

采用移频法进行离轴全息图压缩的研究

李旭¹, 李勇²

(1. 浙江警察学院实验中心, 浙江 杭州 310053; 2. 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要: 由于数字全息图的数据量庞大, 其传输、存储占用大量的通信带宽和存储空间。为实现数字全息图有效的传输、存储, 需要对其进行信息压缩。根据离轴全息图的频谱特点, 提出了一种将数字全息图的有效信息从高频段搬移到低频段的方法, 从而降低全息图采样频率达到信息压缩的目的。实验结果表明, 该方法是有用的, 压缩后全息图的再现像与原来的没有明显区别。

关键词: 数字全息图; 信息压缩; 数字全息显示; 全息图信息量

中图分类号: TP391

文献标识码: A

A Method for Compressing Off-axis Digital Hologram with Spectrum Shifting

LI Xu¹, LI Yong²

(1. Zhejiang Police College, Hangzhou 310053, China;

2. Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Large amounts of communication bandwidth and memory space is occupied to transmit and store digital hologram on account of its enormous data volume. It is necessary to compress the information of digital hologram for effective transmittance and storage. A new method is proposed to compress the information, according to the spectrum character of off-axis hologram. The sampling frequency is reduced by shifting the useful information of digital hologram from high-frequency section to low-frequency section. Therefore, the information is compressed. The experimental results show the presented method is available.

Key words: digital hologram; information compression; digital hologram display; the information content of hologram

1 引言

随着数字技术的发展, 全息图的数字化工作越来越受到人们的关注, Schnars 等^[1]提出用 CCD 元件作为激光全息图的记录介质得到数字全息图, 使激光全息图的数字处理成为可能。由于数字处理过程灵活方便, 数字全息图可以应用在 3D 物体表面轮廓重构^[2]、3D 物体识别^[3]、粒子场测试、流场测定、数字全息干涉研究变形、振动等方面。因此, 数

字全息图在 3D 物体显示、科学数据可视化等方面有着广泛的应用前景。另一方面, 由计算机产生的数字全息图——计算机全息^[4]的提出, 使得制作实际中不存在物体的全息图成为可能。然而, 由全

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60702078) 资助。

作者简介: 李旭 (1972 -), 男, 浙江警察学院, 讲师, 硕士。

E-mail: lxlxlx88@163.com

收稿日期: 2008-03-26

息原理可知,全息图的频带较宽^[5],从而导致数字全息图采样频率高,数据量庞大,占用大量的存储空间和通信带宽。数字全息图的压缩是其应用中的一个重要议题。一些研究者提出了光学全息图的压缩方法,如 Haines 和 Brumm^[6]采用散射屏实现用较小尺寸的全息图再现图像;Hildebrand^[7]设计了散射屏方法;Burekhardt 和 Enloe^[8-9]采用曝光小的规则空间阵列的方法减少全息图信息;Lin^[10]对傅里叶变换全息图二次采样压缩全息图。这些方法也可以应用到数字全息中,但都存在问题,如无法直接对干涉条纹操作,分辨率降低及人工操作痕迹,颗粒状和莫尔状条纹导致的再现像失真等。也有学者提出了针对计算机全息图的压缩方法^[11-12],取得了较好的效果,但也只限于计算机产生的数字全息。本文通过研究全息图的频谱特性,提出将全息图有效频谱由高频段搬移到低频段,降低全息图的采样频率达到压缩全息图数据量的目的。更为重要的是,这种方法可以作为其他全息图压缩方法的预处理手段,与其他方法联合使用,大大提高全息图的压缩率。

2 原理

2.1 全息图的频谱特性

由全息图制作原理可知,在满足线性记录条件下,全息图的振幅透过率可表示为:

$$\begin{aligned} t(x, y) &= t_0 + \beta' [|R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 \\ &\quad + 2 |R(x, y)| |O(x, y)| \cos[2\pi\alpha y - \phi(x, y)]] \\ &= t_b + \beta' [|O(x, y)|^2 + 2 |R(x, y)| |O(x, y)| \\ &\quad \cos[2\pi\alpha y - \phi(x, y)]] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, t_0 和 β' 为与感光材料性质及拍摄条件有关的常数; $t_b = t_0 + \beta' |R(x, y)|^2$, 表示均匀偏置透射率; $\phi(x, y)$ 为物光的相位分布; α 为载频。

