

数字仿真形貌影栅云纹法及实验系统的原理

云大真 云海 雷振坤

(大连理工大学工程力学系, 辽宁大连 116024)

摘要 基于影栅虚云纹场的概念, 提出并实现了对形貌影栅云纹法利用计算机布置影栅云纹仪各种光场, 自动生成高质量全场仿真影栅云纹图, 建立了一种数字仿真形貌影栅云纹法自动测量和处理一体化实验系统(全文简称为实验系统). 系统特别适合于作为形貌影栅云纹法误差分析的评估系统, 对光场布置不同的影栅云纹仪及其对应的相移值近似程度不一样引起的初始系统误差进行分析、预测和评估, 给出减少这种系统误差应遵循的准则.

关键词 形貌影栅云纹法; 影栅虚云纹场; 仿真技术; 误差评估

中图分类号 TN911-73; O348.12 **文献标识码** A

0 引言

由于机械零件和建筑结构物的设计与施工、地形地貌的测量、星际和隐蔽工程内部空间形貌的探测和遥测等现代工农业发展的需要, 促使了形貌测量与重建研究工作的萌生与发展, 并日益获得重视而浸透到医学、美容、侦察和辨伪等方方面面. 在已有的测量和处理方法中, 形貌影栅云纹法 (shadow moiré profilometry) 属于无接触光学方法, 因其测量范围和凹凸深度调节方便, 可大可小, 可深可浅; 受环境条件的影响较小; 有较稳定的精度, 结果精确度较高且操作方便等, 所以是当前研究的热点.

从近年许多应用形貌影栅云纹法测量形貌和重建的工作中, 不难发现在实际实验系统中生成影栅云纹图的都是采用影栅云纹仪中的点照射一点观测光场^[1~6], 而且它们所选取的主要光场参量, 如点光源 S (或观测点 C) 与参考栅 RG 的距离 d , S 与 C 的距离 f , RG 的栅间距 p 等, 一般都各不相同, 尚无一定的参考准则. 由理论分析可知, 即使是光场布置最简单的等距点照射——点观测 (等距 \dots) 光场, 在使用相移法获得条纹图时, 因相移量只能近似取值, 故不能满足各级条纹在全场获得均匀的相移, 所以在获得的形貌重建结果中, 必然带有因光场参量不规范和不统一而造成的初始系统误差, 这种误差随着光场的改变而变化, 致使数据采集产生的测量误差不能做正确的分析, 导致结果的精确度也不能做正确的对比和评定. 完善一个科学实验方法, 要解决最基本的问题之一就是其实验系统首先必须是稳定可靠的. 故本文针对形貌影栅云纹法的数字仿真原理与技术进行细致的专门研究, 并对其测量与处理实验系统中的初始系统误差进行分析, 进而

作出恰当的评估是必要的.

1 基本原理和技术

1.1 数字仿真影栅云纹图构思的形成与实现

1.1.1 构思的形成

人们在研究影栅云纹法 (shadow moiré method), 分析推导此方法中不同光场布置的离面深度 (off-plane depth) 或离面位移 W (off-plane displacement) 与影栅云纹级数 N (shadow moiré fringe order) 之间的关系时, 经历了一段从特殊到一般的认识过程. 各个时期针对不同的具体光场布置, 采用了各自不同的计算模式得到的 $W \sim N$ 关系式, 这样做虽然达到了用全场影栅云纹图中的 N 来确定对应的 W 的目的^[7], 但看上去它们是彼此孤立, 没有反映出各光场之间的联系和共性, 所以对自动构建数字仿真的全场云纹图的作用不大. 鉴于此, 这里基于影栅虚云纹场的概念^[8,9] 和同一坐标系来统一 $W \sim N$ 关系式的新推导 (见图 1), 从中揭示出各光场之间的联系和共性, 为自动生成数字仿真全场云纹图提供构思的原理基础.

