

doi: 10.3788/lop47.030502

三色光栅彩色摄影数字化频率的研究

张宝颖

(军事交通学院基础部, 天津 300161)

摘要 为了提高三色光栅彩色摄影的数字解码速度, 得到高质量的解码彩色图像, 需选择适当的数字化频率。根据 Nyquist 采样定理, 分析了采样频率 f_s , 光栅频率 f_g 和光栅数字化频率 f_{gs} 三者之间的关系, 找到了 f_s 最佳值的确定方法。结果表明, 对于 20 line/mm 的三色光栅, f_s 的最佳值为 2032 d/i, 不仅使解码时间缩短为原来的 1/3, 而且完整保留了编码图像的细节和彩色信息。 f_s 最佳值的确定方法为三色光栅彩色数码摄影术的进一步成熟提供了依据。

关键词 光栅; 数字化频率; 抽样定理; 编码图像; 傅里叶变换

中图分类号 TN911.73 OCIS 050.2770 100.2000 文献标识码 A

Study of Digital Frequency in Tricolor Grating Color Photography

Zhang Baoying

(General Courses Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

Abstract In tricolor grating color photography, the digital frequency f_s is a key parameter, which affects the decoding speed and the quality of the decoded image. Therefore, the value of f_s should be determined. The triangle relation among digital frequency f_s , gratings frequency f_g and gratings sampling frequency f_{gs} is analyzed in accordance with the Nyquist sampling theorem. The method to determine the optimum value of parameter f_s is obtained. The result shows that f_s should be 2032 d/i when f_g is 20 line/mm. It has not only kept the original encoded image information completely but also improved the decoding speed to 3 times. It is of great benefit to the development of tricolor grating digital color photography and its further application in the future.

Key words gratings; digital frequency; sampling theorem; encoded image; Fourier transform

1 引言

光栅衍射及成像研究一直是人们关注的热点问题^[1~3], 其中发展最为成熟的是三色光栅彩色摄影技术^[4~6]。这种彩色摄影的优势在于采用黑白底片记录, 成本低廉且易于保存, 没有褪色问题。缺点是系统分为编码和解码两个部分, 解码过程需要庞杂的光学系统才能实现。1999年, 该技术实现了半数字化, 解码过程由计算机代替 4f 光学系统, 不仅简化了系统结构、实现了数字解码, 而且运用融合零级等技术使解码彩色图像质量明显提高^[7~10]。2002年, 通过在黑白 CCD 像面前加贴三色光栅 (编码 CCD) 的方法, 实现了编码数字化, 编码解码一步完成, 使一种基于三色光栅的新型数码相机成为可能^[11]。

在三色光栅彩色摄影数字化的过程中, 数字化编码图像是一个重要步骤。数字化时采样频率的选择直接影响着解码速度和解码彩色图像的质量。如果采样频率选得过低, 会破坏编码图像的光栅结构, 造成解码图像的彩色信息丢失; 如果采样频率选得过高, 则会产生信息冗余, 使编码图像数据量无意义增大, 不

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-10-29

作者简介: 张宝颖(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学信息的获取、处理、存储、传输及显示等方面的研究。
E-mail: zhangbaoying69@126.com

仅浪费存储空间,而且使解码过程延长,浪费时间。因此,采样频率的确定不是随意的,需要合理选择。

2 图像的最高频率、数字化抽样频率、光栅的空间分辨率和数字化频率

图像的分辨率是表征图像质量的重要参数。图像给人感觉清晰与否,不仅与图像灰阶等级和色彩饱和度有关,还与图像的空间分辨率有关。对于不同的记录介质或显示器件,有不同的定义方法,如 line/mm, d/i (dot per inch) 等。每一幅给定的图像,都存在一个最高频率(空间截止频率),记为 f_c , 对应着图像的最小细节。图像的数字化抽样频率是指模拟图像通过模/数(A/D)转换成为数字图像时的空间采样频率,也就是扫描频率,记为 f_s 。比如, $f_s=800$ d/i 说明每英尺有 800 个像素点。

Nyquist 抽样定理告诉我们:要从抽样信号中无失真地恢复原信号,抽样频率 f_s 应不小于 2 倍信号最高频率 f_c 。根据抽样定理,如果图像 $f(x,y)$ 的傅里叶频谱 $F(u,v)$ 是有限带宽的,则存在最高空间截止频率 f_c , 当采样频率

$$f_s \geq 2f_c \quad (1)$$

时,采样信号能够完整地恢复出原信号。习惯上称 $f_c = f_s/2$ 为 Nyquist 频率。

光栅的空间频率 f_g 是指单位长度内所具有的光栅条数,简称光栅频率。比如, $f_g=20$ line/mm 说明每毫米有 20 线对。光栅的数字化频率 f_{gs} 是指编码底片数字化时,每一光栅周期所包含的像素数。可以得到

