

# 激光散斑三维形貌绝对测量技术

赵明路<sup>1</sup> 马 晓<sup>1</sup> 张子邦<sup>1</sup> 梁 曼<sup>1</sup> 李 莹<sup>2,3</sup> 钟金钢<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

<sup>2</sup>暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632

<sup>3</sup>暨南大学华文学院, 广东 广州 510610

**摘要** 为了实现对物体的三维形貌绝对测量,避免相位解包裹处理,研究实现了一种基于激光散斑场纵向相关性质的三维形貌绝对测量技术。实验研究了激光散斑场纵向相关性质,利用CCD相机拍摄不同纵向深度的散斑图,通过相关运算获得散斑图的纵向深度与横向偏移之间的线性关系。利用这一线性关系,实现了对处于激光散斑场中的物体表面到参考面之间高度的绝对测量,三维形貌重建无需相位解包裹处理,并且由于激光散斑场是激光照射毛玻璃形成的,避免了投影数字散斑技术中的透镜投影系统,技术装置简单,操作方便。该技术有望在实践中获得应用。

**关键词** 测量; 高度测量; 图像相关; 激光散斑

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0208001

## Three-Dimensional Shape Absolute Measurement Based on Laser Speckles

Zhao Minglu<sup>1</sup> Ma Xiao<sup>1</sup> Zhang Zibang<sup>1</sup> Liang Man<sup>1</sup> Li Ying<sup>2,3</sup> Zhong Jingang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

<sup>3</sup>College of Chinese Language and Culture, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510610, China

**Abstract** The longitudinal coherence properties of laser speckles are investigated. The properties are then utilized for three-dimensional (3-D) shape absolute measurement, bringing a feature that phase unwrapping is released. A sequence of speckle images is captured by a CCD camera at different longitudinal positions. The lateral displacement of the speckle can be obtained by calculating the correlation among the speckle images. According to the relationship between the longitudinal length and the lateral displacement, the absolute measurement of height from the object surface to reference plane can be realized. Additionally, the phase unwrapping process is released in data processing. A projection-lens system in the technique of projected digital speckle patterns is also released, because the laser speckle field is generated by a laser which illuminates on a frosted glass. The structure of the system is simple and convenient for implement. This technique is potential to be used in practice.

**Key words** measurement; height measurement; image correlation; laser speckle

**OCIS codes** 120.2830; 100.2000; 030.6140

## 1 引 言

结构光投影三维形貌测量术,已广泛应用于三维模型重建、物体表面轮廓测量等领域<sup>[1-6]</sup>。在目前现有的结构光投影三维形貌测量技术中,利用条纹图投影的相位检测三维形貌测量技术,具有测量速度快、精度

收稿日期: 2015-08-12; 收到修改稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475064、41206081)、广东省科技计划项目(2013B060100001)

作者简介: 赵明路(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: milozhao@live.cn

导师简介: 李 莹(1976—),女,博士,副教授,主要从事光学检测等方面的研究。E-mail: liying@hwy.jnu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn

高等特点,但该技术必须在求得条纹相位后,需要进行相位解包裹处理<sup>[7]</sup>。当物体面形复杂、存在较大的突变时,相位解包裹处理会出现较大困难,导致相位解包裹处理错误,无法重建物体的实际三维面形<sup>[8-9]</sup>。尽管利用双频条纹图可以适当提高相位解包裹的准确性<sup>[10]</sup>,但仍不能完全解决相位解包裹问题。相位包裹问题是由于条纹的周期性而引起,为了完全避免相位解包裹处理,一些学者提出了一种用随机散斑图取代周期条纹图的投影数字散斑三维形貌测量术<sup>[11-13]</sup>。该技术将散斑图通过投影机投射到被测物体表面,CCD摄像机在不同于投影的方向拍摄被测物体表面的散斑图,利用相关运算,获取纵向不同深度平面的散斑图相对基准面散斑图的横向位移量,来解调物体表面的深度信息,从而重建被测物体表面形貌。但由于任何透镜投影系统都有一定的景深,当物体表面落差超出景深范围比较多时,散斑图会模糊,将影响深度信息的解调。

激光散斑场是由相干激光束被随机散射介质调制后,在三维空间形成的包含许多呈随机分布的亮暗斑点光场。对激光散斑场的观察和理论研究几乎在激光发明的同时就开始了,并发展出了许多利用激光散斑特性的应用<sup>[14-15]</sup>。过去对激光散斑场的观察和研究,主要集中在与散射介质平面平行的测量平面上的横向性质。尽管有少量对散斑场纵向方向相关性质的研究,但主要是以理论研究为主<sup>[16-21]</sup>,因此利用散斑场纵向方向相关性质的应用也较少见。近年,微软公司的 Kinect 三维体感设备就利用了散斑场纵向方向相关性质,实现了对游戏中的人体姿态三维跟踪。董小龙等<sup>[22]</sup>提出利用纵向去相关技术实现三维重建。

本文首先对激光散斑场纵向相关性质进行了实验研究,再利用其纵向相关性质,实现了对处于激光散斑场中的物体的三维形貌绝对测量,避免了相位解包裹处理,并且无需透镜投影系统,散斑场由激光束照射在毛玻璃上形成。