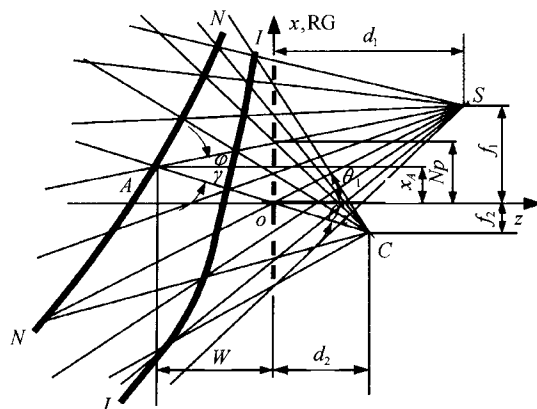


图 1 形成影栅虚(理想)云纹的几何干涉模式和坐标系
Fig. 1 The geometrical interference mode to produce the virtual shadow moiré fringes and the coordinate system

选择图1不等距点照射一点观测(不等距· · ·)光场代表影栅云纹仪中的一般光场. 图中参考栅RG的右侧是仪器光场布置的坐标和标识符号,坐标原点O要求设在RG栅线空隙中间;左侧是由该光场生成的等价于全场影栅云纹的各级影栅虚云纹N的位置坐标.

由图1的几何关系并令 $W = -z$, 可得到

$$W = \frac{(n-m)p}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) - (\frac{np}{d_1} - \frac{mp}{d_2})} = \frac{Np}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) - (\frac{np}{d_1} - \frac{mp}{d_2})} \quad (1)$$

式中 np 和 mp 分别是射线SA和CA与图1坐标系中的 x 轴, 即RG主方向的截距, $n=0, 1, 2, \dots, m=0, 1, 2, \dots$; p 为RG的栅间距, 全文所有的 $p=0.5 \text{ mm}$. 因为虚云纹等价于全场影栅云纹, 故式(1)中的 $n-m=N$ 为影栅云纹级数.

当图1中的 $d_1 = d_2 = d$, 就得到等距· · ·光场, 式(1)变为

$$W = \frac{Np}{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) - \frac{Np}{d}} \quad (2)$$

当式(1)中的 d_1, d_2 和式(2)中的 d 都趋近于 ∞ , 就得到平行照射—平行观测(//—//)光场, 这时有

$$W = \frac{Np}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (3)$$

式中, θ_1 和 θ_2 分别为照射和观测角度, 均等于常量.

至此可获得两个共识: 一是不同光场布置的影栅云纹仪是存在联系的, 在一定条件下可以由此及彼; 二是抓住利用影栅虚云纹 N 沿离面深度 W 空间位置的分布这一共性来推导 $W \sim N$ 关系式, 说明了各级影栅虚云纹与同一级全场影栅云纹二者的等价性, 进而解决用全场影栅云纹图中的各点 N 来计算与之对应 W 的问题. 既然可以利用二者的等价性对 $W \sim N$ 关系式作一般性的推导, 当然也可以利用二者的等价性, 把虚云纹分布通过仿真技术转化为全场影栅云纹图.

1.1.2 构思的实现

利用上述共识的概念, 通过下述步骤实现了在计算机上自动生成数字仿真全场云纹图这个关键性的难题: 1) 在计算机中布置所用的数字仿真影栅云纹仪光场; 2) 用相应的 $W \sim N$ 关系式计算出影栅云纹 N 在 $-z$ 方向上的空间位置分布和根据光强按余弦(或者正弦)分布, 用自编专用程序做出灰度条纹图, 它们都由数字仿真影栅云纹仪生成在计算机中, 如图2中(a)和(b), (a)为等距· · ·光场, $\theta_1 =$

$12^\circ, \theta_2 = 0^\circ, d = 1500 \text{ mm}$, (b)为//—//光场, $\theta_1 = 12^\circ, \theta_2 = 0^\circ$; 3) 根据 N 在 $-z$ 方向的空间位置和灰度分布图, 用自编专用程序在计算机中自动完成实现仿真的全场影栅云纹图, 图3是球面一部分在//—//光场中的仿真云纹图.

