

轮廓特征包在激光主动照明识别系统中的应用

孙涛¹ 王灿进^{1,2*} 王锐¹ 王挺峰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 提出了一种结合轮廓转动惯量和特征包(BoF)算法的激光主动照明目标识别方法。介绍了转动惯量的定义, 并提出了一种多尺度轮廓转动惯量特征区域检测方法和轮廓转动惯量局部不变特征提取方法。多尺度轮廓转动惯量特征区域检测方法能够提取出包含轮廓的最小特征区域, 而轮廓转动惯量局部不变特征能够很好地描述轮廓的大小、位置、规则度等信息, 对于各种图像变换具有不变性, 并且计算效率较高。使用BoF算法统计图像的轮廓转动惯量局部不变特征, 生成归一化特征直方图作为整幅图像的特征向量, 输入训练好的支持向量机分类器进行识别。实验结果表明与基于Hu矩和BP神经网络的目标识别方法相比, 所提算法在旋转和仿射变换下的识别率分别提高7.33%和19.08%。

关键词 图像处理; 激光主动照明; 目标识别; 轮廓转动惯量; 特征包

中图分类号 TN957.52; TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0109002

Contour Bag of Features Applied in Laser Active Lighting Recognition System

Sun Tao¹ Wang Canjin^{1,2} Wang Rui¹ Wang Tinfeng¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A novel recognition method for laser active lighting system based on contour torque features and bag of features (BoF) is proposed. The concept of torque is introduced and a multi-scale contour torque feature region detector and a contour torque local invariant feature descriptor are proposed. The multi-scale contour torque feature region detector can extract the smallest feature region that contains the whole contours. The contour torque local invariant features can commendably represent the size, position, shape regularly of the contours, and they are also invariant to image transformation. What's more, the features are efficiently to compute. The contour torque local invariant features of an image with BoF algorithm is added up to generate normalized feature histogram, which is then input into the trained support vector machine (SVM) for recognition. The experimental results indicate that compared with existing laser active lighting recognition algorithm based on Hu moment and BP neural network, the recognition rate is increased by the proposed method by 7.33% in rotation transform and 19.08% in affine transform, respectively.

Key words image processing; laser active lighting; target recognition; contour torque; bag of features

OCIS codes 100.5010; 100.3008; 100.2960

收稿日期: 2014-07-16; 收到修改稿日期: 2014-07-28

基金项目: 长春市科技计划(2013270)、吉林省科技发展计划(20126015)

作者简介: 孙涛(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光主动照明模式识别方面的研究。E-mail: st_23@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: wcjps@126.com

1 引 言

激光主动照明系统^[1-2]是通过调节激光器的发散角和功率,对目标进行照明,成像探测装置收集反射光,获得较为清晰的目标强度图像。这种成像机制抗干扰能力强,适用于复杂的战场环境。

激光主动照明的最终目标是搜索、发现、识别和跟踪目标,因此在主动照明技术日渐成熟的同时,有必要开展激光主动照明目标识别技术的研究。目前国内外关于激光主动照明目标识别算法的研究,公开发表的文献较少。本文作者在前期提出结合Hu矩和BP神经网络的激光主动照明自动目标识别方法^[3],该方法在目标发生旋转时识别率较高,而在目标发生仿射变换时识别率迅速下降,原因是Hu矩并不具备仿射不变性。为此调研机制较为接近的激光成像雷达自动目标识别算法:Shen等^[4]提出小波矩算法,该方法结合了小波变换的多尺度性和正交矩的不变性,在对激光成像雷达图像的全局特征和局部细节描述能力上取得平衡,但是仍未解决仿射不变问题;Zhou等^[5]基于最小概率误差准则对地面交通目标距离像进行统计分类;Devore等^[6]设计样本对象的隶属度函数,对坦克目标进行识别。以上两种方法均需要准确的目标提取过程,在实际应用中难以实现;Zheng等^[7]模拟激光与目标模型的作用机理获得距离像的模版,使用模版匹配方法进行识别,这种方法过于依赖模版的准确度,并且计算量很大,难以实时应用;Vasile等^[8]提出结合目标的形状和尺寸信息,实现姿态独立的自动目标识别;Koksal等^[9]通过边缘跟踪技术提取距离像的边缘,并与模型数据库进行匹配,实现军用车辆的识别,取得较好的识别效果。

