

文章编号:1001-5078(2024)12-1894-06

· 红外技术及应用 ·

基于红外边界约束的点云目标识别系统

齐恩铁¹, 姜春雨², 赵立英¹, 孙海峰³

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春中国光学科学技术馆, 吉林 长春 130117; 3. 长春电子科技学院, 吉林 长春 130061)

摘要:为了提高点云目标的识别准确率和识别速率,设计了红外图像获取与激光扫描联合使用的目标识别系统,提出了基于红外边界约束的点云目标提取算法。首先,利用边缘增强和红外特征对红外图像进行灰度化处理。其次,利用目标红外图像区域为点云目标提取提供边界约束,并通过映射比例函数完成二维图像到三维点云的投影,实现坐标系对齐。最后用符合边界约束的点云集合完成目标识别。实验针对复杂背景下车目标进行测试,并对比了传统算法和本算法的测试结果。在点云总量增加时,传统算法的检出率从83.7%增至97.6%。本算法从96.2%增至98.8%,受点云总量影响更小。偏角增加会导致本算法准确率降低,但其仍优于传统算法。本算法对伪目标的剔除效果明显,故其准确率稳定性更高。本算法的检出时间仅为传统算法的1/3至1/4。本设计在目标识别准确性和检出时间上均有所提升,具有更好的实用性。

关键词:目标识别;点云提取;红外特征;边界约束

中图分类号:TP391.41;TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.013

Constraint point cloud target recognition system based on infrared boundary

QI En-tie¹, JIANG Chun-yu², ZHAO Li-ying¹, SUN Hai-feng³

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Changchun China Optical Science and Technology Museum, Changchun 130117, China; 3. Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130061, China)

Abstract: To improve the recognition accuracy and speed of point cloud targets, a target recognition system combining infrared image acquisition and laser scanning is designed, and a point cloud target extraction algorithm based on infrared boundary constraints is proposed in this paper. Firstly, edge enhancement and infrared features are used to grayscale the infrared image. Secondly, the target infrared image area is utilized to provide boundary constraints for point cloud target extraction, and the projection of 2D images to 3D point clouds is achieved by mapping scale functions, achieving coordinate system alignment. Finally, target recognition is realized using a set of point clouds which meets boundary constraints. The experiments are tested for vehicle targets in complex contexts and the results are compared between the traditional algorithm and the present algorithm. As the total amount of point clouds increases, the detection rate of traditional algorithm increases from 83.7% to 97.6%. The algorithm in this paper increases from 96.2% to 98.8%, and is less affected by the total amount of point clouds. This algorithm is effective in rejecting pseudo-targets, so its accuracy is more stable. The detection time of this algorithm is only 1/3 to 1/4 of the traditional algorithm, and this design has improved both target recognition accuracy and detection time, and has better practicality.

Keywords: target recognition; point cloud extraction; infrared characteristics; boundary constraints

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20230203048SF)资助。

作者简介:齐恩铁(1980-),男,硕士,助理研究员,研究方向为电力智能巡检、激光雷达技术等。E-mail:qiet0312@sina.com

通讯作者:孙海峰(1978-),男,硕士,教授,研究方向为人工智能与教育技术。E-mail:199699545551@sina.com

收稿日期:2024-03-19; **修订日期:**2024-05-21

1 引言

在复杂环境中实现待测目标三维点云的准确获取在军事跟踪、自动驾驶、地形扫描等多个领域都具有重要意义^[1]。复杂环境中背景的非合作属性导致目标点云与背景及杂散点云的可分离度降低,从而降低了识别精度。为了提升目标识别率与准确度,组合检测和混合识别的工作方式成为一项研究热点^[2]。

将目标区域的可见光、红外图像等作为参考信息提升目标点云获取是一种常见手段。杨帆^[3]利用数据挖掘算法对目标可能区域中的点云进行特征提取,一定程度上提高了目标识别率。Dominik^[4]采用三维包围盒构建了目标点云数据的外包围边界,从而提升了目标点云选取的精细化程度,但由于可见光区域选择受背景光影响较大,其识别正确率仅为 62.1%。Sochor^[5]通过预设特定类型车辆数模的方式,在特征点层面完成颗粒度对齐,晴天条件下识别率优于 78.6%。Kumar 等人^[6]通过可见光图像灰度特征进行分类,在利用分类数据重新组合点云,提高了目标数据的获取速度。LIU Z^[7]采用 Smoke 算法构建目标视觉立体几何关系,实现预测目标的点云区域的目的,使其点云获取速度提升了 50% 以上。薛培林^[8]基于可见光与点云数据融合实现了在市内同时识别 2 个以上的车辆目标。

