

采用短相干光数字全息术实现反射型 微小物体的三维形貌测量^{*}

袁操^{今¹⁾} 翟宏琛^{1)†} 王晓雷¹⁾ 吴 兰²⁾

1) 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) 浙江大学光学工程系, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2006 年 4 月 21 日收到, 2006 年 6 月 4 日收到修改稿)

针对反射型微小物体, 设计了一种可在三维形貌测量中实现微小物体分层记录的短相干光源无透镜傅里叶变换数字全息记录系统, 并利用该系统对锥形微孔壁实现了分层记录. 该系统可通过调节待测物体的位置, 改变全息记录中的物光光程, 从而获得重构三维物体所需要的一系列子全息图. 该系统具有光路简洁, 系统的附加误差小的特点. 实验测量的轴向误差约为 3.5%, 横向误差约为 2.6%. 此外, 在三维重构的过程中, 为避免因散斑噪声较大而无法利用位相信息进行三维重构的情况, 采用了最小二乘多项式拟合方法, 将微小物体的一系列再现强度图像进行三维重构. 由于避免了复杂的相位展开, 所以不但运算简单, 而且具有较强的抗散斑噪声能力.

关键词: 短相干光源, 数字全息术, 三维形貌测量, 无透镜傅里叶变换全息术

PACC: 4240M, 8170G, 4285F

1. 引 言

随着机械微加工技术、微电子技术、生物技术、基因工程、生命科学、材料科学、表面技术、信息技术和纳米技术的飞速发展, 使得对微小物体进行三维表面轮廓测量的需求变得越来越迫切.

光学测量法是一种被广泛应用的三维形貌测量方法. 常用的光学三维面形测量方法有机器视觉^[1, 2] (computer vision)、位相测量术^[3, 4] (phase measurement)、光学三角法^[5] (triangulation) 及光学干涉计量法^[6] (interferometrical method) 等. 机器视觉可用于三维物体的轮廓识别以及位置、形状分析, 但存在精度不高、计算耗时等缺点. 位相测量术的测量精度虽高, 但需要相位展开运算, 该运算不但复杂, 而且易受外界因素影响. 光学三角法虽然具有计算简单、对应用环境要求不高的优点, 但受到被测物体特性限制.

数字全息术^[6-8]近年来备受瞩目, 是一种可实现光学干涉计量的新方法. 数字全息术利用 CCD 或

CMOS 等光电器件来记录全息图, 用计算机进行数字再现, 从而克服了传统全息术需要对记录材料进行化学湿处理和不能直接得到物体数据信息等缺点. 同时, 由于数字全息术具有较高的分辨率, 属于非接触式测量, 对测量环境以及被测物体都没有特殊的要求等诸多优点, 因而已被应用到微小物体的形貌测量领域中^[6, 7]. 而且, 若使用短相干长度的光源进行数字全息记录时^[9-11], 还可保证只有当参考光与物光的光程差在相干长度以内时才发生干涉, 从而使物体不同深度层面的再现图像不会发生干扰, 因此可以对微小物体的任意层面进行成像. 如果将短相干光源引入到无透镜傅里叶变换数字全息记录系统中, 还可得到高分辨率的分层再现像^[10]. 但是, 无透镜傅里叶变换记录系统要求物光和参考光曲率半径相等, 因此如果采用文献 [11] 中的只改变参考光光程, 而不改变参考光曲率半径的方法实现分层记录时, 由于全息图中干涉光场中的二次项因子无法相互抵消, 所以会造成 CCD 采样困难. 而且, 直接使用傅里叶变换再现, 容易出现再现像离焦的现象. 若在分层记录中, 既要改变参考光光程又要调

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60377008)、天津市自然科学基金(批准号: 043800611)和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题项目(批准号: LMOI-0503)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhai@nankai.edu.cn

