

光纤干涉投射实时傅里叶轮廓术的研究

张 超 段发阶 邢明浩 胡 博

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 基于光纤干涉投射技术,采用马赫-曾德尔光纤干涉仪结构产生杨氏双孔干涉条纹,同时通过高速 CMOS 相机采集变形条纹图像,并传输至计算机,利用实时视觉库 OpenCV 实现了自动化的高速条纹图像处理。采用旋转矩形窗算法实现滤波窗口自动选择,对多种相位解包裹算法进行了探讨,总体时间算法复杂度为 $O(n \lg n)$,测量时间小于 200 ms。通过视觉标定,测量精度为 0.2 mm。

关键词 计算机视觉;实时傅里叶轮廓术;光纤投射;视觉标定;自动条纹图像处理

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0207001

Fiber-Optic Interferometer Projection of Real-Time Fourier Profilometry

Zhang Chao Duan Fajie Xing Minghao Hu Bo

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Fringe using optical fiber which is from Young's double hole interference theory and by formation of Mach-Zender interferometer are projected. At the same time, the deformed fringe images is taken by a high speed CMOS camera. By means of computer vision, automated high-speed fringe image processing with the help of open source computer vision (OpenCV) is achieved. Rotating rectangular algorithm is proposed to the automated selection of Fourier filtering window. A variety of phase-unwrapping algorithm is discussed. The overall time complexity of the algorithm for the measurement is $O(n \lg n)$ and the measurement time is less than 200 ms. By visual calibration, RMS error is 0.2 mm.

Key words computer vision; real-time Fourier transform profilometry; fiber optical projection; visual calibration; auto-stripe image processing

OCIS codes 070.0070; 070.2575; 120.0120

1 引 言

基于传感技术的计算机视觉系统的目标是实现全场下的实时、高精度(稳,快,准)三维重构(马尔视觉理论)。光纤由于体积小,稳定性高,抗电磁辐射能力强,灵敏度高,且应用成熟,价格低廉,成为目前传感技术的首选材料之一。

光纤三维传感分为光纤傅里叶变换轮廓术^[1]、光纤全息干涉测量法^[2]、光纤散斑测量法^[3],光纤相移轮廓术和光纤主动三角法(结构光法)等。由于全

息测量对环境要求严格,而散斑测量要求物体表面粗糙,所以在全场高精度实时光纤三维传感方面,常采用光纤傅里叶变换轮廓术和光纤相移轮廓术来实现。对于条纹投射装置,传统方式多采用光栅投影并结合机械平移装置实现,该方式条纹密度与相移精度都相对较低;采用数字投影仪(DLP)投射条纹,条纹图由计算机生成,相移精度高,但条纹密度受投影仪的限制,导致测量精度较低;采用光纤干涉投射条纹,可提高条纹密度,进而提高测量精度,便于实

收稿日期: 2010-02-26; 收到修改稿日期: 2010-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(50375110)、国家重点实验室探索课题和教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介: 张 超(1984—),男,博士研究生,主要从事计算机视觉与光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: chao_zhangchao@163.com

导师简介: 段发阶(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事测试计量技术及仪器、激光及光电测试技术、计算机视觉检测技术、光纤传感技术和自动控制技术等方面的研究。E-mail: fajieduan@126.com

现高分辨率分析,但条纹相位的稳定和精确相移的实现是技术难点。C. R. Mercer^[4]采用双光纤通过透镜聚焦后形成干涉,测量范围受透镜孔径影响。Timothy L. 等^[5]利用光纤耦合器干涉投射,结构紧凑。林晓艳等^[6]利用三光纤投射,并对三光纤空间位置进行了分析。范华^[7]采用光纤耦合器实现了变频投射,实现了高精度解相。Karahana Bulut 等^[8,9]采用四芯光纤投射,并且对模型进行了分析,但是光纤需要专门加工。Takeda 等^[10]提出了利用傅里叶变换与频域滤波求取相位场的方法,该方法只需一幅图像,但是使用快速傅里叶变换(FFT)会产生泄露、混淆和栅栏效应引起的误差。Giuseppe Schirripa Spagnolo 等^[11~13]通过光纤傅里叶变换轮廓术在文物保护,振动测量和生物医学方面得到应用,取得良好效果,但未能实现对环境干扰的主动控制,测量精度不高。