## 2 激光散斑场纵向相关性质的实验研究

激光散斑场纵向相关性质的实验装置如图 1 所示,L 是 150 mm 腔长、TEM<sub>00</sub>模式的氦氖激光器。激光器发出的激光束经过毛玻璃(G)后形成散斑场,图中 Z 轴垂直于毛玻璃光滑面,并且与激光器的激光束出射光轴重合。为了研究激光散斑场纵向(Z 轴方向)相关性质,用一与 Z 轴垂直并在 Z 轴方向可移动的平板(P)接收散斑,用一 CCD 摄像机拍摄平板上的散斑图,CCD 的成像光轴与 Z 轴的夹角为  $\theta$ ,并且激光光轴与 CCD 光轴构成的平面与图中 Y 轴垂直。平板从  $z=0$  处开始沿着纵向方向(Z 轴方向)等间距  $\Delta z$  移动 S 次,由 CCD 依次拍摄不同平板上的散斑图,得到 S+1 幅用  $R(s)$  表示的散斑图(其中  $s=0,1,\dots,S$ )。例如,在图 1 中  $z=0$  位置拍摄的散斑图用  $R(0)$  表示,等间距移动了 50 次 ( $S=50$ ) 拍摄的散斑图用  $R(50)$  表示。

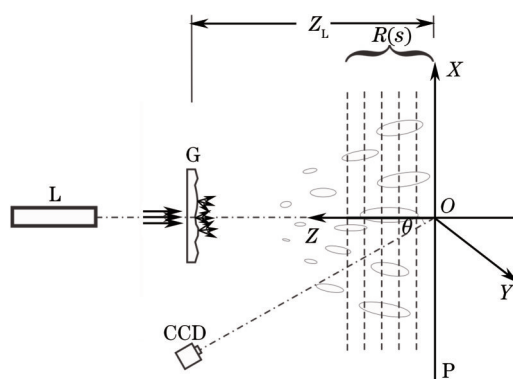


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

散斑场在纵向方向上的相关长度可以用来衡量散斑场在纵向方向上的相关情况。理论研究表明,散斑场的纵向相关长度  $\delta_z$  可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\delta_z = 6.7\lambda(Z_L/D)^2, \quad (1)$$

式中  $Z_L$  为毛玻璃(G)粗糙面到平板(P)的垂直距离,  $D$  为毛玻璃粗糙面上光斑的直径,  $\lambda$  为激光波长。这里  $Z_L = 250 \text{ mm}$ ,  $D \approx 1 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 求得散斑纵向相关长度  $\delta_z \approx 265.0 \text{ mm}$ 。实验中平板(P)从  $z=0$  开始沿着 Z 轴方向等间距  $\Delta z = 1 \text{ mm}$  移动 50 次(即 S 为 50),由 CCD 依次拍摄每次移动后平板上的散斑图,共拍摄

到 51 幅散斑图像,图 2 给出了实验拍摄到的  $R(1)$ 、 $R(5)$ 、 $R(10)$ 、 $R(50)$  散斑图,所拍摄的散斑图尺寸为  $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 。由于平板在纵向移动的范围为  $50 \text{ mm}$ ,小于理论估算的纵向相关长度  $265.0 \text{ mm}$ ,即实验所得的这些纵向不同位置的散斑图理论上应该具有很好的相关性或相似性。因此在实验上可以通过计算纵向不同位置散斑图间的相关系数,来评价其纵向相关性质,相关系数越大,说明两散斑图的相关性越大或相似度越高。

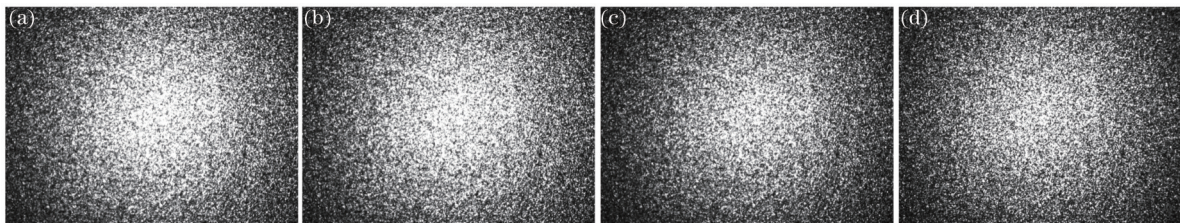


图 2 散斑图。(a)  $R(1)$ ; (b)  $R(5)$ ; (c)  $R(10)$ ; (d)  $R(50)$

Fig.2 Speckle images. (a)  $R(1)$ ; (b)  $R(5)$ ; (c)  $R(10)$ ; (d)  $R(50)$

令  $R(0)$  为基准散斑图,其他的散斑图为待匹配散斑图,所有的待匹配散斑图都和基准散斑图进行相关运算,得到相关系数来评价它们之间的相关性。根据成像原理可知,由于 CCD 的光轴和平板移动的方向有一个夹角  $\theta$ ,当平板在纵向移动时,CCD 拍摄到的散斑图像在  $X$  轴方向(横向)也会有一个移动。考虑到这个横向移动的影响,可以利用一个大小为  $m \times n$ (假设散斑图大小为  $M \times N$ ,  $1 < m < M$ ,  $1 < n < N$ )的模板在基准散斑图上选取一个基准子散斑图,在待匹配散斑图中逐点移动同样大小的模板来获取不同的待匹配子散斑图,如图 3 所示。将待匹配子散斑图与基准子散斑图作相关运算,计算相关系数  $C$ :

$$C = \frac{\sum_m \sum_n [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]}{\sqrt{\sum_m \sum_n (f - \bar{f})^2 \cdot \sum_m \sum_n (g - \bar{g})^2}}, \quad (2)$$