相对于灰度及颜色信息,激光主动照明下的目标轮廓更容易被提取。Xu等^[10]提出了轮廓转动惯量的概念,能够准确地描述轮廓的特性。借鉴Xu的思想,提出了一种基于轮廓转动惯量特征的识别方法,能够快速有效地识别目标:提出了一种多尺度转动惯量特征区域检测方法,用以提取包含目标的圆形特征区域;并提出了轮廓转动惯量局部不变特征提取算法,提取轮廓局部不变特征,统计生成特征包(BoF)描述符;然后将BoF描述符输入训练好的支持向量机(SVM)^[11]进行分类识别。

2 轮廓转动惯量

假定存在图像块 P_a , o 为 P_a 的中心, c 是 P_a 中的轮廓, p 为 c 其中一点,则 p 上的转动惯量 t 为

$$t(p) = op \times f(p), \quad (1)$$

式中 \times 表示叉乘, $f(p)$ 表示作用在 p 点的应力,计算公式为^[10]

$$f(p) = \frac{\nabla I(p)^\perp}{|\nabla I(p)|}, \quad (2)$$

式中 $\nabla I(p) = (I_x, I_y)$ 表示 p 点的梯度, $\nabla I(p)^\perp$ 表示与 $\nabla I(p)$ 垂直而长度相同的向量。转动惯量的生成过程如图1所示。

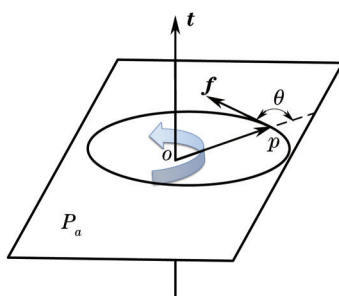


图1 转动惯量示意图

Fig.1 Contour torque diagram

根据以上定义, $t(p)$ 的模值 $\tau(p)$ 可以根据(3)式计算得到:

$$\tau_o(p) = |op| |f(p)| \sin \theta = |op| \sin \theta, \quad (3)$$

式中 $\theta \in [0^\circ, 360^\circ)$ 表示 $f(p)$ 和 op 的夹角。

对每个轮廓点的转动惯量累加,可得到图像块 P_a 的轮廓转动惯量为

$$\Gamma_o = \sum_{i=1}^n \tau_o(p_i), \quad (4)$$

式中 n 为图像块中轮廓点的数目。

根据(4)式可以推出:轮廓规则时,每点的转动惯量区域相似,累计值 Γ_o 较大,而轮廓不规则时,各点的转动惯量差别较大甚至符号相反, Γ_o 较小;轮廓越接近图像块边缘, Γ_o 越大;凸轮廓的 Γ_o 大于凹轮廓的 Γ_o 。即轮廓的转动惯量 Γ_o 能够描述轮廓是否规则、是否接近边缘、是否为凸轮廓等特征。

为了保证特征的尺度不变性,对(4)式进行归一化:

$$\hat{\Gamma}_o = \frac{\Gamma_o}{r^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_o(p_i)}{r^2}, \quad (5)$$