课题的提出是根据国家重大科技专项等科学和工程技术研究课题所涉及的若干关键科学和技术问题中对微小型化和轻量型等技术特征的需求,无法由现有的成熟视觉探测技术和系统集成技术进行简单地移植,需要对特殊的机理进行创新性研究。文中采用光纤条纹投射,结合计算机视觉技术,通过傅里叶轮廓术,提出了旋转矩形窗自动选择算法,实现了实时三维测量,通过对各种参数的标定,均方根(RMS)误差为 0.2 mm。

2 测量原理

系统如图 1 所示。利用 3 dB 光纤耦合器构成马赫-曾德尔干涉仪,满足杨氏双孔干涉条件。投射系统采用氦氖激光器, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,两孔距离为 $22 \mu\text{m}$,标定方法参考文献[14],条纹投射端通过光纤夹固定,为了减少环境干扰,光纤输出臂等长切割。

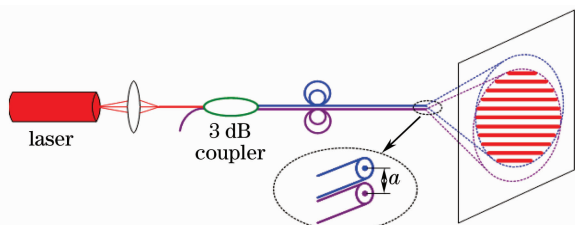


图 1 条纹投射系统原理图

Fig. 1 System diagram of fringe projection

如图 2 所示建立坐标系,在 XYZ 坐标下光纤中心坐标分别为 $(0,0,0)$ 和 $(0,a,0)$,根据杨氏干涉理论在 UVZ 平面上产生干涉,在 P 点的干涉场为

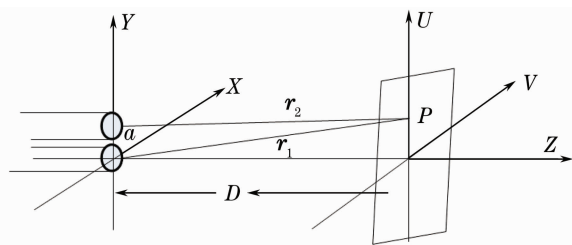


图 2 条纹分析

Fig. 2 Fringe analysis

$$U(P,t) = U_1(P,t) + U_2(P,t), \quad (1)$$

式中 $U_1(P,t), U_2(P,t)$ 分别为两光纤出射的线偏振光矢量,偏振相对角度分别为 θ_1 和 θ_2 ,由于光纤芯径只有 $4 \mu\text{m}$,接收屏离光纤端面较远时,光纤 1 和光纤 2 可等效为点光源。由光纤 1 出射光的初始振幅为 U_1 ,满足傍轴条件时

$$U_1(P,t) = \frac{U_1}{D} \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}_1 + i\varphi_1) \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 φ_1 为出射初相角, \mathbf{k} 为波矢。

由光纤 2 出射光的初始振幅为 U_2 ,在球面坐标系下,满足傍轴条件和远场条件时

$$r_2 = D + \frac{U^2 + V^2}{2D} + \frac{X^2 + Y^2}{2D} - \frac{UX + VY}{2D}, \quad (3)$$

$$U_2(P,t) = \frac{U_2}{D} \exp\left(i\mathbf{k}\mathbf{r}_1 - i\mathbf{k} \frac{UV + VY}{2D} + i\varphi_2\right) \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 φ_2 为出射初相角

$$U(P,t) = [U_1(P,t) + U_2(P,t)][U_1(P,t) + U_2(P,t)]^* = \left(\frac{U_1}{D}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{D}\right)^2 + 2\frac{U_1}{D}\frac{U_2}{D} \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2) \cos\left(ik \frac{UX + VY}{D} + i\Delta\phi\right), \quad (5)$$