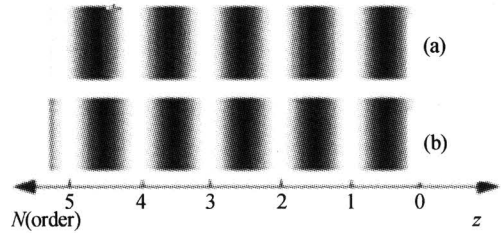


图2 N沿着一z方向的空间位置和灰度分布图
Fig. 2 Position and gray distribution of N along with -z

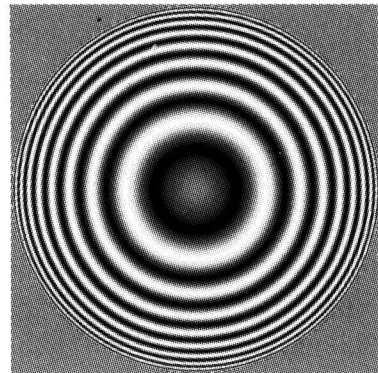


图3 一部分球面在//—//光场中的仿真影栅云纹图, $\theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = 0^\circ, p = 0.5 \text{ mm}$

Fig. 3 Simulated fringe pattern of shadow moiré on part sphere in //—// with $\theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = 0^\circ, p = 0.5 \text{ mm}$

曾把图3和图5等的仿真全场云纹图与我们研究中, 以及文献[1, 3, 6]等在光学机械平台上用影栅云纹仪得到的云纹图做过比较, 发现自动生成的仿真云纹图的质量很好, 云纹十分清晰且噪声很小.

1.2 实验系统的建立

1.2.1 实验系统

把1.1节仿真云纹图构成和实现的原理与程序作为数据的自动测量系统, 选择合适的相移法和参考有关形貌重建的方法^[10~13], 所建立的数字仿真形貌影栅云纹法自动测量与处理一体化实验系统如图4.

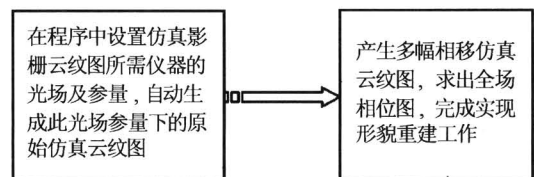


图4 数字仿真形貌影栅云纹法自动测量与处理一体化实验系统的框图

Fig. 4 The sketch of digitally simulated shadow moiré profilometry experimental system

1.2.2 相移法与相移值

一般地说, 有多种相移法可供选择, 但其效果却因所处理的问题而异. 对图4的实验系统, 选用在周

期 $[0, 2\pi]$ 内每步步长为 $\pi/2$ 的三等步相移法,即 $\delta\phi_1=0, \delta\phi_2=\pi/2, \delta\phi_3=\pi$ 和 $\delta\phi_4=3\pi/2$,可分别得到对应 $\delta\phi_i$ 下的光强 $I_i (i=1, 2, 3, 4)$,即4幅相移的影栅云纹图. 由式

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (4)$$

便可得到全场的相位分布,即全场相图. 经去包裹,便可得到相位连续分布的全场相图,进而重建物体的三维形貌图.

为了避免采用相移器导致增加实验的复杂性,可以采用变动仪器光场参量的方法将相移值 $\delta\phi_i$ 转化为对应的参量变化值实现相移. 对形貌影栅云纹法,理论上可以具体改变仪器光场参量中的 $f \rightarrow \delta\phi_f, d \rightarrow \delta\phi_d, p \rightarrow \delta\phi_p$ 和 $W \rightarrow \delta\phi_w$ (图1),但具有实际意义、最容易操作的是用 $\delta\phi_w$. 现以常用的等距 $\cdot\cdot\cdot$ 和 $\parallel\text{-}\parallel$ 光场来说明相移值对实验系统初始系统误差的影响.

