

远距离激光光斑位置高精度测量方法

张少迪^{1,2} 孙宏海^{1,3}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院研究生院, 北京 100049

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为了提高激光光斑位置测量精度, 考虑影响光斑测量精度的因素, 并对若干关键技术进行研究。为了抑制由于气溶胶散射导致的激光后向散射, 研究距离选通技术, 提出一种基于四象限探测器的异步距离选通技术; 为了削弱大气湍流的随机扰动对激光光斑成像的影响, 提出一种改进的盲解卷积事后复原方法, 并从数学上证明了该方法的收敛性; 为了消除多传感器采集图像之间的差异, 提出一种基于目标区域的图像配准算法; 还原光斑图像并利用高斯曲面拟合法提取激光光斑的位置信息。实验结果表明, 提取到的激光光斑位置精度不大于 0.3 pixel。

关键词 测量; 激光后向散射; 大气湍流; 盲解卷积; 图像配准

中图分类号 TP139.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0708003

High Precision Method of Long-Ranged Laser Spot Position Measurement

Zhang Shaodi^{1,2} Sun Honghai^{1,3}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to improve the precision of laser spot position measurement, several key technologies are studied. Range-gated technology is studied to restrain laser backscattering caused by aerosol scattering. An asynchronous range-gated method based on four-quadrant detector is introduced. An improved blind deconvolution method used to process images afterwards is introduced, which serves to lower the impact of atmosphere turbulence on laser spot imaging. An image registration method based on objective area is introduced to eliminate the difference between visible camera and infrared camera. Recover the spot and find the laser spot position using Gauss surface fitting. The experimental results show that the precision of laser spot position is not more than 0.3 pixel.

Key words measurement; laser backscattering; atmosphere turbulence; blind deconvolution; image registration

OCIS codes 100.1455; 100.2000; 290.1350

1 引言

激光光斑位置测量是激光照射器监测系统的一项重要内容。外场实验时, 可见光相机和红外相机

共同装置在转台上, 利用可见光相机对靶板进行跟踪, 红外相机随之转动, 可以采集到激光光斑图像。激光光斑图像能量分布近似服从高斯分布, 可以采

收稿日期: 2012-03-05; **收到修改稿日期**: 2012-04-06

基金项目: 国家 863 计划(2006AA703405F)资助课题。

作者简介: 张少迪(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事实时数字图像处理方面的研究。

E-mail: mmlover_2009@yahoo.com.cn

导师简介: 孙宏海(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事数字图像处理和先进成像与实时处理系统等方面的研究。

E-mail: shh426@gmail.com

用高斯曲面拟合法进行定位细分^[1~3],其算法精度可以达到 0.1 pixel。但是激光光斑远距离成像,受到大气湍流扰动,表现为光束强度起伏、光束漂移、光束扩展以及像点强度分布扩散、图像抖动模糊、峰值下降和位置偏移等气动光学效应,在测量之前应先进行图像复原。此外由于相机像面和光斑靶面之间不垂直,导致光斑发生“变形”,需要对光斑进行还原。但是可见光传感器和红外传感器之间存在诸多差异,在还原光斑之前还需要多传感器图像配准。本文从研究影响光斑测量精度的因素着手,提出相应的解决方法,并给出实验结果。

2 激光后向散射抑制方法

激光在大气中远距离传播,除了直接被大气吸收衰减外,大气散射会使激光光束向各个方向散开而受到损失,激光后向散射严重影响激光光斑的位置测量,这是因为红外相机采集图像时,激光经大气的散射光和光斑目标反射光一同进入相机视场并在像面上成像,虽然可以根据光强定位光斑目标,但是测量结果的精度受到严重影响。同步距离选通技术是抑制激光后向散射有效方法^[4,5],但是在本文中激光照射器照射时序未知,因此无法同步控制激光照射器和相机。本文提出基于四象限探测器的异步距离选通技术,其基本框图如图 1 所示。

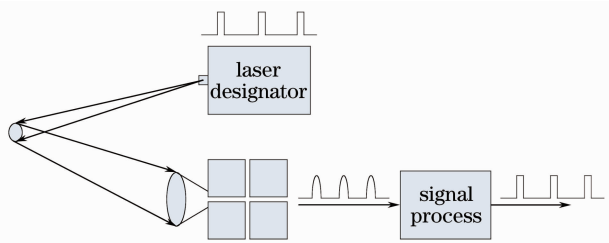


图 1 异步距离选通框图

Fig. 1 Asynchronous range-gated picture

下面介绍算法步骤:

- 1) 对观测到的波形进行平滑处理,并隔离曲线拐点;
- 2) 为迭代求解设定初始值:利用拐点个数估计分解高斯函数分量的个数,估计分量的均值和方差;
- 3) 利用非线性最小二乘法建立方程组,迭代求解分量参数,并使用 Levenburg-Marquardt 方法对参数初始估计值进行优化;
- 4) 计算拟合曲线和观测曲线之间的误差,如果满足精度要求则停止,否则继续迭代求解。

