

文章编号: 0253-2239(2004)03-304-5

基于离散衍射光的全息光栅的带宽压缩*

柴晓冬 韦 穗

(安徽大学计算智能与信息处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘要: 提出一种基于离散衍射光的全息光栅的带宽压缩算法。人眼的视觉分辨率是有限的,即空间频率变化在 Δf_{pupil} 以内时(两根光线的夹角小于 0.3°),不会察觉光线的跳变。首先对衍射光的频谱进行采样,使全息光栅衍射的是空间频率不连续的离散光,即在光栅的编码中只包含离散光频谱,且满足人眼视觉要求。这样,光栅的条纹函数为周期性函数,因此,在条纹编码中我们只需记录一个周期的函数值(样本数),光栅的条纹函数的样本数可得到有效的压缩。然后在解码中通过简单的复制可恢复光栅条纹函数的全部样本值。采用这种方法,大大压缩了数据量,提高了传输速率,达到了动态显示的要求。

关键词: 信息光学; 光学信号处理; 动态全息显示; 离散衍射光; 离散光频谱; 带宽压缩; 条纹函数
中图分类号: O438 文献标识码: A

Bandwidth Compression of Holographic Grating Based on Discrete Diffraction Light

Chai Xiaodong Wei Sui

(The Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039)

(Received 14 April 2003; revised 4 September 2003)

Abstract: Based on discrete diffraction light, an algorithm of holographic grating bandwidth compression is proposed. As is known to all, the visual resolution of human eyes is quite limited. That is, human eyes cannot perceive the jump of light beams within the 8 mm^{-1} variation of space frequency (angle between two light beams is less than 0.30°). At first the frequency spectrum of diffraction light is sampled so as to make holographic grating diffraction discrete in space frequency, namely, in the grating code is included discrete frequency spectrum, which satisfies requirements of human vision. In this case, the fringe function of the grating becomes a periodic one, and what is needed, therefore, is to record a periodic functional value (sampling value). As a result, the sampling value of such fringe function can be effectively compressed. Subsequently, all sampling values of the fringe function can be restored in decoding right by means of copying. This method that can not only compress data but also upgrade transmission rate achieves the desired dynamic display.

Key words: information optics; optical signal processing; dynamic holographic display; discrete diffraction light; spectrum of discrete diffraction light; bandwidth compression; fringe function

1 引 言

动态全息三维显示是交互式真三维显示,具有

重要的应用价值,是人们对全息技术提出的新要求^[1,2]。然而实现动态全息三维显示的数据量是巨大的。通常巴掌大($100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$)的全视差(垂直和水平方向都发生光衍射)全息图的采样数(即“带宽”)超过 100 吉伽样本,而衍射角为 30° 时也需 25 吉伽样本。在基于空间光调制器(SLM)的动

* 国家自然科学基金(60143003)资助课题。

E-mail: cxdyj@163.com

收稿日期:2003-04-14;收到修改稿日期:2003-09-04

态三维显示中,如果以 8 位分辨率,60 帧/秒的传输速率计算,则数据量将达到 12 太拉位/秒,这样的速度目前是无法实现的^[3~5]。因此,全息光栅的带宽压缩是实现动态三维显示的关键问题^[6]。由麻省理工学院(MIT)提出的全息带宽压缩方法,是基于连续频谱的压缩方法,解码采用卷积方法恢复全部样本值,计算较复杂^[7]。文献[8~11]采用小波方法或其他图形图像处理方法对全息图像进行带宽压缩,是面向数字全息重构的一种算法,实质是一种二维图形图像处理方法,并未涉及真三维显示和光的衍射问题。本文提出一种基于人眼视觉的带宽压缩方法,即全息光栅衍射的是空间频率不连续的离散光,或者在光栅的编码中只包含离散光频谱,且满足人眼视觉要求。这样,光栅的条纹函数的样本数可得到有效的压缩,而在解码中可恢复光栅的条纹函数的全部样本值。采用这种方法,大大减少了数据量,提高了传输速率,达到了动态显示的要求。

