

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0853-04

超分辨在共焦三维形貌检测术中的应用*

邓小强 刘 力 杨莉松 王桂英 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 通过对共焦三维形貌检测术的分析, 根据超分辨理论, 在共焦系统中加入环形光瞳滤波器, 以期延长系统的动态检测范围, 并提高系统的横向分辨率。理论和实验结果表明该方法在适当牺牲轴向分辨率的条件下, 能有效地延长系统的动态检测范围, 且提高其横向分辨率。

关键词: 共焦三维形貌检测术; 超分辨; 环形光瞳滤波器

中图分类号: O439 文献标识码: A

1 引 言

Lee 等人^[1,2]利用共焦显微系统的轴向响应曲线斜坡区段的强度与高度的线性关系发展了一种三维表面形貌检测法。该方法具有很高的轴向分辨率, 但是它所能测量的动态范围一般都很小。例如: 若将 NA = 0.65 的 40 倍物镜用于共焦系统的物镜部分, 纵向分辨率为 4 nm, 动态范围却只有 1.3 μm; 将 NA = 0.85 的 60 倍物镜用于物镜部分, 纵向分辨率为 2 nm, 动态范围只有 0.7 μm。若能找到一种方法在延长动态测量范围的同时, 又不影响系统的横向分辨率, 甚至提高系统的横向分辨率将会大大改善系统的适用范围。幸运的是, 根据超分辨理论在共焦系统中加入适当的光瞳滤波器就能达到目的。当然, 这种光瞳滤波器应该具有以下性质: 在延长系统的轴向响应曲线的半高半宽度 (HWHM) 的同时, 还能提高系统的横向分辨率, 至少不能降低横向分辨率。这种滤波器中最简单的是环形光瞳滤波器^[3]。它既能达到上述目的又具有结构简单及容错性好的优点。当然, 我们也可以设计其它类型的光瞳滤波器与共焦系统相结合来实现这一目的。本文给出了简要的理论分析和几个计算实例。并用实验结果验证了该方法的可行性。

2 理论分析

根据衍射理论, 设透镜的出瞳半径为 a , 出瞳到

像面 (本文中为焦平面) 的距离为 f , 如图 1 所示, 假设紧贴着出瞳前加上半径为 a 、中心遮挡比 (光瞳的中心区不透光部分的半径与光瞳半径的比值) 为 ϵ 的环形光瞳滤波器。当用单色平行光入射时, 在焦平面上和焦点附近轴向的光强分布为:

$$I(\nu, \rho) = \frac{a^4}{\lambda^2 f^2} \left[\frac{2J_1(\nu)}{\nu} - \frac{2J_1(\epsilon\nu)}{\nu} \right]^2, \quad (1)$$

这里, ν 对应径向坐标, 由下式给出:

$$\nu = \frac{2\pi a \rho}{\lambda f}, \quad (2)$$

其中 ρ 为焦平面上实际的径向坐标, J_1 为第一类一阶贝塞尔函数。

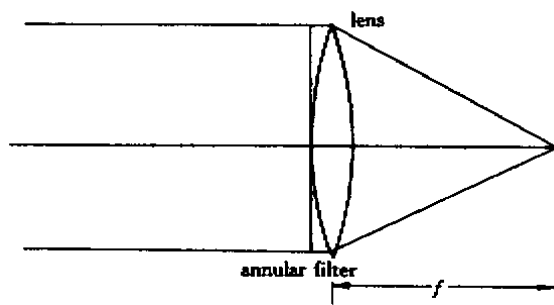


Fig. 1 Scheme of imaging system with annular pupil filter.

