

数字合成莫尔条纹的频谱分析与滤波处理

朱丽君 王玉荣 孟祥锋 杨修伦 江 山

山东大学信息科学与工程学院,山东省激光技术与应用重点实验室,山东 济南 250100

摘要 莫尔轮廓术是实现物体三维面形测量的主要方法之一,它基于莫尔条纹产生和分析技术。莫尔条纹产生方法主要有阴影法、投影法和数字合成法三种。对于数字合成法,目前通常采用低通滤波提取莫尔条纹,低频区域含有许多无用频率成分,会降低所提取的莫尔条纹的质量。通过分析参考条纹图像和变形条纹图像经相乘、相加、相减运算结果图像的频谱,比较不同滤波处理方法对提取莫尔条纹的影响,提出一种采用带通滤波提取莫尔条纹的新方法。与低通滤波相比,带通滤波可以产生衬比度更高的强度分布为标准余弦分布的莫尔条纹;此外,相加和相减运算产生的莫尔条纹之间相位相差 π ,明暗反转。计算机模拟和实际实验均验证了上述分析结论的正确性和该方法的有效性与其可行性。

关键词 测量; 三维面形测量; 莫尔轮廓术; 莫尔条纹; 频谱滤波

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1209002

Spectral Analysis and Filtering of Moire Fringes Generated by Using Digital Image Processing

Zhu Lijun Wang Yurong Meng Xiangfeng Yang Xiulun Jiang Shan

Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract Moire topography, a generation and analysis technique of moire fringes, is one of the techniques usually applied to three-dimensioned (3D) object shape measurement. Three kinds of methods, shadow moire, projection moire and digital moire, are mainly used to generate moire fringes. At present, low-pass filtering is used for extracting the moire fringes, since the low-frequency region contains lots of unwanted frequency components, the extracted moire fringes are not satisfactory and need to be improved. After theoretical analysis, a new method for extracting moire fringes, the band-pass filtering method, is proposed. This method can be used to extract moire fringes generated by multiplication, addition or subtraction of the reference fringes and deformed fringes by digital image processing. Compared with the traditional low-pass filtering method, the contrast of moire fringes with band-pass filtering is higher, and the intensity distribution is standard cosine. Besides, there is a phase shift of π between the moire fringes produced by addition and subtraction operation, so their bright and dark fringes are justly reversed. The correctness and validity of the proposed method and analysis have been verified by computer simulations and experiments.

Key words measurement; 3-D shape measurement; moire topography; moire fringe; spectral filtering

OCIS codes 120.4120; 120.2650; 070.6110

1 引 言

光学三维面形测量在机器视觉、实物仿形、逆向工程、工业自动检测、产品质量控制、生物医学等领域具

收稿日期: 2015-07-27; 收到修改稿日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61275014)

作者简介: 朱丽君(1991-),女,硕士研究生,主要从事光电检测与光学测量等方面的研究。E-mail: 1026587485@qq.com

导师简介: 王玉荣(1965-),男,教授,硕士生导师,主要从事数字全息、光电检测与光学测量等方面的研究。

E-mail: yrw@sdu.edu.cn(通信联系人)

有重要意义和广泛应用前景^[1-6],其实现方法有多种,如相位测量轮廓术(PMP)^[7-8]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[9-10]及莫尔轮廓术(MT)^[11]等。莫尔轮廓术是莫尔条纹的产生与分析技术,它利用基准光栅与投影到物体表面受到物体面形调制的变形光栅叠合形成莫尔条纹,并通过分析莫尔条纹获得物体的三维面形信息。

莫尔条纹是周期性或准周期性结构之间叠合形成的差频结构^[12-13]。产生莫尔条纹的方法有多种,如阴影法^[14-15]、投影法^[16-17]和数字合成法^[18-20]等。阴影法需要大尺寸参考光栅,且形成的莫尔条纹图像的衬比度和清晰度较差,测量精度较低。传统投影法存在结构复杂、装校精度要求高等缺点。数字合成法是基于光电成像和数字图像处理技术对传统投影法的改进,系统结构简单,可以方便地调整条纹密度和方向,可以采用数字图像处理技术获得高质量的莫尔条纹,并且便于实现条纹分析的自动化。

在莫尔条纹数字合成法中,由变形条纹图像和参考条纹图像产生莫尔条纹的两个主要步骤是图像算术运算和频谱滤波处理。图像算术运算用于完成变形条纹图像和参考条纹图像的叠合;从空间域来看,运算后的图像中既包含莫尔条纹又含有原有条纹;从空间频域来看,运算后的图像的频谱中既包含条纹图像的背景强度频谱、基频频谱和高次谐波频谱,还可能包含差频频谱、和频频谱。频谱滤波用于滤出能够产生莫尔条纹的频谱成分,尽量减少其他频谱成分和各种噪声的影响,得到衬比度好、信噪比高的莫尔条纹。文献[21]采用相乘运算和低通滤波产生莫尔条纹,为了减少原条纹背景强度噪声频谱对低通滤波和莫尔条纹质量的影响,在相乘运算之前对原条纹图像进行预处理(减去背景强度),给出了计算机模拟验证结果。实际中,由于受照明光和物体表面反射率不均匀及杂散光的影响等原因,实际条纹图像的背景强度并不是常数,并且条纹的调制度也不是均匀的,因此,该方法难以用于实际测量应用。此外,该文献中通过对相加运算结果图像的频谱分析,认为采用相加运算难以得到莫尔条纹。文献[22-23]讨论了相减莫尔的提取方式,参考条纹图像和变形条纹图像相减运算后,取绝对值再低通滤波,由于低频区包含较多的无关信息,此方法获得的莫尔条纹信噪比较低。