3 改进盲解卷积算法对光斑图像做事后复原

大气湍流扰动引起大气介质的折射系数随机波动,使激光在传播过程中光学波前发生失真,产生光强闪烁和光束漂移等现象,严重影响激光光束在大气中远距离传播的质量以及激光光斑的成像质量^[6]。为了提高激光光斑位置测量精度,本文采用盲解卷积算法对激光光斑图像进行事后图像复原。比较经典的盲解卷积算法有 IBD 算法^[7]、SA 算法^[8]、NAS-RIF 算法^[9]、TV 算法^[10]等。这些经典算法不容易收敛,即使收敛得到的最优解也不唯一,为了筛选最优解还需要添加新的约束。本文在 TV 算法基础上提出一种改进算法。

为了提高目标函数的收敛性和收敛速度,引入惩罚机制改进 TV 正则化方法,改进后的算法可称为 PTV,可表示为

$$P_{TV}(u, f) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|u_i - D_i f\|_2^2 + \sum_i \|u_i\|_2, \quad (1)$$

$$P_{TV}(v, h) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2. \quad (2)$$

改进的算法中引入两个变量 u 和 v , β 为惩罚系数;(1)式和(2)式中第一项为惩罚项,于是目标函数可以定义为

$$L(f, h) = \sum \|g - f \otimes h\|_2^2 + \alpha_1 P_{TV}(f) + \alpha_2 P_{TV}(h). \quad (3)$$

由于惩罚项的引入,增添了两个新的变量,因此交替最小化方法也需要做相应的改进,基本步骤为:

- 1) 给定初始值 f^{00} 和 h^{00} 以及允许误差 ϵ ;
- 2) 求 h^0 使得下式取最小值:

$$L(h) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \|g - f^{00} \otimes h\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2. \quad (4)$$

- ① 利用初始值 h^{00} , 求 v^0 使得下式取最小值:

$$P_{TV}(v) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h^{00}\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2, \quad (5)$$

求解可得

$$v_i^0 = \max \left\{ \|D_i h^{00}\| - \frac{1}{\beta}, 0 \right\} \frac{D_i h^{00}}{\|D_i h^{00}\|}. \quad (6)$$

- ② 利用得到的 v^0 , 求 h^{01} 使得下式取最小值:

$$P_{TV}(h) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \| h - f^{00} \otimes h \|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \| v_i^0 - D_i h \|_2^2, \quad (7)$$

求解可得

$$h^{01} = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}\{D^{(1)}\}^* \odot \mathcal{F}\{v_1\} + \mathcal{F}\{D^{(2)}\}^* \odot \mathcal{F}\{v_2\} + \frac{1}{\beta} \mathcal{F}\{f^{00}\}^* \odot \mathcal{F}\{g\}}{\mathcal{F}\{D^{(1)}\}^* \odot \mathcal{F}\{D^{(1)}\} + \mathcal{F}\{D^{(2)}\}^* \odot \mathcal{F}\{D^{(2)}\} + \frac{1}{\beta} \mathcal{F}\{f^{00}\}^* \odot \mathcal{F}\{f^{00}\}} \right\}. \quad (8)$$

③验证是否满足 $P_{TV}(v^0, h^{01}) < \epsilon$, 如果不满足则继续循环; 如果满足则使 $h^0 = h^{0n}$, 算法继续进行。

3) 求 f^1 使得下式取最小值

$$L(f) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \| g - f \otimes h^0 \|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \| u_i - D_i f \|_2^2 + \sum_i \| u_i \|_2. \quad (9)$$

①利用初始值 $f^{10} = f^{00}$, 求 u^0 使得下式取最小值:

$$P_{TV}(u) = \frac{\beta}{2} \sum_i \| u_i - D_i f^{10} \|_2^2 + \sum_i \| u_i \|_2, \quad (10)$$

求解可得

$$u_i^0 = \max \left\{ \| D_i f^{10} \| - \frac{1}{\beta}, 0 \right\} \frac{D_i f^{10}}{\| D_i f^{10} \|}. \quad (11)$$

②利用得到的 u^0 , 求 f^{11} 使得下式取最小值:

$$P_{TV}(f) = \frac{1}{\alpha_1} \sum \| g - f \otimes h^0 \|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \| u_i^0 - D_i f \|_2^2, \quad (12)$$

