

文章编号: 0258-702X(2002)03-0263-04

# 基于针孔阵列的多光束共焦三维测量系统

孔 兵, 王 昭, 谭玉山, 弥 宁

(西安交通大学激光与红外应用研究所, 西安 710049)

**提要** 提出了一种基于  $500 \times 500$  的针孔阵列的多光束共焦三维测量系统, 该系统具有测量视场大, 测量速度快, 系统结构简单等特点。

**关键词** 共焦测量, 针孔阵列, 三维轮廓, 误差标定

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Multi-beam Confocal System Using Pinhole Array

KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan, MI Ning

(Laser & IR Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** The  $500 \times 500$  pinhole array is used in the multi-beam confocal system for 3D measurement. The equipment needn't mechanical rotation, thus it is simple in the mechanism, also the measuring field is larger. With the interpolation technique, the 3D profile can be got quickly with high precision.

**Key words** confocal measurement, pinhole array, 3D profile, error calibrating

## 1 引 言

由于具有非接触、精度高、测量速度快的特点, 多光束共焦测量已经成为一种重要的光学三维测量手段。扫描共焦显微镜(CSOM)的原理如图 1 所示, 通过针孔的光经过透镜的汇聚作用照射到被测物上, 反射回来的光再次经过透镜照射到针孔面上, 当其位于针孔共轭面时, 即被测物与针孔共焦时, 根据光线传播的几何性质, 大部分光线可以通过针孔到达其后的检测器件(图中未画出), 而当被测物离焦时, 大部分反射光将被针孔遮挡, 检测器接收到的光强大大降低。正是由于共焦显微镜具有很高的深度分辨力, 使其在医学、工业等领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。而多光束共焦三维测量将点、面照明有机地结合在一起, 用点光源阵列并行投射到被测物平面上, 从而实现全场测量, 缩短了检测时间, 降低了成本, 适合于物体的在线三维测量<sup>[2]</sup>。

G. Q. Xiao 等提出了一种全场共焦扫描显微镜<sup>[3]</sup>, 由于采用旋转 Nipkow 盘进行扫描, 增加了系

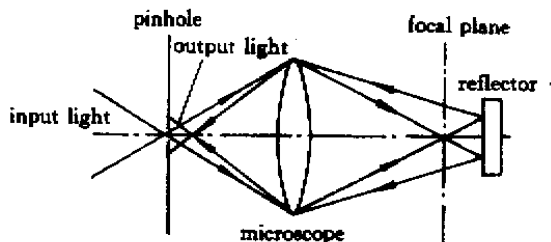


图 1 共焦扫描显微镜(CSOM)原理示意图

Fig.1 Illustration of the principle of the confocal scanning optical microscope(CSOM)

统的复杂程度, 采用显微物镜进行测量, 测量视场较小。为此本文提出采用普通光学透镜取代显微物镜, 减小数值孔径, 在牺牲一定的测量精度的情况下, 可减小针孔间距, 提高单位面积上的针孔数, 当针孔数目与 CCD 像元数相当时, 就可实现非扫描的全场测量, 简化系统结构, 提高测量速度, 同时还带来另外一个好处, 即扩大测量视场。

收稿日期 2000-11-20; 收到修改稿日期 2001-02-19

基金项目 西安交通大学行动计划 A[2000]000063 及西安交通大学在职博士基金 99-522 资助项目。

作者简介 孔兵(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事数字图像处理、精密检测等。E-mail: KBMAIL@sohu.com

### 2 多光束共焦测量原理

所采用的基于针孔阵列的多光束共焦测量系统如图 2 所示 其工作原理如下。

针孔  $P$  处的点光源 ,经过成像系统成像到  $P'$  点 ,当被测物处于  $P'$  点时 ,反射回来的光线经同一个物镜聚焦到针孔  $P$  ,成像到探测器  $P''$  点 ,此时探测器信号达到最大值 ,当被测物沿轴向移动时 ,照射光将在被测物表面弥散开来 ,反射回来通过针孔  $P$  的光通量减少 ,从而导致探测器接收到的信号减少。为了提高信噪比 ,在本系统中采用了偏振立方棱镜作为分光和检光器件 ,加入  $1/4$  波片使返回的信号光振动方向偏转  $90^\circ$  从而到达探测器。

