

文章编号: 0258-7025(2010)03-0784-05

基于区域调制度和最大化的大尺寸 物体三维重构

程旭升 曹益平 何宇航

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出了一种对大尺寸物体进行三维重构的方法。该方法运用相位测量轮廓术(PMP)测得子区域的三维面形,采用区域调制度和最大化的思想进行高度相关匹配,通过拼接获得了整个物体的三维面形。该方法与运用所有高度数据进行匹配相比,减少了运算时间,提高了拼接精度。利用高度匹配得到的重叠区域位置,制作调制度二值化模板将物体从背景和阴影中提取出来,对子物体图像进行了灰度图像拼接。结果表明,三维重构的重复精度优于 $20\ \mu\text{m}$,拼接精度优于 $100\ \mu\text{m}$,为大尺寸物体的三维重构提供了一种有效方法。

关键词 图像处理;相位测量轮廓术;三维重构;相关识别;调制度;高度匹配;图像拼接

中图分类号 TN247;TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0784

A Three-Dimensional Reconstructed Method of Big Scale Objects Based on the Maximum of an Area Modulation Sum

Cheng Xusheng Cao Yiping He Yuhang

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract A novel and high precise three-dimensional (3D) reconstructed method of big scale objects is proposed. The sub-shapes of the experimental object are measured with phase measuring profilometry (PMP), height matching is carried out in the modulation maximum area with an algorithm due to maximum correlativity. The method saves matching time by computer compared to using the whole height data of the sub-objects, and the mosaic precision is improved. Finally the whole shape of objects is obtained by the mosaic method. Binarization templates of modulation are generated in order to draw out the object from background and shadow, and image mosaic is carried out by using the overlapping position obtained from the above height matching. The results show that the repeatability precision of our method is superior to $20\ \mu\text{m}$, and the mosaic precision is beyond $100\ \mu\text{m}$, which is an effective method to reconstruct big scale objects.

Key words image processing; phase measuring profilometry; three-dimensional reconstruction; correlation recognition; modulation; height matching; image mosaic

1 引 言

相位测量轮廓术(PMP)^[1,2]以其快速、大面积、高精度的特点在三维测量中受到广泛的研究和应用。PMP系统由投影系统和成像系统两部分组成,为了保证测量精度,投影在物体上的每个条纹周期

成像设备至少捕捉两个抽样点,对于大尺寸的物体,需要成像设备具有足够高的空间分辨率,高分辨率意味着高成本,而且由于工艺的限制,成像设备的分辨率也不能任意提高。因此,对于大尺寸物体三维面形的测量,成像设备的有限分辨率和系统的测量

收稿日期:2009-04-29;收到修改稿日期:2009-06-16

基金项目:国家 863 计划(2007AA01Z333)、四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介:程旭升(1987—),男,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理方面的研究。

E-mail:chengxusheng@yahoo.com.cn

导师简介:曹益平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方面的研究。

E-mail:caoyiping@mail.sc.cninfo.net(通信联系人)

精度之间的矛盾,是一个需要解决的问题。

本文提出了一种对大尺寸物体进行三维重构的方法,即运用 PMP 对物体进行分区测量,获得子物体的三维面形后,采用拼接技术得到物体完整的三维图像。在 PMP 中,获取高度信息的准确性与调制度的大小有关,本文对子物体上特定大小的调制度和最大的区域内高度数据进行匹配,找出重叠区域后对三维图像和二维灰度图像进行拼接。

2 PMP 的测量原理和方法

以大尺寸岩芯样品(样品尺寸直径约为 10 cm,高度约为 3.5 cm)为例,图 1,2 显示了样品表面的一部分,需要获得整个样品的三维面形。把岩芯样品放在 PMP 测量系统的工作台上进行测量,采用分区域测量的方法,获得两个子岩芯面(为方便叙述,将两个子岩芯面分别记为岩芯面 1 和岩芯面 2)的三维面形。在岩芯面 1 的大致重叠区域内寻找一个在一定面积内的调制度和最大化的区域,与岩芯面 2 上同样大小的区域高度数据进行匹配,找到重叠区域后对子岩芯的三维图像和二维灰度图像进行拼接,获得整个岩芯样品的三维图像和灰度图像。