求解可得

$$f^{11} = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}\{D^{(1)}\}^* \odot \mathcal{F}\{u_1\} + \mathcal{F}\{D^{(2)}\}^* \odot \mathcal{F}\{u_2\} + \frac{1}{\beta} \mathcal{F}\{h^0\}^* \odot \mathcal{F}\{g\}}{\mathcal{F}\{D^{(1)}\}^* \odot \mathcal{F}\{D^{(1)}\} + \mathcal{F}\{D^{(2)}\}^* \odot \mathcal{F}\{D^{(2)}\} + \frac{1}{\beta} \mathcal{F}\{h^0\}^* \odot \mathcal{F}\{h^0\}} \right\}. \quad (13)$$

③验证是否满足 $P_{TV}(u^0, f^{11}) < \epsilon$, 如果不满足则继续循环; 如果满足则使 $f^1 = f^{1n}$, 算法继续进行。

4) 将 f^1 和 h^0 代入目标函数(3)式中, 验证是否满足 $L(f^1, h^0) < \epsilon$, 如果不满足则继续循环, 如果满足则停止循环。

在改进的交替最小化算法中, “*”表示复共轭, “ \odot ”表示逐个元素取乘积。

4 光斑图像配准与还原

采用可见光相机和红外相机对激光光斑进行跟踪采集, 其中可见光相机可以清晰地拍摄到靶板, 可以用于对靶板进行跟踪, 而红外相机可以清晰地采集到激光光斑。相机的光轴与靶板之间的角度是在变化的, 二者之间存在透射变换, 采集到的光斑图像发生“变形”, 在计算光斑位置之前, 首先要还原光斑图像。此外可见光相机和红外相机之间也存在差异, 包括像面大小、图像分辨率、光轴之间偏差等, 因此在还原光斑图像之前还要对两幅采集到的图像进行配准。在本课题中, 可见光相机和红外相机的目

标图像中都包括靶板, 但是不能应用靶板边缘进行图像配准, 这主要是因为红外相机采集的靶板图像中靶板边缘比较模糊, 不容易准确提取。虽然靶板边缘模糊, 但是靶板的目标区域相对于背景图像来说还是比较清晰的。因此可以提取来自不同传感器的靶板区域, 组成两个对应点集 $\{V_i\}_{i=1,2,\dots,N}$ 和 $\{I_j\}_{j=1,2,\dots,M}$, 由于无法将两个点集中的对应点一一对应, 所以需要找到能够表征两个点集的特征量来表示两个点集构成的区域。

由于仿射变换 8 参数矩阵是一个三阶变换矩阵, 因此需要用三阶统计量表征仿射变换区域, 下面构造增广协方差矩阵, 它在区域 Ω 上的定义为

$$\Sigma = \frac{1}{|\Omega|} \iint_{\Omega} \mathbf{X} \mathbf{X}^T d\Omega, \quad (14)$$

式中 $\mathbf{X} = (x - \bar{x}, y - \bar{y}, 1)^T$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。假设仿射变换前后的区域分别为 Ω_1 和 Ω_2 , 存在关系: $\mathbf{Y} = \mathbf{R} \mathbf{X}$, \mathbf{R} 是仿射变换 8 参数矩阵。则两个目标区域的增广协方差矩阵为

$$\begin{cases} \Sigma_1 = \frac{1}{|\Omega_1|} \iint_{\Omega_1} \mathbf{X}\mathbf{X}^T d\Omega_1 \\ \Sigma_2 = \frac{1}{|\Omega_2|} \iint_{\Omega_2} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T d\Omega_2 = \\ \frac{1}{|\mathbf{R}| |\Omega_1|} \iint_{\Omega_1} \mathbf{R}\mathbf{X}\mathbf{X}^T \mathbf{R}^T |\mathbf{R}| d\Omega_1 \end{cases} \quad (15)$$

由于平面二次曲线可以表示为 $ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0$ 。用矩阵可以表示为

$$[x, y, 1] \begin{bmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{X}^T \mathbf{C} \mathbf{X} = 0, \quad (16)$$

式中矩阵 C 为对称阵, 由于增广协方差矩阵也为对称阵, 可以利用增广协方差矩阵定义一个平面二次曲线: $\mathbf{X}^T \Sigma^{-1} \mathbf{X} = 0$ 。则仿射变换前后两个区域的增广协方差矩阵定义的平面二次曲线为

$$\begin{cases} \mathbf{U}^T \Sigma_1^{-1} \mathbf{U} = 0 \\ \mathbf{V}^T \Sigma_2^{-1} \mathbf{V} = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

式中 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别为平面二次曲线上点的坐标。将(15)式代入(17)式可得

$$\begin{cases} \mathbf{U}^T \Sigma_1^{-1} \mathbf{U} = 0 \\ \mathbf{V}^T \Sigma_2^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{V}^T (\mathbf{R}\Sigma_1\mathbf{R}^T)^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{V}^T (\mathbf{R}^{-1})^T \Sigma_1^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{V} \end{cases} \quad (18)$$

