

## 激光主动成像结合距离选通技术的零时信号测量方法

范有臣, 赵洪利, 孙华燕, 郭惠超, 赵延仲

(解放军装备学院, 北京 101416)

**摘要:** 针对火箭起飞过程中零时信号难以准确测量问题, 提出了激光主动成像与距离选通技术相结合的测量方式, 并通过求取光流的变化进而求取位移移动量获得火箭起飞的零时信号。对现有的零时信号测量方式进行了分析, 确定了基于距离选通的 ICCD 成像方式, 结合目标垂直上升的特性, 提出目标轮廓与 HS 光流结合的抗光照干扰算法。实验结果表明: 在模拟目标匀速上升过程中, 在光照变化不大情况下, 单独的边缘检测及单独的 HS 光流检测算法均能检测出目标的上升趋势; 在光照变化剧烈情况下, 边缘检测及 HS 光流检测算法均出现严重的误差, 目标轮廓与 HS 光流结合算法排除了目标内部的干扰, 得到的目标像素点位移量与真实的上升量基本一致, 误差在亚像素量级, 若图像帧频为 25 fps, 则时间精度为 80 ms, 完全符合零时信号提取的要求。

**关键词:** 零时信号; 激光主动成像; 距离选通; 光流

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0306004

## Zero signal measurement method based on laser active imaging combined with laser range-gated technology

Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, Guo Huichao, Zhao Yanzhong

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To accurately measure the zero signal of rockets during takeoff, a measurement method was put forward herein combining laser active imaging and range-gated technology, under which the zero signal was obtained by calculating the change in optical flow and then the amount of displacement. Existing zero signal measurement methods were analyzed to determine the range-gated ICCD imaging method, and combined with the feature of the target rising vertically, an anti-light interference algorithm was proposed combining the target contour and HS optical flow. Results show that as the simulated target is rising in uniform velocity, when the light changes little, either edge detection or HS optical flow detection algorithm could detect the upward trend of the target independently; when the light changes drastically, both edge detection and HS optical flow detection algorithm show serious errors, while edge detection combined with HS optical flow algorithm eliminates the interference inside the target, and the target pixel displacement amount obtained is basically consistent with the real ascending amount with the

收稿日期: 2015-07-06; 修订日期: 2015-08-16

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向的科研。Email: 465377900@qq.com

error in sub-pixel. If the image frame frequency is 25 fps, the time accuracy is 80 ms, which is in full compliance with the requirements of zero signal extraction.

**Key words:** zero signal; laser active imaging; range-gated technology; optical flow

## 0 引言

零时信号是火箭发射初始阶段要测量的重要参量,也称火箭起飞信号或弹动时刻,零时信号准确与否将直接影响测控基准信号的准确性和火箭弹道基准时间的判定<sup>[1]</sup>。目前有5种应用于靶场的零时信号起飞技术检测方法:(1)在火箭发射台底部安装熔丝,借助起飞火焰的高温将熔丝烧断,同时给出起飞零时信号;(2)箭体顶部安放触发障碍物,当火箭上升时与该物接触给出零时信号;(3)箭体底部接入红外传感器,红外传感器感知箭体喷火引起的温度变化数据,当温度达到预设阈值时发送零时信号;(4)下方放置光电转换探测器,探测起飞喷火时的火光,火光强度达到阈值时给出零时信号;(5)加装激光探测器,发射经过调制的光束照射火箭箭体,当起飞到一定距离后,探测器则无法感应反射光,该时刻即为零时信号<sup>[2]</sup>。

上述前两种检测手段响应时间为秒级,这给检测数据的网上交换、数据处理和火箭飞行情况预报带来很大时间上的误差;第二种手段采用接触式测量,测量过程中的碰撞有可能导致火箭顶端电子元器件受到一定程度的影响,并且需要提前放置,不够灵活。另外,火箭起飞时只有到达一定的推力时箭体方能离开发射塔,这就造成采用熔丝熔断和传感器检测发出零时信号时,箭体实际并未产生位移,从而上述(1)、(3)、(4)种方法出现误判的可能性较大。第五种方法检测器件存在放置方式不够灵活,架高困难等问题。靶场急需一种灵活方便、易于操作、实时性高的方法。