节聚焦透镜的位置,会使系统的复杂度增加,同时也会带来附加的误差。

此外,从现有文献看,在使用数字全息术进行形貌测量时,一般都是利用物体相位信息和高度之间的关系来恢复其三维形貌。获得物体的相位有两种方法可供选择:其一是在约束条件下利用迭代运算获得物体的相位信息^[12];第二种方法是从再现像复振幅的分布中直接提取物体相位信息^[13-17]。采用第一种方法进行测量时,往往需要进行数百次迭代运算,运算量过大。采用第二种方法进行测量时,只需要对再现像复振幅的复角进行相位展开运算,就能得到物体的相位。对于透明物体,由于包裹相位不受散斑噪声影响,所以能够顺利地得到它的相位。但是记录反射型物体的数字全息图时,由于物体表面起伏引起的随机散斑噪声,会在很大程度上影响再现过程中相位展开的顺利进行,因此,会导致计算复杂,而且在噪声很大的情况下甚至会掩埋有效的相位信息,直接造成相位展开无法进行。为此,曾经有研究小组^[18]提出用自适应滤波的方法,对包裹相位去除部分噪声后,再进行展开运算,通过该滤波处理可以取得良好的效果,但这种滤波方法只局限于受噪声影响较小的包裹相位图。

为此,本文设计了一个无透镜傅里叶变换短相干光源数字全息分层记录系统。该系统能够在保证参考光和物光具有相同曲率半径的情况下,通过移动物体改变物光光程实现微小物体的分层记录。由于避免了前述方法中的各种弊病,因而光路简洁,附加误差小。此外,在三维重建构成中,针对本实验中待测的反射型微小物体具有散斑噪声较大,而无法进行相位展开运算的特点,本文提出了一种新的重

构微小物体三维形貌的方法。即采用全息再现的强度信息而不是位相信息进行三维重构,而且采用了最小二乘多项式拟合的方法,将分层记录得到的子全息强度图像进行拟合重构。这样,不但由于避免了复杂的相位展开计算,因而计算简便,而且具有较强的抗噪声能力。

2. 记录系统和过程

本文提出的记录系统如图 1 所示。为了提高再现像的分辨率,采用无透镜傅里叶变换全息记录光路。由激光器发出的光被分束镜 BS_1 分束后,一束光被反射镜 M_1, M_2, M_3 以及分束镜 BS_2 反射后照射到物体上。这束光被物体信息调制后,透过 BS_2 照射到 CCD 上形成物光。另一束光被反射镜 M_4 和 M_5 反射后,经透镜聚焦,形成球面光波,再被 BS_2 反射后照射到 CCD 上作为参考光。物体被置于一个调节精度为 $10 \mu\text{m}$ 的可移动平台上,用以调整物体到 CCD 的距离。在实验中,短相干长度的激光光源是由掺钛蓝宝石飞秒激光器提供的。放大系统是美国光谱物理公司出产的,型号为 SpitfireHP50。其中心波长为 800 nm ,最窄脉宽为 50 fs (半峰全宽),最大单脉冲能量为 2 mJ ,重复频率为 1 kHz 。通过干涉实验测得该光源的相干长度为 $40 \mu\text{m}$ 。在实验中,用以形成球面参考光波的聚焦透镜的焦距为 10 mm ,使用的 CCD 为 Minton1881EX 型,像素数为 576×768 ,像素尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$ 。

