

文章编号: 0258-7025(2008)12-2017-05

# 数字全息中利用图像拼接测量大物体的 三维形貌

冯忠耀 贾 昉 周景会 忽满利

(西北大学物理学系, 陕西 西安 710069)

**摘要** 为扩大数字全息的测量视场,使数字全息可以应用于大物体三维形貌的测量,利用菲涅耳离轴数字全息,让照明光依次照明物体的各个区域并分别记录全息图,利用精密电控旋转台精确控制参考光的入射角以保证每次记录时物参角不变,通过参考光入射角的变化量确定物体不同被照明区域之间的位置关系,对获得的物体去包裹的相位图进行拼接,进而得到整个物体的三维形貌。利用该方法测量了大小为 11 cm×19 cm 的石膏嘴的三维形貌,图像拼接的绝对拼接误差远小于 1.14 mm,高度测量误差约为 0.5 mm,实验结果说明这种测量方法能够有效地扩大数字全息测量物体三维形貌的视场并且具有和横向分辨率相当的拼接精度。

**关键词** 信息光学;形貌测量;数字全息;图像拼接;视场

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.2017

## Three-Dimensional Surface Shape Measurement of Big Objects by Image Splicing in Digital Holography

Feng Zhongyao Jia Fang Zhou Jinghui Hu Manli

(Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract** To enlarge the field-of-view of digital holographic surface measurement, so that digital holography can be applied in three-dimensional(3-D) surface measurement of large objects, based on Fresnel off axis digital holography, different part of the object is illuminated singly and their holograms are recorded respectively. The object-reference angle remains the same for each recording by precisely controlling the incident angle of the reference wave using an electronically controlled turntable. The position of the illuminated part can be obtained from the change of the incident angle of reference wave. The unwrapped phase maps are spliced to obtain the 3-D surface shape of the whole object. The 3-D surface shape of a 11 cm×19 cm plaster mouth model is measured using this method. The absolute splicing error is no more than 1.14 mm and the surface height error is about 0.5 mm. It is proved that this method is very effective in enlarging the field-of-view of digital holographic 3-D surface shape measurement and its splicing precision is as high as the lateral resolution of digital holography.

**Key words** information optics; surface shape measurement; digital holography; image splicing; field-of-view

### 1 引 言

物体三维形貌测量在工业生产、医学、文物保护等很多领域有非常广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。在数字全息<sup>[3~7]</sup>中,使物体照明光的波长或倾角发生一个微小的改变<sup>[8]</sup>,通过计算改变前后两幅再现像的相位

差,就可以得到物体的三维形貌信息。1997年 Ichirou Yamaguchi 等<sup>[9,10]</sup>提出了相移数字全息并且将其应用于三维形貌测量。相移法彻底消除了零级项和共轭项,充分发挥了 CCD 的性能,使视场达到最大,但是仍然只能测量十几毫米大小的物体,而

收稿日期:2008-02-29;收到修改稿日期:2008-06-25

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(04jk338)资助项目。

作者简介:冯忠耀(1975—),男,讲师,主要从事激光器件和信息光学方面的研究。E-mail: fzhy3039550@163.com

且相移数字全息需要高精度的相移器,对环境的稳定性要求相当高,因此不适合实际应用。与三角测量法和投影光栅法<sup>[11,12]</sup>相比,数字全息形貌测量不需要扫描系统和投影系统,但是目前数字全息的视场很小,严重限制了它能够测量的物体的大小,降低了数字全息三维形貌测量的实用性。预成像法使用透镜将被测物体先成一缩小的实像,再用数字全息进行测量,可以有效地扩大视场。但这种方法的视场大小仍受数字全息系统的视场和成像系统放大率的限制;被测物体比较大的时候平行光无法提供足够大的照明范围,同时得到图像的像素点数受到 CCD 像素点数的限制,最大只能达到 CCD 像素点数的一半。