下面从频域来研究全息图特性。即使记录时存在非线性情况,其结果只是在频谱中出现高阶谱,在本文中线性情况下讨论的结果同样适用非线性记录情况。将式(1)傅里叶变换可得:

$$\begin{aligned} T(\xi, \eta) &= t_b \delta(\xi, \eta) + \beta' G_0(\xi, \eta) \otimes G_0(\xi, \eta) + \\ &\quad \beta' G_0(\xi, \eta - \alpha) + \beta' G_0^*(-\xi, -\eta, -\alpha) = G_1(\xi, \eta) + \\ &\quad G_2(\xi, \eta) + G_3(\xi, \eta) + G_4(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\otimes$ 表示自相关; $G_0(\xi, \eta)$ 为物的频谱。设物的带宽为 $2B$, 则式(2)第二项带宽为 $4B$ 。全息图的频谱可用图 1 来表示。由全息照相理论,为避免频域中各分量重叠,对于载频在 y 方向的情况,载频 α 必

须大于等于 $3B$, 则 $t(x, y)$ 在 y 方向的最高频率大于等于 $4B$ 。

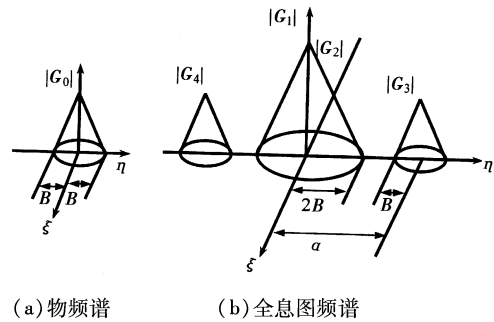


图 1 全息图频谱特点

由图 1 及全息再现理论可知,全息图中实际有用的部分是物的频谱,而自相关项频谱对再现像无贡献。本文的目的就是设法去除自相关项频谱,只保留物的频谱部分,并将其搬移到低频段,降低全息图的采样频率来压缩全息图的数据量。

2.2 全息图的频谱搬移原理

观察公式(1),式中只有第 3 项是与再现像有关的,其频谱是图 1 中的 G_3 和 G_4 。将式(1)的第 3 项乘以空间频率为 f 的余弦信号可得:

$$\begin{aligned} t'(x, y) &= 2\beta' |R(x, y)| |O(x, y)| \cos[2\pi\alpha y - \\ &\quad \phi(x, y)] \cos(2\pi f y) = a(x, y) \{ \cos[2\pi(\alpha - f)y - \\ &\quad \phi(x, y)] + \cos[2\pi(\alpha + f)y - \phi(x, y)] \} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $a(x, y) = \beta' |R(x, y)| |O(x, y)|$ 。式(3)第一项就是将全息图的有效频谱搬移到低频段的结果,第二项为高频项。滤除高频项后,得到的新图像具有较低的空间频率。这样,就可以用较低的采样频率对处理后的图像重新采样,压缩了全息图的数据量。

在全息图的后续处理中,如输出进行光学再现,有可能需要将压缩后的全息图还原。由上面的操作过程可知,将新全息图乘以空间频率为 f 的余弦信号,并进行高通滤波则可以将全息图的频谱搬回原处。也可以乘以其他空间频率的余弦信号,将全息图的频谱搬移到需要的位置。

2.3 数据压缩量

为讨论方便,这里只考虑一个方向重采样情况。由第 2.1 节所述全息图特点及采样定理,全息图的采样周期至少满足:

$$\delta \leq \frac{1}{8B} \quad (4)$$

对全息图进行移频后,新全息图的最高频率可

达 $2B$ 。根据采样定理,新的采样周期必须满足:

$$\delta \leq \frac{1}{4B} \quad (5)$$

比较式(4)、式(5),可知移频压缩后至少将原全息图压缩到原来的一半。

3 实验及结果

3.1 数据处理步骤及参数确定

频谱搬移法进行全息图压缩步骤如下:

1)对全息图作高通滤波,滤波器截止频率为 $2B$;

2)将滤波后的全息图乘以余弦信号,信号的空间频率为 $f - B$;

3)对处理后的图像作低通滤波,滤波器截止频率为 $2B$;

4)对图像以 $4B$ 为采样频率重新采样。

在频谱搬移前,首先要确定频谱的移动量 f 。由全息照相原理,全息图的载频由物光波的平均入射角和参考光的平均入射角及光波长决定。频谱移动量 f 可以表示为:

$$f = \left| \frac{\sin\theta_{oy} - \sin\theta_{ry}}{\lambda} \right| \quad (6)$$

式中, θ_{oy} 表示物光波平均入射角; θ_{ry} 表示参考光平均入射角; λ 表示光波长。

确定了频谱移动量后,还要确定物的带宽 B_y 。它们由物光波之间的最大夹角和波长决定,在旁轴近似下可以表示为:

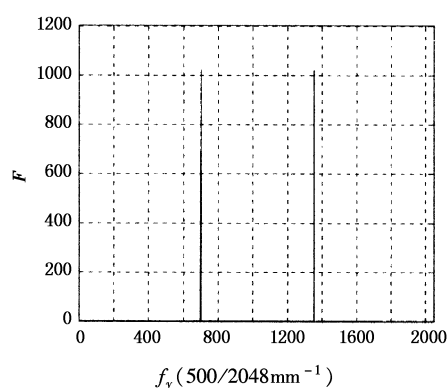
$$B_y = \frac{W_{oy} + W_{hy}}{z_0 \lambda} \quad (7)$$

式中, W_{oy} , W_{hy} 分别表示物和全息图的半宽度, z_0 表示物到全息图的距离。

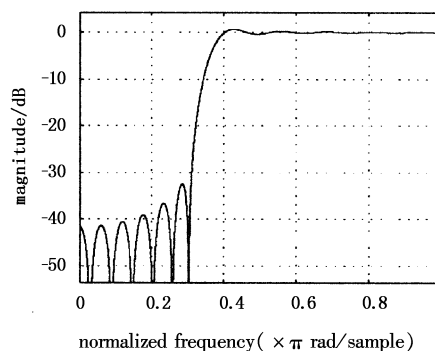
上述参数也可以从全息图的频谱分布中观察得到。

3.2 全息图压缩实验结果

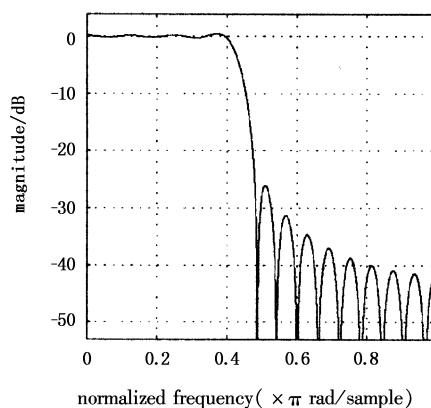
我们采用计算机全息图进行了数据压缩实验。实验参数如下:物的尺寸为 $10\text{mm} \times 13\text{mm} \times 5\text{mm}$,全息图采样周期为 $2\mu\text{m}$,尺寸为 2048×2048 点,物到全息面距离为 300mm ,参考光入射角为 5° ,波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 。根据全息图制作参数,设计了移频用的余弦信号和用于压缩的 FIR 高通、低通滤波器,阶数为 30。图 2 为滤波器的幅频特性及信号频谱。



