

文章编号: 0253-2239(2008)02-0355-06

基于声光栅的变频条纹投射系统

赵慧洁 曾俊钰 雷彦章

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 针对三维形貌测量中结构光照明系统投影速度慢、结构复杂、在线集成困难的问题,提出了一种基于声光栅的变频条纹投射系统。该系统利用拍频信号驱动声光偏转器,在声光晶体中形成两个重叠的光栅,光源发出的激光以布拉格角入射,形成两束一级衍射光,经透镜聚焦形成光强按正弦规律分布的结构光条纹。建立了数学模型,同时提出了一种新的相位凝固技术,使条纹空间频率和相位的变化规律得到了很好的解释。该系统结构紧凑、体积小,全电控可调,无任何机械移动部件,具有条纹投影速度快、精度高、动态可编程的特点。应用该系统对石膏像形貌进行测量,获得了用于三维成像的相位图。该投射系统对于解决复杂几何形状物体的三维测量问题具有较高的工程应用价值。

关键词 光学器件; 三维形貌测量; 结构光; 声光偏转器

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

Frequency-Varying Fringes Projector Based on Acoustic Grating

Zhao Huijie Zeng Junyu Lei Yanzhang

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract A new acoustic grating fringe projector (AGFP) was developed for solving the problems of the low speed, complex structure and hard on-line integration of the traditional structure light illuminator in three-dimensional (3-D) measurement. An acousto-optic deflector (AOD) driven by a beat frequency signal generated two overlap gratings inside the acousto-optic (AO) crystal and diffracted the incident laser beam into two first-order beams. The two first-order beams were brought together by a projection lens and the fringe pattern was generated by the interference of them. We established the math model of the fringe pattern and proposed a new method called 'phase freezing' to explain the changes of the spatial period and phase of fringes. The acousto-optic technique for producing fringe patterns provided a number of significant benefits, such as completely solid state, small scale, electronically control without any mechanical moving part, high precision and dynamic programmable ability. We obtained a precise phase map of a plaster statue with the device. The projection system is of great engineering value in high-accuracy three-dimensional non-contact complicated profile measurement.

Key words optical devices; three-dimensional shape measurement; structural light; acousto-optic deflector

1 引 言

在基于光栅投影的三维形貌测量系统中^[1],若采用传统的空间相展开方法,当被测物体存在不连续或梯度较大的表面时,就会产生解相错误,无法获得正确的连续相位分布。文献^[2~4]提出了将不同空间周期的条纹投射到被测物体表面进行测量的改进方法。该相位解算的方法需要多幅条纹图像,传

统产生结构光条纹主要有两类方法,激光干涉投影^[5]和白光光栅投影^[6];产生相位移动的主要方法是通过控制压电晶体的机械变形调整光程或投影光栅位置。上述方法很难动态和快速地改变结构光条纹的空间频率。并且由于都存在机械运动,相位移动的速度和可靠性受到很大的限制。基于数字光处理技术(DLP)的数字投影仪用来产生结构光^[7]为相

收稿日期: 2007-06-26; 收到修改稿日期: 2007-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(60678030)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0174)、教育部博士点基金(20040006033)、航空基础科学基金(05I51068)和航天创新基金资助课题。

作者简介: 赵慧洁(1966—),女,辽宁沈阳人,教授,主要从事视觉检查和信息处理等方面的研究。

E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

位测量三维轮廓术带来很大方便,它可以实现数字相移,具有很高的相移精度。然而由于数字投影产生的结构光受投影仪像素数目的限制,不可能产生较高空间频率的正弦条纹,限制了对微小物体的测量;另外,数字投影仪的核心器件微型反射镜(DMD)的刷新和采集不能同步控制,也会影响获取条纹图质量,造成测量误差^[8]。

针对以上问题,国内外学者提出了许多新的硬件装置^[9,10]。美国麻省理工学院林肯实验室的研究人员报道了一种声光波纹干涉测量技术,基于声光调制原理的三维成像系统^[9](Acousto-optic accordion fringe interferometry, AO-AFI),能够以视频速率完成任意形状物体的三维传感,且无任何机械移动部件。但其研究人员并没有将该声光条纹现象解释清楚。本文基于这一原理提出了一种声光栅变频条纹投射系统(Acoustic grating fringe projector, AGFP)。介绍了声光布拉格衍射原理,通过理论推导建立了数学模型,提出了一种新的相位凝固技术,使条纹空间频率和相位的变化规律得到了很好的解释。应用以上原理设计了变频条纹的投射和采集系统该系统,对石膏像形貌进行测量,获得了用于三维成像的相位图。