本系统中采用的针孔阵列为  $500 \times 500$  ,针孔直径为  $10 \mu\text{m}$  ,针孔间距为  $50 \mu\text{m}$  ,透镜  $L_2$  与  $L_3$  焦距之比为  $4:1$  ,即测量视场可达到  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。

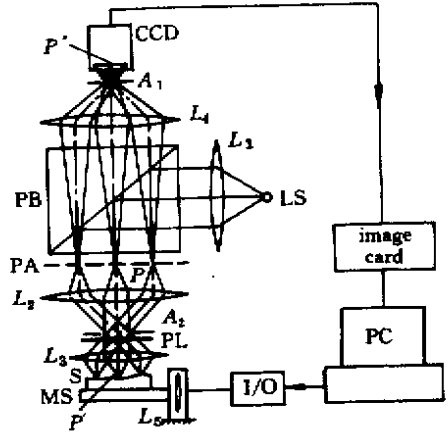


图 2 使用针孔的多光束共焦显微镜原理  
 $L_1 \sim L_5$  :透镜 ; $A_1, A_2$  :小孔 ; $LS$  :光源 ; $PL$  : $1/4$  波片 ;  
 $PA$  :小孔阵列 ; $PB$  :偏振分束器 ; $MS$  :活动台 ; $S$  :样品  
Fig.2 Principle of multiple-beam confocal microscope using pinhole array

### 3 三维轮廓的快速提取

根据文献 [4] ,沿轴向 ( $z$ ) 的光强分布可以近似

$L_1 \sim L_5$  : lens ;  $A_1, A_2$  : aperture ;  $LS$  : light source ;  $PL$  :  $1/4 \lambda$  plate ;  
 $PA$  : pinhole array ;  $PB$  : polarizing beam-splitter ;  $MS$  : moving stage ;  $S$  : sample

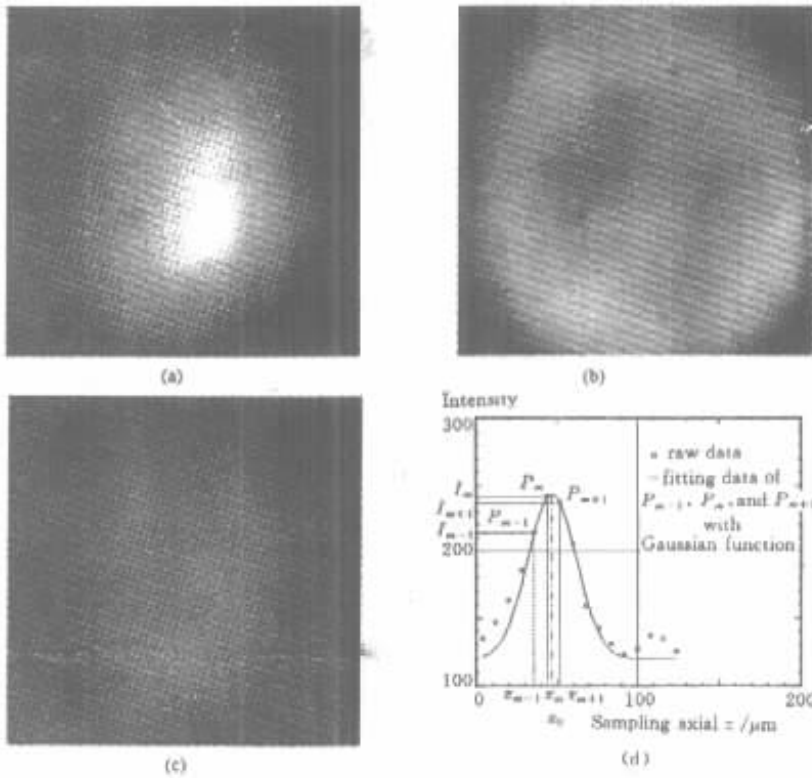


图 3 采用上述设备对平面镜进行测量的结果

采样位置分别为 (a)  $z = 36 \mu\text{m}$  (b)  $z = 68 \mu\text{m}$  (c)  $z = 124 \mu\text{m}$  (d) 为点  $(1500 \mu\text{m}, 1500 \mu\text{m})$  沿采样轴向的光强分布