式中  $f=f(i,j)$  与  $g=g(i,j)$  分别为基准子散斑图和待匹配子散斑图各点的灰度值,  $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别为基准子散斑图和待匹配子散斑图的灰度平均值。

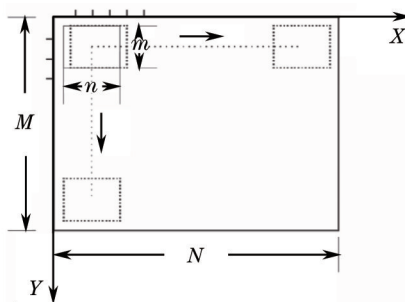


图 3 获得相关系数分布示意图

Fig.3 Schematic diagram of obtaining a correlation coefficient distribution

每获取一个待匹配子散斑图,便利用(2)式计算得到一个相关系数。移动模板遍及整个待匹配散斑图时,就可得到一个用  $M \times N$  大小的矩阵  $T(s)$  表示的相关系数分布,由于无法计算相关系数,矩阵四周元素的相关系数值设置为零。按照这种方法依次求出每个待匹配散斑图[  $R(1)$ ,  $R(2)$ , ...,  $R(50)$  ]的相关系数分布  $T(1)$ ,  $T(2)$ , ...,  $T(50)$ 。在每个相关系数分布中,如果有一个最大相关系数,那么和这个最大相关系数对应的待匹配子散斑图,就是和基准子散斑图最接近的子散斑图,称为已匹配子散斑图。同时,根据基准子散斑图的中心坐标值和已匹配子散斑图的中心坐标值,可计算它们的中心坐标值差值,也即相对基准散斑图的横向偏移量。

为了排除基准子散斑图位置的特殊性所带来的干扰,选取了两幅不同位置的基准子散斑图,如图 4 所示,其中一幅位于散斑图像中心,称为子图像 A[图 4(a)],另一幅居于偏离中心的位置,称为子图像 B[图 4(b)],所选基准子散斑图尺寸为  $101 \times 101$ (即  $m = n = 101$ )。

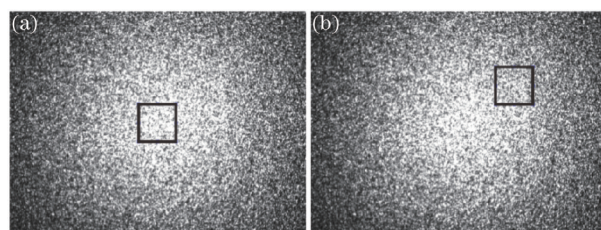


图4 不同位置的基准子散斑图。(a)子图像A;(b)子图像B

Fig.4 Reference subimages at different positions. (a) Subimage A; (b) subimage B

根据上述实验原理和参数设置,分别得到两组实验数据。根据相关系数分布和待匹配子散斑图中心位置坐标,可以用图直观地表示出与不同待匹配子散斑图对应的相关系数情况。图5所示为子图像A与相距基准散斑图 $z$ 处的待匹配散斑图之间的相关系数分布。 $z$ 的取值分别为1、5、10、50 mm。图6所示为子图像B与相距基准散斑图 $z$ 处的待匹配散斑图之间的相关系数分布。 $z$ 的取值分别为1、5、10、50 mm。图5和图6中, $X$ 、 $Y$ 为待匹配子散斑图中心位置坐标, $C$ 为相关系数数值。由图5和图6可知,基准子散斑图和不同纵向位置的散斑图之间的相关系数分布中有一个明显的峰值(最大值)。与峰值对应的待匹配子散斑图和基准子散斑图相似性最大,即基准子散斑图在每幅待匹配散斑图中都可以找到与之相匹配的区域。