虽然可见光图像更清晰,但其受环境光、背面噪声影响较大,往往需要借助复杂的处理算法计算目标区域。相比之下,红外图像虽然空间分辨率略低,但其目标的可识别率更好,有利于快速获取边界范围。VORA S^[9]利用语义分割对红外图像进行分类,降低了目标区域点云数据的选取范围。刘宇^[10]采用 16 线激光雷达获取稀疏点云数据,将重投误差控制在 3 个像素以内。全选悦^[11]将激光雷达点云数据导入红外图像,对三种常见坦克目标进行了分析,结合算法的目标识别率提升了 60%。战荫泽^[12]利用红外特征提取的方式对目标点云进行迭代筛选,使系统漏检率小于 10.0%,误检率小于 5.0%。夏琰^[13]采用红外图像与点云融合,提升了三维目标的识别概率。本文采用红外图像提供目标边界约束,完成两种数据的融合计算,从而提高目标点云的提取速度与识别正确率。

2 基于红外边界的点云目标识别系统设计

基于红外边界约束的目标识别系统如图 1 所示。其主要由三个核心模块组成:激光雷达点云扫描获取

模块 A、红外图像获取模块 B 和数据融合与目标识别模块 C。A 模块由 CPU 控制调制模块使激光雷达对待测区域进行扫描,反射光通过光学天线收集并转化为有效电信号传回 CPU;B 模块通过红外 CCD 完成 A 模块视场范围的红外图像采集,并传回 CPU;C 模块对红外图像滤波降噪,根据目标红外特征计算其位置的映射区域。B 模块提供的红外边界约束限制可以大幅减小 A 模块中目标点云选取的数据量和提高点云边界提取精度,从而通过 C 模块中的识别算法可将目标位置信息用于对点云数据的目标位置进行约束。

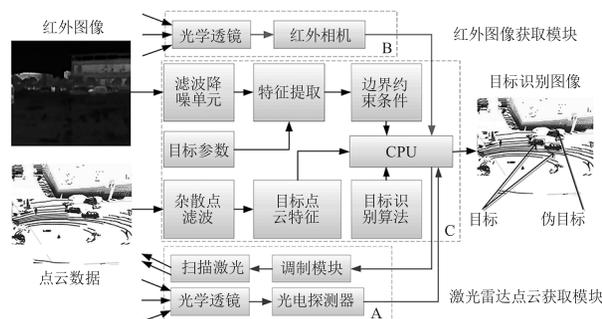


图 1 基于红外边界约束的点云目标识别系统

Fig. 1 Point cloud target recognition system based on infrared boundary constraints

为了使测试过程中红外成像系统的视场与激光雷达的视场保持一致,在测试前需先用二维棋盘格与激光靶标点进行标定。标定过程:(1)将红外成像系统与激光雷达同向固定于车载平台上,使两个光学接收端尽量水平;(2)在测试系统前方,已知的不同距离上逐次放置二维棋盘格与激光靶标点,并同时获取红外图像与激光雷达点云;(3)由采集图像与点云分别构建坐标系,因为棋盘格与靶标点都是已知位置,故两个坐标系可以通过映射实现坐标系对齐,对齐后再次测量位置目标点时,只要红外成像系统和激光雷达相对位置没有变化,就可以认为两系统视场保持一致。

3 算法设计与实现

3.1 红外图像特征提取

当红外成像系统的视场与激光雷达的视场一致时,可以通过提取红外图像 $g(x, y)$ 中目标位置特征为点云数据 $P(x, y, z)$ 提供边界约束。根据目标红外特性完成二维红外图像上目标区域的选取可以提高点云边界的提取准确度及速度。设系统与待测目标距离为 d ,红外图像采集模块及点云获取模块在世界坐标系中的视场角分别 (θ_x, θ_y) 和 (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z) 。则红外图像

区域为 $g(x_{ir}, y_{ir})$, 则:

$$\begin{cases} x_{ir} = 2d \cdot \sin(\theta_x/2) \\ y_{ir} = 2d \cdot \sin(\theta_y/2) \end{cases} \quad (1)$$

提取图像的红外特征点, 其在世界坐标系中的第 $(s+t)$ 阶原点距^[14] 有

$$M_{st} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_{ir}^s y_{ir}^t g(x_{ir}, y_{ir}) dx_{ir} dy_{ir} \quad (2)$$

