

文章编号: 2095-4980(2019)02-0305-04

一种抗噪声激光主动成像目标识别方法

张鲁薇^{1,2}, 谢京江¹, 孙涛¹, 王锐¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出一种基于轮廓曲率去噪和仿射不变矩的目标识别方法, 适用于激光主动成像这样的高噪声复杂应用场合。通过计算每个像素及其邻域的轮廓曲率, 判断像素携带的信息量大小, 据此对像素点进行分类。对分属不同类别的像素点, 使用不同滤波参数的 Lee 滤波器进行滤波。对滤波后的图像再次提取出轮廓, 计算轮廓的仿射不变矩, 训练分类器进行目标识别。实验结果表明, 本文算法在噪声环境下对目标的仿射变换具有较高的识别率, 并且满足激光主动成像识别系统对于实时性的要求。

关键词: 目标识别; 激光主动成像; 轮廓曲率; 仿射不变矩

中图分类号: TN957.52; TP391.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201902.0305

An anti-noise target recognition algorithm for laser active imaging

ZHANG Luwei^{1,2}, XIE Jingjiang¹, SUN Tao¹, WANG Rui¹

(1.State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A target recognition method based on contour curvature and affine invariant moments is proposed, which is applicable for complex high-noise scenes such as laser active imaging system. By calculating the curvature of the pixels and their neighborhood, the information the pixels contain is determined, and then the pixels are classified. For the pixels belonging to different classes, Lee filter with different filter parameters are adopted. After the filtering, the contours of the object are extracted and the affine invariant moments are calculated, so as to train the classifier and identify the object. Experimental results indicate that the proposed method has a high recognition rate for affine object under high-noise conditions and meets the real-time performance requirement of laser active imaging recognition systems.

Keywords: target recognition; laser active imaging; contour curvature; affine invariant moment

被动成像技术是依靠采集目标反射或发射的光信息进行成像, 自身并不具备照明增强的功能, 在夜间、雾霾等能见度较低条件下, 无法满足自动目标识别的需求。此时, 激光主动照明技术^[1]是一种有效的成像手段。将激光主动成像技术与自动目标识别技术相结合, 在现代战场和国防安全领域具有广阔的应用前景。

目前国内外针对激光雷达成像目标识别的研究已经取得了一定的进展。Armbruster^[2]比较了确定性和似然性的模型匹配方法在激光成像雷达目标识别方面的性能, 最后指出结合目标分割的似然性匹配方法能够取得最高的识别率。Hodge 等^[3]搭建了一套激光成像雷达识别跟踪系统, 使用透视形状融合(Perspective Shape Fusion, PSF)方法, 结合二维轮廓和三维形状信息进行识别。Pal 等^[4]通过提取相关度、均值、标准差等 13 个特征, 使用 k 最近邻(k-Nearest Neighbor, kNN)分类器和多层感知器(Multi-Layer Perceptron, MLP)网络进行分类识别。Soliday 等^[5]从距离像中提取几何特征, 从强度像中提取反射系数特征, 将二者融合并运用模糊神经网络分类器进行识别。马君国等^[6]将中心矩、Hu 矩和 Zernike 矩进行组合, 运用在激光成像雷达仿真距离像的目标识别中。上述方法基本是在仿真或者低噪条件下使用, 未充分考虑噪声的影响。在激光主动成像中, 噪声是影响成像质量的重要因素。由于噪声掩盖了目标的有效信息, 算法识别能力将受到很大影响。为此, 本文提出一种抗噪声的激光主动成像目标识别方法, 将去噪技术与自动目标识别技术相结合, 并在实验部分验证了算法性能。

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2018-08-13

基金项目: 中国科学院创新基金资助项目(CXJJ-17-M132)