应该提请注意的是,虽然该记录系统与文献^[11]报道的实验装置相似,但文献中给出的实验装置是通过改变参考光的光程完成分层记录,而本文

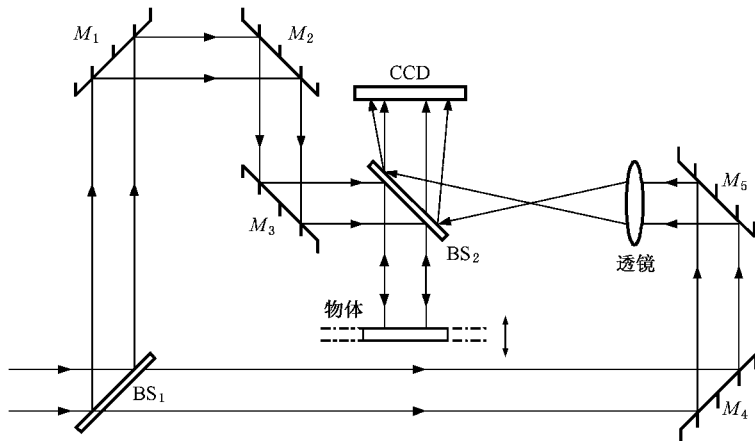


图 1 数字全息术记录光路示意图

提出的系统是利用物光光程的改变来实现全息记录的.虽然在理论上,移动物体或改变参考光的光程都可以获得每一层物体的全息图,但由于在拍摄短相干长度光源的无透镜傅里叶变换全息图时,不仅要求参考光和物光的光程近似相等,而且为了保证 CCD 能满足采样条件,还要求参考光点光源到记录介质表面的距离和物体到记录介质表面的距离相等,也就是参考光和物光具有相同的曲率半径.这样,若改变参考光光路里反射镜的前后位置,则聚焦透镜也需要作相应的移动,才能保证参考光点光源和每层物体到 CCD 的距离相等.所以若通过改变参考光实现分层记录,则需要由两个光学元件配合完成.这样就会增加实验的复杂性,而且在移动聚焦透镜的过程中还会带来附加的误差.而本文提出的通过移动物体实现被测物体的分层记录的方法,能够在获得高质量全息图的同时,避免不必要的附加的误差.这是因为,物光光程和物光曲率半径的改变都可以通过移动物体同时完成,因而,不需要再移动其他光学元件或加入透镜补偿曲率半径,从而,能够从根本上避免改变光程过程中引入的附加误差.

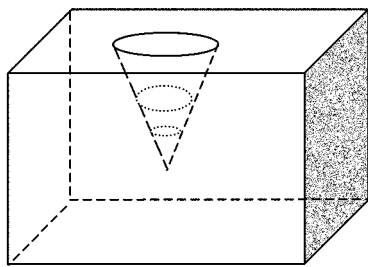


图 2 被拍摄物体示意图

实验中被拍摄的物体是在一块厚铝板上加工的

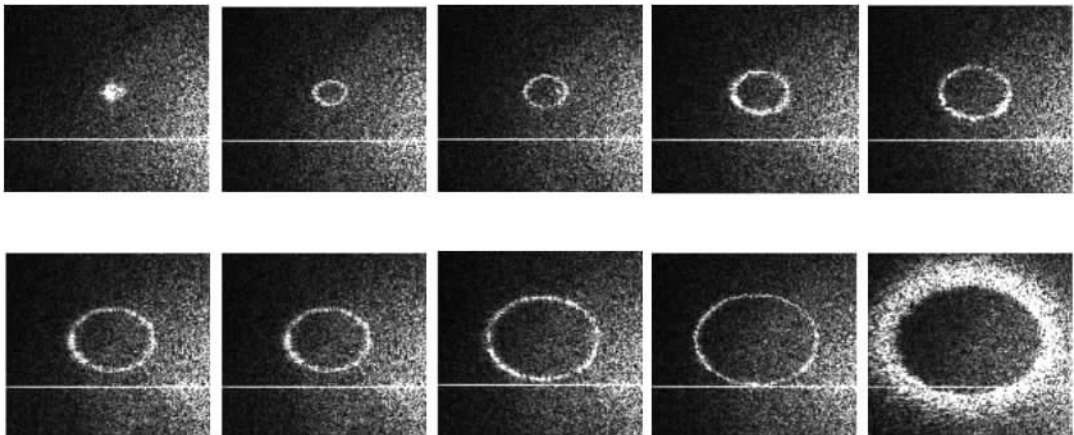


图 3 圆锥孔的分层再现结果

一个深度约为 0.872 mm 的微型圆锥盲孔,如图 2 所示.将该物体置于图 1 所示光路中,口径大的一边朝向 CCD 靶面,该盲孔的中垂线垂直于 CCD 靶面.利用飞秒激光作为全息记录光源.物体在每次记录后,沿轴向移动的距离为 $20 \mu\text{m}$,这个距离恰好等于本实验采用光源相干长度的一半.若每移动一次物体记录一幅全息图,则可得到物体在不同深度处的一系列子全息图.