式中 r 是归一化的圆形区域半径。

3 基于轮廓转动惯量 BoF 特征的目标识别

3.1 MSCTR 特征区域提取

关于局部不变特征区域提取方法有许多,其中具有代表性的包括:Tuytelaars 等^[12]提出了一种基于边缘的仿射不变区域提取方法(EBR),从 Harris 角点开始沿着边缘搜寻纹理测度函数的极值点,最终得到平行四边形区域,再转化为椭圆区域。随后,Tuytelaars 等^[13]又提出了一种基于灰度极值的仿射不变区域提取方法(IBR),从角点开始沿着任意射线搜索灰度函数的极值区域。Kadir 等^[14]提出了一种显著区域检测方法(SR),对每个像素在尺度空间找到熵取极值的邻域作为候选区域,接着根据概率密度函数对这些区域进行排序,找到概率最大的 P 个区域作为特征区域。Matas 等^[15]提出了一种最大稳定极值区域算法(MSER),使用一组不同的阈值分割图像,寻找其中最稳定的区域作为感兴趣区域。Mikolajczyk 等^[16]对 Harris 角点和 Hessian 角点两种角点算子推广到仿射不变特征区域,提出著名的 Harris-affine 和 Hessian-affine 检测算子。

以上的局部不变区域提取方法并没有考虑轮廓信息,提取出的特征区域可能出现轮廓信息不丰富、不完整的情况,影响轮廓转动惯量特征提取。根据前文分析, $\hat{\Gamma}_o$ 越大,轮廓距离图像块边缘越接近。根据这个性质,通过改变邻域大小,找到 $\hat{\Gamma}_o$ 取极值的区域即为包含轮廓的最小区域。

因此提出了一种由粗到细的多尺度轮廓转动惯量特征区域检测方法(MSCTR)。该方法在尺度和图像组成的三维空间检测出 $\hat{\Gamma}_o$ 取极值的图像块作为特征区域。具体的实现步骤如下:

1) 对图像进行降采样,建立尺度空间金字塔,设每层的尺度为 t , 则 $t_i = 2t_{i-1}$, $i = 1, \dots, n$, $t_0 = \sigma$;

2) 在尺度空间的每层中,分别以每个像素为中心,取半径为 r (r 为定值)的圆形邻域,根据(5)式计算其转动惯量;

3) 在相邻的三层中,如果当前像素的 $\hat{\Gamma}_o$ 是相邻三层的 3×3 邻域中 $\hat{\Gamma}_o$ 的极值,则该点为一个 MSCTR 特征点,位置为 (x_i, y_i) , 尺度为 t_i ; 如果不是,在每层的 3×3 邻域中将 $\hat{\Gamma}_o$ 值拟合,找到极大值点的位置和对应的 $\hat{\Gamma}_o$ 值,再对这些 $\hat{\Gamma}_o$ 值沿着尺度轴拟合,找到极值点的位置 (x_i, y_i) 和尺度的最终估计值 t_i , 得到特征区域集合 $\Phi = \{x_i, y_i, t_i, r\}$;

4) 定义阈值 T , 在 Φ 中剔除 $\hat{\Gamma}_o$ 绝对值小于 T 的位置点;

5) 将 Φ 映射到原始图像坐标, 即 $\Phi' = \{x, y, r\} = \{2^i x_i, 2^i y_i, r\}$ 。

对于每个图像块, MSCTR 算法的坐标系原点为图像块的中心, 因此算法平移不变。在不同尺度上进行搜索, 得到的 $\hat{\Gamma}_o$ 相对面积归一化, 因此算法是尺度不变的。 $\hat{\Gamma}_o$ 计算的角度无关性使 MSCTR 具备旋转不变性, 而(1)式中舍弃梯度信息使其具备光照不变性。最后找到的特征区域有两种: $\hat{\Gamma}_o$ 取正极值, 即暗背景上的亮目标, 称为亮图像块; $\hat{\Gamma}_o$ 取负极值, 即亮背景上的暗目标, 称为暗图像块。

3.2 基于转动惯量的轮廓特征 FCTLIF

对每个 MSCTR 特征区域 Q , 提出一种快速轮廓转动惯量特征(FCTLIF), 其采样模式如图 2 所示:

1) 在以特征区域中心为圆形,半径为 $r/4$ 、 $r/2$ 和 $3r/4$ 圆上,分别等间隔采样 8 个点 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{i8}\}, \{O_{m1}, O_{m2}, \dots, O_{m8}\}, \{O_{o1}, O_{o2}, \dots, O_{o8}\}$ 。 OO_1 方向计算参考加速稳健特征(SURF)局部不变特征;

