

# 光学系统中光瞳动态变化的测量

孙争<sup>1,2,3</sup> 沈锋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; <sup>3</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研究了光学系统实时精密自动对准中光束光瞳位置动态变化的测量问题。采用相位相关算法处理基准和实测图像得到光瞳平移量数据,其测量相对误差不超过 0.4 pixel;针对实际运用中光瞳图像存在的灰度变化、噪声、旋转和缩放等诸影响因素,对算法进行了理论分析和全面的仿真测试。结果表明该算法能克服光强分布不均和强噪声的影响,得到高精度测量结果;对旋转和缩放进行校正后,测量精度在 1 pixel 左右。提出并测试了将多帧图像叠加后的图像之和作为基准图像的测量方法,使相位相关信噪比提高了 88.6%,稳健性显著提高。

**关键词** 测量;光路准直;相位相关法;光瞳平移量

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.051204

## Measurement of Dynamically Changing Pupil in Optical System

Sun Zheng<sup>1,2,3</sup> Shen Feng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electroics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>2</sup> Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The measurement of pupil-position change in real-time precise automatic alignment of optical system is investigated. The translation data of the pupil is obtained by processing reference of phase-correlation algorithm and experimentally measured image; the measurement relative error is less than 0.4 pixel. In accordance with the various influencing factors such as the grey level change, noise, rotation and scaling, theoretical analysis and simulation test of the algorithm is performed. The results show that algorithm can overcome effect of inhomogeneous distribution of light intensity and severe noise, so that high measurement result can be obtained. After correction of the rotation and scaling corrected, the measurement precision remains in 1 pixel. The measurement method that superposed multi-image sum is taken as the reference image is proposed, the phase correlation SNR is enhanced by 88.6%, robustness is obviously increased.

**Key words** measurement; optical collimation; phase correlation; pupil displacement

**OCIS codes** 120.1880; 120.1680; 100.2000

## 1 引言

在实际光学系统中,由于受热变形、工作环境干扰和运动等因素的影响,激光束在传播过程中处于动态变化,使光学系统光瞳未能与设定光阑对准而无法正常工作。在实际运用中,激光光束光强一般分布不均,光瞳图像边缘不清晰,且在传播过程中易受衍射和湍流等因素影响而产生动态变化。为确保激光能稳定、精确地到达指定目标位置,需要设计光路耦合装置对光束漂移进行实时测量和校正<sup>[1]</sup>,其中光瞳的偏移量的准确测量是关键之一。

2004年,赵维谦等<sup>[2]</sup>提出了基于二象限探测器的测量方案;2009年,亓波等<sup>[3]</sup>提出用位置敏感探测器测量信标光的光斑质心作为实际光瞳位置;2011年,杨榕<sup>[4]</sup>提出用哈特曼传感器焦面上点阵的整体质心来表

收稿日期: 2012-12-27; 收到修改稿日期: 2013-02-27; 网络出版日期: 2012-04-12

作者简介: 孙争(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学信号探测与处理等方面的研究。E-mail: arlife\_sun@163.com

作者简介: 沈锋(1969—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: shenfeng@ioe.ac.cn

征光瞳的位置的测量方案。以上测量方法概括为通过测量光瞳质心位置的运动来估计光瞳实际位置变化,当光瞳光强分布不均且动态变化时,这些方法在测量精度和稳定性上均不能满足实际需求。为此,本文提出一种基于图像处理的光瞳平移量测量方法,通过对标定光瞳图像和待测光瞳图像用相位相关算法进行处理,得到待测光瞳位置的动态变化。基于图像相位相关的测量方法对图像的整体灰度起伏、低频灰度变化(如条纹干扰)和强的噪声干扰不敏感,精度可达到亚像素级。