本文对采用相乘、相加、相减运算产生莫尔条纹的方法进行了系统的理论分析和实验研究。分析了参考条纹图像和变形条纹图像采用不同运算方法得到的图像的频谱成分和结构;基于频谱分析,分析了不同滤波方法提取莫尔条纹的特点,提出提取莫尔条纹的新方法,即带通滤波方法。

2 数字合成莫尔条纹的系统结构与数据处理过程

莫尔条纹数字合成方法如图1所示。图1(a)是获取参考条纹图像和变形条纹图像的装置结构原理图,采用交叉光轴系统。其中,投影仪和CCD相机位于同一平面 P_1 内沿水平(或竖直)方向放置, P_2 面作为参考平面与 P_1 面平行;CCD相机光轴垂直于参考平面,并与投影仪光轴相交于参考平面上一点;待测物体位于参考平面前紧贴放置。由CCD相机分别拍摄参考条纹图像 $I_1(x,y)$ 和携带待测物体面形信息的变形条纹图像 $I_2(x,y)$ 。在获得 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 后,采用数字图像处理方法产生莫尔条纹的数据处理过程如图1(b)所示:首先对 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 进行相乘、相加或相减运算得到运算结果图像;然后对运算结果图像进行傅里叶变换得到运算结果图像的空间频谱;再根据运算结果图像的频谱结构特点,采取适当的空间频谱滤波方法得到滤波后的频谱;对滤波后的频谱进行逆傅里叶变换,最后取其强度分布,得到莫尔条纹 $I_M(x,y)$ 。上述过程中的参考条纹图像 $I_1(x,y)$ 也可以不采用拍摄参考面上投影条纹的方式,而是直接由计算机生成。

3 原理分析

理论上,用于产生投影条纹图像的光栅可以是余弦光栅,也可是矩形光栅。实际中,受参考平面和待测物体表面的反射率分布不均匀及投影和成像系统传递函数的影响,由CCD相机拍摄得到的条纹图样会偏离原有的余弦分布或矩形分布。基于任何周期条纹图样均可分解为不同频率的余弦光栅图样叠加的原理,为简化分析,在下面的理论分析中投影条纹采用单载频余弦条纹。设由CCD相机拍摄得到的参考条纹图像和变形条纹图像分别表示为

$$I_1(x,y) = a_1(x,y) + b_1(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)] = a_1(x,y) + \frac{1}{2}b_1(x,y)\exp(i\varphi_0)\exp(i2\pi f_0 x) + \frac{1}{2}b_1(x,y)\exp(-i\varphi_0)\exp(-i2\pi f_0 x), \quad (1)$$

$$I_2(x,y) = a_2(x,y) + b_2(x,y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)] = a_2(x,y) + \frac{1}{2}b_2(x,y)\exp[i\varphi(x,y)]\exp(i2\pi f_0 x) + \frac{1}{2}b_2(x,y)\exp[-i\varphi(x,y)]\exp(-i2\pi f_0 x), \quad (2)$$

式中 f_0 是条纹图像 x 方向的空间频率, $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 分别表示条纹图像的背景强度分布和振幅调制度分布, 一般情况下二者均是空间坐标 (x,y) 的函数, $\varphi_0(x,y)$ 是参考条纹的相位, $\varphi(x,y)$ 是变形条纹的相位, 它包含了待测物体的面形信息。在图1(a)所示结构中, 相位差分布 $\Delta\varphi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_0(x,y)$ 与待测物体面形高度分布 $h(x,y)$ 之间的关系为^[6]

$$h(x,y) = \frac{L\Delta\varphi(x,y)}{2\pi Df_0 + \Delta\varphi(x,y)}, \quad (3)$$

式中 L 是像面和参考平面之间的距离, D 是投影装置和相机的出瞳中心之间的距离, f_0 是光栅在参考平面上投影条纹的空间频率。在得到相位差分布 $\Delta\varphi(x,y)$ 后, 就可以计算出待测物体面形分布 $h(x,y)$ 。得到相位差分布 $\Delta\varphi(x,y)$ 的方法有多种, 如: 傅里叶变换轮廓术(FTP)^[9-10]基于(1)、(2)式采用傅里叶变换频谱滤波, 相位测量轮廓术^[5]基于(2)式采用相移技术与相移算法, 莫尔轮廓术^[11]基于(1)、(2)式产生莫尔条纹并进行分析。本文主要讨论莫尔轮廓术方法中基于(1)、(2)式采用数字图像处理技术产生莫尔条纹的原理和方法。

