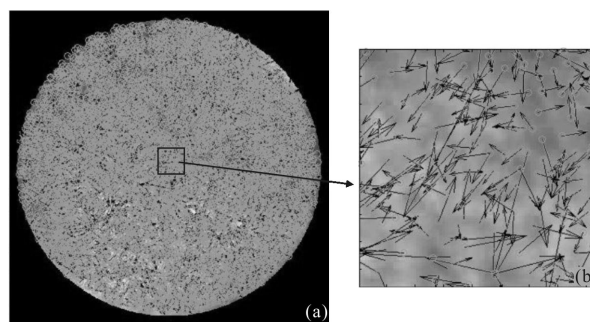


图 5 提取到的图像特征点

Fig.5 Extracted image feature points

采用 K-D Tree 索引算法对提取到的特征点进行匹配,得到了大量的匹配成功点,当然其中也包括了一定数量的误匹配点。由于映射展开后微球的旋转量对应了平面坐标的平移量,所以正确的匹配点最明显的特征为点对之间的连线均为近似的平行线,即斜率为一定值。采用 RANSAC 算法处理后的匹配结果如图 6 所示。该算法可以有效剔除误匹配产生的离群点,其正确率达 95%以上。

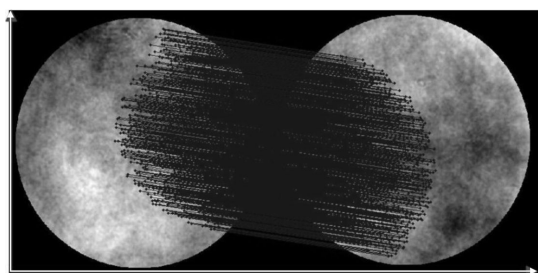


图 6 误匹配点剔除后的结果

Fig.6 Results with mismatching points removed

由于匹配条件较好,正确匹配点数量较多,达 9812 对,加入较大随机误差后,匹配点数量将急剧减少。如加入 $\pm 0.0037\lambda$ 的随机误差后,匹配点数量仅为 102 个,但仍可进行正常拼接。以图 6 左下角为原点建立坐标系, x 轴正向水平向右, y 轴正向竖直向上,这里给出 10 组匹配点坐标关系,如表 1 所示。

表 1 匹配点坐标关系

Tab.1 Relationship of matching points coordinates

x_1	y_1	x_2	y_2	Δx	Δy
449.046	344.762	836.037	289.924	386.992	-54.838
274.678	328.759	61.722	273.806	387.043	-54.952
315.467	375.930	702.611	321.052	387.143	-54.877
333.839	372.730	720.869	317.603	387.030	-55.126
419.932	233.540	806.828	178.695	386.896	-54.845
284.138	324.686	670.949	269.682	386.811	-55.004
430.306	199.452	817.174	144.643	386.867	-54.808
276.690	157.635	663.775	102.635	387.085	-54.999
413.439	336.018	800.427	280.842	386.988	-55.176
373.543	275.005	760.616	219.822	387.072	-55.183

x 轴和 y 轴方向上的坐标偏移量均值分别为 386.993 和 -54.981,标准差分别为 0.105 和 0.141,可见正确匹配的特征点之间的坐标平移量偏差极小。将子孔径 2 的数据按照计算出的平移量进行坐标平移,重叠区域数据取两者均值作为融合后的数据,得到拼接后的映射图像如图 7 所示,最后将映射图像的灰度值还原为高度值,得到拼接后的形貌数据如图 8 所示。由图可见,拼接后的形貌数据具有良好的视觉效果,映射回表面形貌误差数据后,重叠区域

相对于原数据的偏差均值仅为 0.0018λ ,而全过程在普通市售计算机上运行所需时间为 10.25 s,可见,在测量环境良好的情况下,采用基于映射图像匹配的子孔径拼接方法是高效的、可行的。

