

文章编号 1004-924X(2015)增-0661-08

## 像质评价结合互信息在激光图像配准中的应用

范有臣<sup>\*</sup>, 赵洪利, 孙华燕, 郭惠超, 赵延仲, 高宇轩  
(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

**摘要:** 为了获得运动目标的激光三维图像, 建立了距离选通条件下的激光主动成像系统, 提出了一种基于像质评价的激光图像互信息配准算法。介绍了基于距离选通的 ICCD 成像原理和成像系统。针对互信息算法, 详细描述了配准的整个算法流程。最后针对运动目标距离选通成像过程中如何选择切片图像作为基准图像的问题, 提出在配准之前引入像质评价标准, 实现了基于像质评价的激光图像互信息配准算法。实验结果表明, 在距离选通激光切片图像中, 亮度、信噪比、平均梯度和边缘强度具有明显的区分度, 可以此为标准选择出切片图像中质量较好的图像; 基于像质评价的基准图像的选取能够有效减少错误配准, 整个配准算法精度达到 0.01 pixel。该算法兼顾了鲁棒性和精度, 稳健性强, 特别适用于运动目标激光图像的配准。

**关键词:** 像质评价; 运动目标; 激光图像; 图像配准; 距离选通; 互信息配准

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0661

## Application of image quality evaluation and mutual information in laser image registration

FAN You-chen<sup>\*</sup>, ZHAO Hong-li, SUN Hua-yan, GUO Hui-chao, ZHAO Yan-zhong, GAO Yu-xuan

(Academy of Equipment of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: love193777@sina.com

**Abstract:** To obtain the three-dimensional laser images of moving targets, this paper establishes a range-gated laser active imaging system, and puts forward a laser image registration algorithm based on image quality evaluation and mutual information. The principle of ICCD imaging and imaging systems based on range gated were introduce. On the basis of the mutual information, the entire process of registration algorithm was described in detail. For how to choose the slice images as a reference image in moving target range gated imaging, the standard of quality evaluation was introduced before the registration, and the laser image registration algorithm based on image quality evaluation and mutual information was implemented. Experimental results indicate that brightness, Signal to Noise Ratio (SNR), average gradient and edge strength have obvious distinction, which can be as standards to select a better image in laser range-gated slice image. The reference image selection based on the image quality evaluation can effectively reduce the error registration, and the entire registration algorithm

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61302183)

accuracy reaches to 0.01 pixel. The algorithm offers high precision and strong robustness, and is especially suitable for the laser image registration of moving targets.

**Key words:** image quality evaluation; moving target; laser image; image registration; range gated; mutual information registration

## 1 引言

三维成像是判别物体姿态,识别真假目标的有效手段<sup>[1]</sup>。在距离选通激光主动成像时,对于静止目标而言,可以通过对目标切片成像获得不同选通距离的目标图像,进而通过算法获得目标的三维图像。而对于运动目标而言,在切片成像的同时,目标的空间位置会发生变化,因此需要配准不同选通距离的目标图像,使目标的空间位置基本对齐,而后才能获得目标的三维图像。

配准算法层出不穷<sup>[2]</sup>,其一般按照特征空间可以分为两种,一是基于特征的配准算法,一是基于灰度的配准算法<sup>[3]</sup>。两者的主要区别在于是否包含图像分割过程,基于特征的算法包含图像分割部分以进一步提取显著特征,而基于灰度的方法是直接采用图像的统计信息,不必包含图像分割过程。基于特征的方法提取目标的点、线、边缘等显著特征,以显著特征代替整幅图像,在配准过程中大大减少了运算信息量,运算速度较快。常用的点检测方法有 Harris 角点检测、SIFT 算法、SURF 算法等及各类衍生算法;常用的线段和边缘检测方法有 Canny 边缘检测、Hough 变换等。可用的匹配特征在图像中应该是稳定的,并能够代表整幅图像,在待配准图像及基准图像中都能够有效地自动提取出来,但是由于激光图像存在噪声大,纹理信息不丰富,加上大气湍流造成的灰度不规则变化,不同切片图像之间明暗变化大等,因此很难提取出有效的特征点。

互信息配准算法是当前的研究热点,该算法不需要对原始图像做过多的图像预处理,不需要进行特征提取,只要根据基准图像和待配准图像对应像素的统计值计算相似性函数,进而获得最优配准结果。整个配准过程无需人工参与,配准结果鲁棒性好,准确性高,缺点是缺失了空间信息,并且计算量偏大。文中从常用配准算法开始分析,介绍了基于距离选通的 ICCD 成像原理,针对互信息算法,详细介绍了配准的整个算法流程。