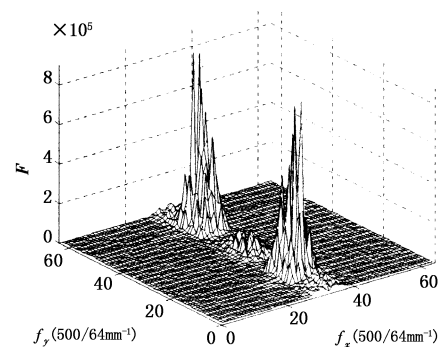
(a) 余弦信号谱



(b) 高通滤波器幅频特性



(c) 低通滤波器幅频特性



(d) 全息谱

图2 滤波器幅频特性及信号频谱

图3 分别为模型照片、全息图片段、全息图再现像、全息图移频后的频谱和经压缩、还原后

的数字再现像。从采用移频压缩前后的再现像比较可以看出,本文提出的方法对像质没有明显的影响。另外我们对移频压缩前后的全息图采用 JPEG 图像压缩算法进行压缩,比较它们的压缩率。在原始全息图压缩率为 11% 时,移频压缩后的全息图的总压缩率为 6%,全息图再现像主观感觉比较满意。在原始全息图压缩率为 9% 时,移频压缩后的全息图的总压缩率为 5%,全息图再现像主观感觉仍然比较满意,但出现了明显的高级次像。

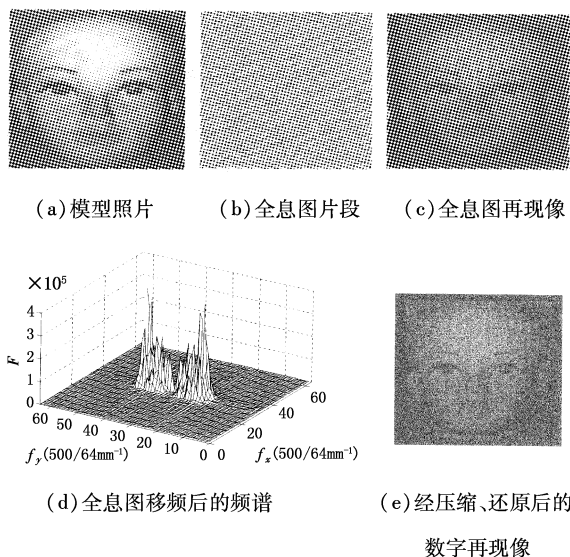


图3 实验结果

4 结束语

我们提出了一种通过压缩全息图的频谱,降低全息图采样频率的方法压缩数据。由于它只是滤除了全息图中无用的频谱信息,并将有用频谱向低频端移动,在理论上是一种无损压缩方法。在只降低一个方向上的采样频率时,可以将全息图的数据至少压缩到原来的一半。进一步将压缩后的全息图用 JPEG 算法进行有损压缩,实验中压缩率达到 6% 时,再现像质无明显下降。实验结果表面本文提出的全息图压缩方法是有效的。

参考文献:

[1] Schnars U, Kreis T M, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms : reduction of

the spatial frequency spectrum[J]. Opt. Eng., 1996, 35 (4) : 977 - 982.

- [2] Ma Lihong, Wang Hui, LI Yong, et al. Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement[J]. Journal of Optics A: pure and applied optics., 2004, 4: 396 - 400.
- [3] Bahram Javidi, Daesuk Kim. Three-dimensional-object recognition by use of single-exposure on-axis digital holography[J]. Optics Letters, 2005, 30(3) : 236 - 238.
- [4] A W Lohmann, D P Paris. Binary Fraunhofer holograms generated by computer[J]. Appl. Opt., 1967, 6(10) : 1739 - 1748.
- [5] Li Yong, Jin Hongzhen, Wang Hui, et al. Research for horizontal parallax only kinoform in 3D display[J]. Chinese Journal of Lasers B, 2002, 11(6) : 465 - 468.
- [6] K A Haines, D B Brumm. Holographic data reduction [J]. Applied Optics, 1968, 7(6) : 1185 - 1189.
- [7] B P Hildebrand. Hologram bandwidth reduction by space-time multiplexing[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(2) : 259 - 264.
- [8] C B Burckhardt. Information reduction in holograms for visual display[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(2) : 241 - 246.
- [9] C B Burckhardt, L H Enloe. Television transmission of holograms with reduced resolution requirements on the camera tube [J]. Bell System Tech. Jour., 1969, 48: 1529 - 1535.
- [10] L H Lin. A method of hologram information reduction by spatial frequency sampling[J]. Applied Optics, 1968, 7 (3) : 545 - 548.
- [11] M Lucente. Computational holographic bandwidth compression[J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3) : 349 - 365.
- [12] M Lucente. Holographic bandwidth compression using spatial subsampling [J]. Opt. Eng., 1996, 35: 1529 - 1537.