## 2 相位相关算法原理

相位相关法依据的是傅里叶变换的平移性质<sup>[5~7]</sup>。对于仅差平移量 $(d_x, d_y)$ 的两幅图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的关系为

$$f_2(x, y) = f_1(x - d_x, y - d_y). \quad (1)$$

对(1)式进行傅里叶变换可得

$$\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta) = \exp[-j2\pi(\epsilon d_x + \eta d_y)] \mathcal{F}_1(\epsilon, \eta), \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)$ ,  $\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta)$ 分别为图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的频谱。可见两者间的傅里叶频谱仅差一个与平移量 $(d_x, d_y)$ 相关的相位差,这一相位差等于两幅图像的归一化互功率谱 $G(\epsilon, \eta)$ ,即

$$G(\epsilon, \eta) = \frac{\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) \mathcal{F}_2^*(\epsilon, \eta)}{|\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) \mathcal{F}_2^*(\epsilon, \eta)|} = \exp[j2\pi(\epsilon d_x + \eta d_y)]. \quad (3)$$

对(3)式进行傅里叶逆变换可得

$$g(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{G(\epsilon, \eta)\} = \delta(x - d_x, y - d_y). \quad (4)$$

由(4)式可知, $G(\epsilon, \eta)$ 进行傅里叶逆变换后得到的函数 $g(x, y)$ 为一冲激函数( $\delta$ 函数),其在坐标 $(d_x, d_y)$ 处取得极大值。如图1所示,寻找函数 $g(x, y)$ 的极大值点位置就可得到图像之间的相对平移量。

数字图像为有限间隔采样,且程序处理过程中用离散傅里叶变换代替连续情况,测量的平移量结果为整数像素数。因此,本文对 $g(x, y)$ 中相关峰值附近进行双立方插值,使测量结果相对误差控制在0.4 pixel以内。

实际中,两幅图像归一化互功率谱的逆变换总是含有一个代表两幅图像配准点的相关峰和一些由噪声和频谱泄漏等因素引起的非相关峰<sup>[8]</sup>。相关峰的峰值大小直接反映两幅图像间的一致程度。为描述图像间的相关性,定义相位相关信噪比(SNR)为相关峰值幅度与非相关峰值标准差之比<sup>[5]</sup>。设相关峰值幅度用 $A$ 表示,则相关峰强度为 $A^2$ ,非相关峰强度为 $1 - A^2$ ,若图像大小为 $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ ,则非相关峰值的标准差 $\sigma$ 和信噪比 $\psi$ 定义为

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{N} \sqrt{(1 - A^2)} \\ \psi = \frac{A}{\sigma} = \frac{NA}{\sqrt{(1 - A^2)}} \end{cases}. \quad (5)$$

对于其他因素引起的非相关峰,设其取值为高斯分布,则非相关峰值大于等于阈值 $T$ 的概率 $P_T$ 可以表示为

$$P_T = \frac{N^2}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \int_0^1 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_T^2}\right) dx. \quad (6)$$

若使 $\sigma$ 取最大值 $N^{-1}$ ,则有

$$P_T \leq \frac{N}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{N^2 T^2}{2}\right). \quad (7)$$

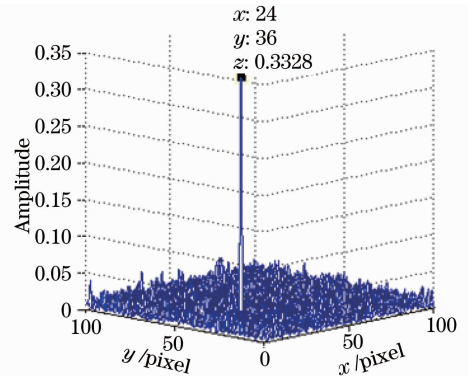


图1 平移量为(24,36)像素时的相关峰  
Fig.1 Correlation peak when displacement is (24, 36) pixels

实际中,非相关峰幅度大小一般在 0.03 以下,如对于  $N=200$  的图像,当阈值  $T=0.03$  时,非相关峰值大于  $T$  的概率  $P_T=1.22 \times 10^{-6}$ ,说明相位相关法具有很强的抗干扰能力和较大的测量动态范围。