鉴于基准图像选取在配准中起着重要的作用,结合距离选通图像的特点,提出采用像质评价的方法选择一幅质量最好或较好的图像作为配准基准图像。实验表明基于像质评价互信息配准算法精度高,可靠性高,能够有效应用于运动目标激光图像的配准。

## 2 基于距离选通的 ICCD 成像

基于距离选通的激光主动成像系统被广泛应用于水下探测、夜间目标成像及军事侦察等各个方面<sup>[4-5]</sup>,目前国内基于距离选通的激光主动成像主要应用于静止目标成像<sup>[6-7]</sup>。其基本原理是<sup>[8-9]</sup>:首先,激光器发射脉冲激光照亮目标,此时探测器快门关闭;而后当目标反射的激光脉冲即将到达探测器时,打开探测器快门,接收反射脉冲后立即关闭。这种工作模式只能接收目标的反射激光,对于目标以外的反射光具有物理屏蔽的作用,很好地屏蔽了后向散射。本文设计的小型化室内系统如图 5 所示。实验系统主要有 5 部分组成:激光照明模块、激光接收模块、同步控制模块、ICCD 成像模块及计算机。选通成像探测器型号为 1XC18/18WHS-G,激光器波长为 860 nm,其单脉冲能量最大为 4 mJ,重复频率可达 1 kHz,接收光学系统焦距为 100 mm、口径 25 mm。



图 1 系统实物图

Fig. 1 Physical map of system

### 3 互信息配准算法

#### 3.1 熵与互信息的基本概念

熵是信息论的基本概念,表述了图像灰度值的不确定性,其值越大,灰度值的不确定性越高,包含的灰度值概率分布越分散,反映的图像信息越多<sup>[10]</sup>。图像的熵定义为:

$$H(A) = - \sum_{i=1}^n p_i(a) \log p_i(a), \quad (1)$$

其中  $A$  表示图像,  $p$  表示像素值的取值概率,  $a$  为图像中的像素值。

上述表述是针对一幅图像的情况,扩展到二维情况,设两幅图像分别为  $A$  和  $B$ , 对应的像素值分别为  $a$  和  $b$ , 则联合概率分布表示为

$$p_{ij}(a, b) = P\{A = a, B = b\} = \frac{s_{ij}(a, b)}{\sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} s_{ij}(a, b)}, \quad (2)$$

其中  $(a, b)$  表示图像  $A$  和  $B$  对应的像素对,  $s(a, b)$  表示出现的像素对的个数。则相对应于一维变量,  $A$  和  $B$  两幅图像的联合熵为

$$H(A, B) = - \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} p_{ij}(a, b) \log p_{ij}(a, b). \quad (3)$$

从定义中可以看出,联合熵表述了图像之间的相关程度,两幅图像的相关性越大,其联合熵越大,反之亦然。

条件熵是衡量已知一幅图像的条件下,另一幅图像的信息量,定义已知图像  $B$  的条件下图像  $A$  的条件熵为

$$H(A | B) = H(A, B) - H(B) = - \sum_{i=1}^{n_a} p_i(a | b) \log p_i(a | b),$$

其中

$$p_i(a | b) = \frac{p_i(a, b)}{p_i(b)}. \quad (4)$$

根据联合熵和条件熵可以进一步定义互信息:

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B), \quad (5)$$

或表示为

$$I(A, B) = H(A) - H(A | B) = H(B) - H(B | A). \quad (6)$$

采用边缘概率密度和联合概率密度也可以表示为

$$I(A, B) = - \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} p_{ij}(a, b) \log \frac{p_{ij}(a, b)}{p_i(a) \cdot p_j(b)}, \quad (7)$$

其中,  $p_{ij}(a, b)$  表示联合概率密度,  $p_i(a)$  和  $p_j(b)$  为边缘概率密度。

#### 3.2 互信息配准模型

配准算法可以看作拼接、融合的预处理过程,是整个算法的基石。在图像配准流程中,配准涉及的主要问题是特征提取、搜索空间、相似性测度和搜索算法 4 个方面,而基于互信息的配准算法并不需要预先提取特征,因此只涉及搜索空间、相似性测度和搜索算法 3 方面的问题<sup>[11]</sup>。在本文配准过程中假设图像中的目标是刚体变换,即只有  $X$  轴和  $Y$  轴的平移及  $XY$  平面内的旋转,相似性测度则采用图像的归一化互信息作为配准标准,搜索算法采用粒子群优化搜索算法。

