

一种全场三维共焦检测的新方法*

田维坚 丁志华

(浙江大学, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

郭履容 陈波 庞霖

(四川联合大学, 信息光学研究中心, 成都 610064)

摘 要 提出了一种利用微光学阵列合成器件实现全场三维面形并行检测、记录的共焦方法。此方法的关键是, 在共焦系统中引入了一微光学阵列合成器件来产生一点光源列阵, 实现了对同一剖面同时并行检测, 并首次采用了 CCD 面阵像元取代小孔光阑直接截取三维信息光强。本文讨论了该方法的三维信息检测原理、响应关系, 给出了初步的实验结果和三维重构图。

关键词 全场三维面形, 并行共焦检测, 微光学阵列合成器件, CCD 面阵像元。

1 引 言

近年来, 基于共焦原理的飞点扫描层析术以其高对比度、高分辨率、易于实行三维成像数字化处理等显著优点, 已越来越引起人们的关注, 并且已发展为成熟的商品化仪器^[1]。然而, 最新研究动向表明, 在全场三维共焦光学检测技术中, 有试用部分共焦或光学微器件的方法。其主要目的是希望达到较大视场, 加快检测速度, 克服现有共焦飞点扫描显微镜的不足, 但从实验结果来看, 也都存在着一些问题, 并不十分理想^[2~4]。

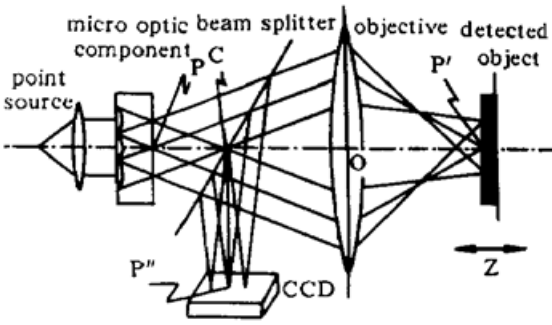
基于对以往工作的研究和分析, 本文提出了一种新的共焦三维面形检测方法——利用微光学阵列实现三维面形并行抽样、记录的方法。此方法主要是在共焦系统中, 引入了一个由微透镜阵列和小孔列阵组成的微光学阵列合成器件, 此合成器件在共焦系统中产生一个匀称的二维平面点光源列阵, 实现了同一剖面同时并行检测, 从而取代了传统的共焦系统中利用光学扫描器对剖面扫描。该合成器件利用微透镜列阵将光束会聚, 提高了光能利用率, 利用小孔阵列光阑阻挡了杂散光的通过, 增大了信噪比。另外, 此共焦系统首次直接用 CCD 面阵上的像元替代了小孔光阑来截取共焦点像的光强, 解决了从器件表面反射回来的强烈眩光的问题, 简化了装置和操作。具有较高的性能价格比。

2 三维并行共焦检测原理

并行共焦检测光学系统的光路原理如图 1 所示, 平行光经过微光学阵列合成器件后, 即

* 中国博士后科学基金和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放项目(LM01-9708)资助。

收稿日期: 1997-03-05; 收到修改稿日期: 1997-12-03



产生了一个匀称的点光源阵列，这个点光源阵列通过物镜投射在被测物体上，对被测物面实行同时全场平面并行抽样。三维信息的检测，可以其中任一道检测光路为例来加以分析：点光源 P 经物镜投射在物面 P' 点上。由物面上 P' 反射回来的光线经同一物镜、分束器聚焦在探测平面上，由安置在此的 CCD 面阵相应像元 P'' 接收，转化为光电信号。这里，CCD 面阵与点光源阵列到物镜的距离应严格一致，即保证

Fig. 1 Scheme of the micro-array parallel confocal detecting system

$$\overline{PCO} = \overline{P''C} + \overline{CO} \tag{1}$$

若 P' 恰好处于 P 的共焦面上时，则在 CCD 面阵上的 P'' 像元将接收到光强最大值，若物面上的 P' 点处于轴向离焦的位置，则 P' 处就弥散成一较大的光斑，由此光斑散射的光线再经过物镜、分束器投影到 CCD 面阵时，光强分布也扩散到了 P'' 周围， P'' 处像元接收到的光强就会相对减弱。因此，在对纵向 z 进行剖面抽样的过程中，从探测到的最大强度值 I 即可确定 P' 点的第三维值 z 。

