

文章编号 1004-924X(2011)06-1414-07

# 彩色全息光电再现倍率色差的消除

王涛\*, 于瀛洁, 郑华东

(上海大学 精密机械工程系 上海 200072)

**摘要:**针对基于空间光调制器的彩色全息光电再现系统在利用计算全息图进行光电再现时会由于三色激光波长不同造成再现像出现倍率色差,影响再现效果的问题,本文重点分析了倍率色差产生的原因。为了消除倍率色差,提高彩色光电再现像的质量,提出了在全息图计算过程中对物信息进行差别采样来消除倍率色差。基于时分复用方法搭建了彩色全息光电再现系统,以迭代傅里叶变换型全息图为例,对处理后的计算全息图进行了光电再现。实验表明,提出的方法可以消除波长不同造成的色差(33.6%(红色),12.5%(绿色)),实验结果验证了本文所提出方法的可行性。

**关键词:**全息术;计算全息图;差别采样;倍率色差;光电再现

**中图分类号:**O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1414

## Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography

WANG Tao\*, YU Ying-jie, ZHENG Hua-dong

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

\* Corresponding author, E-mail: wantall@shu.edu.cn

**Abstract:** As the magnification chromatism caused from different wavelengths of color lasers in the optoelectronic reconstruction based on a spatial light modulator effects on the quality of reconstructed images, this paper focuses on the reason that the magnification chromatism arises. In order to remove the magnification chromatism, it proposes a method to sample the three color objects with disparity in the process of hologram computing to improve the image quality. A full color electro-holographic system based on a time shearing method is established and holograms computed by the Iterative Fourier Transform Algorithm (IFTA) are reconstructed. The experiment indicates that the magnification chromatism 33.6% for red and 12.5% for blue can be both removed, which shows that the method proposed is verified by experiment results.

**Key words:** holography; computer generated hologram; disparity sampling; magnification chromatism; optoelectronic reconstruction

收稿日期:2010-07-06;修订日期:2010-10-27.

基金项目:上海市科委国际合作项目(No. 09530708700);上海大学研究生创新基金资助项目(No. SHUCX101060)

## 1 引言

全息术能够实现信息的三维显示。传统彩色全息术利用白光再现彩虹全息图再现彩色物体,记录过程对物体进行三次曝光且通过调整狭缝位置来消除再现过程中的色差<sup>[1]</sup>,也可以通过在全息图前面或后面放置特制平面光栅来消除色差<sup>[2]</sup>。数字彩色全息记录需要三色光分别照射物体,记录三色全息图,再现过程是将三色全息图进行再现并合成得到物体的彩色信息。计算机进行的数字全息图数值再现可以通过补零或调整再现距离等方法来消除色差<sup>[3]</sup>。而在全息光电再现中,可以通过调整相应光路来消除色差<sup>[4-5]</sup>。计算全息灵活性好,借助于空间光调制器可以实现全息图的光电再现<sup>[6-7]</sup>。Martinez 提出对全息图按照波长进行压缩,来消除色差。以蓝色为基准,其红色与绿色分量全息图相应减少的量为 5.25% 与 2.08%,这种方法牺牲了红色信息与绿色信息的部分高频信息<sup>[8]</sup>。Sando 等对彩色计算全息进行了相关的研究,提出了计算过程中根据波长改变物体投影角来实现对色差的补偿<sup>[9-10]</sup>。Ferraro 等提出在全息图计算过程中通过改变波长等参数来消除再现过程中色差<sup>[11]</sup>,但菲涅耳全息图在光电再现过程中衍射效率较低。

位相型全息图是一种新型的全息图,由于其只对光波的位相调制而不改变光的强度,因而具有较高的衍射效率<sup>[12]</sup>。用来计算位相型全息图的算法有:迭代傅里叶算法,直接二元搜索算法, Yang-Gu 算法等<sup>[13]</sup>。迭代傅里叶变换是用来计算位相全息图的一种常用的算法,其计算过程由于不引进波长参数而不易在计算过程中改变波长来进行色差补偿。本文利用空间光调制器的位相调制特性来实现位相型全息图的承载。对迭代傅里叶变换型的全息图光电再现进行成像分析,得到了再现过程中存在色差的原因;提出了在计算全息图过程中对彩色物体三色分量进行差别采样,有效消除了再现过程中的倍率色差,得到较好的彩色全息光电再现效果。该方法对动态实现彩色全息光电再现具有一定的现实意义。

