

计算全息再现像的误差源分析

易开红, 田逢春, 冯文江

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘要: 由于其高度的灵活性以及光学系统的高速性和实时性, 计算全息在模式识别、光学计算等信息光学领域得到广泛应用, 但精度的提高成为很多应用实用化的关键。根据罗曼 III 型编码理论, 设计制作了计算全息图并在实验中成功实现光学再现。系统论述了此编码法设计计算全息图产生误差的原因, 特别对散斑噪声、编码噪声和光学系统误差作了详细分析, 并指明了如何降低计算全息编码误差及提高再现像质量的途径, 使其更好、更广泛地在信息光学领域得以应用。

关键词: 信息光学; 罗曼编码; 光学再现; 散斑; 误差

中图分类号: O438.1; TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)10-0020-03

Analysis on Error Source of Reconstructed Image by CGH

YI Kai-hong, TIAN Feng-chun, FENG Wen-jiang

(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The computer-generated hologram (CGH) is applied extensively in information optics, such as pattern recognition, optics computing and so on, owing to its flexibility, high speed, real time. But it is a key to improve precision in many applications. An optically reconstructed image was successfully obtained by CGH which was designed and manufactured based on Lohmann III coding theory. Reasons for error in the reconstructed image are systematically analyzed. Particularly speckle noise, coding noise and optics system noise are analyzed in detail. In order to spread its application in information optics fields, methods on how to reduce CGH coding errors and improve CGH quality are also given.

Key words: information optics; Lohmann coding; optical reconstruction; speckle; errors

0 引言

1948 年英国科学家盖伯 (Gabor) 在提高电子显微镜的分辨能力时发明了光学全息。1965 年罗曼 (A. W. Lohmann) 教授引入了通信理论中的抽样定理, 采用迂回相位编码技术, 在数字计算机中综合出了世界上第一张计算全息图^[1] (CGH, Computer-Generated Hologram)。随着数字信号处理技术和计算机技术的广泛应用, 计算全息技术在光学数据处理、存储与加密、干涉量度和三维物体显示等领域得到了空前发展, 它不仅能象光学全息一样, 全面记录物光波的振幅与相位信息, 而且具有高灵活性、可重复性等特点。因此, 引起了许多光学信息处理工作者的极大兴趣, 尤其在制作各种空间滤波器方面取得了很多研究成果^[2]。历经数年的研究发展, 计算全息的编码方式产生了罗

曼编码、博奇编码、黄氏编码、李威汉编码和迭代算法等多种技术^[3,4], 但精度一直没有得到质的提高, 较大的再现误差在一定程度上制约了计算全息技术的广泛应用。笔者根据罗曼 III 型编码理论, 设计制作了计算全息图, 并在实验中成功实现了光学再现; 系统地论述了计算全息图产生误差的主要原因, 特别对散斑噪声、编码噪声和光学系统误差作了详细分析, 并指明了如何提高计算全息质量的途径。

1 计算全息的制作原理及再现

1.1 制作原理

计算全息的制作过程如图 1 所示。在计算全息的设计制作过程中, 核心步骤是编码, 即如何把振幅和相位用非负的实数值表示。罗曼编码有 I、II、III 型, 其中 III 型编码精度最高。利用这种编码方法的计算全息图的透过率只有 0 (不透光)、1 (全透光) 两个值, 制

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60472037)

作者简介: 易开红 (1976-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为全息技术; 田逢春, 教授, 博导, 研究方向为信息与通信工程; 冯文江, 博士, 教授, 研究方向为通信与测控技术。

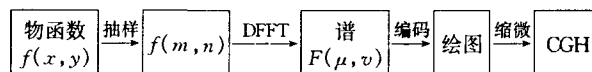


图 1 计算全息制作

作简单,抗干扰能力强,对记录介质的非线性效应不敏感,因而应用广泛。

物波函数抽样后经离散快速傅里叶变换(DFFT)后的谱记为:

$$F_{mn} = C_{mn} + jD_{mn} \quad (1)$$

其中, C_{mn} , D_{mn} 分别为离散谱的实部和虚部。故离散谱的幅值和相位分别为:

$$A_{mn} = \sqrt{C_{mn}^2 + D_{mn}^2} \in [0, +\infty) \quad (2)$$

$$\Phi_{mn} = \arctan(D_{mn}/C_{mn}) \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \quad (3)$$