文中采用基于距离选通的激光主动成像方式,可直接安装在靶场原有测量设备上,不需要单独设立观测点,在对弹体成像的同时给出零时信号。采用脉冲激光与 ICCD 同步成像的方式在距离目标 1~2 km 处对弹体直接成像,可实现全天时成像。另外,该成像方式集火箭起飞零时信号测量以及起飞后的弹体跟踪于一体,可以有力配合靶场现有测量设备实现

目标的全方位跟踪测量。文中首先分析了获取目标图像的3种方式,对比分析了距离选通激光主动成像的优势,然后采用边缘检测结合 HS 光流算法提取目标移动量。

## 1 获取目标图像的3种方式

目前,针对零时信号测量还未有采用激光主动成像的方式,针对火箭的飞行测量,靶场主要设备是高帧频可见光相机<sup>[3]</sup>。但是可见光相机只能在白天成像测量,夜间成像需要采用激光照明的方式,因此,获取目标的方式可以分为3种:(1)高帧频可见光成像;(2)激光照明的高帧频可见光成像;(3)基于距离选通的 ICCD 成像。另外,由于火箭起飞时刻时常会受到烟雾的干扰,因此对火箭这种刚体目标的摆动,可以采用只测量目标顶端的方式,避免烟雾影响。

### 1.1 高帧频可见光成像

标准电视制式工作的固体图像传感器帧频为 25 fps<sup>[4]</sup>,目前高帧频摄像系统<sup>[5]</sup>最高帧频可达到几万甚至几百万帧每秒。高帧频数字摄像机具有很高的时间分辨率,可以很好地体现实验中待检测的高速运动目标的细节特征,高帧频摄像机获得序列目标运动图像后,对目标图像应用相关算法运算,得到实际箭体的运动参数。但是随着帧频的不断提高,曝光时间不断缩短,图像亮度不断降低,尤其在夜间发射的情况下,目标亮度将更加降低<sup>[6]</sup>,图像质量将进一步下降,难以求出正确的位移量。

### 1.2 激光照明的高帧频可见光成像

由上节分析可知,在夜间高帧频可见光成像时,目标图像存在亮度不够的情况,必须采用补光的方式,在高帧频情况下,普通光照补光作用基本不大,必须采用激光的方式,将光束覆盖目标或目标的某一部分。同时若激光发射端与成像端架设在同一设备上或距离较近,将会引起严重的后向散射,可行的解决方法是分立安放发射端和接收端,将激光发射端安放在一个测量点,成像端放在另一个测量点,如图1所示。

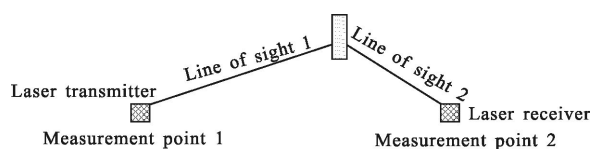


图1 激光发射端与接收端分立放置

Fig.1 Laser transmitter and receiver placed division

分立放置的方法虽能有效地避免后向散射,但是在火箭起飞初始时刻对火箭弹体成像测量零时时刻时,需要两个测量点才可以完成任务,在实际应用中可行性较低。

### 1.3 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>[7-8]</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>[9-10]</sup>,其基本原理是: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。这种工作模式只接收目标反射回来的激光,对于目标以外的反射光具有物理屏蔽的作用,很好的屏蔽了后向散射。