Fig.3 Analysis of a mirror measured with the refered equipment

The sampling position were (a)  $z = 36 \mu\text{m}$  , (b)  $z = 68 \mu\text{m}$  , (c)  $z = 124 \mu\text{m}$  and (d) gave the distribution of intensity at point  $(1500 \mu\text{m}, 1500 \mu\text{m})$  along the sampling axial

表示为

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

其中  $k$  为波数  $2\pi/\lambda$  ,  $\sin\alpha$  为数值孔径。

光强变为最大值一半时对应的宽度称为半极值宽度(FWHM),其值为

$$FWHM = \frac{0.44\lambda}{1 - \cos\alpha} \quad (2)$$

图 3 为采用本系统对理想平面镜的光强采样结果,由图 3(a)~(c)可见,针孔阵列首先与平面镜的中心位置相交,表现为图像中心较亮,随着平面镜的轴向移动,焦平面与平面镜的相交位置由中心向外移动,在采样图像中有一较亮的圆环,平面镜进一步移动,圆环也在进一步外移。试验结果表明该系统的焦平面发生了弯曲,对理想平面镜的测量结果表

$$z_0 = z_m + \frac{1}{2} \cdot \frac{(z_{m+1} - z_m)^2 \cdot (\ln I_m - \ln I_{m-1}) - (z_m - z_{m-1})^2 \cdot (\ln I_{m+1} - \ln I_m)}{(z_{m+1} - z_m) \cdot (\ln I_m - \ln I_{m-1}) - (z_m - z_{m-1}) \cdot (\ln I_{m+1} - \ln I_m)} \quad (3)$$

当采样间距恒定时,即

$$z_2 - z_1 = z_3 - z_2 = \dots = z_m - z_{m-1} = \dots = z_n - z_{n-1} = \Delta z$$

(3)式可以简化为

$$z_0 = z_m + \frac{1}{2} \cdot \frac{(\ln I_{m+1} - \ln I_{m-1}) \cdot \Delta z}{2 \cdot \ln I_m - \ln I_{m+1} - \ln I_{m-1}} \quad (4)$$

利用这种算法来分析图 3(d)的结果,求出的焦

征了焦平面的弯曲程度。

分析图 3(d)结果,如果直接将其上光强最大的点  $P_m$  对应的轴向坐标  $z_m$  作为点(1500  $\mu\text{m}$ , 1500  $\mu\text{m}$ ) 处的测量高度,很明显采样间距直接决定了测量的精度(当然采样间距要合适,大不能超过 2FWHM,小不能低于 CCD 灵敏度所能探测的范围)。利用该方法测量的结果如图 5(a)所示。

文献 [5] 中给出了一种适用于共焦测量的快速算法——内插值法,与第一种算法相比,这种算法利用了较多采样点的信息,除最高点  $P_m$  外,还包括在其两侧的点  $P_{m-1}$ ,  $P_{m+1}$ 。由于利用了更多点的信息,测量精度得到提高。内插值法的思想是采用高斯拟合,然后利用拟合方程,求出焦点的位置。焦点的计算公式如下

点位置为  $z_0 = 47.06 \mu\text{m}$ ,很明显,以  $z_0$  作为焦点的位置比  $z_m = 44 \mu\text{m}$  更接近实际焦点位置。图 4(b)为对平面镜的轮廓的测量结果,相对于图 4(a),该测量结果更平滑,表明了这种算法的有效性。

