

分布式孔径综合成像系统旋转和放大率误差的校正

陈波¹, 孙天齐¹, 刘爱新², 杨旭¹

¹华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210;

²北京铁路局机务处, 北京 100086

摘要 针对基于数字全息术的分布式孔径综合成像系统, 分析子孔径间探测器旋转和光瞳放大率误差对孔径综合成像的影响, 提出基于子孔径目标图像配准的误差校正方法。首先采用尺度不变特征变换算法、欧氏距离最近法和 M 估计抽样一致算法进行子孔径目标图像配准, 由此计算出子孔径间探测器旋转和光瞳放大率误差。其次对子孔径上的目标光复振幅进行处理, 实现旋转和放大率误差的校正。实验结果表明, 由于子孔径目标图像配准计算出的旋转角度和放大率的相对误差小于 0.01, 校正后综合孔径成像锐度显著提高。

关键词 成像系统; 分布式孔径; 数字全息; 旋转误差; 放大率误差; 校正

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011102

Correction of Rotation and Magnification Errors in Distributed Aperture Synthesis Imaging System

Chen Bo¹, Sun Tianqi¹, Liu Aixin², Yang Xu¹

¹ College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

² Mechanical Department, Beijing Railway Administration, Beijing 100086, China

Abstract In the distributed aperture synthesis imaging system based on digital holography, the errors of detector rotation and the pupil magnification among the sub-apertures are studied, and the correction methods based on the sub-aperture image registration is proposed. The scale-invariant feature transform algorithm, the nearest neighbor search method based on Euclidean distance and the M-estimator sample consensus algorithm are carried out to realize the image registration of sub-aperture, so that the errors of relative rotation angle and magnification among the sub-apertures are calculated. Then the complex amplitude of object light is processed to correct the rotation and magnification errors. The experimental results show that the calculated relative error values are less than 0.01, and the sharpness value of synthetic aperture image is significantly improved after correction.

Key words imaging systems; distributed aperture; digital holography; rotation error; magnification error; correction

OCIS codes 110.1220; 090.1995; 100.3010

1 引言

孔径综合是提高光学成像系统分辨率的有效手段之一^[1-4]。基于数字全息术的分布式孔径综合成像系统采用多个子孔径对目标进行全息探测, 然后根据其空间位置对各个子孔径上的目标光复振幅进行综合, 从而实现多孔径综合高分辨率成像^[5-10]。这种技术具

有模块化、三维成像和数字综合等优点, 但是孔径综合的相位误差一般应控制在 $1/10$ 波长以内^[8]。系统装配误差是子孔径间相位误差的来源之一, 如子孔径探测器间的相对位移、倾斜、旋转以及缩束装置的放大率误差都会引起孔径综合的相位误差, 对此目前主要采用基于像清晰化的校正方法^[11-13]。针对子孔径间的位移误差, Jiang 等^[14]研究了基于综合孔径图像质量评价

收稿日期: 2017-07-09; 收到修改稿日期: 2017-08-10

基金项目: 河北省自然科学基金(F2013209149)、华北理工大学研究生创新项目(2017S24)

作者简介: 陈波(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事主动成像、自适应光学方面的研究。

E-mail: chenbo182001@163.com

及优化的数字校正方法,达到了亚像素精度。考虑到子孔径间的相对位移和旋转误差,Gunturk 等^[15]提出一种基于坐标系变换、多域串行迭代式的校正方法,即把在直角坐标系下较难直接处理的孔径旋转、位移等误差,通过坐标系变换(如极坐标、对数坐标系等)、傅里叶变换等方法,转化为倾斜和位移等误差,然后对各种相位误差依次采用迭代式像清晰化法进行校正。考虑到多次坐标系变换引起的数值误差以及散斑噪声对迭代式像清晰化算法收敛特性的影响^[16],这种校正方法方法存在耗时长、甚至局部收敛的问题。

针对子孔径间的旋转和放大率误差,本文提出了基于子孔径目标图像配准的误差校正方法。与目前直接采用迭代式像清晰化校正方法^[15]相比,本文方法不仅无需坐标系变换和迭代运算,而且可以同时校正两种误差。