本文在离轴菲涅耳数字全息基础上通过改变照明平行光的倾斜角照明物体的不同部分,得到物体不同部分的三维形貌数据,测量时保持物参角  $\Phi$  不变,通过参考光入射角的变化量,复原物体各部分高度图像的相对位置,再对多幅三维形貌图进行拼接。使用这种方法测量一块石膏嘴的三维形貌,绘制出了石膏嘴的三维形貌图。被测石膏嘴的三维形貌范围比文献[10]中被测灯泡的范围扩大了至少两个数量级。

## 2 测量原理

### 2.1 数字全息测量物体三维形貌

如图 1 所示,物体被平行光照明发出的光入射到 CCD 上,在 CCD 上的复振幅分布为  $O(x_H, y_H)$ , 作为全息记录的物光。一束与 CCD 光轴夹角为  $\alpha$  的平行光  $R = \exp(j2\pi x_H \sin \alpha / \lambda)$  作为参考光与物光发生干涉,物参角为  $\Phi$ , 干涉场的强度分布为

$$I = |O|^2 + |R|^2 + O^*R + OR^*, \quad (1)$$

符号 \* 代表复数共轭。为了消除零级光干扰,同时用 CCD 记录物光和参考光各自的强度,并从全息图中减去。调节物参角  $\Phi$  使其满足频谱分离条件和

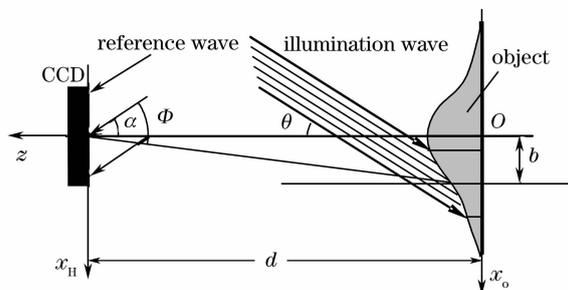


图 1 测量原理

Fig. 1 Principle of measurement

抽样定理<sup>[13]</sup>,在频域中滤除共轭项  $O^*R$  的频谱,这样全息图中就只剩下了  $OR^*$  项,然后对全息图进行逆向菲涅耳衍射计算,得到物体表面处的光场复振幅分布。

用一束倾斜角为  $\theta$  的宽平行光照明物体,以物平面坐标原点  $O$  为基准,让照明光的倾斜角  $\theta$  发生一个微小的改变  $\Delta\theta$ ,  $\theta$  改变前后物体表面相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi(x_o, \theta + \Delta\theta) - \varphi(x_o, \theta) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\Delta\theta}{2} \left[ h(x_o) \sin \left( \theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) + x_o \cos \left( \theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right], \quad (2)$$

从(2)式可以看出,相位差中包含了两项,第一项和物体表面的高度成正比,第二项和  $x_o$  成正比,为线性倾斜项。

若照明光的倾斜角  $\theta$  和它的改变量  $\Delta\theta$ , 消除掉线性倾斜相后的相位差设为  $\Delta\varphi'$ , 就可以由相位差得到物体表面高度,由于  $\Delta\theta$  非常小,物体表面高度可近似为

$$h(x_o) \approx \frac{1}{\sin \theta} \frac{\lambda \Delta\varphi'}{2\pi \sin \Delta\theta}. \quad (3)$$

对照明光倾斜前后记录的两幅数字全息图进行数字再现,并计算相位差,再代入(3)式计算物体表面的高度。本文使用的菲涅耳变换算法省去了积分号外的二次相位因子,二次相位因子只是空间坐标的函数,忽略该因子对相位差的计算没有影响。

