

彩色数字全息系统中透镜色差影响的研究

楼宇丽 李俊昌 桂进斌 宋庆和 李重光

(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500)

摘要 在物光通过透镜系统到达 CCD 平面的彩色数字全息研究中, 将每一色光的像视为像空间中的物体。基于全息图补零的一次傅里叶变换(1-FFT)重建方法, 导出既能较好地统一不同色光重建物体的物理尺寸, 又能考虑透镜色差影响的彩色数字全息图像重建方法。对该方法的研究结果表明, 透镜色差的影响等效于让物体的重建像偏离了理想的重建像平面。然而, 数字全息重建图像具有一定的焦深, 在多数情况下, 可以忽略透镜色差的影响, 利用厂家给定的焦距标称值获得满足实际需要的彩色重建图像。

关键词 全息; 数字全息; 波前重建; 彩色数字全息; 透镜色差

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0409001

Analysis of Influence Caused by Lens's Chromatic Aberration in Color Digital Holographic System

Lou Yuli Li Junchang Gui Jinbin Song Qinghe Li Chongguang

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

Abstract In the research of color digital holography with CCD-recording and lens-imaging, each monochromatic image could be regarded as an objective image projected on the CCD sensitive plane. Based on single fast Fourier transform (1-FFT) reconstruction method via zero-padding, a new reconstruction method in color digital holography is proposed. According to this method, not only the size of reconstructed images in different monochromatic light is same, but also the influence of lens's chromatic aberration can be taken into account. The study demonstrates that the influence of lens's chromatic aberration is equivalent to an offset of reconstructed image apart from ideal imaging plane. Fortunately, in digital holography the reconstructed image has a certain focal depth. Thus, the influence of lens's chromatic aberration may be ignored in most cases. Depending on nominal lens's focal length supplied by manufacturer, a reconstructed color image that meets practical requirement can be got.

Key words holography; digital holography; wavefront reconstruction; color digital holography; lens's chromatic aberration

OCIS codes 090.1705; 090.1995; 100.3010

1 引言

在光学无损检测领域中, 全息技术是一种精密检测技术^[1~5]。与传统全息相比, 数字全息省去了底片处理的过程, 缩短了曝光时间, 从而降低了对振动的敏感性, 可以较好地得到相位信息。数字全息的这些优点使它适用于物体三维形貌及微形变等物体量的测量^[5,6]。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 3 个位移矢量, 通常使用 3 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, 采用透镜组成的光学系统对物光场进行变换是通常采取的措施。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^[7~9], 将物体成像在 CCD 平面

收稿日期: 2011-10-24; **收到修改稿日期**: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60977007)资助课题。

作者简介: 楼宇丽(1975—), 女, 硕士研究生, 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)

上。然而,由于透镜的焦距是光波长的函数,当使用多种波长的光照射物体时,不同波长的光对应不同的像平面,不可能使用 CCD 在同一位置实时地接收不同波长光照明下物体的像。因此,当光学系统给定后,准确确定不同波长光照的物体的像平面,并按照统一的物理尺寸进行 3 种色光的像重建,是必须解决的两个问题。

对于第二个问题,当物体的像平面已经准确确定后,可以将物体的像视为像空间的物体,目前已经有许多统一不同色光重建像尺寸的方法^[10,11]。然而,对于第一个问题,光学系统中的透镜焦距通常是由厂家直接给定的,它事实上是对于某一特定波长的焦距。由于不能准确知道在任意波长下透镜的焦距,因此考查透镜色差对重建图像的影响,研究是否可以利用厂家给定的焦距直接进行成像的近似计算,是本文的主要研究内容。

由于任意成像系统可以等价于一个透镜的成像系统,本文利用透镜折射率随波长变化的柯西公式^[12,13],以一个透镜构成的成像系统为例分别计算红绿蓝 3 种色光照射下同一物体的像平面,并且,将每一色光的像视为像空间中的物体,参照能较好统一不同色光重建物体的物理尺寸的一次傅里叶变换(1-FFT)离焦重建方法^[14,15],导出既能较好统一不同色光重建物体的物理尺寸,又能考虑透镜色差影响的彩色数字全息图像重建方法。对该方法的研究结果表明,透镜色差的影响等效于让物体的重建像偏离了理想的重建像平面。然而,数字全息重建图像具有一定的焦深^[16,17],在多数情况下,可以忽略透镜色差的影响,利用厂家给定的标称焦距值获得满足实际需要的彩色重建图像。

