

## 互相关算法在运动目标距离选通激光三维成像中的应用

范有臣<sup>1</sup>, 赵洪利<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>2</sup>, 郭惠超<sup>2</sup>, 赵延仲<sup>2</sup>

(1. 装备学院 信息装备系, 北京 101416;

2. 装备学院 光电装备系, 北京 101416)

**摘要:** 在微光成像中, 距离选通成像是一种获取目标三维信息的有效手段。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, 进而通过二值化算法或质心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, 因此需要对不同选通距离的目标图像进行配准, 而后才能获得目标的三维图像。搭建了基于像增强电荷耦合器件 (ICCD) 的距离选通实验系统, 提出了一种基于像质评价的互信息配准算法配准激光图像目标的空间位置, 然后对配准后的激光图像通过互相关算法获得三维图像, 并在保证一定的三维精度基础上, 逐渐减少激光图像的像幅数, 最后与二值化算法和质心算法三维重构进行了实验对比, 实验结果表明, 互信息配准算法能够有效配准激光图像, 互相关三维成像算法精度高于二值化法和质心法, 最少采用 2 幅图像即可获得目标的三维点云图像, 大大降低了对运动目标三维成像的难度。

**关键词:** 运动目标; 激光主动成像; 距离选通; 互相关

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0617003

## Application of cross-correlation algorithm in moving target range-gated three-dimensional laser active imaging

Fan Youchen<sup>1</sup>, Zhao Hongli<sup>1</sup>, Sun Huayan<sup>2</sup>, Guo Huichao<sup>2</sup>, Zhao Yanzhong<sup>2</sup>

(1. Department of Information Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Optical and Electrical Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In low-light imaging, range-gated imaging is an effective method to obtain the 3D information of the target. As for the static targets, the different strobe distance target image can be obtained by the target slice imaging, and then the 3D image of the target is obtained by binary algorithm or centroid algorithm. For moving targets, in the same time of slice imaging, the spatial position of the target will change. Therefore, it is necessary to register different distance image before it can get a three-dimensional image of the object. Firstly, the range-gated ICCD experimental system was built, and mutual information image registration algorithm based on image quality evaluation was proposed for the image target registration. Then the 3D laser image was obtained by cross-correlation algorithm and the image number of laser image was gradually reduced on the basis of ensuring accuracy. Finally, the experiment of 3D reconstruction was carried out compared with the binary algorithm and centroid algorithm. Experimental results show that mutual information registration algorithm can effectively match laser image, mutual

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61302183)

作者简介: 范有臣(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电信息处理、激光图像处理等方面的研究。Email: love193777@sina.com

导师简介: 赵洪利(1964-), 男, 教授, 主要从事信息化总体技术等方面的科研工作。Email: 465377900@qq.com

correlation algorithm for 3D imaging accuracy is higher than the binary method and centroid method. The 3D image can be obtained by using the two images, greatly reducing the difficulty of moving targets three-dimensional imaging.

**Key words:** moving targets; laser active imaging; range-gated technology; mutual correlation

## 0 引言

微光成像技术研究开始于 20 世纪,起初主要应用于军事领域,随着微光器件的不断升级和发展,现已在民用领域得到广泛应用,其核心部件是微光成像传感器,目前主要有 4 种微光成像传感器:电子倍增 CCD(EMCCD)、背照明电荷耦合器件(BCCD)、电子轰击电荷耦合器件(EBCCD)以及像增强电荷耦合器件(ICCD)。EMCCD 动态范围大,但是快门时间不能实现 ns 级的控制,不能实现选通成像,BCCD 和 EBCCD 需要十几千伏的高压,目前应用程度不高,ICCD 既可以实现电子倍增又具有皮秒量级选通快门的传感器,是目前应用最广泛、商业化程度较高的器件。

三维成像是判别物体姿态,识别真假目标的有效手段。无扫描三维成像最近几年发展迅速,基本方式是采用二维器件获得三维信息,按激光光源的不同可以分为连续光测量方法和脉冲光测量方法。连续光测量方法主要有相位调制方式和频率调制方式两种,因为发射光要求是连续激光,因此作用距离较近,现在更多的测量采用的是脉冲光测量方法<sup>[1]</sup>。按获取方式的不同可以分为直接测量方法和间接测量方法,直接测量方法是通过器件直接测量目标的距离,典型代表是基于盖革模式的雪崩光电二极管(APD)面阵测量<sup>[2]</sup>,每个单点 APD 对应于一个像素,都可以独立完成测距功能,发射一次脉冲即可同时获得灰度-距离像。间接测量方法是指通过调制解调激光信号的方式间接获取距离信息,可分为多视场测量、条纹管成像测量、距离选通测量三种方式<sup>[3]</sup>。多视场测量通过多个传感器成像,从不同的角度解算出目标空间位置,而后在统一的坐标系下合成三维信息。条纹管成像是通过条纹管屏幕记录激光回波信号不同飞行时间对应位置的条纹,进而利用相对位置的不同还原距离图像,单狭缝条纹管只能还原目标一个条状的距离图像,若要获取整个目标的

