

基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统

张一, 余卿, 张昆, 程方, 崔长彩

引用本文:

张一, 余卿, 张昆, 等. 基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 859–866.

ZHANG Yi, YU Qing, ZHANG Kun, et al. Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 859–866.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0859>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量

Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy
光学精密工程. 2017, 25(6): 1449–1457 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1449>

基于数字微镜器件实现共焦测量的结构光参数

Parameters of structured lights of DMD used in confocal measurement
光学精密工程. 2015, 23(5): 1272–1278 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1272>

彩色共焦系统可调制色散物镜设计

Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system
光学精密工程. 2017, 25(4): 875–883 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172504.0875>

物体表面非接触式高精度瑕疵检测与三维重建

Non-contact high-precision defect detection and 3D reconstruction of object surface
光学精密工程. 2017, 25(10s): 87–94 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172513.0087>

基于光强传输方程的相位恢复条件

Applicable conditions of phase retrieval based on transport of intensity equation
光学精密工程. 2015, 23(10z): 77–84 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0076>

文章编号 1004-924X(2020)04-0859-08

基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦测量系统

张 一¹, 余 卿^{1*}, 张 昆¹, 程 方¹, 崔长彩²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 彩色共聚焦技术因其高分辨率、高测速的特点, 在表面形貌测量领域备受关注, 然而现有的彩色共聚焦技术多为单点测量, 一定程度上限制了测量效率。本文在彩色共聚焦技术的基础上, 以 DMD 作为光分束器件, 结合自主研发的大口径色散管镜, 利用面阵彩色相机作为光电接收器件, 研究和建立了基于数字微镜器件的并行彩色共聚焦实验平台, 实现了对被测物面上多个探测点的并行图像处理。最终, 利用所搭建的并行彩色共聚焦测量系统, 对 50 μm 高的台阶和自制台阶进行了测量, 并对硬币的表面形貌进行了三维恢复。实验结果表明, 该测量系统的轴向测量范围为 300 μm , 测量精度达到微米级; 同时, 能够较好地恢复硬币的表面形貌特征, 具有较好的测量效率与可靠性。

关键词: 光学测量; 彩色共聚焦技术; 数字微镜器件; 彩色相机; 表面形貌三维重构

中图分类号: TH742 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0859

Parallel chromatic confocal measurement system based on digital micromirror device

ZHANG Yi¹, YU Qing^{1*}, ZHANG Kun¹, CHENG Fang¹, CUI Chang-cai²

(1. *College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;*

2. *Institute of Manufacturing Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yuqing@hqu.edu.cn*

Abstract: The chromatic confocal technique has garnered much attention in the field of surface topography measurement due to its high accuracy, resolution, and rapidity of operation. However, the existing chromatic confocal methods are mostly based on single-point measurement, which restricts their measuring efficiencies. To address this shortcoming, parallel chromatic confocal measurement system based on the chromatic confocal technique was proposed and studied in this paper. In this experimental system, DMD was used as an optical beam splitter, a self-developed dispersive tube lens was applied to produce axial dispersion, and a color camera was used as a photoelectric receiving device. A self-developed color conversion algorithm was also used to simultaneously obtain spectral information from multi-confocal-points. Finally, a parallel chromatic confocal measurement experimental platform was constructed, the experimental measurements corresponding to 50 μm high steps and self-made steps

收稿日期: 2019-11-15; 修订日期: 2020-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51505162); 福建省科技计划项目 (No. 2019I0013); 泉州市科技计划项目 (No. 2017T004); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目 (No. 18013080064)

were performed, and the surface topography restoration experiments were conducted. The experimental results indicate that the axial measuring range of the system is $300\ \mu\text{m}$, and the measuring accuracy is able to achieve micron level. Further, as a 3D measurement system, the proposed technique was verified to be capable of reconstructing the surface topography of a coin based on one-shot.