2 原理和方法

2.1 成像原理及误差分析

基于数字全息术的分布式孔径综合成像系统示意图如图 1 所示^[5,11]。

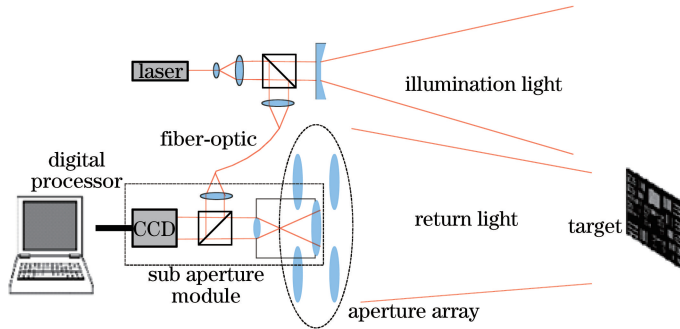


图 1 基于数字全息术的分布式孔径综合成像系统示意图

Fig. 1 Scheme of distributed aperture synthesis imaging system based on digital holography

激光器发射出的相干光束被分为两束,一束光射向目标,另一束光进一步分束为各个子孔径内的本地参考光。子孔径内的光电探测器分别记录本地参考光与目标返回光的干涉信号。在数字信号处理

器中,首先利用傅里叶变换等方法从干涉信号中分别复原出子孔径探测器上的目标返回光复振幅 U_i , 然后按照子孔径空间位置对 U_i 进行综合,并通过菲涅耳衍射公式计算出目标平面上的复振幅:

$$\begin{aligned}
 E(u, v) &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(u^2 + v^2)\right] \iint U(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j2\left(\frac{u}{\lambda z}x + \frac{v}{\lambda z}y\right)\right] dx dy = \\
 &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(u^2 + v^2)\right] \mathcal{F}\left\{U(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right]\right\} = \\
 &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(u^2 + v^2)\right] \sum_{i=1}^N \left\{ \mathcal{F}\left\{U_i(x - a_i, y - b_i) \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right]\right\} \right\} = \\
 &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(u^2 + v^2)\right] \sum_{i=1}^N \left\{ \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(a_i^2 + b_i^2)\right] \exp\left[-j2\pi\left(\frac{a_i u}{\lambda z} + \frac{b_i v}{\lambda z}\right)\right] G\left(\frac{u - a_i}{\lambda z}, \frac{v - b_i}{\lambda z}\right) \right\} = \\
 &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(u^2 + v^2)\right] \sum_{i=1}^N E_i(u, v), \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中 $u-v$ 表示目标所在平面坐标系, $x-y$ 为孔径综合平面坐标系, z 为孔径综合平面与目标所在平面之间的距离, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $\mathcal{F}[\cdot]$ 表示傅里叶变换, $U(x, y) = \sum_{i=1}^N U_i(x - a_i, y - b_i)$, (a_i, b_i) 为第 i 个子孔径中心的位置坐标, N 为子孔径数目, $G[u/(\lambda z), v/(\lambda z)] = \mathcal{F}\{U_i(x, y) \times \exp[jk/2z(x^2 + y^2)]\}$ 。

由(1)式可知,忽略 $\exp(jkz)/(j\lambda z) \times \exp[jk/(2z)(u^2 + v^2)]$, $u-v$ 平面上重构出的目标光复振幅为

$$\begin{aligned}
 E_i(u, v) &= \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(a_i^2 + b_i^2)\right] \times \\
 &= \exp\left[-j2\pi\left(\frac{a_i u}{\lambda z} + \frac{b_i v}{\lambda z}\right)\right] G\left(\frac{u - a_i}{\lambda z}, \frac{v - b_i}{\lambda z}\right). \tag{2}
 \end{aligned}$$

假设第 i 个子孔径内的探测器围绕其中心 (a_i, b_i) 旋转了 θ , 此时由全息数据复原出的 x - y 平面上的目标光复振幅为

$$U_i[(x-a_i)\cos\theta - (y-b_i)\sin\theta, (x-a_i)\sin\theta + (y-b_i)\cos\theta], \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式, 并结合傅里叶变换的旋转、移位性质可以计算出 u - v 平面上有:

$$E'_i(u, v) = \mathcal{F}\{U_i[(x-a_i)\cos\theta - (y-b_i)\sin\theta, (x-a_i)\sin\theta + (y-b_i)\cos\theta] \times \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right]\} = \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(a_i^2 + b_i^2)\right] \exp\left[-j2\pi\left(\frac{a_i u}{\lambda z} + \frac{b_i v}{\lambda z}\right)\right] \times G\left[\frac{(u-a_i)\cos\theta - (v-b_i)\sin\theta}{\lambda z}, \frac{(u-a_i)\sin\theta + (v-b_i)\cos\theta}{\lambda z}\right]. \quad (4)$$

