

一种新的反向投影条纹生成方法研究

肖 朝 苏显渝 荆海龙

(四川大学光电科学技术系,四川 成都 610064)

摘要 反向条纹投影技术是一种应用于在线或批量检测的快速而稳定的光学三维面形检测技术。提出了一种新的产生反向条纹的算法,新的算法建立投影器坐标系与摄像机坐标系的正向映射变换关系,通过投影器坐标系上一个像素点的两套相位值,找到其在摄像机坐标系中对应的位置,即产生投影器坐标系像素点在摄像机坐标系中的注册。由于期望在摄像机中观察到的条纹图像只是简单的正弦条纹图像,直接读取注册点的期望条纹相位,很容易产生反向条纹。计算机模拟和反向条纹投影实验中的相位标准差分别达到 7.044×10^{-6} rad 和 3.34×10^{-2} rad,比以前的方法在精度上有了较大的提高,并简要分析了精度提高的原因。计算机模拟和实物测试实验都验证了该方法的可行性。

关键词 信息光学;反向条纹生成;结构光投影;三维面形测量;条纹分析

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2120

A New Method For Generation of Inverse Projected Fringe

Xiao Chao Su Xianyu Jing Hailong

(Department of Optoelectronics Science and Technology, Sichuan University,
Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract Inverse fringe projection is a fast and robust optical 3D shape inspection technique, which is applied to online or batch inspection. A new method for generating inverse fringe is proposed, which builds the normal mapping transform relationship between projector coordinate and camera coordinate. A pixel on the projector coordinate has two suits of phase, through which its position on the camera coordinate can be located, which is called the register of projector pixels on the camera coordinate. Since the required fringe map in the camera is just simple sinusoid image, so it can easily get the inverse fringe by reading the phase of register point directly. Standard phase difference in simulation and real experiment reaches 7.044×10^{-6} and 3.34×10^{-2} separately, which gets a higher precision than former methods. Then the reason accounting for the high precision is analysed. Both simulation and experiment prove the feasibility of this method.

Key words information optics; inverse fringe generation; structured light projection; three-dimensional shape measurement; fringe analysis

1 引 言

反向条纹投影技术(Inverse Projected-Fringe-Technique)^[1]是在传统的光学三维面形测量方法^[2](如莫尔轮廓术、相位测量轮廓术^[3~5]、傅里叶变换轮廓术^[6~9])的基础上演化而来的。它继承了传统三维面形测量的非接触、高精度、高速度以及易于在

计算机控制下实行自动化测量等优点,同时它对面形的微小形变具有很高的敏感性,因而尤其适用于工业生产流水线上产品面形的质量控制。

产生反向条纹的关键是建立投影器坐标系(l, m)和摄像机坐标系(i, j)之间的反向几何传递关系。已提出的方法包括最近邻差值法,梯度

收稿日期: 2008-01-15; **收到修改稿日期**: 2008-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(60527001)资助课题。

作者简介: 肖 朝(1982-),男,硕士研究生,主要从事光学三维传感研究工作。E-mail: xiaochao20052006@163.com

导师简介: 苏显渝(1944-),男,教授、博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感的教学与研究工作。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

法^[10],双线性差值法和二元三次多项式差值法^[11]等。梯度法是利用已知的相位梯度来计算线性变换矩阵,而最近邻法、双线性差值法和二元三次多项式差值法都是通过相位的关系把摄像机上的像素点映射到投影器坐标系上去,这种映射变换称为逆向映射变换。在逆向映射变换中,虽然实现了摄像机上的每个像素点在投影器坐标系中的注册,但由于注册点向投影器像素点进行图像传递时涉及较复杂的权重分配等运算,反向条纹的产生较为复杂。本文提出一种新的产生反向条纹的算法,新的算法建立投影器坐标系与摄像机坐标系的正向映射变换关系,即产生投影器坐标系像素点在摄像机坐标系中的注册,由于期望在摄像机中观察到的条纹图像只是简单的正弦条纹图像,直接读取注册点的期望条纹相位,很容易产生反向条纹。计算机模拟和反向条纹投影的实验证实,新的产生反向条纹的算法具有更高的精度。