## 2 全息图光电再现分析

全息图光电再现系统能够实时再现全息图。由空光调制器承载全息图实现全息图光电再现在国内外得到了较多的关注<sup>[14-16]</sup>。利用空间光调制器实现彩色全息显示的方法主要包括空间复用方法与时分复用方法<sup>[4,17]</sup>。空间复用方法一般采用 3 片空间光调制器分别产生三色分量再现像在空间进行合成。目前也有利用单片空间光调制器实现空间合成的方法报道<sup>[18]</sup>。时分复用方法利用单片空间光调制器产生时间序列的三色再现像,利用人眼的视觉暂留效应来获取彩色信息,具有系统结构简单,光学元件较少等优点。图 1 所示为本文采用基于时分复用方法的全息图光电再现系统,系统包括半导体激光器(RGB Laser)及激光控制器(Laser Driver),中性滤光片(Neutral Filter, NF),显微物镜(Micro Objective, MO),滤波小孔(Pinhole, PH),偏振片(Polarizer, P),傅里叶变换透镜(Fourier Transform Lens, FTL),反射镜(Mirror, M),反射式空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM),接收屏(Screen, S), CCD 等。成像过程中,考察不同时间段内系统的工作状态,例如,在  $t_1$  时间段内,在激光控制系统的控制下,红色激光处于开启用状态而另外两波长激光器处于停用状态,空间光调制器加载红色分量全息图,因此在该时间段内只产生红色分量的再现像。在  $t_2$  时间段内绿色激光开启,红色与蓝色激光器处于停用状态,空间光调制器加载绿色分量全息图,在该时间段内在接收屏上呈现绿色分量再现像。同理在  $t_3$  时间段内接收屏上

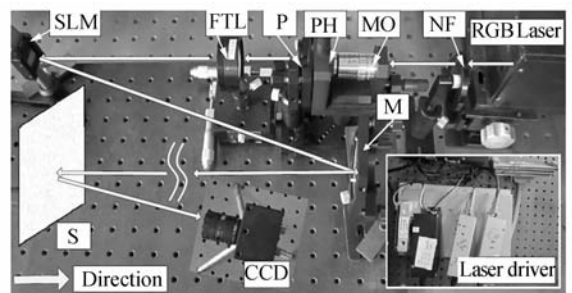


图1 全息图光电再现系统示意图

Fig. 1 Optoelectronic reconstruction system

呈现蓝色分量再现像。在计算机的控制下,空间光调制器所加载的全息图与三色激光器保持同步,实现了 3 种颜色分量再现像在接收屏上进行序列显示,由于人眼的视觉暂留效应产生彩色效果。全息图光电再现像可由二维承载介质如屏幕接收,也可由三维承载介质承载。

以一种波长为例研究基于空间光调制器的全息成像特性。空间光调制器用来加载位相型全息图,由空间光调制器的微结构及二维光栅的衍射特性可知,接收屏上有 4 个完全相同的光电再现像,其成像示意图如图 2 所示。坐标中心“O”为零级干涉极大,其余点为次级干涉极大,它们决定了每个光电再现像的成像区域。图中  $X, Y$  分别为光电再现像成像区域的宽度和高度。图 2 左上角为图像中的局部放大图,图中  $\Delta x, \Delta y$  为光电再现像的横向间隔和纵向间隔。