三维图像则需要采用多狭缝条纹管成像方法<sup>[4]</sup>。距离选通测量方式可以分为增益调制成像和门控切片方式两种,两种方式中使用的器件都是 ICCD。增益调制成像是通过 2 幅图像获得目标三维图像,一幅图像是当 ICCD 增益恒定时获得的,另一幅图像是通过 ICCD 增益线性调制获得的,通过 2 幅图像的灰度值的对比获得三维图像。门控切片方式是通过控制选通距离门的方式对目标进行切片式成像,获得目标不同选通距离的图像,进而合成目标三维图像。增益调制成像需要对 ICCD 增益严格控制,作用距离与门控切片方式相比更短,不适用于远距离成像<sup>[5-6]</sup>。

通过上述对各种激光三维成像模式分析可以看出,针对运动目标三维成像,主要有 2 种成像方式:APD 面阵成像和距离选通成像。APD 面阵成像在一帧图像中可以同时获取目标的距离信息和强度信息,三维成像速度快,测距距离远,波长响应范围从早期的可见光范围扩展到人眼安全波长,目前 APD 阵列大小可达 256×256,但是国外 APD 阵列对国内出口有限制,只可以进口 8×8 大小的阵列,因此发展距离选通三维成像是替代 APD 成像的有效方式。距离选通三维成像中,增益调制成像每一次三维成像需要先后获得目标的 2 幅图像,若实现对运动目标的三维成像,则需要 2 套成像系统同时对目标成像,增加了系统的复杂性,同时作用距离不如门控切片方式。现有门控切片方式能够将多幅二维图像通过二值化算法或质心算法拟合合成一幅三维图像,但是二值化算法精度较低,质心算法需要多幅图像才能达到一定的三维精度,现有报道最少采用 3 幅切片图像可以获得一幅三维图像。总之,现有三维成像模式在实际应用中还有各种各样的限制,还需进一步探索,基于主要应用于远距离成像的要求,文中探讨了门控切片距离选通三维成像的模式,分析其基本原理,提出一种新的三维成像计算方法,在保证一定精度的基础上减少切片数量获得目标三维图像。文

中通过应用配准后的激光图像互相关算法获得三维图像,最少采用 2 幅图像获得了目标的三维点云图像。

### 1 基于像质评价的激光图像互信息配准算法

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,由于目标移动、大气湍流等的影响造成图像质量下降,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,进而对图像进行空间对准。

#### 1.1 激光图像的像质评价

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,在文中,忽略图像获取的影响,仅从图像本身考虑图像质量,良好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,因此评价的指标主要有:(1)亮度;(2)信噪比;(3)清晰度;(4)信息量;(5)均匀性;(6)平均梯度和边缘强度<sup>[7]</sup>。

##### 1.1.1 亮度

通常,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:

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

式中: $g(x, y)$ 为原始图像; $M, N$ 分别为行数和列数。

##### 1.1.2 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:

(1) 对整幅图像中的目标图像进行灰度均值的计算;

(2) 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。

(3) 对全部图像进行标准差  $LSD_m$  的平均值求解;

(4) 信噪比  $SNR = M / LSD_m$ 。

##### 1.1.3 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,文中应用调制对比度的方法实现表示目标

图像的对比度:

$$C = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\mu_T + \mu_B} \quad (2)$$

式中:参数  $\mu_T$  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。

##### 1.1.4 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对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,借助图像中特定方向及距离范围内不同像素点间灰度情况,实现对原始图像全部像素点进行统计的目的。其表达式为:

$$P(i, j, D, \theta) = \{(x, y) | f(x, y) = i, f(x + Dx, y + Dy) = j; x = 0, 1, 2, \dots, N_x - 1; y = 0, 1, 2, \dots, N_y - 1\} \quad (3)$$

式中: $i, j = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ ;  $x, y$  表征图像的像素坐标; $L$  表征图像呈现出的灰度级数; $N_x, N_y$  则表征图像内在的行列数。位移量用  $D$  进行表示,通常设定为 1;参数  $\theta$  用以表征两个像素点同  $x$  坐标轴呈现出的顺时针角度情况,通常有以下取值: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。

图像清晰度及信息熵采用如下方式进行定义:

清晰度

$$DEF = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \{ \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) \}, |i - j| = n \quad (4)$$

信息熵

$$ENT = \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=1}^{L-1} p(i, j) \log p(i, j) \quad (5)$$

##### 1.1.5 均匀性

图像均匀性的评估采用灰度起伏标准差  $\sigma_I$ ,其表达式为:

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_i \sum_j (x_{ij} - \hat{\mu})^2} / \hat{\mu} \quad (6)$$

