

基于辅助参考线的光栅投影轮廓测量系统及标定方法

王 涛 孙长库 石永强 王 鹏

(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 传统光栅投影轮廓系统需要严格的几何尺寸约束, 实际使用中难以构造, 而且采用参考平面作为被测物体的相位测量基准, 限制了系统的测量和应用范围。针对这些问题, 提出了采用辅助参考线代替传统光栅轮廓系统中参考面的系统模型, 给出了利用参考线将相对相位校正为绝对相位的公式, 利用空间映射及优化求解算法实现了从绝对相位到被测物真实空间坐标的映射。设计了圆形靶标, 只采用一个平面靶标即可实现靶标点空间坐标、靶标相位以及参考线位置的采集, 简化了标定过程。最后进行了测量实验, 使用两幅图像完成了石膏头像三维数据的获取, 通过测量平面靶标的平移和旋转的间距, 验证了方法的测量精度, 靶标平移间距的均方差为 0.02 mm, 旋转间距的均方差为 0.03°。实验证明该测量方法速度快, 系统搭建和标定方法简易, 测量精度高, 具有重要的应用价值。

关键词 图像处理; 三维形貌测量; 辅助参考线; 空间映射; 标定

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0115002

Novel Grating Projection System Based on Assistant Line and its Calibration Method

Wang Tao Sun Changku Shi Yongqiang Wang Peng

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

Abstract The structure of the traditional grating projection system is difficult to construct for its rigid geometry constraints. In addition, the reference plane is inevitably employed in the system which limits the range of the measurement and the application. In order to resolve the above problems, an assistant line is introduced to the system. The equation of translation from relative phase to absolute phase is deduced according to the assistant line. Space mapping method and its optimization algorithm are employed, by which the object's real 3D data can be calculated. A circle liner target is designed, with which the extraction of feature points, target phase and feature line can be accomplished by only one image, and the procedure of the calibration is simplified. Last, the profile of a plaster model is measured by the system with two images, and the accuracy of the result is proved, the mean-square deviation (MSE) of the distance between ten shifting planes is 0.02 mm, and the MSE of the angle between ten rotating planes is 0.03°. The experiment shows that the method is accurate, fast, and easy to construct and calibrate, which has important application values.

Key words image processing; 3D profile measurement; assistant line; space mapping method; calibration

OCIS codes 150.1135; 150.0155; 150.6910

1 引 言

利用光栅测量物体三维形貌具有灵敏度高、非接触和速度快等优点, 已经成为测量物体三维形貌

的一种重要测量手段^[1~5]。传统光栅投影轮廓系统的测量方法一般分为两步, 首先设置一个参考平面, 投射光栅, 用 CCD 记录光栅相位分布, 第二步将被

收稿日期: 2010-04-06; 收到修改稿日期: 2010-05-13

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-06)资助课题。

作者简介: 王 涛(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事检测技术、视觉测量及图像处理等方面的研究。

E-mail: wangtao301@gmail.com

导师简介: 孙长库(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与光电测试技术等方面的研究。

E-mail: sunck@tju.edu.cn

测物放入光场,记录经物体表面调制后的相位变化 $\Delta\varphi(x,y)$,由系统结构参数求出被测物体高度分布 $h(x,y)$ 的值。这种传统的测量系统要求摄像机光心和投影仪中心的连线平行于参考面,摄像机光轴或投影仪光轴垂直于参考面,光轴和投影轴相交于参考面(或两轴平行)等。实际操作中上述位置关系很难达到,标定时调整过程繁琐复杂,标定精度也不易控制。针对这种情况,许多学者对传统系统模型做了改进工作^[6~9],但是这些算法或多或少地用到了传统模型中二维平面上的一些三角关系来求物点高度,构造系统时仍然需要有一定的几何约束。

另外,传统测量都把参考面上的相位分布作为测量系统的比较基准。理想的情况是被测物与参考平面自然结合,避免产生相位截断,以确保能够准确求取相位差。参考面的使用大大限制了测量的灵活性和测量的范围。为了解决上述问题,本文给出了一种更易于构造和标定的系统模型,在测量系统中引入辅助参考线,从而摆脱了参考面的约束,增加了测量的灵活性、便携性。