Key words: optical measurement; parallel chromatic confocal; Digital Micromirror Device(DMD); color camera; surface topography measurement

1 引言

近年来,在材料表面形貌测量领域,以光学测量为代表的非接触式测量技术以其测量准确、快速、分辨率高等特点,引起国内外专家学者的重视^[1]。其中,源于共聚焦测量技术的彩色共聚焦测量方法^[2]不依赖于轴向层析技术,仅依靠垂直于光轴方向的二维横向扫描,即可获取材料表面的三维形貌特征,极大地缩短了检测时间,提高了测量效率,适用于高速、高精度的表面形貌检测^[3-5]、生物医疗^[6]及厚度检测^[7]等领域,成为了国内外专家学者关注的热点。

Boettcher^[8]等人将彩色共聚焦显微镜和光谱测量技术相结合,设计了一种彩色共聚焦光谱相干层析成像系统,可以实现高分辨率的单镜头形貌测量。Sanbz, Claude^[9]等人研究设计了一种适用于小直径物体的高精度测量彩色共聚焦传感器,实现了对表征直径为 $0.1\ \text{mm}$ 的铜铍丝的精密测量。王津楠^[10]利用双分离的消色差场镜和色散聚焦镜组成了色散物镜,设计了光栅光谱仪,并搭建了光谱共聚焦测量系统,测量范围达到 $1.2\ \text{mm}$,最大测量误差为 $9\ \mu\text{m}$ 。刘伯奇^[11]利用彩色共聚焦传感器采集数据,实现了对零件厚度及轮廓的测量。马敬等人^[12]针对色散物镜进行了优化设计,其设计的色散物镜测量范围达 $1.05\ \text{mm}$,分辨率达 $105\ \text{nm}$ 。周勇^[13]设计并搭建了用于透镜厚度测量的光谱共焦测量系统,该系统的最大测量范围是 $30\ \text{mm}$,测量精度为 $5\ \mu\text{m}$ 。然而,由于色散元件往往只针对轴上点进行优化,光电接收器件又多采用单点测量的光谱仪等原因,现阶段彩色共聚焦测量系统大多以单点测量为主,限制了测量效率;而且,单点共聚焦光路测量需要对被测物进行横向扫描,会产生机械运动误差,降低测量精度,因此人们开始研究并行彩色共聚焦测量系统。Hillenbrand^[14]等人提出了一种

将微机械驱动针孔阵列用于彩色共聚焦系统的传感器,显著提高了测量系统的横向分辨率。Tiziani^[15]等人提出了一种基于微透镜阵列的彩色共聚焦装置,可以在不减小数值孔径的情况下实现对较大目标场的测量,并针对不同的应用场合提出不同的设置方法。

然而,针孔阵列等光分束器件一旦设计制造完成,其参数将固定不变,影响了并行彩色共聚焦显微镜的适用范围。数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)作为一种光分束器件^[16]对光线具有良好的调制性,可以实现柔性的多点并行共聚焦扫描,从而满足对被测物表面形貌的多种测量要求。相较针孔阵列^[17-18]和微透镜阵列^[19]等光分束器件, DMD 具有无机械振动影响、光点阵列参数可变等优势,且 DMD 具有程序可控制性,可以通过合理的扫描策略实现对被测物面的光点扫描,在保证高速成像和高分辨率成像的前提下,无需进行硬件变动或光路调整,即可适应不同的测量要求。

因此,本文提出将 DMD 与彩色共聚焦技术相结合,利用彩色共聚焦原理,以共聚焦光路为基础,以 DMD 为光分束器件,搭建了并行彩色共聚焦测量系统;利用自主研发的颜色转换算法,在该测量系统上进行了一系列实验,证明了该系统可用于表面形貌的高精度测量和三维恢复。

2 系统原理与设计

2.1 单点彩色共聚焦原理

单点彩色共聚焦显微技术原理如图 1 所示。光源发出的光线经过小孔形成点光源,再经准直镜准直后,被色散管镜沿光轴方向色散开,此时,不同波长的光线被会聚在沿光轴方向的不同位置上;光线经被测物面反射后,通过分光镜进入到光电探测器之中,由于光电探测器前方的小孔能挡住大部分杂散光,因此只有一种波长的光线能够

进入到光电探测器中。随着被测物面沿光轴方向的移动,进入到光电探测器的光线的波长也发生改变,通过建立该波长与被测物面轴向位置的关系,便可以根据光电探测器所接收到的光谱信息获得被测物的轴向位移或表面形貌信息。