2.1. 分层再现

根据无透镜傅里叶变换全息术的特性可知,将物体每次移动 $20 \mu\text{m}$ 后获得的子全息图作傅里叶变换,就能得到物体各个分层的再现像复振幅分布.利用复振幅分布可以获得各层物体的强度分布图像.从首次观察到全息干涉条纹直至条纹完全消失,移动平台所移动的距离即为整个物体的高度,相邻两幅再现像之间的高度差为 $20 \mu\text{m}$.

本文利用移动物体的方法,获得了微型圆锥盲孔不同深度处的 42 层子全息图(拍摄间隔为 $20 \mu\text{m}$).作为示例,图 3 仅给出了其中部分强度再现像,即从圆锥孔顶端算起的,间隔为 $80 \mu\text{m}$ 的十个不同深度处的强度再现像(截取了 +1 级像).从图中能清楚地看到,圆锥孔内壁各切面的强度图像,在底部的一个点,随着深度的变换,圈的半径也在不断改变.显然,在这些图中还能看到很明显的散斑噪声.此外,还可以看出,通过移动物体可以成功地记录和再现物体各层面的强度分布图像,层与层之间的再现像并不会发生干扰.此外,需要说明的是,图 3 中,各幅再现像中都有一条直线,这条线是由于傅里叶变换的算法产生的.在重构过程中通过边缘提取技术可以将其去除,所以,不会对重构图像构成影响.

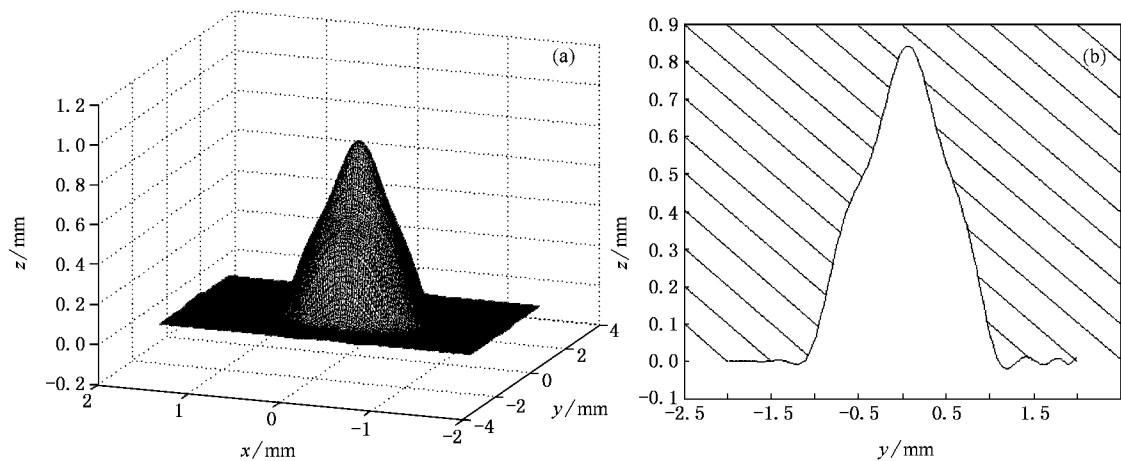


图4 (a)圆锥孔的三维重构示意图 (b)三维重构的锥孔纵截面

2.2. 三维重构

将获得的42层幅再现的强度图像根据物体的层与层之间的高度信息,通过最小二乘多项式拟合方法,可以将待测的微型圆锥孔重构出来.在拟合过程中,最小二乘多项式的次数选为20.重构的结果如图4所示(与图2所示物体的放置,正好上下颠倒).图4(a)是物体的三维形貌图,图4(b)是重构锥孔的纵截面图.

从重构图可测出被测物体的高度为0.8408 mm,最大孔径宽度是2.416 mm.与测量出来物体高度0.872 mm相比,轴向误差约为3.5%,实际测量得到的最大孔径宽度为2.480 mm,重构误差约为2.6%.物体每次移动的距离决定了本系统轴向的测量精度为20 μm (光源相干长度的一半).根据记录系统的数值孔径,可以计算出系统的横向分辨率,其数值为25 μm .