##### (1) 刚体变换模型

在刚体变换中配准图像与待配准图像的变换可以表示为

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

其中,  $\theta$  表示旋转角度,  $\mu_x$  和  $\mu_y$  分别表示  $X$  轴和  $Y$  轴方向的平移量。在刚体变换中只有 3 个独立的自由度变量,其向量形式为  $[\mu_x \ \mu_y \ \theta]$ , 在优化搜索算法中,依此向量搜索互信息的最大值。

##### (2) 归一化互信息

为了减少图像之间的重叠区域对互信息测度的影响,采用归一化互信息作为配准标准,相关实验表明,归一化的互信息算法鲁棒性更好,定义为

$$I(A, B) = \frac{H(A) + H(B)}{H(A, B)}. \quad (9)$$

整个配准基本流程如下: a. 输入基准图像  $f(x, y)$  和待配准图像  $g(x, y)$ ; b. 确定搜索空间的变换模型  $T$ , 计算待配准图像在初始变换下的图像  $T(g(x, y))$ , 对变换后图像的非整数点采用双线性插值; c. 计算基准图像  $f(x, y)$  和变换图像  $T(g(x, y))$  的相似性测度, 即归一化互信息值; d. 如果相似性测度符合预先设定精度则输出当前变换参数, 如果不符合则经过粒子群搜索算法不断优化变换参数, 进而变换待配准图像; e. 迭代重复 b~d 步骤直到配准成功, 输出使归一化互信息最大值对应的变换  $T$ 。

## 4 基于像质评价的互信息配准算法

在图像配准过程中,基准图像的选取对于配准能否成功有着至关重要的作用。运动目标的激光主动成像中,目标的移动、大气湍流会造成图像质量下降。尤其是对运动目标进行切片成像的过程中,图像质量起伏很大,并不是每一幅图像都可以作为基准图像,所以必须选择成像质量好的图像作为基准图像进行校准。

### 4.1 像质评价参数选择

对于激光图像而言,图像质量的好坏与目标作用距离、大气湍流强度、激光照明条件和成像器件有着密不可分的联系,在本文中,忽略图像获取的影响,仅从图像本身考虑图像质量,则可以较好地反映激光主动成像特性的图像特征信息要具有以下特点:可区分性、可靠性、独立性,评价的指标主要有:亮度,信噪比,清晰度,信息量,均匀性,平均梯度和边缘强度。

基于激光成像的原始图像中,一般情况下需要探测的目标图像仅占据整幅图像的一小部分,所以需要按照图像呈现的特性进行不同区域的分割(如下图 2 所示)。

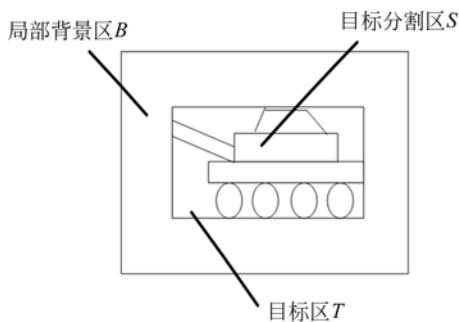


图 2 图像区域划分

Fig. 2 Image area division

#### 4.1.1 亮度

适宜的图像亮度是对图像进行处理所需的前提,而通常所指的亮度评估是对目标区域图像的亮度进行评估。一般而言灰度均值作为检测图像亮度的指标,同时也是进行图像亮度评估过程中的重要参数。图像中目标区域的灰度均值  $m$ , 定义如下:

$$m = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N g(x, y), \quad (10)$$

其中,  $g(x, y)$  表示原始图像,  $M$  和  $N$  分别对应行数和列数。

#### 4.1.2 信噪比

对于图像信噪比参数来说,估计噪声是关键。因为激光成像所形成的图像噪声机制十分复杂,作用机理也相对复杂,因此本文将借助局域标准差法的途径进行图像噪声的评估。计算信噪比流程如下:a. 对整幅图像中的目标图像进行灰度均值的计算。如果目标图像遍布整幅原始图像,则该原始图像呈现出的灰度均值便是目标图像的均值;如果目标图像仅为整幅原始图像的一小部分,则应当仅对图像中的目标图像进行灰度均值的处理。b. 对原始图像进行  $4 \times 4$  区域分割处理,以便对分割完成后的图像块进行标准差  $LSD$  的求解。c. 对全部图像进行标准差  $LSD_m$  的平均值求解。d. 计算信噪比  $SNR = M / LSD_m$ 。