2 声光布拉格衍射

声光偏转器的基本原理是体光栅的布拉格衍射效应^[11],如图1所示。

射频(Radio frequency, RF)信号经压电换能器转化为超声波在声光介质中传播,介质在超声波传播方向受到压缩或伸长。若介质中的超声波沿 X 方向传播,则媒质粒子沿 X 方向的位移所引起的折射率应变可表示为

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n^3 p_{s_0} \cos(K_s X - \Omega_s t), \quad (1)$$

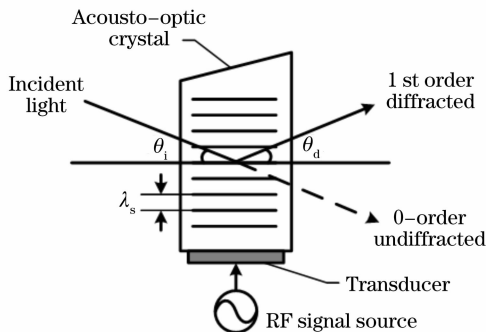


图1 声光布拉格衍射原理图

Fig. 1 Normal Bragg diffraction geometry

式中 n 为无声波时介质折射率, s_0 为应变幅值, Ω_s 和 K_s 分别代表超声波角频率和波矢。当一束光以 θ_i 角入射至该介质时,如果满足布拉格衍射条件 $\theta_i = \theta_B$ (其中 θ_B 为布拉格衍射角) 时,则有部分入射光以 θ_d 角衍射出来,根据布拉格原理可计算出衍射角

$$\sin \theta_i = \sin \theta_d = \sin \theta_B = \frac{\lambda}{2nv_s} f_s, \quad (2)$$

式中 λ 为光波波长, v_s 为超声在晶体中的速度, f_s 为超声频率。从(2)式可以看出,通过改变超声频率 f_s (即改变射频驱动信号的频率) 可以使衍射角 θ_B 的大小发生变化,从而改变光束的出射方向。布拉格衍射的衍射效率可表示为

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right], \quad (3)$$

式中 P_a 为超声功率,其值与加在压电换能器上的电功率等效; L 和 H 是压电换能器的长度和宽度; M_2 是声光优值。特别是当衍射效率不大时 ($\eta < 50\%$), $\sin x \approx x$, (3) 式可以简化为

$$\eta \approx \frac{\pi^2 M_2 L}{2\lambda_0^2 H} \cdot P_a, \quad (4)$$

这表明当超声功率较小时,衍射光强和超声功率为近似线性关系。

3 变频条纹数学模型

如图2,频率为 f_c 的基带信号和频率为 f_m 的调制信号被混合形成射频驱动源 ($f_c > f_m$), 驱动声光晶体,由(1)式知,此时声光晶体折射率的改变可表示为

$$\begin{aligned} \Delta n &= -\frac{1}{2}n^3 p_{s_0} \cos(K_c X - \Omega_c t) \cos(K_m X - \Omega_m t + \Phi_0) \\ &= \frac{1}{2}\Delta n_0 \{ \cos[(K_c + K_m)X - (\Omega_c + \Omega_m)t + \Phi_0] + \\ &\quad \cos[(K_c - K_m)X - (\Omega_c - \Omega_m)t - \Phi_0] \}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 Φ_0 为调制波的初相位, $\Delta n_0 = -\frac{1}{2}n^3 p_{s_0}$ 。由(5)

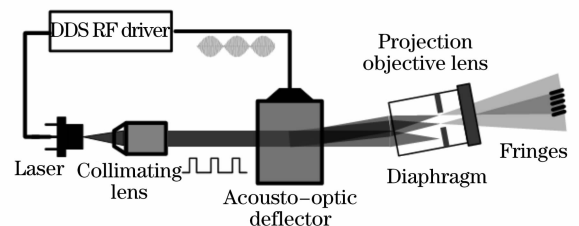


图2 声光栅条纹投射系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of acoustic grating fringe projector