2 新型光栅轮廓系统的测量原理

为了实现快速测量,目前光栅投影轮廓系统主要采用相移法或傅里叶变换法求解变形条纹的相位。这两种方法求解的相位需要采用二维平面解相位的方法进行相位展开,由于摄像机采集到的变形条纹的范围不同,其展开相位的值域分布是不同的,属于相对相位。如图1所示,由于投射的光栅图是已知的,投影仪实际构造了一个锥形的绝对相位空间,为了将采用二维平面解相算法得到的相对相位(或自由相位)统一到这个相位空间中,通过投射一条辅助参考光线到被测物表面的方法来实现,即在相位测量之前,在投影仪的投射像面上绘制一条直

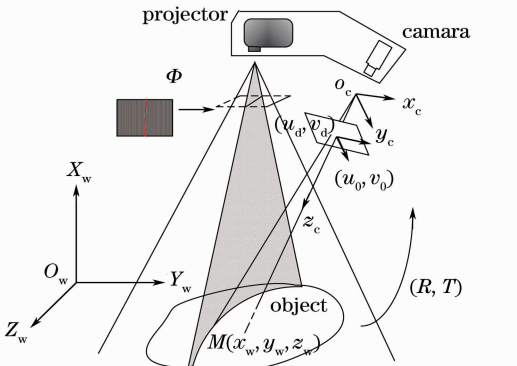


图1 系统结构图

Fig.1 System structure

线,使这条投射光线照射到物体表面。

设投射到被测物上的辅助参考线为零相位基线,然后通过相移法或傅里叶变换法,求出相对相位,通过以下式子来校正被测物相位在相位空间中的值:

$$\Phi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_0, \quad (1)$$

式中 $\varphi(x,y)$ 表示直接由被测物体得到的相对相位(自由相位), $\Phi(x,y)$ 表示由零相位基线确定的绝对相位空间中的相位值, φ_0 表示被测物表面与零相位基线相交处的相位值。将此方法推广到一种特殊的情况,可以将投射光栅的边缘作为基准相位的起始点,记做 Φ_0 。则辅助光线与基准相位之间的相位差为

$$\Delta\varphi = 2\pi(N_x/p) + \Phi_0, \quad (2)$$

式中 N_x 为参考线在光栅图 x 方向上的像素位置(光栅条纹为 y 方向), p 代表投射光栅的像素周期。这样被测物相位在绝对相位空间中的值为

$$\Phi(x,y) = \varphi(x,y) - \Delta\varphi. \quad (3)$$

通过这样的处理,标定时采用的参考线和测量时不必相同,增加了测量的弹性。

通过相位校正,测得的相位为绝对相位,在测量视场范围内,被测物体表面各点的绝对相位值是唯一的,由摄像机标定和投影变换,可以确定绝对相位到空间坐标点的映射。利用空间映射法,可直接建立像素坐标 (u_i, v_i) 和相位值到空间坐标的映射模型。这里采用 n 阶多项式描述映射模型,采用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} p_0 & p_1 & \cdots & p_{m-1} \\ q_0 & q_1 & \cdots & q_{m-1} \\ r_0 & r_1 & \cdots & r_{m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \phi \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} \sum_{k=0}^{n-i-j} u^i v^j \phi^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 p_i, q_i 和 r_i (其中 $i=0,1,2,\dots,m-1$) 是多项式的系数。(4)式可以简单表示为

$$\mathbf{AX} = \mathbf{b}. \quad (5)$$

这样,只要求出(4)式的系数矩阵即系统需要标定的参数: $[p_i, q_i, r_i]$,就可在实际测量中,根据测得的绝对相位值和对应的摄像机的像素坐标值求解被测物体真实的空间坐标。

3 系统标定过程

3.1 特征点空间坐标的获取

可以借助大量已知靶标特征点的三维坐标以及

它们在摄像机上的像素坐标及绝对相位值,求解 p_i, q_i, r_i 。为了简化标定过程,增加系统的便携性和灵活性,利用虚拟平面靶标和 Zhang^[10] 的不确定视角摄像机标定法建立特征点的空间坐标系,如图 2 所示。

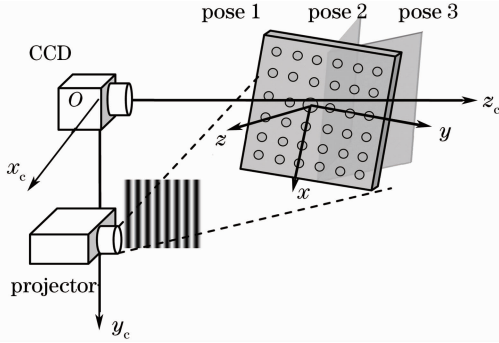


图 2 系统标定示意图

Fig. 2 Sketch map of system calibration

在测量视场内不同深度的几个位置上任意摆放靶标,经过 Zhang 的摄像机标定,每个靶标面的外部参数即相对于摄像机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 都已求得,假设第 i 个位置的靶标面的外部参数为 R_i 和 T_i ,则靶标面上点在摄像机坐标系下的坐标为