2 全息光栅基本条纹函数及其频谱分布

在基于水平视差(HPO)的三维全息显示中,全息图是由一系列全息行在垂直方向排列构成。全息行由一系列全息元素构成,将宽度为 $w(w=0.25\text{ mm})$ 的全息元素的空间带宽 f 进行 n 等分, $\Delta f=0.5p/n$, p 为空间采样率,每个基本条纹的空间频率带宽为 Δf ,则每个全息元素可将光线朝 n 区域衍射。一个

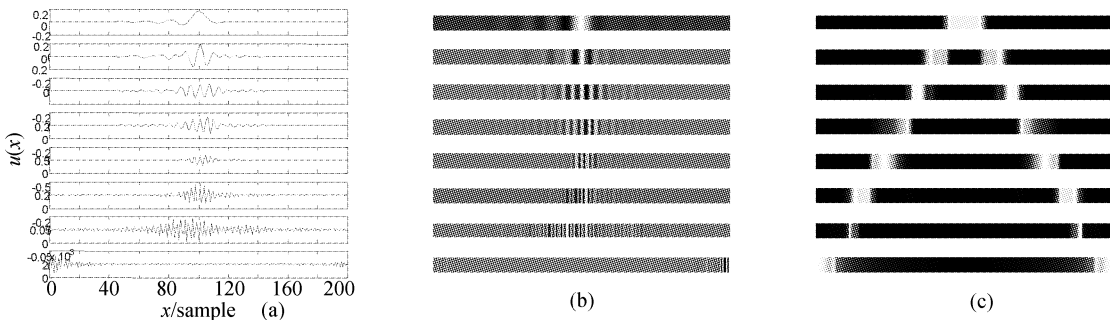


Fig. 2 (a) Function of the eight basis fringes, (b) the eight basis fringes patterns, (c) diffraction of distribution of the eight basis fringes

由(2)式可算出光栅的空间频率在一定范围内变化时,产生的两根衍射光不会使人的视觉产生光线的跳变。设人眼的瞳孔直径为 3 mm,如果观察距离为 600 mm, $\lambda=0.633\ \mu\text{m}$,求得

$$\Delta f_{\text{pupil}} = (3\text{ mm}/600\text{ mm})/633\text{ nm} \approx 8\text{ mm}^{-1},$$

即空间频率变化在 Δf_{pupil} 以内时(两根光线的夹角小于 0.3°),不会察觉光线的跳变。因而,基本条纹的空间连续频谱可由间隔小于 Δf_{pupil} 离散频谱构

三维全息图像可看成是空间的多个三维光点形成,如图 1 所示。

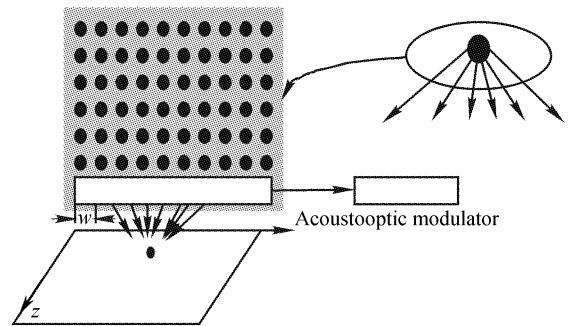


Fig. 1 Imaging three-dimensional point by diffraction of basis fringes

全息元素中包含空间频率不同的基本条纹,可将光朝多个水平方向衍射。在文献[12,13]中,我们采用傅里叶变换的迭代法和基于小波变换算法计算了基本条纹的条纹函数及其衍射光分布,如图 2 所示。从图中看出,每个基本条纹的衍射光是连续分布的,且每个基本条纹函数在 $w(w=0.25\text{ mm})$ 宽度内采样了 200 个样本值。研究中,我们发现,由于人眼的视觉分辨率是有限的,根据衍射方程

$$\sin \theta_0 - \sin \theta_i = f\lambda, \quad (1)$$

式中, θ_i 是入射光跟全息平面法线的夹角,而 θ_0 是衍射光线跟全息平面法线的夹角,称为衍射角, λ 是单色光的波长, f 是光栅空间频率。对衍射方程求导

$$\partial f/\partial \theta_0 = \cos \theta_0/\lambda, \quad (2)$$

成,由此实现的基本条纹的衍射光将是满足视觉要求的离散衍射光。

3 基本条纹的带宽压缩

图 2 为未压缩的基本条纹函数和其频谱分布。

设宽度为 $w(w=0.25\text{ mm})$ 的全息元素样本宽度为 N_h ,现在 w/R_c 宽度中取样本数为 N_h/R_c (R_c

为压缩比),其函数定义为 $u_1(x)$,且连续频谱为 $F(f)$,并满足

$$F(f) = F[u_1(x)], \quad (3)$$

现将 $u_1(x)$ 的连续频谱转为离散频谱,需在频率中对频谱抽样,同时应满足采样定理^[14]。若 $F(f)$ 在频率中被间隔为 p 的冲激序列 $\delta_f(f)$ 所抽样,则