2) 以 O 为圆心截取半径为 r 的圆形区域,并计算该区域内的 \hat{F}_o ;

3) 分别以 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{i8}\}, \{O_{m1}, O_{m2}, \dots, O_{m8}\}, \{O_{o1}, O_{o2}, \dots, O_{o8}\}$ 为圆心,截取半径为 $r/4$ 、 $r/2$ 和 $r/4$ 的圆,计算 $\hat{F}_{o_{i1}}, \hat{F}_{o_{i2}}, \dots, \hat{F}_{o_{i8}}, \hat{F}_{o_{m1}}, \hat{F}_{o_{m2}}, \dots, \hat{F}_{o_{m8}}, \hat{F}_{o_{o1}}, \hat{F}_{o_{o2}}, \dots, \hat{F}_{o_{o8}}$

4) 组合步骤 2) 和步骤 3) 的计算结果,最终得到 25 维特征向量

$$FCTLIF(O, r) = \{\hat{F}_o, \hat{F}_{o_{i1}}, \hat{F}_{o_{i2}}, \dots, \hat{F}_{o_{i8}}, \hat{F}_{o_{m1}}, \hat{F}_{o_{m2}}, \dots, \hat{F}_{o_{m8}}, \hat{F}_{o_{o1}}, \hat{F}_{o_{o2}}, \dots, \hat{F}_{o_{o8}}\}。$$

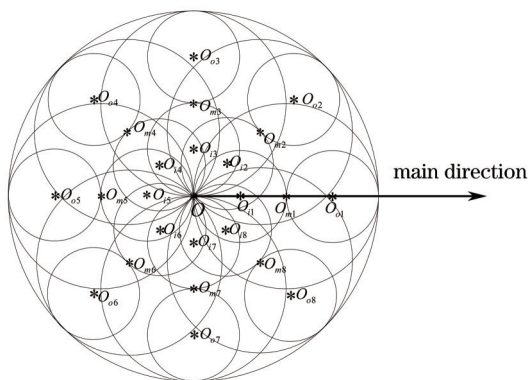


图 2 快速轮廓特征采样模式

Fig.2 Sample pattern of FCTLIF

转动惯量可以使用以下方法进行拆分计算:

$$T_o(Q) = \sum_{p \in Q} op \times f(p) = \sum_{p \in Q} (oo_r + o_r, p) \times f(p) = oo_r \times \sum_{p \in Q} f(p) + \sum_{p \in Q} o_r, p \times f(p), \quad (6)$$

式中 o_r 表示整幅图像的左上角。由(6)式可知,对于任意图像块,均只需要一次乘加操作就可以得到 $T_o(Q)$, 这无疑提高了 FCTLIF 的计算效率。

3.3 生成 BoF 描述向量

对每幅训练图像和测试图像,将会提取出大量的 FCTLIF 描述符,如果直接进行最近邻匹配,计算量很大,同时无法排除孤立噪声的影响。为此引入 BoF 技术^[7]:首先对大量训练图片提取出 FCTLIF 特征描述符,接着对这些描述符集合进行聚类,提取出聚类中心生成视觉码本;对测试图片和训练图片的每个 FCTLIF,分别计算其到各个聚类中心的距离,将其归入距离最近的一类;接着根据归类结果计算归一化直方图,这个直方图就是该图像的特征向量。每幅图像均只使用一个直方图进行表示,这一方面能够削弱噪声点的影响,增加算法的稳健性;另一方面,识别过程转化为直方图之间的比较,大大缩短了计算量。同时,通过直方图归一化,能够在一定程度上抵抗目标仿射变换的影响,使识别算法具备仿射不变性。

分类器选用支持向量机,能够克服小样本、非线性和维数灾难等问题。使用训练图片特征向量训练 SVM,随后提取测试图片特征向量输入 SVM 进行分类识别。

3.4 目标识别

综上所述,提出的基于轮廓 BoF 特征的激光主动照明目标目标识别方法具体步骤为:

- 1) 使用 MSCTR 算法提取目标图像的圆形特征区域;
- 2) 对每个特征区域,提取 25 维的 FCTLIF 特征描述符;
- 3) 对训练图片的所有 FCTLIF 特征描述向量进行聚类,得到 K 个聚类中心;
- 4) 对训练图片和测试图片,首先根据步骤 1)、2) 提取 FCTLIF 特征,接着计算每个特征到聚类中心的距离,得到其类索引,并据此计算归一化直方图(直方图横轴为类索引,纵轴为该类的归一化特征数),即为该图像的轮廓 BoF 特征向量;

5) 训练阶段,提取训练图像的轮廓 BoF 描述符输入 SVM 分类器进行训练。最后,结合训练好的分类器,输入测试图像的轮廓 BoF 特征进行分类识别。

4 实验仿真和结果分析

4.1 搭建主动照明实验系统和训练分类器

为验证提出的基于轮廓 BoF 识别算法的有效性,搭建激光主动照明目标识别系统:光源采用波长为 793 nm 的 LU0793T030 近红外激光器,实验中令其功率固定在 3 W;成像系统使用 Falcon HG 1M120CMOS 相机,将图像传输至工控机上,所成图像尺寸为 1024 pixel×1024 pixel。目标识别算法在工控机上运行。

识别目标使用如图 3 所示的模型枪,将目标放置距成像系统 450 m 处,进行观测和识别。



图3 冲锋模具枪

Fig.3 Submachine gun model

训练 SVM 分类器的过程中,使用 200 张枪支图片作为正例,200 张其他目标图片和背景图片作为反例,提取轮廓转动惯量 BoF 特征,输入 SVM 进行分类器的训练。

4.2 提取特征区域

使用提出的 MSCTR 特征区域检测方法提取特征区域,计算半径 $r=20$,尺度金字塔为 4 层。检测结果如图 4(a)所示,红色区域表示暗图像块,即 \hat{I}_0 取负极值的情况,蓝色区域表示亮图像块,即 \hat{I}_0 取正极值的情况。根据先验知识,实验中所用的目标在主动照明成像条件下呈现黑色,因此目标区域只可能为暗图像块。位于枪尖处出现的小圆形区域是由于该部分枪尖轮廓与枪体轮廓间断引起。而枪支下侧的圆形区域是由于背景墙纹理较为复杂而提取出的。剔除面积很小的特征区域,并只取暗区域的图像块,最终检测结果如图 4(b)所示。可以看出,MSCTR 特征区域检测方法对于目标周围的散斑噪声具有较好的抵抗能力,并且能够较为完整地提取目标区域,证明了所提算法的有效性。

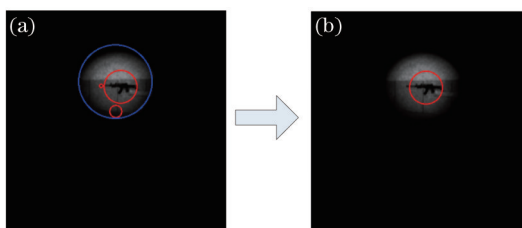


图4 MSCTR算法检测结果

Fig.4 MSCTR detection result

MSCTR 特征区域检测方法在尺度空间中搜寻 \hat{I}_0 取极值的点,与传统的阈值法^[18]提取轮廓相比,其优势在于:根据目标的先验知识,目标区域是暗图像块,MSCTR 可以剔除白色散斑和最外圈照明边界的影响,而阈值法则无法区分不同边界;提取出的目标区域具有较明显的转动惯量特性,便于后面的特征向量提取;阈值法需要实现确定阈值参数,不同的分割阈值对处理结果产生严重影响,而 MSCTR 则无此缺陷。