2 数字全息记录系统简介

当被测量物体的投影尺寸与 CCD 面阵尺寸有较大差异时,为使 CCD 较好地接收物光场信息,采用透镜组成的光学系统对物光场进行变换是通常采取的措施。可以采用多个透镜组成的系统或单个透镜进行成像,由于任意成像系统可以等价于在像方主面有一个薄透镜的光学系统,故讨论一个透镜的成像系统,其结果可以推广到任意透镜组合。图 1 是物光通过单一透镜的数字全息记录系统简化光路。

物体经过透镜成像,根据实际需要及透镜成像的性质,合适选择物体与透镜间的距离可使物体在像空间成一放大或缩小像。在像空间中将物体的像

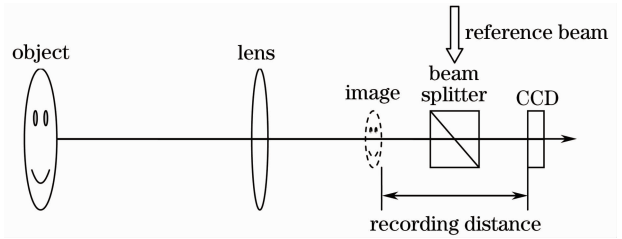


图 1 物光通过透镜到达 CCD 的数字全息记录系统

Fig.1 Digital hologram recording configuration by CCD 视为物体,其到 CCD 间的距离就视为像空间的物距。然而,透镜的焦距与入射光的波长相关,也就是说当物体与透镜间距离固定时,不同波长的照明光对应的物体像位置不同,像空间的物距及成像的放大率不同。因此,在彩色数字全息研究中,考虑透镜色差对于准确进行物光场的 1-FFT 波前重建,是一个十分重要的研究内容。虽然不同色光的成像尺寸不同,但成像放大率差异不大,为简明起见,在研究中认为 3 种色光对应的像具有相同的尺寸。

3 考虑透镜色差的 1-FFT 离焦彩色重建

参照文献[14,15]的 1-FFT 离焦重建研究,导出考虑透镜色差的 1-FFT 离焦彩色重建方法。

令波长为 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ 的 3 种色光求得的在像空间的物距分别为 d_{oR}, d_{oG}, d_{oB} , 1-FFT 离焦重建像距分别为 d_R, d_G, d_B , 各色光的全息图像素数分别为 N_R, N_G, N_B 。由于 3 种色光的全息图像素宽度依次为 $\frac{\lambda_R d_R}{N_R}, \frac{\lambda_G d_G}{N_G}$ 及 $\frac{\lambda_B d_B}{N_B}$ ^[18,19], 为使重建像的像素具有相同的尺寸,则有

$$\frac{\lambda_R d_R}{N_R} = \frac{\lambda_G d_G}{N_G}, \quad (1)$$

$$\frac{\lambda_G d_G}{N_G} = \frac{\lambda_B d_B}{N_B}, \quad (2)$$

令

$$d_R = d_{oG} + d_{oR} - d_G, \quad (3)$$

代入(1)式得

$$d_G = \frac{(d_{oG} + d_{oR})N_G(\lambda_R/\lambda_G)}{N_R + N_G(\lambda_R/\lambda_G)}. \quad (4)$$

当使用 1-FFT 方法进行图像重建时,为使重建像有足够多的像素表示,通常通过全息图周边补零形成较大的全息图^[11],并且,为便于进行 FFT 计算,通常让补零后的全息图像素数为偶数^[14]。下面导出相关表达式:

$$\text{令 } N_R = (\lambda_R/\lambda_G)N_G \approx 1.190N_G, \text{ (4)式变为}$$

$$d_G = \frac{(d_{oG} + d_{oR})(\lambda_R/\lambda_G)}{1.190 + (\lambda_R/\lambda_G)}. \quad (5)$$

令 $N_B = (\lambda_B/\lambda_G)N_G \approx 0.889N_G$, 代入(2)式得

$$d_B = \frac{0.889\lambda_G d_G}{\lambda_B}. \quad (6)$$

首先用(5)式求出 d_G , 再用(3)式和(6)式则可以计算出 d_R, d_B 。

不难看出, 考虑透镜色差影响并统一不同色光重建像像素尺寸后, 不同色光的重建图像均不在理想的像平面上。但是, 只要重建图像在焦深范围内, 则能较好地进行物体的彩色图像重建。当准确知道不同色光照明下的透镜焦距时, 便能按照上面方法进行彩色数字全息的物光场波前重建。

然而在实际应用中, 通常只知道透镜标称值, 它事实上是某一特定波长照明下的透镜焦距, 准确知道不同波长下的透镜焦距值比较困难。如果直接使用透镜标称值进行彩色数字全息波前重建, 是否也能够让重建像在焦深内, 下面对此问题继续进行研究。