$$F_f(f) = F(f) \cdot \delta_f(f), \quad (4)$$

其中 $\delta_f(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - np)$,
有

$$F^{-1}[\delta_f(f)] = F^{-1}\left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - np)\right] = \frac{1}{p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nT),$$

根据卷积定理,有

$$F^{-1}[F_f(f)] = F^{-1}[F(f)] * F^{-1}[\delta_f(f)],$$

令

$$F^{-1}[F_f(f)] = u(x),$$

即

$$u(x) = \frac{1}{p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_1(x - nT). \quad (5)$$

由(5)式可知,对压缩后的基本条纹的频域抽样,其傅里叶逆变换得到的基本条纹函数是压缩函数呈周期变化的函数,因此,在条纹编码中我们只需记录一

个周期的函数值(样本数)。根据频域采样定理,频域采样间隔 p 与空域中的一个周期的基本条纹 $u_1(x)$ 的宽度(样本数) N 之间满足

$$N = \frac{N_h}{R_c}, \quad R_c = w \cdot p,$$

这样,可计算条纹宽度为 N_h/R_c 的样本数的基本条纹函数,然后在解码时进行复制,以获得 N_h 宽度的样本值。

4 计算结果

为了使空间域和空间频率域具有良好特性^[5],我们选择了高斯函数作为压缩后的基本条纹函数。设高斯函数为

$$u_1(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\tau}\right)^2\right], \quad (-\infty < x < \infty), \quad (6)$$

当 x 为样本点时, $\tau = 8$, (6) 式的傅里叶变换为

$$F[u_1(x)] = \sqrt{\pi\tau} \cdot \exp\left[-\left(\frac{2\pi f\tau}{2}\right)^2\right]. \quad (7)$$

图 3 为 8 个压缩的基本条纹函数、连续频谱分布函数及其频谱强度分布。空间采样率为 $p_1 = 512 \text{ mm}^{-1}$, 频谱宽度为 8 个等带宽的频带 $\Delta f = 0.5 p_1/8 = 32 \text{ mm}^{-1}$ 。

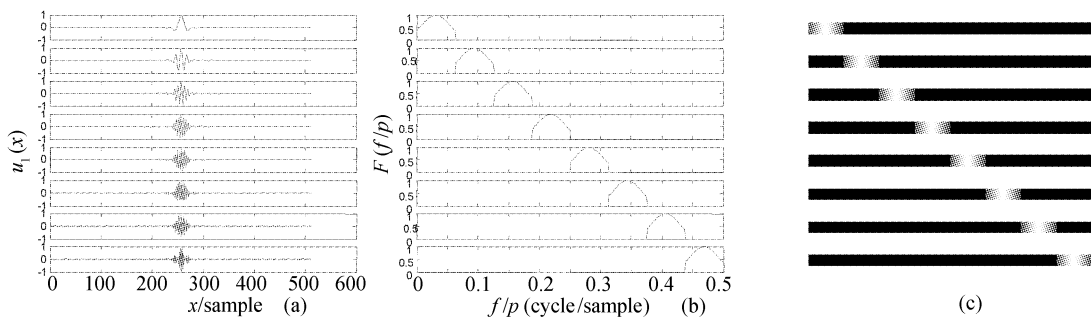


Fig. 3 (a) Compression function of the eight basis fringes, (b) function $F(f)$ of spectral distribution of the eight basis fringes, (c) continuous distribution $|F(f)|^2$ of diffractive light