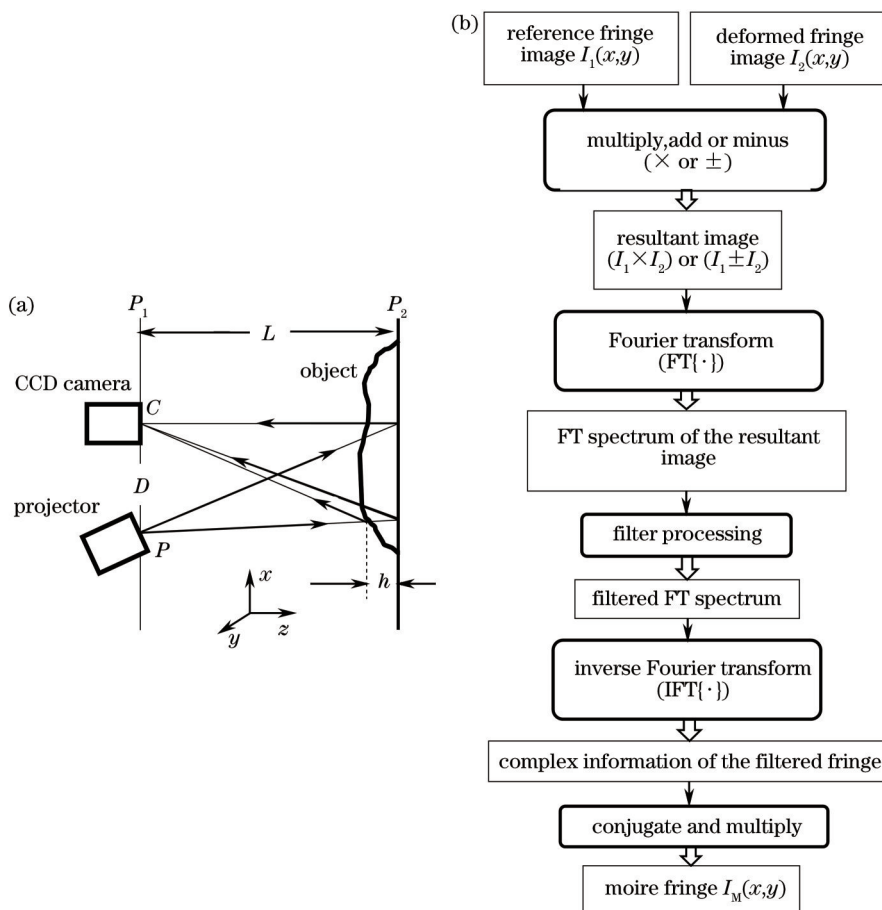


图1 数字合成莫尔条纹的系统结构与数据处理框图。(a) 条纹投影与成像系统;
(b) 基于数字图像处理产生莫尔条纹的数据处理流程

Fig.1 Schematic diagram for generating moiré fringe patterns by using digital image processing. (a) Geometry of the fringe projection and imaging system; (b) flow chart of generating moiré fringe patterns by using digital image processing

采用图1(b)所示方法, 对参考条纹图像 $I_1(x,y)$ 和变形条纹图像 $I_2(x,y)$ 分别进行相乘和加、减运算。为简化, 下面的推导中略去空间坐标 (x,y) , 相乘和加、减运算得到的结果图像分别表示为

$$I_1 \times I_2 = a_1 a_2 + \frac{1}{4} b_1 b_2 \{ \exp[i(\varphi - \varphi_0)] + \exp[-i(\varphi - \varphi_0)] \} + \frac{1}{2} [a_1 b_2 \exp(i\varphi) + a_2 b_1 \exp(i\varphi_0)] \exp(i2\pi f_0 x) + \frac{1}{2} [a_1 b_2 \exp(-i\varphi) + a_2 b_1 \exp(-i\varphi_0)] \exp(-i2\pi f_0 x) + \frac{1}{4} b_1 b_2 \exp[i(\varphi + \varphi_0)] \exp(i4\pi f_0 x) + \frac{1}{4} b_1 b_2 \exp[-i(\varphi + \varphi_0)] \exp(-i4\pi f_0 x), \quad (4)$$

$$I_1 \pm I_2 = a_1 \pm a_2 + \frac{1}{2} [b_1 \exp(i\varphi_0) \pm b_2 \exp(i\varphi)] \exp(i2\pi f_0 x) + \frac{1}{2} [b_1 \exp(-i\varphi_0) \pm b_2 \exp(-i\varphi)] \exp(-i2\pi f_0 x). \quad (5)$$

(4)式所示相乘运算结果图像的傅里叶变换频谱可表示为

$$\text{FT}\{I_1 \times I_2\} = \text{FT}\left\{a_1 a_2 + \frac{1}{4} b_1 b_2 \{ \exp[i(\varphi - \varphi_0)] + \exp[-i(\varphi - \varphi_0)] \}\right\} + \text{FT}\left\{\frac{1}{2} [a_1 b_2 \exp(i\varphi) + a_2 b_1 \exp(i\varphi_0)]\right\} * \delta(f_x - f_0) + \text{FT}\left\{\frac{1}{2} [a_1 b_2 \exp(-i\varphi) + a_2 b_1 \exp(-i\varphi_0)]\right\} * \delta(f_x + f_0) + \text{FT}\left\{\frac{1}{4} b_1 b_2 \exp[i(\varphi + \varphi_0)]\right\} * \delta(f_x - 2f_0) + \text{FT}\left\{\frac{1}{4} b_1 b_2 \exp[-i(\varphi + \varphi_0)]\right\} * \delta(f_x + 2f_0), \quad (6)$$