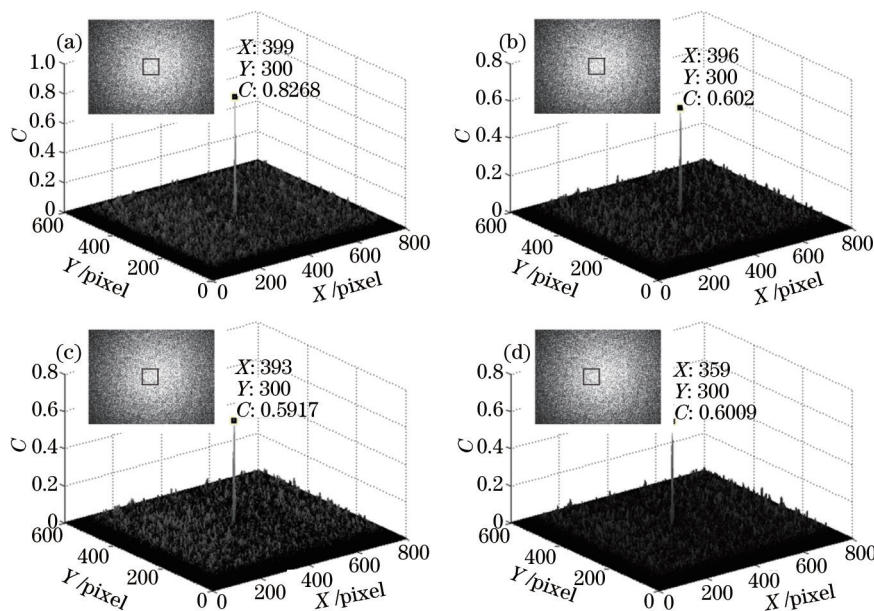


图5 子图像A与相距基准散斑图 $z$ 处的待匹配散斑图之间的相关系数分布。(a)  $z=1$  mm ;(b)  $z=5$  mm ;

(c)  $z=10$  mm ;(d)  $z=50$  mm

Fig.5 Distribution of correlation coefficients between subimage A and matching image at a distance  $z$  from reference image.

(a)  $z=1$  mm ;(b)  $z=5$  mm ;(c)  $z=10$  mm ;(d)  $z=50$  mm

图7给出了两种基准子散斑图情况下,各个相关系数分布 $T(s)$ 中的峰值大小,其峰值均大于0.5。实验中,平板在纵向移动的范围为50 mm,即实验所测量的纵向空间处于激光散斑场的纵向相关范围内。因此,所得实验数据和理论是吻合的。图7(a)的相关系数数值比图7(b)稍小,可能是中心位置散斑较亮,拍摄时存在饱和情况。另外,图7也显示相关系数出现一定波动,这可能是因为这些散斑图是依次在不同的时间拍摄的,而一般认为激光散斑场是与时间相关的一个动态场,尽管这里使用的是一个TEM<sub>00</sub>单模激光器,其输出光强仍会随时间在一定范围内波动,从而导致散斑场随时间发生波动。为了进一步考察这种波动对相关性的影响,进行了如下实验。将平板P固定于图1坐标原点处,其他实验装置设置参数不变,通过CCD拍摄50幅不同时间的散斑图 $R_t(0)$  ( $t=1,2,3\cdots,50$ ),拍摄间隔为1 s,关闭激光器L几个小时后,重新打开激光器L,待其稳定后再拍摄1幅散斑图 $R'(0)$ 。令 $R'(0)$ 为基准散斑图,50幅 $R_t(0)$ 为待匹配散斑图,在所有散斑图中心位置取大小为101×101的子图像进行相关运算,得到的相关系数如图8所示。可以看出其相关系数随时间

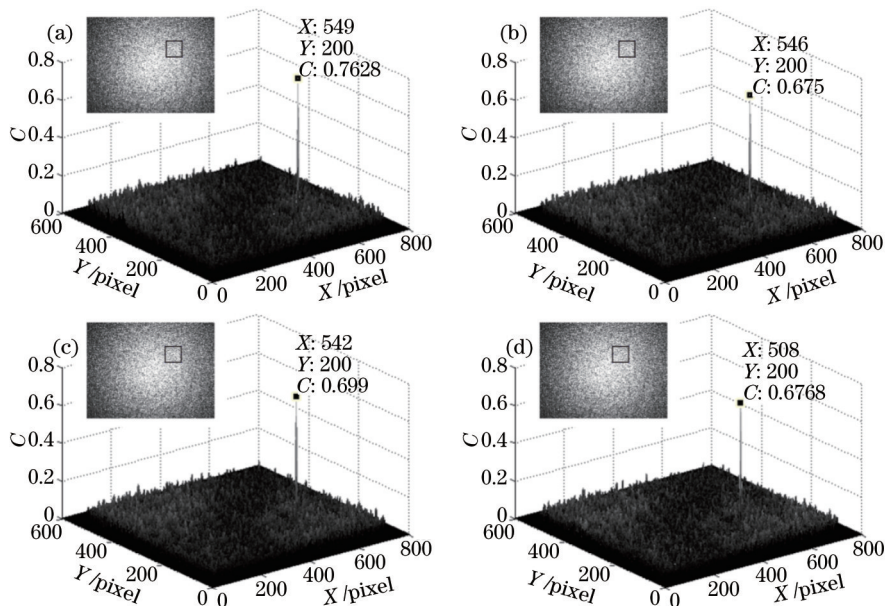


图6 子图像B与相距基准散斑图 $z$ 处的待匹配散斑图之间的相关系数分布。(a)  $z = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $z = 5 \text{ mm}$ ; (c)  $z = 10 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 50 \text{ mm}$

Fig.6 Distribution of correlation coefficients between subimage B and matching image at a distance  $z$  from reference image.