Annular pupil filter is positioned at enter pupil of system 轴向强度分布为:

$$I(0, u) = \frac{a^4}{\lambda^2 f^2} \left\{ \frac{\sin[u(1-\epsilon^2)/4]}{u/4} \right\}^2, \quad (3)$$

其中, u 对应轴向坐标, 具体表达式为

$$u = kz(\sin\alpha)^2.$$

由 (3) 式可知轴向半高半宽延长的倍数为 $(1-\epsilon^2)^{-1}$, 也就是说, 当 ϵ 增大时系统轴向响应曲线的斜坡区也随之增大。系统的横向强度点扩散函数的第一零点比 [加光瞳时系统的横向强度点扩散

* 国家自然科学基金 (69637030) 及面上基金 (69777004) 资助课题。

收稿日期: 2000-04-24; 收到修改稿日期: 2000-06-02

函数第一零点对应的坐标值与艾里(Airy)方式时系统相应的第一零点对应的坐标值之比]随遮挡比 ϵ 的关系如图 2 所示。

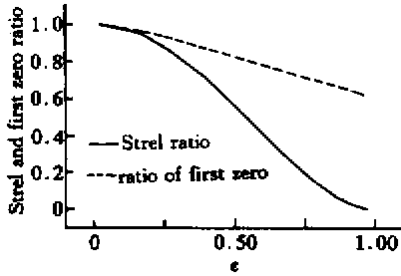


Fig. 2 Transversal strel and first zero ratio vs the radius of shield area of the optical pupil ϵ

由图可知系统的横向强度点扩散函数的第一零点比随 ϵ 的增大而减小,当 ϵ 趋于 1 时第一零点比为 0.6。另外,当环形光瞳的遮挡比越大时,系统的中心强度值越小,这在实际系统中会降低信号的信噪比(SNR)。因此,图 2 给出了系统的斯特耳(Strel)比(加光瞳时系统的中心强度值与艾里方式时系统的中心强度之比)随遮挡比 ϵ 变化的曲线。由图 2 可知,斯特耳比随 ϵ 的增大而减小,当 $\epsilon > 0.9$ 时斯特耳比小于 3%。

对 ϵ 的几个典型值系统的归一化轴向强度分布如图 3(a)所示,相应的归一化横向强度分布如图 3(b)所示。

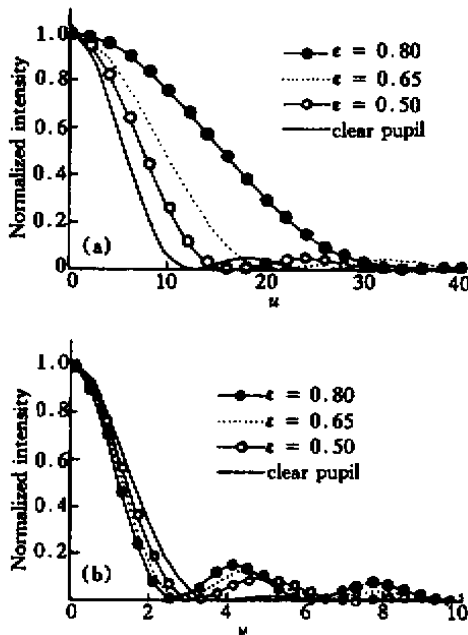


Fig. 3 Normalized intensity distribution along axial direction (a) and at the imaging plane (b) for three typed values of ϵ . For comparison, the intensity distribution of clear pupil are shown in the figures

$\epsilon = 0.50$ 对应的横向第一零点比为 0.820,焦深延长 1.333 倍; $\epsilon = 0.65$ 对应的横向第一零点比为 0.752,焦深延长 1.732 倍; $\epsilon = 0.80$ 对应的横向第一零点比为 0.692,焦深延长 2.778 倍。同时,由图 3 可知无论对轴向还是横向强度曲线,其旁瓣强度都很低。

