

# 像空间彩色数字全息研究

楼宇丽 李俊昌 桂进斌 宋庆和 李重光 樊则宾

(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500)

**摘要** 彩色数字全息检测研究中,当物体的投影尺寸与 CCD 面阵尺寸有较大差异时,为充分获取物体信息,可以使用透镜系统对物光进行变换,并且,基于物和像的相似特性,将物体的像视为像空间中的物体在像空间中进行彩色数字图像重建是常用的方法。像空间中确定不同波长光照的物体的像平面,按照同一物理尺寸重建不同色光的像光场是应用研究中必须解决的问题。提出一种不必知道光学系统的透镜参数而通过实验确定不同色光像平面的简易方法,并基于数字全息重建像焦深的研究,在像空间中较好地重建了物体的彩色图像。

**关键词** 全息;数字全息术;彩色数字全息术;变焦系统;相干光成像

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0409001

## Research of Color Digital Holography in Image Space

Lou Yuli Li Junchang Gui Jinbin Song Qinghe Li Chongguang Fan Zebin

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract** In order to obtain sufficient information about object-wave fields when there are large differences between the size of the object and CCD array, it is a common way to transform object light with lens system in the detection research of color digital holography. Based on the similar characteristics of object and image, the image of object is often viewed as object fields in image space and the reconstructed color digital image. It is a problem that must be solved to determine imaging plane of object when illuminated by lights with different wavelengths and to reconstruct these image fields with the same size. A new simple method of determining image plane of different-color lights without knowing lens parameters of optical system is presented. Further more, based on focal-depth research of digital holographic reconstructed image, the color image of object is reconstructed well in image space.

**Key words** holography; digital holography; color digital holography; zoom system; coherent-light imaging

**OCIS codes** 090.1705; 090.1995; 100.3010; 100.3175

## 1 引言

在光学无损检测领域中,全息术是一种精密检测技术<sup>[1~6]</sup>。数字全息由于自身优点而适用于物体三维形貌及微形变等物理量的测量<sup>[5,6]</sup>。数字全息检测研究中,当测量物体表面微形变这一类物理量时,需要实时检测观测点不共面的三个位移矢量,通常使用三种不同波长的激光进行彩色数字全息检测。当被测量物体的投影尺寸与 CCD 面阵尺寸有

较大差异时,为了让 CCD 较好地接收物光场信息,可以采用光学系统对物光场进行变换,例如,让物光通过不同性质的透镜组成的显微镜或变焦系统,让物体成像在 CCD 平面。当 CCD 平面与物体的像平面不重合时,必须考虑物光通过一个光学系统的波前重建问题。由于波前重建是通过衍射的数值计算实现的,重建场的物理尺寸不但与重建方法的选择有关<sup>[7]</sup>,且由于透镜色差效应,不同色光重建像具有不

**收稿日期**: 2012-10-13; **收到修改稿日期**: 2012-12-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977007)、云南省教育厅基金(2012y515, 2012y516)和昆明理工大学校人培基金(2009-038)资助课题。

**作者简介**: 楼宇丽(1975—),女,博士研究生,讲师,主要从事光学信息处理及数字全息技术等方面的研究。

E-mail: louyulil@163.com

**导师简介**: 李俊昌(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事信息光学理论及数值计算等方面的研究。

E-mail: jcli@vip.163.com(通信联系人)

同的放大率。如何准确确定不同色光的物体重建像位置,并在统一的物理尺寸下重建不同色光的物光场是必须解决的问题。

关于物体重建像位置的研究,可以在考虑透镜色差的前提下根据构成光学系统的每一透镜的位置及相关参数,利用几何光学理论较准确地获得物体经光学系统后的像平面位置<sup>[8]</sup>。对于一实际给定的光学系统,通常不能准确地知道透镜的几何参数,一种简化的处理办法是将透镜视为薄透镜,基于柯西公式确定透镜对于给定波长的折射率<sup>[8,9]</sup>,再利用透镜成像公式追踪计算光学系统后的像平面位置。然而,当组成光学系统的元件较多时,引起误差的因素增多,累计误差较大。如果能够建立一种简易的测量方法,不需要知道光学系统的内部结构却能较准确地确定系统的像平面,具有重要的实际意义。