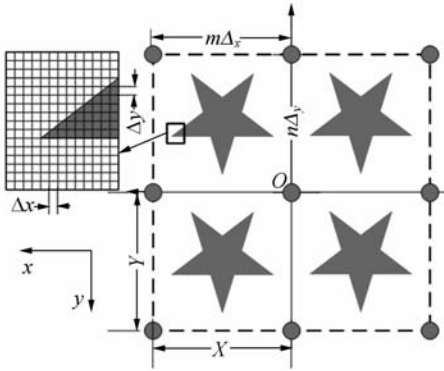


图 2 接收屏上成像示意图

Fig. 2 Reconstructed images on screen

由标量衍射理论及衍射成像理论易知,接收屏上的再现像的横向与纵向间隔为:

$$\Delta x = \frac{\lambda d}{m \cdot \Delta \xi}, \Delta y = \frac{\lambda d}{n \cdot \Delta \eta}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为再现光波长; $d$  为再现距离,即光由空间光调制器出射到接收屏所经过的几何距离; $m, n$  为空间光调制器的横向和纵向像素数; $\Delta \xi, \Delta \eta$  为空间光调制器的横向与纵向像素间隔。

光电再现像的大小等于接收屏上光电再现像的点阵数与接收屏处像素间隔的乘积,且再现像面上一个完整成像区域所包含的像素数为空间光调制器的像素数<sup>[19]</sup>。以一维方向再现长度为例,三色再现像  $x$  方向长度分别为:

$$\begin{cases} x_R = m_R \Delta x_R = m_R \frac{\lambda_R d_R}{m \cdot \Delta \xi} \\ x_G = m_G \Delta x_G = m_G \frac{\lambda_G d_G}{m \cdot \Delta \xi} \\ x_B = m_B \Delta x_B = m_B \frac{\lambda_B d_B}{m \cdot \Delta \xi} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $m_R, m_G, m_B$  分别为红色、绿色、蓝色再现像横向像素数; $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$  为红、绿、蓝再现光波长; $m$  为空间光调制器横向像素总数, $\Delta \xi$  为空间光调制器横向像素间隔。光电再现过程中一般情况下三色再现像方向长度不同,即产生了倍率色差。

### 3 位相型计算全息图光电再现像倍率色差消除方法

直接根据物信息的三色分量信息来计算全息图,三色分量信息的横向像素数相等。易知全息再现像与三色分量信息具有相同的像素数,即  $m_R = m_G = m_B$ 。由图 1 所示系统进行全息图再现,由系统可知  $d_R = d_G = d_B, \lambda_R = 632 \text{ nm}, \lambda_G = 532 \text{ nm}, \lambda_B = 473 \text{ nm}$ 。根据全息光学中对倍率色差定义<sup>[20]</sup>可知,以蓝色成像为参考对象,绿色与红色倍率色差分别为:

$$\begin{cases} \Delta \alpha_g = \frac{x_G - x_B}{x_B} \times 100\% = 12.5\% \\ \Delta \alpha_r = \frac{x_R - x_B}{x_B} \times 100\% = 33.6\% \end{cases}.$$

消除色差的方法即通过一系列方法使得  $x_R = x_G = x_B$ 。由式(2)可知,再现距离与全息再现像像素数为两个可调整的变量,基于此可将色差消除方法分为两种,基于调整光电再现距离的方法与对源信息进行差别采样的方法。

#### 3.1 基于调整光电再现距的方法

在全息再现像像素点相同的情况下,为消除色差,三色再现距离应满足:

$$\begin{cases} d_R = \frac{m \cdot x_R \cdot \Delta \xi}{m_R \lambda_R} \\ d_G = \frac{m \cdot x_G \cdot \Delta \xi}{m_G \lambda_G} \\ d_B = \frac{m \cdot x_B \cdot \Delta \xi}{m_B \lambda_B} \end{cases}, \quad (3)$$

易知  $d_R < d_G < d_B$ 。满足这个要求需在实验中应用3个独立的空间光调制器对三色全息图进行再现,并且要求比较精密的调整装置来调整各自的再现距离,这不仅增加了成本,而且光路调整复杂。因此本文提出对彩色物体三色分量占有的离散像素点数进行压缩或扩展的方法(本文称为差别采样法)来消除彩色全息光电再现像的倍率色差。

### 3.2 基于对源信息进行差别采样的方法

在图1所示的光电再现系统中,三色再现距离  $d_R = d_G = d_B$ ,可以通过调整再现像所占的像素素来消除倍率色差,且光电再现像的像素数量需满足条件:

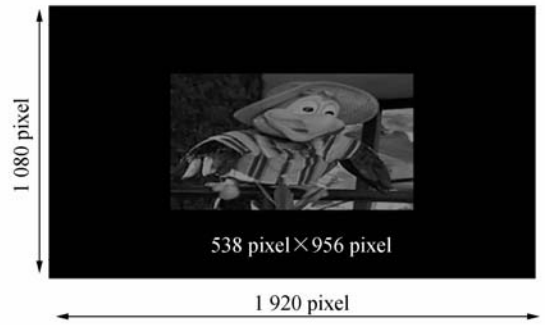
$$m_R : m_G : m_B = \frac{1}{\lambda_R} : \frac{1}{\lambda_G} : \frac{1}{\lambda_B}, \quad (4)$$

由  $\lambda_B < \lambda_G < \lambda_R$  得蓝色光电再现像所占的像素数最多,所以以蓝色像素为基准,红色和绿色光电再现像的像素量按式(4)进行压缩。当满足这一关系时,三色分量的计算全息图光电再现像无倍率色差。

### 3.3 实验验证

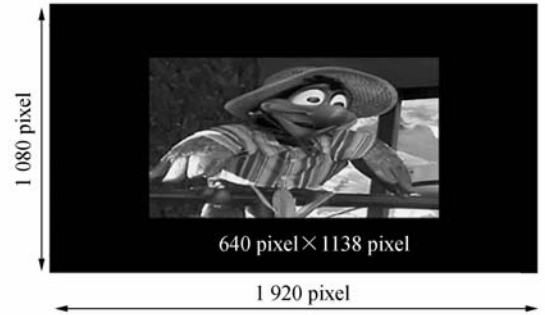
验证实验采用反射式空间光调制器 PLUTO-VIS,像素量为  $1\,080\text{ pixel} \times 1\,920\text{ pixel}$ ,像素间隔为  $8.0\ \mu\text{m}$ 。由于一幅全息图的像素总量与空间光调制器的像素总量相同,而由迭代傅里叶计算全息图特性可知,物信息的像素总量与全息图的像素总量相同<sup>[19]</sup>,因此作为物波信息的三色源图的像素总量均为  $1\,080\text{ pixel} \times 1\,920\text{ pixel}$ (即承载全息图的空间光调制器的像素总量),如图3(a)(b)(c)所示。设蓝色分量有效信息所占区域的像素量为  $720\text{ pixel} \times 1\,280\text{ pixel}$ ,如图3(c)中信息区域所示。由式(4)可知红色和绿色分量物信息所占像素量分别为:  $538\text{ pixel} \times 956\text{ pixel}$  和  $640\text{ pixel} \times 1\,138\text{ pixel}$ ,分别如图3(a)与3(b)中部信息所示。以图3中所示的信息作为物波信息来计算迭代傅里叶变换全息图,得到的全息图如图4所示,其大小均为  $1\,080\text{ pixel} \times 1\,920\text{ pixel}$ ,右上角为局部细节放大。

利用图1所示全息图光电再现系统对图4全息图进行光电再现。利用可控 CCD 对三色分量进行采集,在时间段  $t_1, t_2, t_3$  内分别采集到红色分量,绿色分量,蓝分量再现结果,由 CCD 合成