式中 $\Delta\phi$ 为初相差。

图 3 为干涉条纹投射距离 D 分别为 15, 20 和 100 cm 满足远场近轴条件下的光面模型,由图中可看出随着场距增加条纹光面的线性度增强。

系统模型如图 4 所示,选取摄像机镜头光学中心作为原点, x 轴平行摄像机像素水平方向, y 轴平行摄像机像素垂直方向, z 轴沿摄像机光轴方向。光纤投射器中心位于 $P(L,0,0)$,与原点相距基线距离 L 。光纤投射器投射的条纹与 y 轴方向平行,0 级条纹所在光面与 x 轴夹角为 β_0 。

投射角度为 β 的条纹图上点 $S(x,y,z)$ 的坐标满足式

$$x \sin \beta - z \cos \beta = L \sin \beta, \quad (6)$$

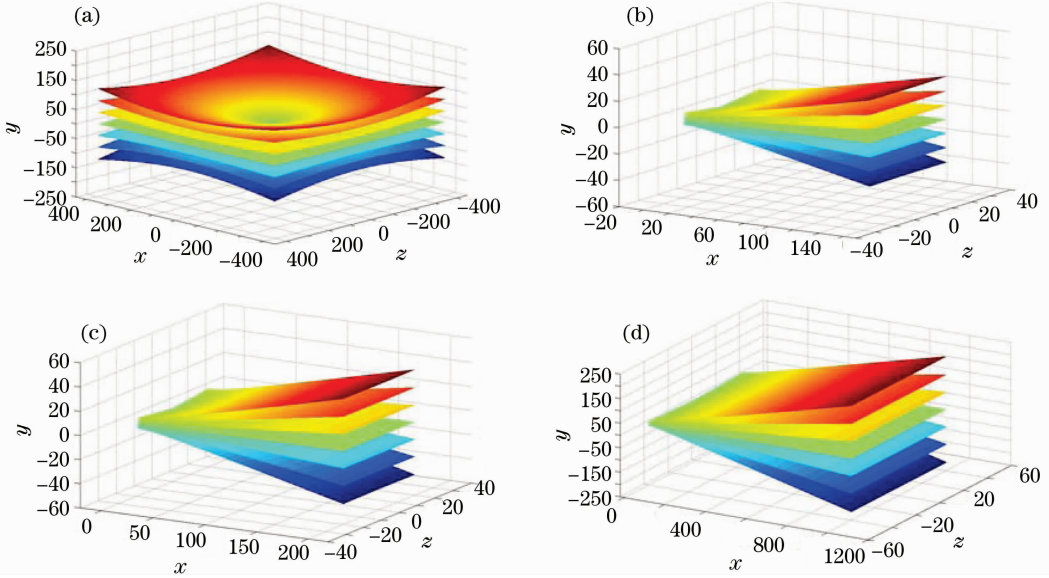


图3 干涉条纹光面模型。(a)一般情况下光面模型,(b)场距 15 cm 时光面模型,(c)场距 20 cm 时光面模型,(d)场距 100 cm 时光面模型

Fig. 3 Model of fringe by interference. (a) generally model, (b) field away from the fiber end is 15 cm, (c) field away from the fiber end is 20 cm, (d) field away from the fiber end is 100 cm

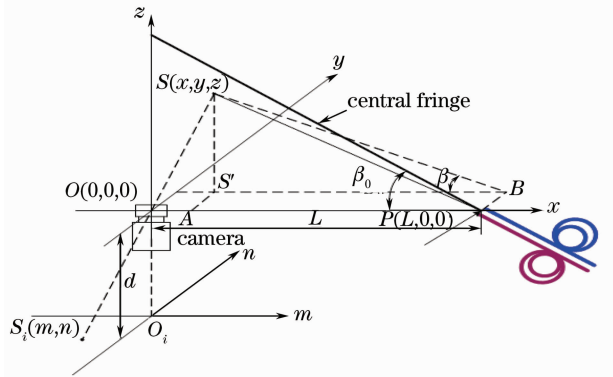


图4 系统测量原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the measuring system