式知,在声光晶体内部形成两个相互重叠的超声光栅。假设通过声光晶体的超声波复振幅分别为

$$A_1 = A_0 \exp\{i[(K_c + K_m)X - (\Omega_c + \Omega_m)t + \Phi_0]\}, \quad (6)$$

$$A_2 = A_0 \exp\{i[(K_c - K_m)X - (\Omega_c - \Omega_m)t - \Phi_0]\}, \quad (7)$$

式中 A_0 表示超声波的最大振幅。通过晶体的平面入射波复振幅为

$$E_0(z, t) = E_0 \exp[i(k_0 z - \omega_0 t)], \quad (8)$$

式中 E_0 表示平面波的最大振幅, ω_0 和 k_0 分别代表平面波角频率和波矢, z 为平面波传播的方向。当光子与声子之间的碰撞满足动量匹配条件时布拉格衍射才能发生, 此时有^[12]

$$k_i \pm K_s = k_d, \quad (9)$$

$$\omega_i \pm \Omega_s = \omega_d, \quad (10)$$

ω_i 和 k_i 为入射光波角频率和波矢, ω_d 和 k_d 为衍射光波角频率和波矢。取 +1 级衍射光则有

$$E_1(z_1, t) = E_{10} \exp\{i[(k_0 + K_c + K_m)z_1 - (\omega_0 + \Omega_c + \Omega_m)t + \Phi_0]\}, \quad (11)$$

$$E_2(z_2, t) = E_{20} \exp\{i[(k_0 + K_c - K_m)z_2 - (\omega_0 + \Omega_c - \Omega_m)t - \Phi_0]\}, \quad (12)$$

$E_1(z_1, t)$ 、 $E_2(z_2, t)$ 分别为入射光通过声光偏转器后的 +1 级衍射光的复振幅。如图 2 所示两个一级衍射光分别以不同的偏转角出射, 由 (2) 式知其夹角为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda\Delta f}{v_s} = \frac{\lambda \cdot 2f_m}{v_s}, \quad (13)$$

衍射光经投影镜头透镜聚焦后在像平面的光强分布为

$$I = \{\text{Re}[E_1(z_1, t) + E_2(z_2, t)]\}^2, \quad (14)$$

由于光电接收器(如 CCD)频率响应远跟不上极高的光频, 故上述光强表达式中可略去高频项, 由 (14) 式化简得到

$$I = \frac{E_{10}^2}{2} + \frac{E_{20}^2}{2} + E_{10}E_{20} \cos(2K_m Z - 2\Omega_m t + 2\Phi_0). \quad (15)$$

4 相位凝固技术

由 (15) 式知, 要获得稳定的干涉条纹图像必须使时间相位为固定值, 即

$$t = t_0 + \frac{n\pi}{\Omega_m}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (16)$$

分别取 $t_0 = 0, n = 1$ 得到 $t = \pi/\Omega_m$ 。考虑以频率为 $f = 1/t = \Omega_m/\pi = 2f_m$ 的脉冲电流调制激光器, 此

刻, 光束以 $t = \pi/\Omega_m$ 的时间间隔对声光偏转器照射, (15) 式变为

$$I = \frac{E_{10}^2}{2} + \frac{E_{20}^2}{2} + E_{10}E_{20} \cos(2K_m Z + 2\Phi_0), \quad (17)$$

表明出射的两束一级衍射光经透镜聚焦后得到了光强按正弦规律分布干涉条纹。分别调节调制信号频率 f_m 和初始相位的 Φ_0 大小, 可以灵活的对出射的结构光条纹空间频率和相位进行控制。同时, 由 (5) 式知此时声光晶体折射率的改变表示为

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \Delta n_0 \cos(K_c X - \Omega_c t') \times \cos(K_m X - \pi + \Phi_0), \quad (18)$$

式中 $t' = n\pi/\Omega_m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。(18) 式表明, 在声光晶体内形成了包络相位凝固不变的拍频超声相位光栅, 如图 3 所示。(17) 式所示的干涉条纹可视为光束通过上述拍频超声相位光栅后发生衍射的结果。这种通过频闪照明而获得具有包络相位凝固不变的拍频超声相位光栅的现象称为相位凝固技术。