其中, s 和 $t \in R_0$ 将其换算为极坐标^[15] 时, 有:

$$(x_{ir}, y_{ir}) = (r \cos \phi, r \sin \phi) \quad (3)$$

将(3)式带入(2)式后, 有:

$$M_{st} = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} r^{s+t} \cdot \cos^s \phi \cdot \sin^t \phi \cdot g(r, \phi) dr d\phi \quad (4)$$

对于已知目标的红外特征信息 M_{target} 而言, 通过判断 M_{st} 与 M_{target} 的关系就可以给出目标在红外图像中的映射区域, 该区域的边界范围用于点云数据目标提前的限定范围。

3.2 基于红外特征边界的点云约束

目标点云的提取需要提供一个区域范围, 该范围在包含所有目标点云特征的基础上越小越好, 一是可以提高点云处理速度, 二是可以减少杂散点对目标点的干扰, 所以点云约束就显得十分重要了。由于激光雷达与红外图像获取模块具有相同的视场, 故根据红外特征的目标区域限制同样可以适用于目标点云区域, 从而为其提供边界约束。

设目标红外图像对应的视场夹角与视距为 (ϕ_x, L_x) 和 (ϕ_y, L_y) , 而其点云在对应坐标轴上的视场夹角与视距为 (θ_x, D_x) , (θ_y, D_y) 和 (θ_z, D_z) 。则以红外图像模块坐标系对点云坐标系投影, 设置映射比例函数 f , 则有:

$$\begin{cases} f_x = \frac{D_x \sin(\theta_x/2)}{L_x \sin(\phi_x/2)} \\ f_y = \frac{D_y \sin(\theta_y/2)}{L_y \sin(\phi_y/2)} \\ f_z = \sqrt{f_x f_y} D_z \end{cases} \quad (5)$$

根据式(4) 给定的原点距关系可知, 红外图像中符合 $M_{st} < M_{target}$ 的区域才会认定为目标区域, 故将其作为边界条件代入基于式(5) 的点云位置计算函数有:

$$\begin{cases} x_{lidar}, y_{lidar}, z_{lidar} = (f_x x_{ir}, f_y y_{ir}, f_z z_{ir}), M_{st} < M_{target} \\ x_{lidar}, y_{lidar}, z_{lidar} = 0, M_{st} > M_{target} \end{cases} \quad (6)$$

上式可知, 目标点云在进入点云提取前首先完成的是基于红外特征边界内的点云选取, 不在其范围的

点直接置零从而剔除, 这样可以大幅减少需要目标重建的点云总量及抑制杂散点的干扰。

3.3 算法实现

算法主要是思想是将红外图像中目标区域作为激光扫描目标点云的边界条件, 从而减小杂散点对目标提取的干扰和提高目标重建速度。实现的关键因素有两点, 一是将红外图像的二维关系投影到三维点云坐标系中, 二是将红外特征参数用于点云位置反演计算。

按照此思路算法步骤与程序流程如下:

(1) 采集红外图像 $g(x, y)$ 和点云数据 $P(x, y, z)$, 根据目标点云中心位置的点云均值计算得到测试距离均值 d 和视场角 $\theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \phi_z$;

(2) 根据距离均值 d 和视场角 θ_x, θ_y , 计算红外图像中目标区域范围 $g(x_{ir}, y_{ir})$, 对包含目标的红外区域图像进行特征提取, 获得 M_{st} ;

(3) 将对应距离及视场角条件下的标准目标红外原点距 M_{target} 作为阈值, 对所有目标红外图像区域中的像素进行判断选取, 保留 $M_{st} < M_{target}$ 的像素;

(4) 在世界坐标系下完成红外图像 (x, y) 到点云数据 $P(x, y, z)$ 中 (x, y) 的坐标系对齐, 计算对齐坐标系后的视场夹角 (ϕ_x, L_x) , (ϕ_y, L_y) 与视距 (θ_x, D_x) , (θ_y, D_y) 和 (θ_z, D_z) ;

(5) 计算映射比例函数 f , 完成红外特征参数对目标点云数据筛选判据的构建, 对目标点云区域的所有点进行遍历判定, 根据式(6) 的判定条件, 符合的点保留并重新赋值, 不符合的点置零剔除;