### 2.2 相位图的拼接

在数字全息中,通过平移被测物体,将物体不同区域的全息像拼接起来,可以扩大视场。本文使用一种新的图像拼接方法来扩大数字全息的视场,这种方法不用平移物体,而是通过精确控制参考光的入射角来实现,其原理如图 1 所示。让照明光依次照明物体的不同部分并拍摄全息图,将多幅全息图的再现像拼接起来。为了保证频谱分离条件和抽样条件一直被满足,根据物体被照明区域位置的变化精确地调节参考光的入射角,使物参角对于每次拍摄保持不变。对全息图中的  $O_H R^*$  项进行菲涅耳逆变换,可得

$$F\{O_H R^*, -d\} = F\{O_H, -d\} \otimes \mathcal{F}^{-1}\{R^*\} \left( \frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d} \right) = O_o(x, y) \otimes \mathcal{F}^{-1}\{R^*\} \left( \frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d} \right), \quad (4)$$

式中  $F$  表示菲涅耳变换,距离为负代表逆变换,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示傅里叶逆变换,  $\otimes$  表示卷积,  $O_o(x, y)$  表示物平面光场分布。对参考光  $R = \exp(j2\pi x \sin \alpha / \lambda)$  的共轭进行傅里叶逆变换可得

$$\mathcal{F}^{-1}\{R^*\} \left( \frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d} \right) = \delta \left( \frac{x}{\lambda d} - \frac{\sin \alpha}{\lambda}, \frac{y}{\lambda d} \right), \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,并利用小角度近似,用弧度代替正弦,得到

$$F\{O_H R^*, -d\} = \lambda d O_o(x - d\alpha, y), \quad (6)$$

(6)式即为  $x_0$  平面的重现光场分布。可以看出由于  $R^*$  的存在,再现像相对于物体位置移动了  $d\alpha$ ,当分别照明物体各部分时,需要调节参考光的入射角  $\alpha$  使物参角  $\Phi$  保持不变,平移量  $d\alpha$  对于物体的不同部分就不一致,这会造成各再现像之间的位置关系被破坏,给图像拼接带来困难。如图 1 所示,若以照明中心在  $O$  点为起始记录位置,当在物平面上照明中心偏离坐标原点  $O$  距离  $b$  时,物光方向相对光轴  $z$  将转过一定的角度  $\arctan(b/d)$ ,为保持物参角不变,参考光倾斜角也应随之改变  $\Delta\alpha = \arctan(b/d)$ 。因此两幅再现像的平移量相差了  $d\Delta\alpha$ 。因为  $d$  是已知的,所以只要知道参考光入射角的变化量  $\Delta\alpha$ ,就能恢复它们的实际位置关系,实现图像的准确拼接。如果  $\Delta\alpha$  存在误差  $E_{\Delta\alpha}$ ,定义拼接相对误差为

$$dE_{\Delta\alpha} = \frac{E_{\Delta\alpha} L_{\text{CCD}}}{\lambda}. \quad (7)$$

### 3 实验

实验装置如图 2 所示。图中 BS1 和 BS2 为分束器,BA 是光束衰减器,BE 是扩束器, $M$  是反射镜, $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  为正透镜。激光器发出的光束被 BS1 分成两束,透射光被扩束后,由透镜  $L_1$  和  $L_2$  准直作为参考光,反射光再经两次反射后被扩束,由透镜  $L_3$  准直,作为物体的照明光。物体被成像透镜所成的实像处于透镜与分束器 BS2 之间。透镜  $L_3$  被固定在一个精密平移台上,可沿垂直于照明光的方向精密移动,使照明光的倾斜角发生变化,分束器 BS2 被固定在精密转台上,用来调节参考光的入射角。实验所使用的激光波长为 532 nm,CCD 像素间距为 8.6(H)×8.3(V)  $\mu\text{m}$ ,像素数 768pixel(H)×576pixel(V)。透镜  $L_3$  的焦距是 300 mm,口径为 75 mm,成像镜头焦距为 100 mm。