式中: $I$  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,则表示目标图像灰度均值; $m, n$  则表示目标图像中的维数情况。

##### 1.1.6 平均梯度和边缘强度

平均梯度和边缘强度的定义如下:

平均梯度

$$g = \frac{1}{NM} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]} / 2 \quad (7)$$

边缘强度

$$ei = \frac{1}{NM} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{g_a(x,y)^2 + g_b(x,y)^2} \quad (8)$$

式中： $g(x,y)$ 为图像； $M,N$ 表征原始图像的行数及列数； $p_i$ 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  $g_b(x,y)^2$  为  $g(x,y)$  经“sobel”算子对图像进行边缘检测处理后所获得的检测图像。

### 1.2 基于像质评价的激光图像互信息配准算法

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 1 所示<sup>[8-9]</sup>。

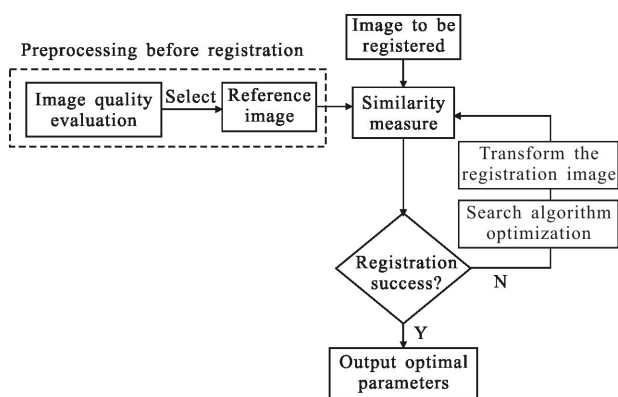


图 1 配准流程图

Fig.1 Registration flow chart

## 2 互相关三维成像

### 2.1 距离选通三维成像原理

根据距离选通成像原理<sup>[10]</sup>，激光在  $t_0$  时刻发射脉冲，经过一段时间后目标反射光到达探测器，此时选通门打开，即可对  $R_1=ct_0/2$  距离处的目标成像， $L$  为切片距离深度， $c$  为真空中的光速，定义该图像为第一个切片，若选通延时步进为  $\Delta t$ ，则第二个切片图像的成像距离为  $R_2=c(t_0+\Delta t)/2$ ，依次循环步进，直到获得目标的全部切片图像，如图 2 所示，其中

$$L = c \frac{t_{gate} + t_{wide}}{2} \quad (9)$$

式中： $t_{gate}$  为探测器快门时间； $t_{wide}$  为激光脉冲宽度。

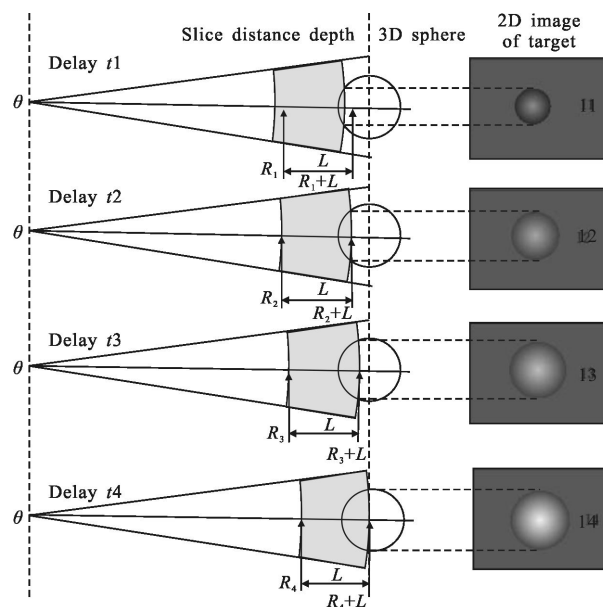


图 2 切片成像示意图

Fig.2 Slice imaging schematic

则每一帧图像对应的距离为：

$$R_i = c \frac{t_0 + i\Delta t}{2} \quad (10)$$

获得目标的二维强度切片图像后，即可通过二维图像求取目标的距离信息，进而合成三维图像，常用的算法有二值化算法和质心算法，他们的本质都是通过切片图像间的帧间关系和灰度信息获得对应的距离信息。

#### 2.1.1 二值化算法求解距离信息

二值化算法是求解距离信息最直接最简单的方法，通过对图像二值化处理将目标与背景分离，然后直接与每一帧图像对应的距离信息相乘，最后将所有切片图像的相乘结果相加，即可得到目标的三维图像。具体流程如下<sup>[11]</sup>：

