激光与红外融合目标检测

韩义波[1],杨新锋[2,3],滕书华[4],庄祉昀[4]

(1. 南阳理工学院 软件学院,河南 南阳 473004;
2. 武汉大学 计算机学院,湖北 武汉 430079;
3. 南阳理工学院 计算机与信息工程学院,河南 南阳 473004;
4. 国防科学技术大学 自动目标识别重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘　要:针对自动目标识别需求,提出了一种激光与红外融合目标检测方法。首先介绍了基于方向显著性的红外目标检测算法,并分析了该算法的优缺点。针对该算法的缺陷,提出了一种激光与红外融合的目标检测方法,该方法将激光雷达测得的弹目距离信息引入到基于方向显著性的红外目标检测算法中,大大提高了目标检测算法的精度。仿真实验表明文中方法解决了单源红外目标检测算法对应用场景适应性不强和鲁棒性较差的诸多问题,大大提高了目标的检测率。

关键词:激光雷达;　红外图像;　融合检测;　方向显著性
中图分类号:TP391.4　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201847.0804005

Detection of laser and infrared fusion target

Han Yibo[1], Yang Xinfeng[2,3], Teng Shuhua[4], Zhuang Zhiyun[4]

(1. School of Software, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;
2. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
3. College of Computer and Information Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;
4. Science and Technology on Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at requirement of automation target recognition, a new target detection method of laser and infrared fusion was studied. Firstly, the infrared target detection method based on direction saliency was introduced, and the advantages and disadvantages of the algorithm were analyzed. A laser and infrared fusion target detection algorithm was proposed. The distance information measured by lidar was incorporated into the infrared target detection algorithm based on directional saliency, which greatly improved the precision of the target detection algorithm. The simulation experiment shows that this method solves the problems of poor adaptability and robustness of single source infrared target detection algorithm, and greatly improves the detection rate of the target.

Key words: laser radar;　infrared image;　fusion detection;　direction saliency

收稿日期:2018-03-05;　**修订日期**:2018-04-03
基金项目:国家自然科学基金(61471371);湖南省自然科学基金(2015jj3022);河南省科技攻关项目(132102210215)
作者简介:韩义波(1977-),男,讲师,博士,主要从事物联网服务、算法设计、数据分析与挖掘等方面的研究。
Email:13307318398@163.com

0 引 言

随着战争环境的日益复杂,战争对抗愈加激烈,精确制导武器攻击时遇到的对抗层次越来越多,对抗手段越来越高明,采用单一的成像制导方式很难完成作战使命,必须发展复合成像寻的制导技术来有效提高导弹的作战效能[1-3]。

激光雷达主动成像系统通过成强度像和距离像来表征物体的几何结构特征,具有较高距离精度,并且图像的分辨率高、对比度大,但其隐蔽性较差,不能大范围扫描;而被动红外探测通过接收目标本身发射红外辐射成像,作用距离远,隐蔽性强,但是被动红外图像信噪比低、边缘模糊,无法获取精确的距离信息[4]。将激光雷达和红外主被动融合后的数据既能反应目标的热信息又能反应目标的高分辨率信息以及距离信息,为目标场景的分析提供了更加全面、更加丰富和完整的信息,有利于提高制导精度和应付各种复杂的战场环境,从而发挥全天候作战优势,这也是武器系统实现精确打击的重要发展方向。因此,开展基于激光成像雷达与红外成像的复合制导技术研究,具有重要的理论及现实意义[5-6]。

在激光红外复合制导过程中,导弹由远及近飞向感兴趣目标,在制导过程中目标相应地逐渐由小目标转变为大的面目标。由于红外作用距离远、视场大、图像分辨率高,红外图像处理贯穿从搜索、捕获直至击中目标的全过程。据此,可将融合制导过程中的红外目标检测分为两个阶段:红外小目标检测和红外面目标检测。设计鲁棒性强的红外目标检测算法,是激光红外复合制导的前提。红外目标检测算法本质上就是寻找一个能大幅提高输入红外图像信杂比的有效方法[7-8],据此可将红外目标检测算法大致分为两大类:基于滤波器的方法和基于背景预测的方法。基于滤波器的方法直接对输入红外图像进行滤波处理,从滤波后的图像中提取出目标[9-10];基于背景预测的方法,则首先预测背景图像,然后将输入图像与背景图像相减,从而提取出目标[11]。考虑到制导过程中随着导弹与目标之间距离的变化,目标在图像中由点目标逐渐变大,直到充满视场最后溢出视场,而现有的红外单源目标检测算法有的仅适合处理小目标[12],有的仅适合处理大目标(面目标),既能处理小目标又能有效处理大目标的检测算法不多。针对这一问题,文中将制导过程中激光雷达测得的距离信息引入到现有的检测算法中,提出了一种对小目标和面目标都有效的激光与红外融合目标检测算法,大大提高了目标检测算法的鲁棒性。