对于全场平面上的所有抽样点而言，并行三维信息的检测过程可采用矩阵形式来加以讨论^[5]。设点光源阵列共有 n 列、 m 行，通过物镜将其分割面地并行投射到被测物面上，这可看作是一个线性变换过程 M ，在被测物面上的点阵总数、行与列都保持不变，即有

$$M[n \times m] \tag{2}$$

可简单地假定 $M = 1$ ，即被测物平面 (x, y) 上有并行抽样点 $n \times m$ ，则样点坐标可分别表为：

$$\begin{cases} x_i, & i = 0, 1, 2, \dots, n - 1; \\ y_j, & j = 0, 1, 2, \dots, m - 1 \end{cases} \tag{3}$$

设在检测过程中，点光源阵列在纵向 z 轴方向共形成并行共焦剖面像 l 次，各剖面间距均为 Δz ，即样点纵向坐标可表为：

$$z_k = k\Delta z, \quad k = 0, 1, 2, \dots, l - 1 \tag{4}$$

对应于某一共焦剖面 k ，探测面阵都可并行接收到各抽样点 (x_i, y_j) 上的强度值 (I_{ij}) ，并得到由 $(x_i, y_j, I_{i,j})$ 三值表示的 k 剖面阵列

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, m - 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

剖面为 l 次，则共有三值数组剖面阵列 l 个：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}_0, \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}_1, \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}_2, \dots, \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}_k, \dots, \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ I_{ij} \end{bmatrix}_{l-1}, \quad \begin{bmatrix} i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, m - 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

对以上 l 幅剖面阵列同名抽样点 (x_i, y_j) 的强度值 $(I_{i,j})$ 进行比较，选出最大值 $(I_{i,j})_{\max}$ 并确定其所在的某一剖面 k ，根据(4)式，求得

$$z_{ij,k} = k\Delta z$$

用 $(z_{ij,k})$ 替换 $(I_{i,j})_{\max}$ ，则该样点三维值数组为 $(x_i, y_j, z_{ij,k})$ 。最后，由这样的一组三维值阵

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ z_{ij,k} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ j = 0, 1, 2, \dots, m-1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

列构成了被测物体的三维面形。

三维并行共焦检测方法的关键, 是采用了一阵阵点光源, 同时成像在物面上照明物点, 然后, 物面各点又同时成像在探测面阵上, 它们都是同时点点对应的, 即: 用一点光源阵列同时完成了全场共焦三维信息的采集和记录。而一般共焦飞点扫描的三维检测系统, 采用的是分时单点抽样检测法。它需要用光束扫描器按一定的时序间隔, 对采样光点执行全场的逐点扫描抽样。

3 并行共焦检测实验系统与结果

3.1 实验系统的配置

实验系统分为光学检测、光电接收与数据图像记录、数据处理与面形重构三部分, 其配置及主要流程如图 2 所示。光学检测部分的光路结构已在图 1 中给出。在此, 光源选用了主峰为 541 nm、半高谱宽约为 10 nm 的准单色非相干光, 既可消除相干噪声, 又得到较满意的纵向强度响应关系 $I(z)$ (参见图 3)。微透镜阵列是为此工作设计、制作的折射型、无死区阵列, 每单元尺寸 $100 \mu\text{m}$, 共 40×40 单元。实验测定该微透镜阵列焦距为 $1.442 \pm 0.001 \text{ mm}$, 焦斑大小 $15.1 \pm 0.3 \mu\text{m}$, 会聚于焦斑上的实际光能利用率约为 80%。与微透镜阵列相配置的 40×40 小孔阵列, 放在微透镜焦平面上, 小孔直径 $b = 25 \mu\text{m}$ ^[6]。