2 原 理

2.1 反向条纹技术

2.1.1 反向条纹投影的基本原理

传统的基于结构光照明的三维面形测量方法采用正向条纹投影方法,即投影仪投影直的正弦条纹到物体表面,摄像机记录变形的条纹 $f(x, y)$,如图 1(a)所示。变形条纹可表示为

$$f(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi x/p + 2\pi h(x, y)/\lambda_e) \quad (1)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为物体表面非均匀反射率, $h(x, y)$ 为待测物体面形分布, p 为条纹周期, λ_e 为等效波长。而反向条纹投影技术是投射变形的正弦条纹到物体表面,得到的是直的正弦条纹。如图 1(b)所示。此时如果物体上有微小形变,由于得到的是直条纹,用反向投影技术就能够快速高效地找到形变位置,这也是它的最大的优点之一。

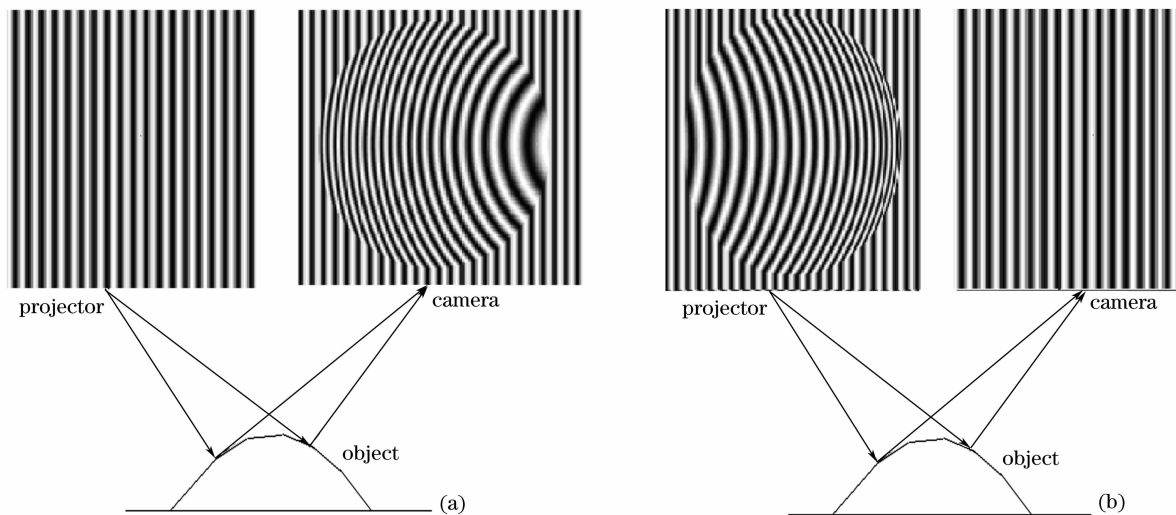


图 1 传统条纹投影和反向条纹投影的区别。(a) 传统条纹投影,(b) 反向条纹投影

Fig. 1 Differences between conventional and inverse fringe projection. (a) conventional fringe projection; (b) inverse fringe projection

2.1.2 反向条纹投影的基本流程可以概括为以下 3 个步骤^[8]

(1) 用传统的相位测量方法得到被测物体的变形条纹,从而求出摄像机坐标 (i, j) 和投影器坐标 (l, m) 之间的几何对应传递关系,以及强度传递参量 $I_0(i, j)$ (背景光强), $\gamma(i, j)$ (条纹调制度)^[3]。

(2) 定义希望在检测中摄像机得到的图像 $I_w(i, j)$, 根据步骤(1)的传递关系,计算出摄像机应该投射的反向条纹 $I_{inv}(l, m)$ ^[10]:

$$I_{inv}(l, m) = (I_w - I_0 + I_0 \gamma) / (2 I_0 \gamma) \quad (2)$$

式中 $I_w = I_w[i(l, m), j(l, m)]$, $I_0 = I_0[i(l, m),$

$j(l, m)]$, $\gamma = \gamma[i(l, m), j(l, m)]$ 。

(3) 往被测物体上投射步骤(2)中算出的反向条纹,在摄像机上得到图像 $I_{cam, inv}$ 。然后再用传统方法(FTP、PMP 等)计算出物体的面形,通过与标准物体的比较得到差异。