1 基于方向显著性的红外目标检测算法

为了提高小目标的检测精度,参考文献[7]提出了一种结合视觉注意机制的基于方向显著性的红外目标检测方法 (Directional Saliency-based Method, DSBM)[7],该算法的基本原理为:首先,基于小面模型(facet model),利用特定的二阶方向性导数滤波器(Second-order Directional Derivative, SODD)将原始的红外图像分解为不同方向上的通道图像;再利用显著性检测方法,即傅里叶变换的相位谱(Phase Spectrum of Fourier Transform, PFT),计算每个通道上的显著性图,从而提高目标相对于背景的信噪比;然后,将每个通道上的显著性图利用设定的显著性融合方法来进行融合,得到高信噪比的目标显著性图;最后,在目标显著性图中利用经验阈值提取出最终的目标。图 1 给出了基于方向显著性的红外目标检

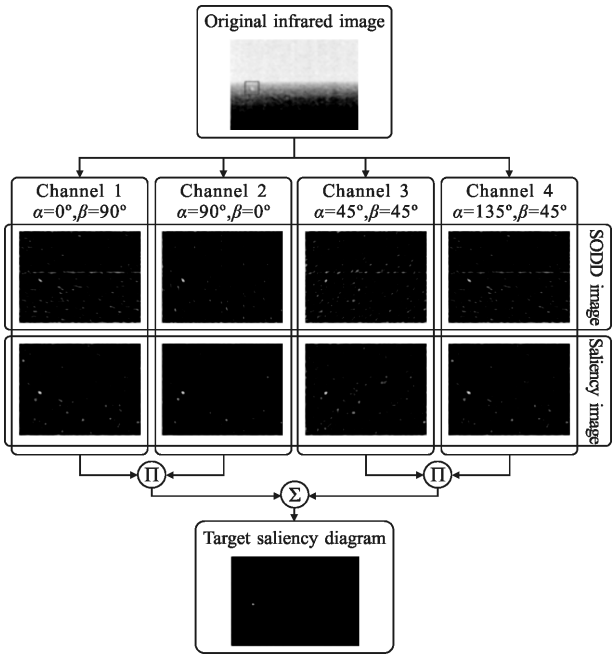


图 1 基于方向显著性的红外目标检测算法流程图

Fig.1 Flow chart of infrared target detection algorithm based on direction saliency

测算法流程图示。原始的红外图像被二阶方向性导数滤波器分解成了两个正交方向组 (共四个方向)，然后通过 PFT 方法得到方向显著性图，最后利用显著性融合方法得到了最终的目标显著性图。参考文献[7]对复杂背景下的多类红外弱小目标进行了实验，表明 DSBM 算法能够实现不同复杂背景下的目标检测，具有较高的检测率和鲁棒性。

下面针对制导过程中对地目标检测任务，分别开展定性实验和定量实验以验证 DSBM 检测算法性能。实验数据采用激光红外仿真系统(场景设定为目标由远及近的过程)得到地面典型运动目标(包括小轿车、装甲车和坦克) 的红外图像序列，接着利用 DSBM 算法进行红外目标检测，得到单源红外 DSBM 算法对小轿车、装甲车和坦克的红外仿真图像序列检测结果，如图 2~4 所示。图 2(a)~(d)分别为第 1、26、60、75 帧检测结果。图 3(a)~(d)分别为第 1、20、48、63 帧检测结果。图 4(a)~(d)分别为第 1、25、48、70 帧检测结果。从实验结果可以看出，单源红外 DSBM 算法对于小目标的检测结果比较理想，但对于目标大小变化(如图 2(d)、图 3(d)、图4(d))的目标，由于目标过大后导致目标所在区域多个位置上的显著性响应均较大，从而使得这几个位置均被检测为目标，出现较多虚警；此外，对于视场内存在多个疑似目标时(如图 2(a)所示)，目标检测也会出现较多虚警。