实验中测量了一个石膏嘴的三维形貌,大小约为 11 cm×19 cm。将物体分为 3 行 5 列共 15 部分,调节照明光的倾角,分别照明被测物体的不同部分。因物体表面高度不同,用倾斜照明光照射时出现了遮挡,因此测量中将物体与  $xoy$  平面成  $7.7^\circ$  放置。测量时,由于透镜  $L_3$  的口径为 75 mm,照明光斑大小直径约为 75 mm,为能够满足记录条件,使用了一成像透镜先使物面成一倒立的实像,再调节

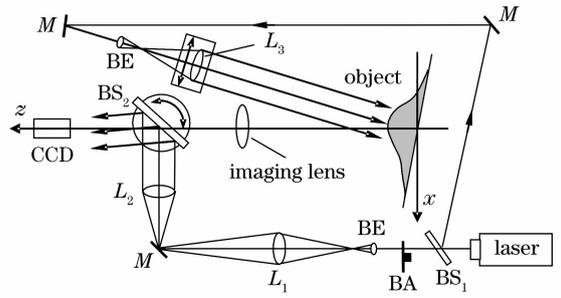


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

合适的物参角  $\Phi$ ,使再现像的频谱满足分离条件,并且使物体的再现像达到最大空间带宽积。在水平方向,通过  $L_3$  调节照明光的入射角  $\theta$ ,通过精密转台转动分束器 BS2 调节参考光的入射角  $\alpha$ ,使物参角  $\Phi$  保持不变,因为在水平方向原始像和共轭像已经分开,在竖直方向就能以固定的参考光方向实现整个物体高度上的测量,所以保持参考光竖直方向的入射角不变,只改变照明光的俯仰实现不同高度上的照明。在水平方向调节  $L_3$  使照明光的倾角  $\theta$  发生变化后和参考光的入射角  $\alpha$  相对于初始位置的改变量  $\Delta\alpha$  可由图中几何关系求出,实验中  $\theta$  取  $15.70^\circ, 14.08^\circ, 12.46^\circ, 10.83^\circ, 9.21^\circ$  时,  $\Delta\alpha$  分别为  $1.20^\circ, 0.52^\circ, 0^\circ, -0.61^\circ, -1.23^\circ$ 。

测量各部分三维形貌时, $L_3$  的平移量为 0.06 mm,因此  $\theta$  的改变量是  $\Delta\theta = 0.06/300 \text{ rad} \approx 0.0115^\circ$ ,CCD 和成像镜头像面的距离  $d$  是 610 mm,物体距镜头大约 760 mm,CCD 距实像为 495 mm。实验测量结果如图 3 所示。照明光倾斜前后,数字全息的再现像分别为 U1 和 U2,计算 U1/U2 的辐角得到它们的相位差,由于物体的实像是倒立的,所以需要先将相位差图像旋转  $180^\circ$ ,结果如图 3(a) 所示。图 3(b) 是从图 3(a) 中去除了与  $x_0$  成正比的线性倾斜项的结果。为了消除相位图中的噪声,使用自适应滤波法<sup>[14]</sup>对图 3(b) 进行了去噪处理,结果如图 3(c) 所示。在区域增长相位去包裹算法<sup>[15]</sup>的基础上,引入了分割线算法的概念<sup>[16]</sup>,使区域增长的方向绕过相位图中正负极点的连线(分割线),通过数据拟合对图 3(c) 进行相位去包裹,结果如图 3(d) 所示。去包裹程序还对再现像的强度图和相位图 3(b) 的方差进行了综合分析,标出物体区域,相位去包裹只在物体区域内进行,对无意义的背景噪声不作处理。

根据测量中  $\Delta\alpha$  的不同,当参考光入射角  $\alpha$  变化量为  $\Delta\alpha$  时,对各幅再现像的  $x$  坐标平移  $\Delta x =$

$d\Delta\alpha$ 。对图 3(d) 的各子图分别进行坐标平移并进行拼接,重叠区域取两幅包裹相位图的加权平均值。图 4 给出了拼接的结果,图 4(a) 是图 3(d) 中各部分去包裹相位图拼接后的图像,其像素数为 467 pixel