#### 4.1.3 对比度

旨在求解出背景图像同目标图像间所呈现出的差异性,本文应用调制对比度的方法实现表示目标图像的对比度:

$$C = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\mu_T + \mu_B}. \quad (11)$$

如图 2 所示,  $\mu_T$  是表征图像中目标图像阈值在  $T$  内的灰度均值情况;参数  $\mu_B$  是表征目标图像附近的背景图像的平均灰度情况。

#### 4.1.4 清晰度和信息量

灰度共生矩阵是借助图像灰度表现出的空间关系实现图像分析的一种主流手段,是求取图像二阶概率密度函数进而实现对图像估计的方法,借助对图像中特定方向及特定距离范围内不同像素点间的灰度,对原始图像的全部像素点进行统计。其表达式为:

$$P(i, j, D, \theta) = \{ (x, y) \mid f(x, y) = i, f(x + Dx, y + Dy) = j; x = 0, 1, 2, \dots, N_x - 1; y = 0, 1, 2, \dots, N_y - 1 \}, \quad (12)$$

式中:  $i, j = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ ;  $x$  和  $y$  表征图像的像素坐标;  $L$  表征图像呈现出的灰度级数;  $N_x$  和  $N_y$  则表征图像内在的行列数。位移量用  $D$  表示,通常设定为 1;参数  $\theta$  用以表征两个像素点同  $x$  轴顺时针的夹角情况,通常取以下值:  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 。

图像清晰度 DEF 及信息熵 ENT 定义如下:

$$DEF = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \left\{ \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) \right\}, |i - j| = n; \quad (13)$$

$$ENT = - \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} p(i, j) \log p(i, j). \quad (14)$$

#### 4.1.5 均匀性

在激光主动成像探测系统中,由于激光的高度空间相干性、激光光束质量不高、光束处于聚焦或发散状态等原因降低了照明光束的均匀性;传输过程中由于大气湍流引起光束抖动、光强闪烁和像点抖动等一系列反应也会对光束均匀性产生重要影响,最后导致目标图像均匀性变差。因此,均匀性评价是目标图像质量评价的重要内容。

图像均匀性的评估用灰度起伏标准差  $\sigma_I$  表示,其表达式为

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_i \sum_j (x_{ij} - \hat{\mu})^2 / \hat{\mu}}, \quad (15)$$

式中:参数  $I$  用于表征目标图像区域,  $\langle I \rangle$  则表示目标区域呈现出的像素灰度均值大小,  $\hat{\mu}$  表示目标图像灰度均值,  $m$  和  $n$  表示目标图像中的维数情况。

#### 4.1.6 平均梯度和边缘强度

平均梯度  $g$  和边缘强度  $ei$  的定义如下:

$$g = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] / 2}, \quad (16)$$

$$ei = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{g_a(x, y)^2 + g_b(x, y)^2}, \quad (17)$$

$g(x, y)$  表示图像,  $M$  和  $N$  则表征原始图像的行数及列数,  $p_i$  则用以表征像素值大小是  $i$  的像素点在整个图像中出现的概率,  $g_a(x, y)^2$  和  $g_b(x, y)^2$  是  $g(x, y)$  经“sobel”算子对图像进行边缘检测处理后所获得的检测图像。

以下为系统获取的 3 幅切片图像,分别求取各参数如表 1 所示。

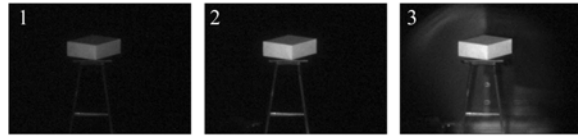


图 3 3 幅切片图像

Fig. 3 3 slice images

表 1 3 幅图像各参数结果

Tab. 1 Parameters of 3 images

序号	亮度	信噪比	对比度	信息熵	均匀性	平均梯度	边缘强度
1	37.031 9	12.572 4	0.786 6	1.164 8	0.968 9	4.721 0	41.057 0
2	64.631 4	17.852 7	0.851 7	1.065 6	0.991 3	5.165 9	47.103 9
3	85.924 9	19.371 1	0.596 3	1.064 3	0.836 6	5.777 8	52.817 8