本文提出一种利用点源数字全息图测量系统像平面位置的方法,为验证方法的可行性,设计了由两个正透镜及一个负透镜组成的变焦系统,进行了理论计算与实验测量的比较。并且,基于研究结果及数字全息重建像焦深的讨论<sup>[10,11]</sup>,研究了在同一物理尺寸下重建彩色物体像的方法,给出像空间中使用一次快速傅里叶变换(1-FFT)离焦重建法<sup>[7]</sup>重建彩色物体像的实例。

## 2 透镜系统像平面位置的理论计算

当光学系统由多个透镜组成时,可以沿物光的传播方向将前方透镜形成的像视为后方透镜的物,利用透镜成像公式逐一追踪计算,最终获得像平面的位置。

对于薄透镜,设透镜焦距为  $f$ ,物距为  $s$ ,像距为  $s'$ (见图 1),透镜成像公式为<sup>[8]</sup>

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

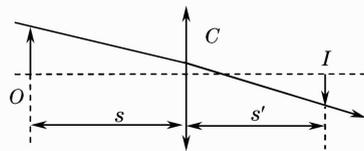


图 1 薄透镜成像示意图

Fig. 1 Sketch of imaging by thin lens

对于厚透镜,可以沿光传播的方向,将前一折射面形成的像视为后一折射面的物,计算物体通过透镜的成像位置。图 2 是一厚透镜相关参数定义图,根据文献<sup>[8]</sup>,计算公式为

$$\frac{n_1}{s_1} + \frac{n_0}{s} = \frac{n_1 - n_0}{r_1}, \quad (2)$$

$$\frac{n_2}{s'} + \frac{n_1}{t - s_1'} = \frac{n_2 - n_1}{r_2}, \quad (3)$$

式中  $r_1, r_2$  为厚透镜两表面曲率半径,  $n_0, n_1, n_2$  为折射率,  $s$  为物体到透镜前表面距离,  $s_1', s_1''$  为物体经透镜两表面逐次成像的像距,  $t$  为透镜厚度。

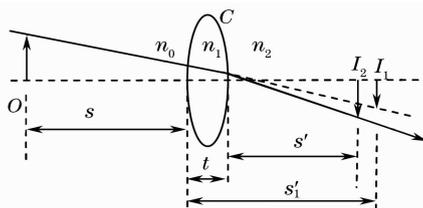


图 2 厚透镜逐次成像示意图

Fig. 2 Sketch of successive imaging by thick lens

将(2)、(3)式进行整理,可以获得物体经厚透镜的成像位置计算公式

$$s' = \frac{n_2 r_2 \{t - n_1 / [(n_1 - n_0) / r_1 - (n_0 / s)]\}}{(n_2 - n_1) \{t - n_1 / [(n_1 - n_0) / r_1 - (n_0 / s)]\} - n_1 r_2}, \quad (4)$$

参数如图 3 所示。

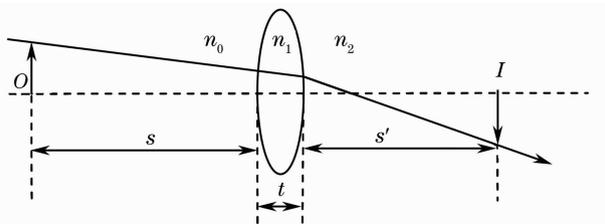


图 3 厚透镜等效成像示意图

Fig. 3 Sketch of equivalent imaging by thick lens

由上述分析可知,如果系统内透镜较多,需要知道透镜厚度、折射率、两表面曲率半径及位置等相关参数,对于实际给定的光学系统,准确获得这些参数并不容易。

## 3 透镜系统像平面的数字全息检测

当物体到 CCD 间有一个光学变焦系统时,若物体是物平面上的点源,将在变焦系统的像平面处呈现点源的像,到达 CCD 的光波场可以视为像平面上的像点发出的的光波场。在 CCD 上引入一参考光,

则能利用 CCD 记录下像空间中点源的全息图。像平面到 CCD 的距离即像点发出的球面波到达 CCD 的波面半径。以下导出利用全息图确定像平面位置的方法。

将物平面到 CCD 平面视为一个“黑箱”，建立直角坐标  $O-xyz$ ，令  $z$  为光轴， $z=0$  为 CCD 平面，图 4 给出理论研究坐标定义图。