(a)  $z = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $z = 5 \text{ mm}$ ; (c)  $z = 10 \text{ mm}$ ; (d)  $z = 50 \text{ mm}$

出现了一定的波动,但数值均大于0.7,可以说明散斑图在时间上仍具有良好的相关性,并且二次启动激光器获得的散斑图同样具有良好的相关性。

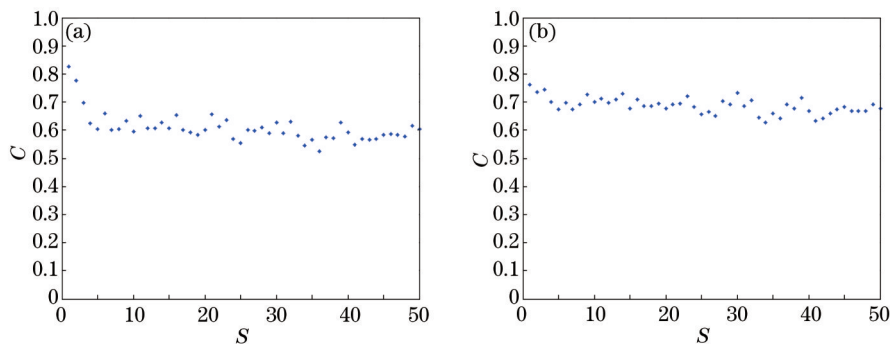


图7 相关系数峰值。(a) 子图像A; (b) 子图像B

Fig.7 Peak value of correlation coefficient. (a) Subimage A; (b) subimage B

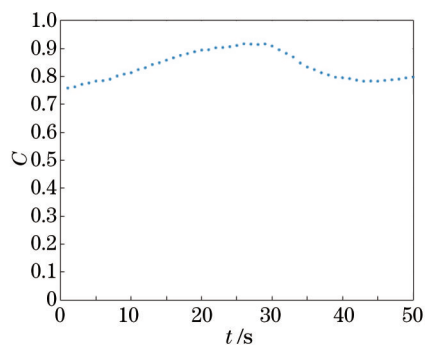


图8 相关系数

Fig.8 Value of correlation coefficient

当然,激光光源的发散性将导致散斑颗粒在不同位置会在拍摄图像中表现出不同的放大比例,从而也会影响散斑图的相关性。可以用不同位置散斑颗粒的尺寸来估算其影响程度。在自由传播情况下,激光散斑的颗粒尺寸直径<sup>[6]</sup>为

$$d_s = 1.4\lambda(Z_L/D). \quad (3)$$

由实验中  $D \approx 1 \text{ mm}$ 、 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 、 $Z_L = 250 \text{ mm}$  可得,散斑颗粒的尺寸  $d_s \approx 0.22 \text{ mm}$ ,而实验中  $50 \text{ mm}$  的测量范围内散斑尺寸变化值为  $0.04 \text{ mm}$ 。因此这种不同的放大比例也会对相关系数的计算产生一定的影响,从而影响测量范围。

由图 1 所示,CCD 的拍摄光轴和平板移动的方向( $Z$ 轴方向)存在夹角  $\theta$ ,导致 CCD 拍摄到不同纵向位置的散斑图像在横向( $X$ 或 $Y$ 轴方向)有一定偏离,实验中,根据每个相关系数分布  $T(s)$  中峰值所对应的待匹配子散斑图的中心横纵坐标,可得每幅待匹配散斑图像相对于基准散斑图的横向偏移量,及偏移量与平板纵向移动距离之间的关系。图 9(a)和图 10(a)分别为根据两不同位置的基准子散斑图得到的在  $X$ 轴方向上的偏移量;图 9(b)和图 10(b)分别为根据两不同位置的基准子散斑图在  $Y$ 轴方向上的偏移量。图 9 和图 10 显示在两种情况下得到的横向偏移量基本一致。由于实验中激光光轴与 CCD 光轴是处于同一水平面上,所以基准子散斑图在  $Y$ 轴方向的偏移量为 0,即  $\Delta y = 0$ ,如图 9(b)和图 10(b)。当然在实验中如果无法严格保证激光光轴和 CCD 光轴处于同一水平面,则在  $Y$ 轴方向的偏移量也将不为零。由图 9(a)和图 10(a)可知, $X$ 轴方向的偏移量与待匹配散斑图的纵向位置成对应关系,即

$$\Delta x = \alpha s \Delta z. \quad (4)$$

由于  $z = s\Delta z$ ,有

$$\Delta x = \alpha z, \quad (5)$$

式中  $z$  为纵向位移,单位为  $\text{mm}$ ;  $\Delta x$  为在  $X$ 轴方向上的偏移量,单位为  $\text{pixel}$ ;  $\alpha$  为定值,由激光光轴与 CCD 光轴的夹角  $\theta$  决定,单位为  $\text{pixel/mm}$ 。这与实验所采用三角测量法原理是相吻合的,所以基准子散斑图在横向的偏移量随纵向位移的变化而发生线性变化,这种线性关系可以被用来测量物体三维形貌。具体计算  $\alpha$  值时,先对图 9(a)中的数值进行线性拟合,再计算其斜率的绝对值即  $\alpha$  值,其值为  $0.81 \text{ pixel/mm}$ 。实验中,移动间隔  $\Delta z$  越小,在一定移动范围内获取的数据就越多,计算  $\alpha$  值时线性拟合精度就越高,获得的  $\alpha$  值也就越精确。