点 S 在摄像机像平面中所成的像点为 $S_i(m, n)$, 其中 m, n 分别为水平与垂直方向像素序号[中心像素坐标为 $(0, 0)$]。根据摄像机针孔透视变换模型, S 与 S_i 之间的关系可写为

$$\frac{x}{m} = \frac{y}{n} = \frac{z}{d}, \quad (7)$$

式中 d 为透镜中心到像面距离。可得 S 与 S_i 之间坐标关系可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{mL}{m - dc \tan \beta} \\ y = \frac{nL}{m - dc \tan \beta} \\ z = \frac{dL}{m - dc \tan \beta} \end{cases}, \quad (8)$$

条纹投射角度 β 与相位场关系为

$$\varphi(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda} a \tan(\beta - \beta_0), \quad (9)$$

式中 a 为两光纤距离, 当干涉条纹相位被检测到后, 利用(9)式可求得 β , 从而利用(8)式求得 S 点的坐标。条纹相位的解调可利用傅里叶变换法。

摄像机获取的条纹图像可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (10)$$

(10)式可重写为

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x), \quad (11)$$

式中

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\varphi(x, y)], \quad (12)$$

式中 $g(x, y)$ 对 x 的傅里叶变换为

$$\mathcal{G}(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f - f_0, y),$$

滤出频谱中的 $C(f - f_0, y)$, 从而得到基频成分, 并将其移回原点做反变换得到 $c(x, y)$, 求出 φ

$$\tan \varphi(x, y) = \frac{\text{Re}[c(x, y)]}{\text{Im}[c(x, y)]}. \quad (13)$$

3 自动窗口选择和实时性分析

3.1 旋转矩形窗自动选择算法

傅里叶轮廓术中滤波窗口通过提取载波条纹频率附近的频谱, 获得物体的频谱信息, 由于物体轮廓的多样性, 条纹处理自动化一般很难实现, 通常通过

人机交互取得。其中载波条纹频率的精确定位是窗口选择的关键。由频谱的对称性,只需考虑右半平面载波条纹频率。通过求解载波条纹频率,构建矩形窗滤波器。算法为:首先通过将干涉条纹图 FFT 变换到频域中,求取频谱全局最大值,获得零频中心

值,并将其周围像素的频率值赋零,再次求解频谱全局最大值,由于频谱对称性,保留右上值,获得载波条纹的空间频率,通过比较零频中心值,获得偏移量和关于水平轴的旋转量,构建矩形滤波器,如图 5 所示。

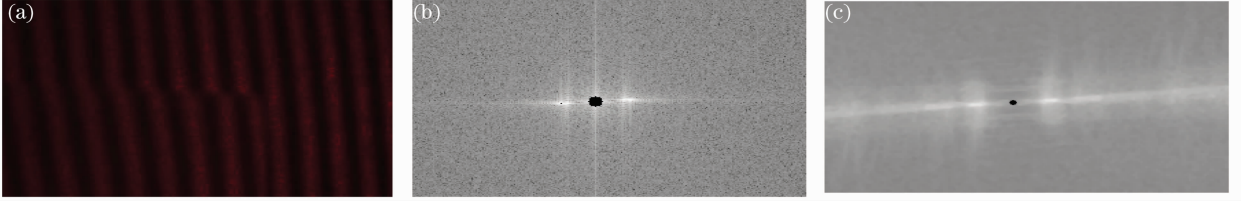


图 5 旋转矩形窗自动选择算法。(a) 采集的原图,(b) FFT 变换图,(c) FFT 反变换滤波窗口图

Fig. 5 Rotating rectangular window auto-selection algorithms. (a) collected original image, (b) FFT transform diagram, (c) IFFT transform filter window diagram