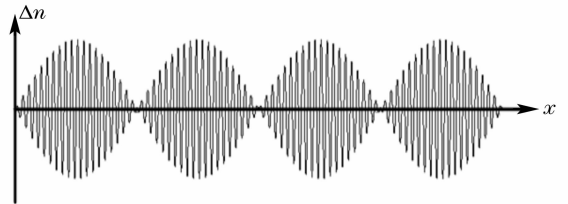


图 3 拍频超声相位光栅示意图

Fig. 3 Schematic of the beat-frequency acoustic phase grating

图 4 为声光晶体某一点 (x, y, z) 处脉冲照明光束将介质折射率相位锁定的示意图。如图所示, 脉冲光束以时间间隔 $t = \pi/\Omega_m$ 照亮声光晶体, 该脉冲光束宽度对干涉条纹平均光强的影响可由下式决定:

$$\langle I(x, y, z, \Phi_0) \rangle = 2f_m \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \eta(x, y, \Phi_0, t) I_0(x, y, z, t) dt, \quad (19)$$

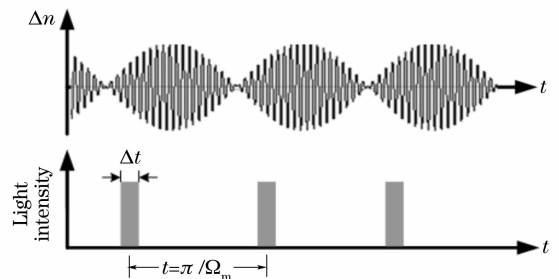


图 4 脉冲照明光束锁定介质折射率相位示意图

Fig. 4 Schematic of the phase of the refractive index was locked by pulse illumination

式中 t_0 为照亮声光晶体时刻, Δt 为脉冲光束持续时间, $\eta(x, y, \Phi_0, t)$ 为延迟相位 Φ_0 以后的声光晶体衍射效率, $I_0(x, y, z, t)$ 为照射的光束光强。一般情况下, 入射光束均匀地照亮声光晶体, 由(19)式知, 当脉冲光束持续时间 Δt 越短时, 条纹的光强分布就越接近声光晶体衍射效率 $\eta(x, y, \Phi_0)$ 的分布, 又由(4)式知

$$\eta \propto P_a \propto E^2, \quad (20)$$

式中 E^2 为射频驱动信号的电功率。由文献[11], 射频驱动信号电场强度 E 的变化与声光晶体折射率改变 Δn 相同, 也即 $E \propto \Delta n$, 故得到

$$\eta \propto \Delta n^2, \quad (21)$$

由(18)式计算知 Δn^2 是频率为 $2f_m$ 的正弦包络, 即当脉冲光束持续时间 Δt 取足够短时, 就会获得光强按严格正弦规律分布的干涉条纹。

5 声光栅变频条纹投射系统

声光栅投影系统如图 2, 主要由相干光源、准直镜、声光偏转器、投影镜头、直接数字频率合成器(Direct digital synthesizer, DDS)射频驱动源等部分组成。光源采用波长为 660 nm 激光二极管。声光偏转器工作波长从 488 nm 到 850 nm。高速脉冲激光经过准直镜以后成为平行光束, 以布拉格角入射声光偏转器。直接数字频率合成器驱动源提供给偏转器的混频信号通过压电换能器使声光晶体内形成两个重叠的超声相位光栅。采用相位凝固技术, 实现超声相位光栅的凝固, 形成投射到物体表面的结构光条纹。该声光栅投射系统可以产生并投射不同空间频率和相位的结构光条纹序列。

图 5 为基于直接数字频率合成技术的动态可编程射频驱动源原理图。驱动源由直接数字频率合成、时钟、混频器、可调增益放大器(Variable gain amplifier, VGA)、射频功率放大器、数模转换器(Digital analog converter, DAC)、通讯接口电路以及用于对整个驱动源进行控制的现场可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)组成。其中采用的直接数字频率合成芯片共有三路同步直接数字频率合成输出通道, 每个通道都可接受 32 bit 的频率控制字和 14 bit 的相位控制字输入, 频率范围 40 kHz~200 MHz, 最小频率步长为 0.116 Hz, 相位移动误差为 0.02° , 频率和相位转换时间小于 75 ns。可调增益放大器增益调节范围为 11.6~46.5 dB。射频功率放大器增益大于 24 dB, 带宽为 50~450 MHz。直接数字频率合成芯片用于合成三