对比前两种成像方案,基于距离选通的 ICCD 成像方案有3个优势:(1)既可以高帧频成像,探测器的高增益又可以提高目标成像亮度。现有 ICCD 帧频可以达到2000帧/s,灵敏度达到 $10^{-6}$  lx以下。(2)成像体制既可以有效避免后向散射的影响,又可以将激光器与成像单元集成放在同一测量点,更有利于工程化实现。(3)不仅可以对零时时刻测量,还能在火箭脱离发射架后继续跟踪火箭弹体,完成整个垂直发射阶段的跟踪。

为模拟火箭起飞初始时刻,设计了小型化室内系统如图2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

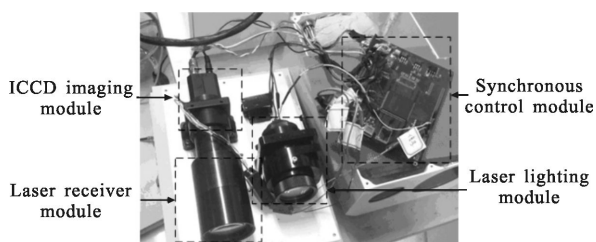


图2 系统实物图

Fig.2 Physical map system

像模块及计算机<sup>[11]</sup>。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。

## 2 基于目标轮廓的 HS 光流算法

光流算法是一种研究图像灰度随时间以及实体运动关系的算法,能够提取出目标成像面上像素运动的瞬时速度,可以在亚像素级别精确提取目标位移,文中将光流法应用于目标的运动位移提取,并基于火箭的垂直上升的运动特征,针对发射初期火箭火焰引起的光照变化,尤其是夜间发射情况,提出了一种目标轮廓与 HS 光流结合的抗光照干扰算法。

### 2.1 光流约束方程

因为光流是由图像表面亮度模式化运动所形成的,从而绝大部分的光流计算方法都是源于亮度常数模型,即借助图像表面亮度不随时间变化的对应关系得到物体运动参数<sup>[12]</sup>。亮度常数模型的数学表达式为:

$$I(x+u, y+v, t+\Delta t)=I(x, y, t) \quad (1)$$

式中: $I(x, y, t)$ 表征图像序列; $(x, y)$ 及 $t$ 则为空间位置和时间参量; $\Delta t$ 表述连续图像间的时间间隔量。 $(u, v)$ 则为时刻 $t$ 下的空间位置像素点 $(x, y)$ 在单位时间间隔内的位移,一般只需计入单位时间为1的离散状况。公式(1)的矢量形式为:

$$I(x+v, t+1)=I(x, t) \quad (2)$$

式中: $x=(x, y)$ 表示空间位置; $v=(u, v)$ 表述单位时间间隔的位移变化矢量即速度矢量。

显而易见,上式是非线性的,通常为便于求解运算对其进行线性化变换,一般做法是对 $I(x+v, t+1)$ 实施一阶泰勒级数展开,即:

$$\nabla I(x, t)v^T + I_t(x, t) + \varepsilon = 0 \quad (3)$$

式中: $\nabla=[\partial_x, \partial_y]$ , $\varepsilon$ 表示高阶泰勒展开函数项,通常情况下忽略高阶项计算,即:

$$\nabla I(x, t)v^T + I_t(x, t) = 0 \quad (4)$$

容易看出公式(4)是对公式(3)进行高阶忽略的一种线性近似,从而在进行处理光流时会引入一定的误差,这种误差被定义为模型误差。

现阶段应用的光流计算方法大致可以分为四类<sup>[13-14]</sup>:正则化方法、局部邻域方法、区域匹配方法以及相位法。

对于拍摄的第 1 帧和第 100 帧激光图像, 图像原始大小为  $640 \times 480$ , 选取  $200 \times 200$  的区域放大显示, 各算法结果如图 3 所示。