4.3 目标识别结果

对每帧激光主动照明结果经滤波^[19]、线性拉伸、canny 轮廓检测^[20]等预处理后,提取其轮廓转动惯量 BoF 特征量,再利用训练好的 SVM 分类器进行分类识别。对比实验采用文献[3]提出的激光主动照明目标识别方法。从图 5 和图 6 可以看出,目标发生旋转时,处于各个角度,两种算法均能够很好地识别。当目标发生较为严重的仿射变换时,双隐含层 BP 算法识别不出枪目标,而所提方法能够很好地识别。这是因为 Hu 矩特征并不具备仿射不变性,而识别方法中,检测出的 MSCTR 特征区域和生成的轮廓特征包特征均具有仿射不变性,因此算法对于发生仿射变换的目标也能够较好地识别。

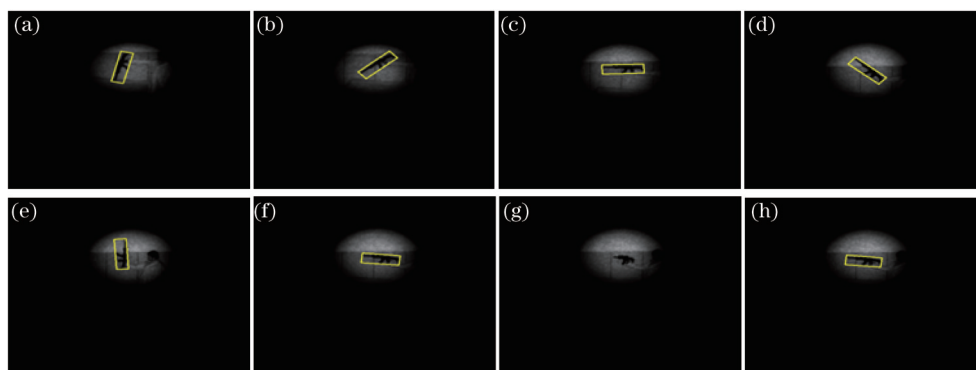


图 5 夜间 Hu 矩+BP 神经网络算法目标识别结果

Fig.5 Recognition results of rob at night using Hu moment + BP neural network

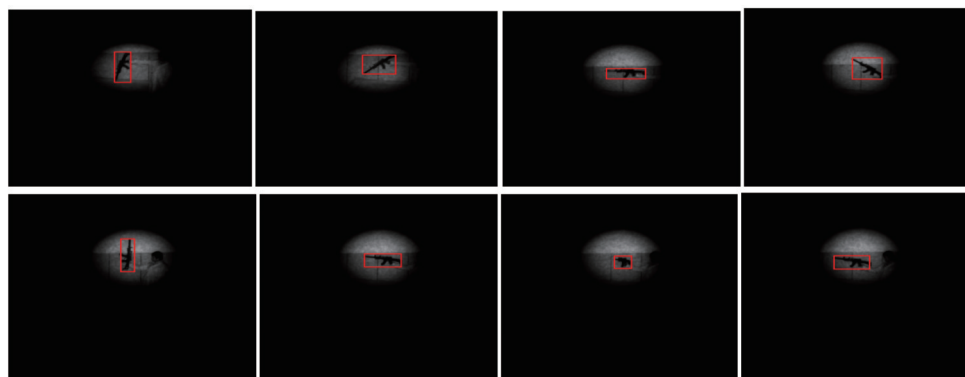


图 6 夜间所提算法目标识别结果

Fig.6 Recognition results of rob at night using proposed algorithm

统计得到的目标统计识别率如表 1 所示。从结果上看,两种算法旋转变换好于仿射变换的识别效果,这是因为仿射变换容易改变轮廓形状,导致识别失败。整体上,在目标发生旋转变换时,所提算法与文献[3]所采用的 Hu 矩+BP 神经网络算法识别率相当;在目标发生仿射变换时,所提算法比文献[3]算法识别率高,这证明所提算法具有较好的旋转和仿射不变性。实验证明所提算法在激光主动照明下能够获得较好的识别效果。

表 1 黑夜条件下目标识别统计结果

Table 1 Statistics results of target recognition at night

Target transform	Recognition rate using method in Ref.[3]	Recognition rate using proposed method
Rotation	76.21%	83.54%
Affine	40.06%	59.14%
Rotation+affine	62.26%	75.80%