通过比较可得

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{V} \Rightarrow \mathbf{V} = \mathbf{R} \mathbf{U}, \quad (19)$$

由(19)式可以看出, 如果两个区域之间仿射变换 8 参数矩阵为 \mathbf{R} , 则由两个区域增广协方差矩阵定义的平面二次曲线也可由仿射变换得到, 并且对应的仿射变换 8 参数矩阵也为 \mathbf{R} 。此外, 利用增广协方差矩阵表征区域, 由于像素的灰度不参与运算, 因此对于图像的亮度变换具有稳健性。

在计算增广协方差矩阵时, 减去了目标区域的重心, 因此经过仿射变换后的图像丢失了空域偏移量信息。为了确定图像变换后的偏移量, 可以采用搜索方法搜索最佳匹配位置。PSO 算法^[11]是一种全局搜索优化算法, 其主要思想是从随机解出发, 通过迭代搜索最优解, 通过适应度评价解的品质。在本课题中, 利用仿射变换将图像中的目标区域变换之后, 还需要确定两个目标区域之间的偏移量, 因此应以偏移量 (d_x, d_y) 作为粒子, 粒子适应度则选择为变换后的红外图像与对应可见光图像区域的互相关系数, 通过迭代搜索确定最优解, 即两幅图像之间最佳空域偏移量, 具体步骤为:

1) 提取两幅图像的靶板目标区域, 建立各自区

域的增广协方差矩阵, 求得仿射变换 8 参数矩阵, 并进行仿射变换;

2) 将平移量表示成粒子, 初始化粒子的位置和速度, 并且评价每个粒子的适应度;

3) 对于第 i 个粒子, 将其适应值与 pBest 的适应值相比较, 如果较大, 则将当前粒子设置为 pBest, 反之无动作; 对于每个粒子, 将适应值都与 gBest 的适应值相比较, 如果有较大的粒子, 则选择适应值最大的粒子作为 gBest, 反之无动作;

4) 调整粒子速度和位置, 如果未达到结束条件则返回步骤 3), 否则进入步骤 5);

5) 选择全局最优粒子的位置作为所求的最佳偏移量, 完成两幅图像的配准。

红外图像和可见光图像在进行图像配准之后, 即可利用可见光图像中靶板的特征对红外图像中的光斑进行还原了^[12]。具体方法为: 提取拍摄到的图像中靶板 4 个角点坐标, 然后人为设定这 4 个角点的理想坐标, 利用这些已知信息求取 8 参数矩阵, 利用 8 参数矩阵将实际拍摄到的图像点转换为理想坐标点, 实现光斑还原。

5 实验结果与讨论

5.1 图像配准和光斑还原精度验证

实验用的靶板尺寸为 1640 mm × 1220 mm, 为了验证光斑还原和图像配准精度, 在靶板上的固定位置设置 13 个直径为 5 mm 的定位孔, 如图 2 所示。其中利用 4 个定位孔圈定 1320 mm × 1100 mm 的矩形区域, 并在该矩形区域中心以及四条边的中心分别安置一个定位孔, 其他 4 个定位孔分别为矩形区域对角线的四等分点, 并且每个定位孔上都装有红外发光二极管。

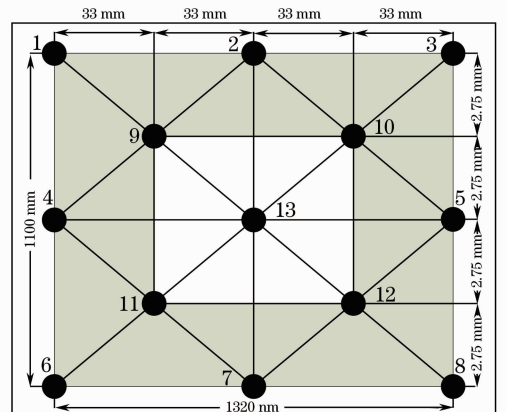


图 2 实验靶板示意图

Fig. 2 Experimental target

验证光斑还原算法精度的方法为：利用矩形区域外围 8 个红外发光二极管作为标志灯还原靶板区域，然后定位中间 5 个红外发光二极管计算算法精度。验证图像配准精度的具体步骤为：首先对可见光相机和红外相机采集到的图像进行配准，然后计算红外图像仿射变换 8 参数矩阵，并利用该 8 参数矩阵对可见光图像进行仿射变换，计算各个定位孔的位置，确定配准精度，靶板图像如图 3 所示。