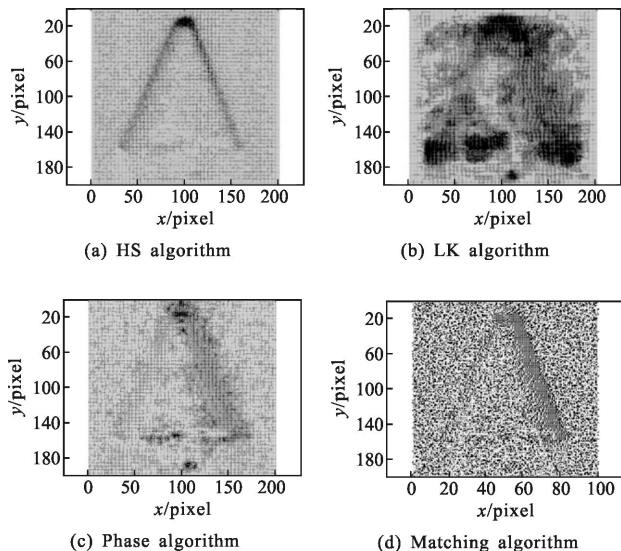


图 3 各算法结果

Fig.3 Results of various algorithms

由于目标是垂直上升的, 且背景没有其他运动目标干扰, 从上图可以看出, LK、相位及匹配的算法中背景干扰严重, 在没有位移移动的区域产生了大量错误光流值, HS 算法受到的背景干扰最小, 最能代表目标的实际移动轨迹, 因此选用 HS 算法作为光流计算的基本方法。

## 2.2 目标轮廓与 HS 光流结合的抗光照干扰算法

在目标上升过程中, 因为火箭火焰的影响, 尤其是夜间发射时, 发射火焰会造成光照变化, 此时, 由于亮度的变化, 不仅仅有目标光流的变化, 还有背景光流的变化。

另一方面, 由于火箭上升路线固定, 在发射初期只可能是垂直上升, 因此根据火箭的垂直上升特性与光流计算相结合, 提出了一种目标轮廓与 HS 光流结合的抗光照干扰算法, 首先, 提取目标顶端的轮廓, 将轮廓的最上端边缘进行细化, 并采用形态学算法, 使边缘上端膨胀 10 个像素, 然后采用 HS 算法求取目标的光流值, 最后将求取的光流图像与边缘膨胀图像进行逻辑与运算, 只求取边缘上方的光流值, 屏蔽其他光流值的影响。因为在判断零时刻, 在目标移动了 3~5 个像素之内就要给出零时信号, 因此选取边缘上方 10 个像素的区域对零时刻判

定没有影响。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 光照条件不变时算法效果分析

图 4 分别为第 1 帧和第 100 帧图像, 目标上升过程中图像的光照条件基本未变, 其亮度也基本一致, 100 幅图像的亮度均值如图 5 所示。

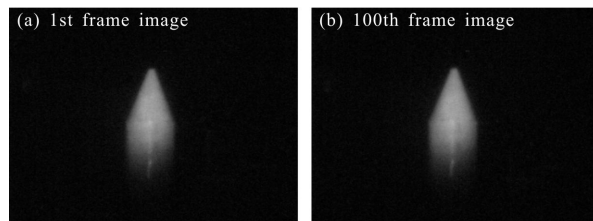


图 4 图像的光照条件不变的图像

Fig.4 Invariant illumination conditions images

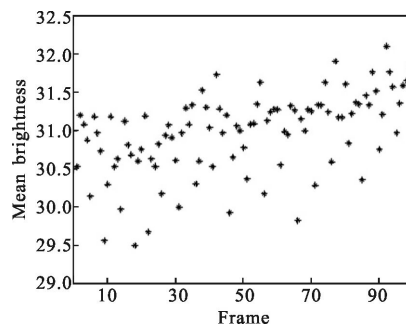


图 5 图像的亮度均值

Fig.5 Mean brightness of the image

图 6 分别为第 40 帧和第 100 帧图像与第 1 帧图像相减图像的二维化图像。在图像上升过程中, 从图中可以看出, 随着目标的上升, 二维化图像中的非零值逐渐增多, 表现在图像上就是白色亮点逐渐增加。