对比 $E_i(u, v)$ 和 $E'_i(u, v)$ 不难发现, 由于倾斜相位因子 $\exp\{-j2\pi[a_i u/(\lambda z) + b_i v/(\lambda z)]\}$ 不具有旋转不变性, 因此除非 $G[u-a_i/(\lambda z), v-b_i/(\lambda z)] = G\{[(u-a_i)\cos\theta - (v-b_i)\sin\theta]/(\lambda z), [(u-a_i)\sin\theta + (v-b_i)\cos\theta]/(\lambda z)\}$, 否则 $E'_i(u, v)$ 一定存在相位误差。

类似地根据傅里叶变换的尺度变换性质可以推导出, 子孔径内的缩束装置引起的放大率误差, 即 U_i 的尺度变化引起的 $E_i(u, v)$ 的相位误差, 因此必须予以校正。

2.2 校正方法

利用(1)式计算出第 i 个子孔径单独重构出的目标图像为

$$I_i(u, v) = \frac{1}{(\lambda z)^2} |E_i(u, v)|^2 = \frac{1}{(\lambda z)^2} G\left(\frac{u-a_i}{\lambda z}, \frac{v-b_i}{\lambda z}\right). \quad (5)$$

当 U_i 以坐标 (a_i, b_i) 为中心旋转 θ 后, 由(4)式计算出第 i 个子孔径重构出的目标图像为

$$I'_i(u, v) = \frac{1}{(\lambda z)^2} |E'_i(u, v)|^2 = \frac{1}{(\lambda z)^2} \times \left| G\left[\frac{(u-a_i)\cos\theta - (v-b_i)\sin\theta}{\lambda z}, \frac{(u-a_i)\sin\theta + (v-b_i)\cos\theta}{\lambda z}\right] \right|^2. \quad (6)$$

对比(5)式和(6)式可知, $I'_i(u, v)$ 相对于 $I_i(u, v)$ 旋转了 θ 。类似地, 根据傅里叶变换的尺度变换性质以及 $\exp[jk/(2z)(x^2 + y^2)]$ 的圆对称特

性可以得出, $U_i(x-a_i, y-b_i)$ 的尺度变化将引起目标图像 $I_i(u, v)$ 的尺度变化, 尺度量互为倒数。因此 $U_i(x-a_i, y-b_i)$ 间的相对旋转、放大率误差可通过计算目标图像 $I_i(u, v)$ 之间的相对旋转和尺度变化量得到。

基于以上分析, 提出了基于子孔径目标图像配准的误差校正方法。以 $I_i(u, v)$ 为例, 具体步骤如下:

1) 任选一个子孔径作为参考孔径, 该子孔径入瞳面上的目标光复振幅记作 $U_{\text{ref}}(x, y)$, 所成目标图像记作 $I_{\text{ref}}(u, v)$ 。

2) 采用尺度不变特征变换(SIFT)算法^[17]、欧氏距离最邻近法^[18]和 M 估计抽样一致(MSAC)算法^[19]对子孔径目标图像 $I_i(u, v)$ 和 $I_{\text{ref}}(u, v)$ 的特征点进行提取和配准, 并计算出 $I_i(u, v)$ 和 $I_{\text{ref}}(u, v)$ 之间的图像变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \cos\theta & -c \sin\theta \\ c \sin\theta & c \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 c 表示尺度量, θ 表示旋转角度, a_0, a_1 为位移量。

3) 根据 $I_i(u, v)$ 与 $U_i(x, y)$ 间的运算关系, $U_i(x, y)$ 与 $U_{\text{ref}}(x, y)$ 之间的旋转角度为 θ , 放大率应为 $s=c^{-1}$, 因此对 $U_i(x, y)$ 按照

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \cos\theta & -s \sin\theta \\ s \sin\theta & s \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

进行变换, 即可校正 $U_i(x, y)$ 与 $U_{\text{ref}}(x, y)$ 之间的旋转和放大率误差。

根据以上分析, 本文方法没有采用文献[17]中涉及的坐标变换, 也无需迭代算法, 而是直接通过子孔径目标图像配准的方法找出误差, 然后对采集到的全息图或复原出的目标光复振幅进行校正, 因此本文方法在运算量和实时性方面优势明显。