(6) 基于新赋值后的点云数据进行完成三维重建, 并根据点云数据库对目标种类进行识别。算法程序流程图如图2所示。

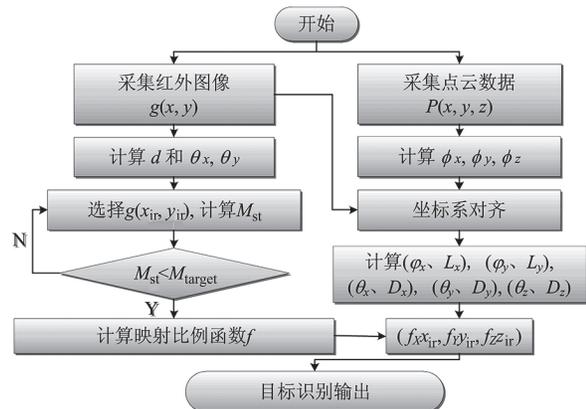


图2 基于红外边界约束的点云目标识别算法程序流程图

Fig.2 Flowchart of point cloud target recognition algorithm based on infrared boundary constraints

4 实验

4.1 红外特征提取

在户外实验中,用于对比观察的可见光图像由于MGS2001-H2型CCD相机提供,如图3(a)所示。选用FOTRIC-320型手持红外热像仪获取目标区域的二维红外图像,如图3(b)所示。设备参数:红外分辨率 160×120 ,热灵敏度 $50 \text{ mk}/0.05 \text{ }^\circ\text{C}$,视场角 $25^\circ \times 19^\circ$,空间分辨率 2.73 mrad ,温度监测范围 $-20^\circ \sim 550^\circ$,测温精度 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对原始红外图像进行滤波降噪、图像灰度处理后得到图3(c),代入待测目标红外特征数据后,测试参数完全适用于本系统中车辆等目标的红外图像获取,对原始伪彩色图像进行灰度化处理并图像识别目标位置的预处理图像如图3(d)所示。

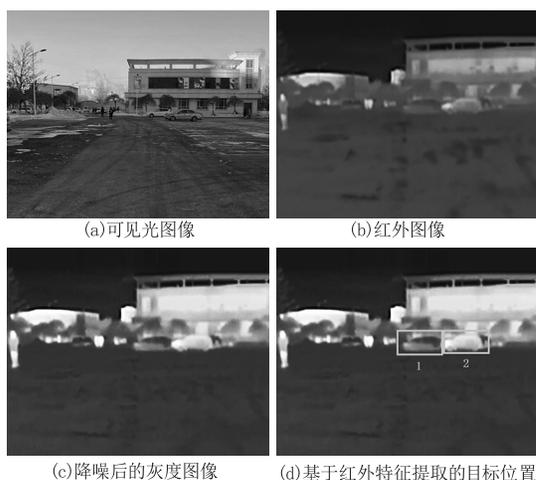


图3 基于红外图像特征的目标位置提取

Fig. 3 Target position extraction based on infrared image features

如图3(a)所示,红外图像采集模块与激光扫描模块对应的视场均为存在复杂背景的测试区域,其中背景楼宇的颜色与待测目标(车辆)之间的颜色相近,背景中还包含了人员、树木等干扰项。如图2(b)和(c)分别是对应区域的红外图像与经滤波后的灰度图像,可以看出在采用噪声抑制和图像增强后,目标的轮廓清晰度得到了显著提高,目标、人员、树木等的边缘信息更清晰了。如图3(d)所示,结合预设目标红外特征后,可以准确地完成对目标1和目标2的位置判别,从而依据目标几何特征给出目标区域范围 $g(x_{ir}, y_{ir})$ 和其特征参数 M_{st} ,从而在统一坐标系后为目标点云的准确提取提供 x 轴和 y 轴方向上的边界约束。

整个实验过程中分别完成了单车辆目标、多车辆目标(无重叠和少量重叠)、简单背景与复杂背景的测试,由于篇幅限制,图3中给出的是复杂背景下存

在少量重叠的多车辆目标测试结果。该种测试条件的检测率是不同测试条件中最低的,故在此条件下能够实现目标的有效识别即可验证方法的可行性。

4.2 红外边界约束目标点云区域对比

点云数据由TITAN-MI型稀疏激光雷达扫描获得,测距精度 $\pm 2 \text{ cm}$,视场范围 $(45^\circ, 25^\circ)$,测试位置与可见光、红外光的图像采集位置相近,测试获得的点云数据如图4(a)所示,采用红外边界约束的目标点云数据如图4(b)所示。