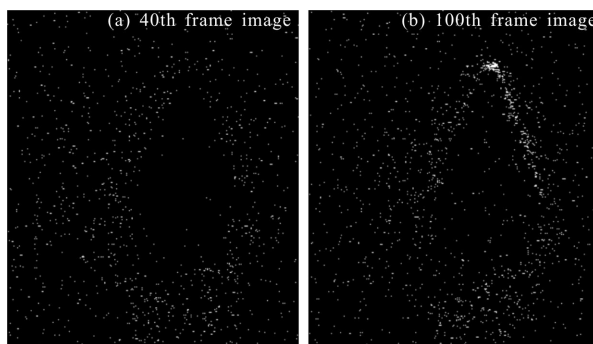


图 6 相减图像的二维化图像

Fig.6 Binary image after subtraction

将每一帧图像依次与第一帧图像相减, 统计相

减二值化图像中的非零值。从图 7 中可以看出,直接相减的二值化图像可以反映一定的上升趋势,但是误差比较大,像素值浮动范围也很大。

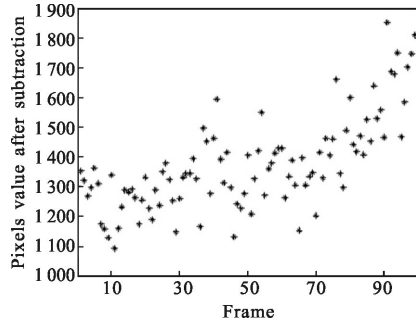


图 7 相减二值化图像中的非零值之和  
Fig.7 Sum of non-zero value of binary image

采用 HS 算法分别计算 80 帧和 100 帧图像的光流图,图 8 为目标顶部的光流放大图像。

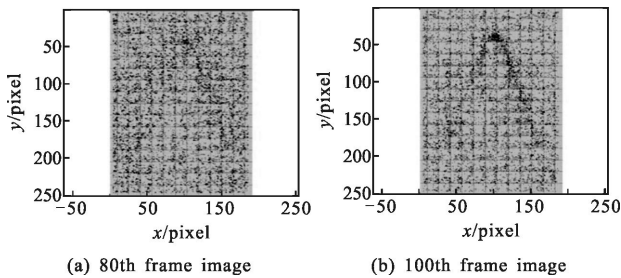


图 8 光流放大图像  
Fig.8 Optical flow image magnification

图 9 为目标移动时求取的位移移动量,图(a)为所有光流值的总和,图(b)为单个像素点的 Y 值位移。

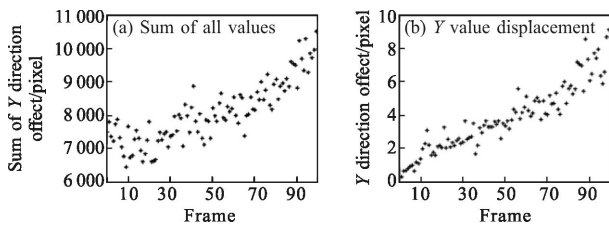


图 9 求取的位移移动量  
Fig.9 Movement of displacement

从图 9 中可以看出,随着目标的上升,光流 Y 值总和上升趋势明显,基本反映了目标的实际运动。右图求取的 Y 值移动量与真实的目标运动量也基本能一一对应。

### 3.2 光照条件变化时算法效果分析

在夜间发射时,由于夜晚光照条件差,整个背景