5 结 论

针对激光主动照明的特点,提出了一种基于轮廓转动惯量特征的目标识别方法。提出了一种多尺度转动惯量特征区域检测方法,提取圆形的特征区域;随后计算特征区域的快速轮廓转动惯量特征,统计生成 BoF 描述符,并结合 SVM 进行分类识别。实验证明提出的特征区域检测方法和特征向量提取方法均具有较好的旋转、仿射不变性,适用于激光主动照明系统。

参 考 文 献

- 1 Li Ziqin, Li Qi, Wang Qi. Noise characteristic in active laser imaging system by statistic analysis[J]. Chinese J Laser, 2004, 31(9): 1081-1085.
李自勤, 李 琦, 王 骐. 由统计特性分析激光主动成像系统图像的噪声性质[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1081-1085.

- 2 Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Hybrid filter based on pixel classification for laser active imaging[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(3): 0309001.
王灿进, 孙 涛, 陈 娟. 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309001.
- 3 Wang Canjin, Sun Tao, Shi Ningning, *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1639-1647.
王灿进, 孙 涛, 石宁宁, 等. 基于双隐含层BP算法的激光主动成像识别系统 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1639-1647.
- 4 D Shen, H H S Ip. Discriminative wavelet shape descriptors for recognition of 2-D pattern [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(2): 151-165.
- 5 X Zhou, M D DeVore. Shape recognition from three-dimensional point measurement with range and direction uncertainty[J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 127-202.
- 6 M D Devore, X Zhou. Minimum probability of error recognition of three-dimensional laser-scanned targets[C]. SPIE, 2006, 6234: 623407.
- 7 Q F Zheng, S Z Der, H I Mahmoud. Model-based target recognition in pulsed ladar imagery[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2001, 10(4): 565-572.
- 8 A N Vasile, R M Marino. Pose-independent automatic target detection and recognition using 3D laser radar imagery[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005,15(1): 61-78.
- 9 A E Koksai, J H Shapiro, W M Wells. Model-based object recognition using laser radar range imagery[C]. SPIE, 1999, 3718: 256-266.
- 10 Y Xu, Y H Quan, Z M Zhang. Contour-based recognition[C]. Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012. 3402-3409.
- 11 Li Jiang, Guo Lihong. Target threat assessment using improved SVM[J]. Optics and Precision Engineering, 2014,22(5): 1354-1362.
李 姜, 郭立红. 基于改进支持向量机的目标威胁估计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1354-1362.
- 12 T Tuytelaars, G L Van, L D'haene, *et al.*. Matching of affinely invariant regions for visual servoing[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, 2: 1601-1606.
- 13 T Tuytelaars, L V Gool. Matching widely separated views based on affine invariant regions[J]. International Journal on Computer Vision, 2004, 59(1): 61-85.
- 14 T Kadir, A Zisserman, M Brady. An affine invariant salient region detector[C]. European Conference on Computer Vision, 2004, 3021: 228-241.
- 15 J Matas, O Chum, M Urban, *et al.*. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions[J]. Image and vision computing, 2004, 22(10): 761-767.
- 16 K Mikolajczyk, C Schmid. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63- 86.
- 17 G Csurka, C R Dance, L X Fan, *et al.*. Visual categorization with bags of keypoints[C]. ECCV Workshop on Statistical Learning in Computer Vision, 2004. 1-22.
- 18 He Zhiyong, Sun Lining, Huang Weiguo, *et al.*. Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2315-2323.
何志勇, 孙立宁, 黄伟国, 等. 基于Otsu准则和直线截距直方图的阈值分割[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2315-2323.
- 19 Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Hybrid filter based on pixel classification for laser active imaging[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0309001.
王灿进, 孙 涛, 陈 娟. 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309001.
- 20 Jiang Li, Wu Weiren, Zhang Zhijing, *et al.*. Automatic detection of micro image edges for micro accessories[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 224-232.
姜 黎, 吴伟仁, 张之敬, 等. 微小型结构件显微图像边缘的自动识别[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 224-232.

栏目编辑: 张浩佳