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R}_i \begin{pmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \end{pmatrix} + \mathbf{T}_i, \quad (6)$$

摄像机坐标系到第一个靶标面建立的空间坐标系的转换关系为

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \mathbf{R}_1^{-1} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} - \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{T}_1, \quad (7)$$

因此,其余靶标面在第一靶标面建立的空间坐标系下的坐标为

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{R}_i \begin{pmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_1^{-1} (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_1). \quad (8)$$

由于每个位置的旋转矩阵都是正交矩阵,因此可利用 $\mathbf{R}_i^{-1} = \mathbf{R}_i^T$ 简化以上各式的求解。经以上的坐标转换,可得到以第一靶标面的坐标系为世界坐标系的一组空间点阵列。

3.2 靶标的设计与处理

在光栅投影模式下,具有较大面积深颜色的靶标,如圆形斑点靶标,棋盘格靶标等,会在相位测量中产生较大的乘性噪声。由于求取相位方法的原理

不同,这样的靶标对于用傅里叶变换法测量相位的结果影响更加明显。针对这个问题,可以使用白色平板测量相位和采集辅助参考线位置,然后再使用圆形斑点或棋盘格靶标提取特征点坐标信息,但是这样一是一操作繁琐,二是在更换靶标过程中难免会对测量精度造成影响。因此,设计了如图 3 所示的圆形靶标,最大限度的降低靶标颜色深度对光栅条纹的影响。靶标的中心为大圆,作为平面靶标的坐标原点,其他小圆等距分布。

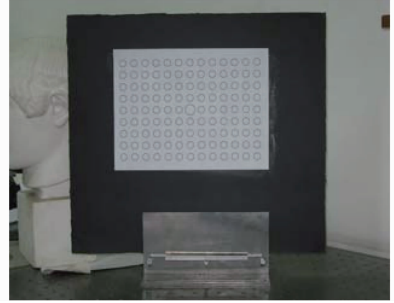


图 3 圆形靶标

Fig. 3 Circle line target

由于靶标是任意摆放的,投影仪投射的辅助参考线的位置不固定,有可能落在圆的间隙,也可能穿过某列小圆,不失一般性,以如图 4(a) 所示为例,参考线穿过特征小圆这种较为复杂的情况对靶标的处理进行说明:

1) 特征圆环圆心坐标的确定:使用 Canny 算子,对图像进行轮廓提取,利用 Prune-and-Search 算法^[11] 计算对提取的轮廓集合进行特征筛选,得到其中的圆环轮廓,进行椭圆拟合确定其圆心图像坐标。参考线所在列的小圆将不被检测到,如图 4(b) 所示;

2) 参考线提取预处理:为了降低直线检测的噪声,对圆筛选之后的,将有效椭圆所在的图像区域涂白,然后对图像进行 Hough 变换,提取其中的直线特征。如图 4(c) 所示,根据先前得到的圆环轮廓集的圆心坐标范围,筛选位于靶标内部的直线特征,进而确定基准线中心的范围,即图 4(c) 所示中间的红线;

3) 参考条纹中心坐标的提取:在确定的处理范围之内,采用灰度重心法提取参考线条纹的中心坐标。

这样通过一个圆线靶标图像,即可得到基准线位置和特征点坐标,而且在相位采集的过程中,圆线产生的噪声可以忽略不计,进一步简化了标定过程。

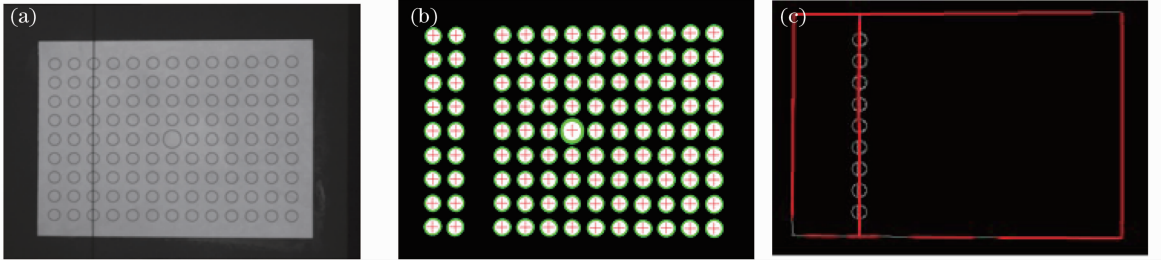


图 4 对靶标图像的处理。(a)带有参考线的靶标图,(b)椭圆提取后效果,(c) Hough 变换检测的参考线

Fig. 4 Processing of the target image. (a) original target with assistant line, (b) effect after the ellipse extraction, (c) assistant line detected by the Hough transform