$$f_{gs} = \frac{f_s}{f_g}, \quad (2)$$

即光栅的数字化频率等于抽样频率与光栅频率的比值。已知 f_g 和 f_{gs} , 就可以得到扫描频率为 $f_s=f_g f_{gs}$ 。

3 数字化编码底片最佳频率的确定

三色光栅彩色摄影的解码是通过傅里叶变换以及一级频谱滤波获得彩色信息。三色光栅由 3 个原色的 Ronchi 子光栅叠加而成。图 1 所示的 3 个矩形框分别代表红、蓝、绿 3 个子光栅所对应的一级频谱滤波器,由于滤波器的尺寸受限,即使在每个光栅周期内记录了更多的图像细节,在进行一级频谱滤波时,这些细节对应的高频信息因处于滤波器之外,也会被滤掉。因此,解码彩色图像的分辨率由光栅频率 f_g 决定, f_g 越大, 3 个一级频谱间距越大, 滤波器孔径越大, 图像分辨率就越高。

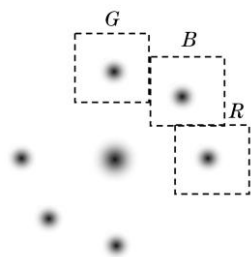


图 1 编码图像的傅里叶变换一级频谱滤波器
Fig.1 First-order filters in Fourier frequency plane

编码图像中光栅结构的存在,类似于对图像进行了空间采样,这个采样频率就等于光栅的空间频率,也代表了编码图像的空间截止频率,即 $f_c=f_g$ 。在编码底片数字化时,相当于对编码图像进行二次采样。由(1)式得

$$f_s \geq 2f_g. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,数字化抽样频率受光栅空间频率制约。只有满足 $f_s \geq 2f_g$, 才能使数字编码图像中的光栅结构得以保持,三原色彩色信息才会完整保留。因此得到 $f_{gs} \geq 2$, 即每个光栅周期至少应有两个像素,分别对应着一个光栅周期内透光和不透光的部份。

但是,扫描时采样点很难与光栅条纹的中心对齐,如图2所示。为简单直观起见,图中只给出水平和45°方向的光栅,设光栅常数为 $2a$,3个子光栅的空间频率相同均为 f_g 。当取最小值 $f_{gs}=2$ 时,以 O 点为基准点,每个像素点对应的图像区域为 $a \times a$,假设对于水平或竖直的光栅,每周期正好有2个像素。那么,对于45°方向的光栅,每个光栅周期在水平或竖直方向的宽度均为 $2a\sqrt{2}$,含有近似3个采样点,即每半个光栅周期有1.5个采样点,产生截断误差,造成该方向上光栅的周期性被破坏。因此,为保证该方向上光栅结构的完整,必须有 $f_{gs} > 2$ 。

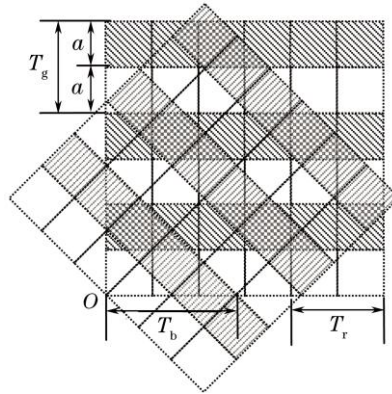


图2 三色光栅的截断误差

Fig.2 Truncation error of the tricolor grating

另一方面, f_{gs} 又不能太大。如果太大,则会使编码图像数据量无意义增大,产生信息冗余,不仅浪费了存储空间,而且使解码过程延长,浪费了时间。为此,有允许的最小值为, $f_{gs}=4$ 此时有

$$f_{gs} = T_r = T_g = 4, \quad T_b = 4\sqrt{2} \approx 5.7, \quad (4)$$

式中 T_r , T_g , T_b 分别为竖直、水平和45°方向上的子光栅每个周期对应的像素值。其中,对于水平和竖直方向的子光栅,每个光栅周期内有4个采样点,每半个光栅周期有2个采样点。而对于45°方向的子光栅,每个光栅周期内有5.6个采样点,每半个光栅周期近似有2.8个采样点。即使光栅周期与采样点有偏差,导致截断误差,也能保证光栅的透光和不透光部分均有采样点,光栅结构得到完整保留。

由(2)和(4)式可确定最佳扫描频率 f_s 。例如,对于 $f_g = 20$ line/mm的三色光栅,最佳扫描频率为 $f_s = f_g f_{gs} = 20 \times 4$ line/mm=2032 d/i。图3即为采用上述扫描频率得到的数字编码图像和解码彩色图像。