为便于计算和说明,现取 $w = 1.0 \text{ mm}$ 宽度,对图 3 (b) 中的频谱进行频率采样,采样率 $p = 8 \text{ mm}^{-1}$, 频谱转变为离散谱,将其傅里叶逆变换,获得了 $u_1(x)$ 的周期变化的条纹函数 $u(x)$, 如图 4 所示。因此,在条纹编码时,只须记录单个周期的条纹函数 $u_1(x)$, 即在宽度为 $w = 1.0 \text{ mm}$ 中的 512 个基本条纹样本值中,只须记录 64 个样本值,压缩比为 8。

解码时,可复制 $u_1(x)$ 构成 $u(x)$, 如图 4(a) 所示,其物理条纹模式如图 5 所示。

对于空间图像某光点 $d(x, y, z)$, 由几何光学确定为包含图 6(b) 所示的全息矢量,每个全息矢量的频率值和大小分别代表对应的基本条纹及其放大量。则该光点的频谱为基本条纹频谱与全息矢量的卷积

$$F_d(f) = \sum_{i=0}^7 c_i \otimes F_f(f), \quad i = 0, 1, \dots, 7 \quad (8)$$

式中 c_i 为形成该光点的某些全息元素中的基本条纹的全息矢量, $F_d(f)$ 为光点 $d(x, y, z)$ 包含的频谱,如图 6(c) 所示。在实际成像中,这个空间光点

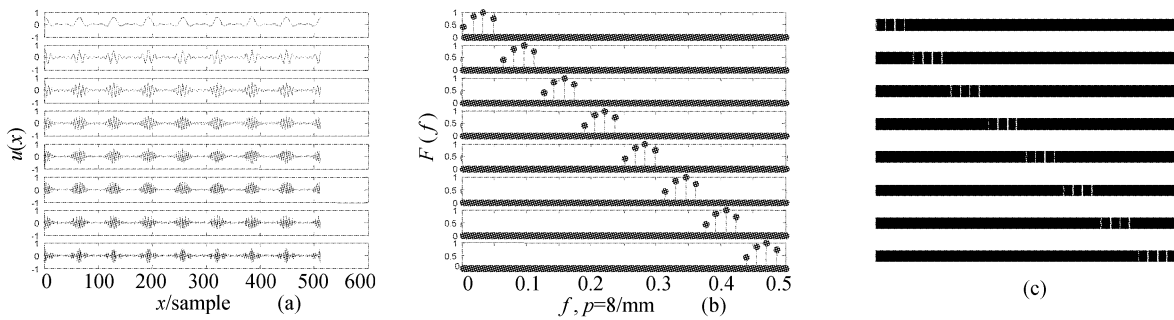


Fig. 4 (a) Function $u(x)$ composed of periodic function $u_1(x)$, (b) discrete spectrum $F_f(f)$ of sampling in spectrum, (c) intensity distribution $|F_f(f)|^2$ of diffractive light

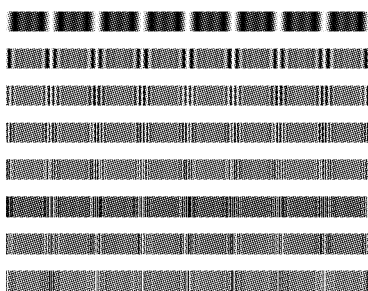


Fig. 5 The basis fringes patterns $u(x)$ in physics
可由 8 个相邻的全息元素的衍射光贡献形成。若 8 个全息矢量分别来自 8 个相邻的全息元素, 即须 8

个空间频率不同的基本条纹的衍射光会聚形成该光点。

对由光点组合形成的三维图像来说, 全息平面中的每一全息元素需向多个方向衍射光线, 则每一全息元素最终包含的全息条纹为

$$u_d(x) = \sum_{i=0}^7 c_i u(x), \quad (9)$$

在解码中全息元素条纹的实现可用公式(9)计算, 然后复制。图 7 为按(9)式解码后的某全息元素的条纹函数和条纹模式, 它反映的是该全息元素对图像形成所包含的多个基本条纹函数的总和。