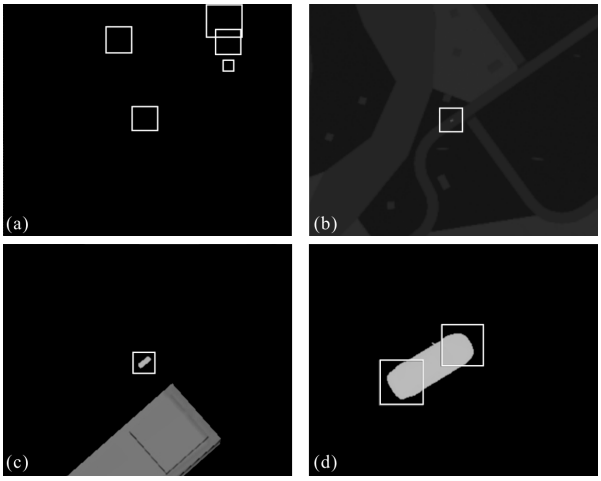


图 2 针对小轿车的 DSBM 算法检测结果

Fig.2 DSBM algorithm detection results for cars

为进一步评估 DSBM 算法的目标检测性能，第二组实验采用三类典型地面运动目标的红外仿真图像序列对 DSBM 算法性能进行定量评估，定量评估的指标包括算法在各类目标红外仿真图像序列下的检测率、虚警率以及漏检率。设某类目标的红外仿真图像序列中的图像总帧数为 N，且假设每帧图像中仅有一个目标，则所有图像序列中出现的真实目标总个数也应为 N，然后逐帧统计所有图像序列中检测出来的真实目标个数 N_{real}，虚假目标个数 N_{false}，漏检帧数 N_{miss}，则检测率为 $P_d=N_{real}/N$，虚警率为 $P_f=N_{false}/N$，漏检率为 $P_m=N_{miss}/N$。表 1 给出了 DSBM 算法对上述各类目标的红外仿真图像序列的检测结果，其中 T 表示平均每帧检测所用的时间。