本文只是为了说明提出的算法的可行性,故仅涉及几何反向传递关系,暂不考虑强度传递关系。

2.1.3 反向条纹的生成方法

在生成反向条纹时,已有的研究工作^[10~12]采用了逆向映射变换,实现了摄像机上的每个像素点在投影器坐标系中的注册。最近邻差值法、双线性差

值法和二元三次多项式差值法都是通过相位的关系把摄像机上的像素点映射到投影器坐标系上去,如

图 2(a)所示。

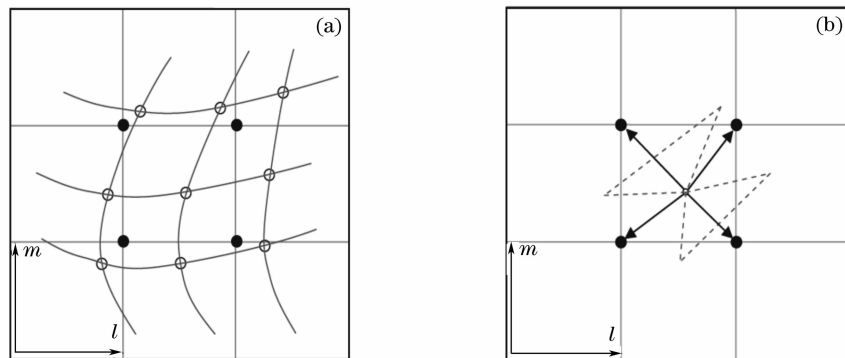


图 2 (a) 摄像机像素到投影器坐标系的映射; (b) 相位分配

Fig. 2 (a) Pixel mapping from camera to projector; (b) phase distribution

图中实心黑点代表投影器上的像素 (l, m) , 空心圆圈代表摄像机上的像素映射在投影器上的位置。这些圆圈所连成的曲线就代表了系统的几何反向传递关系。而为了求得反向传递关系, 我们就要如图 2 (b) 中那样, 把空心圆圈的在摄像机中的位置根据权重分配到与其相邻近的投影器像素点上去。但由于注册点向投影器像素点进行图像传递时涉及较复杂的权重分配等运算, 反向条纹的产生较为复杂, 精度也受到限制。

2.2 一种新的反向条纹生成方法

本文提出了一种新的产生反向条纹的方法, 即不是把摄像机坐标系 (i, j) 上的像素点映射到投影器坐标系 (l, m) 上, 而是根据投影器上一条光线经过物体传递到摄像机上相位不变的原理, 根据直条纹整数像素点上的相位值来找到其对应应在变形条纹相位场中的位置。我们用下式表达这个关系:

$$(i, j) = f_1(l, m) \quad (3)$$

式中函数 f_1 表示插值运算。

由于是投影水平和垂直两个方向上的条纹, 因此投影器和摄像机上每个像素点都对应两个相位。该方法的核心思想是, 对于投影器上的每个像素点, 例如 $A(l, m)$, 先根据它在垂直方向上的相位 Φ_{AV} , 由公式(3)在摄像机坐标系中找到一系列与其相位相等点的位置 P_{AV} , 当然找到的这些等相位位置很可能不在摄像机整数像素点上, 称这样的非整数点位置为亚像素位置。这些等相位点 P_{AV} 构成点 A 的一条等相位曲线 L_{AV} , 用下式表示:

$$L_{AV}(i, j) = f_2(P_{AV}) \quad (4)$$

式中函数 f_2 表示把离散点拟合成曲线。

同样的道理, 也可以根据 A 点在水平方向上的

相位 Φ_{AP} 在摄像机坐标系中找到一条等相位曲线 L_{AP} 。这样找到的两条等相位曲线有且只有一个交点 $B(i, j)$:

$$B(i, j) = f_3(L_{AV}, L_{AP}) \quad (5)$$

式中函数 f_3 表示求两条曲线 L_{AV} 和 L_{AP} 的交点。

这个交点 B 就是 A 点对应的摄像机坐标系上的等相位点, 也就是说投影器上 A 点发出的光线通过被测物体的漫反射将照射在摄像机上的 B 点。用同样的方法遍历投影器上的像素点我们就能够找到全部投影器像素点所对应的摄像机上的等相位点, 即完成投影器坐标系像素点在摄像机坐标系中的注册。