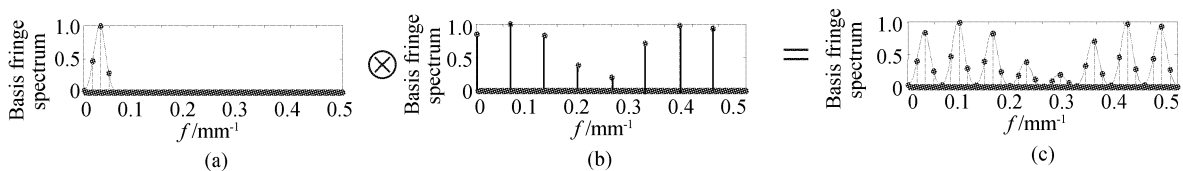


Fig. 6 (a) The basis fringes spectrum, (b) holographic vectors of imaging point, (c) discrete spectrum of imaging point

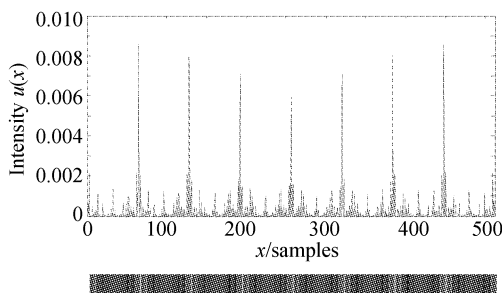


Fig. 7 Fringe function and fringe pattern of holography

结论 采用基于空间频率域采样的条纹生成法, 空间频率变化在人类视觉范围内, 其条纹函数是呈周期变化的函数, 衍射光为离散光。因此, 条纹编码阶段有效压缩了带宽, 而在解码阶段只是简单的复制周期函数。该函数可经射频处理将其转换为适合声

光调制器的输入射频信号, 实现了基于空间光调制器(SLM)的电全息动态显示。

参 考 文 献

- 1 Colin D. Cameron, Pain Douglas A. Computational challenges of emerging novel true 3D holographic displays. *Proc. SPIE*, 2000, **4109**:129~140
- 2 Zhao Jialin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12):1447~1451 (in Chinese)
- 3 Mark Lucent. Interactive three-dimensional holographic Displays: seeing the future in depth. *Computer Graphics*, 1997, **31**(2):63~67
- 4 Mark L, Galyean T A. Rendering interactive holographic images. *Proc. SIGGRAPH 95, Annual Conference Series*, 1995, In: *Computer Graphics Proceedings*, New York: ACM SIGGRAPH, 1995. 387~394
- 5 Lucente M. *Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography*. Massachusetts: Massachusetts

- Institute of Technology, 1994
- 6 Lucente M. Interactive computation of holograms using a look-up table. *J. Electron. Imaging*, 1996, **2**(1):28~34
- 7 Lucente M. Computational holographic bandwidth compression. *IBM Systems J.*, 1996, **35**(3):349~365
- 8 Cai Xiaou, Wang hui, Li Yong *et al.*. The application of wavelet analysis in hologram compression. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(6):739~743 (in Chinese)
- 9 Li Liangyu, Li Yinzh. Digital holography free of zero order diffraction and conjugate images. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):427~429 (in Chinese)
- 10 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyj. A improved biblock zero tree coding for hyperspectral data compression. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):834~838 (in Chinese)
- 11 Yan Jingwen, Sun Hui, Zhang Shenghua. A new compression of multispectral image data. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(3):298~303 (in Chinese)
- 12 Chai Xiaodong, Wei Sui. Wavelet analysis for holographic basis fring. *Proc. SPIE*, 2002, **4875**(2):1123~1125
- 13 Chai Xiaodong, Wei Sui. Holographic sereogram display based on sequence parallax images. *J. Southeast University* (东南大学学报), 2003, **33**(3):289~291 (in Chinese)
- 14 Zheng Junli. *Signal and System* (信号与系统). Beijing: Higher Eeucation Press, 1990. 227~230 (in Chinese)



中国光学学会 2004 年大会

中国光学学会 2004 年大会将于 2004 年 4 月 14~16 日在杭州举行. 本次会议是中国光学学会的一次盛会, 将总结交流我国光学工程领域的最新成果, 展望光学科技在 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化. 本次会议将与大型光学、光电子新技术新产品展览会——中国国际(杭州)光学·光电子博览会(Photonics China Expo., 2004, 杭州)、中国光学与光电子产业——企业家论坛、全国高校光学教学研究会——光学、光电类高等人才培养论坛同期举行, 拟邀请众多院士和著名专家到会作邀请报告。