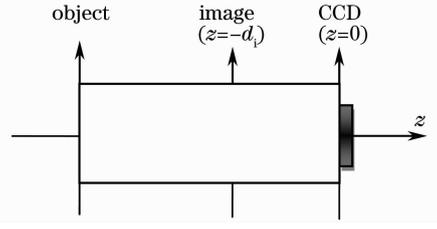


图 4 物平面到 CCD 平面光学系统示意图

Fig. 4 Sketch of optical system from object plane to CCD plane

令到达 CCD 的物光为相位  $\varphi_i$  坐标为  $(x_i, y_i, -d_i)$  的像点发出的光波

$$u_i(x, y) = Q_i \exp \left\{ \frac{jk}{2d_i} [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] + j\varphi_i \right\}, \quad (5)$$

再令到达 CCD 的参考光是波面半径  $d_r$ 、初始相位  $\varphi_r$ 、坐标为  $(x_r, y_r, -d_r)$  的点源发出的球面波

$$u_r(x, y) = Q_r \exp \left\{ \frac{jk}{2d_r} [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2] + j\varphi_r \right\}, \quad (6)$$

在 CCD 平面上两光波的叠加场则为  $u_r(x, y) + u_i(x, y)$ ，CCD 记录的全息图可以表示为

$$|u_r(x, y) + u_i(x, y)|^2 = Q_r^2 + Q_i^2 + 2Q_r Q_i \cos \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_r} \right) [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2] + \Phi \right\}, \quad (7)$$

式中  $x_1, y_1$  是与  $x_i, y_i, d_i, x_r, y_r, d_r$  相关的实常数， $\Phi$  是与  $\varphi_i, \varphi_r$  相关的实常数。(7) 式表明，干涉图像是以  $(x_1, y_1)$  为中心的圆形干涉条纹。令  $r$  为观测点到  $(x_1, y_1)$  的距离，(7) 式可重新写为

$$I(r) = Q_r^2 + Q_i^2 + 2Q_r Q_i \cos \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_r} \right) r^2 + \Phi \right]. \quad (8)$$

当(8)式中相角  $\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_r} \right) r^2 + \Phi = 2n\pi$  时出现干涉亮纹， $r$  为亮环半径，相邻亮纹对应相角的差为

$$\frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_r} \right) (r_{n+1}^2 - r_n^2) = 2\pi. \quad (9)$$

对(9)式进行整理，并将半径转化为直径形式，则有

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_r} + \frac{8\lambda}{D_{n+1}^2 - D_n^2}. \quad (10)$$

因为点源全息图用已知像素宽度的 CCD 记录，只要知道亮环两端的像素坐标，就可测得其直径  $D_1, D_2, D_3, \dots$ ，当给定光波长及参考光半径  $d_r$  后，可以用(10)式确定像平面位置  $d_i$ 。

## 4 透镜系统像平面位置的数字全息检测实验

### 4.1 实验系统简介

为证实上述研究，在物体与 CCD 间引入一变焦系统<sup>[12]</sup> (见图 5)，进行光学系统像平面位置的测量研究。实验采用了三种激光：红光  $\lambda=632.8$  nm、绿光  $\lambda=532$  nm 及蓝光  $\lambda=473$  nm。射入系统的激光经半反半透镜  $S_1$  分为两束。其中一束被全反镜  $M_0$  反射经透镜  $F_0$  及  $L_0$  形成剖面尺寸较大的平面波照明物体  $O$  形成物光。球面透镜  $L_1, L_2$  及  $L_3$  构成一变焦系统(透镜参数见表 1)，经  $L_3$  出射的物光透过分束镜  $S$  到达 CCD。另一束光被反射镜  $M_1$  反

射经透镜  $F_1$  形成球面波，再经分束镜  $S$  反射到达 CCD 形成参考光。CCD 像素宽度为  $0.00465$  mm，取样数  $N=1024$ ，即 CCD 面阵宽度  $L=4.76$  mm。实验测得到达 CCD 的参考光波面半径为  $d_r=732.4$  mm，各元件间距分别为： $d_0=125.0$  mm， $d_1=218.0$  mm， $d_2=1185.0$  mm， $d_3=210.0$  mm， $d_s=25.4$  mm， $d_4=277.0$  mm。