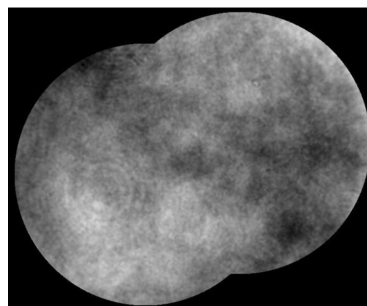


图 7 拼接后的映射图像

Fig.7 Mapping image after stitching

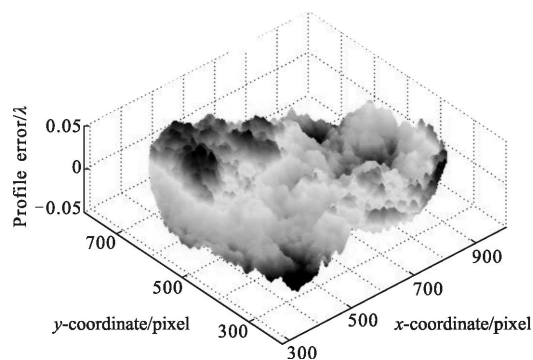


图 8 拼接后的形貌数据

Fig.8 Profile data after stitching

4 结论

在微球表面形貌检测过程中需要进行子孔径数据拼接以扩大测量范围。基于最近点迭代(ICP)原理的三维点云匹配方法存在运算量大、拼接效率低的不足。文中采用基于映射图像匹配的子孔径拼接方法,将三维的形貌数据进行降维处理,映射为二维图像,将旋转关系转化为平移关系处理,通过特征匹配算法获得坐标关系,从而实现子孔径的拼接。仿真实验结果表明了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] Ma Xiaojun, Gao Dangzhong, Ye Chenggang, et al. Interior surface roughness of ICF micro-shells with phase shift interference technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 224-228. (in Chinese)

- 马小军, 高党忠, 叶成刚, 等. 相移动干涉法测量 ICF 微球内表面粗糙度[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 224–228.
- [2] Wu Xinmin, Chen Jinbang, Gao Zhishan. Adaptive vibration-resistant techniques in interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(4): 214–218. (in Chinese)
吴新民, 陈进榜, 高志山. 干涉测量中的自适应抗振技术[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 214–218.
- [3] Wang Ning, Jia Xin, Xing Tingwen. Test of shallow asphere using sub-aperture stitching method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2525–2530. (in Chinese)
王宁, 贾辛, 邢廷文. 子孔径拼接检测浅度非球面[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2525–2530.
- [4] Deng Wantao, Wang Kaiwei, Bai Jian, et al. Elimination of reference surface error on high-accuracy subaperture stitching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1194–1199. (in Chinese)
邓万涛, 汪凯巍, 白剑, 等. 高精度子孔径拼接中参考面误差的去除方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1194–1199.
- [5] Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, et al. Key technology for fiber phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 254–259. (in Chinese)
张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 光纤相移点衍射干涉仪关键技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 254–259.
- [6] Fu Qiang, Shen Feng, Rao Changhui. Distributed stochastic parallel gradient descent based on point diffraction interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2451–2457. (in Chinese)
付强, 沈峰, 饶长辉. 基于点衍射干涉仪的分布式随机并行梯度下降算法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2451–2457.
- [7] Wu Mengqi, Li Zhongwei, Zhong Kai, et al. Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0215002. (in Chinese)
伍梦琦, 李中伟, 钟凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(02): 0215002.
- [8] Zhang Qiang, Hao Kai, Li Haibin. Research on scale invariant feature transform feature matching based on underwater curve constraint[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 2015003. (in Chinese)
张强, 郝凯, 李海滨. 水下环境中基于曲线约束的 SIFT 特征匹配算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 2015003.
- [9] Chen Kai, Zhang Da, Zhang Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812003. (in Chinese)
陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812003.
- [10] Lei Yuzhen, Li Zhongwei, Zhong Kai, et al. Mismatching marked points correction method based on random sample consensus algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315002. (in Chinese)
雷玉珍, 李中伟, 钟凯, 等. 基于随机抽样一致算法的误匹配标志点校正方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315002.