对于等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场,文献[6]已给出

$$\delta\phi_w = \frac{2\pi}{p} \frac{fd}{(d+W)^2} \delta W \quad (5)$$

应该指出,式(5)中 $\delta\phi_w$ 与 δW 的关系是非线性的. 为了便于实际操作,考虑到 $W \ll d$,式(5)可近似写成

$$\frac{\delta\phi_w}{\delta W} = \frac{2\pi}{p} \frac{f}{d} \quad (6)$$

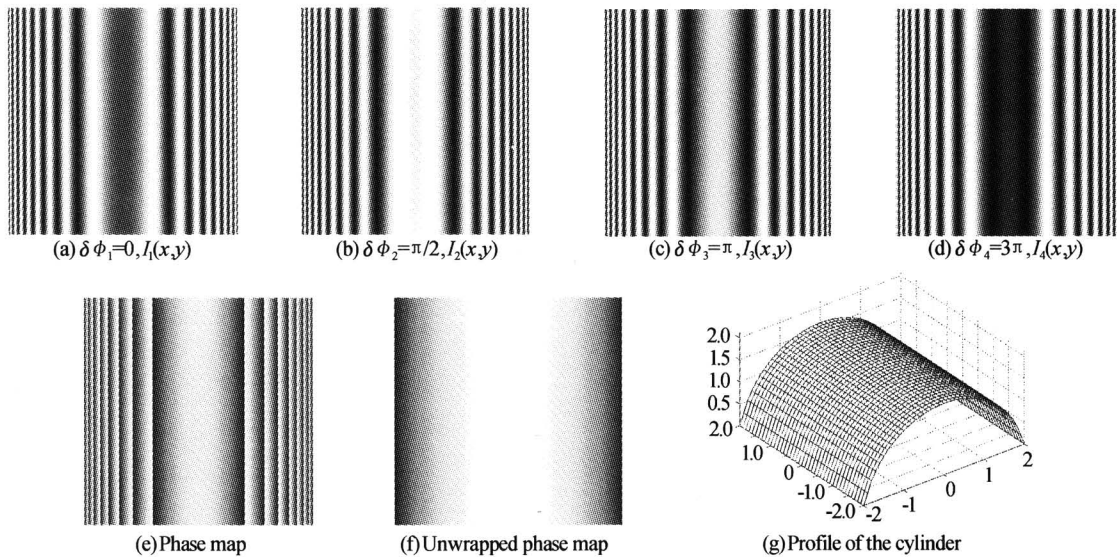


图5 用 $\parallel\text{-}\parallel$ 光场重建圆柱面形貌

Fig. 5 Reconstruction of the profile of the cylinder by the $\parallel\text{-}\parallel$ arrangement

2.2 等距点照射一点观测(等距 $\cdot\cdot\cdot$)光场

光场参量为: $\theta_1=15^\circ, \theta_2=0^\circ, f=392\text{ mm}, d=2500\text{ mm}$,RG的 $p=0.5\text{ mm}$. $\delta\phi_i$ 与 δW_i 的转换由式(6)计算. 步骤和运算过程与2.1节相同. 仅给出全场相图和重建圆柱体表面的三维形貌图(图6a和b).

2.3 两种光场结果的比较

定性地看,图5(e和g)与图6(a和b)似乎没有

这一简化处理,相当于把全场的 $\delta\phi_w/\delta W$ 看成常量,是近似相移值. 这样做虽便于操作,但是实验系统中必然引入初始系统误差.

对于 $\parallel\text{-}\parallel$ 光场,由式(3)得

$$\frac{\delta\phi_w}{\delta W} = \frac{2\pi}{p} (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \quad (7)$$

可见, $\parallel\text{-}\parallel$ 光场得到全场的 $\delta\phi_w/\delta W$ 是常量,为精确的相移值.

2 考题

均采用半径 $R=21.0\text{ mm}$ 的圆柱体来做考题的定标试件,以验证所建立的实验系统的正确性和不同光场参量会给该实验系统引入各异的初始系统误差.

2.1 平行照射—平行观测($\parallel\text{-}\parallel$)光场

光场的参量为:照射角 $\theta_1=15^\circ$,观测角 $\theta_2=0^\circ$,RG的 $p=0.5\text{ mm}$. 按1.2节所述的步骤,根据上述的三等步相移法的要求和计算程序等,得到的四幅相移的仿真影栅云纹图(图5a~d)、全场相图(图5e)、去包裹后相位连续分布的全场相图(图5f)和重建圆柱体表面的三维形貌图(图5g). 图5(a~d)中 $\delta\phi_i$ 与 δW_i 的转换由式(7)算出.