现在定义我们想要投射反向条纹后在摄像机上看到的条纹图 $I_w(i, j)$, 比如一幅直的正弦条纹。

$$I_w(i, j) = 0.5 + 0.5\cos(2\pi x / p) \quad (6)$$

仍以 A 点为例, 既然已经找到了投影器像素点 A 和摄像机上位置点 B 的对应关系, 因此直接读取摄像机上位置点 B 的期望条纹相位值, 产生 A 点的反向条纹相位, 如此遍历我们就得到了投影器上每个像素点对应的相位值。此时投影器坐标系上的相位分布就是我们要得到的反向相位分布, 投射此相位分布的条纹就是反向条纹, 就能够在摄像机上得到想要的直的正弦条纹。

新的产生反向条纹的映射关系如图 3 所示, 为表述简洁起见图中只给出了一维分布情况。

在图 3 中, 横坐标的左半部分表示投影器坐标系上一行像素的位置, 右半部分是摄像机坐标系上一行像素的位置, 为了便于说明问题, 纵坐标是公共的, 用来表示相位值。图中左方的斜线表示投影仪正向投影的直条纹的相位线, 图中右方的斜线表示

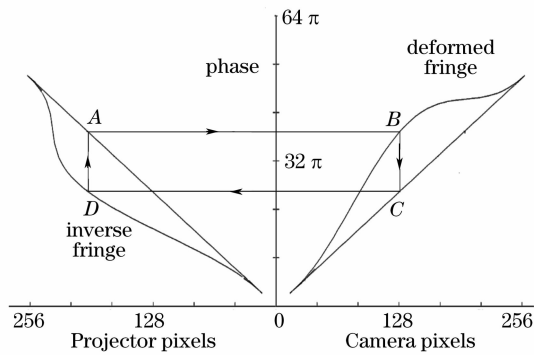


图 3 反向条纹生成相位映射的示意图

Fig. 3 Phase mapping of inverse fringe generation

反向投影时摄像机期望观察到的直条纹的相位线。本文中提出的方法可以形象地表示如下：(1) 在左方(投影仪方)直条纹的相位线上任取一点，比如图中的 A 点，根据相位相等关系找到其在右方(摄像机方)变形相位图中所对应的位置，即 B 点的横坐标。(2) 如果我们想要投射反向条纹后得到直条纹，

就把横坐标与 B 点相同的 C 点的相位值赋给 A 点对应的像素点。这样就得到了 D 点。如此遍历 A 点所在直线上的所有像素点就能够得到与其对应的 D 点所在曲线，也就是反向条纹相位曲线。

3 计算机模拟实验

在计算机模拟中，投影器和摄像机的分辨率都是 256×256 ，采用斜投影正拍摄的方式，投射的正弦条纹的周期为 8pixels，采用 5 帧相移^[2]来采集变形条纹。模拟实验中由于光轴的摆放缘故，只取垂直方向的变形，水平方向近似考虑成不变形。所用的物体为 MatlabTM 软件中的山峰函数 Peaks，如图 4 (a)所示。生成的其中一幅变形条纹如图 4 (b)所示。图 4 (c)和图 4 (d)分别为生成的垂直方向的反向条纹和投射反向条纹后得到的直条纹。图 4 (e)为投影器上一点(110, 120)的等相位线求交点示意图。投影结果和标准正弦条纹的相位差如图 4 (f)。