首先对所有切片图像二值化处理，此时图像灰度值由 0~255 变为 0 或 1。假设图像  $J$  是切片图像  $I$  的二值化结果，然后计算每一帧切片图像对应的距离值，按照上节推导，对应的距离值为：

$$R_i = c \frac{t_0 + i\Delta t}{2n} \quad (11)$$

式中： $t_0+i\Delta t$  为当前帧图像对应的延时； $n$  为光在传输过程中的折射率。

最后通过图像  $J$  与  $R_i$  相乘获得目标三维距离图像，则三维图像矩阵  $K$  为：

$$K = \sum_{i=1}^n J \times R_i \quad (12)$$

### 2.1.2 质心算法求解距离信息

当选通门宽较大或激光脉冲较宽时,二值化算法距离精度变差,此时一般采用质心算法求解距离信息,质心算法与二值化算法的最大不同是求取每一像素对应的距离信息,更加适合于精确成像<sup>[2]</sup>。质心算法假设每一个像素在一系列切片图像中灰度值最大的对应于此像素的准确距离,因为在选通成像时,目标可能会出现多个切片图像中,而目标的灰度值会随着选通距离的变化而变化,理想情况下,只有选通距离与目标实际距离一致或相近时,目标反射回波才能全部被探测器接收,此时对应的目标灰度值也最大。具体算法过程如下。

首先,推算出所有图像对应的时间延时和距离信息。假设按延迟时间获得 1~n 幅切片图像,则根据前节推导,第 i 幅图像  $I_i(x,y)$  对应的延迟时间为  $t_i = t_0 + i\Delta t$ , 对应距离信息为:  $R_i = c \frac{t_0 + i\Delta t}{2}$ 。

然后,求取每一个像素(x,y)对应的时间延迟。将所有切片图像的灰度值相加,即:

$$I(x,y) = \sum_{i=1}^n I_i(x,y) \quad (13)$$

则像素(x,y)对应的时间延迟<t>为:

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y)t_i}{I(x,y)} \quad (14)$$

最后,代入到对应距离信息为:

$$R_i = c \frac{\langle t \rangle}{2} = \frac{c}{2} \times \frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y)t_i}{I(x,y)} = \frac{c}{2} \times \left( t_0 + \frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y) \times i}{I(x,y)} \Delta t \right) \quad (15)$$

根据每个像素对应的距离信息即可直接换算出目标三维图像。

## 2.2 基于互相关法的三维成像

按照质心法原理分析,采用质心法三维重构时需要至少 3 幅切片图像,为进一步较少图像幅数提高重构精度,提出了一种互相关算法。互相关算法通过将理想灰度曲线与像素点实际灰度曲线相关,进而根据相关峰值求取该像素点的实际距离,因为两

者相关后,只存在一个峰值,使峰值与距离信息一一对应,根据对应的延迟时间即可求出当前距离。具体推导如下。

通常情况下,脉冲激光时域表示为<sup>[13]</sup>:

$$P(t) = (t/\tau)^2 \exp(-t/\tau) \quad (16)$$

式中:  $P(t)$  为脉冲激光时域信号;  $\tau$  为激光脉冲宽度。

像增强器 ICCD 的选通快门采用矩形函数的形式,表示如下:

$$g(t) = \begin{cases} 1 & t_d \leq t \leq t_d + t_g \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $t_d$  为延迟时间;  $t_g$  为选通门宽。则理想状态下,在接收时间内,单个像素点获得的能量即为激光脉冲在选通们时间内的积分,表示为:

$$Q(t_d, t_g) = \int_0^\infty P(t)g(t)dt = \int_{t_d}^{t_d+t_g} P(t)dt \quad (18)$$

式中:  $Q(t_d, t_g)$  为像素点能量表示,在文中定义为灰度级理想曲线。

理想曲线  $x(n)$  与实测曲线  $y(n)$  的互相关  $r(x,y)$  表示如下<sup>[14]</sup>:

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n+m) \quad (19)$$

则互相关值最大时对应于像素点(x,y)的时间延迟  $t_\mu$ :

$$t_\mu = t_1 + \frac{x}{2} \times \Delta t \quad (20)$$

式中:  $t_1$  为实测曲线中首个非零点延迟时间;  $x$  为互相关最大值对应的横坐标值,则  $x/2$  为实测曲线中对应的横坐标值,  $x\Delta t/2$  即对应于取得最大值的时间间隔,其具体关系如图 3 所示,其中(a)为理想灰度级曲线,(b)为实测曲线,(c)为互相关曲线。

最后,代入到对应距离信息为:

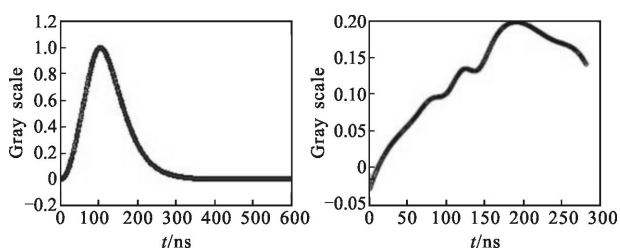
$$R_i = c \frac{t}{2} = \frac{c}{2} \times (t_0 + t_\mu) = \frac{c}{2} \times (t_0 + (t_1 + (x \times \Delta t)/2)) \quad (21)$$