### 3 相位相关测量方法性能的理论分析和仿真分析

实际应用中常要处理光强分布不均、存在强度整体波动和局部条纹干扰的光瞳图像,其成像质量差且很不稳定。另外,光瞳图像采集和传输过程中也不可避免地受到噪声干扰。

#### 3.1 灰度变化和噪声的影响分析

采集到存在灰度变化和噪声的光瞳图像  $f_2(x,y)$  可表示如下:

$$f_2(x,y) = f_1(x-d_x, y-d_y)h(x,y) + n(x,y), \quad (8)$$

式中  $f_1(x,y)$  为基准图像,  $h(x,y)$  和  $n(x,y)$  分别为灰度和噪声干扰项。

求图像间的归一化互功率谱得

$$G(\epsilon, \eta) = \frac{[\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) * H(\epsilon, \eta)][\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta) - N(\epsilon, \eta)]^*}{|[\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) * H(\epsilon, \eta)][\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta) - N(\epsilon, \eta)]^*|} = \exp[j2\pi(\epsilon d_x + \eta d_y)]. \quad (9)$$

由(9)式可知,当存在灰度变化和噪声干扰时,两幅图像频谱的相位差仍等于二者归一化互功率谱  $G(\epsilon, \eta)$ ,由(4)式知其傅里叶逆变换仍在坐标  $(d_x, d_y)$  处取极大值。当光强整体波动时,灰度影响因子  $h(x,y)$  为常数,归一化后可以消除其影响;当光强存在条纹干扰或者低频灰度变化影响时,  $H(\epsilon, \eta)$  为  $\delta$  函数或若干  $\delta$  函数和的形式,由于  $\delta$  函数与任一函数  $f(x,y)$  的卷积是  $f(x,y)$  自身,所以低频灰度变化对结果影响很小。对于噪声的影响,在频域中,噪声引入的频率分量会降低相关峰值信号功率;从空域中分析<sup>[9]</sup>,噪声的存在造成图像间的重叠率变小,从而使相关峰值减小。

为验证算法的有效性,测试中对实际采集到的存在灰度变化和条纹干扰的 100 frames 光瞳图像分别运用相位相关算法和传统质心算法进行平移量的测量,所得结果的相对误差统计分布如图 2 所示。

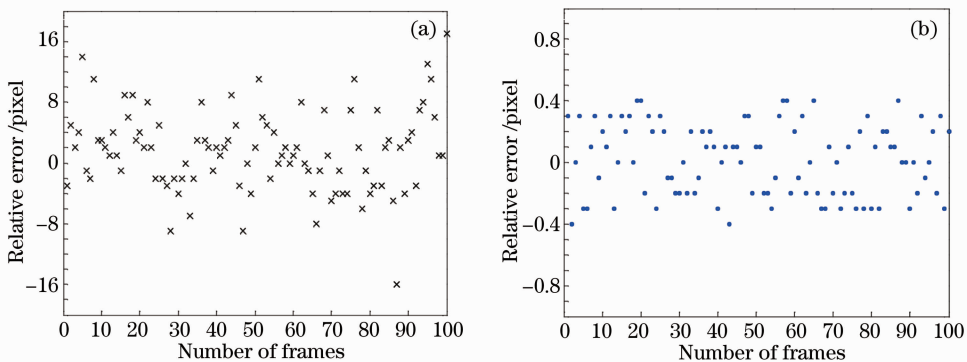


图 2 质心法和相位相关法测量结果的相对误差分布对比。(a) 质心法;(b) 相位相关法

Fig. 2 Distribution contrast of measured results' relative error of centroid and phase-correlation algorithm.