3.3 标定参数的优化求解

对于 m 个已知空间坐标点阵列, 对应的图像坐标 (u_i, v_i) 以及相位值 $\phi(u_i, v_i)$, 将这些值带入式中, 得到扩展的矩阵式, 记为 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{b}}$, 其中 $\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{b}}$ 分别为 $n \times m, 3 \times m$ 矩阵。使用最小二乘法(LSA)可以求解出标定矩阵

$$\mathbf{A} = \bar{\mathbf{b}}\bar{\mathbf{X}}^T(\bar{\mathbf{X}}\bar{\mathbf{X}}^T)^{-1}. \quad (9)$$

对于摄像机采集系统来说, 图像的采集格式为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$, (9)式中要使用像素坐标的 n 次幂, 另外再加上 ϕ 的数据也在几百的范围内, 所以将会得到一个很大的数值, 在计算机中运算, 可能会存在因运算结果截断带来的关键系数求解失败的现象。可以采用数据的单位化方法解决这个问题。假设采集图像的宽和高分别为: w 和 h ; ϕ 的取值范围为 $[a, b]$, 则可以得到它们的单位值为

$$\begin{cases} \bar{u} = u/w \\ \bar{v} = v/h \\ \bar{\phi} = \frac{\phi - a}{b - a} \end{cases}. \quad (10)$$

将这些单位化的值代入 LSA 中进行计算, 可以得到较为准确的标定矩阵。这里采用 Levenberg-Marquardt 最优化方法对标定结果进行优化计算。利用(4)式求解的估算值 (x_{ei}, y_{ei}, z_{ei}) 和真实值 (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}) 的最小距离偏差和, 建构最优化的目标函数

$$F = \min \sum_{i=0}^m [(x_{ei} - x_{ri})^2 + (y_{ei} - y_{ri})^2 + (z_{ei} - z_{ri})^2] \quad (11)$$

对标定矩阵优化求解。

4 精度验证及测量实验

在实验中, 采用 Plus V-362 型号 DLP 投影仪和 Teli CS8620HCi 型号 CCD 摄像机组成光栅投影轮廓测量系统。选用镜头焦距标称值为 25 mm 。实验系统的测量距离约为 $1100 \sim 1300 \text{ mm}$, 测量范围约为 $300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 。经过上述标定过程得到的系数矩阵如表 1 所示。

表 1 标定结果

Table 1 Results of calibration

p_i		q_i		r_i	
-358.12	-7.23	-456.12	-89.14	3698.01	546.14
799.52	5.65	228.67	70.25	-6012.23	-295.47
-663.84	0.23	-246.52	-10.25	6741.02	-4.25
226.23	-123.55	45.12	-566.25	-18654.23	14741.12
2.52	456.52	189.56	258.12	-336.45	-6745.10
0.66	756.23	3.12	288.69	2.36	-6554.14
-0.45	-3.12	-1.54	-9.85	2.36	658.25
542.52	-0.23	256.98	-1.25	-7865.12	-8.11
-336.75	0.85	-365.14	68.45	8556.58	-399.15
156.75	4.23	83.45	178.12	-2896.12	-524.12

为了验证测量精度和测量效果进行了如下实验:

4.1 测量精度验证

将标准平面靶标在精密控制台上平移 10 个位置, 各位置间隔为 1 mm , 其中任一位置的测量点可

以采用最优化算法拟合为平面方程, 计算平面之间距离。然后, 将靶标在精密控制台上旋转 10 个位置, 各位置间隔为 1° , 计算相邻位置之间的夹角。表 2 是平移靶标求取的各相邻位置之间的距离,

表 3 是旋转靶标求取的各相邻位置之间的夹角。可以看出平面之间位置关系的均方差 (MSE) 在 0.02 mm 和 0.03° 之内, 具有较高的精度。

表 2 各个靶标面平移间距

Table 2 Translational distance between each target

Position number	Distance /mm	Average /mm	MSE /mm
2-1	0.965		
3-2	0.991		
4-3	1.009		
5-4	0.984	0.991	0.018
6-5	1.011		
7-6	0.983		
8-7	0.998		