灰度值很低,火焰对图像亮度的影响尤其强烈,目标在上升过程中光照也随之不规则的变化,如图 10 所示,模拟目标在光照变化中向上移动了 4 个像素。

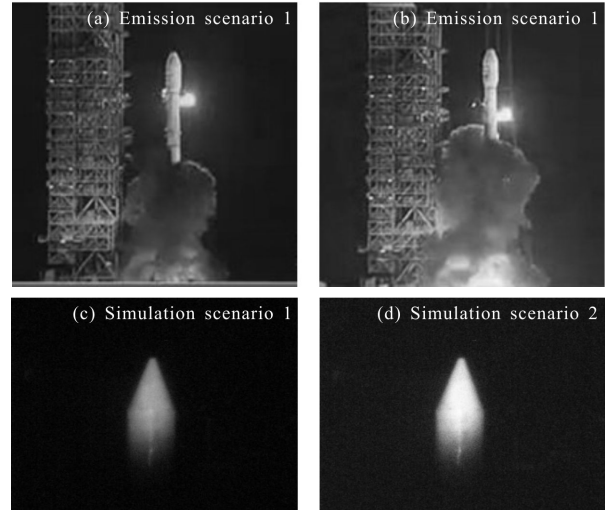


图 10 真实场景与模拟场景  
Fig.10 Real scene and simulation scene

图 11 分别为 40 帧、100 帧图像与第 1 帧图像的相减图像与相减图像的二值化图像。在图像上升过程中,从图 11 中可以看出,由于光照的影响,相减后的图像并不能体现出目标的边缘变化。

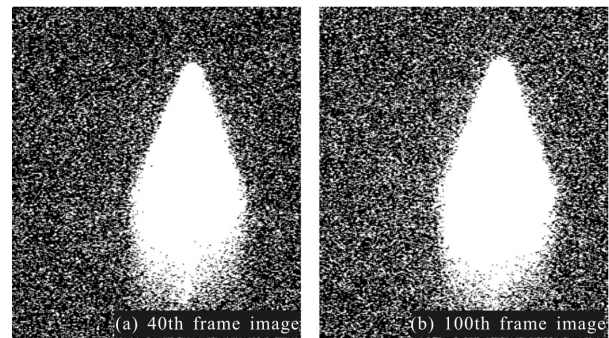


图 11 相减图像的二值化图像  
Fig.11 Binary image after subtraction

统计相减二值化图像中的非零值,如图 12 所

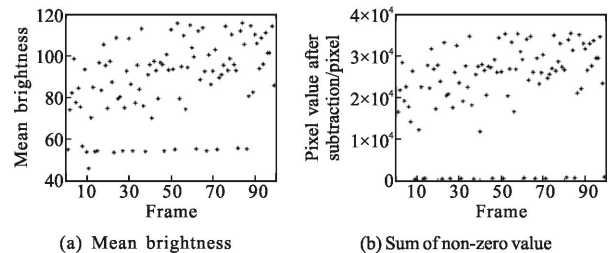


图 12 光照变化情况下的二值化图像统计  
Fig.12 Statistical binarized image under illumination changes

示,图像亮度均值波动范围很大,相减后的像素值之和也没有规律。

图 13 分别为 80 帧和 100 帧图像的目标顶部光流放大图像。从图中可以看出,由于光流的变化,不仅目标边缘发生了光流变化,目标内部也有相应的光流变化,整个图像的光流变化值如图 14 所示,此时无法从光流变化值中提取出目标的真实运动情况。