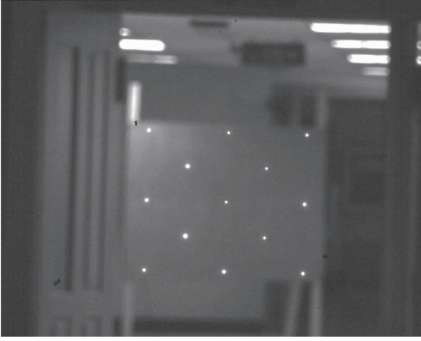


图 3 靶板图像

Fig. 3 Target figure

在实验过程中出现这样一种现象：调整光学系统，当使靶板成像清晰时发光二极管成像发散；而当使发光二极管成像清晰时，靶板成像变得模糊。这种现象产生的原因是由于靶板反射光属于可见光波段，而红外发光二极管属于红外波段，由透镜折射率公式可知实验所用的光学系统对于二者成像的焦距不一致，因此无法使二者同时成清晰像。实验中是利用红外发光二极管的位置做还原和精度验证的，这里使红外发光二极管成清晰像。表 1 所示为 1~8 号红外发光二极管的定位结果。

表 1 定位 1~8 号红外发光二极管

Table 1 Infrared diode position of No. 1~8

No.	Position
1	(225.13, 198.27)
2	(346.43, 202.55)
3	(465.74, 205.19)
4	(221.33, 304.28)
5	(461.54, 310.58)
6	(218.37, 410.50)
7	(339.25, 413.21)
8	(459.75, 416.70)

利用 1~8 号灯求得仿射变换 8 参数矩阵，并对靶板区域做还原处理，结果如图 4 所示。

9~13 号灯在还原后的靶板区域图像位置以及实际位置如表 2 所示。

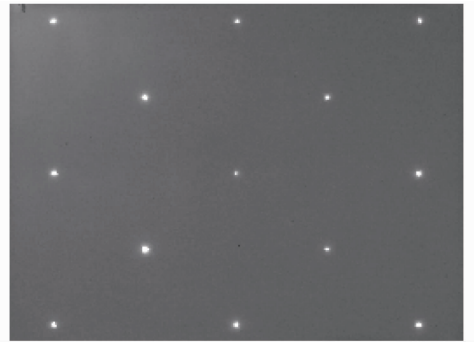


图 4 靶板还原结果

Fig. 4 Target recover result

表 2 定位 9~13 号红外发光二极管

Table 2 Infrared diode position of No. 9~13

No.	Image position	Theoretical position
9	(77.02, 53.03)	(77, 53)
10	(181.89, 53.11)	(182, 53)
11	(77.12, 140.10)	(77, 140)
12	(181.97, 140.01)	(182, 140)
13	(129.87, 96.88)	(130, 97)

计算还原误差为

$$E = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=9}^{13} (L_{ix} - L_{ix}^0)^2 + \frac{1}{5} \sum_{i=9}^{13} (L_{iy} - L_{iy}^0)^2}, \quad (20)$$

式中 (L_{ix}, L_{iy}) 为第 i 个发光二极管的定位坐标， (L_{ix}^0, L_{iy}^0) 为第 i 个发光二极管的理论坐标，计算结果为 0.128。

图 5 为红外相机和可见光相机同时采集到的

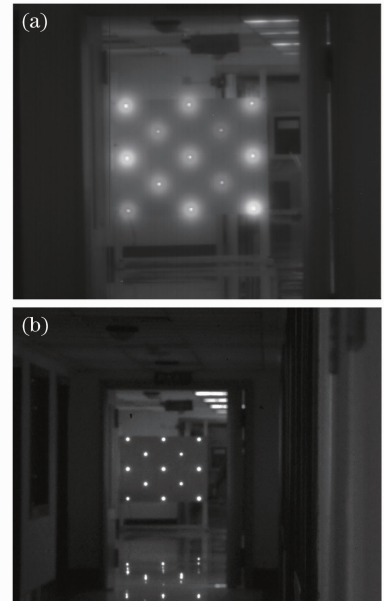


图 5 实验图像。(a) 红外图像；(b) 可见光图像
Fig. 5 Experimental figure. (a) Infrared image;
(b) visible image

图像。

以靶板为目标的图像配准结果如图 6 所示。

分别提取可见图像和红外图像中 13 个发光二极管的坐标,如表 3 所示。

计算各个信标灯之间误差平方和公式为

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \|I_i - V_i\|_2^2}, \quad (21)$$