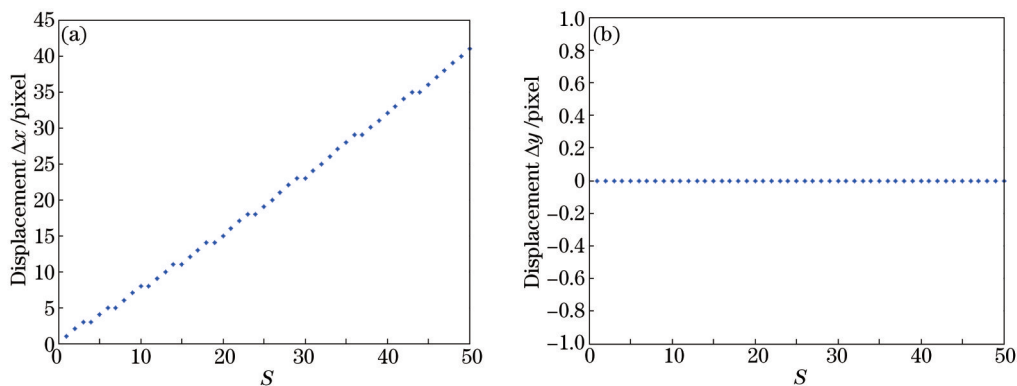


图 9 子图像 A 在(a)  $x$ 轴方向和(b)  $y$ 轴方向上的偏移量

Fig.9 Displacement of subimage A on (a)  $x$  axis and (b)  $y$  axis

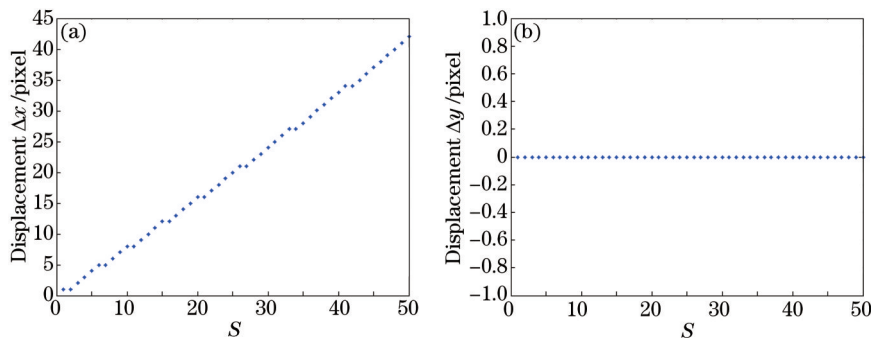


图 10 子图像 B 在(a)  $x$ 轴方向和(b)  $y$ 轴方向上的偏移量

Fig.10 Displacement of the subimage B on (a)  $x$  axis and (b)  $y$  axis

### 3 基于激光散斑场纵向相关性质的三维形貌测量

实验装置如图 1 所示,待测量物体为一高度 25 mm 的四面体和一长 39 mm 宽 18 mm 高 12 mm 的长方体。首先将平板(P)移动到 0 点位置,拍摄一幅散斑图  $R(0)$ 。然后将待测物体放置在参考板上,拍摄一幅经过待测物体调制的散斑图  $R$ ,如图 11 所示。

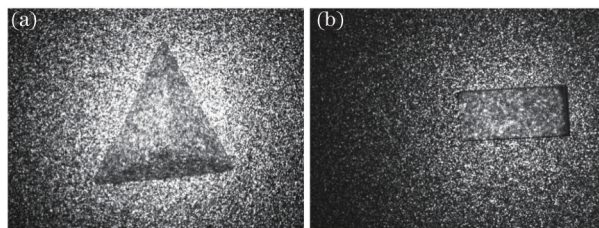


图 11 经过物体调制的散斑图。(a) 四面体; (b) 长方体

Fig.11 Speckle images modulated by objects. (a) Tetrahedron; (b) cuboid

与第二部分中获取相关系数分布的过程相似,将  $R$  视为基准散斑图,  $R(0)$  为待匹配散斑图,稍有不同的地方是,基准子散斑图也需要通过一个大小为  $m \times n$  的移动模板在  $R$  中逐点移动来获取。选取移动模板的大小,应基于以下两方面的考虑:1) 模板越大,计算得到的相关系数可靠性就越高,计算得到的  $\alpha$  值也越精确;2) 模板越小,重建图像的横向分辨率就越高,能反映的三维形貌细节就越丰富。综合这两点,实验中选择  $m = n = 25$ 。在基准子散斑图与  $R(0)$  相关运算所得的相关系数分布中找到唯一的峰值,即在  $R(0)$  中存在与基准子散斑图相对应的子散斑图,由此可计算出基准子散斑图中心位置对应的偏移量。当所取的基准子散斑图遍及  $R$  时,便可得到一个尺寸为  $U \times V$  的偏移量分布  $D_{\Delta x}$  (其中  $U = M - m + 1$ ,  $V = N - n + 1$ ),如图 12 (a)所示,再由(5)式计算出对应的纵向长度(物体高度)分布  $H_z$ ,如图 12(b)所示。根据物体高度分布  $H_z$  和每个点对应的  $X, Y$  坐标,得到物体的三维形貌重建图像,如图 13 和图 14 所示。图 13 为用灰度表示的所测物体的高度分布图(灰度标尺的单位为 mm),其中白色点为噪声,大部分出现在边缘附近,原因可能是:1) 由于在这些边缘区域受到物体阴影影响,无法得到准确的散斑信息所造成的;2) 测量时要用一定大小模板作相关计算,边缘处散斑在这一区域中有突变,相关性变差所致。