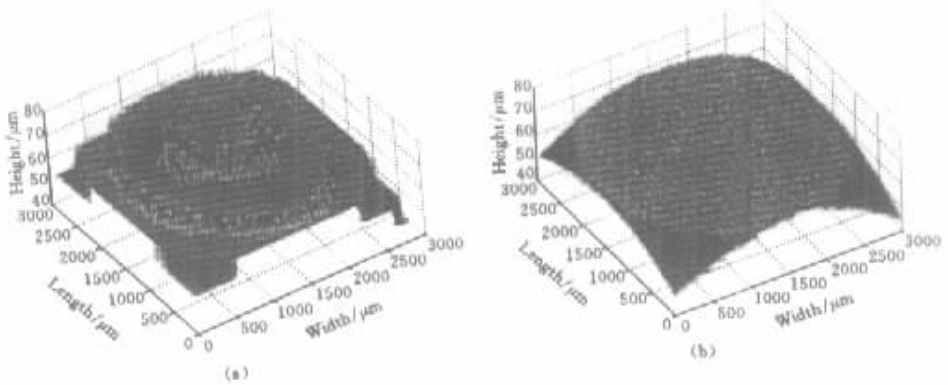


图 4 平面镜的三维轮廓

(a)采用直接比较法 (b)采用内插值法

Fig.4 3-D plot of the mirror

(a) using the direct comparison ;(b) using the interpolation technique

### 4 试验结果处理

如前所述,对平面镜的测量结果发生了弯曲,表明该系统本身存在系统误差。在此采用二次曲面进行误差标定,标定公式如下

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (5)$$

其中  $a, b, c, d, e, f$  根据最小二乘法确定,公式如下:

$$\begin{bmatrix} \overline{x^2} & \overline{y^2} & \overline{xy} & \overline{x} & \overline{y} & 1 \\ \overline{x^4} & \overline{x^2y^2} & \overline{x^3y} & \overline{x^3} & \overline{x^2y} & \overline{x^2} \\ \overline{x^2y^2} & \overline{y^4} & \overline{xy^3} & \overline{xy^2} & \overline{y^3} & \overline{y^2} \\ \overline{x^3y} & \overline{xy^3} & \overline{x^2y^2} & \overline{x^2y} & \overline{xy^2} & \overline{xy} \\ \overline{x^3} & \overline{xy^2} & \overline{x^2y} & \overline{x^2} & \overline{xy} & \overline{x} \\ \overline{x^2y} & \overline{y^3} & \overline{xy^2} & \overline{xy} & \overline{y^2} & \overline{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{z} \\ \overline{x^2z} \\ \overline{y^2z} \\ \overline{xyz} \\ \overline{xz} \\ \overline{yz} \end{bmatrix}$$

图 5 为利用(6)式进行标定及修正的结果 (a) 为沿  $x = 1500 \mu\text{m}$  处的测量值与标定值的比较 (b) 为对平面镜的测量结果进行修正后的结果。

最后利用本套系统对 BGA 芯片的管脚进行了测量,采样间距为  $12 \mu\text{m}$ ,结果如图 6 所示,其中(a)

为采用内插值法计算的结果 (b)为利用测量平面镜得到的标定值进行修正后的结果。根据测量结果, BGA 管脚高度为  $115 \pm 5 \mu\text{m}$ ,采用螺旋测微仪(测量精度为  $10 \mu\text{m}$ )对管脚高度测量数据为  $120 \mu\text{m}$ 。