### 4.2 像平面位置的实验测定

实验时首先不放入透镜  $L_0$  及物体  $O$ ，沿轴平移  $F_0$ ，其右方焦点处形成物平面上点光源。由 CCD 记录的点源全息图示于图 6。

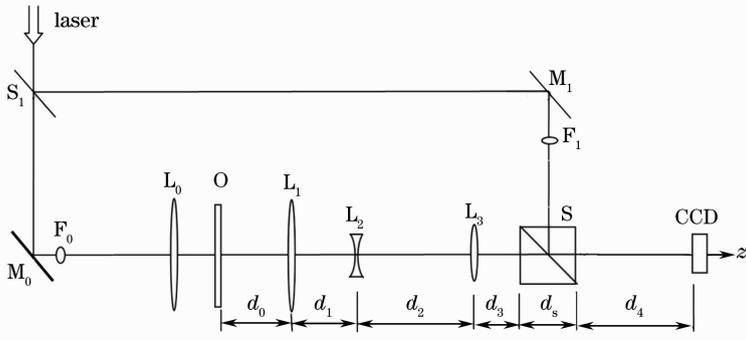


图 5 物体与 CCD 间引入一变焦系统的数字全息光路

Fig. 5 Digital holographic optics using a zoom system between the object and CCD

表 1 光学元件参数

Table 1 parameters of the optical elements

	$n_D$	$r_L/mm$	$r_R/mm$	$t/mm$	$f_D/mm$
$L_0, L_1, L_3$		242.98	-448.88	18.0	300.0
$L_2$	1.5168	-102.72	102.72	4.0	-100.0
S		$-\infty$	$\infty$	25.4	/

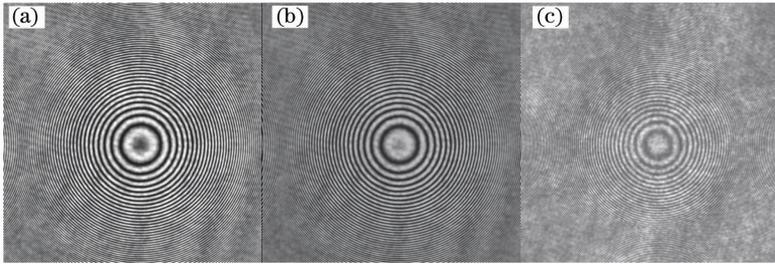


图 6 三种色光照射下的点源全息图。(a) 红光全息图；(b) 绿光全息图；(c) 蓝光全息图

Fig. 6 Hologram of point source with different-color light sources. (a) Red-light hologram; (b) green-light hologram;

(c) blue-light hologram

对图 6(a), 测出 12 个相邻干涉亮环在竖直、水平两个方向的直径, 并以平均值作为每个亮环直径  $D$ , 代入 (10) 式可求得 11 个  $d_i$  的值, 求其平均值。

对图 6(b)、(c) 相同处理, 即可测得三种色光下的成像位置, 结果见表 2。

表 2 理论计算与实验结果的对比

Table 2 Comparison of theoretical calculation and experimental results

$\lambda/nm$	Theoretical calculation						Experimental results with		
	Thick lens system			Thin lens system			holographic method		
	R(632.8)	G(532)	B(473)	R(632.8)	G(532)	B(473)	R(632.8)	G(532)	B(473)
$n$	1.5151	1.5195	1.5232	1.5151	1.5195	1.5232	1.5151	1.5195	1.5232
$s_1/mm$	116.0	116.0	116.0	125.0	125.0	125.0	/	/	/
$s'_1/mm$	-204.62	-205.63	-206.50	-213.78	-215.09	-216.20	/	/	/
$s_2/mm$	411.62	412.63	413.50	431.78	433.09	434.20	/	/	/
$s'_2/mm$	-81.20	-80.69	-80.26	-81.41	-80.90	-80.47	/	/	/
$s_3/mm$	1255.21	1254.69	1254.32	1266.41	1265.90	1265.47	/	/	/
$s'_3/mm$	401.30	396.83	393.14	394.83	390.50	386.94	/	/	/
$S_4/mm$	-191.30	-186.83	-183.14	/	/	/	/	/	/
$s'_4/mm$	174.54	170.11	166.46	168.08	163.76	160.19	/	/	/
$d_i/mm$	102.46	106.89	110.54	108.92	113.24	116.81	105.69	106.62	106.74
$ \Delta d_i /mm$	3.22	0.27	3.80	3.23	6.63	10.07	/	/	/
$d_i/mm$	106.63			112.99			106.35		

### 4.3 像平面位置的理论与实验测量的比较

实验采用的光学元件材质均为 H-K9L (517642), 厂家提供的参数如表 1 (对应于波长为 0.0005876 mm 的光波) 所示。因为折射率与入射光波长有关, 根据柯西公式, 对于上述三种激光, 折射率