式中 FT{·} 表示傅里叶变换, * 是卷积运算符, 等号右边的第 1 项到第 5 项分别对应于频谱中的不同成分。从频谱的总体空间分布来看: 第 1 项是零级谱, 它包含条纹图像背景强度的频谱和条纹变形前后的差频频谱, 其中心位于频谱面原点; 第 2 项和第 3 项分别是正、负一级谱, 其中心分别位于频谱面的 $(f_0, 0)$ 和 $(-f_0, 0)$, 它们分别是变形条纹和参考条纹频谱的正负两部分; 第 4 项和第 5 项分别是正、负二级谱, 它们均包含条纹变形前后的和频频谱, 其中心分别位于频谱面的 $(2f_0, 0)$ 和 $(-2f_0, 0)$ 。

(5)式所示加、减运算的结果图像的傅里叶变换频谱可表示为

$$\text{FT}\{I_1 \pm I_2\} = \text{FT}\{a_1 \pm a_2\} + \text{FT}\left\{\frac{1}{2} [b_1 \exp(i\varphi_0) \pm b_2 \exp(i\varphi)]\right\} * \delta(f_x - f_0) + \text{FT}\left\{\frac{1}{2} [b_1 \exp(-i\varphi_0) \pm b_2 \exp(-i\varphi)]\right\} * \delta(f_x + f_0), \quad (7)$$

(7)式等号右边的第 1 项到第 3 项分别对应于频谱中不同成分。从频谱的总体空间分布来看: 第 1 项是零级谱, 它是条纹图像背景强度的频谱, 其中心位于频谱面原点; 第 2 项和第 3 项分别是正、负一级谱, 其中心分别位于频谱面的 $(f_0, 0)$ 和 $(-f_0, 0)$, 它们分别是变形条纹和参考条纹频谱的正负两部分。

如(6)、(7)式所示, 运算结果图像的频谱中包含不同的频谱成分, 这些频谱成分在频谱面上的位置不同; 合理选取投影条纹的空间频率 f_0 , 使这些频谱成分在频谱面上位置分离, 采用适当滤波方法可以分别得到不同的频谱成分; 对不同的频谱成分再分别进行逆傅里叶变换并与其复共轭相乘取强度分布, 可以得到不同的条纹分布图样。下面就相乘运算和加、减运算分别进行分析。

对于相乘运算。由(6)式可知, 若采用低通滤波仅让零级谱通过、进行逆傅里叶变换, 并与其复共轭相乘取强度, 其强度分布为

$$I_0^*(x, y) = a_1^2 a_2^2 + \frac{1}{8} b_1^2 b_2^2 + a_1 a_2 b_1 b_2 \cos(\varphi - \varphi_0) + \frac{1}{8} b_1^2 b_2^2 \cos[2(\varphi - \varphi_0)]. \quad (8)$$

若采用带通滤波仅让正一级谱(或负一级谱)通过、进行逆傅里叶变换, 并与其复共轭相乘取强度, 其强度分布为

$$I_1^*(x, y) = \frac{1}{4} (a_1^2 b_2^2 + a_2^2 b_1^2) + \frac{1}{2} a_1 a_2 b_1 b_2 \cos(\varphi - \varphi_0). \quad (9)$$

若采用带通滤波仅让正二级谱(或负二级谱)通过、进行逆傅里叶变换, 并与其复共轭相乘取强度, 其强度分布为

$$I_2^*(x, y) = \frac{1}{8} b_1^2 b_2^2. \quad (10)$$

(8)式中, 前两项是背景强度分布; 第三项包含有条纹变形前后的差频 $(\varphi - \varphi_0)$, 含有待测物体面形信息, 是莫尔条纹, 其中包含原条纹图像背景强度 $a(x, y)$; 第四项含有两倍差频 $2(\varphi - \varphi_0)$, 其空间频率是莫尔条纹的 2 倍, 该项虽然强度较弱但叠加在莫尔条纹上, 会降低莫尔条纹的衬比度, 使莫尔条纹强度偏离标准余弦分布。(9)式第一项是背景强度分布, 第二项包含有条纹变形前后的差频 $(\varphi - \varphi_0)$, 含有待测物体面形信息, 是莫尔条纹, 其中包含原条纹图像背景强度 $a(x, y)$, 但不包含两倍差频 $2(\varphi - \varphi_0)$ 。(10)式无条纹分布, 不含有待测物体面形信息。分析比较可知: 采用相乘运算时, 低通和带通滤波都可以获得莫尔条纹, 但与低通滤波相比, 采用带

通滤波仅让正一级谱(或负一级谱)通过,能获得质量更好的莫尔条纹。

对于加、减运算。由(7)式可知,其零级谱不含有待测物体面形信息,仅采用低通滤波无法得到莫尔条纹。采用带通滤波仅让正一级谱(或负一级谱)通过,进行逆傅里叶变换,并与其复共轭相乘取强度,可以获得莫尔条纹,其强度分布为

$$I_1^{\pm}(x,y) = \frac{1}{4}(b_1^2 + b_2^2) \pm \frac{1}{2}b_1b_2 \cos(\varphi - \varphi_0). \quad (11)$$

该强度分布第二项包含有条纹变形前后的差频,含有待测物体面形信息,是莫尔条纹,且不包含原条纹图像背景强度 $a(x,y)$ 。此外,因为 $\exp(\pm i\pi) = -1$,所以加、减运算所产生的莫尔条纹之间有 π 相移,条纹明暗反转。