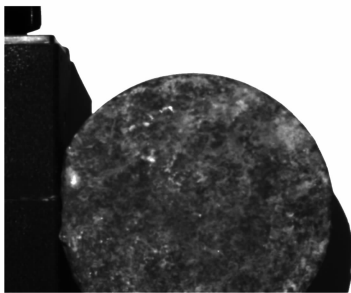


图 1 岩芯面 1

Fig. 1 No. 1 rock specimen surface

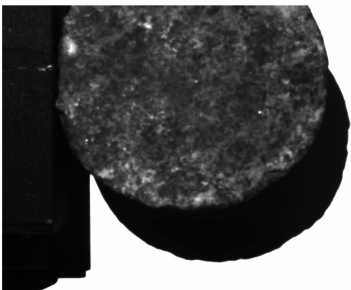


图 2 岩芯面 2

Fig. 2 No. 2 rock specimen surface

2.1 测量原理

PMP 具有较高的测量精度,可以测量物体的细节特征信息,如图 3 所示。将正弦光栅条纹投影到

三维物体表面,由电荷耦合器件(CCD)成像系统获得的变形光栅像可以表示为^[3,4]

$$I(x,y) = R(x,y)[A(x,y) + B(x,y)\cos\phi(x,y)], \quad (1)$$

式中 $R(x,y)$ 为物体表面不均匀的反射率, $A(x,y)$ 为背景强度, $B(x,y)/A(x,y)$ 为条纹的对比度, $\phi(x,y)$ 为受物体高度调制的变形条纹相位函数。按 $1/N$ (N 为投影条纹的帧数) 光栅周期连续移动正弦光栅 N 步,并分别采集对应变形条纹,则可从 N 帧相移条纹中计算出反映物体面形变化的相位函数 $\phi(x,y)$

$$\phi(x,y) = \arctan \left[\frac{\sum_{j=1}^N I_j(x,y)\sin(2\pi j/N)}{\sum_{j=1}^N I_j(x,y)\cos(2\pi j/N)} \right], \quad (2)$$

式中 $I_j(x,y)$ 为第 j 帧条纹图各点的光强值。由于采用反正切计算,(2) 式中得到的相位被限制在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内,采用相位展开算法^[5,6] 处理后就得到连续的相位分布 $\psi(x,y)$ 。从测量系统的空间三角形之间的相似性可以导出高度 $h(x,y)$ 与相位的关系^[7]

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\psi(x,y)} + c(x,y) \frac{1}{\psi(x,y)^2}, \quad (3)$$

式中参数 $a(x,y), b(x,y), c(x,y)$ 由系统结构参数决定,可通过标定获得。

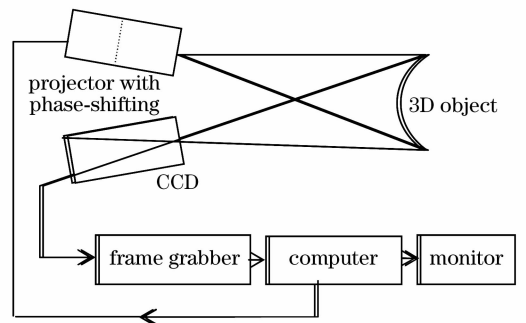


图 3 PMP 系统框图

Fig. 3 Block diagram of PMP system

2.2 基于调制度和最大化的高度匹配

为了将岩芯表面各点的高度信息和灰度信息从背景区域中提取出来,可以依据调制度数值设定阈值来制作二值化模板。调制度是衡量相位展开可靠性的参数,调制度越大的点,相位展开后得到的连续相位就越准确。在相位测量轮廓术中,调制度 $M(x,y)$ 可以表示为^[8]