幅值和相位归一化后得:

$$l_{mn} = A_{mn}/A_{\max} \quad (4)$$

$$p_{mn} = \Phi_{mn}/2\pi$$

罗曼 III 型编码的抽样单元如图 2 所示,每个单元中设计了一个通光矩形孔径(孔径以外不透光),孔径宽度 W 取为定值 $1/2$,单元尺寸 $\delta\mu$ 、 $\delta\nu$ 由抽样定理确定,文中选择 $\delta\mu = 1/\Delta X$, $\delta\nu = 1/\Delta Y$, ΔX 、 ΔY 表示物函数 $f(x, y)$ 的 x 、 y 取值范围。高度 l_{mn} 随着不同的样点幅值变化, p_{mn} 表示矩形孔中心偏离单元中心的距离,反映了相位的变化情况,其原理是基于光栅迂回相位效应,这样离散谱函数就可以用一系列矩形孔径表示。

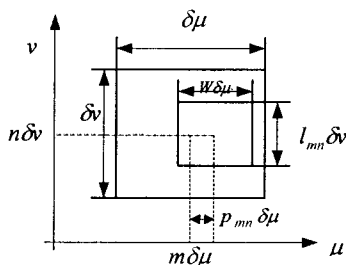


图 2 罗曼 III 型编码抽样单元

计算机生成全息图后,用高精度的激光打印机出图,然后经过感光、显影和定影等步骤得到全息产品。

1.2 全息产品光学再现试验

计算全息再现可用计算机模拟再现和光学再现,光学再现光路系统如图 3 所示。本试验中,编码原图是汉字“庆”的二值图。利用 Matlab 软件进行罗曼 III 型 64×64 抽样编码,计算机生成的全息图如图 4

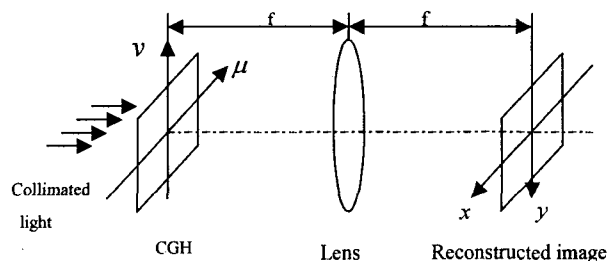


图 3 计算全息再现光路

所示。然后制作成全息干板,由图 3 所示光路再现,在透镜(规格:直径 100mm,焦距 400mm)后焦面上用数码相机 CANON 350D 采集,得到的结果如图 5 所示。因光源为红色的 Hi-Ne 激光,波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$,相机采集时选择彩色模式,故再现像为彩色,此处已经转换为灰度图像。

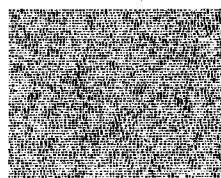


图 4 罗曼 III 型编码

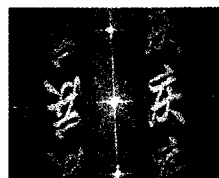


图 5 再现图像

2 误差来源分析

为了分析再现像的误差,把实验得到的彩色再现像变为灰度图像,且对第一级再现像进行匹配处理,匹配后的误差分布直方图分别如图 6 所示。误差分布直方图是根据预先转换为灰度图格式的原图像与匹配后的一级再现像相减,然后统计灰度分布得到的,其中横坐标为灰度级(本试验采用 16 位,共 65536 灰度级),纵坐标为像素个数。灰度级高端,像素个数越多,表明误差越大。