式中 I_i, V_i 分别为可见光图像和红外图像中第 i 个灯在靶板上的坐标,于是图像配准结果为 0.06。

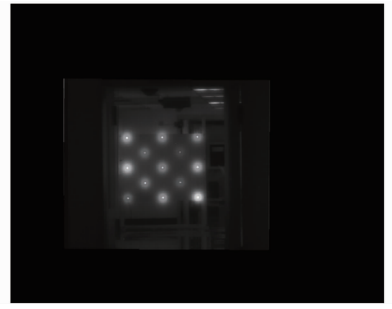


图 6 配准后的图像
Fig. 6 Registration image

表 3 图像配准精度
Table 3 Registration precision

No.	1	2	3	4	5	6	7
Visible	(199.34, 228.87)	(262.37, 229.04)	(323.81, 229.36)	(200.40, 280.41)	(323.65, 280.01)	(202.39, 331.98)	(262.08, 331.87)
Infrared	(199.22, 229.01)	(262.49, 229.16)	(323.92, 229.45)	(200.55, 280.52)	(323.54, 279.86)	(202.21, 332.11)	(261.89, 332.02)
No.	8	9	10	11	12	13	
Visible	(323.94, 331.92)	(231.41, 254.79)	(293.01, 254.80)	(231.31, 306.43)	(292.99, 306.00)	(262.21, 281.21)	
Infrared	(323.82, 331.84)	(231.55, 254.87)	(293.11, 254.94)	(231.44, 306.30)	(292.81, 306.17)	(262.04, 280.98)	

5.2 盲解卷积事后复原

改进的盲解卷积算法和传统经典盲解方法相比具有很大优势,通过实验并对结果做客观评价,验证

改进算法的性能。采用 Lena 参考图像作为原始图像,并设计两个高斯函数作为使参考图像退化的点扩展函数,如图 7 所示。

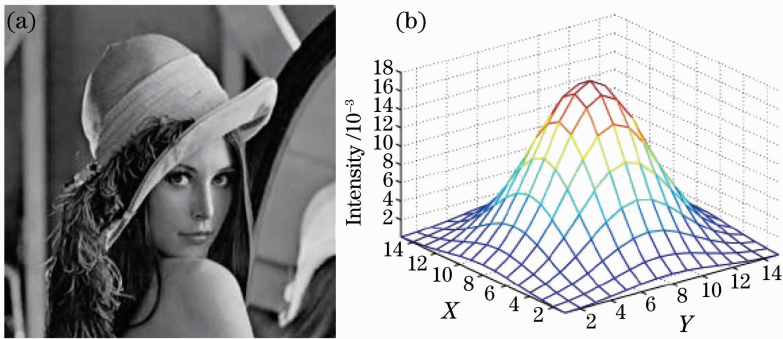


图 7 Lena 标准图像(a)和点扩展函数(b)

Fig. 7 Lena image (a) and point spread function (b)

实验方法为,利用方差为 9 高斯点扩展函数对参考图像进行高斯模糊处理;为了验证算法抗噪声能力,同时加入模糊信噪比(BSNR)为 40 dB 高斯加性噪声,结果如图 8 所示。

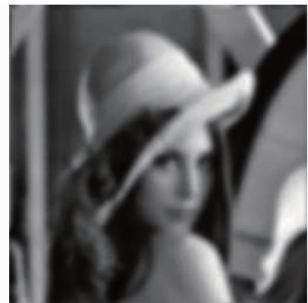


图 8 加入噪声的 Lena 图像

Fig. 8 Lena image added with noise

为了比较采用不同事后图像复原算法处理图像的质量,采用以下准则:

1) 均方根误差,假设图像大小为 $M \times N$,则参考图像 R 和复原图像 F 之间的均方根误差为

$$x_{EMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - F(i,j)]^2}{M \times N}}. \quad (22)$$

均方根误差值越小,说明复原图像质量越好。

2) 互信息,参考图像 R 和复原图像 F 的互信息为

$$I_M = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{R,F}(i,j) \text{lb} \frac{P_{R,F}(i,j)}{P_R(i)P_F(j)}, \quad (23)$$

式中 P_R 为参考图像 R 的概率密度, P_F 为复原图像 F 的概率密度, $P_{R,F}$ 为 R 和 F 的联合概率密度, L 为灰度级数。互信息越大,复原图像的质量越好。

3) 改善信噪比 (ISNR),反映了图像的恢复质量,改善信噪比值越大,表示图像复原质量越好。

$$R_{\text{ISN}} = 20 \lg \left(\frac{\|f - g\|_2}{\|f - u\|_2} \right), \quad (24)$$

式中 f, g, u 分别代表源图像、观测图像和复原图像。

实验中,使用观测图像作为初始迭代图像, δ 函数作为初始点扩散函数。对于本文提出的迭代算法约束条件,将迭代过程中迭代图像和点扩散函数负值部分设置为零,迭代结束条件 ϵ 设定为 1×10^{-4} 。利用改进算法恢复的图像如图 9 所示。



图 9 恢复的 Lena 图像
Fig. 9 Lena restoration

表 4 为利用本文提出算法、IBD 算法和 TV 算法恢复的图像结果,从表中统计数据可以看出,本文提出的算法恢复图像的效果要好得多。

表 4 算法性能比较

Table 4 Comparison among algorithms' capability

Algorithm	MSE	MI	ISNR
IBD	42.93	-32.37	2.43
TV	36.67	-22.86	2.99
Proposed method	28.36	-15.61	3.64