从表 1 中可以看出,只有亮度、信噪比、平均梯度、边缘强度具有明显的区分度,其他变量没有明显差别,因此选取这 4 个参量作为像质评价的原始参数。

一般情况下亮度是数值最大的参数,为了在同一水平下对比各个图像及参数,需要将原始数据进一步处理,最直接的办法是归一化。假定在等同参数和条件下,已获取到  $n$  组目标图像,而对于某项具体参数  $x$ ,还需从已获取的  $n$  组数据中找出  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ ,归一化过程如下:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (18)$$

根据经验设置参数上下限:亮度的最大值为

255,最小值为 0;信噪比的最大值为 30 dB,最小值为 5 dB;平均梯度的最大值为 10,最小值为 0;边缘强度的最大值为 100,最小值为 0。归一化后的参量如表 2 所示。

表 2 各参数归一化结果

Tab. 2 Normalized results of parameters

亮度	信噪比	平均梯度	边缘强度
0.145 2	0.302 9	0.472 1	0.410 6
0.253 5	0.514 1	0.516 6	0.471 0
0.337 0	0.574 8	0.577 8	0.528 2

### 4.2 基于像质评价的互信息配准算法

在距离选通系统对运动目标进行切片成像时,成像质量参差不齐,然而在配准过程中基准图像的选取对于能否配准成功有着至关重要的作用,采用像质评价标准,选取成像质量较好的图像作为基准图像,为配准成功做好前期准备,整个流程如图 4 所示。

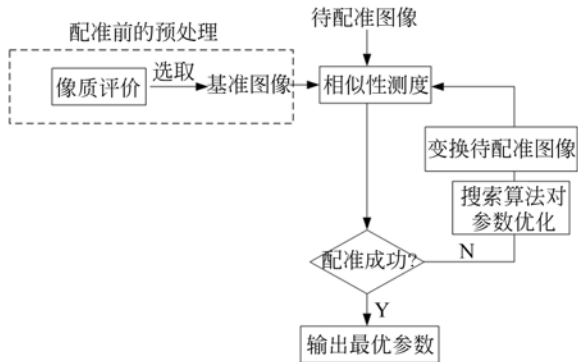


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flowchart

## 5 实验与结果

### 5.1 像质评价参数实验

采用成像系统获取一组切片图像,目标实际水平移动了 7 个像素,没有垂直位移及旋转,选通距离为 5 m,激光脉冲步进为 10 ns,获得 20 组切片图像,选取其中的 6 组如图 5 所示。

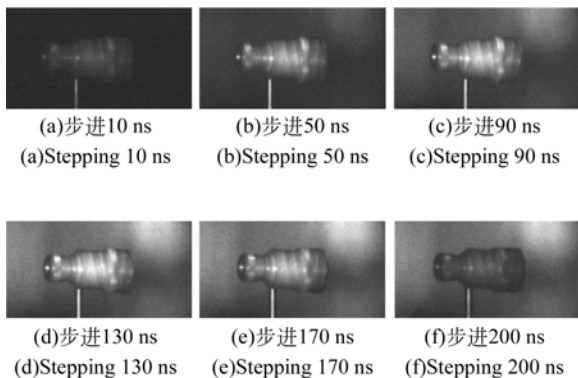


图 5 6 组切片图像

Fig. 5 6 groups of slice images

根据像质评价标准分别计算亮度、信噪比、平均梯度、边缘强度如表 3 所示。

表 3 6 组图像各参数结果

Tab. 3 Parameters of 6 images

参数	亮度	信噪比	平均梯度	边缘强度
1	49.815 2	20.637 1	2.734 9	24.921 8
2	81.095 0	21.565 6	3.822 9	37.030 5
3	97.100 3	21.907 3	4.470 5	43.181 9
4	114.649 3	22.235 5	4.926 7	47.783 5
5	106.560 1	22.360 5	4.578 1	44.257 4
6	80.342 0	21.944 5	3.565 8	33.399 5

归一化后的像质参数如图 6 所示,每一幅图像的归一化参数之和如图 7 所示。从图中可以看出,第 4 幅图像的归一化参数之和最大,这也与视觉效果基本相符,将选择图 8(d)作为基准图像。