$$M(x, y) = \frac{1}{2}NI_0B(x, y)C(x, y), \quad (4)$$

式中 I_0 为偏置强度, $B(x, y)$ 为表面各点的反射率, $C(x, y)$ 为条纹的对比度。可以看到, 调制度与反射率成正比, 因此阴影和背景部分的调制度比较低。可以给调制度设定一个阈值, 大于此阈值的调制度被赋值为 1, 小于此阈值的调制度被赋值为 0, 这样得到调制度二值化模板, 将整个高度面上的调制度为 0 的区域的高度值赋值为 0, 这样就将岩芯表面区域从阴影和背景中提取出来了。调制度可通过其定义式^[8]

$$M(x, y) = \left\{ \left[\sum_{j=1}^N I_j(x, y) \sin(2\pi j/N) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^N I_j(x, y) \cos(2\pi j/N) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

计算获得。

岩芯表面由于自然断层会使得岩芯表面区域的局部高度出现较大的跃变, 在进行相位展开时, 由于高度的跃变可能会导致岩芯表面区域相位展开的局部错误, 从而在相位-高度映射时导致高度映射的错误。因此可以在相位展开前由变形条纹的截断相位找出极点位置, 在相位展开时不对极点展开, 而在展开后用极点为中心 $n \times n$ 范围内非极点的相位值的均值替代该极点处的相位值, 从而使得整个岩芯表面上展开相位连续。进而进行相位-高度映射, 这样便可以保证岩芯表面区域高度的准确性。

由计量光栅可以知道载物台移动的距离, 因此可知两块子岩芯的大致重叠区域。选取一定大小的模板, 遍历岩芯面 1 上大致重叠区域内的调制度, 对模板内所覆盖的调制度值求和, 找到最大值并记录此时模板所在位置 P 。保持岩芯面 1 的灰度图像位置不动, 在载物台移动的方向以像素为单位平移岩芯面 2 的灰度图像, 对 P 位置的高度数据做相关匹配运算, 相关匹配系数为^[9]

$$R = \frac{\left[\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K H_1(j, k) H_2(j, k) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K H_1^2(j, k) \right] \left[\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K H_2^2(j, k) \right]}}, \quad (6)$$

式中 $H_1(j, k)$, $H_2(j, k)$ 分别为两块岩芯表面各点的高度。找到最大相关系数 R , 就找到了两块岩芯的精确重叠区域。

区域调制度和最大化思想找重叠区域的优点在于: 调制度是衡量相位展开可靠性的参数, 调制度最大的区域获得的高度最精确, 因此在此区域进行高

度匹配有利于提高拼接精度; 对两块子岩芯所有高度数据进行相关匹配运算的计算量相当巨大, 而对特定大小的区域进行相关匹配运算可以减少大量的计算时间。

由于系统存在误差, 重叠区域的高度存在微小差异, 可以在重叠区域选取一个模板, 对模板内重叠区域的高度求平均差值, 再对岩芯 1 的高度整体减去平均差值的一半, 岩芯 2 的高度整体加上平均差值的一半, 得到修正后的高度值。然后采用渐进渐出的方法对重叠区域的高度进行线形处理^[10]

$$h(x, y) = \beta h_1(x, y) + (1 - \beta)h_2(x, y), \quad (7)$$

式中 $\beta = (x_{\max} - x)/(x_{\max} - x_{\min})$, 为渐变因子。

这样对两块岩芯进行拼接, 获得了整个岩芯样品的三维面形。

2.3 图像灰度拼接

为了将岩芯表面各点的高度和灰度信息一一对应, 需要对子岩芯灰度图像进行拼接。由于已得到二值化模板和重叠区域位置, 故可以依据二值化模板将岩芯灰度图像上调制度为 0 的区域灰度赋值为 0, 从而将岩芯表面区域从阴影和背景中提取出来。在进行灰度拼接时, 同样采用渐进渐出的方法对重叠区域灰度进行线形处理, 可获得整个岩芯表面的灰度图像。