5.3 实际外场

根据本文提出的准确测量激光光斑位置的关键技术,设计实验方案如图 10 所示。

实验过程中,靶板是运动的,激光照射器将激光光斑照射到靶板上,利用可见相机实时采集靶板图像,识别并跟踪目标靶板,跟踪方式可以根据指令选择闭环跟踪、远程单杆跟踪或本地单杆跟踪。四象

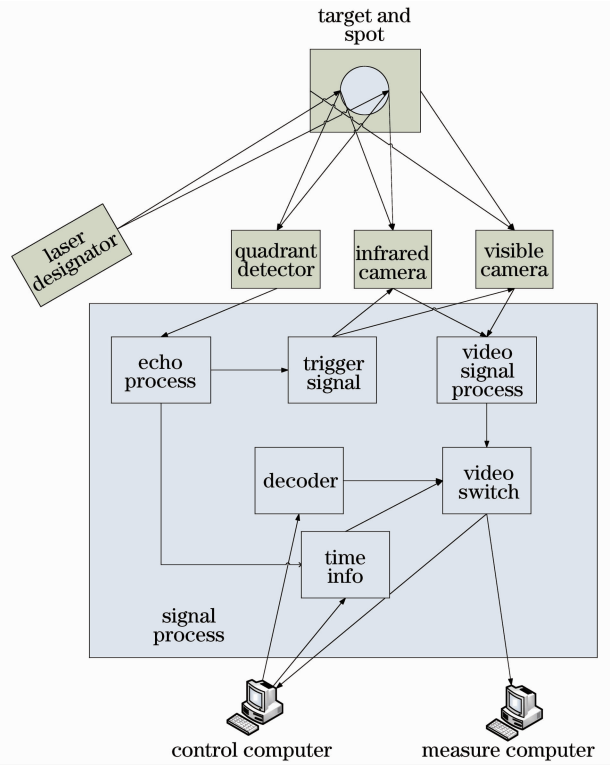


图 10 光斑测量平台示意图

Fig. 10 Spot measurement platform

限探测器接收激光回波信号,其中包括激光后向散射信号以及激光光斑反射信号,可以将四象限探测器探测到的激光回波信号送入回波信号处理模块进行处理,提取激光光斑反射信号,并生成相机外触发选通时序,抑制激光后向散射。当激光照射器以固定频率照射时,根据检测到的连续两个光斑信号,即可确定激光照射器的发射频率,计算出后续激光脉冲信号到来时刻,产生相应的时序控制信号,触发相机、采集卡等开始工作。控制计算机发送的切换指令经指令解码模块后控制信号处理模块,将红外图像和可见光图像有选择地送入两台计算机。同时将时钟锁存的激光到来时刻传送给信号处理模块,追加到每帧视频图像的最后一行,供测量计算机同步跟踪与测量同帧图像使用。红外相机用于拍摄激光光斑图像,并经过信号处理模块送入测量计算机。然后可以利用本文提出的改进盲解卷积算法完成图像事后复原,削弱大气湍流对激光光斑成像的影响。再按照本文提出的图像配准方法将可见图像和红外图像进行配准,消除多传感器之间的差异,并利用靶板特征还原激光光斑图像。最后利用高斯曲面拟合法提取激光光斑位置。利用该实验方案对实际外场实验图像进行处理。

采集到的激光光斑图像如图 11 所示,可见光相

机拍摄到的靶板图像如图 12 所示。



图 11 红外相机采集的激光光斑图像

Fig. 11 Laser spot image from infrared camera



图 12 可见光相机采集的靶板图像

Fig. 12 Target image from visible camera

由图 11 可以看出激光光斑图像受大气湍流影响,光斑的边缘很模糊,并且光斑能量分布发生抖动。利用提出盲解卷积图像事后复原算法对光斑图像进行恢复,结果如图 13 所示。