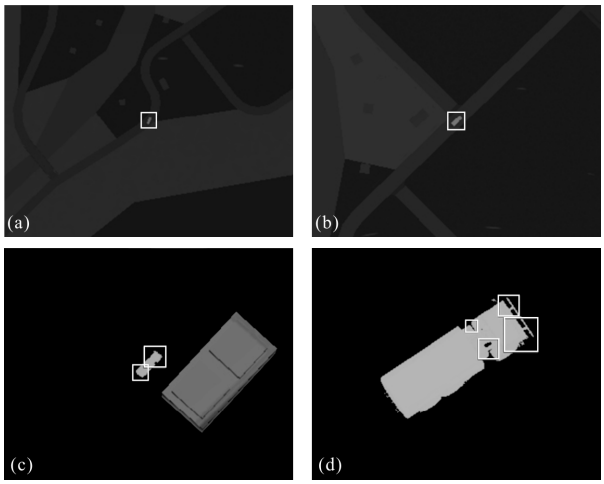


图 3 针对装甲车的 DSBM 算法检测结果

Fig.3 Detection results of DSBM algorithm for armored vehicles

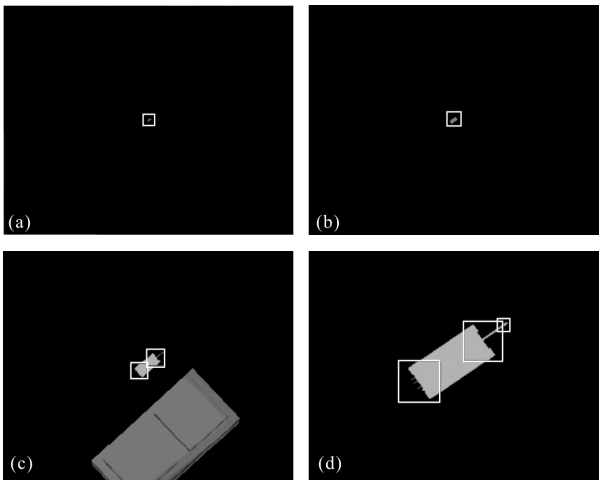


图 4 针对坦克的 DSBM 算法检测结果

Fig.4 Detection results of DSBM algorithm for tanks

由表 1 的实验结果可知，基于DSBM 的红外目标检测算法对三类地面运动目标的检测结果中，装

甲车的检测率最高,为 92.31%,坦克的检测率最低,但也达到了 91.67%;对于虚警概率,小轿车的虚警概率最高,为 16.89%;对三类目标的漏检率相对较低,均在 8%左右。DSBM 算法虚警率较高的原因在于,当导弹从远处飞向目标时,导弹与目标之间的距离(弹目距离)不断减小,红外图像目标不断变大,逐渐从点目标扩展为面目标,在变成较大的面目标后,DSBM 的检测结果往往在一个目标上会输出多个检测结果(如图 2(d)、3(d)和 4(d)),因此导致了虚警率的上升,影响了 DSBM 算法的整体性能。由表 1 亦可知,DSBM 算法的复杂度较低,平均每帧图像上消耗的目标检测时间在 45 ms 左右,能够实现对红外图像目标的近实时检测。

表 1 DSBM 算法针对各类地面运动目标的检测结果

Tab.1 Detection results of DSBM algorithm for all kinds of ground moving target

Target category	N	N_{real}	N_{false}	N_{miss}	P_d	P_f	P_m	T/ms
Car	77	71	13	8	0.922 1	0.168 9	0.077 9	43.2
Armored vehicle	65	60	10	6	0.923 1	0.153 9	0.076 9	44.8
Tank	72	66	11	8	0.916 7	0.152 7	0.083 3	45.1

从以上两组实验可知,基于 DSBM 的单源红外目标检测算法对于红外小目标,检测精度高,算法速度快;当目标变为大的面目标时,检测率比较低,虚警率和漏检率都较高。

2 激光与红外融合目标检测

第 1 节给出的单源红外目标检测算法,虽然针对小目标的检测精度较高,但其应用范围具有一定的局限性,特别是当目标大小变化以及视场内存在多个疑似目标时,DSBM 算法会出现较多虚警,导致检测精度下降,直接影响制导后续的跟踪识别结果。考虑到激光雷达可以获得丰富的目标三维结构信息以及准确的弹目距离,与红外所提供的信息具有良好的互补性,因此可以利用这两种异源信息来提高目标检测的性能。据此,此节在 DSBM 算法基础上,提出一种激光与红外融合的目标检测算法,算法框图如图 5 所示。

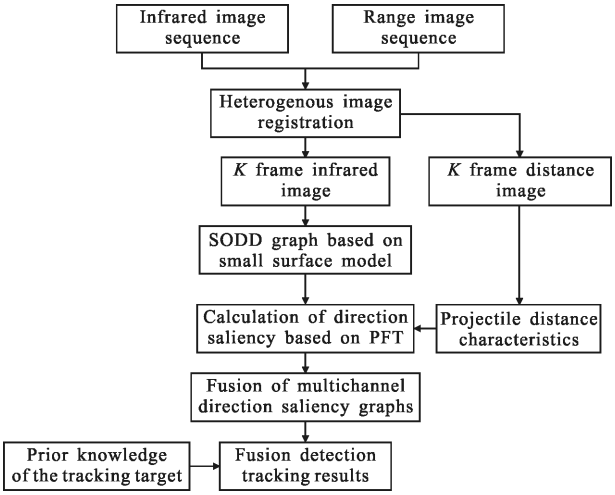


图 5 激光与红外融合检测流程图

Fig.5 Flow chart of laser and infrared fusion detection

首先将激光距离像与红外图像配准;对配准后的图像,提取红外单源传感器中所检测到的目标,然后根据激光传感器得到的导弹与目标之间的距离,实时确定红外图像中每个像素所代表的实际尺寸,最后根据检测所需的目标先验知识,如地面运动目标小轿车、装甲车、坦克的实际尺寸大小,过滤掉虚警目标,并实时地更新红外单源检测结果中检测框的大小,实现高精度的激光与红外融合目标检测。