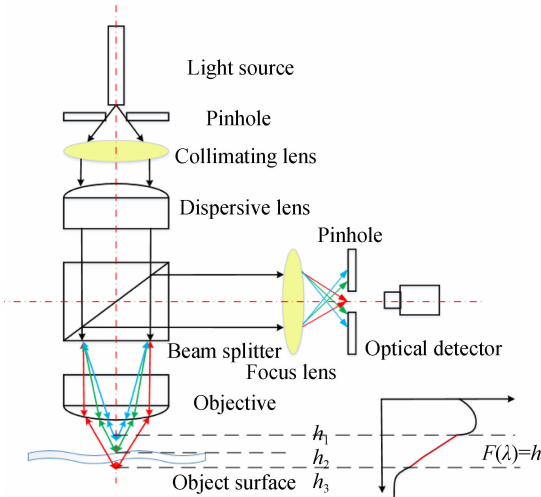


图 1 彩色共聚焦原理

Fig. 1 Schematic of chromatic confocal measurement

2.2 并行彩色共聚焦测量系统

单点彩色共聚焦测量系统由于只能进行单点扫描,测量速度较慢;若能够实现多点彩色共聚焦测量,可显著提高测量速度。并行共聚焦技术通常将一束光分成彼此平行的多束光,实现对被测物面上多个点的同时测量,对光源进行分束的技术包括 Nipkow 转盘、微透镜阵列等。

如图 2 所示,入射光线穿过微透镜阵列后,光线被分割成彼此平行的若干条光束,并照射在物面上,经物面反射后最终由 CCD 接收,这是一种典型的并行共聚焦测量系统。

与现有的并行共聚焦技术相比,并行彩色共聚焦系统中,在物方平行存在着数个彩色聚焦点群,每个彩色聚焦点群都包含了若干个不同颜色的聚焦点,相当于有多个单点彩色共聚焦系统在工作,进一步提高了测量效率。

2.3 基于 DMD 的并行彩色共聚焦测量系统

DMD 是由一定尺寸的微反射镜组成的阵列,每个微反射镜可以通过调制进行 $\pm 12^\circ$ 的偏转。通过控制每个微反射镜的偏转状态,即可方便地将 DMD 反射的光束构建成所需的点阵列光

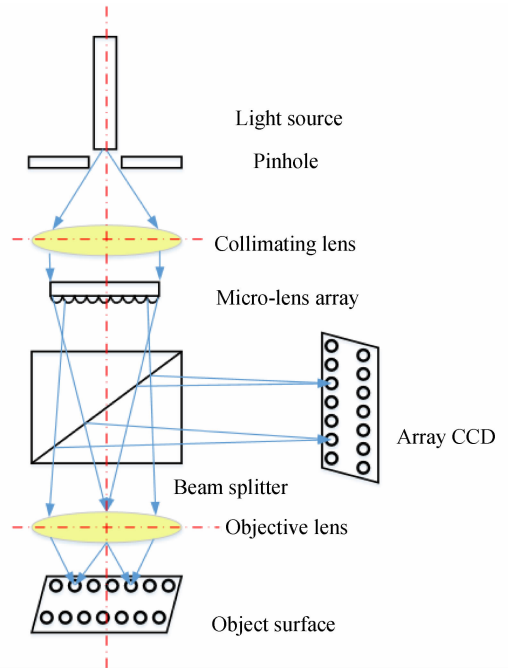


图 2 基于微透镜阵列的并行共聚焦系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of parallel confocal system based on microlens array

源。与采用微透镜阵列所形成的点光源阵列相比,基于 DMD 的点阵列光源具有良好的可调制性,能适应不同要求的测量对象。图 3 为基于 DMD 的并行彩色共聚焦测量系统示意图。