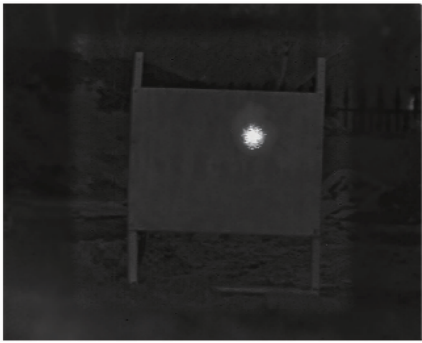


图 13 事后复原的光斑图像

Fig. 13 Spot image after registration

将可见光相机和红外相机按照提出的图像配准算法得到的配准图像如图 14 所示。

为了消除由于透射变换导致的激光光斑失真,图 15 为还原之后的光斑图像。

设原点位于靶板的左上角,那么提取到的激光光斑相对于靶板位置为(160.21,62.98)。图 16 为光斑能量分布图。

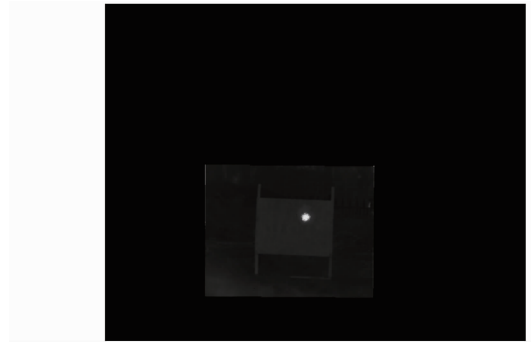


图 14 图像配准后的图像

Fig. 14 Registration image

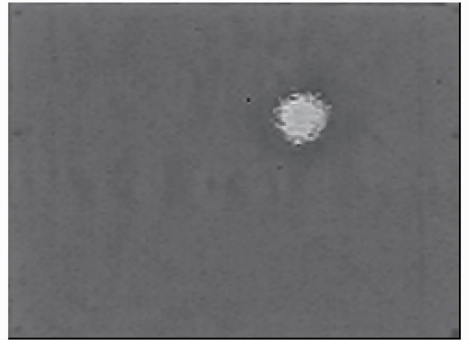


图 15 还原处理后的光斑图像

Fig. 15 Recovered spot image

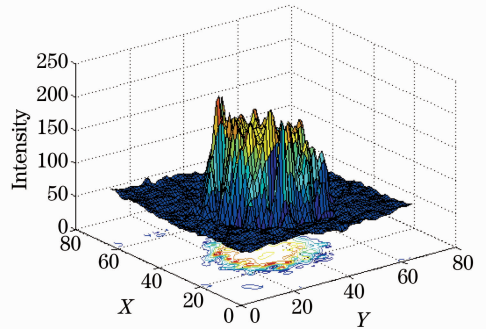


图 16 激光光斑能量分布

Fig. 16 Laser spot energy distribution

6 结 论

本文就提高激光光斑位置测量精度的四个关键技术展开研究,对于每个关键技术提出相应的实现方法,并通过实验验证了提出算法的精度。实验结果表明提出的异步距离选通技术可以很好地抑制激光后向散射;改进后的盲解卷积算法图像复原结果和经典算法相比在图像复原质量上有了提高;提出的基于目标区域图像配准方法对于图像亮度等变化具有稳健性。虽然实际外场实验中没有参考的光斑位置,但是通过仿真实验的验证,可以充分说明最后实际测量的光斑位置精度优于 0.3 pixel。

参 考 文 献

- 1 S. D. Zhang, Y. J. Wang, H. H. Sun. Design of high precision star image locating method used in star sensor technology[C]. Changchun: Computer, Mechatronics, Changchun, Control and Electronic Engineering, 2010 International Conference on, 2010, **5**: 411~414
- 2 Zhang Shaodi, Wang Yanjie, Sun Honghai. Application of triangulation and PSO-BP neural network to star pattern recognition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(6): 30~37
张少迪, 王延杰, 孙宏海. 三角剖分以及 PSO-BP 神经网络在星图识别中的应用[J]. *光电工程*, 2011, **38**(6): 30~37
- 3 Zhang Shaodi, Wang Yanjie, Sun Honghai. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 395~402
张少迪, 王延杰, 孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(2): 395~402
- 4 Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109001
韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0109001
- 5 Huang Youwei, Wang Xia, Jin Weiqi *et al.*. Temporal model of underwater laser range-gated imaging and pulse stretching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3177~3183
黄有为, 王霞, 金伟奇等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3177~3183
- 6 Shen Baoling, Sun Jianfeng, Zhou Yu *et al.*. Influence of time-varying atmospheric turbulence to facular orientation deviation in dynamic process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805004
沈宝良, 孙建锋, 周煜等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805004
- 7 G. R. Ayers, J. C. Dainty. Iterative blind deconvolution method and its applications[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7): 547~550
- 8 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- 9 D. Kundur, D. Hatzinakos. A novel recursive filtering method for blind image restoration[C]. International Conference on Signal and Imaging Processing, 1995, **95**: 428~431
- 10 T. Chan, G. Golub, P. Mulet. A nonlinear primal-dual method for total variation-based image restoration[C]. ICAOS'96 Lecture Notes in Control and Information Sciences, 1996, **219**: 241~252
- 11 Zhang Liping. The Theorem and Practice upon the Particle Swarm Optimization Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005
张丽平. 粒子群优化算法的理论及实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- 12 Zhang Ye. A Study on Eye-like Scene Matching Algorithm for Navigation Guidance[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese academy of Sciences, 2008
张叶. 基于人眼视觉机制的景象匹配制导技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008

栏目编辑:何卓铭