(a) Centroid algorithm; (b) phase-correlation algorithm

如图 2(a) 所示,在灰度变化的影响下,传统质心算法受灰度变化影响很大,相对误差达到十几像素,不能满足实际需求;图 2(b) 中,相位相关算法测量相对误差小于等于 0.4 pixel,说明相位相关测量方法可以克服图像中灰度的干扰变化,达到所需测量精度。

为探究噪声对相位相关算法的影响规律,本文对常见的噪声包括高斯噪声、椒盐噪声和散斑噪声影响下的待测光瞳图像进行了仿真测试<sup>[10]</sup>,测试中处理了 100 frames 噪声强度逐渐增大的待测光瞳图像。在高斯噪声影响下得到的测试结果如图 3 所示。

由图 3(a) 可知,在很强(方差为 1)的高斯噪声下算法测量的相对误差可控制在 0.5 pixel 以内;图 3(b) 中,相关峰值随噪声增强而变小,由(7)式可知,在方差为 1 时相关峰值仍大于非相关峰,算法依然有效,说明相位相关算法具有极强的抗噪能力。

对于其他加性噪声和散斑噪声(乘性噪声)的影响,仿真测试结果与高斯噪声影响类似。

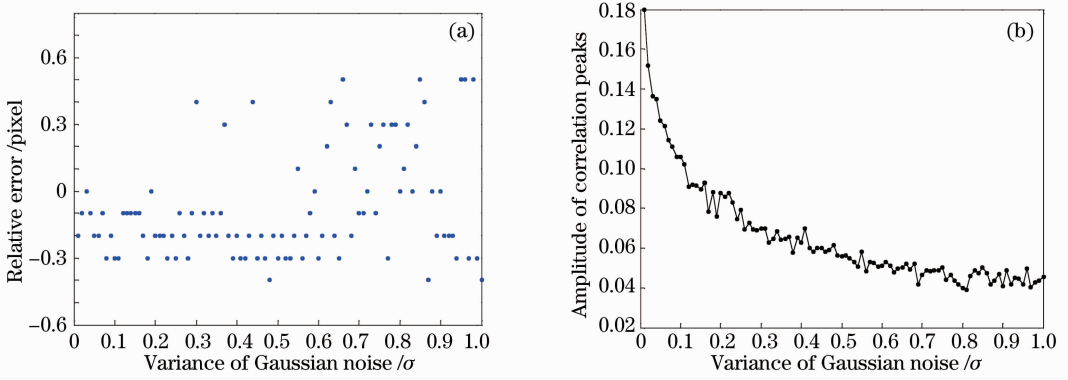


图3 相位相关算法的抗噪分析。(a)噪声下测量相对误差变化;(b)噪声下相关峰值变化

Fig. 3 Test results of phase-correlation algorithms's anti-noise performance. (a) Relative error varies with Gaussian noise; (b) amplitude of correlation peak varies with Gaussian noise

### 3.2 图像旋转和缩放的影响分析和校正

在光学系统中,受工作模式、器件精度和调整误差影响,所得光瞳图像可能会发生旋转和缩放<sup>[11]</sup>。当图像  $f_2(x', y')$  相对  $f_1(x, y)$  存在平移、旋转和缩放时<sup>[9,12,13]</sup>,坐标变换关系为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - d_x \\ y - d_y \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中  $\theta_0$  为旋转角度,  $s$  为缩放比例。则两幅图像的频谱间关系为

$$\begin{cases} \mathcal{F}_2(\epsilon, \eta) = \mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) \exp[-j2\pi\varphi(\epsilon, \eta)] \\ \mathcal{F}_1(\epsilon, \eta) = \mathcal{F}_1(\epsilon s \cos \theta_0 + \eta s \sin \theta_0, -\epsilon s \sin \theta_0 + \eta s \cos \theta_0) \\ \varphi(\epsilon, \eta) = (\epsilon s \cos \theta_0 + \eta s \sin \theta_0)d_x + (-\epsilon s \sin \theta_0 + \eta s \cos \theta_0)d_y \end{cases}. \quad (11)$$