带通滤波情况下,相乘运算和加减运算的比较:1) 比较(11)式和(9)式可知,(11)式中不包含有原条纹图像的背景强度分布 $a(x,y)$;因此,与相乘运算相比,加减运算产生的莫尔条纹的清晰度更好、信噪比更高。2) 比较(7)式和(6)式可知,相乘运算的频谱比加减运算的频谱更复杂,相乘运算的频谱中包含5项,而加减运算的频谱中包含3项、各频谱成分分散得更开,因此,与相乘运算相比,加减运算滤波器的选择更灵活,可以有效地利用频谱空间,有助于提高面形测量精度。实际应用中,尽管投影系统和成像系统均非理想成像以及参考平面和待测物体表面反射率的非均匀分布,会使CCD相机拍摄得到的条纹图像偏离理想余弦分布,从而导致条纹图像的空间频谱展宽,但这并不影响上述分析结论。

4 计算机模拟实验验证

为验证上述原理分析的正确性,进行如下模拟实验。参考条纹的强度分布为归一化的理想余弦分布,即 $I_1(x,y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(2\pi f_0 x + \varphi_0)$ 。设待测物体表面反射率均匀分布且等于1,由待测物体产生的变形条纹的强度分布为 $I_2(x,y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)]$,其面形分布对投影条纹的调制包含在 $\varphi(x,y)$ 中。采用 Matlab 模拟置于参考平面的待测球冠物体的面形高度分布 $h(x,y)$,其最大高度为 180 mm,如图 2(a)所示。(3)式中其他参数取值为 $L=3000$ mm, $D=300$ mm, $\varphi_0(x,y) = 0$, $\Delta\varphi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_0(x,y) = \varphi(x,y)$ 。参考条纹图像和变形条纹图像分别如图 2(b)和 2(c)所示,均为 512 pixel×512 pixel,每个像素大小为 1 mm×1 mm,参考条纹周期为 4 mm。按图 1(b)所示流程和方法进行数据处理获得莫尔条纹。

相乘运算的模拟实验结果如图 3 所示,图 3(a)是相乘运算的结果图像;图 3(b)是相乘运算结果图像的功率谱分布(频谱强度分布),从中可以清楚地看出(6)式所示的五个频谱成分;图 3(c)是带通滤波仅让正一级谱或负一级谱即(6)式中第 2 项或第 3 项通过后得到的莫尔条纹图样;(d)是低通滤波仅让零级谱即(6)式中第 1 项通过后得到的条纹图样。从图 3(c)、(d)可知,对于相乘运算,低通和带通均可获得莫尔条纹,但带通滤波莫尔条纹的衬比度更高。加减运算的模拟实验结果分别如图 4、5 所示。在图 4、5 中,(a)是相加运算或相减运算的结果图像;(b)是相加运算或相减运算结果图像的功率谱分布(频谱强度分布);(c)是带通滤波仅让正一级谱或负一级谱即(7)式中第 2 项或第 3 项通过后得到的莫尔条纹图样。比较 4(c)和图 5(c),可以看出相加和相减运算产生的莫尔条纹明暗反转。

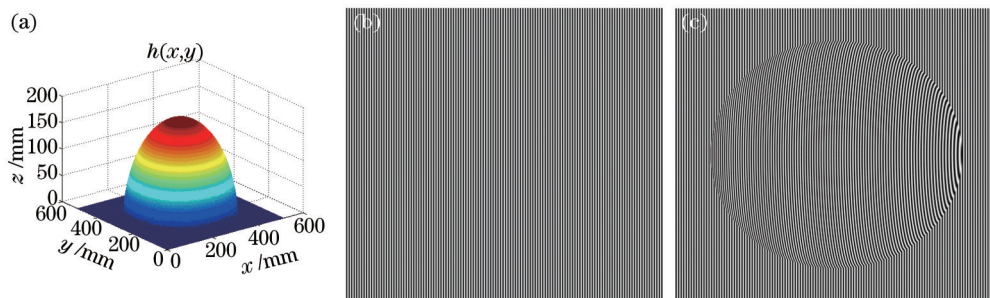


图 2 计算机模拟实验。(a) 表示待测物体面形高度分布函数 $h(x,y)$; (b) 参考条纹; (c) 变形条纹

Fig.2 Computer simulations. (a) Height distribution function $h(x,y)$ of the shape of measured object; (b) reference fringes;

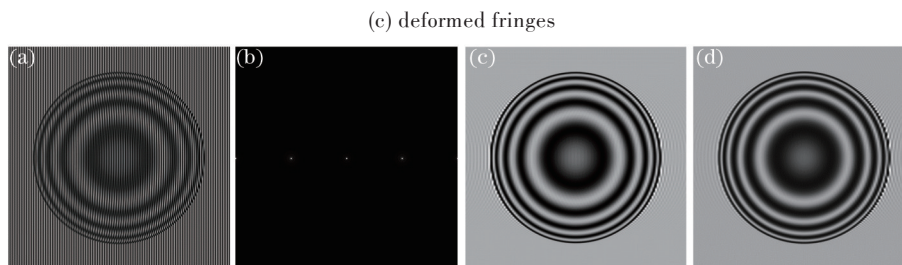


图3 相乘运算。(a) 结果图像;(b) 图3(a)的功率谱分布;(c) 带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过后得到的莫尔条纹;
(d) 低通滤波仅让零级谱通过后得到的莫尔条纹