3 实验

3.1 实验方案

建立了如图 2 所示的数字离轴全息实验装置。激光器的出射光束经过准直和扩束后由分束镜分为两路, 一路对目标进行照明, 另外一路作为本地参考光。CCD 记录目标散射光和参考光形成的离轴全息图。激光器波长为 635 nm, CCD 像素数为 1300 pixel × 1024 pixel, 每个像素大小为 4.65 μm , 目标与 CCD 的距离约为 1.03 m, 目标是一枚直径为 0.025 m 的金属币。

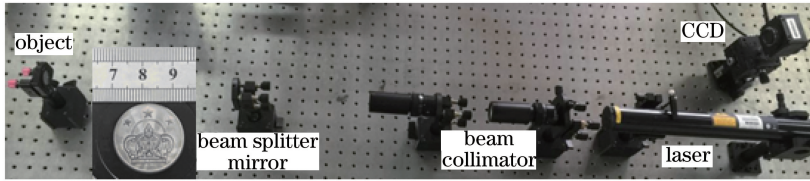


图2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

通过将 CCD 分别旋转 -15° 、 0° 、 $+15^\circ$ 来模拟存在相对旋转误差的 3 个子孔径,如图 3 所示,摆角器的分辨率为 0.1° 。考虑到实验系统中没有采用缩束式接收装置,因此对 CCD 旋转至 -15° 采集到的数据进行 0.85 倍的尺度变换,对旋转至 $+15^\circ$ 采集到的数据进行 1.15 倍的尺度变换,模拟实际系统中子孔径缩束装置间的放大率误差。需要说明的是,该实验系统中 3 个子孔径中心位置重叠,因此,与图 1 相比,不是真正意义上的分布式孔径综合成像系统,但能够用于验证上述旋转、放大率误差校正方法。此外,实际中 CCD 的旋转和缩放误差由系统的结构等因素决定,实验选择的 -15° 、 $+15^\circ$ 等数据具有一般性,不是刻意为之。

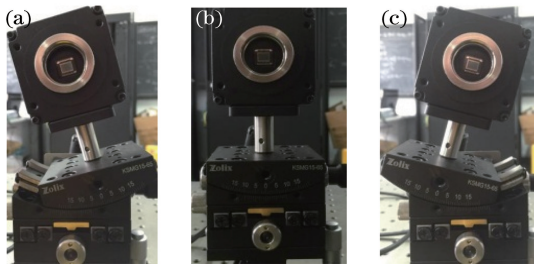
图3 CCD 旋转不同角度。(a) -15° ; (b) 0° ; (c) $+15^\circ$

Fig. 3 Different rotation angles of CCD.

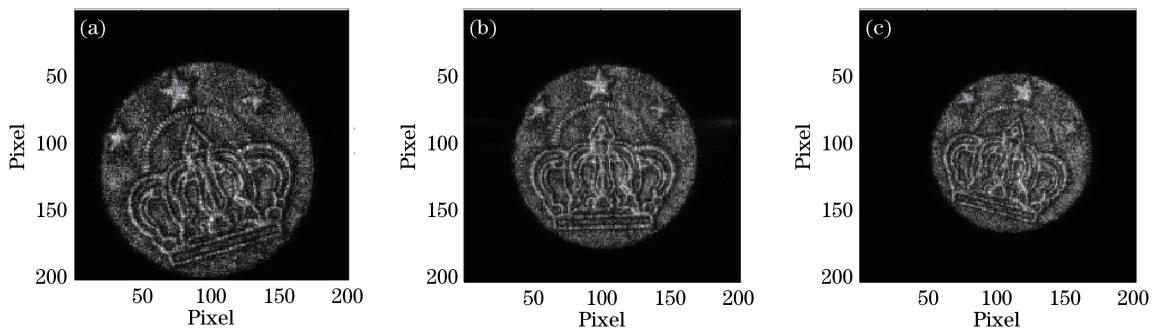
(a) -15° ; (b) 0° ; (c) $+15^\circ$ 

图4 3 个子孔径各自重构出的目标图像

Fig. 4 Images reconstructed by three sub-apertures respectively

利用表 1 中的加权均值对复原出的 $U_i(x, y)$ 进行校正(即几何变换),然后利用(1)式计算校正后 3 个子孔径的综合成像结果,结果如图 6 所示,其中