$\times 645$  pixel,图 4(b) 是得到的石膏嘴与  $xoy$  平面存在夹角的三维形貌图,图 4(c) 是经过坐标旋转将该夹角消除后的三维形貌图。

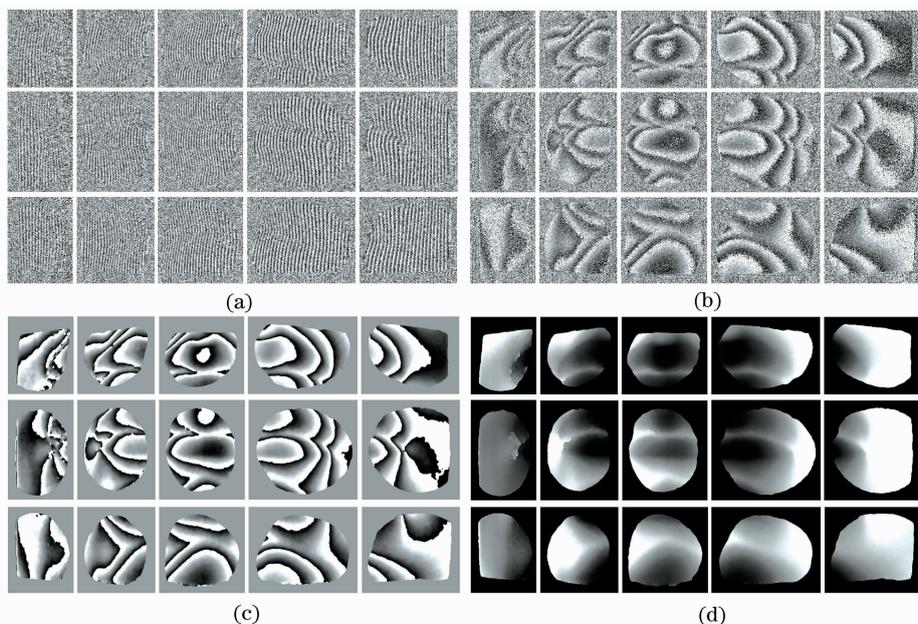


图 3 石膏嘴各部分三维形貌测量。(a) 再现像的相位差;

(b) 除去线性倾斜项后的相位差;(c) 去噪声后的相位差;(d) 相位去包裹的结果

Fig. 3 3-D surface shape measurement of a plaster mouth model. (a) Phase difference of the reconstructed image; (b) phase difference after removal of the linear tilting term; (c) phase difference after denoising; (d) the result of phase unwrapping

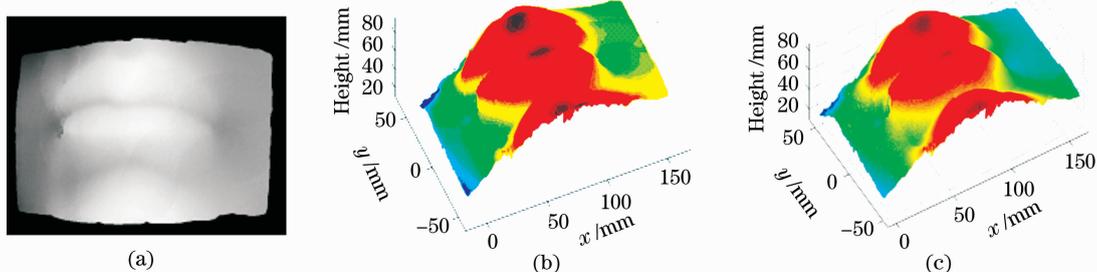


图 4 (a) 石膏嘴去包裹相位图的拼接;(b) 石膏嘴修正前的三维形貌图;(c) 石膏嘴修正后的三维形貌图

Fig. 4 Spliced image of the unwrapped phase of the plaster mouth model (a)

and 3-D topography of the plaster mouth model before (b) and after (c) modification