3 实验设计和结果

本实验采用如图 4 所示的反射式光纤共焦显微系统。波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光经透镜 L_1 与光纤耦合器的端口 1 耦合(其分光比为 50/50,光纤有效数值孔径为 0.13,场模半径为 $2.4 \mu\text{m}$)。由耦合器输出端 4 出射的光经透镜 L_2 (NA = 0.10 的 4 倍物镜)转变成平行光,平行光通过环形光瞳后经透镜 L_3 (N.A. = 0.65 的 40 倍透镜)聚焦到置于由计算机通过压电陶瓷驱动源控制的三维扫描平台上的样品。从样品反射回来的光经光纤耦合器的端口 2 成像在 CCD(信噪比 SNR 大于 48 dB,最小照度为 0.021 lx)探测平面上。光纤耦合器的端口 3 浸入折射率与光纤匹配的甘油溶液中以避免光纤端面反射引起的干扰。

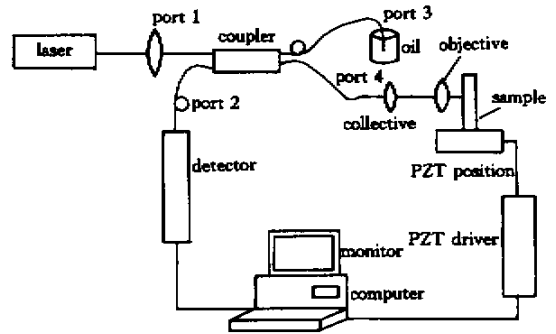


Fig. 4 Experimental setup of confocal reflection-mode scanning microscope using single-mode fiber coupler

不加环形光瞳时,共焦系统对理想平面的纵向响应曲线在焦点附近两侧各存在一区域,其光强 I 随 z 变化较其它位置敏感^[14],且显现线性变化规律。理论上, $K(z)$ 归一化斜率 $I^{-1}(0) \left| \frac{dI}{dz} \right|$ 近似表示为

$$S = 4.5 \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \lambda,$$

其中 $\sin \alpha$ 为物镜有效数值孔径,故系统响应曲线在 $z = 0$ 两侧斜率为 $0.85 / \mu\text{m}$ 。若激光器外界扰动波动为 $\delta\%$,则系统轴向分辨精度为 $0.01\delta/S / \mu\text{m}$ 。由

于所用激光器输出波动小于 0.4%，因此将限制轴向分辨率约为 5 nm，线性区归一化光强为 0.2 ~ 0.9，对应的动态范围是 0.82 μm 。

对共焦系统而言，其有效振幅点扩散函数是物镜部分振幅点扩散函数和集光部分的振幅点扩散函数之积。该乘积特性在超分辨应用中一般用来抑制旁瓣强度^[5,6]或用来实现三维超分辨研究^[7]。

本实验所采用的系统中由于集光透镜和物镜部分的透镜的数值孔径相差很大，系统的有效振幅点扩散函数可以近似为物镜部分的振幅点扩散函数。因此，实验中所采用的环形光瞳是依物镜部分设计的。

加入环形光瞳滤波器后，系统的轴向响应曲线如图 5 所示。

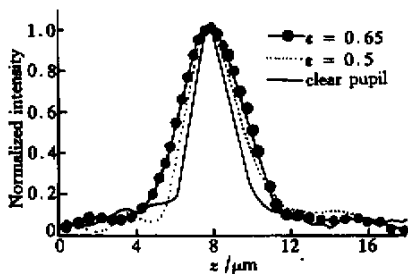


Fig.5 Intensity distribution along axis of fiber confocal scanning imaging system with two annular pupils

由图可知系统的线性斜坡区变宽了，但其斜率也相应地变大了。也就是说在扩大动态测量范围的同时系统的轴向分辨率会有所下降。图中 $\epsilon = 0.5$ 时，轴向半高半宽 (HWHM) 延长了 1.25 倍； $\epsilon = 0.65$ 时，轴向半高半宽延长了 1.63 倍。这比理论值 1.33 和 1.68 小。我们认为这是由于在计算结果中轴向强度值取的只是像面上严格的轴向点的强度，而实际测量中总是取 CCD 阵面的一个小区的强度值作为轴向强度值，这将带来平均效应，从而导致测量结果偏小。