4 不考虑透镜色差的 1-FFT 离焦彩色重建

当不考虑透镜色差时, 令 d 为利用透镜标称值求出的像空间物距, 则有 $d_{oR} = d_{oG} = d_{oB} = d$ 。仍利用 1-FFT 离焦重建研究方法, 令 1-FFT 离焦重建像距分别为 d'_R, d'_G, d'_B , 各色光的全息图像像素数分别为 N_R, N_G, N_B 。则有

$$\frac{\lambda_R d'_R}{N_R} = \frac{\lambda_G d'_G}{N_G}, \quad (7)$$

$$\frac{\lambda_G d'_G}{N_G} = \frac{\lambda_B d'_B}{N_B}, \quad (8)$$

令

$$d'_R = 2d - d'_G, \quad (9)$$

代入(7)式得

$$d'_G = \frac{2dN_G(\lambda_R/\lambda_G)}{N_R + N_G(\lambda_R/\lambda_G)}. \quad (10)$$

令 $N_R = (\lambda_R/\lambda_G)N_G \approx 1.190N_G$, (10)式变为

$$d'_G = \frac{2d(\lambda_R/\lambda_G)}{1.190 + (\lambda_R/\lambda_G)}, \quad (11)$$

令 $N_B = (\lambda_B/\lambda_G)N_G \approx 0.889N_G$, 代入(8)式得

$$d'_B = \frac{0.889\lambda_G d'_G}{\lambda_B}. \quad (12)$$

观察(5)、(6)式和(11)、(12)式可见, 无论考虑或不考虑透镜色差影响, 不同色光的重建像平面均不是理想的像平面。为了解是否可以直接使用透镜标称

值进行彩色数字全息波前重建, 下面通过实验分别研究两种重建方法的绝对离焦量, 即计算 $|d_R - d_{oR}|$, $|d_G - d_{oG}|$, $|d_B - d_{oB}|$ 与 $|d'_R - d_{oR}|$, $|d'_G - d_{oG}|$, $|d'_B - d_{oB}|$ 的数值, 考查它们的大小及是否在重建像的焦深范围, 便能对重建方法的可行性做出结论。目前, 已经有不少学者给出数字全息 1-FFT 重建图像焦深的表达式^[17], 以下利用文献[17]给出的表达式 $\delta_{zm} = \frac{1.5\lambda z_0^2}{L^2}$ (L 为 CCD 的宽度) 进行研究。

5 实验研究

在红($\lambda_R = 632.8 \text{ nm}$)、绿($\lambda_G = 532 \text{ nm}$)、蓝($\lambda_B = 473 \text{ nm}$) 3 种色光照明下进行实验, 物体是 $105 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的泥塑彩绘猴王头像, 物体到负透镜焦距为 220 mm , 透镜到 CCD 距离为 531 mm 。实验中采集图像所用的 CCD 像元数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $4650 \text{ nm} \times 4650 \text{ nm}$, CCD 面阵宽度为 $4.76 \text{ mm} \times 4.76 \text{ mm}$; 所使用的透镜焦距标称值为 $f_D = -100 \text{ mm}$, 折射率为 $n_D = 1.51680$, 对应于 587.6 nm 波长, 这些参数由产家提供。

根据理论研究^[9], 若任意给定波长下透镜材料折射率为 n_i , 则相应的焦距 f_i 为

$$f_i = f_D \frac{n_D - 1}{n_i - 1}, \quad (13)$$

而折射率随入射光波长 λ_i 的变化关系可以用柯西公式描述为^[12,13]

$$n_i^2 = a + b\lambda_i^{-2} + c\lambda_i^{-4}, \quad (14)$$

式中 a, b, c 是与透镜材质有关的系数。

对于本实验使用的透镜, 材质为 H-K9L (517642), 根据产家提供的几种波长及对应折射率, 由其中 3 种波长及对应折射率并利用(14)式就可计算出 3 个系数, 分别为: $a = 2.261$, $b = 1.459 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$, $c = -2.944 \times 10^{-4} \mu\text{m}^4$ 。由(13)、(3)、(5)、(6)、(9)、(11)、(12)式分别计算出考虑及不考虑透镜色差影响时的透镜焦距、像空间物距、离焦重建像距等量, 相关比较结果如表 1 所示。不难看出, 考虑透镜色差影响时, 离焦量较小, 基本低于不考虑透镜色差影响时的 1 个数量级。然而, 虽然不考虑色差时离焦量较大, 但与焦深相比这个值仍然很小。所以透镜色差的影响可以忽略不计。