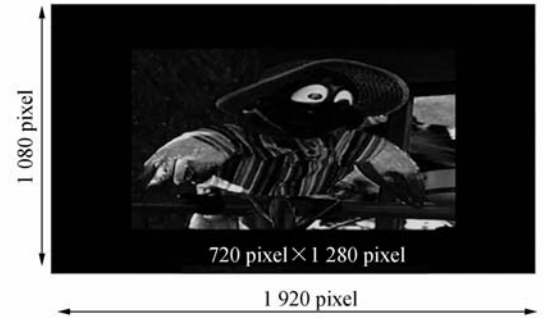
(a) 红色分量源图

(a) For red



(b) 绿色分量源图

(b) For green



(c) 蓝色分量源图

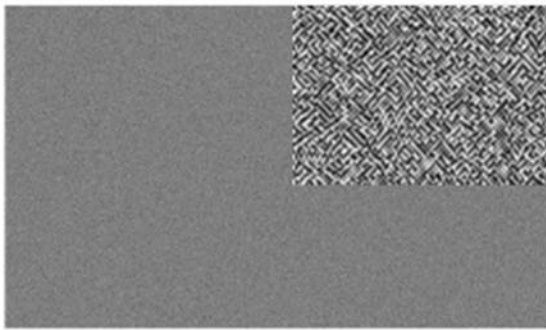
(c) For blue

图3 差别采样后各色分量的源图

Fig. 3 Original information

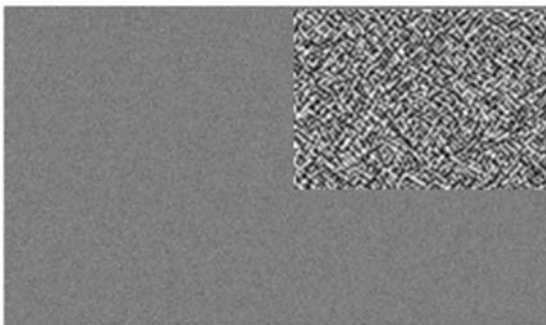
得到的光电再现结果如图5所示。

图5所示再现像中消除了由于再现波长不同带来的倍率色差。但图5所示再现结果与理想颜色(如图6所示)存在差别,即存在颜色失真、彩色再现像模糊、分辨率不高。颜色失真的原因包括,实验中采用的三色激光到达再现像面上的能量没有严格匹配,但该再现不影响本文的结论。彩色



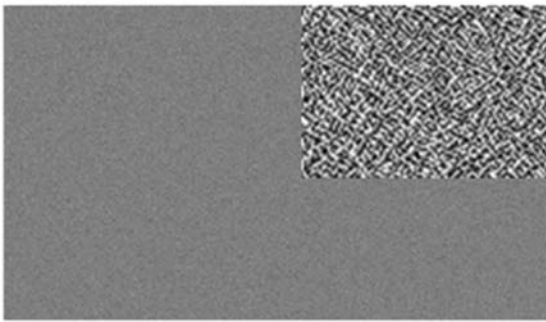
(a) 红色分量全息图

(a) For red



(b) 绿色分量全息图

(b) For green



(c) 蓝色分量全息图

(c) For blue

图 4 三色分量计算全息图

Fig. 4 Computer generated holograms of three colors

再现像模糊及分辨率不高造成全息像质量下降的原因主要包括:1)全息再现像属于激光成像,因此散斑的大小直接影响了再现像的质量<sup>[21]</sup>,提高成像质量需要进一步研究如何控制散斑大小;2)本文使用的电寻址空间光调制器为离散的像素化器件,其所承载的信息量相对于传统全息干板来讲是非常有限的;3)空间光调制器调制特性带来误

差,即理论位相调制特性与实际调制特性差别;4)半导体 RGB 激光器提供光源的质量较差,本文虽然利用小孔对激光进行了滤波,但准直后其光束质量仍没有达到理想波面。



图 5 消除倍率色差的光电再现像

Fig. 5 Reconstructed image without magnification chromatism



图 6 源信息

Fig. 6 Original information

## 4 结 论

在基于空间光调制器的彩色全息光电再现系统中,利用计算全息图进行光电再现时由三色激光波长不同造成的再现像出现的倍率色差严重影响了光电再现像的效果。通过改变彩色物体三色分量的像素点数,分别计算物体三色分量的计算全息图,在再现过程中,可以有效消除红色 33.6% 与绿色 12.5% 倍率色差。本文以迭代傅里叶计算全息图为例,对差别采样计算得到的全息图进行了光电再现,得到了较好的再现结果,验证了本文方法的可行性。本文方法对于全息光电显示的研究和应用有积极意义。