若不进行旋转和缩放的校正,图像间归一化互功率谱表示为

$$G(\epsilon, \eta) = \frac{\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)\mathcal{F}_2^*(\epsilon, \eta)}{|\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)\mathcal{F}_2^*(\epsilon, \eta)|} = \exp[j2\pi\varphi(\epsilon, \eta)]. \quad (12)$$

(11), (12)式说明,图像频谱和归一化互功率谱会受到图像旋转和缩放的影响。对(12)式归一化互功率谱  $G(\epsilon, \eta)$  进行傅里叶逆变换,仍会得到一冲激函数,设峰值坐标为  $(D_x, D_y)$ ,其表示为

$$\begin{cases} D_x = s(d_x \cos \theta_0 - d_y \sin \theta_0) \\ D_y = s(d_x \sin \theta_0 + d_y \cos \theta_0) \end{cases}. \quad (13)$$

由(13)式可知,在不进行旋转和缩放的校正下,相关峰值坐标受  $\theta_0, s$  的影响,并不对应图像间的相对平移量。经过仿真测试,相关峰值实际上会随旋转角度的增大而迅速减小。当  $\theta_0 < 0.8^\circ$  时,图像旋转会造成较大的测量误差;当旋转角度大于  $0.8^\circ$  时,相关峰值与非相关峰相当,算法失效。

为了能够较准确地得到光瞳平移量,在光瞳图像存在旋转和缩放的情况下,进行相位相关算法计算平移量之前,采用基于傅里叶-梅林变换<sup>[11,13]</sup>和相位相关的算法对图像旋转和缩放量进行了估计,下面对估计算法进行详细介绍。

对(11)式两边求模,得到图像  $f_2(x', y'), f_1(x, y)$  的频谱幅度间的关系为

$$|\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta)| = |\mathcal{F}_1(\epsilon s \cos \theta_0 + \eta s \sin \theta_0, -\epsilon s \sin \theta_0 + \eta s \cos \theta_0)|. \quad (14)$$

对(14)式进行极坐标变换,即由坐标系  $(\epsilon, \eta)$  转换成  $(\rho, \theta)$  坐标系得

$$|\mathcal{F}_2(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)| = |\mathcal{F}_1[s\rho \cos(\theta - \theta_0), s\rho \sin(\theta - \theta_0)]|, \quad (15)$$

即

$$|\mathcal{F}_2(\rho, \theta)| = |\mathcal{F}_1(s\rho, \theta - \theta_0)|. \quad (16)$$

对(16)式沿  $\rho$  方向取对数,并令  $\lambda = \log \rho, \lambda_0 = \log(1/s)$  可得

$$|\mathcal{F}_2(\lambda, \theta)| = |\mathcal{F}_1(\lambda - \lambda_0, \theta - \theta_0)|. \quad (17)$$

(14)~(17)式的计算过程即为傅里叶-梅林变换。(17)式表明,图像的频谱幅度的缩放和旋转在对数极

坐标系  $(\lambda, \theta)$  内表现为坐标的平移, 则与求图像的平移量类似, 对  $|\mathcal{F}_1(\lambda, \theta)|$ ,  $|\mathcal{F}_2(\lambda, \theta)|$  利用相位相关算法可求得  $(\lambda_0, \theta_0)$ , 由  $\lambda_0$  可计算得到缩放因子  $s$ 。

综上所述, 存在旋转和缩放的光瞳图像间的平移量计算步骤如下:

- 1) 求图像  $f_2(x', y')$ ,  $f_1(x, y)$  的频谱  $\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)$ ,  $\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta)$ , 并计算得到各自的频谱幅度  $|\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)|$ ,  $|\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta)|$ ;
- 2) 对  $|\mathcal{F}_1(\epsilon, \eta)|$ ,  $|\mathcal{F}_2(\epsilon, \eta)|$  进行傅里叶-梅林变换得到  $|\mathcal{F}_1(\lambda, \theta)|$ ,  $|\mathcal{F}_2(\lambda, \theta)|$ ;
- 3) 对  $|\mathcal{F}_1(\lambda, \theta)|$ ,  $|\mathcal{F}_2(\lambda, \theta)|$  利用相位相关算法求得平移量  $(\lambda_0, \theta_0)$ , 并计算得到放缩量  $s$ ;
- 4) 对图像进行旋转和缩放的校正, 对校正后的图像利用相位相关算法求得平移量  $(d_x, d_y)$ 。