1 激光主动成像中的噪声

根据来源不同,激光主动成像中的噪声主要分为散斑噪声、电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)噪声和背景辐射噪声^[7],其中最主要的噪声是散斑噪声。散斑噪声是一种与激光信号强度有关的乘性噪声。在图像的均匀区域或弱纹理区域,散斑噪声可以建模为:

$$I = I_0 I_{sn} \quad (1)$$

$$p(I_{sn}) = \frac{L^L I_{sn}^{L-1}}{\Gamma(L)} e^{-L I_{sn}} \quad (2)$$

式中: I_0 表示不包含噪声的图像信号; I_{sn} 表示散斑噪声。式(2)表示 I_{sn} 服从伽马分布。

对于散斑噪声的抑制,使用较多的是 Lee 滤波。文献[8]指出, Lee 滤波器采用局部均值与方差估计先验均值与方差,能够较好地保留边缘信息,对于乘性噪声也可以进行线性化,是一种抑制激光主动成像噪声的有效手段。但实际应用中, Lee 滤波器的步长选择是影响滤波效果的重要因素:步长过大,噪声抑制效果较好,但边缘会出现过度平滑;步长过小,边缘信息得以保留,但也会残余大量的噪声。

为了在较好地滤除轮廓噪声的同时保留边缘的细节信息,本文提出一种基于轮廓曲率特征,从而自适应设置滤波器参数的方法。根据轮廓曲率的分布,将图像上的点分为强信息点(曲率较大的部位)、弱信息点(曲率较小的部位)和无信息点(无轮廓的部位),不同的点采用不同步长的滤波器进行滤波。这样可以保证 Lee 滤波的参数设置更加具有针对性,进一步保留强边缘,同时弱化噪声的影响。

2 基于轮廓曲率的去噪方法

使用 Canny 算子或者灰度形态学方法提取出轮廓,针对轮廓上的每个点,采用 11 点法计算轮廓曲率。该方法使用 5 点采样间隔,以避免相邻噪声点带来的计算误差。设当前轮廓点为 $P_i(x_i, y_i)$,前后 5 点采样间隔的轮廓点为 $P_{i-5}(x_{i-5}, y_{i-5}), P_{i+5}(x_{i+5}, y_{i+5})$,则 11 点法的具体计算公式为:

$$\rho(x_i, y_i) = \text{sign}((x_i - x_{i-5})(y_{i+5} - y_i) - (y_i - y_{i-5})(x_{i+5} - x_i)) \frac{R_{i1} R_{i2}}{\|R_{i1}\| \|R_{i2}\|} \quad (3)$$

式中: ρ 为轮廓曲率; $R_{i1} = \|P_i - P_{i-5}\|, R_{i2} = \|P_i - P_{i+5}\|$ 表示 2 个轮廓点之间的欧式距离。

考虑噪声的随机性和复杂背景的影响,相邻轮廓点的曲率可能发生突变。因此,使用长度为 5 的均值滤波器进行曲率平滑:

$$\rho(p_i) = \frac{1}{5} \sum_{j=i-2}^{i+2} \rho(p_j) \quad (4)$$

本文认为轮廓曲率更大的点,更接近于目标轮廓的关键点,能够表征更多的目标信息。因此根据轮廓曲率,来划分图像上的各个像素点的重要程度。设定阈值 Tuh_ρ, Th_ρ 和 Tl_ρ ,且 $Tuh_\rho > Th_\rho > Tl_\rho$,若 $\rho(x_i, y_i) > Tuh_\rho$,则称点 $P(x_i, y_i)$ 为超强信息点,其邻域(本文取 3 邻域)为 $PVRI$;若 $Th_\rho < \rho(x_i, y_i) \leq Tuh_\rho$,则称点 $P(x_i, y_i)$ 为强信息点,其邻域为 PRI ;若 $Tl_\rho \leq \rho(x_i, y_i) < Th_\rho$,则称点 $P(x_i, y_i)$ 为弱信息点,其邻域为 PWI ;若 $\rho(x_i, y_i) < Tl_\rho$,则称点 $P(x_i, y_i)$ 为无信息点,其邻域为 PNI 。根据以上规则,远离轮廓的点均归为无信息点,因为远离轮廓的点处于目标的均匀区域,不包含轮廓、纹理等有用信息,而且,远离轮廓的点使用的滤波窗口大或者小对滤波结果影响甚微。