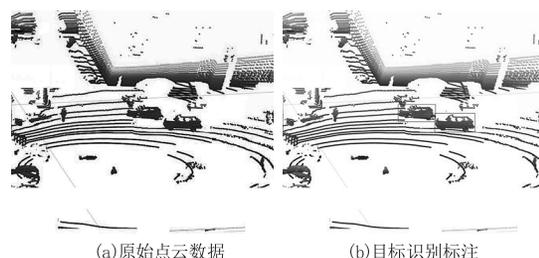


图4 原始点云数据及目标识别标注

Fig. 4 Original point cloud data and target recognition annotations

如图4(a)所示,采用激光雷达扫描可以获得整个区域范围内的点云数据,从点云数据的分布可以明显看出,背景中楼宇建筑的点云数据量很大,这是因为其在激光雷达视场范围内具有很大的反射截面,从而获得了最密集的点云数据。相比而言,两个待测目标的点云数据量并不大,故如果采用传统方法对整个视场中的点云进行立体视觉计算,然后完成目标位置的确定则有大量的点云计算是无效的,所以减小点云运算区域是提高目标识别速度与准确度的重要手段。如图4(b)所示,当采用红外边界约束后,利用图3(d)中目标区域范围 $g(x_{ir}, y_{ir})$ 和其特征参数 M_{st} ,就能计算红外图像二维区域在点云数据中三维区域中相应二维截面中的位置,从而提供点云选取边界,由此目标识别仅在图4(b)中的红框区域中进行即可,从而大幅提升了目标识别速度与种类识别准确度。

4.3 识别准确率与速率测试

为了进一步量化分析本算法与直接点云目标提取的传统算法(即直接通过目标特征在整体点云数据中识别目标位置,以VoxelNet算法为例)之间的识别效果,同时采用两种方法对同一组点云数据进行目标识别,点云总量分别采用5000点、10000点和20000点,激光雷达坐标系与红外图像采集模块坐标系的偏角分别采用 -10° 、 0° 和 $+10^\circ$ 。则识别结果检出率、准确率和检出时间如表1所示。

表1 目标点云识别关系
Tab.1 Target point cloud identification relationship

点云总量 (测试均值)		-10°		0°		+10°	
		传统算法	本算法	传统算法	本算法	传统算法	本算法
5000	检出率/%	83.5	93.1	83.7	96.2	82.9	94.0
	准确率/%	52.9	84.6	53.5	90.2	52.8	83.4
	检出时间/ms	878	207	897	184	891	214
10000	检出率/%	94.9	96.2	95.4	98.7	95.6	95.7
	准确率/%	72.9	85.3	73.5	93.4	73.4	85.7
	检出时间/ms	1298	484	1357	425	1318	510
20000	检出率/%	96.7	96.8	97.6	98.8	96.1	95.9
	准确率/%	78.4	87.5	78.2	93.6	77.4	86.8
	检出时间/ms	3472	928	3548	849	3451	921

根据表1分别针对检出率、准确率和检出时间进行分析可以看出,当点云数量增加时,传统算法的检出率明显增大,从83.7%增至97.6%(0°时),而在此变化过程中偏角对其影响基本可以忽略不计;而本算法对点云数量的变化并不敏感,但偏角的增大会导致检出率小幅下降,从98.8%降至96.8%和96.1%,分析认为这是偏角会导致红外图像投影点云时发生畸变,从而降低了目标映射区域的准确度造成的,但降低后的检出率仍与传统算法将近。相比之下,本算法的准确率明显优于传统算法,所有条件下均在80%以上,最优时可达93.6%,而传统算法最优时也仅能达到78.2%。说明采用红外边界约束的目标识别算法对伪目标的剔除效果显著,图1中标注的伪目标在传统算法中大概率被判别为目标车,但是采用红外边界约束算法中,该位置区域的点云会因为不符合红外约束区域而被排除,从而提高了系统的准确率。传统算法的检出时间受点云总量的影响明显,在20000点时,算法运行时间均在3400ms以上,而本算法由于限定了目标点云的重建区域,均小于950ms,具有更好的实时性。表1中不同点云总量表示的是不同测试条件下测试组数据对应的检出率与准确率,5000点时是4.1节中提到的简单背景条件下的测试结果,由于背景为空旷场地,故回波点总量小,该测试数据为多测测试组的平均数据;10000点和20000点时是复杂背景条件下调节采样密度实现的,同样该测试组也是平均数据,可见其具有不同测试组数据的代表性。