为考察由上述算法得到的平移量精度是否满足要求, 对进行了平移、旋转和缩放后的 100 frames 光瞳图像利用上述算法过程计算得到了光瞳平移量。平移量测量结果的相对误差分布如图 4 所示, 测试过程中, 旋转角度和缩放比的测量精度分别为  $0.1^\circ$  和 0.001 量级。

如图 4 所示, 校正后光瞳平移量测量相对误差取值在 1.5 pixel 内, 相对图 2(b) 精度有所下降。一方面, 由于旋转和缩放量的测量结果并非完全准确<sup>[13,14]</sup>, 即校正后图像相对源图像仍有一定的旋转和缩放, 由(13)式可得, 旋转和缩放的校正误差会导致图像间平移量的测量误差增大; 另外, 存在图像间的灰度变化的干扰, 且计算过程中需要进行多次坐标变换和插值运算。若在精度要求更高的应用中, 需对坐标变换和插值计算过程进行优化。

### 3.3 基准图像的选择

实际光瞳图像的强度分布处于动态变化中, 为抑制灰度变化、条纹干扰和噪声的影响, 提高测量动态范围, 在对光瞳位置进行标定时, 可将采集的光瞳图像叠加得到的图像之和作为基准图像。为验证上述方法的有效性, 在对采集的图像序列的灰度变化进行分析测试后, 以 20 frames 标定光瞳图像之和作为基准图像, 运用相位相关算法测量了 100 frames 待测图像的平移量, 通过(5)式计算了相位相关信噪比, 并将结果与用单帧图像作为基准图像的测量计算结果进行了对比, 测试结果如图 5 所示。

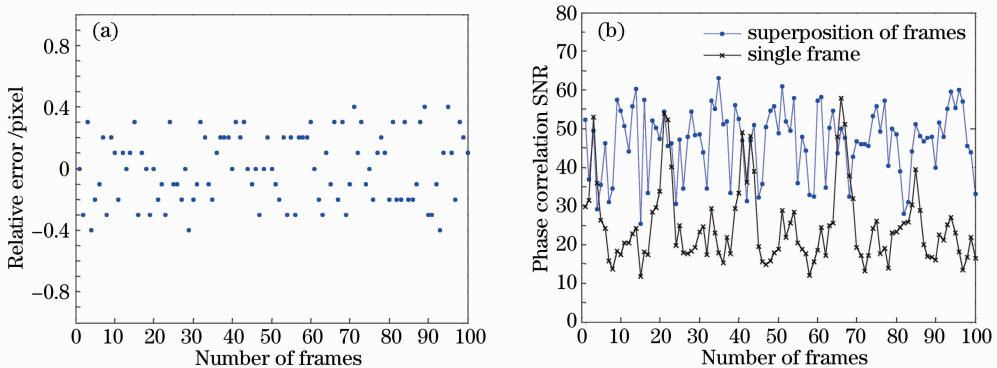


图 5 图像叠加后作为基准图像的处理结果。(a) 相对误差分布; (b) 信噪比对比

Fig. 5 Results of processing with superposed image as the reference image. (a) Distribution of relative error (b) comparison of SNR between single and superposed image as the reference image

比较图 2(b) 和图 5(a) 可得, 图像之和作为基准图像后算法精度保持不变, 相对误差不超过 0.4 pixel; 图 5(b) 中, 图像之和作为基准图像相位相关信噪比均值为 46.69, 而单帧图像作为基准图像的信噪比均值为 24.76, 信噪比提高 88.6%。故实际测量中, 将多帧标定光瞳图像之和作为基准图像可抑制图像中存在的灰度和噪声的干扰, 提高算法稳健性, 进而提高算法测量范围。