另外，实验中的共焦系统物镜部分和集光透镜部分的数值孔径相差虽然较大，但是考虑到共焦系统的双点扩散函数的相乘性，系统的轴向响应曲线应该比单透镜系统会略有缩小。为了验证系统的横向分辨率的提高，我们采用直边响应曲线来评价。

由图 6 可知加上环形光瞳滤波器后系统的直边响应曲线变陡，且随 ϵ 增大而变陡。也就是说 ϵ 越大，系统横向分辨率提高得越多。这和理论预期相符合。

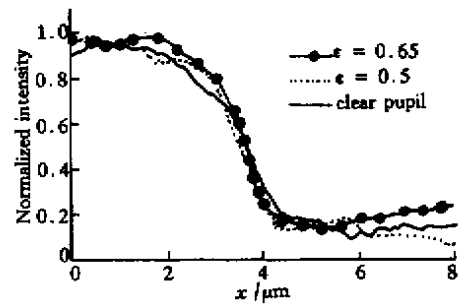


Fig.6 The response curve to a straight-edge object. The solid curve correspond to confocal system with clear pupil and the dotted and dashed curves correspond to system with annular pupil at $\epsilon = 0.5$ and $\epsilon = 0.65$ respectively. 总结 根据超分辨理论，环形光瞳的 ϵ 越大，系统的动态范围延长得越多，横向分辨率提高得越多。但是当 $\epsilon > 0.9$ 时，由于轴向响应曲线斜坡段的斜率降低到不加光瞳滤波器时的 1/5，故理论轴向分辨率会降低到 25 nm；此外系统的中心强度值会低于 3%。因此实际应用中 ϵ 应取到使系统中心强度值大于 5%，理论轴向分辨率不低于 20 nm。本文采用的反射式光纤共焦系统由于端口 3 的反射，实验中 ϵ 只取到 0.65。若严格控制甘油的折射率使其与光纤芯径的折射率相等，则可提高 ϵ 的取值范围。总之，本文所用的方法大大地改善了共焦三维形貌检测系统的适用范围和性能。

参 考 文 献

- [1] Lee C H, Wang J. Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(4~6):233~237
- [2] Tsai C W, Lee C H, Wang J. Deconvolution of local surface response from tomography in nanometer profilometry with a dual-scan method. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(23):1732~1734
- [3] Welford W T. Use of annular apertures to increase focal depth. *J. Opt. Soc. Am.*, 1960, **50**(8):749~753
- [4] Yang Lisong, Wang Guiying. Surface profilometry with fiber optical confocal scanning microscope. *Measurement Science and Technology*, 2000, **11**(12):1786~1791
- [5] Deng X Q, Wang G, Xu Z. Optical pupil filter for improving optical sectioning property in confocal microscope. *Proc. SPIE*, 1999, **3863**:322~326
- [6] Corral M M, Andres P, Castaneda J O *et al.*. Tunable axial superresolution by annular binary filters, application to confocal microscopy. *Opt. Commun.*, 1995, **119**(5, 6):491~498
- [7] Ding Zhihua, Wang Guiying, Gu Min *et al.*. Superresolution with an apodization film in a confocal setup. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):360~363

Super-Resolution in 3-D Confocal Surface Profilometry

Deng Xiaoqiang Liu Li , Yang Lisong Wang Guiyin Xu Zhizan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , The Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800*)

(Received 24 April 2000 ; revised 2 June 2000)

Abstract : Based on super-resolution theory , the 3-D confocal surface profilometry and annular pupil filter are combined for analyzing the property of the 3-D profilometry. The results of computer simulation and experiment prove that this method can explore the axial dynamic range and improve transversal resolution of 3-D profilometry at decreasing axial resolution.

Key words : 3-D confocal profilometry ; super-resolution ; annular pupil filter