为进一步通过实验证明上述结论, 令 $N_G = 2200$, 用考虑色差及不考虑色差两种方法对全息图进行彩色图像的离焦重建。

表 1 色差对成像影响的对比

Table 1 Comparison of imaging influence of chromatic aberration

	Considering lens's aberration			Neglecting lens's aberration		
	R(632.8)	G(532)	B(473)	R(632.8)	G(532)	B(473)
λ /nm						
n	1.5151	1.5195	1.5232	1.5168	1.5168	1.5168
f /mm	-100.33	-99.48	-98.78	-100	-100	-100
Magnification	-0.313	-0.311	-0.310	-0.312	-0.312	-0.312
d_o /mm	612.78	612.49	612.25	612.67	612.67	612.67
d /mm	612.77	612.50	612.34	612.81	612.53	612.47
$ d-d_o $ /mm	0.01	0.01	0.09	0.14	0.14	0.20
δ_{zm} /mm	15.73	13.21	11.74	15.72	13.22	11.75

当考虑色差时,根据(1)、(2)式求得 $N_R = 2618, N_B = 1956$ 。实验研究中,让 3 种色光共用一个参考光扩束及准直系统,通过参考光角度的调节,让每种色光 1-FFT 重建图像在重建像平面的第二像限。作为实例,图 2(a)给出了 CCD 采集的 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 全息图周围补零形成的绿光全息图。图 2(b)为绿光的 1-FFT 重建像。

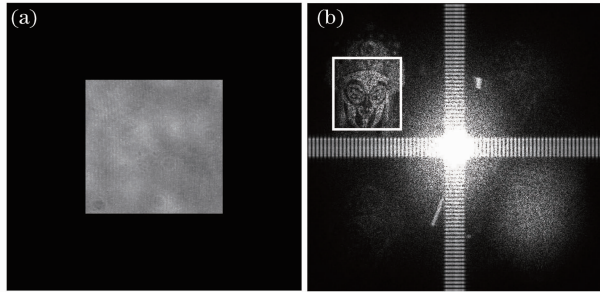


图 2 重建过程示意图。(a)通过补零形成的绿光全息图;(b) 1-FFT 离焦绿光重建图

Fig. 2 Sketch map of reconstruction process. (a) Green holography hologram formed by zeros-padding; (b) 1-FFT defocus reconstructed image of green light

在 3 种色光 1-FFT 重建像的同一位置选取 $500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$ 的区域[见图 2(b)],然后,令所选择区域的图像强度与计算机 3 色图像的分量成比例,图 3 分别给出考虑及不考虑透镜色差时的重建彩色图像。

由图 3 可见,仅从肉眼观察,两幅离焦重建图基本一样,没有明显的区别。为了更准确地进行对比,对 3 种色光下考虑与不考虑色差的重建像的强度分别求取了平均绝对误差,分别为: $\delta_R = 7, \delta_G = 6, \delta_B = 9$ 。为了更直观地看到这一区别,在两幅重建彩色图像中心分别选取同一坐标点并沿横向两侧各取 50 pixel 点,沿这一轴线做强度对比曲线(见图 4),图中实线为考虑色差影响的强度曲线,而虚线为不考虑色差影响的强度曲线,由图 4 明显可见,二者基本是吻合的,但确实存在微小的差异。但计算机显

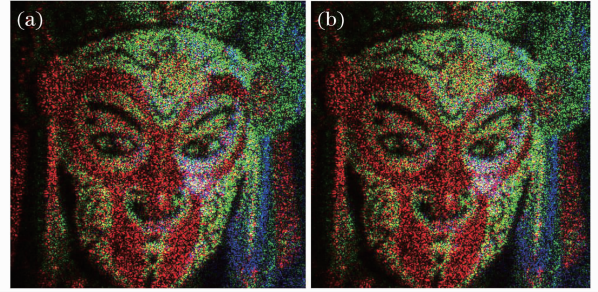


图 3 透镜色差对 1-FFT 离焦重建质量影响的对比 ($500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$)。(a)考虑透镜色差的离焦重建像;(b)不考虑透镜色差的离焦重建像

Fig. 3 Comparison of 1-FFT focus reconstruction between considering and neglecting lens's chromatic aberration ($500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$). (a) Considering lens's aberration; (b) neglecting lens's aberration