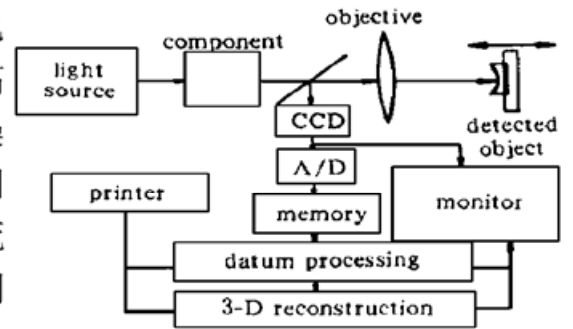


Fig. 2 Block diagram of the experimental system

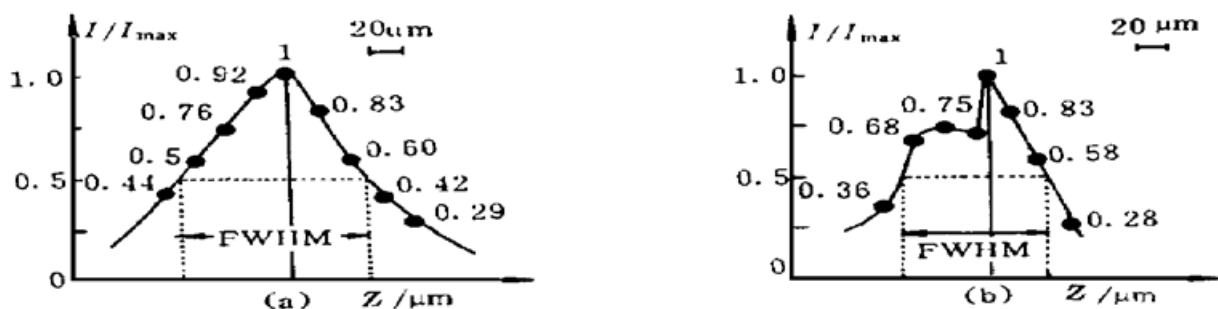


Fig. 3 Response curves of the micro-array parallel confocal detecting system

在图 2 的配置中, CCD 面阵是采用德国 Videv EUROLINE 512×512 CCD 面阵, 像元尺寸 $14 \mu\text{m}$, 灰阶信息 8 bit, 计算机采用 AST/P75 586 型机, 内存 24 M, 配置有图像卡 Prime Time COMBO; 数据图像处理及三维面形的测定为此配套设计的专用软件来完成。

3.2 实验系统的主要性能

用于三维面形检测的共焦系统, 首先要考虑的是它的纵向光强分布, 或者可称为光强随深度变化的响应关系 $I(z)$ 。已有文献给出了理论上的响应关系^[7], 在准傍轴区域内它是一个 sinc^2 函数, 即

$$I(z) = \left\{ \frac{\sin [kz(1 - \cos \alpha)]}{kz(1 - \cos \alpha)} \right\}^2 \quad (8)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, $\sin \alpha = N.A.$ 为显微镜物镜的数值孔径。

而在这响应关系中, 用于衡量共焦系统纵向分辨性能的参数是半极值全宽 $FWHM$ 为:

$$FWHM = 0.443\lambda / (1 - \cos \alpha) \quad (9)$$

与(8)式相同, 这里 $\alpha = \sin^{-1} NA$ 。

根据公式(8)、(9), 同样可从理论上计算出微光学阵列并行共焦实验系统各抽样点的响应关系 $I(z)$ 及半极值全宽, 并可与实际测量结果进行比较。例如, 用 $\lambda = 541 \text{ nm}$ 的准单色光作光源, 在像方实际数值孔径 $N.A.$ 分别为 0.073 和 0.096 时, 可求得理论值 $FWHM_T$ 分别为 $89 \mu\text{m}$ 和 $52 \mu\text{m}$, 对应的实验值 $FWHM_E$ 则分别约为 $120 \mu\text{m}$ 和 $95 \mu\text{m}$ 。实验值与理论值之比, 分别为 $120/89 \approx 1.3$ 、 $95/52 \approx 1.8$ 。这个比值与现有激光飞点扫描共焦系统的比值基本相同^[8]。理论值与实验值存在的这个差异, 主要原因是光学系统的像差及伴之而来的纵向响应非对称性^[9]。

3.3 实验测试结果

初步实验结果表明, 微光学阵列并行共焦检测可达到较大的视场范围、长物距和有较大的纵向检测范围以及较高的精度, 在本实验条件下, 视场范围约为 $4 \times 4 \text{ mm}^2$, 物距可在 $10 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm}$ 的量级上, 最大纵向测量范围约 1 mm , 精度可达到 $20 \mu\text{m}$, 相对误差小于 10%。

另外, 用该实验系统还对人民币壹分硬币的“1”字进行了实际试测。利用准单色非相干



Fig. 4 Two images of confocal profile series on coin with experimental system. (a) The surface of character “1” located on the confocal plane, (b) The base of character “1” located on the confocal plane