3 实验结果及分析

为了验证所提出的大尺寸岩芯样品三维面形重构方法的可行性, 建立了一套 PMP 三维测量实验装置 (CCD 相机的型号为 MVC1000M-45B5, 分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$; 投影仪型号为 HITACHI LCD-PROJECTOR HCP-75X), 三维测量解析度为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 编制了相应的子岩芯面形测量、三维图像拼接以及灰度图像拼接等算法程序, 进行了测试实验。

实验采用五步相移 PMP 对岩芯面 1, 2 进行了三维测量, 图 4 为 CCD 获取的岩芯面 1, 2 的 5 帧变

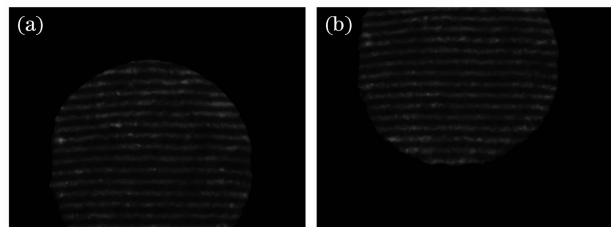


图 4 调制的变形条纹。(a) 岩芯面 1; (b) 岩芯面 2
Fig. 4 Deformed fringes. (a) No. 1 rock specimen surface; (b) No. 2 rock specimen surface

形条纹之一。图 5 为岩芯面 1,2 的归一化调制度三维图。图 6 为设置阈值后岩芯面 1,2 的调制度二值化模板。采用 PMP 测量原理测出了岩芯面 1,2 的三维面形,如图 7 所示。使用一个一定大小的模板,运用高度拼接算法对岩芯面 1,2 进行拼接后得到整个岩芯的三维面形,如图 8 所示。根据图像拼接算法进行图像拼接后,获得整个岩芯面的灰度图像如

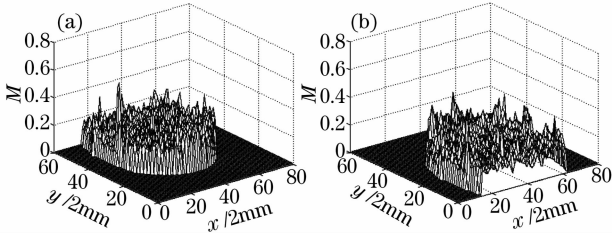


图 5 归一化调制度三维图。(a) 岩芯面 1;(b) 岩芯面 2
Fig. 5 Normalized modulation. (a) No. 1 rock specimen surface; (b) No. 2 rock specimen surface

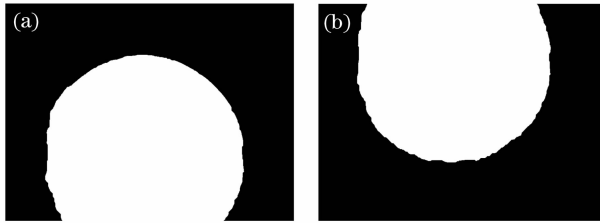


图 6 调制度二值化图像。(a) 岩芯面 1;(b) 岩芯面 2
Fig. 6 Binary images of modulation. (a) No. 1 rock specimen surface; (b) No. 2 rock specimen surface

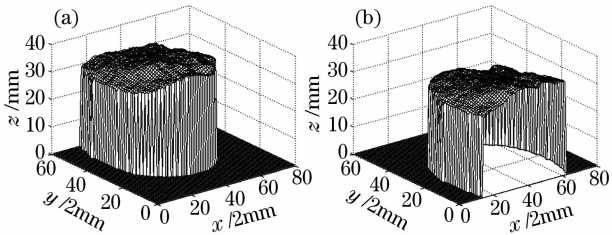


图 7 PMP 测得的岩芯面 1(a)和岩芯面 2(b)的三维面形
Fig. 7 3D shape of No. 1 rock specimen surface (a) and No. 2 rock specimen surface (b) with PMP