通过误差标定实验得到石膏嘴的高度测量误差大约为 0.5 mm,与传统的结构光照明法相比误差大了一个数量级,主要原因是漫反射物体的散斑噪声较大和再现像的相位计算精度低。实验使用的电控旋转台的转动精度为  $0.01^\circ$ ,所以转动误差远小于  $0.01^\circ$ ,由此可得前面实验拼接的绝对误差远小于 1.14 mm,拼接的相对误差远小于 4.33,可以看出拼接误差非常小,完全满足通常的测量需要,对图像的质量没有影响,如果使用更加精密的电控旋转

台拼接误差还可以进一步减小。数字全息再现像的点数受离轴全息图的记录条件限制,最大不超过 CCD 点数的二分之一,与传统的结构光照明法相比像素利用率低,但是本文提出的图像拼接法可以使物体整体图像的点数大于 CCD 像素点数,在一定程度上弥补了这一缺陷。

## 4 结 论

在离轴数字全息的基础上采用本文提出的相位

图像的拼接对石膏嘴的三维形貌进行测量,证明该方法能有效地增加数字全息测量物体三维形貌的范围。实验中通过精确控制参考光入射角的变化来复原物体各部分测量图像的相对位置,从而实现各图像的准确拼接,得到整个物体的三维形貌,进一步扩大了数字全息的测量范围。这种拼接并不要求精确移动物体或 CCD,而只需要精确控制分束镜的转动,因此便于实现系统的集成化,使数字全息三维形貌测量技术更加实用化。

### 参 考 文 献

- 1 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1435~1439  
唐 燕,陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1435~1439
- 2 Sun Ping, Zhang Li, Tao Chunxian. 3-D shape measurement with Fourier transform based on LCD projector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1250~1252  
孙 平,张 丽,陶春先. 基于 LCD 数字投影技术的傅里叶变换法测量物体三维形貌[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1250~1252
- 3 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 4 U. Schnars, W. Juptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **32**(2): 179~181
- 5 T. M. Kreis, M. Adams, W. Juptner. Methods of digital holography; a comparison[C]. *SPIE*, 1997, **3098**: 224~233
- 6 Zhang Fucai, I. Yamaguchi, L. Yaroslavsky. Systematic approach for the design of reconstruction algorithm in digital holography[J]. *SPIE*, 2005, **5642**:261~270
- 7 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.* . Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. lasers*, 2004, **31**(5): 570~574  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息图再现像的分析计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 570~574
- 8 G. Pedrini, P. Froning, H. J. Tiziani *et al.* . Shape measurement of microscopic structures using digital holograms [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**: 257~268
- 9 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 10 Ichirou Yamaguchi, Sohgo Ohta, Jn-ichi Kao. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography[J]. *Optical and Lasers Engineering*, 2001, **36**: 417~428
- 11 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 99~104  
毛先富,陈文静,苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 99~104
- 12 Mengtao Huang, Zhuangde Jiang, Bing Li. Evaluation of absolute phase for 3D profile measurement using fringe projection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):320~322
- 13 Wang Huaying, Wang Dayong, Xie Jianjun *et al.* . Analysis of recording conditions of digital hologram by maximum spatial frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):645~649  
王华英,王大勇,谢建军等. 用极值频率法分析数字全息的记录条件[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 645~649
- 14 F. Palacios, E. Goncalves, J. Ricardo *et al.* . Adaptive filter to improve the performance of phase-unwrapping in digital holography[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**: 245~251
- 15 Wu Lushen, Ren Dan, Wu Kui. New region-growing algorithm for phase unwrapping [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, (s1): 353~359  
吴禄慎,任 丹,吴 魁. 一种新的区域增长相位去包裹算法[J]. *机械工程学报*, 2002, (s1): 353~359
- 16 Wang Xin, Jia Shuhai, Chen Guangde. A review of the study on phase unwrapping [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(8): 665~668  
王 新,贾书海,陈光德. 相位去包裹技术进展[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(8): 665~668