区别,但由精确定量计算所画出的图7可见,二者是有差别的. $\parallel\text{-}\parallel$ 光场的结果与真实的圆柱体表面完全重合,等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场,虽然 $d=2500\text{ mm}$,结果还是存在着一定偏差. 产生偏差的主要原因可以认为是由于在形貌重建过程中,所布置的等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场采用了近似的相移计算公式(6)而引起的,但 $\parallel\text{-}\parallel$ 光场则不存在这个问题,所以得到的结果非常趋近于精确解. 如果使等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场在设置上趋近于

//-//光场,这一偏差自然减少而趋近于精确结果. 多个实验都证实了上述结论,所以在形貌云纹法中,可以认为//-//光场是标准光场,其结果是精确解,可以用来检验和评估其它光场所获得结果精确程度. 这表明,该实验系统十分适用于作为形貌影栅云纹法的初始系统误差评估系统.

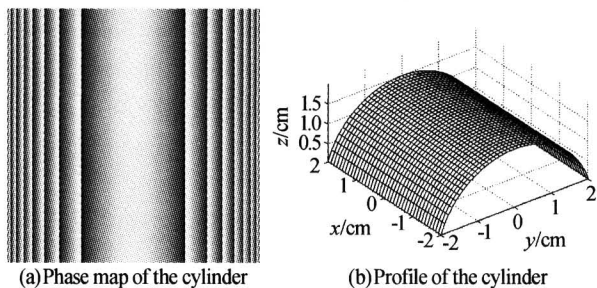


图 6 由等距 · · · 光场得到与 2.1 节相同圆柱体形貌重建结果

Fig. 6 Reconstruction of the profile of the same cylinder as the one in 2.1 by the · · · arrangement with $d_1 = d_2 = d$

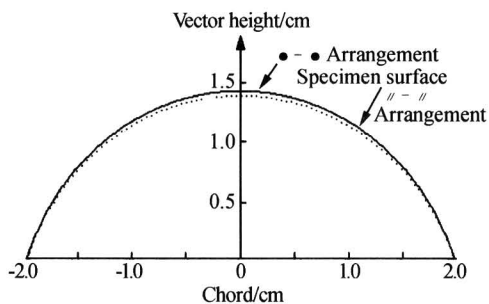


图 7 两种光场得到结果与真实圆球面的比较
Fig. 7 Comparison between the sphere profile results obtained from two arrangements and the real surface

3 不同参量等距 · · · 光场的初始系统误差分析与评估

除了用计算机能方便地仿真布置//-//光场以外,在光学机械平台上组装配套仪器中是很难实现//-//光场的,所以简便的等距 · · · 光场被广泛采用. 这就必然产生随仪器参量改变而变化的初始系统误差,致使彼此的结果不便相互比较,故针对常用的等距 · · · 光场的初始系统误差问题进行分析评估是一项基础性工作,可为今后研究和应用提供应遵循的准则,促进实验系统中影栅云纹仪设计和研制的规范化. 为了简化和便于说明问题,选择三种可以得到一般规律的等距 · · · 光场为例来进行分析. 定标试件仍用 $R = 21.0$ mm 圆柱体,相移值均按式(6)计算.

3.1 改变 d , 保持 f 不变

设 $\theta_2 = 0^\circ, f = 133.97$ mm, $p = 0.5$ mm, d 分别取 200 至 3000 mm. 目的是要了解等距 · · · 光场趋于//-//光场的 d 值. 计算得到 d 与图 7 顶点 A 的相对

误差 δ_A 的变化曲线如图 8(a),它表明由于 d 的增加使等距 · · · 光场趋近于//-//光场, δ_A 就降低;反之 δ_A 就增大. 对应这个光场要使 $\delta_A \leq 5.0\%$, d 就必须 ≥ 1200 mm,对应的 $\theta_1 \leq 6.37^\circ$.

3.2 改变 d , 保持 θ_1 不变

设 $\theta_2 = 0^\circ, \theta_1 = 15^\circ, p = 0.5$ mm, d 分别取 500~3000 mm. 目的与 3.1 节相同. 得到 δ_A 随 d 的变化规律如图 8(b). 可见,要使 $\delta_A \leq 5.0\%$ 就必须有 $d \geq 1100$ mm,对应的 $f \geq 297.74$ mm.