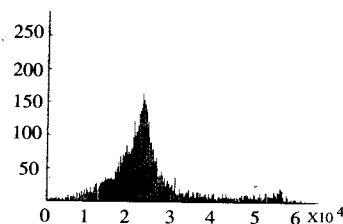


图 6 误差分布直方图

经系统分析,再现像误差来源主要有以下几方面。

2.1 再现像散斑误差

散斑噪声是随机分布的,形成原因主要归结为以下两类:

* 激光的高度相干性。激光照射在粗糙表面时,表面上每一点都可看作子波源,产生散射光(即子波),这些子波彼此相干,在空间某一点相遇时,由于各子波的振幅和相位不同,将会产生相长干涉和相消干涉,在空间产生无规则分布的亮暗斑纹。全息干板在显影、定影时带来的微小颗粒杂质和保存时附着在干板上的灰尘都会产生此种散斑噪声。

* 罗曼编码过程中,傅里叶谱动态范围很大,为了平滑该值需要乘以随机相位因子,此处必然使再现像产生散斑。

针对散斑误差,可以采取以下措施抑制:(a)用时间、空间部分相干光作为光源,即白光信息处理技术,

国内外有不少学者对此正在进行研究;(b) 提高显影、定影液的纯度,制作、保存全息干板注意清洁;(c) 基于数字图像降噪原理,采用多幅图像平均法^[5]。

2.2 计算全息编码误差

编码是计算全息产品制作的核心步骤,严格意义上讲,现阶段所有的编码技术都会带来误差。就罗曼 III 型编码而言,首先导出全息图与再现像的关系。

全息图的透过率函数可表示为:

$$H(\mu, \nu) = \sum_m \sum_n \text{rect} \left[\frac{\mu - (m + p_{mn}) \delta \mu}{W \delta \mu} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{\nu - n \delta \nu}{l_{mn} \delta \nu} \right] \quad (5)$$

其中: $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

根据夫琅和费衍射理论,CGH 经准直平行光垂直照射时,透镜后焦面上将出现前焦面函数 $H(\mu, \nu)$ 的傅里叶逆变换 $h(x, y)$ (按照图 3 所示建立坐标,全息面与再现像面的坐标方向对应相反,因此透镜在此光路系统中作傅里叶逆变换),即再现像表达式为:

$$h(x, y) = \iint H(\mu, \nu) \exp[j2\pi(x\mu + y\nu)] d\mu d\nu = \sum_m \sum_n l_{mn} W \delta \mu \delta \nu \text{sinc}[l_{mn} y \delta \nu] \text{sinc}[W x \delta \mu] \cdot \exp[j2\pi n y \delta \nu] \exp[j2\pi x (m + p_{mn}) \delta \mu] \quad (6)$$

为了比较 $h(x, y)$ 和物函数 $f(x, y)$ 的关系,将物函数写成离散形式。因为物函数是空间域有限函数,由频域抽样定理,物函数的傅里叶变换 $F(\mu, \nu)$ 的内插公式为:

$$F(\mu, \nu) = \sum_m \sum_n F(m/\Delta X, n/\Delta Y) \text{sinc}[\mu \Delta X - m] \text{sinc}[\nu \Delta Y - n]$$

对此作傅里叶逆变换,则得到物函数的表达式:

$$f(x, y) = \delta \mu \delta \nu \text{rect}(x/\Delta X) \text{rect}(y/\Delta Y) \cdot \sum_m \sum_n F(m \delta \mu, n \delta \nu) \exp[j2\pi(m x \delta \mu + n y \delta \nu)] \quad (7)$$

比较式(6)和(7),可见按罗曼 III 型编码方式设计计算全息的再现像不是原物函数的精确重现,采用了以下近似处理,使两者相等。

$$(1) \text{sinc}[W x \delta \mu] \approx 1, |x| \leq \Delta X/2$$

自变量 $W x \delta \mu$ 的取值范围为 $[-1/4, 1/4]$, 则 $\text{sinc}[W x \delta \mu]$ 的变化范围为 $[0.9, 1]$, 此近似会使衍射像强度偏离实际像光强 $|f(x, y)|^2$, 偏移量为 $\text{sinc}^2[W x \delta \mu]$, 在像的边缘处影响最为严重,编码的孔径越大时,幅度偏离也越多。为消除该误差,制作全息图时,将存储在计算机中的原物函数乘以对应尺寸的 sinc 函数的倒数,就可以相当大程度减弱误差;或者提高抽样单元数,减小 $\delta \mu$, 则 $\text{sinc}[W x \delta \mu]$ 越接近常数 1, 再现像误差越小。