表 3 各个靶标面旋转角度间距

Table 3 Angle between each target

Position number	Distance /($^\circ$)	Average /($^\circ$)	MSE /($^\circ$)
2-1	1.028		
3-2	0.974		
4-3	0.977		
5-4	1.004	1.000	0.025
6-5	1.005		
7-6	1.026		
8-7	0.972		

4.2 石膏头像测量实验

采用太阳神石膏头像作为被测物体, 图 5 所示面部线条为投影仪投射的辅助参考线, 通过图像处理的方法提取参考线的精确位置, 原则上可以采用该线上任意一点作为相位展开的种子点, 实际处理中要避免使用相位残留点(残留点信息可以在相位展开算法过程中获取)。图 6 所示为光栅条纹图, 相位的求取使用的是傅里叶变换法, 相位展开的方法是采用的 Goldstein^[12] 经典的枝切算法 (Branch-cut), 需要指出的是, 由于石膏头像面部起伏不大, 没有断裂、孔洞情况, 枝切线较少, 长度也较短, 会得



图 5 辅助参考线图

Fig. 5 Assistant line on plaster

到比较理想的相位展开值, 对于较复杂的被测物需要有相应的解相算法配合, 这也是二维平面相位解包裹研究的热点^[13-15]。

由图 7 可以看出, 尽管被测物背景有较强的干扰信息, 如圆斑靶标和阴影等, 但是并不影响被测物在相位空间中的位置确定。



图 6 光栅条纹图

Fig. 6 Grating fringe on plaster



图 7 三维测量效果图

Fig. 7 Effect drawing of the result 3D measurement

5 结 论

针对快速测量需求, 构建了一种基于辅助投影光线的光栅投射系统测量模型, 该系统具有如下特点: 1) 不需要严格的几何尺寸要求, 只需摄像机和投影仪保持一定夹角, 使被测物位于视场角和投射角的交集范围内即可。标定时只需要将靶标随意摆放几个位置, 即可实现标定, 提高了标定的速度, 具有便携性; 2) 测量速度快, 对于石膏像的测量, 采用了两幅图像, 一幅图像用于提取投射的辅助参考线位置, 一幅光栅图用于计算相位值, 即可完成形貌测量; 3) 测量精度高。测量实验结果表明, 该测量及标定方法具有较高的测量精度, 平面位移的均方差为 0.02 mm , 平面旋转的均方差为 0.03° ; 4) 辅助投影线的使用, 摆脱了传统结构中参考面的束缚, 增强了测量的灵活性, 如采用多个投射参考线的方法, 对于多目标不连续的物体, 也可进行快速测量, 有着较广泛的应用价值。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, H. Ina, S. Koboyashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 2 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 3 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three-dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 197~202
周翔, 赵宏. 基于 Mexican hat 小波变换的三维轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 197~202
- 4 Peng Wang, Xu Xiao, Zimiao Zhang *et al.*. Study on the position and orientation measurement method with monocular vision system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(1): 55~58
- 5 M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22): 5347~5354
- 6 Xianfu Mao, Jingwen Chen, Xianyu Su. Improved Fourier-transform profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(5): 664~668
- 7 Wansong Li, Xianyu Su, Zhongbao Liu. Large-scale three-dimensional object measurement; a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(20): 3326~3333
- 8 A. Rosario, D. L. Giuseppe, L. Consolatina *et al.*. A new calibration procedure for 3-D shape measurement system based on phase-shifting projected fringe profilometry[J]. *IEEE Trans. Instrumentations and Measurement*, 2009, **58**(5): 1291~1298
- 9 Ailing Tian, Zhuangde Jiang, Yanqun Huang. A flexible new three-dimensional measurement technique by projected fringe pattern[J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(8): 585~589
- 10 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 11 M. Nimrod. Linear programming in linear time when the dimension is fixed[J]. *J. Association for Computing Machinery*, 1984, **31**(1): 114~127
- 12 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometer: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 13 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~721
李思坤, 陈文静, 苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~721
- 14 Zhao Wancheng, Lu Yuangang, Zhang Ting. Phase gradient correlation based quality map for two dimensional phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 149~154
赵万成, 路元刚, 张婷. 用于二维相位展开的相位梯度相关质量图[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 149~154
- 15 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267