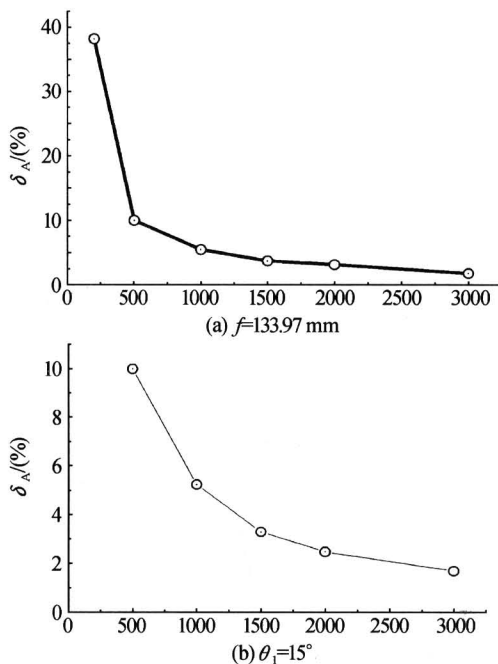


图 8 δ_A 随 d 的变化规律
Fig. 8 Relation between δ_A and d

3.3 d 保持不变, 改变 θ_1

设 $\theta_2 = 0^\circ$, 选定 $d = 2000$ mm, 改变 $\theta_1 = 10^\circ$ 至 25° . 目的是研究满足 $\delta_A < 5.0\%$ 的情况下, 选定某一 d 值时, 在 $\theta_1 \geq 10^\circ$ 以后, 改变 θ_1 可能引起的误差. 这时的 δ_A 随 θ_1 的变化规律如图 9, 可见, 虽然在选定满足 $\delta_A \leq 5.0\%$ 的 d 值, 但当 $\theta_1 > 20^\circ$ 时, δ_A 的增加突然变快. 这说明在布置等距 · · · 光场时, 不但选定的 d 要满足 $\delta_A \leq 5.0\%$, 而且同时还必须

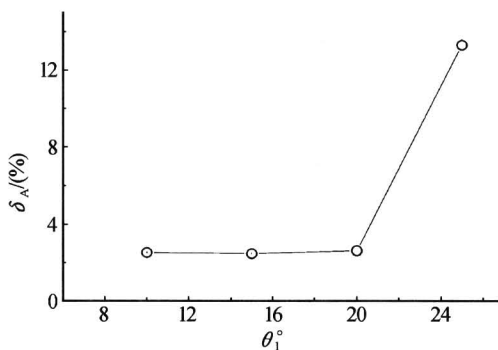


图 9 δ_A 随 θ_1 的变化规律 ($d = 2000$ mm)
Fig. 9 Relation between δ_A and θ_1

注意 θ_1 不能大于 20° 。

综上所述可知,在实验系统中,影栅云纹仪的等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场参量是不能随意选定的,选择不当可能会使整个实验系统带来不可预料或过大的初始系统误差,这对后继工作是很不利的。在一般正常情况下,为了保证实验系统的最大初始系统误差小于 5% ,在等距 $\cdot\cdot\cdot$ 光场中,RG 至点光源 S 和观测点 C 的距离,即参量 d 至少应在 1300 mm 至 1500 mm 之间,取 $d=1500$ mm 是恰当的;射线 SO 与 CO 的夹角 θ 应控制在 $6^\circ\sim 15^\circ$ 之间,取 $\theta=15^\circ$ 是恰当的。至于对某些不正常的特殊情况,也可以用本文方法进行评估。