Fig.3 Multiplication. (a)Resultant image; (b) power spectrum of Fig.3 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter selecting positive or negative part of the first-order spectrum

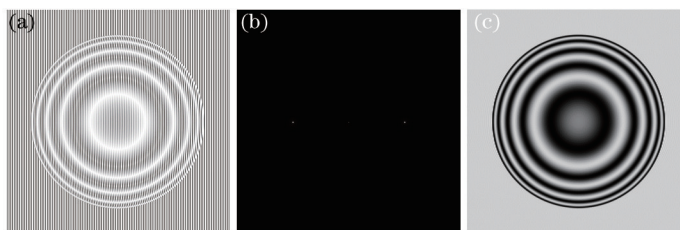


图4 相加运算。(a) 结果图像;(b) 图4(a)的功率谱分布;(c) 带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过后得到的莫尔条纹
Fig.4 Addition. (a) Resultant image; (b) Power spectrum of Fig.4 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter selecting positive or negative part of the first-order spectrum

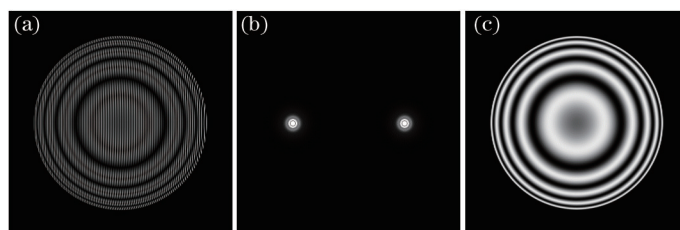


图5 相减运算。(a) 结果图像;(b) 图5(a)的功率谱分布;(c) 带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过后得到的莫尔条纹
Fig.5 Subtraction. (a) Resultant image; (b) power spectrum of Fig.5 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter selecting positive or negative part of the first-order spectrum

5 实验验证

实验装置的原理结构如图1(a)所示。待测物体是存钱罐的白胚,其高度和宽度分别约为250 mm和150mm;参考平面为投影幕布。投影仪(EPSON CH-TW 5200)分辨率为1920 pixel×1080 pixel;CCD相机(DH-SV2000FM)分辨率为1628 pixel×1236 pixel;二者沿竖直方向放置,并与计算机连接,分别用于投影和拍摄条纹图像。距离参数 $L=1000$ mm、 $D=300$ mm。采用Matlab编程产生余弦光栅条纹,并通过投影仪分别投射到参考平面和待测物体上。

图6(a)和(b)分别是参考条纹图像和变形条纹图像,二者都经过预处理只保留物体边沿轮廓范围内的条纹。相乘运算、相加运算、相减运算实验结果分别如图7~9所示,在图7~9中:(a)是参考条纹图像和变形条纹图像运算后的结果图像,(b)是结果图像的功率谱,(c)是采用带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过得到的莫尔条纹图样。图7(d)是相乘运算采用低通滤波仅让零级谱通过得到的莫尔条纹图样。为了更清楚地对不同方法获得的莫尔条纹进行比较,绘出了图7(c)和(d)、图8(c)、图9(c)中亮线处的一维强度分布,分别如图10所示;其中:图10(a)是相乘运算带通与低通获得的莫尔条纹一维强度分布的比较,图10(b)是相加运算带通与相乘运算带通获得的莫尔条纹一维强度分布的比较,图10(c)是相加运算带通与相减运算带通获得的莫尔条纹一维强度分布的比较。

从图10的比较结果可见:相乘运算下低通滤波获得的莫尔条纹的衬比度比带通滤波低,这是由于低频区

含有较多的无关信息。模拟实验中,由于采用理想余弦条纹,其背景强度、调制度及物体反射率都是均匀分布,因此对产生莫尔条纹的影响不明显。在此处的实际实验中,可以清楚看出背景强度、调制度及物体反射率的非均匀分布对条纹质量的影响。相加相减运算下带通滤波获得的衬比度比相乘带通滤波获得的莫尔条纹衬

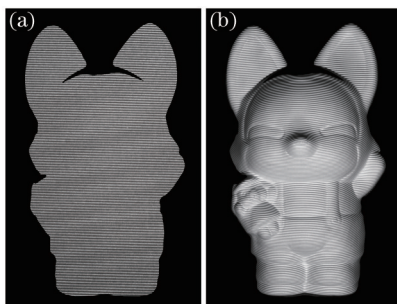


图 6 (a) 参考条纹图像; (b) 变形条纹图像

Fig.6 (a) Reference fringes; (b) deformed fringes

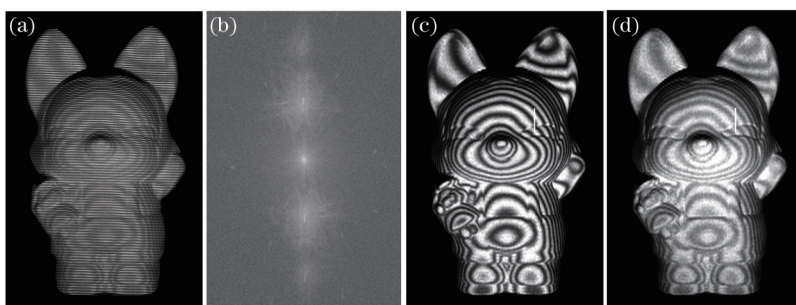


图 7 相乘运算。(a) 结果图像; (b) 图 7(a)的功率谱分布; (c) 采用带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过得到的莫尔条纹图样; (d) 采用低通滤波零级谱通过得到的莫尔条纹图样