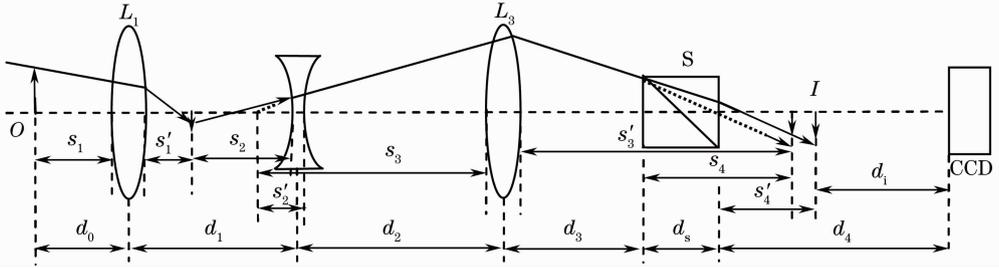


图 7 理论计算成像位置示意图

Fig. 7 Sketch of optical imaging location by theoretical calculations

将光波对应的折射率及表 1 参数代入(3)式中, 就可计算出物体经各个厚透镜逐次成像的位置。由图可见, 最终物体经系统的像平面位置到 CCD 的距离即为  $d_i = d_4 - s'_4$ 。

若视为薄透镜系统, 物体经系统的像平面位置只需将相关参数代入到(1)式中逐次计算得到, 在这里:  $s_1 = d_0, s_2 = d_1 - s'_1, s_3 = d_2 - s'_2$ 。为了计算简便, 将分束镜视为一厚玻璃板, 其对光束的影响是使像发生一个距离为  $\delta = t[1 - (1/n)]^{[14,15]}$  的位移, 由此计算出  $s'_4$ 。

由于透镜的焦距与入射光的波长相关, 根据文献[16]的研究结果, 存在关系式

$$f = f_D \frac{n_D - 1}{n - 1}. \quad (10)$$

据此求出标称值为  $f_D = 300.0$  mm 的透镜与三种光波对应的焦距值分别为:  $f_r = 300.99$  mm,  $f_g = 298.45$  mm,  $f_b = 296.33$  mm; 而标称值为  $f_D = -100.0$  mm 的透镜分别为:  $f_r = -100.33$  mm,  $f_g = -99.48$  mm,  $f_b = -98.78$  mm。将其代入(1)式便能计算出三种色光照射下的像平面位置。

基于上述讨论, 表 2 较详细地给出理论计算及全息实验检测的结果。

在表 2 中,  $|\Delta d_i|$  为理论计算与数字全息方法获得的成像位置之间的差值。由该表可见, 在考虑透镜厚度情况下获得的成像位置, 与采用数字全息法检测的结果较为吻合, 但这一过程极其繁琐; 而当忽略透镜厚度时, 虽然计算过程简单, 但结果偏差较大; 采用数字全息检测时, 三种色光测量结果相近。以下通过彩色数字全息实验进一步验证测量结果的可靠性。

分别为  $n_r = 1.5151, n_g = 1.5195$  及  $n_b = 1.5232^{[9,13]}$ 。图 7 给出根据(4)式进行厚透镜系统像平面追踪计算的相关参数示意图。图中分束镜 S 可视为一个两侧曲率半径均为无穷( $\infty$ )的厚透镜。

## 5 彩色数字全息实验

从像平面位置实验测量结果可以看出, 不同色光的成像位置有差异, 即不同色光在像空间的像有不同的放大率。于是, 如何在统一的物理尺寸下重建不同色光照明下的物体像, 是需要考虑的问题。虽然, 基于较严格的理论分析, 在考虑了像的放大率后, 可以基于目前对彩色数字全息波前重建算法的研究<sup>[7]</sup> 导出相应的重建算法, 但比较繁杂。

由于数字全息重建像有一定的焦深<sup>[10,11]</sup>, 如果所研究的不同色光的像平面位置差异能包容在焦深范围内, 可以在焦深范围内合适选择一个公共的像平面, 便能利用现有的重建算法在像空间进行彩色图像的重建。为简明起见, 以下通过三种色光照明同一物体的彩色数字全息实验, 并采用 1-FFT 离焦重建法<sup>[7]</sup> 重建图像考察以上结论。