2.1 激光距离图像与红外图像配准

假设激光与红外成像导引头为共光路设计,则激光雷达距离图像与红外图像之间只存在平移变换和尺度变换,对两幅图像进行平移和尺度变换即可完成两幅异源图像之间的配准。配准过程为:

(1) 计算红外图像和激光雷达距离图像的中心坐标;(2) 将激光雷达距离图像的中心平移至红外图像的中心;(3) 计算距离图像与红外图像之间的尺度变换因子并实现距离图像的尺度变换;(4) 实现激光距离图像与红外图像之间的异源数据融合配准。

其中,激光距离图像与红外图像之间的尺度变化因子的计算过程如下:设激光成像雷达所测得的弹目距离为 d,红外成像的视场角为 $\alpha_X\times\alpha_Y$,其中 α_X 为 X 方向上的视场角,α_Y 为 Y 方向上的视场角。设红外图像的大小为 $W_{IR}\times H_{IR}$,其中 W_{IR} 为图像宽度,H_{IR} 为图像高度,则红外图像的距离分辨率为:

$$\text{IR_pix_}X=\frac{d\times\sin(\alpha_X/2)\times 2}{W_{IR}}$$

$$\text{IR_pix_}Y=\frac{d\times\sin(\alpha_Y/2)\times 2}{H_{IR}}$$

设激光成像的视场角为 $\beta_X\times\beta_Y$，其中 β_X 为 X 方向上的视场角，β_Y 为 Y 方向上的视场角。设激光距离图像的大小为 $W_{\text{Lidar}}\times H_{\text{Lidar}}$，其中 W_{Lidar} 为图像宽度，H_{Lidar} 为图像高度，则激光雷达距离图像的距离分辨率为：

$$\text{Lidar_pix_}X=\frac{d\times\sin(\beta_X/2)\times 2}{W_{\text{Lidar}}}$$

$$\text{Lidar_pix_}Y=\frac{d\times\sin(\beta_Y/2)\times 2}{H_{\text{Lidar}}}$$

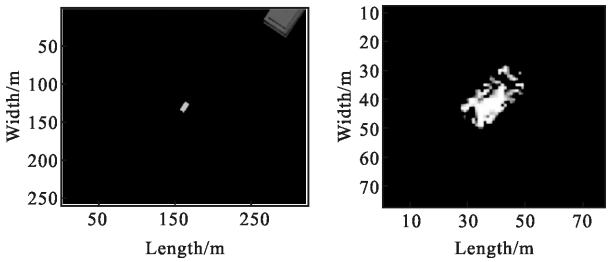
则红外相对于激光距离图像的尺度变换因子可由下式得到：

$$\text{Scale_}X=\frac{\text{IR_pix_}X}{\text{Lidar_pix_}X}=\frac{\dfrac{d\times\sin(\alpha_X/2)\times 2}{W_{\text{IR}}}}{\dfrac{d\times\sin(\beta_X/2)\times 2}{W_{\text{Lidar}}}}=\frac{W_{\text{Lidar}}\times\sin(\alpha_X/2)}{W_{\text{IR}}\times\sin(\beta_X/2)}$$

$$\text{Scale_}Y=\frac{\text{IR_pix_}Y}{\text{Lidar_pix_}Y}=\frac{\dfrac{d\times\sin(\alpha_Y/2)\times 2}{H_{\text{IR}}}}{\dfrac{d\times\sin(\beta_Y/2)\times 2}{H_{\text{Lidar}}}}=\frac{H_{\text{Lidar}}\times\sin(\alpha_Y/2)}{H_{\text{IR}}\times\sin(\beta_Y/2)}$$

因此，要实现激光雷达图像和红外图像的配准，首先需将激光距离图像中心平移至红外图像中心，进而将激光雷达距离图像的 X 和 Y 坐标分别乘以尺度变换因子 Scale_X 与 Scale_Y 即可。