Fig.7 Multiplication. (a) Primary resulting image; (b) power spectrum of the Fig.7 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter selecting positive or negative part of the first-order spectrum; (d) moire fringes obtained with low-pass filter selecting zero-order spectrum

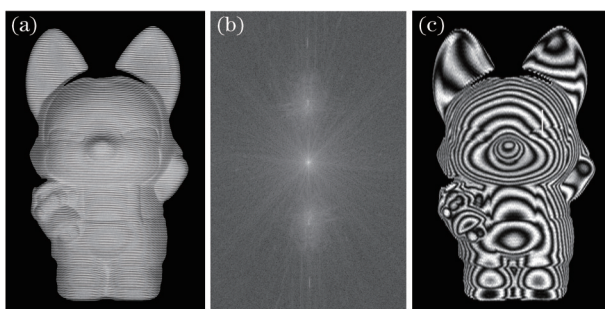


图 8 相加运算。(a) 初期结果图像; (b) 图 8(a)的功率谱分布; (c) 采用带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过时得到的莫尔条纹
Fig.8 Addition. (a) Primary resulting image; (b) power spectrum of Fig.8 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter selecting positive or negative part of the first-order spectrum

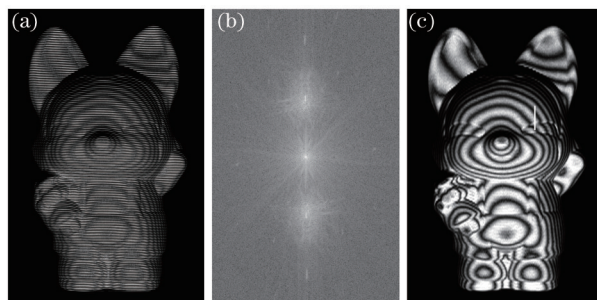


图 9 相减运算。(a) 初期结果图像; (b) 图 9(a)的功率谱分布; (c) 采用带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过时得到的莫尔条纹
Fig.9 Subtraction.(a) Resultant resulting image; (b) power spectrum of Fig.9 (a); (c) moire fringes obtained with band-pass filter

比度更高。相加运算与相减运算下带通滤波获得的莫尔条纹衬比度相当,相位相差 π ; 加减运算的结果图像的频谱比模拟实验中的复杂,实际操作中并没有放宽对滤波器的选择要求。验证了第3节的分析结论。

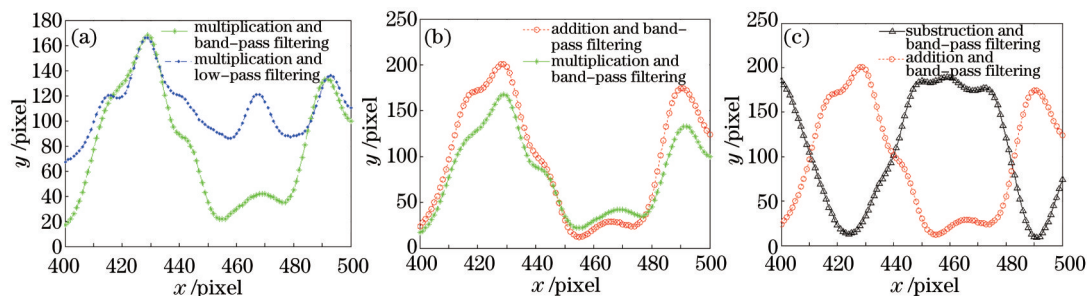


图10 不同运算不同滤波方式下获得的莫尔条纹比较。(a) 相乘运算低通滤波与带通滤波[图7(c)和图7(d)]; (b) 相加运算带通滤波与相乘运算带通滤波(图8(c)和图7(d)); (c) 相加运算带通滤波与相减运算带通滤波[图8(c)和图9(c)]

Fig.10 Comparison of moiré fringes obtained by different mathematical operations and different filtering methods. (a) Multiplication with low-pass filter and band-pass filter respectively [Fig. 7(c) and Fig. 7(d)]; (b) band-pass filter with addition and multiplication respectively [Fig. 8(c) and Fig. 7(d)]; (c) band-pass filter with addition and subtraction respectively [Fig. 8(c) and Fig. 9(c)]