图 5(c)中是提取载波条纹频率附近频谱的矩形窗滤波器。

冗余和硬件原因,整体运行时间小于 200 ms,达到实时应用范围。

3.2 实时性分析与相位解包裹

3.3 投射角度 β_0 与基线长度 L 标定

相位解包裹分为时域和空域计算方法,时域计算量大,属于帧间计算。空域算法分为基于区域的计算方法和全局计算方法。基于区域计算时间长,而且与图像有关,不适合实时应用,通过比较各种算法,大部分算法的时间复杂度为 $O(N^2)$ 。采用基于离散余弦变换(DCT)最小二乘拟合计算方法^[15],将整个条纹处理时间复杂度控制在 $O(n \lg n)$,且与图像内容无关。

如图 6 所示,第 0 级条纹所在光面与量块表面相交得到一条直线,直线两端点为 A_1, B_1 。当量块由移动平台带动沿 z 轴方向移动的时候,将会产生一系列的端点,上方端点(A_1, A_2, \dots, A_n)与下方端点(B_1, B_2, \dots, B_n)分别组成两条直线。由于量块上下两边平行,因此两条直线平行。这些点的像点在像平面中同样组成两条直线,但是两条直线并不平行并且相较于消影点。消影点 $V(m_v, n_v)$ 对应无穷远点的像点,将 (m_v, n_v) 代入到(8)式中,使分母都为 0,从而得到

$$m_v - d \cdot \cot \beta_0 = 0 \Rightarrow \beta_0 = \operatorname{arccot} \left(\frac{m_v}{d} \right), \quad (14)$$

由(8)式且 $dm=0$,则条纹光面与量块交线的像长度

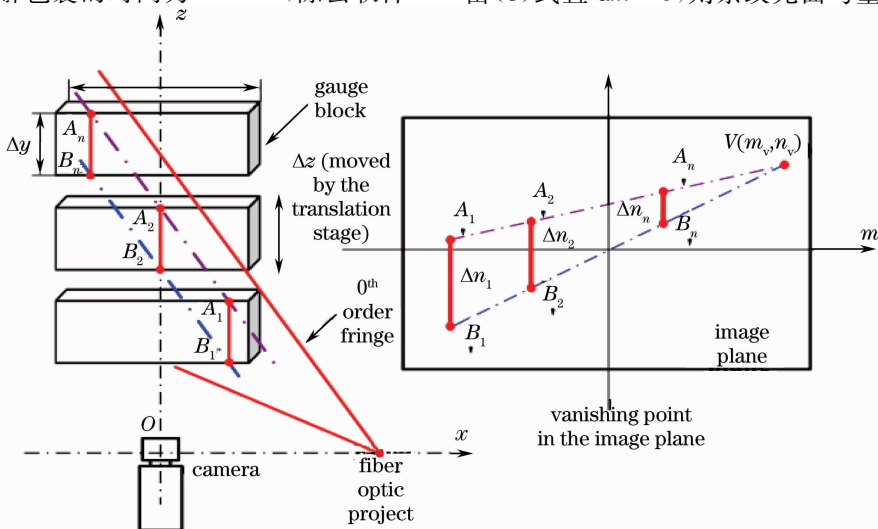


图 6 消影点法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of extinction shadow-point method