## 4 结 论

光路准直中,由于激光光束光瞳强度变化的复杂性使传统位置测量方法面临困境。本文提出了基于相位相关法的待测光瞳平移量的测量方法,并对实际应用中光瞳光强动态分布变化、受噪声干扰以及旋转缩放影响下的算法性能进行了分析和仿真测试。对存在旋转和缩放的光瞳图像,测试了用傅里叶-梅林变换和相位相关算法进行旋转和缩放的测量和校正后的平移量测量效果,最后提出了基准图像的选择方法。结果表明相位相关法应用于光路准直系统中光瞳平移量的测量,其结果的相对误差可控制在 0.4 pixel 内;存在旋转和缩放时,进行校正后算法测量精度在 1 pixel 左右;用和图像作为基准图像将相位相关信噪比提高了 88.6%。基于相位相关算法的光瞳动态位置测量方法在精度和稳健性上满足了实际应用的需要,在相关的光学测量问题上的应用有待拓展。

## 参 考 文 献

- Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu *et al.*. Optimizing onalgorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 78~81  
周 维, 胡东霞, 赵军普 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 78~81
- Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Qiu Lirong *et al.*. Laser beam collimation method and technology in given beam direction[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(1): 61~64  
赵维谦, 谭久彬, 邱丽蓉 等. 激光光束特定方向准直方法与技术[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(1): 61~64
- Qi Bo, Wu Qiongyan, Ren Ge *et al.*. The Couple and Collimation Method of Light Path [P]. Chinese Patent, 200910078257, 2009-7-15  
齐 波, 吴琼雁, 任 戈 等. 光路耦合对准方法[P]. 中国专利, 200910078257, 2009-7-15
- Yang Rong. The Method Based on the Hartmann-Sensor and Fast Tilt-Mirrors for the Coupling and Alignment of Optical Systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011. 13~26  
杨 榕. 基于哈特曼传感器和快速倾斜镜的光路耦合对准技术[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2011. 13~26
- C. D. Kuglin, D. C. Hines. The phase correlation image alignment method[C]. IEEE 1975 Conf. Cybernetics and Society, 1975. 163~165
- Zheng Zhibin, Ye Zhongfu. Image registration algorithm based on phase-correlation[J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2006, **21**(4): 444~448  
郑志彬, 叶中付. 基于相位相关的图像配准算法[J]. *数据采集与处理*, 2006, **21**(4): 444~448
- S. Chunhavitayatera, O. Chitsobhuk, K. Tongprasert. Image registration using Hough transform and phase correlation [C]. ICAC 2006, 2006, **2**: 973~977
- Wu Jiagu. Research of Motion Estimation Algorithm Based on Digital Images[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. 38~41  
吴家谷. 基于数字图像的运动估计算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 38~41
- Gao Yang. Subpixel Target Location Method Based on Phase Correlation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 24~28  
高 扬. 基于相位相关的亚像元目标定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 24~28
- R. C. Gonzalez. Digital Imaging Processing Using Matlab[M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 104~110  
R. C. Gonzalez. 数字图像处理(Matlab版)[M]. , 阮秋琦, 阮宇智 译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 104~110
- Ma Jing, Xu Kehua, Tan Liying. Image beacon acquisition for deep space optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1447~1452  
马 晶, 徐科华, 谭立英. 深空光通信中的图像信标捕获技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1447~1452
- B. S. Reddy, B. N. Chatterji. An FFT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1996, **3**(8): 1266~1270
- Q. S. Chen, M. Dfris, F. Dconick. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1994, **16**(12): 1156~1168
- Fang Junwei, Zhai Chao, Jin Yi. Simulation and optimization of phase correlation algorithm in image mosaics[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, **25**(1): 207~208  
方俊伟, 翟 超, 金 熠. 相位相关法实现图像拼接的仿真与优化[J]. *计算机应用与软件*, 2008, **25**(1): 207~208