根据计算出的分类结果,对像上的每个点 p ,其 Lee 滤波窗口大小 N_L 为:

$$N_L(p) = \begin{cases} 0 & p \in PVRI \\ 3Th_\rho / \rho(p) & p \in PRI \\ 5Tl_\rho / \rho(p) & p \in PWI \\ N_{PNI} & p \in PNI \end{cases} \quad (5)$$

式(5)含义是:若像素包含非常多的信息(属于 $PVRI$),则不滤波而直接保留原始像素;若像素包含大量信息(属于 PRI),则使用 $3Th_\rho / \rho(p)$ 的滤波器步长;若像素包含少量信息(属于 PWI),则使用 $5Tl_\rho / \rho(p)$ 的滤波器步长;若像素不包含信息(属于 PNI),则使用 N_{PNI} 的滤波器步长。这里保证 N_{PNI} 是所有像素滤波步长中最大的。

3 仿射不变矩

经过滤波处理后,就可以重新提取轮廓,进行目标识别。目前多数的激光成像雷达目标识别算法使用 Hu

矩或 Zernike 矩^[4,6]，Hu 矩和 Zernike 矩具有平移、旋转及缩放不变性，但不具备仿射不变性，难以保证目标在仿射条件下的识别率。为此本文引入仿射不变矩^[9]进行激光主动成像下的目标识别。

本文选取由前三阶几何矩构成的 4 个仿射不变矩。对给定轮廓 C 和图像 $f(x,y)$ ，其几何中心矩定义为：

$$\mu_{pq} = \int_C (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x,y) ds \tag{6}$$

前 4 个仿射不变矩为：

$$I_1 = (\mu_{20}\mu_{02} - \mu_{11}^2) / \mu_{00}^4 \tag{7}$$

$$I_2 = \frac{\mu_{30}^2\mu_{03}^2 - 6\mu_{30}\mu_{03}\mu_{21}\mu_{12} + 4\mu_{03}\mu_{21}^3 + 4\mu_{30}\mu_{12}^3 - 3\mu_{21}^2\mu_{12}^2}{\mu_{00}^{10}} \tag{8}$$

$$I_3 = \frac{\mu_{20}\mu_{21}\mu_{03} - \mu_{20}\mu_{12}^2 - \mu_{11}\mu_{30}\mu_{03} + \mu_{11}\mu_{21}\mu_{12} + \mu_{02}\mu_{30}\mu_{12} - \mu_{02}\mu_{21}^2}{\mu_{00}^7} \tag{9}$$

$$I_4 = (\mu_{20}^3\mu_{03}^2 - 6\mu_{20}^2\mu_{11}\mu_{12}\mu_{03} - 6\mu_{20}^2\mu_{02}\mu_{21}\mu_{03} + 9\mu_{20}^2\mu_{02}\mu_{12}^2 - 18\mu_{20}\mu_{11}\mu_{02}\mu_{21}\mu_{12} - 8\mu_{11}^3\mu_{30}\mu_{03} + 12\mu_{20}\mu_{11}^2\mu_{21}\mu_{03} - 6\mu_{20}\mu_{02}^2\mu_{30}\mu_{12} + 12\mu_{11}^2\mu_{02}\mu_{30}\mu_{12} + 9\mu_{20}\mu_{02}^2\mu_{21}^2 + 6\mu_{20}\mu_{11}\mu_{02}\mu_{03}\mu_{30} - 6\mu_{11}\mu_{02}^2\mu_{30}\mu_{21} + \mu_{02}^3\mu_{30}^2) / \mu_{00}^{11} \tag{10}$$