3.2 结果分析

CCD 在上述 3 个角度下分别采集 10 帧全息数据,采用(4)式计算出 3 个子孔径各自所成目标图像(10 帧平均)如图 4 所示。

以未旋转子孔径的目标图像[图 4(b)]为参考,采用 2.2 节的方法计算其余两个子孔径与参考子孔径之间的相对旋转角度和放大率。利用欧氏距离最邻近法进行特征点粗匹配,算法的阈值取 0.8,利用 MSAC 算法对特征点匹配进一步筛查时,算法的抽样次数设为 1000。考虑到匹配过程中 MSAC 算法的随机性,进行了 1500 次配准实验,最终计算出 $U_1(x, y)$ 的旋转角度 θ 和放大率 s 的频数直方图如图 5(a)、(b)所示, $U_2(x, y)$ 的旋转角度 θ 和放大率 s 的频数直方图如图 5(c)、(d)所示,其中横坐标为旋转角度 θ 和放大率 s ,纵坐标为该角度出现的次数 n 。

由图 5 数据计算出旋转角度和放大率的加权均值 $\bar{\theta}$ 和 \bar{s} ,如表 1 所示。由表 1 可知,加权均值与设定值的相对误差小于 0.006。需要说明的是,这一结果是利用 10 帧全息数据成像平均结果进行特征点匹配得到的。同时也对 1、3、5、7 帧全息数据成像结果进行了相同的处理和分析,结果表明,利用 3 帧数据的平均结果进行匹配,相对误差小于 0.01,表明本文方法具有良好的抗噪特性。

图 6(a)为校正旋转和放大率误差前的孔径综合成像结果,图 6(b)为校正后 3 个孔径的综合成像结果。利用锐度函数,定量评价校正前后的综合孔径

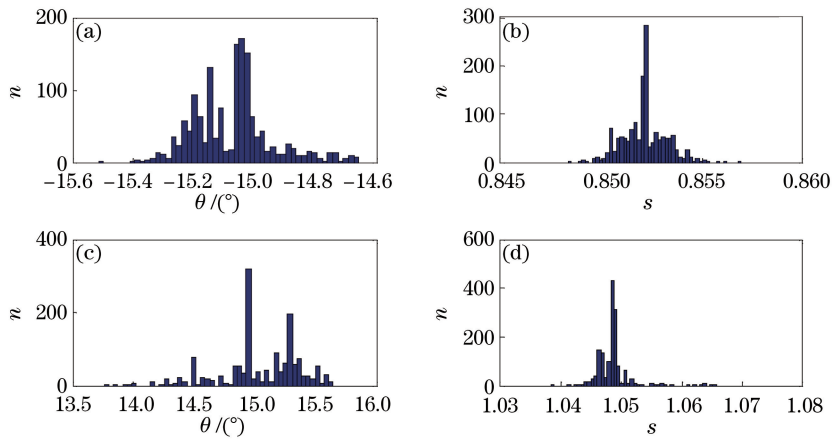


图5 子孔径与参考子孔径间的旋转角度和放大率的直方图。(a)(b)子孔径1;(c)(d)子孔径2

Fig. 5 Histogram of rotation angle and magnification between sub-aperture and reference sub-aperture.

(a)(b) Sub-aperture 1; (c)(d) sub-aperture 2

表1 精度分析结果

Table 1 Accuracy of the correction method

Index	Rotation angle of sub-aperture 1 / (°)	Rotation angle of sub-aperture 2 / (°)	Magnification of sub-aperture 1	Magnification of sub-aperture 2
Setvalue	-15	15	0.85	1.15
Weighted value	-15.0708	14.9194	0.8522	1.1518
Relative error	0.0047	0.0054	0.0026	0.0016

目标图像 $I(u, v)$ 的成像质量:

$$J = \iint [I(u, v)]^2 du dv / \left\{ \iint [I(u, v)] du dv \right\}^2, \quad (9)$$

可以计算得到, J 分别为 7.2174×10^5 和 8.9271×10^5 , 由此可知, 子孔径间的旋转和缩放误差得到了

有效校正, 综合孔径成像质量得到了显著提高。综上所述, 由于3个子孔径中心较为接近, 综合后系统孔径直径并没有显著增大, 所以与图4(b)相比, 综合成像图6(b)的分辨率没有显著提高, 但散斑噪声得到明显抑制, 二者的像清晰度分别为 7.5825×10^5 和 8.9271×10^5 。