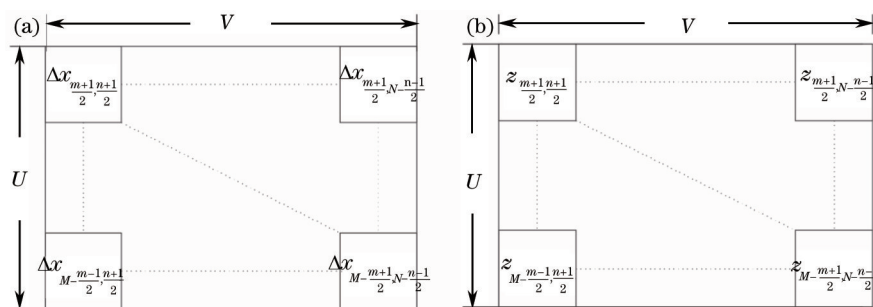


图 12 (a) 偏移量分布和(b) 物体高度分布示意图

Fig.12 Schematic diagram of (a) displacement distribution and (b) height distribution

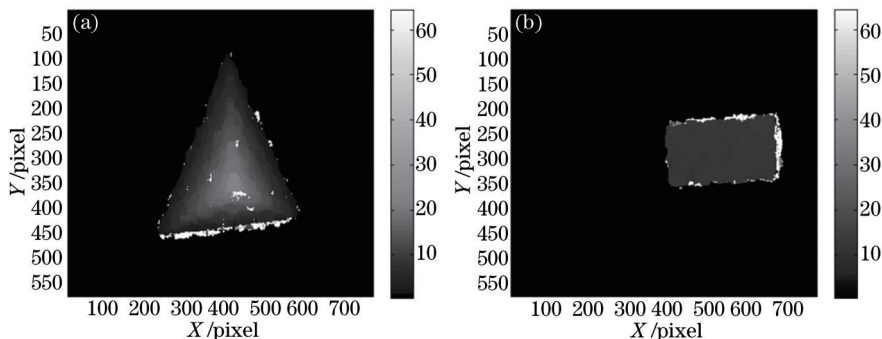


图 13 高度分布灰度图。(a) 四面体; (b) 长方体

Fig.13 Height distribution in 2-D gray scale image reconstruction. (a) Tetrahedron; (b) cuboid

通过膨胀腐蚀算法去除噪声后,图 14 给出了其重建结果的三维表示。图中是按位置坐标每 10 个数据点抽取 1 个点显示的,主要是为了便于观察。重建的物体表面高度值是距离参考面的绝对高度,因此重建过程不需要解包裹处理。为了和物体真实高度比较,图 15 给出了图 14(b)中第 280 行和第 550 列(即  $Y=280$  和  $X=550$ )的剖面高度值,可以看出实验结果为 12.01 mm 与物体真实高度 12 mm 基本接近。但从四面体的重建结果看,面与面之间的夹角不是很锐利,这是由于相关运算是在一个  $m \times n$  大小的区域内进行,重建图像的横向分辨率受  $m \times n$  大小的影响。