## 参考文献:

- [1] 王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:164-167.  
WANG SH F. *Theory and Application of Information Optics* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004:164-167. (in Chinese)
- [2] JOHN N L. Analysis of multiple hologram optical elements with low dispersion and low aberrations [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(8):1686-1696.
- [3] ZHAO J L, JIANG H ZH, DI J L. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lenless Fourier transform holography [J]. *Optic Express*, 2008, 16(4):2514-2519.
- [4] KUNIHICO S. Record and display of color 3-D images by electronic holography [C]. 2007OSA/DH. DWA2, 2007:1-3.
- [5] KUNIHICO S, ATSUSHI S, MASAKAZU M, *et al.*. Reconstruction of color images of high quality by a holographic display[J]. *SPIE*, 2006:6316:61360V-1-9.
- [6] 潘武, 田贻丽. 光学全息的数字实现[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增):15-20.  
PAN W, TIAN Y L. Digital implementation scheme of optical holograms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp.):15-20. (in Chinese)
- [7] 郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维物体空间再现技术中的全息图计算[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5):917-924.  
ZHENG H D, YU Y J, CHENG W M. Computer-generated hologram calculation for spatial reconstruction of three-dimensional object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):917-924. (in Chinese)
- [8] JOSE L M, ANTONIO M, LGNACIO M. Wavelength-compensated color fourier diffractive optical elements using a ferroelectric liquid crystal on silicon display and a color-filter wheel[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5):911-918.
- [9] YUSUKE S, MASAHIDE I, TOYOHICO Y. Full-color computer-generated holograms using 3-D fourier spectra[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25):6246-6251.
- [10] YUSUKE S, MASAHIDE I, TOYOHICO Y. Color computer-generated holograms from projection images [J]. *Optics Express*, 2004, 12(11):2487-2493.
- [11] PIETRO F, DE SERGIO N, GIUSEPPE C, *et al.*. Controlling image size as a function of distance and wavelength in fresnel-transform reconstruction of digital holograms[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(8):854-856.
- [12] LESEM L B, HIRSCH P M, JORDAN J A, *et al.*. The Kinoform; a new wavefront reconstruction device [J]. *IBM J. Res. Dev.*, 1969:150-155.
- [13] 郑华东. 数字全息三维立体显示关键技术研究 [D]. 上海:上海大学, 2009:30-39.  
ZHENG H D. *Study on the key techniques of three-dimensional display based on optoelectronic holography* [D]. ShangHai: ShangHai University, 2009:30-39. (in Chinese)
- [14] BARNES T H, EIJU T, MATUSDA K, *et al.*. Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television[J]. *Applied Optics*, 1983, 28(22):4845-4852.
- [15] JUN A, TOMIO S. Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(32):4622-4628.
- [16] 胡立发. 用平行向列液晶空间光调制器制作全息图的研究[J]. 液晶与显示, 2005, 20(2):93-98.  
HU L F. Kinoform using parallel-aligned nematic liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(2):93-98. (in Chinese)
- [17] ATSUSHI S, NAOKI T, MASASHI N, *et al.*. Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18):16038-16045.
- [18] MICHAL M, IZABELA D, MACIEJ S, *et al.*

- Color image projection based on Fourier holograms [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8):1227-1229.
- [19] GEORGIU A, CHRISTMAS J, MOORE J, *et al.*. Liquid crystal over silicon device characteristics for holographic projection of high-definition television images[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(26):4793-4803.
- [20] 周宪海, 程云芳. 全息光学——设计、制造和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 64-67.  
ZHOU X H, CHENG Y F. *Holographic Optics—Design, Manufacture and Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 64-67. (in Chinese)
- [21] 任淑艳, 张琢, 刘国栋, 等. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):331-336.  
REN SH Y, ZHANG ZH, LIU G D, *et al.*. Restraining speckle of laser imaging system in accurate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):331-336. (in Chinese)

#### 作者简介:



**王涛**(1983-), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 2009 年于上海大学获硕士学位, 主要从事全息显示方面的研究。E-mail: wantall@shu.edu.cn



**于赢洁**(1969-), 女, 辽宁宽甸人, 研究员, 博士生导师, 1996 年、1998 年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事光学精密测量技术与仪器等方面的研究。E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn



**郑华东**(1978-), 男, 江西上饶人, 博士后, 2009 年在上海大学获得博士学位, 主要研究方向为全息显示、光学信息处理。E-mail: bluenote2008@shu.edu.cn