5 结论

本文针对相似点云集合形成的伪目标对识别准

确率影响、点云总量增大造成的识别速度慢等问题,提出了基于红外边界约束的点云目标识别系统及解算方法。算法通过获取待测区域红外图像后先对存在目标的红外区域进行特征识别,得到包含目标的边界区域及映射函数,从而约束点云目标重建时点云的选取范围,达到剔除伪目标和降低点云提取总量的目的。实验结果显示算法的检出率、准确率及检出时间均优于传统算法,验证了其可行性及优越性。

参考文献:

- [1] Dlesk A, Vach K, Pavelka K. Photogrammetric co-processing of thermal infrared images and RGB images[J]. Sensors, 2022, 22(4): 1655-1676.
- [2] Pantoja-Rosero B G, Achanta R, Kozinski M, et al. Generating LOD3 building models from structure-from-motion and semantic segmentation[J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104430.
- [3] Yang Fan, Zhou Hua, Wang Yan, et al. Laser radar image recognition technology based on data mining[J]. Laser Journal, 2016, 37(7): 39-42. (in Chinese)
杨帆,周华,王嫣.基于数据挖掘的激光雷达图像识别技术[J].激光杂志,2016,37(7):39-42.
- [4] Dubskú M, Herout A, Jurúnek R, et al. Fully automatic roadside camera calibration for traffic surveillance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 16(3): 1162-1171.
- [5] Sochor J, Spaňhel J, Herout A. Boxcars: improving fine-grained recognition of vehicles using 3D bounding boxes in traffic surveillance[J]. IEEE Transactions on Intelli-

- gent Transportation Systems, 2018, 20(1): 97 – 108.
- [6] Kumar Das Asit, Jaya Sil. An efficient classifier design integrating rough set and set oriented database operations [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2279 – 2285.
- [7] Liu Z, Wu Z. SMOKE: Single-stage monocular 3D object detection via keypoint estimation [C]//Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020: 4604 – 4612.
- [8] Xue Peilin, Wu Yuan, Yin Guodong, et al. Real-time target recognition for urban autonomous vehicles based on information fusion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(12): 165 – 173. (in Chinese)
薛培林, 吴愿, 殷国栋, 等. 基于信息融合的城市自主车辆实时目标识别[J]. 机械工程学报, 2020, 56(12): 165 – 173.
- [9] VORA S, LANG A H, HELOU B, et al. Pointpainting: Sequential fusion for 3D object detection [C]//Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020: 4604 – 4612.
- [10] Liu Yu, Cai Ying, Rong Dingtao, et al. Calibration between sparse LIDAR and visible/infrared imaging systems [J]. Infrared Technology, 2022, 44(12): 1264 – 1272. (in Chinese)
刘宇, 蔡毅, 戎宁涛, 等. 稀疏激光雷达与可见光/红外成像系统的标定方法[J]. 红外技术, 2022, 44(12): 1264 – 1272.
- [11] Quan Xuanyue, Wu Ran, Yang Xinfeng, et al. Fusion target recognition method of infrared and laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 158 – 165. (in Chinese)
全选悦, 吴冉, 杨新锋, 等. 红外与激光融合目标识别方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 158 – 165.
- [12] Zhan Yinze, Zhang Lidong, Qing Ying. Vehicle target recognition algorithm based on the fusion of lidar and infrared image [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(9): 1238 – 1242. (in Chinese)
战荫泽, 张立东, 秦颖. 基于激光雷达与红外图像融合的车辆目标识别算法[J]. 激光与红外, 2021, 51(9): 1238 – 1242.
- [13] Xia Yan. Research on 3D target recognition algorithm based on infrared features [J]. Infrared Technology, 2022, 44(11): 1161 – 1166. (in Chinese)
夏琰. 基于红外特征的三维目标识别算法研究[J]. 红外技术, 2022, 44(11): 1161 – 1166.
- [14] Zhang Yuanhui, Xu Bairui, Zhu Junjiang, et al. 3D Temperature model reconstruction based on fusion of visible and thermal images [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(2): 256 – 263. (in Chinese)
张远辉, 徐栢锐, 朱俊江, 等. 可见光与热像融合的三维温度模型重建[J]. 计量学报, 2022, 43(2): 256 – 263.
- [15] Yang Yanlong, Xu Chao. Fusion reconstruction method for 3D temperature fields on the human body surface [J]. Infrared Technology, 2022, 44(1): 33 – 40. (in Chinese)
杨炎龙, 徐超. 一种人体体表三维温度场的融合重建方法[J]. 红外技术, 2022, 44(1): 33 – 40.