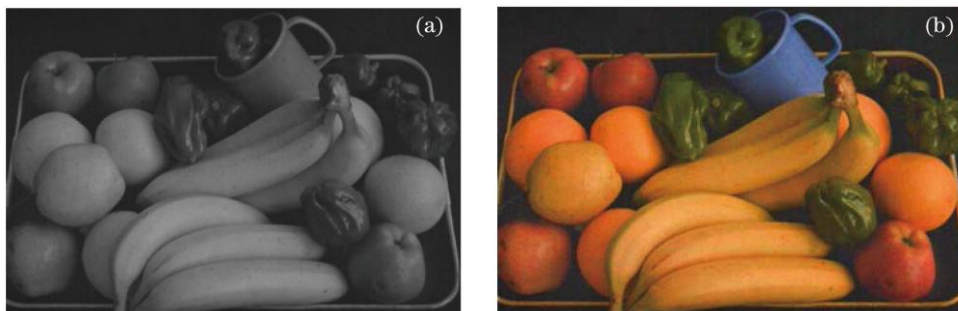


图3 最佳扫描频率下获得的解码图像。(a)原编码图像;(b)扫描频率为2032 d/i时的解码图像

Fig.3 Decoded image with the optimum scanning frequency. (a) encoded image; (b) decoded color image with 2032 d/i

为了进一步验证上述结论,实验中对不同编码底片,选择一系列扫描频率得到的数字编码图像进行解码,结果列于表1(计算机采用PentiumIV,2.4 GHz; $f_g = 20$ lines/mm)。由表1可见,扫描频率大于2032 d/i时解码图像质量虽然很好,但是解码时间长。对于扫描频率为2032 d/i时的解码图像,不但解码图像色彩鲜艳、质量稳定,而且缩短了解码时间,仅为原来的1/3。

表 1 不同扫描频率的解码图像比较

Table 1 Comparison of decoded images with different scanning frequencies

$f_s/d/i$	675	1016	1350	1524	2032	2540	2700
f_{gs}	1.33	2	2.66	3	4	5	5.3
Image size /kB	344	779	1371	1745	3096	4832	5459
Decoding time /s	0.02	0.08	0.09	0.11	0.66	1.27	1.92
Image quality	bad	bad	bad	bad	good	good	good

4 结 论

得到了确定光栅数字化频率 f_{gs} 应遵循的 3 个原则: 为保证数字化时彩色信息不丢失, 需要 $f_{gs} \geq 2$; 为消除截断误差, f_{gs} 应足够大, 以尽量使每一光栅周期内的透光和不透光部分都有采样点; 为使解码时间尽量缩短, 光栅的数字化频率 f_{gs} 应选取得尽量小。综合考虑以上 3 个方面才能得到高质量的解码图像。

参 考 文 献

- 1 Wan Lingyu, Zhang Weiping, Chen Maoxin *et al.*. Intensity of combined beams in bi-grating imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1096~1100
万玲玉, 张卫平, 陈茂鑫 等. 双光栅成像中的汇合级光能量[J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1096~1100
- 2 He Xiaorong, Zhang Weiping. Analysis of the bi-grating diffraction imaging effect by Fresnel diffraction theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1371~1376
何小荣, 张卫平. 用菲涅耳衍射理论分析双光栅成像效应[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1371~1376
- 3 Bo Yuan, Huimin Yan, Xiangqun Cao *et al.*. A new subdivision technique for grating based on CMOS microscope imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 278~280
- 4 Mu Guoguang, Wang Junqing, Fang Zhiliang *et al.*. A white-light processing technique for color photography with white-black film and tricolor grating[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1983, **4**(2): 125~130
母国光, 王君庆, 方志良 等. 用三色光栅和黑白感光胶片拍摄彩色景物[J]. 仪器仪表学报, 1983, **4**(2): 125~130
- 5 Frausis T. S. Yu. White-light processing technique for archival storage of color films[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(2): 457~459
- 6 White Light Information Processing Group. The progress of technique on color photography with tricolor grating and black white film[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5): 546~555
白光信息处理课题组. 用三色光栅和黑白胶片作彩色摄影术的研究与进展[J]. 光学学报, 1998, **18**(5): 546~555
- 7 Jiang Jing, Lin Lie, Fang Zhiliang *et al.*. A technique of digital color image retrieval from the encoded black-white film[J]. *Optik*, 1999, **110**(4): 177~180
- 8 Mu Guoguang. White-light optical information processing and its color photography[J]. *J. Optoelectronics-Laser*, 2001, **12**(3): 285~292
母国光. 白光光学信息处理及其彩色摄影术[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(3): 285~292
- 9 Luo Gang, Liu Fulai, Lin Lie *et al.*. Optical/digital color photography based on white-light information processing[J]. *Science in China. (E)*, 2000, **30**(3): 222~229
罗 罡, 刘福来, 林 列 等. 基于白光信息处理的光学/数字彩色摄影术[J]. 中国科学(E), 2000, **30**(3): 222~229
- 10 Zhang Baoying, Mu Guoguang, Fang Zhiliang. Tricolor grating and its application[J]. *J. Optoelectronics-Laser*, 2002, **13**(7): 763~766
张宝颖, 母国光, 方志良. 三色光栅及其应用研究进展[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(7): 763~766
- 11 Zhang Baoying, Liu Fulai, Lin Lie *et al.*. A study on the encoding color filter of TCG digital camera[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(5): 485~489
张宝颖, 刘福来, 林 列 等. 新型TCG数码相机编码滤色器研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, **24**(5): 485~489