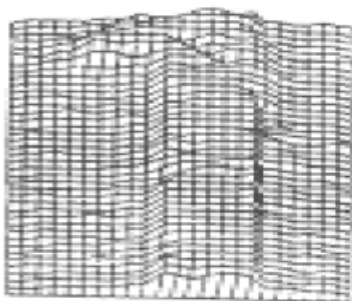


Fig. 5 The 3-D reconstructed topography of character “1”

光 $\lambda = 541 \text{ nm}$ 作光源, 测量面积 $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$, 共取剖面 9 幅, 剖面步进 $40 \mu\text{m}$ 。测量结果峰谷高度差 $240 \mu\text{m}$ 。图 4 给出了“1”字面和底面恰在共焦面上, 点光源列阵分别清晰成的剖面像图 4(a)、图 4(b)。图 5 给出了经计算机处理后的“1”字三维重构图。

结束语 微阵列三维面形并行共焦检测方法, 首次在共焦系统中采用了微光学阵列合成器件产生点光源列阵, 实现同一剖面同时并行检测, 并首次采用了 CCD 面阵像元取代小孔光阑直接截取三维信息光强, 真正达到了点-点共焦对应的关系。实现了多道光路的并行共焦检测。较成功地在共焦系统中发挥了光学信息并行处理的特点, 克服了原共焦系统需较长扫描时间, 并由此引入偏差的问题。

同时提高了能量利用率, 改善了信噪比, 简化了装置和操作。具有较高的性能价格比和应用

前景。

浙江师范大学物理系的李勇老师、王辉教授和唐继跃博士, 浙江大学现代化光学仪器国家重点实验室包正康副主任、杨建文博士后, 中科院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室杜春雷副主任, 都曾给予许多有益的帮助和建议, 在此, 作者向他们表示最真诚的谢意!

参 考 文 献

- [1] C. J. R. Sheppard, (ed. by H. Ohzu, S. Komatsu), Progress in confocal microscopy and its application. *The 3rd International Conference on Optics Within Life Sciences-OWLS III*, Publ. by Elsevier Science B. V. in Amsterdam, 1994 : 91~ 94
- [2] G. Q. Xiao, T. R. Corle, G. S. Kino, Real time confocal scanning optical microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(8) : 716~ 718
- [3] H. J. Tiziani, H. M. Uhde, Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4) : 567~ 572
- [4] H. J. Tiziani, R. Achi, R. N. Kr men *et al.*, Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1) : 120~ 125
- [5] 田维坚等, 并行共焦检测的在维信息获取与处理过程. *光学仪器*, 1997, **19**(4) : 24~ 26
- [6] W. J. Tian, J. W. Yang, Z. K. Bao *et al.*, New method for measuring the properties of optical systems with microoptic components. *Proc. SPIE*, 1996, **2899** : 263~ 268
- [7] C. J. R. Sheppard, H. J. Matthews, The extended-focus, auto-focus and surface-profiling techniques of confocal microscopy. *J. Mod. Opt.*, 1988, **35**(1) : 145~ 154
- [8] T. D. Doukoglou, I. W. Hunter, Spherical-cordinate scanning confocal laser microscope. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(7) : 2103~ 2108
- [9] T. Wilson, A. R. Carlini, Size of the detector in confocal imaging systems. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4) : 227~ 229

A Confocal Method for Measuring Whole-Field Three-Dimensional Surface Topography

Tian Weijian Ding Zhihua

(The State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hongzhou 310027)

Guo Lurong Chen Bo Pang Lin

(Information Optics Research Centre, Sichuan Union University, Chengdu 610064)

(Received 5 March 1997; revised 3 December 1997)

Abstract A confocal method for measuring whole-field 3-D surface topography, which employs a micro-optic component to realize parallel measuring and recording is proposed. An array of point light sources produced by the micro-optic component is used to detect one of the confocal plane series simultaneously. And as an alternative to a pinhole diaphragm, the pixels on the CCD plane directly capture and register the 3-D information intensities from the detected planes. The principle and the depth response relation of the method are discussed, and the primary experimental results and a 3-D reconstructed image are given.

Key words whole-field 3-D surface topography, parallel confocal measuring, micro-optic component, pixels on the CCD plane.