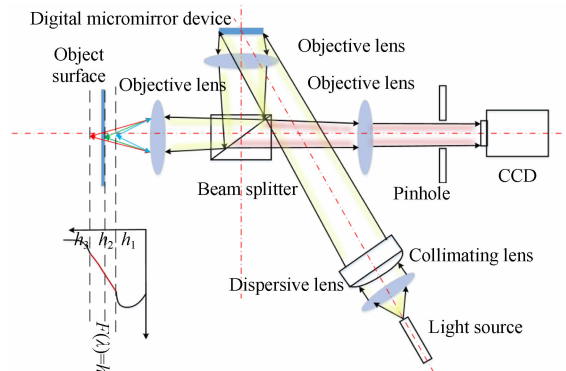


图 3 基于 DMD 的彩色共聚焦测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of chromatic confocal measurement system based on DMD

DMD 作为光分束器件构建并行光源时,可以根据不同的测量环境对光线进行调制,构建参数各异的阵列光源。图 4 展示了光源经 DMD 调制后,形成的 N 行 \times M 列的点光源阵列。

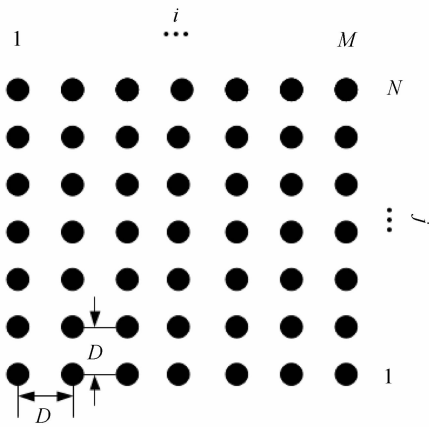


图 4 经 DMD 调制生成的点光源阵列

Fig. 4 Point light source array generated by DMD

该点光源阵列经过共聚焦光学系统, 投射到物体表面并被反射后, 再进入到相机的成像面上。

$$h_{\text{conf}}(x, y, z) = \delta(x, y)h_1(x, y, \Delta z) * h_2(x, y, \Delta z) =$$

$$\iint \delta(x', y')h_1(x', y', \Delta z) \cdot h_2(x - x', y - y', \Delta z) dx' dy' = h_1(0, 0, \Delta z)h_2(x, y, \Delta z), \quad (2)$$

其中: h_2 为聚焦透镜的点扩散函数。则并行彩色

共聚焦系统的总点扩散函数 h_{conf} 可以表述为:

$$h_{\text{conf}} = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \delta_2(x_0 - iD, y_0 - jD) \cdot h_1(x - iD, y - jD, \Delta z) \right] * h_2(x, y, \Delta z) =$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \iint \delta_2(x' - iD, y' - jD) \cdot h_1(x' - iD, y' - jD, \Delta z) * h_2(x - x', y - y', \Delta z) dx' dy' =$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_1(0, 0, \Delta z)h_2(x - iD, y - jD, \Delta z), \quad (3)$$

其中: δ_2 为二维 δ 函数, D 为相邻点光源间距。

式(3)表明, 并行彩色共聚焦系统中, 探测面的总光场分布是各个光源点形成的单个彩色共聚焦光路的光场分布之和, 相当于大量单点彩色共聚焦系统同时工作, 实现了并行彩色共聚焦检测。

2.4 测量系统的建立

基于上述理论分析, 建立了基于 DMD 的并行彩色共聚焦测量实验平台, 如图 5 所示。光源发出的光线经准直透镜准直后, 被课题组自制的色散管镜^[20]沿光轴方向色散开。由于该色散管镜的焦距较长, “景深”较大, 因此光线经过色散管镜后的一定范围内仍可视为准直光。光线被 DMD 调制、反射后, 通过远心光路将 DMD 形成的点光源阵列成像在被测物表面上, 再由被测物面反射后进入到相机中, 从而获得被测物表面的图像信息。

这一过程中, 假设图像空间被离散地划分成若干个小区域 (i, j) ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 同时再假设各点光源满足近似傍轴的条件, 点光源阵列中的每一点光源都会形成一个彩色共聚焦光路, 当任一点光源照射到被测物表面上时, 系统中点扩散函数 h_0 为:

$$h_0(x, y, z) =$$

$$\int \delta(x, y, z - \Delta z) \cdot h_1(x, y, z) dz =$$

$$\delta(x, y)h_1(x, y, \Delta z), \quad (1)$$

其中: δ 函数为光电探测器的采样函数, h_1 为物镜的点扩散函数, (x, y, z) 为物面坐标, Δz 表示光轴方向的离焦量。

当物面点经反射进入到相机的成像面上时, 整个系统的点扩散函数 h_{conf} 为:

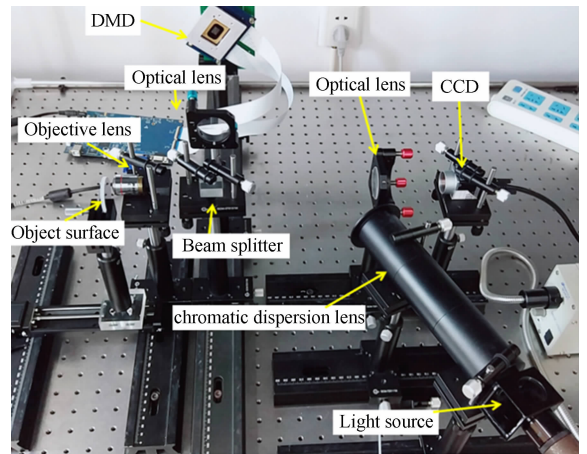


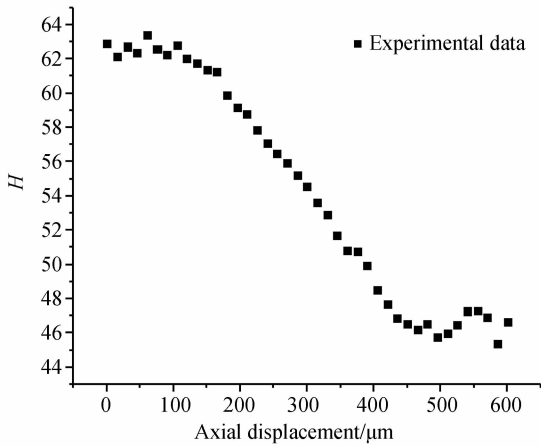
图 5 基于 DMD 的彩色共聚焦测量系统

Fig. 5 Chromatic confocal measurement system based on DMD

3 标定实验

3.1 标定

首先对所搭建的测量系统进行了标定,将被测物沿光轴方向前后移动,聚焦在被测物面的光线的波长将随之发生改变,彩色相机所接收到的图像的颜色信息也将产生变化。所采集到的图像



颜色信息可视为相机的 RGB 信息,通过自主研究的颜色转换算法^[21],能够建立被测物轴向位移与图像 RGB 信息之间的关系,进而可获得图像颜色与轴向位移的关系,再通过直线拟合可得到一段线性区域,该区域即为该实验装置的测量范围。通过颜色转换算法,使彩色相机能够顺利应用于彩色共聚焦测量系统。实验数据与拟合后的线性区间如图 6 所示。

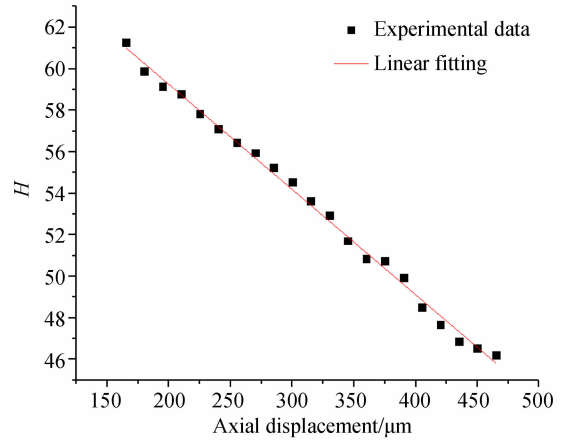


图 6 标定实验结果及线性区间拟合

Fig. 6 Calibration results and linear interval fitting

拟合后得到色调参数与轴向位移的关系式:

$$H = -0.05x + 61.02, \quad (4)$$

其中: H 表示色调参数, x 表示轴向位移。由标定结果可知,在四倍物镜的条件下,实验装置的测量范围为 $300 \mu\text{m}$,线性相关系数 $R^2 = 0.99$ 。