$$(2) \text{sinc}[l_{mn} y \delta \nu] \approx 1, |y| \leq \Delta Y/2$$

此近似对再现像的影响以及解决措施与情况(1)类似。

$$(3) \exp[j2\pi x p_{mn} \delta \mu] \approx 1, |x| \leq \Delta X/2$$

此近似表明,每个全息图抽样单元的相位分别相同。但实际的全息图是矩孔中心偏离其抽样单元中心 $p_{mn} \delta \mu$, 其相位与单元中心是不同的。如果相位变换很缓慢,这种近似大致成立,否则,此相位误差对波前再现影响很大,会导致再现像的畸变。

罗曼迂回相位编码中,假设了通光矩孔中心处的相位与抽样单元中心处的相位相等,位置函数为:

$$\mu_1 = m \delta \mu + \frac{\delta \mu}{2\pi} \text{mod}_{2\pi}[\Phi(m \delta \mu, n \delta \nu)] \quad (8)$$

其中, $\text{mod}_{2\pi}$ 表示对模数 2π 取余数运算。但通光矩孔中心实际位置函数应为:

$$\mu_2 = m \delta \mu + \frac{\delta \mu}{2\pi} \text{mod}_{2\pi}[\Phi(\mu, \nu)] \quad (9)$$

若采用式(9)的位置函数确定编码单元中的通光矩孔的位置,可以很大程度上减少相位误差,但是非常复杂,除非已知全息图面上连续的相位函数。此外,可以通过增加抽样单元数的途径来减少误差,后来有学者研究出迭代算法^[4],以增大计算时间开销为代价,在一定程度上消除了此种误差。

2.3 光学系统误差

图 3 所示的全息再现光学系统不可避免地会引入误差,主要包括以下两类:

* 系统的平行光是通过激光器经准直透镜处理后得到的,因激光光束成高斯分布,不可能得到绝对平行均匀的光束;

* 透镜的傅里叶变换特性是建立在标量衍射理论基础上的,必须要求物波满足近轴条件,否则,误差会很大。若要得到高精度的光学系统,应基于矢量衍射理论(如麦克斯韦方程组)对光学系统设计分析;而且,透镜尺寸有限,实质是一低通滤波器,会丢掉高频信息。

3 结 论

计算全息是随着电子计算机和光学信息处理的发展而兴起的技术,具有高度的灵活性,可记录现实中不存在物体的波前,再现时可以计算机模拟,快速、高效地验证编码的正确性,也可光学再现。光学再现像的误差主要来源于高度相干的激光光源,因其干涉产生散斑;罗曼编码时一系列近似处理带来的误差;非理想的均匀光源,傅里叶透镜一定程度上也限制了系统的精度。为了提高全息精度,可以从编码过程中尽量提

(下转第 26 页)

模块下的一个构件类,名为 CImage 类。创建这样一个对象后,就可以调用 IImage 接口中的方法,实现如图片的加载、转换等操作。

对于 Widget 中用户与界面的交互,在 XML - Glue 中是通过事件驱动机制完成的,即回调机制。回调函数在脚本中的使用,集中在事件处理函数的编写和函数的注册上。脚本中编写事件处理函数,与其他的函数编写没有太多的区别,只是函数的参数列表要与对应的回调函数严格对应,即参数名要相同、参数类型要对应。函数的注册过程也非常简单,如在示例程序中,注册 Exit 按钮上鼠标按下事件处理函数的语句如下:

```
Button.MouseDown = OnButtonClick;
```

其中 Button 是标识 Exit 按钮的对象名,MouseDown 是被注册的回调函数,OnButtonClick 是事件处理函数,其函数主体如下:

```
function OnButtonClick()
{
    MainForm.Close();
}
```