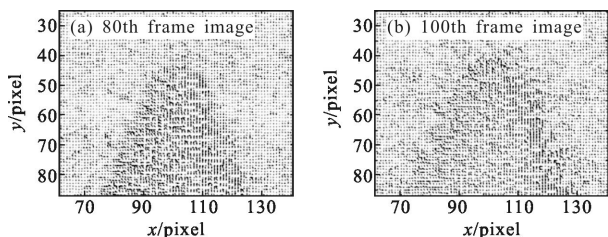


图 13 光流放大图像

Fig.13 Optical flow image magnification

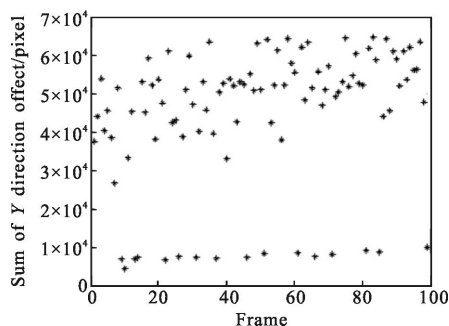


图 14 所有光流值的总和

Fig.14 Sum of all values of optical flow

由于光照变化的影响,导致光流检测的偏移量与目标实际运动不符合,其主要原因是由于在光照的影响下,不仅目标的边缘部分产生了偏移量,在目标内部及背景区域均有不等的偏移量,严重干扰了检测的准确性。在文中,主要讨论的是目标移动的最初始的时刻,且目标的移动方向非常固定,只有向上的移动分量,没有其他方向的移动分量。另外,目标的初始位置是已知的,可以通过初始位置确定目标的基本轮廓,并以此基本轮廓向上延伸若干像素,得到一个扩展的轮廓,只统计此轮廓内的光流变化,从而避免了目标内部及背景的干扰。图 15(a)所示为目标轮廓的边缘检测结果,图(b)为膨胀运算的结果,结构元素  $se=[1;1;1;1;1;1;1;0;0;0;0;0;0]'$ ,图(c)所示为扩展轮廓与光流检测结果的叠加显示,图(d)为目标顶部的细节放大图,只有在扩展轮廓覆盖的部

分才能作为有效地光流偏移值。

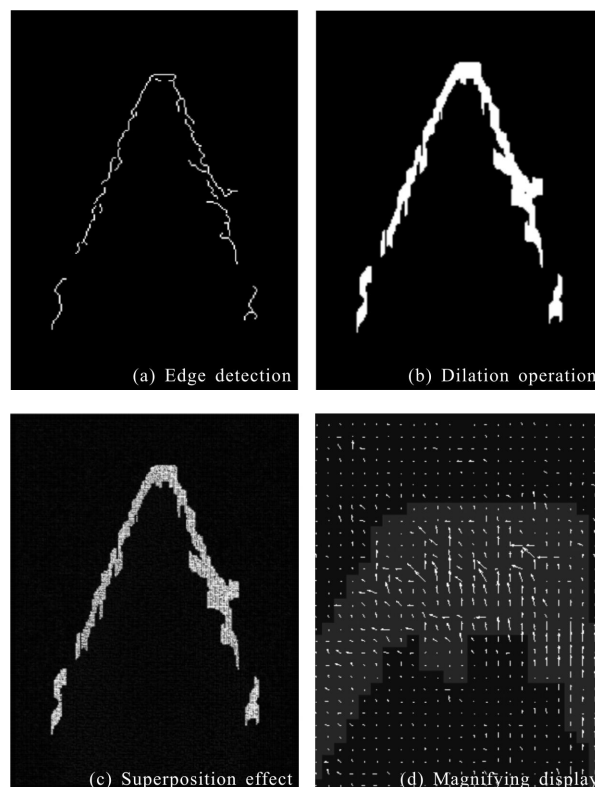


图 15 处理流程

Fig.15 Whole algorithm processing

图 16 为目标移动时求取的位移移动量,图(a)为所有光流值的总和,图(b)为单个像素点的 Y 值位移。

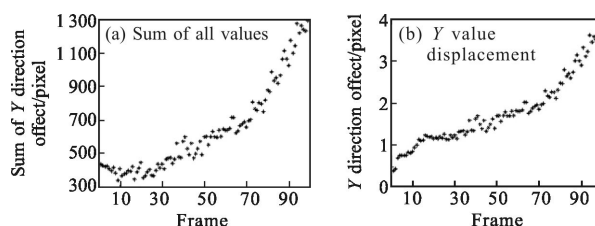


图 16 求取的位移移动量

Fig.16 Movement of displacement

从图 16 中可以看出,Y 值之和有明显的上升趋势,且相比于前图,分布更加合理,离群点明显减少。右图中的 Y 值位移偏差在亚像素级别,与目标移动值一一对应,求取结果与实际运动轨迹基本相符,假设当目标移动值超过 2 个像素时给出零时信号,则此时对应于第 63 帧图像。为较少误判,规定连续 3 帧图像目标移动值超过阈值才给出零时信号,若图像帧频为 25 fps,则时间精度为 3 帧图像的间隔 80 ms。