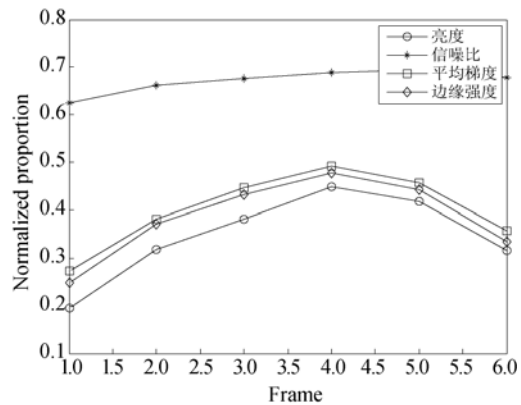


图 6 归一化后的像质参数

Fig. 6 Normalized image quality parameters

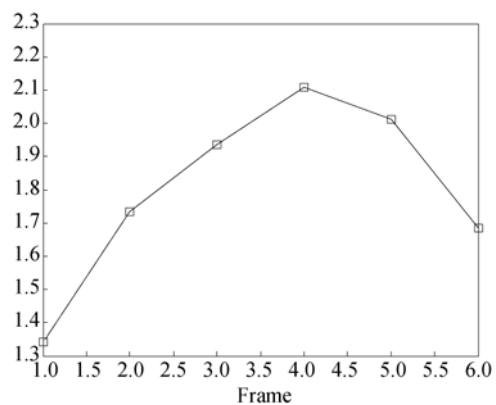


图 7 归一化参数之和

Fig. 7 Sum of normalization parameter

### 5.2 配准实验

#### 5.2.1 随机选择基准图像的配准实验

选择图 5(a)作为基准图像,分别配准其他图

像,配准结果如图 8 所示,配准变换参数如表 4 所示。

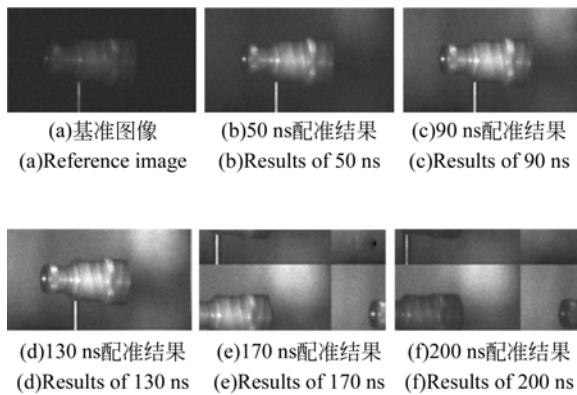


图 8 图 5(a)作为基准图像的配准结果

Fig. 8 Registration results by taking Fig 5(a) as reference image

表 4 图 5(a)作为基准图像的配准各参数结果

Tab. 4 Registration parameters by taking Fig 5(a) as reference image

	旋转	水平位移	垂直位移
2	0.000 0	0.240 0	0.200 0
3	0.000 0	2.070 0	0.220 0
4	0.000 0	4.200 0	0.840 0
5	0.000 0	113.020 0	72.880 0
6	0.000 0	126.150 0	73.720 0

从图 8 中可以看出,按照顺序的方式将第一幅图像作为基准图像时,由于第一幅图像可能存在亮度小、信噪比低、细节信息不明显等问题,在配准其他图像时,会有一些偏差,如图 8(e)和(f)时已经出现严重误差,与原图像明显不符,因此需要选择一组图像中成像质量较好的图像作为基准图像才能避免配准误差。

#### 5.2.2 像质评价选择基准图像配准实验

根据 5.1 节的像质评价标准选择图 5(d)作为基准图像,用其配准其他图像,配准结果如图 9 所示,配准变换参数如表 5 所示。

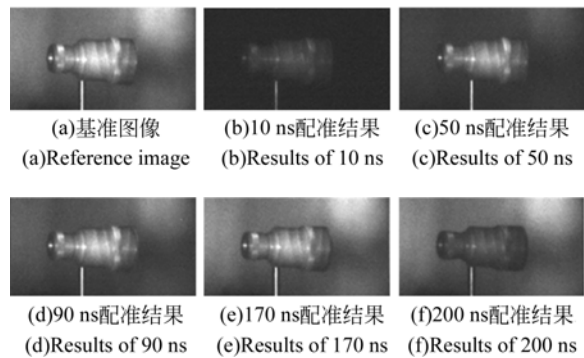


图 9 图 5(d)作为基准图像的配准结果

Fig. 9 Registration results by taking Fig 5(d) as reference image

表 5 图 5(d)作为基准图像的配准各参数结果

Tab. 5 Registration parameters by taking Fig 5(d) as reference image

	旋转	垂直位移	水平位移
1	0.000 0	0.840 0	-4.200 0
2	0.000 0	0.150 0	-3.870 0
3	0.000 0	0.130 0	-2.040 0
5	0.000 0	0.120 0	1.910 0
6	0.000 0	0.140 0	2.860 0