4 结论与讨论

提出了在计算机中自动布置影栅云纹仪光场和自动生成仿真的全场影栅云纹图的基本原理和技术,并建立了数字仿真形貌影栅云纹法自动测量与处理一体化实验系统。由于本方法可以得到高质量的全场影栅云纹图和可以布置获得形貌重建趋近于精确解答的 $//$ - $//$ 光场实验系统,它可用于评估一些不能获得精确解答的同类系统,具体评估了在实验系统中常常采用的等距 $\cdot\cdot\cdot$ 影栅云纹仪光场,得到了控制其初始系统误差的关键数据,可供研究、应用和设计时参考。数字仿真形貌影栅云纹法是形貌影栅云纹法的发展与补充,将实际测量信息与仿真技术二者结合,对于进一步发展和完善形貌重建工作将是有意義的。

参考文献

- Moreno Years A. Moiré topography in odontology. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **40**(2): 143~152
- Quan C, Fu Y, Tay C J. Determination of surface contour by temporal analysis of shadow moiré fringes. *Optics Communications*, 2004, **230**(1): 23~33
- Yoshizawa T, Tomisawa T. Shadow moiré topography by means of phase-shifting method. *Optical Engineering*, 1993, **32**(7): 1668~1674
- Mauvoisin G, Bremand F, Lagarde A. Three-dimensional shape reconstruction by phase-shifting moiré. *Applied Optics*, 1994, **33**(11): 2165~2169
- Degrieck J, Paepegem W V, Boone P. Application of digital phase-shift shadow Moiré to micro deformation measurements of curved surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(1): 29~40
- Jin L H, Kodeizawa Y, Yoshizawa T, et al. Shadow moiré profilometry using the phase-shifting method. *Optical Engineering*, 2000, **39**(8): 2119~2123
- Kobayashi A S. Manual on experimental stress analysis. WESTPORT, CT. USA: SESA. 1978; 62~65
- 云大真, 于万明. 结构分析光测力学. 大连: 大连理工大学出版社, 1996. 81~84
Yun D Z, Yu W M. Photomechanics in structural analysis. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996. 81~84
- Yun D Z, Tao Z Q, Ren F S. Some problems concerning direct measurement of slope and curvature by means of the shadow moiré method. Proceedings of the joint conference on experimental mechanics. Honolulu-Maui, Hawaii: SESA/JSME, 1982. 160~164
- 徐建强, 等. 三维形貌测量的扫描相移法研究. 光子学报, 2004, **33**(10): 1210~1213
Xu J Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1210~1213
- 周灿林, 李方. 一种新的形貌检测系统标定技术. 光子学报, 2005, **34**(5): 761~764
Zhou C L, Li F. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 761~764
- 李方, 周灿林. 一种新的双频光栅轮廓术. 光子学报, 2005, **34**(4): 632~635
Li F, Zhou C L. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 632~635
- 钱克矛, 续伯钦, 伍小平. 光学干涉计量中的位相测量方法. 实验力学, 2001, **16**(3): 239~249
Qian K M, Xu B Q, Wu X P. *J Experimental Mechanics*, 2001, **16**(3): 239~249

Basic Principles of Digital Simulation Shadow Moiré Profilometry and Its Experimental System

Yun Dazhen, Yun Hai, Lei Zhenkun

Dept. of Eng. Mech., Dalian Univ. of Technol., Liaoning Dalian 116024

Received date: 2005-04-20

Abstract A digital simulation shadow moiré techniques is proposed that includes the auto-design of arrangements for shadow moiré instruments and the auto-production of shadow moiré fringe patterns by computer, based on the concept of the virtual shadow moiré field. A new experimental system of the digital simulation shadow moiré profilometry is also built up, which can not only be used to reconstruct profiles of object surface efficiently, but also be used as an error analysis and evaluation system. The parameters of several optical arrangement cases of the shadow moiré instruments were analyzed by using the experimental system. The key data of the arrangement parameters are provided, which play important roles in controlling the maximum original system relative error less than 5%. These data may be used for rationally designing shadow moiré instruments in the experimental system. The digital simulation shadow moiré profilometry proposed in this paper is helpful to promote the development and perfection of the whole shadow moiré profilometry.

Keywords shadow moiré profilometry; virtual shadow moiré field; simulation; error estimation



Yun Dazhen was born in 1932, in Hainan province, China. He is a professor of Dalian University of Technology. His research interests include optical non-destructive measurement, photoelasticity, digital image processing and mechanics measurement technique.