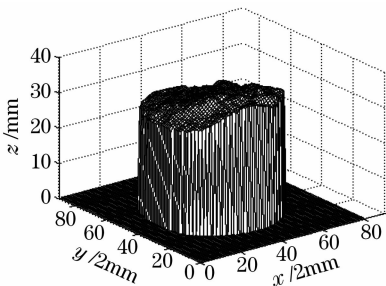


图 8 整个岩芯的高度分布
Fig. 8 Height distribution of whole rock specimen

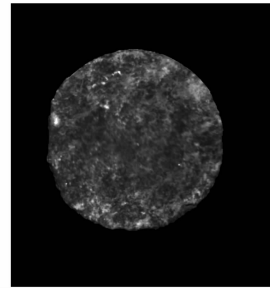


图 9 整个岩芯面的灰度图像

Fig. 9 Gray image of whole rock specimen

图 9 所示。这样整个岩芯面各点的高度和灰度信息一一对应起来了。

通过采用该方法对同一岩芯样品进行多次重复测试实验,重复精度优于 $20 \mu\text{m}$;得到的样品直径与标准尺测量相比较,拼接精度在 $100 \mu\text{m}$ 以内。实验证明,采用区域调制和最大化的方法进行的高度匹配,比运用所有高度数据进行匹配的运算时间节省了一半以上。

4 结 论

提出了一种对大尺寸物体进行三维重构的方法。该方法使用相位测量轮廓术获得岩芯样品子区域的三维面形后,基于区域调制和最大化思想,运用高度相关匹配算法对子物体进行了三维图像拼接,获得了大尺寸物体的三维面形。利用高度匹配得到的重叠区域位置,使用调制度二值化模板消除背景和阴影部分,对子物体灰度图像进行了图像拼接。该方法简单、快速、方便,能达到较高的测量精度和分辨率。

参 考 文 献

- 1 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18):3105~3108
- 2 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2):185~188
- 3 Xu Xingfen, Cao Yiping. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):733~737
许幸芬,曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3):733~737
- 4 Fan Hua, Zhang Chi, Ren Yaping *et al.*. Study of a high precision phase shifter employed in phase shifting metrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):21~25
范 华,张 弛,任亚萍 等. 相移干涉计量中高精度相移器的研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1):21~25
- 5 Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):667~672
朱勇建,刘立人,栾 竹 等. 相位解包裹算法中基于调制度的

- 新质量图[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):667~672
- 6 Wang Jun, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. A novel synthetical method for phase unwrapping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):795~799
王 军,赵建林,范 琦 等. 相位图去包裹的一种新的综合方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):795~799
- 7 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):272~277
宋万忠,苏显渝,曹益平等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(3):272~277
- 8 Su Likun, Su Xianyu, Li Wansong *et al.*. 3-D profilometry based on modulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9):1257~1262
苏礼坤,苏显渝,李万松等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. 光学学报, 1999, **19**(9):1257~1262
- 9 Wu Jianning, Guo Baolong, Feng Zongzhe. An image mosaic technique based on interest points feature matching [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(6):733~737
仵建宁,郭宝龙,疯宗哲. 一种基于兴趣点特征匹配的图像镶嵌技术[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(6):733~737
- 10 Xue Feng, Zhang Yousheng, Jiang Julang *et al.*. Two pass mosaic algorithm of panoramic image using maximum grads and intensity correlation [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(12):2965~2968
薛 峰,张佑生,江巨浪等. 基于最大梯度和灰度相关的两步全景图拼接算法[J]. 系统仿真学报, 2005, **17**(12):2965~2968