6 结 论

本文对基于条纹图像算术运算和频谱滤波产生莫尔条纹的数字合成方法进行了深入研究,提出一种新的莫尔条纹数字合成方法,即带通滤波方法,并进行了实验验证。首先,分析了不同运算方法得到的运算结果图像的频谱成分和结构;然后,基于频谱分析,讨论了不同滤波处理方式产生莫尔条纹的特点。运算结果图像的频谱中包含不同的频谱成分,这些频谱成分在频谱面上的位置不同;合理选取投影条纹的空间频率使这些频谱成分在频谱面上位置分离,采用适当滤波方法可以分别得到不同的频谱成分;对不同的频谱成分再分别进行逆傅里叶变换、并与其共轭相乘,求出强度分布,可以得到不同的条纹分布图样。对于相乘运算,低通滤波和带通滤波均可产生莫尔条纹;但是,低通滤波产生的莫尔条纹中除了受到原条纹图像背景强度的影响之外,还叠加了强度较弱的两倍频条纹,这都会降低莫尔条纹的衬比度并使其偏离标准余弦分布,不利于条纹分析时的相位提取,而带通滤波方法不受这两项因素的影响;因此,对于相乘运算采用带通滤波仅让正一级谱或负一级谱通过是获得莫尔条纹的最佳方法。对于相加和相减运算,低通滤波不能产生莫尔条纹;采用带通滤波产生的莫尔条纹中,不仅没有两倍频条纹,而且没有原条纹图像背景强度的影响;因此,这两种运算均可产生比相乘运算质量更好的莫尔条纹。此外,加、减运算产生的莫尔条纹间有 π 相移,明暗条纹反转。计算机模拟实验和实际实验验证了上述分析结论的正确性及该方法的可行性和有效性。

实际测量应用中,照明光强度与待测物体表面反射率是否均匀及投影与拍摄系统的传递函数都会影响条纹图像背景强度与振幅调制度的均匀性。模拟实验中,上述因素假定为常数或理想状态,它们对莫尔条纹质量的影响不明显。而实际测量实验中,上述因素不再是常数或理想状态,它们对莫尔条纹质量造成的影响会更明显。加、减运算和带通滤波可以直接滤除原条纹图像背景强度不均匀造成的影响,所以,在实际应用中采用加、减运算和带通滤波可以获得更高质量的莫尔条纹。

参 考 文 献

- 1 Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical method[J]. Opt Eng, 2000; 39(1): 10-22.
- 2 R Leach. Optical Measurement of Surface Topography[M]. Berlin: Springer, 2011.
- 3 Stokely E M, Wu S Y. Surface parameterization and curvature measurement of arbitrary 3-D objects: five practical methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(8): 833-840.
- 4 Peng Xiang, Yin Yongkai, Liu Xiaoli, et al.. Phase-aided three-dimensional imaging and metrology[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900120.
- 5 Zhang Qican, Su Xianyu. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress,

- 2013, 50(1): 010001.
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010001.
- 6 Song Qian, Chen Yue, Zhu Ronggang, *et al.*. Research of 3D measurement technology based on gray code projection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031203.
宋 倩, 陈 悦, 朱荣刚, 等. 基于格雷编码投影的三维测量技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031203.
- 7 Tian Zixia, Chen Wenjing, Su Xianyu. Method for improving accuracy and neasurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121201.
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高PMP测量速度和精度的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121201.
- 8 Srinivasan V, Liu HC, Halioua Maurice. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach[J]. Appl Opt, 1985, 24(2): 185-188.
- 9 Takeda Mitsuo, Mutoh Kazuhiro. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Appl Opt 1983, 22(24): 3977-3982.
- 10 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: a review[J]. Opt & Lasers in Eng, 2001, 35(5): 263-284.
- 11 Takasaki H. Moiré topography[J]. Appl Opt, 1970, 9(6): 1467-1472.
- 12 Kjell J Gasvik. Optical Metrology (Third Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- 13 Patorski K. Handbook of the moire Fringe Technique[M]. Elsevier Science, 1993.
- 14 Yoshizawa T, Tomisawa T. Shadow moiré topography by means of the phase-shift method[J]. Opt Eng, 1993, 32(7): 1668-1674.
- 15 Mauvoisin G, Bremand F, Lagarde A. Three-dimensional shape reconstruction by phase-shifting shadow moiré[J]. Appl Opt, 1994, 33(11): 2163-2169.
- 16 Halioua M, Krishnamurthy R S, Liu H, *et al.*. Projection moiré with moving gratings for automated 3-D topography [J]. Appl Opt, 1983, 22(6): 850-855.
- 17 Harding K G, Harris J S. Projection moiré interferometer for vibration analysis [J]. Appl Opt, 1983, 22(6): 856-861.
- 18 Kjell J Gasvik. Moiré technique by means of digital image processing[J]. Appl Opt, 1983, 22(23): 3543-3548.
- 19 Torroba R, Tagliaferri A A. Precision small angle measurements with a digital moiré technique[J]. Opt Commun, 1998, 149(4): 213-216.
- 20 Asundi A. Moiré methods using computer-generated gratings[J]. Opt Eng, 1993, 32(1): 107-116.
- 21 Hao Qun, Ding Ling, Li Mengjuan, *et al.*. Moiré filtered compositive method used in digital moiré interferometry[J]. Optical Technique, 2006, 32(1):82-84.
郝 群, 丁 凌, 栗孟娟, 等. 用于数字莫尔干涉术的莫尔滤波合成法[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 82-84.
- 22 Yang Fujun, He Xiaoyuan, Sun Wei. Digital shadow moiré method with phase-shifting based on liquid crystal display projector[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1057-1061.
杨福俊, 何小元, 孙 伟. 基于液晶显示投影技术的数字影栅云纹相移实现方法[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1057-1061.
- 23 T Yatagai, M Ldesawa, Y Yamaashi, *et al.*. Interactive fringe analysis system: application to moiré contourgram and interferogram[J]. Opt Eng, 1982, 21(5): 901-909.

栏目编辑: 何卓铭