对比互相关算法和质心算法可以看出,在质心算法中,每个像素对应的时间延迟可以表示为:  $\langle t \rangle =$

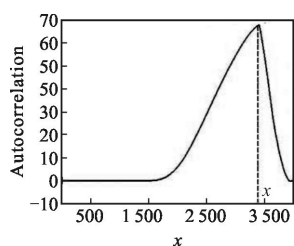
$$\frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y)t_i}{I(x,y)} = t_0 + \frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y) \times i}{I(x,y)} \Delta t, \text{ 其中, } t_0, \Delta t \text{ 都是已知并固定的, } \frac{\sum_{i=1}^n I_i(x,y) \times i}{I(x,y)}$$

则是图像像素点强度的加权平均,加权平均的范围是 1~n 幅图像,而在互相关

算法中,也是求取每个像素的时间延迟  $t=t_0+t_{\mu}=t_0+(t_1+(x \times \Delta t)/2)$ ,与质心法类似, $t_0, \Delta t$  都是已知并固定的, $t_1$  和  $x$  是通过互相关算法求取的对应参数。很显然, $t_1$  和  $x$  是对 1~ $n$  幅图像延迟时间的插值,其精度要高于 1~ $n$  幅图像的加权平均。



(a) 理想灰度级曲线 (a) Ideal gray scale curve  
(b) 实测曲线 (b) Measured curve



(c) 互相关曲线 (c) Correlation curve

图 3 互相关算法示意图

Fig.3 Mutual correlation algorithm diagram

另外,由于质心法在求取延迟时间时是对强度的加权平均,换言之,需要较多的切片图像,切片图像的数目至少大于 3 个,而互相关算法中,在求取  $t_1$  和  $x$  时,只需求取相关时的峰值即可,最少需要 2 幅图像就可以与理想波形相关求出对应峰值。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 三维成像算法比较

采用图 4 所示成像系统获取一组切片图像,实验系统主要由 6 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、激光测距模块及跟踪平台。发射系统采用 9 束 360 nm 的半导体激光器,重频 750 Hz,脉冲宽度为 80 ns,接收系统采用 410 mm 焦距,290 mm 口径,透过率为 0.9 的夜视镜头,选通成像探测器型号为北方夜视生产的 1XC18/

18WHS-G,目标为扩束镜模型,长为 0.4 m,直径 0.2 m,目标实际水平移动了 7 个像素,没有垂直位移及旋转,ICCD 快门时间设为 100 ns,选通门步进为 10 ns,根据公式(9),其选通景深  $L$  为  $(80+100) \times 0.15 \text{ m} = 27 \text{ m}$ ,当选通步进为 10 ns 时对应的是光程差为 3 m,距离分辨率为 1.5 m,即切片距离  $L$  值每次增加 1.5 m,对目标进行了 17 次切片成像,则 17 幅图像对应距离为  $17 \times 1.5 \text{ m} = 25.5 \text{ m}$ ,基本与选通景深一致。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对其他图像进行互信息配准,舍弃了前后 2 帧质量较差的图像,选取配准后的 15 幅图像,如图 5 所示,图中前 7 幅图像与后 8 幅图像的背景亮度相差较大,这是由于前 7 幅图像选通成像过程中只有目标存在,在后 8 幅图像中由于目标背后的其他物体反射的光也是选通成像造成的,在以下讨论中只涉及目标本身的灰度值,忽略背景亮度变化。另外在文中的切片成像过程中,目标图像同一点的理想灰度值曲线应该是高斯曲线,但是由于 ICCD 快门并不是严格的矩形快门,加上电路系统的其他干扰,目标图像同一点的实际灰度值曲线是一个更加接近于梯形的曲线,选取目标上的 6 个点,其灰度值变化和理想灰度值曲线如图 6 所示。下面分别采用二值化法、质心法及互相关法对图像三维重构。