3.2 台阶高度测量

选择两块高度分别为 $1\ 040 \mu\text{m}$ 和 $1\ 090 \mu\text{m}$ 的一级量块构建了一个 $50 \mu\text{m}$ 高度的台阶(图 7),该量块经奥林巴斯激光显微镜 OLS5000 检测,测量结果为 $50.14 \mu\text{m}$ 。对该台阶表面进行测

量,选取彩色相机所得点阵列图形中的数个点的测量平均值作为测量结果。通过多次测量,并将多次测量结果代入公式(4)中,获得的台阶测量数据如图 8 及表 1 所示。

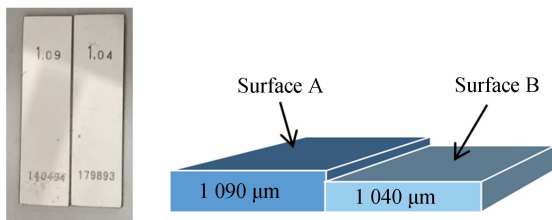


图 7 台阶实物图及测量示意图

Fig. 7 Schematic diagram of step measurement

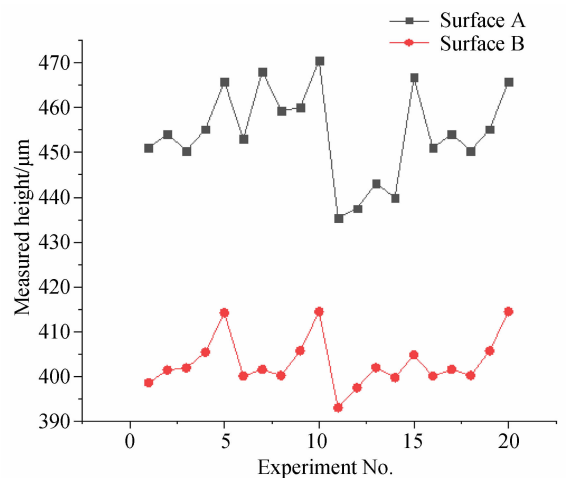


图 8 台阶高度测量结果

Fig. 8 Measurement results of step height

表 1 台阶高度的实验数据及计算结果

Tab. 1 Experimental data and calculation results of step height (μm)

实验序号	测量高度		差值
	表面 A	表面 B	
1	451.02	398.62	52.40
2	454.09	401.42	52.66
3	450.41	401.90	48.51
4	455.17	405.44	49.72
5	465.84	414.21	51.62
6	453.01	400.09	52.92
7	468.13	401.56	66.56
8	459.31	400.22	59.09
9	460.00	405.74	54.26
10	470.54	414.51	56.03
11	435.38	393.04	42.34
12	437.50	397.49	40.01
13	443.16	401.99	41.17
14	439.92	399.78	40.13
15	466.70	404.79	61.91
16	451.02	400.09	50.93
17	454.09	401.56	52.52
18	450.41	400.22	50.19
19	455.17	405.74	49.42
20	465.84	414.51	51.32
平均值	454.33	403.15	51.20
相对误差			2.11%

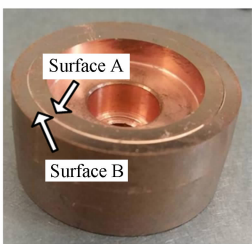
由以上数据可知,该测量系统在测量高度为 $50.14 \mu\text{m}$ 高度差的台阶时,测量平均值为 $51.20 \mu\text{m}$,相对误差为 2.11% 。

然后,对自制台阶(图 9(a))的 A,B 两个表面进行测量。经奥林巴斯激光显微镜 OLS5000 测量,该台阶的高度为 $28.94 \mu\text{m}$ (图 9(b))。在本文所搭建的系统下进行测量,台阶高度为 $29.98 \mu\text{m}$ (图 9(c)),相对误差为 3.59% 。这些误差主要是由于轴上点与轴外点色散的不均匀性造成的,这种不均匀性会导致在同一个成像平面上分布着处于不同波长光点的现象,虽然该误差可以进行修正,但难以彻底消除。目前,该实验系统的测量分辨力能够达到微米级。