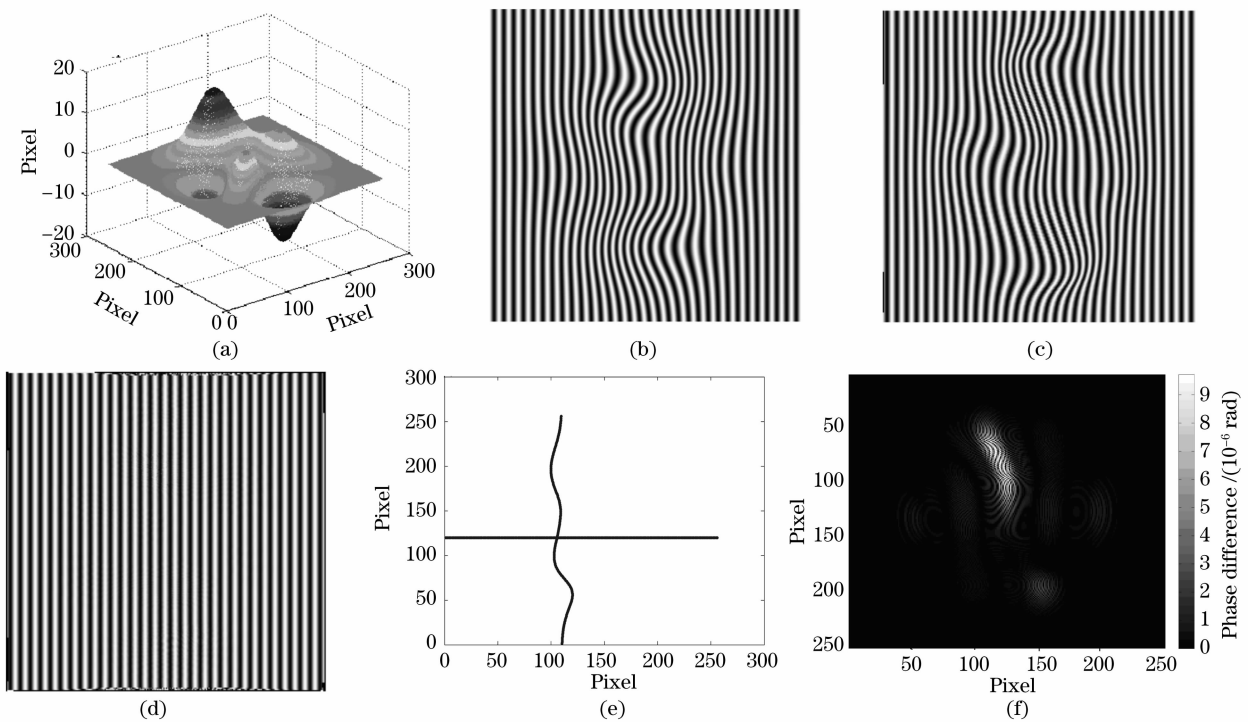


图 4 (a) 模拟的物体；(b) 一幅变形条纹；(c) 生成的反向条纹；(d) 投射反向条纹后的直条纹；(e) 等相位线求交点示意图；(f) 相位差图

Fig. 4 (a) Simulated object; (b) One deformed fringe; (c) Inverse fringe; (d) Straight fringe after casting inverse fringe; (e) Getting the point of two phase-equal lines' intersection; (f) Figure of phase differences

计算机模拟实验中相位标准差能够达到 7.044×10^{-6} rad，而以前的最近邻差值、双线性差值和二元三次差值的相位标准差分别只能达到 0.1795 rad、0.0536 rad 和 0.009 rad^[11]。原因就是