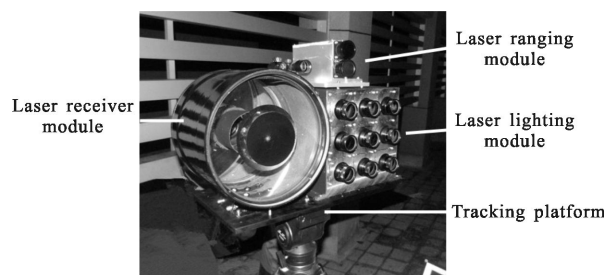


图 4 系统实物图

Fig.4 System of physical map

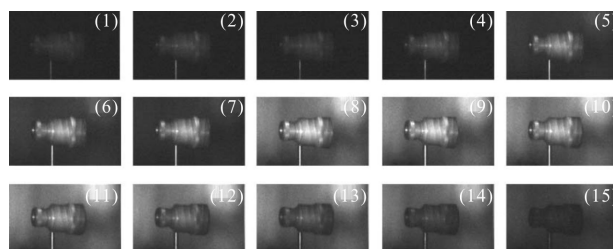


图 5 配准后切片图像

Fig.5 Slice image after registration

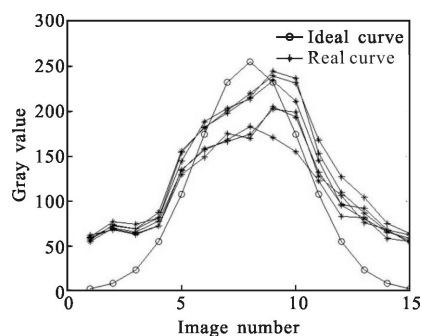


图 6 实际灰度值与理想灰度值比较

Fig.6 Real gray value compared with the ideal gray value

(1) 二值化法

二值化法中影响其三维重构的主要因素是二值化阈值,分别采用 0.2、0.3、0.4 及自适应四种不同的阈值进行三维重构,结果如图 7 所示。

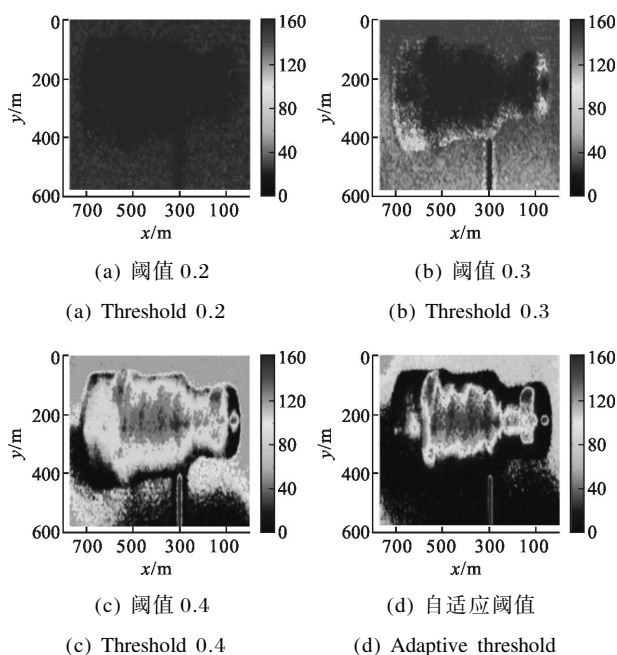


图 7 不同阈值的重构结果

Fig.7 Reconstruction results of different thresholds

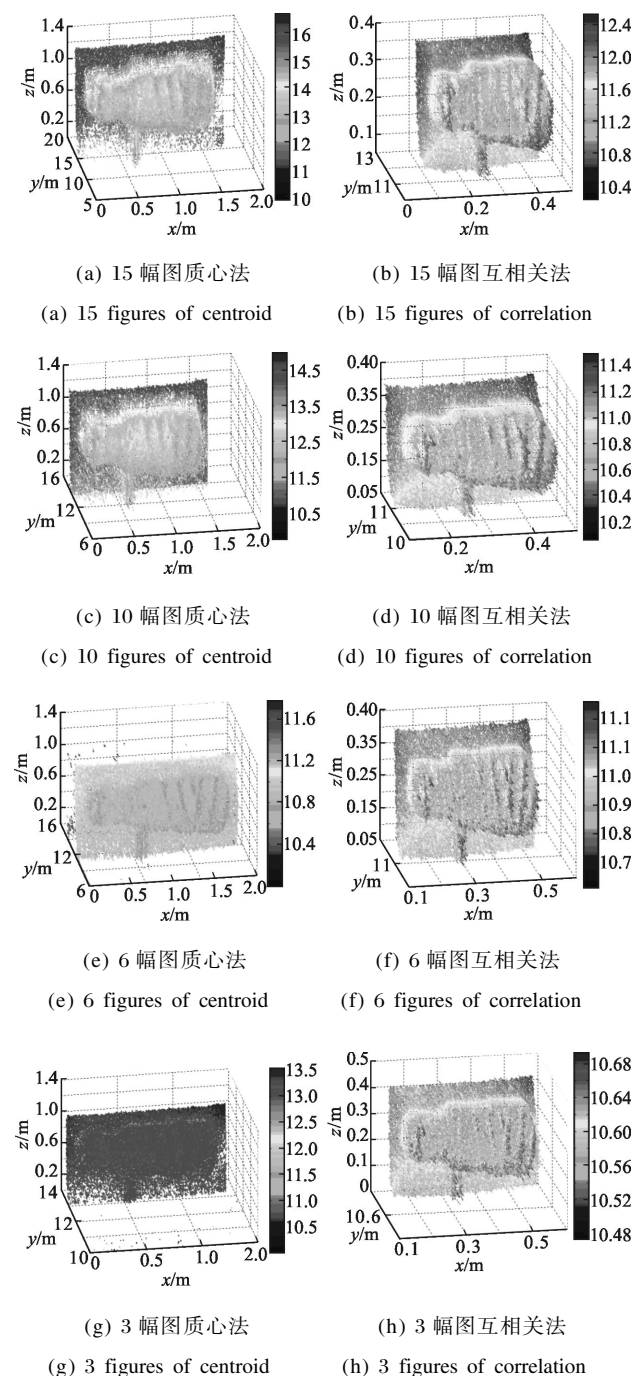
从图中可以看出,二值化法三维重构结果对阈值的选取有很大的依赖性,阈值合适与否直接关系到目标的分割提取,且三维重构的精确度也不高,虽然能够反映物体目标的空间前后位置关系,但是目标像素点之间的距离达到几十米甚至百米,与实际物体不相符。因此下面主要对比分析质心法和互相关法的三维重构效果。