路射频驱动信号: 其中两路接至混频器, 分别为声光晶体中心频率 f_c 和调制频率 f_m ; 这两路信号混频后, 根据(4)式, 通过对可控增益放大器增益的调节, 可以改变超声功率, 从而对投射条纹的亮度进行控制; 混频信号经过射频功率放大器完成功率的放大; 同时, 调制频率的初始相位可以根据测量的需要进行改变。另一路输出为激光器脉冲信号, 由(16)式知, 该脉冲信号和调制频率信号必须为同步信号, 满足严格的倍频关系, 该脉冲信号宽度可调。驱动源通过时钟频率为 100 MHz 的现场可编程门阵列进行控制, 具有高速频率转换、高分辨力、低相位噪声以及输出信号易数字式调制等特点, 并具有长期稳定和高速可编程能力。克服了传统锁相环技术环路建立时间较长和调频分辨力较低的缺点。通过编程改变相位累加器的频率控制字和相位控制字, 可以确定输出信号的频率和相位值。

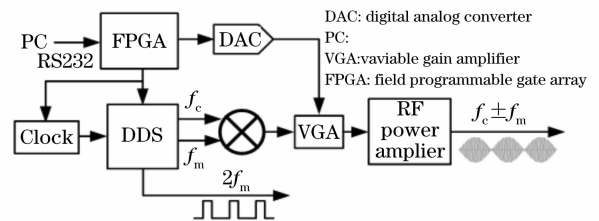


图 5 基于直接数字频率合成技术的动态可编程射频驱动源
Fig. 5 Block diagram of direct digital synthesizer based dynamic programmable RF driver

6 实验和数据处理结果

变频条纹投射和采集系统如图 6 所示。图像采集系统使用 768×576 图像采集卡, 摄像部分使用低照度的 CCD 摄像机。投射系统和成像系统中心距离为 $d=200$ mm, 参考平面到成像系统中心距离为 $l=500$ mm。

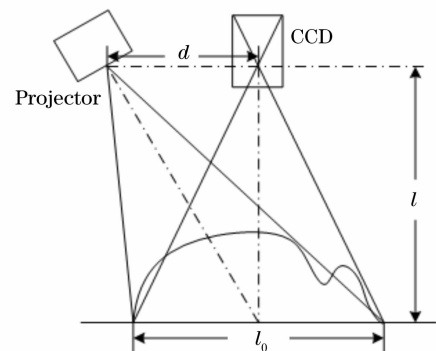


图 6 变频条纹投射和采集系统
Fig. 6 Projection and acquisition system of variable-frequency fringe patterns

系统的整个工作过程均通过软件控制自动完成:1)根据待测物体表面的反射率和周围环境情况,通过计算机串口向投射系统发出指令调节驱动器输出电功率,改变条纹的投射亮度;2)向投射系统写入频率控制字,投射系统将相应空间频率的结构光条纹投射到待测物体表面,同时传递给 CCD 摄像机一个触发信号,控制图像采集卡完成一幅条纹图像的采集;3)收到图像卡采集完毕发出的反馈信号后依次向投射系统写入变化了的相位控制字,使投射到物体表面的结构光条纹发生相位的移动,同时完成条纹图像的采集工作。根据具体的测量要求^[2~4],重复步骤 2),3),即可完成所有变频条纹的投射及采集。

图 7 所示为投射条纹空间频率和相位变换的图像。为了验证该系统的性能,以表面相对比较复杂,存在较大不连续性的石膏人脸像作为探测目标进行了实验。根据外差解相的原理^[2],一般选取三级条纹即可使最后得到的虚拟条纹满足覆盖整个视场的要求,实验中选取了周期分别为视场的 1/70, 1/64, 1/59 的一组条纹。另外,由(16)式知,投射条

纹的周期与系统的调制频率成反比,当系统调制频率为 0.05 MHz 时,对应的条纹周期刚好能够覆盖整个视场,所以对应实验中的条纹周期分别为 3.5 MHz, 3.2 MHz, 2.95 MHz。实验过程如图 8 所示,条纹结构光序列投射到被测物表面。为获得光强具有较好正弦性的结构光条纹,根据(4)式,通过调节驱动信号的电功率,将衍射效率控制在 50% 以下。图 9 为通过外差相位解算^[2]得到的相位图结果。