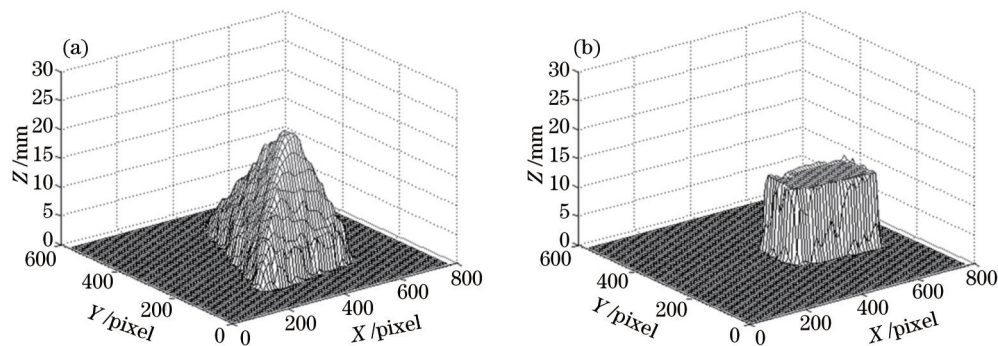


图 14 物体三维重建图。(a)四面体;(b)长方体

Fig.14 3-D shape reconstruction of objects. (a) Tetrahedral; (b) cuboid

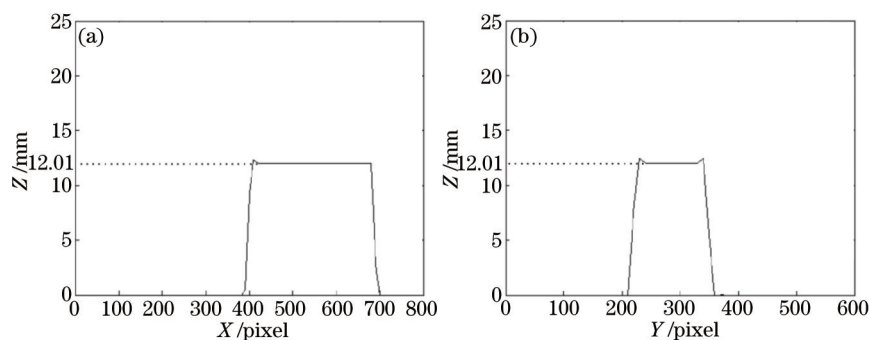


图 15 长方体三维重建剖面图。(a)  $Y=280$ ;(b)  $X=550$

Fig.15 3-D shape reconstruction of cuboid at (a)  $Y=280$  and (b)  $X=550$

## 4 结 论

本文首先在实验上研究了激光散斑场纵向相关性质,然后利用其纵向相关性质对处于激光散斑场中的物体进行三维形貌绝对测量,避免了相位解包裹处理,并且无需透镜投影系统,技术装置简单,操作方便。然而,所提方法在应用上也存在一些固有局限:1)理论上测量物体纵向尺寸(也就是高度的测量范围)不能大于由(1)式给出的散斑的纵向相关长度;2)由于相关运算在一个  $m \times n$  大小的区域内进行,将影响重建图像的横向分辨率;3)在物体面发生突变处,如物体的边缘,散斑在模板区域中也会有突变,会破坏相关性,选取的模板大小会影响形貌变化梯度的测量范围。另外,在实际中,激光光源的发散性将导致散斑颗粒在不同位置会在拍摄图像中表现出不同的放大比例,也会导致不同位置散斑图的相关性变差,影响测量范围和精度。

## 参 考 文 献

- 1 Toyooka S, Tominaga M. Spatial fringe scanning for optical phase measurement[J]. Opt Commun, 1984, 51(2): 68-70.
- 2 Chen W, Tan Y, Zhao H. Automatic analysis technique of spatial carrier-fringe patterns[J]. Opt & Lasers in Eng, 1996, 25(2): 111-120.
- 3 苏显渝,李继陶. 三维面形测量技术的新进展[J]. 物理, 1996, 25(10): 614-620.
- 4 He Dong, Liu Xiaoli, Yin Yongkai, et al.. Three dimensional imaging based on combination fringe and pseudorandom pattern projection [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209021.
- 何 懂, 刘晓利, 殷永凯, 等. 结合条纹和伪随机结构光投影的三维成像[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209021.
- 5 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41



- (2): 0209001.  
 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- 6 Chen Xiaorong, Cai Ping, Shi Wenkang. The latest development of optical non-contact 3-D profile measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(5): 528-532.  
 陈晓荣, 蔡 萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(5): 528-532.
- 7 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48(2): 133-140.
- 8 Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. J Opt Soc Am A, 1982, 72(1): 156-160.
- 9 Itoh K. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. Appl Opt, 1982, 21(14): 2470.
- 10 Macy W W. Two-dimensional fringe-pattern analysis[J]. Appl Opt, 1983, 22(23): 3898-3901.
- 11 Sjö Dahl M, Synnergren P. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography[J]. Appl Opt, 1999, 38(10): 1990-1997.
- 12 杨国标, 方如华, 丁祖泉, 等. 投影散斑相关法在物体三维形状测量中的原理研究及应用[C]. 第九届全国实验力学学术会议, 2000.
- 13 Dai Hongjun, Su Xianyu. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation method[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(10): 1208-1213.  
 代红军, 苏显渝. 数字散斑时间序列相关三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2001, 21(10): 1208-1213.
- 14 Chen Suting, Zhang Yong, Hu Haifeng. Surface roughness measurement based on fractal dimension of laser speckle[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408002.  
 陈苏婷, 张 勇, 胡海锋. 基于激光散斑分形维数的表面粗糙度测量方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408002.
- 15 Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Opt Eng, 1982, 21(3): 213427.
- 16 Joseph W Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. Cao Qizhi, Chen Jiabi, Transl. Beijing: Science Press, 2009: 69-71.  
 古德曼. 光学中的散斑现象:理论与应用[M]. 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 69-71.
- 17 Leushacke L, Kirchner M. Three-dimensional correlation coefficient of speckle intensity for rectangular and circular apertures[J]. J Opt Soc Am A, 1990, 7(5): 827-832.
- 18 Li Q B, Chiang F P. Three-dimensional dimension of laser speckle[J]. Appl Opt, 1992, 31(29): 6287-6291.
- 19 Gatti A, Magatti D, Ferri F. Three-dimensional coherence of light speckles: theory[J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): 063806.
- 20 Magatti D, Gatti A, Ferri F. Three-dimensional coherence of light speckles: experiment[J]. Phys Rev A, 2009, 79(5): 053831.
- 21 Cai Huaiyu, Jiao Mengjin, Huang Zhanhua, *et al.*. A phase encoding modulation method increase the longitudinal correlation of speckle fields[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101203.  
 蔡怀宇, 焦梦锦, 黄战华, 等. 提高散斑场纵向相关性的相位编码调制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 101203.
- 22 Dong Xiaolong, Guo Tailiang. Three-dimensional reconstruction method based on decorrelation of speckle patterns[J]. Computer and Modernization, 2012, (7): 83-87.  
 董小龙, 郭太良. 一种基于激光散斑去相关技术的三维重建方法[J]. 计算机与现代化, 2012, (7): 83-87.

栏目编辑: 何卓铭