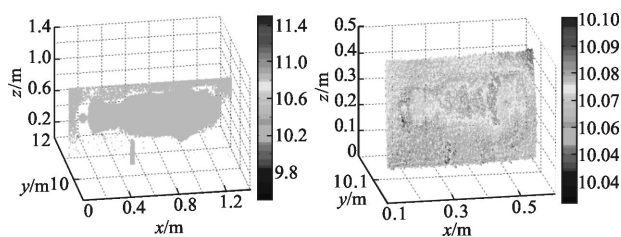
(2) 质心法与互相关法实验结果

按照质心法原理分析,采用质心法三维重构时

需要至少 3 幅切片图像,采用互相关法三维重构时需要至少 2 幅切片图像,因此实验中首先采用 15 幅图像开始重构,依次减少图像数量,即分别采用 15 幅、10 幅、6 幅、3 幅、2 幅图像重构,对比分析两种算法的精度,左边为质心法,右边为互相关法,见图 8。

从图中可以看出,总体而言,质心法与互相关法都能表示出目标的相对距离,基本与目标的相对空间位置相符,明显地,互相关法比质心法的精度更高,另外无论是质心法还是互相关法,其三维重构精





(i) 2 幅图质心法 (j) 2 幅图互相关法  
(i) 2 figures of centroid (j) 2 figures of correlation

图 8 质心法与互相关法重构效果比较

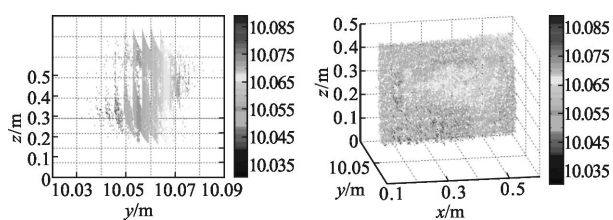
Fig.8 Comparison of the reconstruction between centroid and cross-correlation method

度随着图像数量的减少不断降低, 质心法精度降低尤其明显, 当只有 2 幅切片图像时, 质心法无法求得其三维信息, 只能表示出二维图像, 而互相关法虽能求出三维图像, 但是三维信息不明显, 像素点的三维信息由缺失, 因此下面着重分析采用互相关法利用 2 幅图像获得三维重构图像。

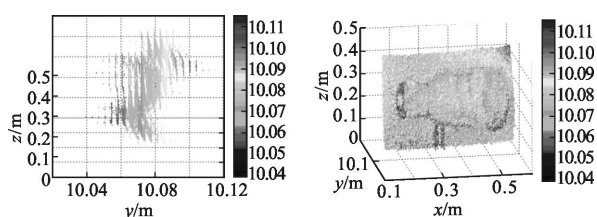
### 3.2 2 幅切片图像三维成像比较分析

采用不同间隔的 2 幅切片图像, 选通步进间隔分别为 10 ns、40 ns、70 ns、100 ns, 对应的目标图像和三维重构效果如图 9 所示。

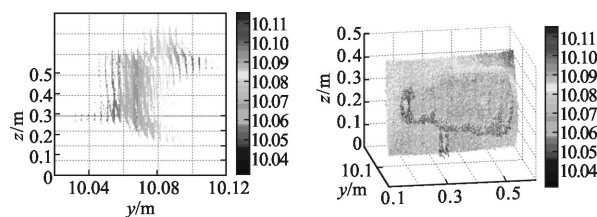
从图中可以看出, 随着选通间隔的增大, 三维重构效果越好, 这是因为在求取每个像素的延迟时间时, 选通间隔越大, 插值的密度越大, 相关峰值  $x$  的求取越精确。