实验物体为一个透明彩色图像“小女孩”, 大小为 30.0 mm × 28.8 mm。将其放在先前点光源的位置, 用三种色光拍摄全息图。根据文献[11], 1-FFT 重建图像的焦深为

$$2|z_m - z_i| \approx 3 \frac{\lambda d_i^2}{L^2}. \quad (12)$$

全息图宽度  $L = 4.76$  mm, 将各色光波长及实验检测值  $d_i$  代入上式, 可计算出焦深分别为 0.9359、0.8007、0.7136 mm。当选择实验检测值  $d_i$  的平均值 106.35 mm (见表 2) 作为重建像位置时, 三种色光重建距离的变化均在焦深范围内, 故采用平均值进行重建是可行的。在该距离下, 利用 1-FFT 离焦重建法进行彩色图像重建。

为了合成彩色图像, 必须让不同色光的重建像的

像素具有相同的物理尺寸,实现的方法是对全息图进行补零操作<sup>[17,18]</sup>。三色色光重建像的像素宽度依次为  $\frac{\lambda_R d_i}{N_R \Delta x}$ 、 $\frac{\lambda_G d_i}{N_G \Delta x}$ 、 $\frac{\lambda_B d_i}{N_B \Delta x}$ , 式中  $\Delta x$  为全息图的像素间距,令  $d_i$  为三个像距的平均值,故要求  $\frac{\lambda_R}{N_R} = \frac{\lambda_G}{N_G} = \frac{\lambda_B}{N_B}$ , 其中  $N_R$ 、 $N_G$ 、 $N_B$  为各色光的全息图像素点数。

选择 1024 pixel × 1024 pixel 的全息图, 让  $\lambda =$

532 nm 的绿光全息图宽度扩展为 2000 pixel, 红光扩展为  $N_R = \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \cdot N_G \approx 2378$  pixel, 蓝光扩展为  $N_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_G} \cdot N_G \approx 1778$  pixel。图 8 分别给出利用三种色光补零全息图获得的像素物理尺寸相同 1-FFT 重建像平面(图中采用消全息图局域平均值方法抑制了零级衍射干扰)。

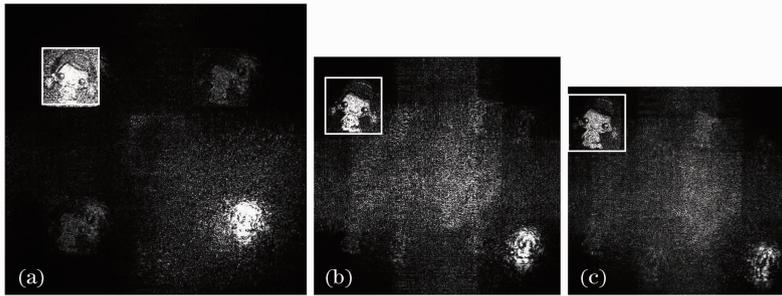


图 8 统一了像素物理尺寸的三种色光的 1-FFT 重建像平面。

(a) 红光(2378 pixel × 2378 pixel); (b) 绿光(2000 pixel × 2000 pixel); (c) 蓝光(1778 pixel × 1778 pixel)

Fig. 8 1-FFT reconstructed images of three-color lights whose pixel sizes are unified. (a) Reconstructed image of red light (2378 pixel × 2378 pixel); (b) reconstructed image of green light (2000 pixel × 2000 pixel); (c) reconstructed image of blue light (1778 pixel × 1778 pixel)

由于 1-FFT 离焦重建法统一了重建像的物理尺寸,在图 8 中分别选择包含重建像的 440 pixel × 440 pixel 区域,对应于像空间的物理宽度  $440 \times \frac{\lambda_R d_i}{N_R \Delta x} = 440 \times \frac{\lambda_G d_i}{N_G \Delta x} = 440 \times \frac{\lambda_B d_i}{N_B \Delta x} = 2.6839$  mm(本实验中  $\Delta x = 0.00465$  mm,理论分析容易证明,实验研究中物体像的放大率约为 0.1,选择区域与物体尺寸 30.0 mm × 28.8 mm 相对应)。图 9 分别给出宽度

为 440 pixel 的红光、绿光及蓝光重建像强度分布及将三色色光强度分布视为真彩色图像红色、绿色及蓝色分量合成的彩色图像。考察合成的彩色图像可以看出,在所研究情况下,选择三色色光像平面位置的平均值作为共同的重建像平面,由于重建像平面在焦深范围,不但能获得质量较好的图像,而且较好地统一了不同色光重建像的物理尺寸。