图 6 给出了待配准的两幅红外图像和激光雷达距离图像。由图 6 可知，由于激光雷达和红外传感器在视场角和图像分辨率等方面的差异，导致目标在两幅图像上的大小有较大的差异。图 7(a)给出了配准前两幅图像叠加显示的效果，图 7(b)给出了采用文中算法配准后得到的效果，可见文中方法能较好地实现距离图像与红外图像之间的融合配准。

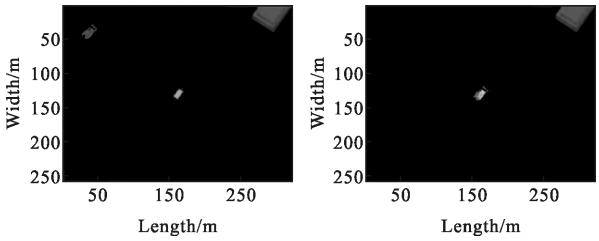


(a) 红外图像 (b) 激光雷达距离图像

(a) Infrared image (b) Range image of laser radar

图 6 待配准的红外图像与激光雷达距离图像

Fig.6 Distance image of lidar and infrared image to be registered



(a) 配准前 (b) 配准后

(a) Pre-registration (b) Post registration

图 7 配准前后的红外图像与激光雷达距离图像

Fig.7 Distance image between infrared image and lidar before and after registration

2.2 激光与红外融合目标检测

图 8 给出了激光与红外融合原理示意图。与第 2.1节相同，设弹目距离为 d，红外成像的视场角为 $\alpha_X\times\alpha_Y$，红外图像的大小为 $W_{\text{IR}}\times H_{\text{IR}}$，$W$ 和 L 分别为红外图像所能容纳的地面尺寸的宽度和长度。按照摄影测量学的相关理论可知，此时若已知视场角和弹目距离，在弹目距离较远时，最大成像尺寸可通过下式近似计算得到：

$$W=2d\times\sin(\alpha_X/2)$$

$$L=2d\times\sin(\alpha_Y/2)$$

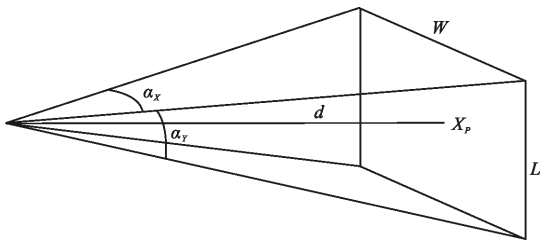


图 8 激光与红外融合检测原理示意图

Fig.8 Diagram of the principle of laser and infrared fusion detection

假设已知红外图像的尺寸(长×宽) 为 $I_{\text{IR}}=M\times N$，则由上式可求得红外图像中每一像素代表的尺寸大小为：$S_{\text{pix}}=\dfrac{\text{Width}\times\text{Height}}{M\times N}$ (m^2/pixel)。假设所需检测目标的实际尺寸(长×宽)为 $S_{\text{Real}}=m\times n$，可推导出目标在红外图像中的大小应该为：$S_{\text{IR}}=\dfrac{M\times m}{L}\times\dfrac{N\times n}{W}$。将 S_{IR} 作为 2D 高斯滤波器的方差，则可实时地更改检测跟踪框的尺寸大小，并结合红外目标的面积特征，成功地剔除掉在单源红外检测跟踪过程中可能出现的虚警。因此，激光与红外融合目标检测算法步骤如下：

(1) 根据实际情况需要，选择合适的正交方向组。通常情况下，分为两个正交方向组（如图 1 所示),其中一个正交方向组包括了通道 1(α=0°,β=90°)和通道 2(α=90°,β=0°),另外一个正交方向组包括了通道 3(α=45°,β=45°)和通道 4(α=135°,β=45°);

(2) 利用加权核[10]对原始输入的红外图像进行卷积运算,得到每个像素的拟合系数;

(3) 利用二阶方向性导数滤波器[6]计算每个通道上的二阶方向性导数图,并修正这些图像;

(4) 计算目标在红外图像中的大小 S_{IR};

(5) 将 S_{IR} 作为 2D 高斯滤波器的方差并引入到 PFT 方法[11]中,计算每个方向通道上的方向显著性图;