($\Delta n_i, i=1,2,\dots,n$)与量块高度 Δy 关系为

$$dy = \frac{\partial y}{\partial n} dn + \frac{\partial y}{\partial m} dm \xrightarrow{dm=0}$$

$$\Delta y = \frac{L}{m_i - d \cdot \cot \beta_0} \Delta n_i, \quad (15)$$

式中 d, β_0 均可求得,交线像长度可由图像处理得到。通过标定其它参数^[14],从而得到高度信息。

3.4 实验

如图 7 为 CMOS 高速相机采集的光纤干涉图,图中条纹对比度高,噪声较小。

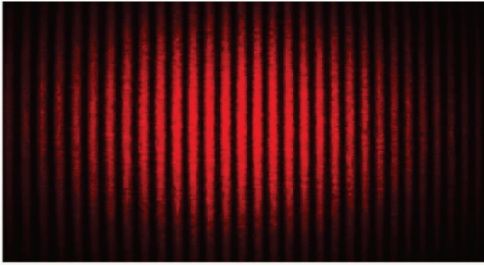


图 7 干涉条纹图像

Fig. 7 Interference fringe physical map

图 8(a)为实验中的小凸台,(b)为凸台对应的相位包裹图,(c)为通过相位展开的三维表面图,(d)为通过视觉标定后的截线图。实验中所采用小凸台实际平均高度为 5.00 mm。利用移动平台移动小凸台,使凸台表面与参考平面距离发生变化,并利用上述方法分别求取各位置处凸台表面相对参考平面的平均高度值。当实际平均高度分别为 5,6,7,8 和 9 mm,获得的实际高度为 4.73,5.71,7.38,8.26 和 9.02 mm,均方根值(RMS)误差为 0.2 mm。系统测量结果可基本反映物体表面的高度信息,但精度还有待提高。

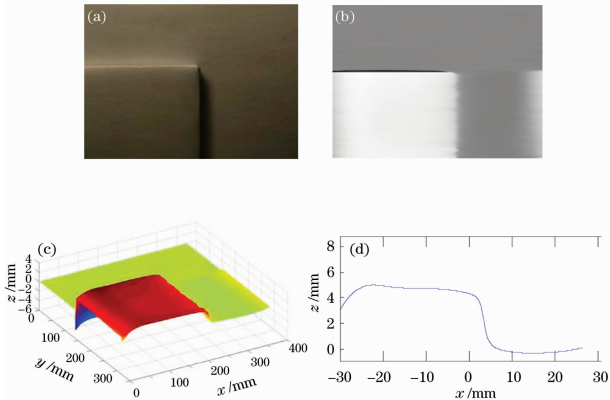


图 8 对台阶的恢复。(a)台阶,(b)相位包裹图,
(c)物体三维图,(d)高度信息图

Fig. 8 On the steps of the recovery. (a) step, (b) wrapped phase map, (c) objects in three-dimensional diagram, (d) a high degree of information map

图 9(a)为实验中的圆柱,(b)投射到圆柱光纤干涉,(c)圆柱对应的相位包裹图。(d)通过相位展开的三维表面图。可以实现对圆柱表面的实时测量,对 400 pixel×400 pixel 图像,整个测量时间为 186 ms。

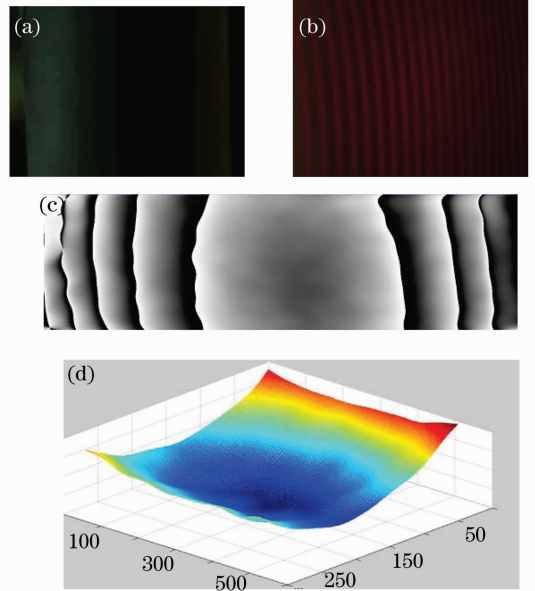


图 9 对圆柱的恢复。(a)圆柱,(b)条纹图,
(c)相位图,(d)物体三维图(mm)