4 激光主动成像下的目标识别实验

综上所述，本文基于轮廓特征去噪的激光主动成像目标识别方法为：a) 使用 Canny 算子或形态学边缘检测提取轮廓，平滑后计算轮廓曲率，将像素点划分为 3 类；b) 对不同类别的像素点，使用不同的 Lee 滤波器步长进行滤波；c) 对滤波后的图像再次提取轮廓，并计算仿射不变矩，训练分类器进行目标识别。

实验搭建一套激光主动成像识别系统：光束发射系统采用功率为 3 W 的近红外光纤耦合半导体激光器，波长为 793 nm，发散角为 5 mrad；接收系统选用 CMOS 相机，像元尺寸为 7.4 μm×7.4 μm，帧频 30 fps，图像分辨率为 1 024 pixel×1 024 pixel；目标为冲锋枪模型，目标距离 500 m。

由于神经网络能够逼近任意非线性函数，在足够的训练样本支持下，是一种性能较好的分类器。随着网络层数的增加，所需要的网络节点数将大大减少，但是过深的网络层数容易造成梯度爆炸或梯度消失，给网络训练带来很大困难。综合考虑下，本实验选择双隐含层神经网络作为分类器。提取目标的仿射不变矩，输入神经网络进行分类识别，采用 Hu 矩和 Zernike 矩作为对比算法进行验证。本文的仿射不变矩包括 4 个特征 $\{I_1, I_2, I_3, I_4\}$ 。对于 Hu 矩而言，由于每组输入 7 个组合矩特征值，输出 1 个训练值，根据 BP 神经网络神经元节点的经验公式和实验测试，选择第一隐含层和第二隐含层的神经元节点数分别为 10 和 6，由此确定的双隐含层 BP 神经网络结构如图 1 所示。对 Zernike 矩，选择第一隐含层和第二隐含层的神经元节点数分别为 35 和 16，本文的仿射不变矩，选择第一隐含层和第二隐含层的神经元节点数分别为 7 和 4。

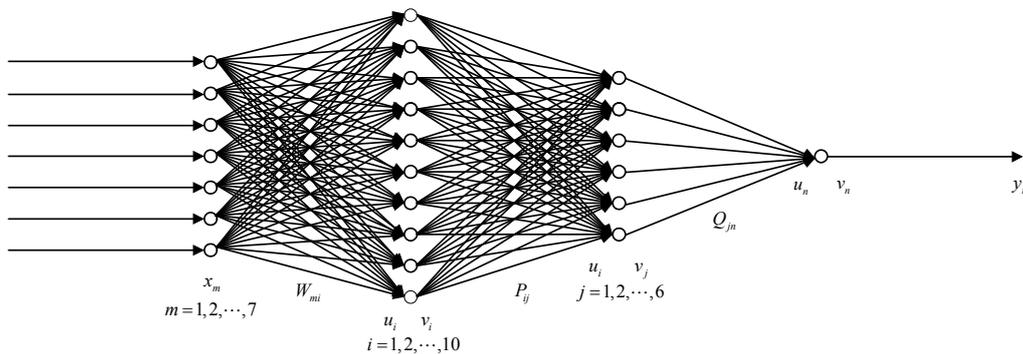


Fig.1 BP neural network structure of double hidden layer
图 1 双隐含层 BP 神经网络结构

手持目标并进行旋转、缩放和仿射等变换，采集图像，建立正反例数据库，交叉提取正反例图片中的轮廓，分别计算 Hu 矩、Zernike 矩和仿射不变矩特征输入各自的神经网络，训练权值系数。训练过程采用 $k(=10)$ 折交叉验证。在训练阶段，设定学习率、误差阈值和最大迭代次数后，使用误差后向传播算法训练网络参数。采用批量梯度下降优化算法，batchsize 为 32，采用 adam 优化方法，初始化参数：学习率 $\alpha=0.001$ 、一阶矩估计的指数衰减率 $\beta_1=0.9$ 、二阶矩估计的指数衰减率 $\beta_2=0.999$ 和 $\epsilon=10^{-8}$ 。最大迭代次数为 100 epoch，误差阈值为 0.999 9。