(6) 采用显著性融合方法[13]来融合所有通道上的方向显著性图,最终得到目标显著性图;

(7) 选择分割阈值，可设定为最大值的 0.35 倍(可根据任务不同按先验知识设定);

(8) 如果检测到的目标面积 S_D 与 S_{IR} 的比值在规定阈值范围内（文中设定为 $0.85\leqslant\frac{S_D}{S_{IR}}\leqslant1.15$),则检测到目标,否则将检测到的目标作为虚警剔除。

3 实验结果与分析

为了验证激光与红外融合目标检测算法的性能，首先利用仿真的三类典型地面运动目标（小轿车、装甲车和坦克)的红外图像与激光图像数据进行测试。图 9~11 分别给出了融合目标检测算法对小轿车、装甲车和坦克仿真图像序列的检测结果示意图。图 9(a)~(d)分别为第 1、26、60、75 帧检测跟踪结果。

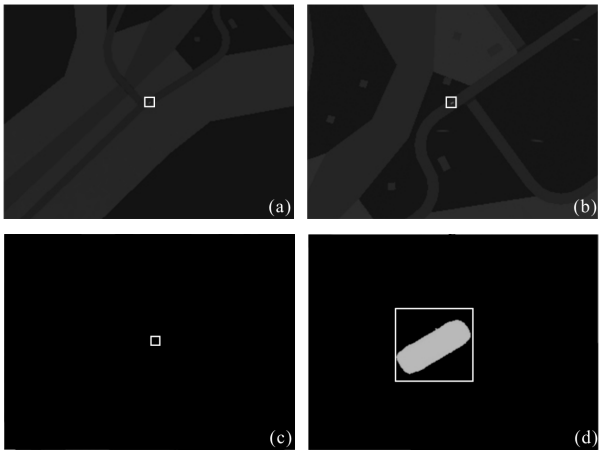


图 9 针对小轿车的融合检测跟踪结果

Fig.9 Tracking results of fusion detection for cars

图 10 (a)~(d) 分别为第 1、20、48、63 帧检测跟踪结果。图 11(a)~(d)分别为第 1、25、58、70 帧检测跟踪结果。由图 9~11 可知,相比于单源红外目标检测算法的实验结果(图 2~图 4),文中所采用的激光与红外融合目标检测算法大大提高了算法的适应性和鲁棒性,不仅在弹目距离较远时(红外小目标),即使当弹目距离较近时（红外面目标)，激光与红外融合检测算法也能够始终准确地检测地面运动目标。因此,激光与红外融合目标检测算法解决了基于 DSBM 的单源红外目标检测算法在弹目距离变化时对目标检测适应性不强和鲁棒性较差的问题。