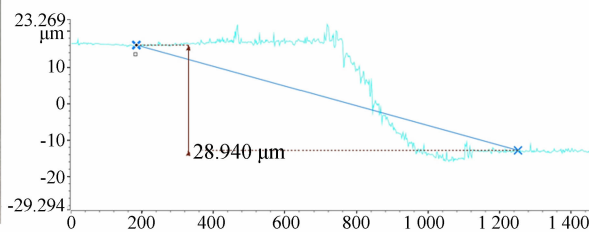
3.3 硬币表面三维形貌恢复

为验证该系统的三维形貌测量能力,将被测物换为一元硬币,对硬币表面形貌特征进行测量。选择对一元硬币反面(图 10)的拼音部分的字母“H”进行测量,对系统采集到的测量结果经过数据处理之后,最终得到如图 11 所示三维形貌还原图像。

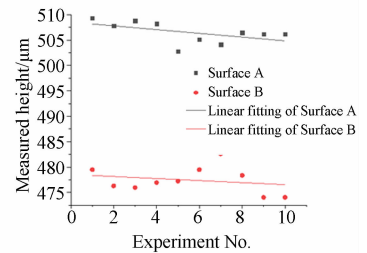
由图 11 可知,虽然在三维重构过程中还原图像存在一定误差,但是基本可以得到被测物的表面特征,验证了本系统可以通过多点同时测量进行微观表面检测及三维形貌测量。



(a) 自制台阶实物图
(a) Self-made step



(b) OLS5000 显微镜下测量结果
(b) Measurement results of OLS5000



(c) 实验系统测量结果
(c) Measurement results of experimental system

图 9 自制台阶实物图及测量结果

Fig. 9 Self-made step and its measurement results



图10 一元硬币实物

Fig. 10 Photo of a coin

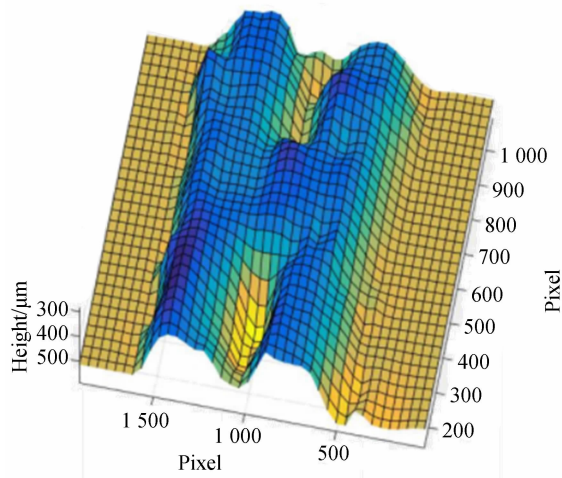


图11 “H”的三维形貌还原图像

Fig. 11 Three-dimensional reconstruction image of 'H'

4 结论

本文以彩色共聚焦技术的原理为基础,利用DMD和彩色相机,以及自主研制的色散管镜及颜色转换算法,建立了并行彩色共聚焦测量系统,实现了对被测物面的多点并行测量,解决了单点彩色共聚焦测量效率较低的问题。理论分析和实验结果均表明,该系统的轴向测量范围为

300 μm ,测量精度可达微米量级,并能够对被测物表面的形貌进行三维重构。该系统通过一次拍照能够得到硬币表面的三维重构图,但受限于视场范围,目前只能进行局部的三维形貌恢复,如何进一步得到全场三维形貌仍有待研究。同时,未来还将对三维重构算法做进一步优化,对测量系统的各项误差进行分析补偿,进一步提高系统的测量精度,更加精确地恢复被测物表面的三维形貌。

参考文献:

- [1] 刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1449-1457.
LIU ZH Q, YI D R, KONG L H, et al.. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1449-1457. (in Chinese)
- [2] BAI J, LI X H, ZHOU Q, et al.. Improved chromatic confocal displacement-sensor based on a spatial-bandpass-filter and an X-shaped fiber-coupler [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10961-10973.
- [3] ZHUO G Y, HSU C, WANG Y, et al.. Chromatic confocal microscopy to rapidly reveal nanoscale surface/interface topography by position-sensitive detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(8): 083106.
- [4] CHEN L, NGUYEN D T, CHANG Y W. Precise optical surface profilometry using innovative chro-

matic differential confocal microscopy [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5660-5663.