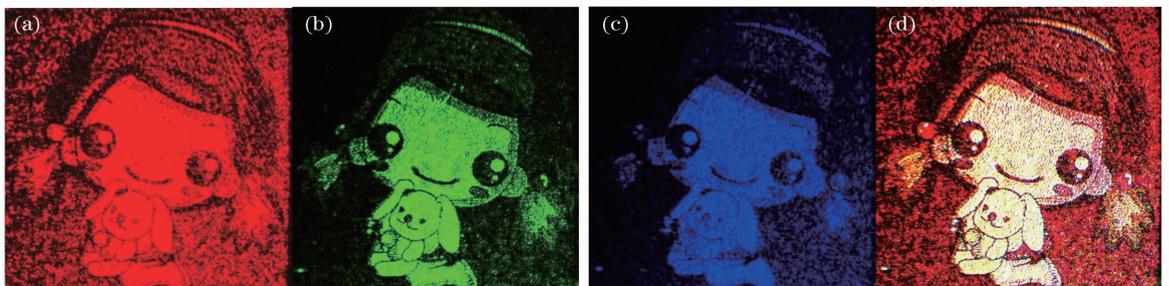


图 9 (a) 红光重建像; (b) 绿光重建像; (c) 蓝光重建像; (d) 三色色光合成的彩色图像

Fig. 9 (a) Reconstructed image of red light; (b) reconstructed image of green light;

(c) reconstructed image of blue light; (d) color image composed by the three-color lights

图 10 中将理论计算与实验检测结果进行对比。均采用三色色光成像位置的平均值(表 2)进行 1-FFT 离焦重建。

从图 10 可见,实验检测结果下合成的彩色图像与作为厚透镜时的对应的彩色图像基本吻合,但作

为薄透镜时对应的彩色图像则很差。这是因为作为薄透镜获得的成像位置已在焦深范围外,而后面二者则在焦深范围内。然而作为厚透镜,获得这一结果的过程相当繁杂。

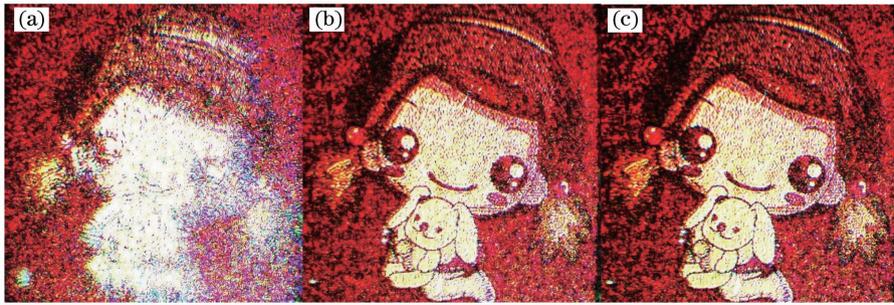


图 10 理论计算与实验检测结果下合成的彩色图像对比。(a) 薄透镜对应的彩色图像；(b) 厚透镜对应的彩色图像；(c) 实验检测对应的彩色图像

Fig. 10 Comparison of Reconstructed images between theoretical calculations and experimental holographic method. (a) Reconstructed color image from thin lens; (b) reconstructed color image from thick lens; (c) reconstructed color image from experimental holographic method

## 6 讨 论

这里的研究中,像平面位置  $d_i$  的准确测量及实际检测时物体准确地放置于物平面是实现准确检测的基础。当通过点源全息图测量出像平面位置后,让实测物体的物平面准确地与点源所在平面重合是获得正确测量的保证。为此,应对实际物平面偏离点源平面可以引入的误差进行讨论。

由于多个光学元件构成的成像系统可以等效于在系统的像方主面上放置一焦距为  $f$  的薄透镜的成像系统。令物平面到像方主面的等效物距为  $L_0$ ,像方主面到像平面的距离  $L_i$ ,令  $f$  为常量,对透镜定理  $\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_i} = \frac{1}{f}$  微分运算后容易得到

$$\Delta L_i = - \left( \frac{L_i}{L_0} \right)^2 \Delta L_0, \quad (13)$$

令  $\Delta L_0$  为实际物平面相对点源平面的偏差,则  $\Delta L_i$  为像空间引入的像平面位置偏移,且有  $\Delta L_i = \Delta d_i$ 。利用(13)式则能讨论  $\Delta L_0$  对实测的影响。