示彩色图像时,每一色彩分量用具有 8 bit 的字节表示,肉眼不能分辨色彩分量低于 4 bit 数值变化时图像色彩的变化^[20]。

由图 3 和图 4 对比结果可见,在进行 1-FFT 离焦重建时,透镜色差对彩色图像重建结果的影响并不大,忽略透镜色差影响通常是可行的。

6 结 论

在物光通过透镜系统到达 CCD 的彩色数字全息研究中,基于全息图补零的一次傅里叶变换重建方法,本文导出既能较好统一不同色光重建物体的物理尺寸,又能考虑透镜色差影响的彩色数字全息图像重建方法。该方法表明,透镜色差的影响等效于让物体的重建像偏离了理想的重建像平面。然而,由于数字全息重建图像具有一定的焦深,通过数值分析及实验对该方法的研究表明,通常可以忽略透镜色差的影响,利用厂家给定的标称焦距值获得满足实际需要的彩色重建图像。本文所进行的研究对简化彩色数字全息检测信息的处理具有实际意义。

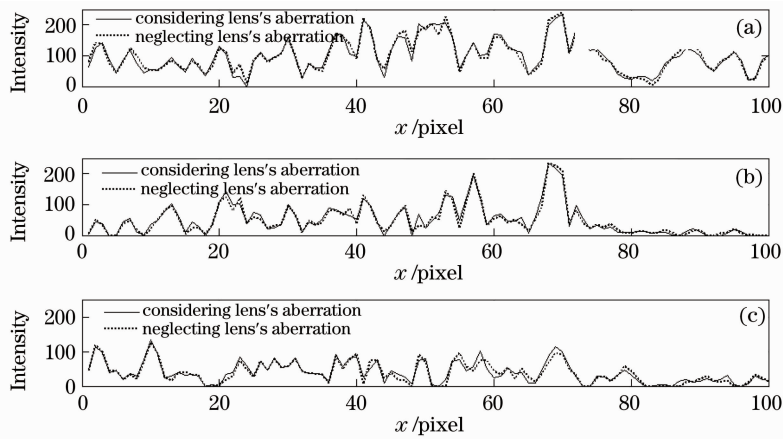


图4 考虑与不考虑透镜色差下重建像的3种色光强度对比曲线。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光

Fig.4 Comparison among intensity distributions of monochromatic reconstructions under considering and neglecting lens's chromatic aberration. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light

参 考 文 献

- U. Schnars, W. Jueptner. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques[M]. New York: Springer, 2005. 85~86
- J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. 3rd ed.. Qin Kecheng Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 326~339
J. W. 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 第三版. 秦克诚译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 326~339
- Yu Meiwen. Optical Holography and the Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 419~425
于美文. 光全息及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 419~425
- Li Junchang, Xiong Bingheng. Information Optics Theory and Calculations[M]. Beijing: Science Press, 2009. 574~591
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
- I. Yamaguchi, S. Ohta, J. Kato. Surface contouring by phase-shifting digital holography[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2001, **36**(5): 417~428
- 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): 0412003
王云新, 王大勇, 赵洁等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412003
- Junchang Li, Zujie Peng, Yunchang Fu. Research of digital holographic object wave field reconstruction in image and object space[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(6): 064201
- Jia Fang, Feng Zhongyao, Zhou Libin *et al.*. Three dimensional surface shape measurement of big objects by pre-imaging digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2239~2243
贾 昉, 冯忠耀, 周利斌等. 预成像数字全息测量大物体三维形貌[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2239~2243
- Lou Yuli, Li Junchang, Zhang Yong'an *et al.*. Optimization research for digital hologram recording system of big objects[C]. *SPIE*, 2010, **7848**: 78481L
- P. Ferraro, S. De Nicola, G. Coppola *et al.*. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8): 854~856
- P. Picart, J. Leval. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(7): 1744~1761
- Yao Qijun. Optical Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 424
姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 424
- Cui Hongbin, Li Yongping, Duan Kaimin. Optics[M]. Beijing: Science Press, 2008. 224
崔宏滨, 李永平, 段开敏. 光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 224
- T. Patrice. Méthodes d' holographie numérique couleur pour la métrologie sans contact en acoustique et mécanique [D]. Le Mans: Université du Maine, 2010
- 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
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Publishing House Electronics Industry, 2005. 401~408
M. 玻恩, E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 401~408
- 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
- 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
- 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
- Li Junchang, Guan Yihong, Cai Guangcheng *et al.*. A fast method for pixel random mapping and application on the hiding technology of LSB[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1345~1350
李俊昌, 管一弘, 蔡光程等. 像素随机映射的快速算法及在 LSB 隐藏技术中的应用[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1345~1350