本文中提出的正向映射变换方法能够比较准确地找到投影器上像素点和摄像机上像素点的对应关系，以上三种方法在根据权重分配相位值的时候可能会存在比较大的误差。

4 实物测试实验

本实验系统如图 5 (a)所示。采用斜投影,正拍摄的方式。

所用的投影器是基于数字微透镜装置(DMD)的数字投影机 DLP,分辨率为 600×800 , CCD 的分

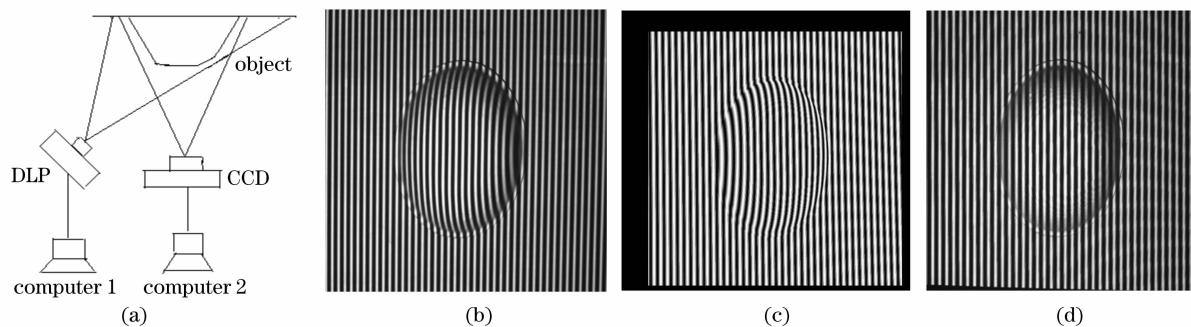


图 5 (a) 实验系统示意图;(b) 采集的一幅变形条纹图;(c) 反向条纹图;(d) 投射反向条纹后的直条纹图
Fig. 5 (a) Schematic of experimental system;(b) One deformed fringe captured;(c) Figure of inverse fringe;
(d) Straight fringe after casting inverse fringe

实物测试实验中相位标准差为 0.0334 rad ,最近邻差值、双线性差值和二元三次差值的相位标准差分别是 0.1027 rad 、 0.0926 rad 、 0.0789 rad ^[11],可见本文中提出的方法在精度上明显优于现有的方法。

5 结 论

提出了一种新的反向条纹生成方法,是通过相位的正向映射找出投影器坐标系上像素点与摄像机坐标系上像素点的对应关系,在摄像机坐标系中定义一个期望的条纹,然后把找到的位置点在该条纹上对应的相位值赋给投影器上对应的像素点,就得到了反向条纹。由于期望在摄像机中观察到的条纹图像只是简单的正弦条纹图像,直接读取注册点的期望条纹相位,容易产生具有高精度的反向条纹。计算机模拟和实物测试实验都验证了该方法的可行性。由于本文提出的反向条纹生成方法容易产生高精度的反向条纹,有利于反向条纹技术在工业检测和多投影机图像合成等领域的应用推广。

参 考 文 献

- 1 Michael K. Kalms, Wolfgang Osten, Werner Jüptner. Inverse projected fringe technique[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4317**: 505~510
- 2 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 3 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984,

分辨率是 480×640 ,物体是一个纸碗。投射的条纹图是垂直和水平两个方向的正弦条纹图,周期是 16 pixels,采用 4 帧相移测量技术。测量过程中的一幅变形条纹图为图 5 (b)。生成的反向条纹图如图 5 (c),它们的投影结果为图 5 (d)。

- 23(18): 3105~3108
- 4 Xian-Yu Su, Wen-Sen Zhou, G. von Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the Ronchi grating[J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(1): 561~573
- 5 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166(in Chinese)
- 李勇,苏显渝.一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- 6 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 7 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Opt. Las. Eng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 8 Yue Huimin, Su Xianyu, Li Zeren. Improved fast fourier transform profilometry based on composite grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 768~771(in Chinese)
- 岳慧敏,苏显渝,李泽仁.基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 768~771
- 9 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)
- 苏显渝,谭松新,向立群等.基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 10 W. LI, T. BOTHE, W. OSTEN. Object adapted pattern projection -part I : generation of inverse patterns[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2004, **41**: 31~50
- 11 Cai Yuanyuan, Su Xianyu, Li Yong *et al.*. Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation[J]. *Opt. Electron. Engng.*, 2006, **33**(5): 85~90(in Chinese)
- 蔡元元,苏显渝,李勇等.基于三次差值坐标变换的反向条纹投影技术[J]. *光电工程*, 2006, **33**(5): 85~90
- 12 Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1641~1646 (in Chinese)
- 蔡元元,苏显渝.采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1641~1646