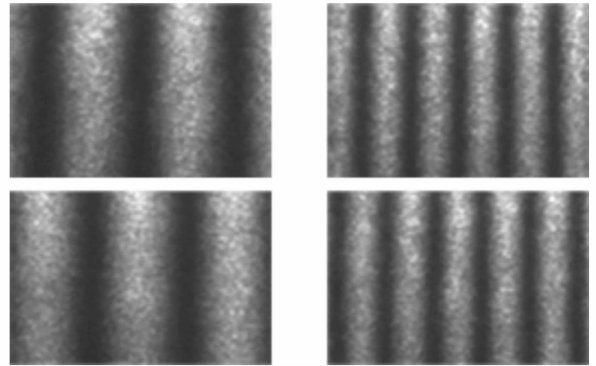


图 7 条纹空间频率和相位变换图

Fig. 7 Fringe patterns with different spatial frequencies and phases

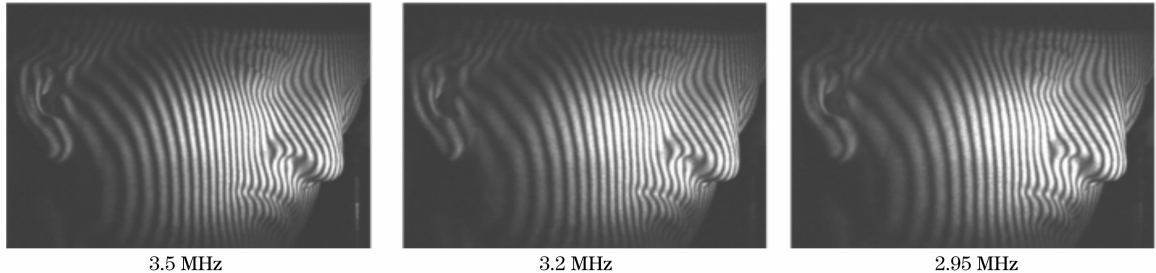


图 8 变频条纹图像的投射和采集

Fig. 8 Projection and acquisition of the variable-frequency fringe patterns



图 9 石膏像相位展开图

Fig. 9 Unwrapped phase map of the plaster statue

7 结 论

提出了一种声光栅变频条纹投射系统,建立了

数学模型,并运用了一种新的相位凝固技术解释了系统的工作过程。该系统结构紧凑、体积小,全电控可调,无任何机械移动部件,具备高速动态可编程能力,投射条纹的空间频率、相位和亮度可灵活的现场更改、配置。实验结果表明该系统对于解决复杂几何形状物体的三维测量问题是一种有效的技术。

参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Carsten Reich, Reinhold Ritter, Jan Thesing. White light heterodyne principle for 3D-measurement [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3100**: 236~244
- 3 Peng Xiang, Qiu Wenjie, Wei Linbin *et al.*. Phase decoding based on temporal-spatial phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 43~48

- 彭 翔,邱文杰,韦林彬 等. 相位解码的时-空重建算法[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 43~48
- 4 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
- 潘 伟,赵 毅,阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 687~691
- 5 R. Hebert, M. Rioux. Toward a hand-held laser range scanner: integrating observation-based motion compensation[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3313**: 2~13
- 6 Peng Xiang, Zhang Zonghua, Zhu Shaomin *et al.*. 3-D digital imaging system based on white-light digital Moiré [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1401~1405
- 彭 翔,张宗华,朱绍明 等. 基于白光数字莫尔的三维光学数字成像系统[J]. 光学学报, 1999, **19**(10): 1401~1405
- 7 Henrik O. Saldner, Jonathan M. Huntley. Profilometry by temporal phase unwrapping and spatial light modulator-based projector[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(2): 610~615
- 8 Li Yong, Su Xianyu, Wu Qingyang. Study of effect on the phase measuring profilometer to the spatiotemporal characteristic of DMD[J]. *Laser J.*, 2005, **26**(3): 57~58
- 李 勇,苏显渝,吴庆阳. 数字微镜器件的时空特性对相位测量轮廓术影响的实验研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(3): 57~58
- 9 Michael S. Mermeister, Daniel L. Feldkhum, Lyle G. Shirley. Video-rate surface profiling with acousto-optic accordion fringe interferometry[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 106~113
- 10 Klaus-Peter Proll, Jean-Marc Nivet, Christoph Volland *et al.*. Application of a liquid-crystal spatial light modulator for brightness adaptation in microscopic topometry[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(1): 6430~6435
- 11 Xu Jieping. *Principle, Design, and Applications of Acousto-Optic Devices* [M]. Beijing: Science Press, 1982. 56~67, 166~180
- 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 56~67, 166~180
- 12 Akis P. Goutzoulis. *Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices* [M]. New York: Marcel Dekker, 1994. 4~15