## 4 结 论

文中采用距离选通技术获得了模拟目标的激光图像,进而采用了目标轮廓与HS光流结合的抗光照干扰算法提取边缘位置的光流变化,进而求出每个像素点的位移量,为零时时刻判定提供了重要参考依据。研究表明;对于白天发射即光照变化不大的场景,边缘检测可以求出目标的上升趋势,但是无法给出每个像素点的具体位移量,光流法中,HS算法最能代表目标的实际运动,相较于其他几种光流算法抗背景干扰最强,并且能精确的计算出像素点的位移量。但是当夜晚发射即光照变化剧烈的情况下,无论是边缘检测还是光流检测都不能精确的检测出目标的移动量,甚至也无法代表运动趋势,目标轮廓结合HS光流算法能够避免内部错误光流的干扰,只提取边缘上方的光流值,大大减少了光照变化带来的干扰,得到的像素点位移与目标实际位移轨迹基本一致。该研究对获取零时信号提出了一种新体制,结合目标垂直上升特征提出了一种零时信号检测方法,对实际运用有重要的借鉴意义,下一步将结合外场实验数据进一步优化算法。

## 参考文献:

- [1] Sun Huayan, Fan Guihua. Conventional Weapons Testing Technology [M]. Beijing: Academy Of Equipment, 2010: 6-9. (in Chinese)
- [2] Liu Chaoshan, Zhou Zhanrong, Li Yuxin, et al. Correlation detection of the zero time of missile launching [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 93-95. (in Chinese)
- [3] Wang Zhiqiang, Gao Xin, Wang Ying, et al. High-speed video system used for multi-target measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006(21): 487-491. (in Chinese)
- [4] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Optical Imaging Principles and Techniques [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 1-9. (in Chinese)
- [5] Wang Zhi Qiang, Gao Xin, Wang Ying, et al. High-speed video system used for multi-target measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 487-491. (in Chinese)
- [6] Chun Jing, Liu Bo, Wang Xiaoxue, et al. Study on optical measurement digital image enhancement during imaging at night [J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2008, 27(4): 19-23. (in Chinese)
- [7] Vincent Larochelle, Pierre Mathieu, Jean-Robert Simard. Two generations of canadian active imaging systems: albedos and elviss[C]//SPIE, 1999, 3698: 229-243.
- [8] Alan Weidemann, Georges R Fournier, Forand L, et al. In harbor underwater threat detection/ identification using active imaging[C]//SPIE, 2005, 5780: 59-70.
- [9] Zhang Fanhui. Research on the data processing method of range-gated laser imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 36-55. (in Chinese)
- [10] Cao Yinan, Wang Xinwei, Zhou Yan. Spatial positioning fuzzy C-means algorithm in segmentation of range-gated image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2682-2687. (in Chinese)
- [11] Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, et al. Moving target laser image acquisition and laser backscattering suppression algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 12(12): 1320-1324. (in Chinese)
- [12] Zhao Yuhua, Yuan Feng, Zhang Qiujia, et al. Spot center arithmetic based on morphology and optical flow equation [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(2): 213-216. (in Chinese)
- [13] Tu Dawei, Jiang Jiliang. Improved algorithm for motion image analysis based on optical flow and its application[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1159-1164. (in Chinese)
- [14] Guo Huinan, Cao Jianzhong, Zhou Zuofeng, et al. Auto-focus algorithm of digital camera based on optical flow estimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3417-3421. (in Chinese)