为了说明该方法的优点,现将本方法获得的结果与采用相位叠加重构物体的方法^[15]获得的结果进行对比,如图5所示.其中图5(a)是某层物体的全息图,利用该幅全息图获得的该层物体的强度和包裹相位信息分别在图5(b)和图5(c)中表示.由于在使用相位重构物体的过程中,包裹相位值在 $[-\pi, \pi]$ 区间内,不能反映原始相位信息,所以必须对其进行展开处理.在理想情况下,只需通过对包裹相位梯度再包裹值进行积分计算便可以求出原始相位.但在实际情况中,为了保证相位展开的顺利进行,首先必须先找到由散斑噪声引起的错误的相位跳变点或跳变区域(通常用“残差(residue)”来表

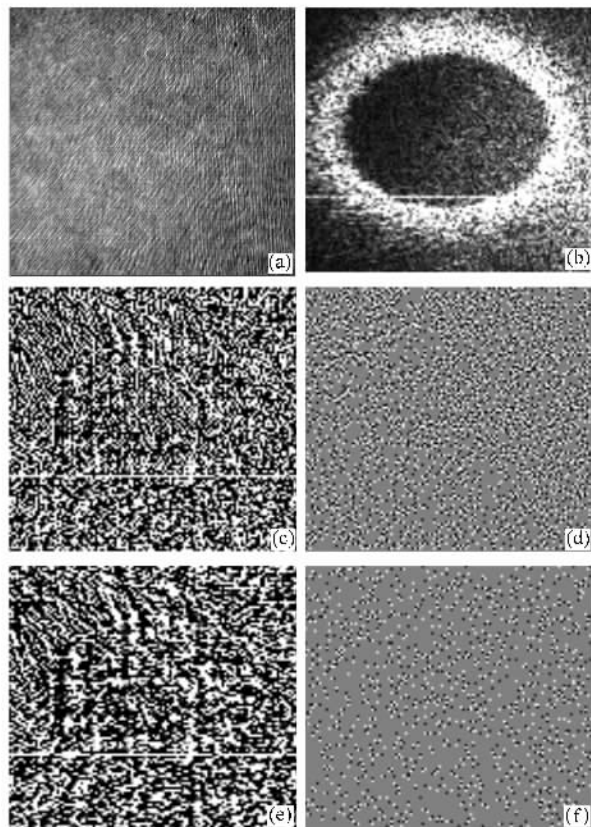


图5 (a)某层物体的全息图 (b)物体的强度图像 (c)物体的包裹相位 (d)滤波前残差示意图 (e)自适应滤波后物体的包裹相位 (f)滤波后残差示意图

示),以便在相位展开过程中避开这些区域^[19].图5(d)中的黑、白点表示的就是对图5(c)进行残差查找的结果.可见,由于包裹相位中的残差分布过于密集,在展开过程中无法避让这些区域,所以不能获得物体的相位信息.即使利用文献[18]提出的方法对

包裹相位进行滤波处理,得到如图 5(e)所示的包裹相位图,从滤波后的残差分析结果图 5(f)中也可以看出,虽然残差已经明显减少,但是包裹相位依然被掩盖在噪声中,所以无法提取有用的信息进行三维重构.

上述对比实验结果表明,在散斑噪声较大,甚至使用滤波手段也无法通过相位展开方法重构微小物体的三维形貌的情况下,利用本文提出的采用最小二乘多项式拟合再现强度图像的重构方法可以成功完成物体的三维重构.

3. 结论和讨论

针对散斑噪声影响大,而无法利用相位信息进行重构物体的情况,文中报道了一种通过物体各分

层的强度图像重构微小物体的新方法.由于该方法可以避免相位展开运算,所以,运算简单,受噪声的影响小.此外,本文还为此专门设计了一个通过移动物体实现物体的分层记录的无透镜傅里叶变换数字全息记录系统.该系统具有光路简洁,附加误差小的特点.从实验结果分析,测量轴向误差为 3.5%,横向误差约为 2.6%.