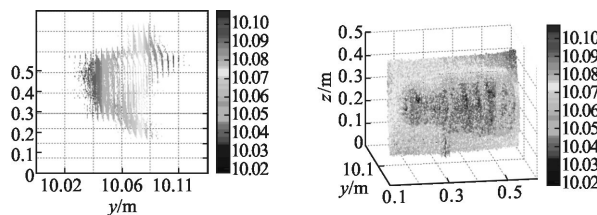
(a) 10 ns 侧视图 (b) 10 ns 三维视图  
(a) 10 ns side view (b) 10 ns three-dimensional view



(c) 40 ns 侧视图 (d) 40 ns 三维视图  
(c) 40 ns side view (d) 40 ns three-dimensional view



(e) 70 ns 侧视图 (f) 70 ns 三维视图  
(e) 70 ns side view (f) 70 ns three-dimensional view



(g) 100 ns 侧视图 (h) 100 ns 三维视图  
(g) 100 ns side view (h) 100 ns three-dimensional view

图 9 2 幅图像不同步进重构效果比较

Fig.9 Comparison of the reconstruction two images of different stepping

## 4 结论

距离选通成像可以获得目标的切片图像, 进而获得目标的三维重构图像, 而对于运动目标而言, 切片图像中目标存在空间移动, 因此必须配准图像, 另外对于距离选通三维成像而言, 所用到的切片图像越少, 捕获运动目标、重构三维图像的难度越小。文中采用像质评价的方法从一系列切片图像中挑选出适合的基准图像, 而后采用互相关算法配准图像, 进一步对比分析了二值化法、质心法和互相关算法在三维重构中的效果, 实验表明, 二值化法可以表述目标基本的空间位置关系, 但是精度较差, 且对二值化阈值的依赖性很高; 质心法在切片数量较多的情况下, 可以保证三维重构精度, 但是随着切片图像数量的降低, 精度不断下降, 最少采用 3 幅图像获得了三维重构图; 互相关算法的精度也随着切片图像数量的减少而降低, 但是精度依然高于质心法, 并且最少通过 2 幅图像获得了三维图像, 进一步对不同选通步进间隔的 2 幅图像对比发现, 选通步进间隔越大, 重构效果越好。

### 参考文献:

[1] Li Dong, Yang Huajun, Zheng Qiuzhen, et al. Application



- of range-gated technology in the three-dimensional imaging laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 85–88. (in Chinese)
- 李东, 杨华军, 郑秋贞, 等. 距离选通技术在三维成像激光雷达中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 85–88.
- [2] Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1117–1123. (in Chinese)
- 李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1117–1123.
- [3] Jiang Yanbing. Array imaging three dimensional lidar [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 6–15. (in Chinese)
- 姜燕冰. 面阵成像三维激光雷达 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 6–15.
- [4] Sun Jianfeng, Gao Jian, Wei Jingsong, et al. Research development of under-water detection imaging based on streak tube imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 811–814. (in Chinese)
- 孙剑峰, 郜健, 魏靖松, 等. 条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 811–814.
- [5] Liu Yan. Experimental study based on the range-gated laser imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 20–31. (in Chinese)
- 刘妍. 基于距离选通激光成像的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 20–31.
- [6] Wang Rui. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR [J]. *Chinese Optics*, 2015 (6): 951–956. (in Chinese)
- 王锐. 激光距离选通成像门宽对图像信噪比影响[J]. 中国光学, 2015(6): 951–956.
- [7] Fan Youchen, Li Yingchun, Sun Huayan, et al. Comprehensive assessment of image performance of laser active imaging system by the meanings of Choquet fuzzy integral [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1059–1062. (in Chinese)
- 范有臣, 李迎春, 孙华燕, 等. 基于 Choquet 模糊积分的激光主动成像性能综合评价 [J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1059–1062.
- [8] Zang Li, Wang Jingdong. Infrared and visible light image fast registration based on mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 164–168. (in Chinese)
- 臧丽, 王敬东. 基于互信息的红外与可见光图像快速配准 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 164–168.
- [9] Yu Xianchuan, Lv Zhonghua, Hu Dan. Review of remote sensing image registration techniques [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2960–2972. (in Chinese)
- 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): 2960–2972.
- [10] Guo Huichao, Sun Huayan, Du Lin. Range information calculation method for 3D imaging based on serial images by time-slice technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3258–3262. (in Chinese)
- 郭惠超, 孙华燕, 都琳. 利用时间切片序列图像的三维成像距离信息计算方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3258–3262.
- [11] Yuan Pusheng. Experimental research of range-gated array detect 3D imaging laser radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 30–50. (in Chinese)
- 原蒲升. 距离选通阵列探测 3D 成像激光雷达的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 30–50.
- [12] Wang Zehao. Research on 3D reconstruction for range-gated laser imaging system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 35–45. (in Chinese)
- 王泽皓. 距离选通激光成像系统三维重构方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 35–45.
- [13] Andersson Pierre. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 034301.
- [14] Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 197–202. (in Chinese)
- 刘振, 李声, 冯常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取 [J]. 中国激光, 2013, 40(5): 197–202.