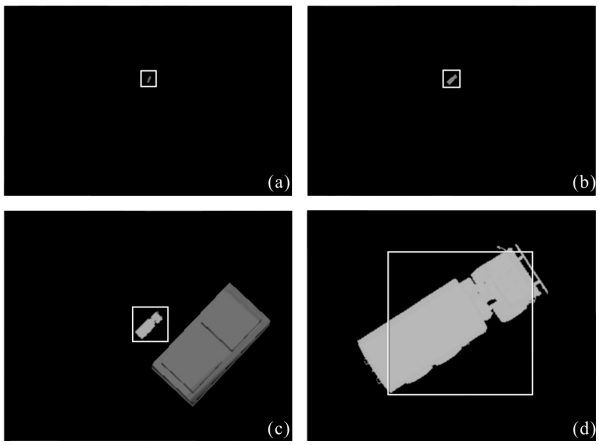


图 10 针对装甲车的融合检测跟踪结果

Fig.10 Tracking results of fusion detection for armored vehicles

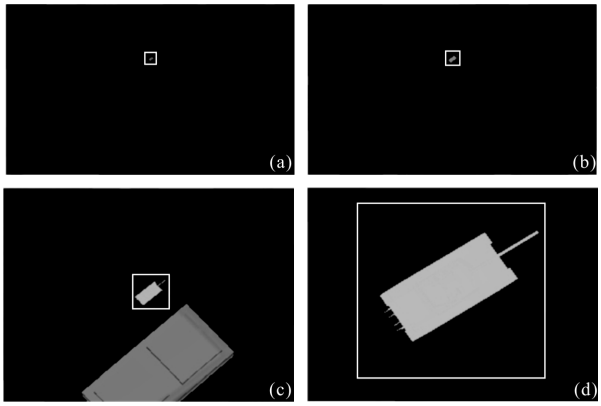


图 11 针对坦克的融合检测跟踪结果

Fig.11 Tracking results of fusion detection for tanks

为了对激光与红外融合检测算法的检测性能做进一步的量化评估，即比较算法在各类目标仿真图像序列下的检测率、虚警率以及漏检率,下面对三类地面目标的激光与红外仿真图像序列进行处理。表2给出了融合检测算法对上述各个目标的仿真图像序

列的检测结果。从表 2 可知,激光与红外融合的目标检测算法将大部分的虚警都剔除掉了，在不增加算法处理时间的基础上大大提高了目标的检测率,为后续的激光与红外融合识别奠定了基础。

表 2 融合检测算法针对各类地面运动目标的综合性能比较

Tab.2 Comparison of comprehensive performance of fusion detection algorithm for all kinds of ground moving targets

Target category	N	N_{real}	N_{false}	N_{miss}	P_d	P_f	P_m	T/ms
Car	77	76	3	1	0.987 0	0.038 9	0.012 9	43.5
Armored vehicle	65	64	2	1	0.984 6	0.030 8	0.015 4	45.1
Tank	72	71	1	1	0.986 1	0.013 9	0.013 9	45.5

4 结 论

为实现复杂战场环境下快速、准确的运动目标检测，文中提出了一种激光和红外图像主被动融合检测方法，弥补了单源数据难以全面描述运动目标的缺陷。该方法将激光雷达测得的距离信息引入到 DSBM 算法中，实现了对小目标和面目标均有效的目标检测。实验结果表明,激光与红外的融合检测算法在没有增加算法复杂度基础上，大大提高了目标检测算法的适应性和鲁棒性。

参考文献:

[1] Yin Xiaochen, Fu Yanhui. Optical design of common aperture IR/ladar dual-mode imaging seeker [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(2): 428-431. (in Chinese)

[2] Chavez-Garcia R O, Aycard O. Multiple sensor fusion and classification for moving object detection and tracking [J]. ***IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems***, 2016, 17(2): 525-534.

[3] Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Remote multiband infrared image fusion system and registration method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(5): 0526002. (in Chinese)

[4] Wu Jiajie. Active-passive detection image registration and fusion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[5] Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, et al. Calculation of maximum range of active and passive laser rangegated detection system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(S1): 86-92. (in Chinese)

[6] Wei Daozhi, Zhao Yan, Huang Shucai, et al. Precise interception method of multi-source asynchronous information fusion for combined seeker [J]. ***Journal of National University of Defense Technology***, 2016, 38(3): 154-159. (in Chinese)

[7] Qi Shengxiang, Ma Jie, Tao Chao, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. ***Geoscience and Remote Sensing Letters***, ***IEEE***, 2013, 10(3): 495-499.

[8] Wang A, Wang M. RGB-D salient object detection via minimum barrier distance transform and saliency fusion [J]. ***IEEE Signal Processing Letters***, 2017, 24(5): 663-667.

[9] Wang Peng, Tian J W, Gao C Q. Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM [J]. ***Electronics Letters***, 2009, 45(3): 156-158.

[10] Wang G D, Chen C Y, Shen X B. Facet-based infrared small target detection method [J]. ***Electronics Letters***, 2005, 41(22): 1244-1246.

[11] Gu Yanfeng, Chen Wang, Liu Baoxue, et al. A Kernel-based nonparametric regression method for clutter removal in infrared small-target detection applications [J]. ***Geoscience and Remote Sensing Letters***, ***IEEE***, 2010, 7(3): 469-473.

[12] Zhang Xiangyue, Ding Qinghai, Luo Haibo, et al. Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(7): 0726002. (in Chinese)

[13] Chan David S, David A Langan, Daniel A Staver. Spatial-processing techniques for the detection of small targets in IR clutter[C]//SPIE, 1990, 1305: 53-62.