如果采用相干长度更短的光源,还可实现更高精度的测量.此时,如果系统的数值孔径进一步增大,则系统的再现像横向分辨率还会进一步得到提高,同时,横向误差也会减小.

由于本文提出的方法还可应用于散斑较小的物体如半透明物体,由于散斑噪声小而可获得误差更小的三维重构图像.所以该方法在对生物内部的组织的三维重构方面,也具有一定的应用前景.

-
- [1] Subbarao M , Gurumoorthy N 1988 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 498
- [2] Ens J , Lawrence P 1993 *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **15** 97
- [3] Su X Y , Li J , Guo L R *et al* 1988 *SPIE* **954** 241
- [4] Saldnet H O , Huntley J M 1997 *Opt. Eng.* **36** 610
- [5] Coodall A J , Burton D R 1994 *Opt. Lasers Eng.* **21** 99
- [6] Cuhe E , Marqret P , Depeursingle C 1999 *Appl. Opt.* **38** 6994
- [7] Mann C , Yu L , Lo C M , Kim M 2005 *Optics Express* **13** 8693
- [8] Yamaguchi I , Ohta S , Kato J 2001 *Opt. and Lasers in Eng.* **36** 417
- [9] Pedrini G , Schedin S 2001 *Optik* **112** 427
- [10] Pedrini G , Tiziani H J 2002 *Appl. Opt.* **41** 4489
- [11] Lluís M L , Pedrini G 2005 *Appl. Opt.* **44** 3977
- [12] Zhang Y , Pedrini G , Osten W , Tiziani H J 2003 *Optics Express* **11** 3234
- [13] Kim M K 1999 *Opt. Lett.* **24** 1693
- [14] Yu L , Kim M 2005 *Optics Express* **13** 5621
- [15] Palacios F , Ricardo J , Palacios D , Goncalves E , Valin L J , Souza D R 2005 *Opt. Commun.* **248** 41
- [16] Shen J Y , Li X G , Chang S J , Zhang Y X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5157 (in Chinese) [申金媛、李现国、常胜江、张延 2005 物理学报 **54** 5157]
- [17] Wang Y , Zhang Z , Zeng Z M , Han X F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1148 (in Chinese) [王 勇、张 泽、曾中明、韩秀峰 2006 物理学报 **55** 1148]
- [18] Palacios F , Goncalves E , Jorge R , Valin L J 2004 *Opt. Commun.* **238** 245
- [19] Ghilgia D G , Pritt M D 1998 *Two-dimensional phase unwrapping : theory , algorithms and software* (New York : John Wiley & Sons , INC.) B4

Three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object by digital holography with short-coherence light source^{*}

Yuan Cao-Jin¹⁾ Zhai Hong-Chen^{1)†} Wang Xiao-Lei¹⁾ Wu Lan²⁾

¹ *Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology, MEC, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

² *Optical Engineering Department, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

(Received 21 April 2006 ; revised manuscript received 4 June 2006)

Abstract

In this paper, a new lensless digital holography system with short-coherent light source is designed for recording three-dimensional surface contour of reflecting micro-object. In the experiment, the different layers on the inner wall of a conical pore are recorded by changing the path length of object beams to record a series of sub-holograms for three-dimensional reconstruction. This makes the recording system compact and reduces the additional error in the recording. The measured longitudinal error is about 3.5% with a lateral error of about 2.6%. Besides, the least squares polynomial fit method is used for the first time to carry out three-dimensional reconstruction with a series of two dimensional intensity images of a micro-object, which not only reduces obviously the complication of the three-dimensional reconstruction, but also can be used to carry out three-dimensional reconstruction of a micro-object with strong laser speckle noise, of which the phase images can not be obtained from the phase-unwrapping process.

Keywords : short-coherence light source, digital holography, three-dimensional surface contouring, lensless Fourier holography

PACC : 4240M, 8170G, 4285F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60377008), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 043800611) and the State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations of Zhejiang University, China (Grant No. LMOI-0503).

[†] Corresponding author. E-mail : zhai@nankai.edu.cn