- [5] 宋丽梅, 魏泽, 杨燕昱, 等. 物体表面非接触式高精度瑕疵检测与三维重建[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10s): 87-94.
SONG L M, WEI Z, YANG Y G, et al. Noncontact high-precision flaw detection and three-dimensional reconstruction of object surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10s): 87-94. (in Chinese)
- [6] HARMENING W M, TIRUVEEDHULA P, ROORDA A, et al.. Measurement and correction of transverse chromatic offsets for multi-wavelength retinal microscopy in the living eye[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(9): 2066-2077.
- [7] YU Q, ZHANG K, CUI C C, et al.. Method of thickness measurement for transparent specimens with chromatic confocal microscopy [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(33): 9722-9728.
- [8] BOETTCHER T, GRONLE M, OSTEN W. Single-shot multilayer measurement by chromatic con-

- focal coherence tomography[C]. *SPIE Optical Metrology. Proc SPIE 10329, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X, Munich, Germany*, 2017: 103290K.
- [9] SANZ C, GIUSCA C, MORANTZ P, *et al.*. Form measurement of a 0.1 mm diameter wire with a chromatic confocal sensor, with associated uncertainty evaluation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 074010.
- [10] 王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
WANG J N. *Research and Design of Chromatic Confocal Displacement Sensor*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 刘伯奇. 基于彩色光谱共焦的轮廓及厚度精确测量[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
LIU B Q. *Precise Measurement of Profile and Thickness Based on Color Spectral Confocal*[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 211-217.
MA J, QI Y J, LU Z X, *et al.*. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 211-217. (in Chinese)
- [13] 周勇, 郭帮辉, 李灿, 等. 透镜中心厚度测量系统出射光谱的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 148-154.
ZHOU Y, GUO B H, LI C, *et al.*. Research on spectrum bandwidth of emergent light in lens center thickness measurement system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 148-154. (in Chinese)
- [14] HILLENBRAND M, WEISS R, ENDRODY C, *et al.*. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [15] TIZIANI H J, ACHI R, KRAMER R N. Chromatic confocal microscopy with microlenses[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(1): 155-163.
- [16] 张锐, 潘明忠, 杨晋, 等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12): 2994-3000.
ZHANG R, PAN M ZH, YANG J, *et al.*. Optical system of echelle spectrometer based on DMD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2994-3000. (in Chinese)
- [17] HILLENBRAND M, MITSCHUNAS B, BRILL F, *et al.*. Spectral characteristics of chromatic confocal imaging systems [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(32): 7634-7642.
- [18] KIM H, MOON S K, SEO M. Hybrid layering scanning-projection micro-stereolithography for fabrication of conical microlens array and hollow microneedle array[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 153: 15-19.
- [19] 孟晶晶, 余锦, 翁泽强, 等. 激光光斑照度的散射成像测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 142-149.
MENG J J, YU J, MO Z Q, *et al.*. Laser spot illuminance measurement method based on scattering imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 142-149. (in Chinese)
- [20] 崔长彩, 李煌, 余卿, 等. 彩色共焦系统可调制色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 343-351.
CUI CH C, LI H, YU Q, *et al.*. Design of adjustable dispersive objective lens for chromatic confocal system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 343-351. (in Chinese)
- [21] 张昆, 余卿, 邵尊桂, 等. 基于彩色相机颜色转换算法的彩色共聚焦测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 151-158.
ZHANG K, YU Q, SHAO Z G, *et al.*. Chromatic confocal measurement method using color camera and color conversion algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 151-158. (in Chinese)

作者简介:



张 一(1995—),女,河北承德人,硕士研究生,2018年于华侨大学获得学士学位,主要研究方向为光电检测。E-mail: zhangyi5511@126.com



余 卿(1983—),男,江西定南人,博士,副教授,2005年、2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要研究方向为光电检测、精密机械设计等。E-mail: yuqing@hqu.edu.cn