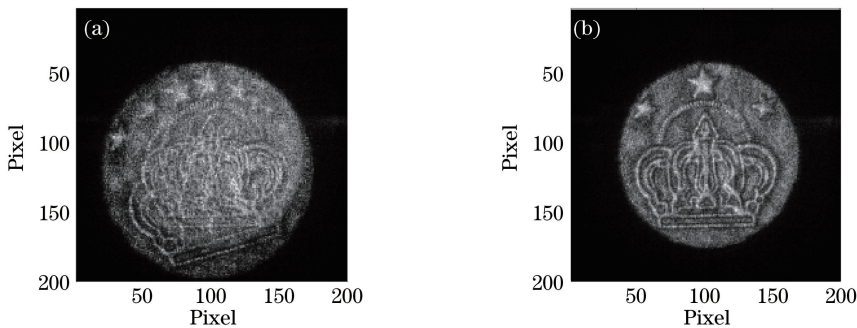


图6 3个子孔径综合成像结果。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 6 Results of comprehensive imaging of three sub-apertures. (a) Before correction; (b) after correction

4 结 论

基于数字全息术的分布式孔径综合成像系统中, 子孔径间探测器旋转和光瞳放大率误差显著影响综合成像质量, 而基于目标图像配准的误差校正方法能够同时校正上述误差。首先通过图像配准计算出子孔径所成目标图像之间的相对旋转和尺度变

化量, 然后根据傅里叶变换的性质计算出子孔径瞳面复振幅之间的相对旋转角度和放大率误差, 最后通过几何变换对子孔径瞳面复振幅进行校正。由于SIFT算法对光线、噪声、微视角的改变以及局部缺失具有很高的稳健性, 因此, 图像配准的校正方法能够用于更复杂的场合, 如子孔径间的视场只有部分重合、子孔径的探测面不在同一平面上等。此外, 考虑

到散斑噪声对图像配准精度的影响,实际应用中可以在本文方法的基础上采用像清晰化法进一步校正。

参 考 文 献

- [1] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [2] Liu L R. Principle of self-interferometric synthetic aperture ladar for 3D imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528001.
刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528001.
- [3] Wu J, Zhao Z L, Wu S D, *et al.* High resolution synthetic aperture ladar imaging at 12.9 m distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228002.
吴谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228002.
- [4] Wei X F, Geng Z X, Cao L, *et al.* A novel imaging performance index and pupil optimization method for optical synthetic aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1111001.
魏小峰, 耿则勋, 曹力, 等. 一种新的光学合成孔径系统成像性能指标与光瞳优化方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1111001.
- [5] Marron J C, Kendrick R L. Distributed aperture active imaging [C]. *SPIE*, 2007, 6550: 65500A.
- [6] Höft T, Kendrick R, Marron J, *et al.* Two-wavelength digital holography [C]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*. Optical Society of America, 2007: DTuD1.
- [7] Marron J C, Kendrick R L. Multi-aperture 3D imaging systems [C]. *IEEE Aerospace Conference*, 2008: 1-3.
- [8] Miller N J, Haus J W, Mcmanamon P F, *et al.* Multi-aperture coherent imaging [C]. *SPIE*, 2011, 8052: 805207.
- [9] Anisimov I, Miller N J, Shemano D, *et al.* Coherent high-resolution sparse aperture imaging testbed [C]. *SPIE*, 2010, 7684: 76840U.
- [10] Widiker J J, Nicholas J. Miller N J, *et al.* Real-time coherent phased array image synthesis and atmospheric compensation testing [C]. *SPIE*, 2012, 8395: 839505.
- [11] Marron J C, Kendrick R L, Seldomridge N, *et al.* Atmospheric turbulence correction using digital holographic detection: experimental results [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11638-11651.
- [12] Thurman S T, Fienup J R. Phase-error correction in digital holography [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(4): 983-994.
- [13] Rabb D, Jameson D, Stokes A, *et al.* Distributed aperture synthesis [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10334-10342.
- [14] Jiang H Z, Zhao J L, Di J L, *et al.* Numerically correcting the joint misplacement of the sub-holograms in spatial synthetic aperture digital Fresnel holography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18836-18842.
- [15] Gunturk B K, Miller N J, Watson E A. Camera phasing in multi-aperture coherent imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11796-11805.
- [16] Chen B, Yang J, Yang X, *et al.* Effect of speckle noise on wavefront distortion correction in laser active imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1012002.
陈波, 杨靖, 杨旭, 等. 激光主动成像中散斑噪声对波前畸变校正性能的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1012002.
- [17] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [18] Yang S, Xia M H, Zheng Z S. Medical image registration algorithm based on polynomial deterministic matrix and SIFT transform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081002.
杨飒, 夏明华, 郑志硕. 基于多项式确定性矩阵的 SIFT 医学图像配准算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081002.
- [19] Torr P H S, Zisserman A. MLESAC: a new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2000, 78(1): 138-156.