## 6 结 论

为了获得运动目标的激光三维图像,本文首先分析比较了现有配准算法性能,介绍了 ICCD 选通成像原理和成像系统,针对互信息算法,详细介绍了整个配准算法流程。将像质评价引入互信息配准算法,提出了一种基于像质评价的激光图像互信息配准算法,在距离选通切片图像中选择成像质量好的图像作为基准图像。实验结果表明:归一化的亮度、信噪比、平均梯度和边缘强度参数作为像质评价标准可以选取切片图像中质量好的图像,提出的算法精度高,可靠性高,能够有效减少错误配准,精度达到 0.01 个像素。

## 参考文献:

- [1] 郭裕兰,万建伟,鲁敏,等. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(4): 843-849.

GUO Y L, WAN J W, LU M, *et al.*. Three dimensional orientation estimation for lidar target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 843-849. (in Chinese)

- [2] 余先川,吕中华,胡丹. 遥感图像配准技术综述[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2060-2970.  
YU X CH, LÜ ZH H, HU D. Review of remote sensing image registration techniques [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(11):2060-2970. (in Chinese)
- [3] 王雷,高欣,崔学理,等. 基于灰度距离融合的 2D/3D 刚性配准[J]. 光学精密工程,2014,22(10):2815-2823.  
WANG L, GAO X, CUI X L, *et al.*. 2D/3D rigid registration by integrating intensity distance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(10):2815-2823. (in Chinese)
- [4] 赵明波,何峻,付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. 光学学报,2012,32(6):238-251.  
ZHAO M B, HE J, FU Q. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. *Acta Optica Sinica*,2012,32(6):238-251. (in Chinese)
- [5] SUFFERN K. 光线跟踪算法技术[M]. 北京:清华大学出版社,2011.  
SUFFERN K. *Ray Tracing Algorithm Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 韩意,孙华燕. 国外成像激光雷达系统仿真软件研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(1):1-9.  
HAN Y, SUN H Y. Advances in foreign simulation softwares of imaging laser radar[J]. *Laser And Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1):1-9. (in Chinese)
- [7] 唐劲,赵远,张宇,等. 增益调制非扫描激光雷达距离像的仿真及实验验证[J]. 中国激光,2011,38(4):234-241.  
TANG M, ZHAO Y, ZHANG Y, *et al.*. Simulation and experimental verification of gain-modulated scannerless lidar range image[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2011,38(4):234-241. (in Chinese)
- [8] MERRITT P H, KRAMER M A. Field test of active tracking of a ballistic missile in the boost phase [C]. SPIE, 1997,3086:2-9.
- [9] LUTZ Y, CHRISTNACHER F. Laser diode illuminator for night vision on-board of a 155 mm artillery shell [C]. SPIE, 2003,5087:185-194.
- [10] 乔玉龙,赵源萌,张存林,等. 基于混合 Powell 法的大赫兹/可见光双波段图像配准[J]. 光学学报,2015(2):151-157.  
QIAO Y L, ZHAO Y M, ZHANG C L, *et al.*. Terahertz/visible dual-band image registration based on hybrid powell algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*,2015(2):151-157. (in Chinese)
- [11] 刘文松,翟海涛,顾晶. 基于互信息的低分辨率对海雷达视频信号配准[J]. 高技术通讯,2014,24(8):800-806.  
LIU W S, ZHAI H T, GU J. Mutual information registration of the video signals from the low-resolution radars observing the sea [J]. *High Technology Letters*,2014,24(8):800-806. (in Chinese)

#### 作者简介:



范有臣(1987—),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事光电信息处理,激光图像处理等方面的研究;E-mail: love193777@sina.com



赵洪利(1964—),男,黑龙江双城人,博士,教授,博士生导师,主要从事信息传输与处理等方面的教学与科研工作。E-mail: 465377900@qq.com