在测试阶段,使用含不同噪声的图像,分别提取不同的矩值输入各自的分类器进行识别。不同算法的平均识别率如图 2 所示。从图 2 可以看出,相比于 Zernike 矩和 Hu 矩,使用仿射不变矩能够大大增加目标正确识别的概率。实验证明:本文的去噪方法结合仿射不变矩应用在激光主动成像识别系统中,能够在噪声较高的条件下、在目标发生仿射变换时,取得较好的识别效果。

5 结论

在分析激光主动成像噪声性质的前提下,提出一种高噪声下的激光主动成像识别算法。根据轮廓曲率对像素点进行分,采用不同的滤波器参数去除噪声,随后提取目标轮廓,计算仿射不变矩,训练神经网络分类器进行识别。从实验结果看,本文算法在激光主动成像高噪声条件下、在目标发生仿射变换时仍然能够识别目标,并具有较高的识别率,因此具有较好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 庞春颖,张涛. 激光主动成像信噪比模型的研究[J]. 光学精密工程, 2008,16(2):319-324. (PANG Chunying,ZHANG Tao. Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2008,16(2):319-324.)
- [2] ARMBRUSTER W. Comparison of deterministic and probabilistic model matching techniques for laser radar target recognition[J]. Proceedings of the SPIE, 2005,5807:233-240.
- [3] HODGE J,KRUGER D,PARK A. Mobile target ladar ATR system[J]. Proceedings of the SPIE, 2001,4379:35-50.
- [4] PAL N R,CAHOON T C,BEZDEK J C,et al. A new approach to target recognition for ladar data[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001,9(1):44-52.
- [5] SOLIDAY S W,PERONA M T,MCCAULEY D G,et al. Hybrid fuzzy-neural classifier for feature level data fusion in ladar autonomous target recognition[J]. Proceedings of the SPIE, 2001,4379:66-77.
- [6] 马君国,黄孟俊. 基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法[J]. 中国激光, 2012,39(6):200-204. (MA Junguo, HUANG Mengjun. Target recognition algorithm based on combination moments for laser imaging radar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012,39(6):200-204.)
- [7] 李晓峰,徐军,罗积军,等. 激光主动成像图像噪声分析与抑制[J]. 红外与激光工程, 2011,40(2):332-337. (LI Xiaofeng, XU Jun, LUO Jijun, et al. Noise analyzing and denoising of intensity image for laser active imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,40(2):332-337.)
- [8] LEE J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980,2(2):165-168.
- [9] FLUSSER J,SUK T. Pattern recognition by affine moment invariants[J]. Pattern Recognition, 1993,26(1):167-174.

作者简介:



张鲁薇(1988-),女,杭州市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为激光主动成像、计算机视觉.email:zhanglw@ciomp.ac.cn.

谢京江(1954-),男,北京市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为先进光学精密加工与检测。

孙涛(1980-),男,长春市人,博士,副研究员,主要研究方向为图像处理。

王锐(1982-),男,长春市人,博士,副研究员,主要研究方向为激光主动成像。

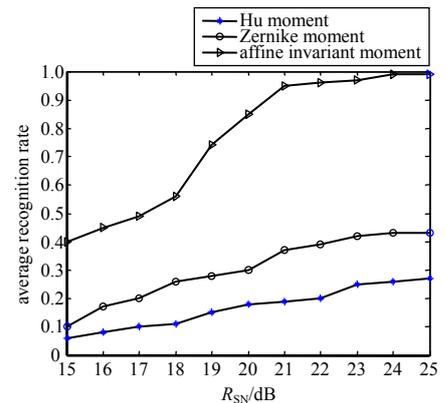


Fig.2 Average recognition rate under different R_{SN}
图 2 不同信噪比下的平均识别率