该事件处理函数也是在脚本中完成的。

对于 Widget 中多视图的实现,可以用 XML - Glue 中内置全局对象 application 的 forward(URI, ForwardMethod, ...) 方法和 view 中 ShowDialog(URI, ...) 方法实现,其中参数 URI 为要跳转的页面,ForwardMethod 标注以何种方式跳转,省略号的意思是后面可以接任意多个参数,它们的作用相当于将当前视图的一些数据传递给跳转页面,供跳转页面使用。

最后,对于 Widget 中与网络数据的交互,XML - Glue 也提供了相应的 XMLHTTP 构件完成网络操作,具体操作规范和 XMLHttpRequest 差不多,客户端通过 CXMLHttpRequest 对象向 HTTP 服务器发送请求并使用 XML 文档对象模型或者是 SAX 处理回应,

在本地解析服务器返回的 XML 文件,提取有用信息供视图显示。

3 总 结

总之,XML - Glue 技术是一种 MVC 架构支持技术,在 XML - Glue 下编写 Widget 只需要用 XML 布局视图部分,用大家熟悉的脚本语言进行逻辑处理,对于网络数据的处理,用 XMLHTTP 实现,该技术目前已经在多部手机上应用,主要用于广告下载等网络数据的下载。XML - Glue 本身非常容易上手,Widget 开发中会遇到的问题也都提供了相应的处理方法,只要你按照文中所述的方法去实践,相信很快就可以开发出了绚丽的 Widget。

参考文献:

- [1] 科泰世纪.《和欣 1.1》资料大全[EB/OL]. 2003. <http://www.51widgets.com/web/guest/downloads>.
- [2] MVC [EB/OL]. 1998. <http://ootips.org/mvc-pattern.html>.
- [3] Martin D. XML 高级编程[M]. 李 喆,严春莹,马 琳译. 北京:机械工业出版社,2001.
- [4] Flanagan D. JavaScript 权威指南[M]. 张铭泽等译. 北京:机械工业出版社,2003.
- [5] Xul Planet. Tutorial with examples[EB/OL]. 2006. <http://www.xulplanet.com/>.
- [6] Pansani A D. XUL and the building processe of a UI[EB/OL]. 2003. <http://luxor-xul.sourceforge.net/download/qatar.pdf>.
- [7] Microsoft Corporation. XAML Overview[EB/OL]. 2006. <http://msdn2.microsoft.com/en-us/library/ms752059.aspx#used-for-ui>.
- [8] 科泰世纪. Koretide. Website[EB/OL]. 2006. <http://www.51widgets.com/web/guest/home>.

(上接第 22 页)

高设计质量,或者增加抽样单元数、减小单元孔径,或者幅值补偿,或者寻求新的编码方法,或者改变全息产品传统的制作步骤,不经过出图打印、缩拍,采用电子束直写全息图技术^[6],与此同时,提高光学元件的制造精度也极其重要。可以肯定的是,随着光技术和加工工艺的进一步发展,计算全息的误差会得到有效降低,在信息光学中应用前景将更加广阔。

参考文献:

- [1] Lohmann A W, Paris D P. Binary Fraunhofer holograms gen-

erated by computer[J]. Appl Opt, 1967, 6(10): 1739 - 1748.

- [2] 王永仲,薛 蕊,张 勇. 计算全息匹配滤波器的研究及性能分析[J]. 激光与红外, 2005, 35(4): 275 - 278.
- [3] 虞祖良,金国藩. 计算机全息图[M]. 北京:清华大学出版社,1984.
- [4] Jennison B K. Iterative approaches to computer-generated holography[J]. Opt Eng, 1989, 28(6): 629 - 637.
- [5] 陈祯培,陈怀新,戴建明. 减少计算全息再现散斑的多图像平均方法[J]. 光电子·激光, 1997, 8(5): 383 - 386.
- [6] 高峰,朱建华,黄奇忠. 电子束直写计算全息图[J]. 中国激光, 2001, A28(6): 556 - 558.