由于  $L_i/L_0$  代表像的横向放大率,以上结果表明,当成像系统的放大倍数  $L_i/L_0 < 1$  时,像平面位置的变化  $\Delta L_i$  对物平面位置的误差  $\Delta L_0$  不敏感。然而,当成像系统放大倍数  $L_i/L_0 > 1$  时,物平面位置的较小误差会引起像平面位置的较大变化。这时,当通过实验确定了像平面后,必须采取特别的措施(例如在装夹针孔的夹具上取下针孔面,而直接在原位更换为待测物体平面),较准确地让物体置于物平面,才能获得较好的测量结果。这里研究的光学系统是对尺寸较大的物体进行数字全息检测设计的,光学系统的放大率甚小于 1。虽然像平面位置的变化对物平面的误差不敏感,但为了保证较好的测量精度,亦采取了原位更换物体的措施,以保证物体的

准确放置来尽可能减小误差。

## 7 结 论

在彩色数字全息研究中,当物光通过一透镜系统变换后到达 CCD 时,本文提出一种利用点源数字全息图测量系统像平面位置的方法,通过理论计算与实验测量的比较验证了测量方法的可行性。并且,基于研究结果及数字全息重建像焦深的讨论,将物体通过透镜系统所成的像视为像空间的物体,提出在像空间中用同一物理尺寸下重建彩色物体像的简易方法,给出像空间中重建彩色物体像的实例。

## 参 考 文 献

- 1 P. Hariharan. Optical Holography: Principles, Techniques, and Applications[M]. Cambridge University Press, 1996. 181~210
- 2 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng Transl. 3rd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 326~339  
J. W. Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚译. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2006. 326~339
- 3 Yu Meiwen. Optical Holography and the Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996  
于美文. 光全息及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- 4 Li Junchang, Xiong Bingheng. Information Optics Theory and Calculations[M]. Beijing: Science Press, 2009  
李俊昌, 熊秉衡. 信息光学理论与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 574~591
- 5 I. Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Rev.*, 2001, **8**(2): 85~89
- 6 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie et al.. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 109~114  
王云新, 王大勇, 赵洁等. 基于数字全息显微成像的微光元部件三维面形检测 [J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 109~114
- 7 Li Junchang. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5):

- 0501001  
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0501001
- 8 Cui Hongbin, Li Yongping, Duan Kaimin. Optics[M]. Beijing: Science Press, 2008. 244~254  
崔宏滨, 李永平, 段开敏. 光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 244~254
- 9 Yao Qijun. Optical Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 187~188  
姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 187~188
- 10 Wang Huaying, Zhao Baoqun, Song Xiufa. Focal depth of Fresnel digital holographic imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 374~377  
王华英, 赵宝群, 宋修法. 菲涅耳数字全息成像系统的焦深[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 374~377
- 11 Li Junchang. Focal depth research of digital holographic reconstructed image[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **65**(13): 134203  
李俊昌. 数字全息重建图像的焦深研究[J]. 物理学报, 2012, **65**(13): 134203
- 12 Li Junchang, Fan Zebin, Peng Zujie. Application research on the zoom system of digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2008, **37**(6): 1420~1424  
李俊昌, 樊则宾, 彭祖杰. 数字全息变焦系统的研究及应用[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1420~1424
- 13 Lou Yuli, Li Junchang, Gui Jinbin *et al.*. Analysis of influence caused by lens's chromatic aberration in color digital holographic system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0409001  
楼宇丽, 李俊昌, 桂进斌 等. 彩色数字全息系统中透镜色差影响的研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0409001
- 14 Yu Daoyin, Tan Hengying. Optics in Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 39~40  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 39~40
- 15 Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jingsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xian: Electronic Science and Technology University Press, 2008. 343~344  
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2008. 343~344
- 16 Y. Lou, J. Li, Y. Zhang *et al.*. Optimization research for digital hologram recording system of big objects [C]. *SPIE*, 2010, **7848**: 78481L
- 17 D. Mas, J. Garcia, C. Ferreira *et al.*. Fast algorithms for free-space diffraction patterns calculation[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**(4-6): 233~245
- 18 J. C. Li, Z. Peng, Y. Fu. Diffraction transfer function and its calculation of classic diffraction formula [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(2): 243~248

栏目编辑:何卓铭