Fig. 9 On the recovery cylinder. (a) cylinder, (b) fringe pattern, (c) phase diagram, (d) objects in three-dimensional map (mm)

4 结 论

基于光纤干涉仪原理的干涉条纹投射方案,通过数学模型构建论证了投射方案的可行性。利用摄像机拍摄经物体调制的条纹图,恢复出物体的三维信息,并对实时性进行了分析。实验中发现光纤易受环境干扰而使条纹漂移,针对这一问题,在后续研究中将利用系统中 3 dB 耦合器输入方另一非输入臂产生的干涉信号探测条纹相位信息从而实现条纹的稳定控制。

参 考 文 献

- 1 C. C. J. Quan, H. M. Shang, P. J. Bryanston-Cross. Contour measurement by fibre optic fringe projection and Fourier transform analysis[J]. *Opt. Commun.*, 1995, (119): 479~483
- 2 Staffan Schedin, Giancarlo Pedrini, Hans J. Tiziani *et al.*. All-fiber pulsed digital holography[J]. *Opt. Commun.*, 1999, (165): 183~188
- 3 W. Liu, Y. Tan. Singlemode optical fiber electronic speckle pattern interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, (25): 103~109
- 4 C. R. Mercer, G. Beheim. Fiber-Optic Projected-Fringe Digital Interferometry. *Hologram Interferometry and Speckle Metrology*

- Proc. [C]. 1990, 210 ~ 216, Bethel, Conn., Society for Experimental Mechanics
- 5 Timothy L. Penning Ton, Hai Xiao, Russell May *et al.*. Miniaturized 3-D surface profilometry using fiber optic coupler [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, (33): 313~320
 - 6 Lin Xiaoyan, Wu Meixia. The design and numeric simulation of optical fiber projector for the measurement of 3-D object shapes [J]. *Opt. Techique*, 2007, **33**(1): 37~40
林晓艳, 吴美霞. 用于物体三维测量的光纤投影器的设计与数值模拟 [J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 37~40
 - 7 Fan Hua, Zhao Hong, Tan Yushan. Automatic profilometry by dual-frequency of optical fiber projection grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 86~89
范 华, 赵 宏, 谭玉山. 光纤投影双频自动轮廓测量术 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 86~89
 - 8 Karahan Bulut, M. Naci Inci. Three-dimensional optical profilometry using a four-core optical fibre [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, (37): 463~469
 - 9 Libo Yuan, Xue Wang. Four-beam single fiber optic interferometer and its sensing characteristics [J]. *Sensors and Actuators*, 2007, (138): 9~15
 - 10 M. Takeda, I. Hideki. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. O. S. A.*, 1982, **72**(1): 156~160
 - 11 Giuseppe Schirripa Spagnolo, Dario Ambrosini. Fibre optic projected fringes for monitoring marble surface status [J]. *J. Cultural Heritage*, 2000, **1**(1): 337~343
 - 12 Giuseppe Schirripa Spagnolo, Domenica Paoletti, Dario Ambrosini. Vibration monitoring by fiber optic fringe projection and Fourier transform analysis [J]. *Opt. Comm.*, 1997, **139**(1): 17~23
 - 13 Hai Xiao, Yibing Zhang, Anbo Wang. Multispectral three-dimensional digital infrared thermal imaging [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(4): 906~911
 - 14 Duan Fajie, Zhang Cong, Zhang Chao *et al.*. Fourier transform profilometry based on fiber-optic interferometric projection [C]. Proc. 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, CISP'09, 2009, 2388~2392
 - 15 Dennis C. Ghiglia, Louis A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, **11**(1): 107~118
 - 16 Qian Xiaofan, Zhang Yong' an, Li Xinyu *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on mask and least-squares iteration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 440~444
钱晓凡, 张永安, 李新宇等. 基于掩膜和最小二乘迭代的相位解包裹方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 440~444
 - 17 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan *et al.*. Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2780~2785
吴双卿, 张 引, 张三元等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2780~2785
 - 18 Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1858~1862
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1858~1862