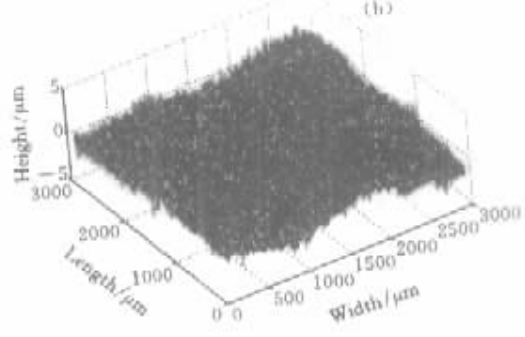
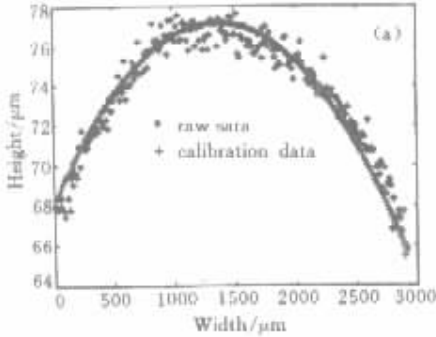


图 5 系统误差标定和校正

(a) 在  $x = 1500 \mu\text{m}$  处沿  $y$  方向原始数据和标定数据的比较 (b) 采用标定数据校正后的平面镜的三维轮廓

Fig.5 Error calibration and revision

(a) comparison between the raw data and calibrating data along  $y$  at  $x = 1500 \mu\text{m}$  ;

(b) revising 3-D profile of the mirror using the calibrating data

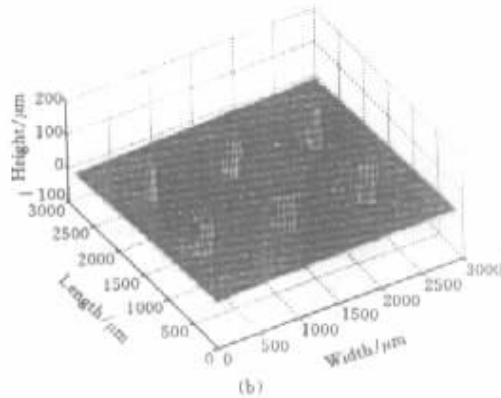
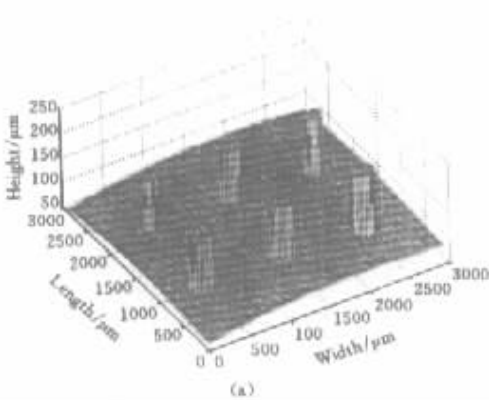


图 6 BGA 芯片测量结果

(a)原始测量数据 (b)校正后的三维轮廓

Fig.6 Measuring result of BGA chip

(a) raw measuring data ;(b) revising 3D profile

## 5 结 论

该多光束共焦测量系统采用  $500 \times 500$  的针孔阵列,具有测量视场大,结构简单等特点。结合内插值算法,可大大提高测量的速度及精度。由于本系统为试验装置,元器件存在缺损,测量结果只选取了视场中  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的区域。

### 参 考 文 献

1 T. Wilson , Barry R. Masters. Confocal microscopy [ J ]. *Appl. Opt.* ,1994 , **33** ( 4 ) 565 ~ 566

2 Hans J. Tiziani , Hans-Martin Uhde. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement [ J ]. *Appl. Opt.* , 1994 , **33** ( 4 ) 567 ~ 572

3 G. Q. Xiao , G. S. Kino. A real-time confocal scanning optical microscope [ C ]. *SPIE* ,1987 , **809** :107 ~ 113

4 C. J. R. Sheppard , H. J. Matthews. The extended-focus , auto-focus and surface-profiling techniques of confocal microscopy [ J ]. *J. Mod. Opt.* ,1986 , **33** ( 1 ) :145 ~ 154

5 Kong Bing , Wang Zhao , Tan Yushan *et al.* . The fast 3D profile measurement using confocal microscopy and error analysis [ J ]. *Acta Photonica Sinica* ( 光子学报 ) ,2000 , **29** ( 6 ) :549 ~ 553 ( in Chinese )