

距离选通激光成像空间定位模糊 C 均值聚类分割法

曹忆南^{1,2}, 王新伟², 周燕²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083)

摘要: 针对距离选通激光成像对比度低、照度不均、图像模糊的特点, 提出了一种基于空间定位的模糊 C 均值聚类方法 (SPFCM) 对目标进行分割。传统的模糊 C 均值聚类法存在以下缺点: 一是需要预先获得目标分类数量, 自适应性较差; 二是对空间信息不敏感, 导致目标轮廓不完整以及错误分类。针对上述缺陷, 文中对传统算法进行了改进, 引入了初定位的概念, 首先利用最大类间方差法 (Otsu 法) 和数学形态学工具对子目标进行初步定位, 再将其形心方位信息和灰度信息融合到聚类过程中, 以较短的迭代过程实现不同目标的归类。实验结果证明基于空间定位的模糊 C 均值聚类法可以完整、有效地对距离选通激光图像进行提取分割, 处理时间优于传统 FCM。

关键词: 距离选通; 图像分割; 模糊 C 均值聚类; Otsu 法; 初定位

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2682-05

Spatial positioning fuzzy C-means algorithm in segmentation of range-gated image

Cao Yinan^{1,2}, Wang Xinwei², Zhou Yan²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: A fuzzy C-means algorithm based on spatial positioning was proposed to do the segmentation for range-gated image, which had the feature of low contrast, uneven illumination, and blurring. Object extraction is essential in image processing, providing the basic and necessary information for other methods. Traditional FCM algorithm needs the number of classes to cluster the data, which limits its adaptability. It also lacks in sensitivity of spatial information, resulting in misclassification as well as incomplete extraction of objects. For the above defects, the traditional algorithm was improved by pre-positioning. Firstly, median filter, Otsu method, and mathematical morphology method were applied to do the initial segmentation, obtaining the centroid and grayscale information of all targets, which took very short time. Then both of the centroid and grayscale information were used in clustering process, accomplishing the classification with fewer iterations and less time consuming than traditional FCM. Experiments indicate that the the Spatial Positioning FCM (SPFCM) is effective in segmentation of range-gated image, the targets can be extracted more completely and faster than traditional FCM algorithm. This

收稿日期: 2013-02-07; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

作者简介: 曹忆南(1988-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理及嵌入式系统方面的研究。Email: caoyinan@semi.ac.cn

导师简介: 周燕(1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事光电成像、光电信号检测方面的研究。Email: zhouyan@semi.ac.cn

new method can be applied to navigation, tracking and surveillance with range-gated imaging system.

Key words: range-gated; image segmentation; fuzzy C-means clustering; Otsu; pre-positioning

0 引言

距离选通激光成像系统可有效抑制后向散射等背景噪声,提高了激光成像系统的信噪比^[1]。此外,通过主动控制选通门的延时和脉宽还能够对目标进行精确测距^[2],因而广泛应用于导航、远距离侦察^[3]等民用和军事领域^[4]。对于被测目标而言,能否从图像中有效分割出来成为了后续处理与分析的先决条件。作为一种激光主动成像,由于光源和接收器件的限制,距离选通成像存在对比度低、照度不均、图像模糊等特点^[5]。模糊 C 均值聚类法(FCM)作为一种非监督的聚类算法,具有收敛速度快、特征维度高等优点^[6],常用于图像分割。然而传统的 FCM 算法需要预先知道分类数量,而且对像素的空间信息不敏感,容易导致分割结果不连续。在聚类数量较多的情况下,FCM 算法迭代次数较多,实时性受到限制。对此 Alan 等人^[7]提出自适应空间约束的 FCM 算法、孟丽敏等人^[8]提出基于空间邻域加权的 FCM 算法对 MR 图像进行分割,但这两种算法均只考虑到相邻像素的灰度信息,只能对局部关联性加以约束,而且均需要预先给定分类数,需要手工输入。针对距离选通激光成像的特点,文中提出一种基于空间定位的 FCM 算法,首先将图像进行快速粗分割,再将子目标空间和灰度信息融入传统 FCM 算法中,与 FCM 相比,不仅能够自适应确定分类数量,还能保证分类的完整性和准确性,同时运算速度也得到了提升。

1 模糊 C 均值算法

模糊 C 均值聚类法(FCM)是一种常用的图像分割算法,通过对目标函数的迭代运算进行类别归属。FCM 把 n 个像素分为 C 个模糊类,并根据每个像素与聚类中心的距离对目标函数进行迭代计算,目标函数 W 为:

$$W(U, V_1, \dots, V_c) = \sum_{i=1}^c W_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

式中: d_{ij} 为每个像素到每个分类集合的距离; μ_{ij} 为每个像素对各个分类的隶属度,通过归一化,每个像

素对各个分类集合的隶属度之和为 1,即:

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1, \forall j=1, \dots, n \quad (2)$$

式中: m 为模糊度, m 值越大,分类结果柔性越大;而 m 为 1 时,聚类过程则退化为硬 C 均值聚类(HCM)。

使用拉格朗日乘数法构造新的函数,可使目标函数达到最小值,此时满足最小值的必要条件为:

$$V = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m h_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m} \quad (3)$$

以及

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (4)$$

式中: h_j 为像素的灰度值。通过反复迭代聚类中心 V_i 和隶属度矩阵 μ_{ij} ,可以求出目标函数 W 的最小值。

2 融合目标基本信息的模糊 C 均值聚类法

传统模糊 C 均值聚类法存在以下三个问题,一是需要预先手动输入分类数量,大大降低了系统的智能程度;二是需要有目标信息的先验知识,如果初始聚类中心信息与实际目标信息差别较大,会大大增加聚类的迭代次数;三是对分类集合的空间信息不敏感,具有灰度值相似而空间距离较远的点很有可能被归入一类,造成错误分类结果。因此,文中首先用传统快速算法对目标进行方位和灰度信息的粗提取,以此结果作为聚类算法的附加信息,不仅可以更精确地对目标进行分类,还能减少迭代运算量,提升聚类效率。

2.1 基于 Otsu 算法获取目标的基本信息

对于距离选通激光成像等图像而言,存在对比度低、目标边缘较暗且整体亮度不均等特点。比较常用的目标提取方法包括边缘提取法和阈值分割法等。由于亮度不均,基于边缘轮廓的特征提取法将会产生不连续边缘,造成后续计算非常复杂^[9]。而基于全局阈值的方法虽然会导致无法提出完整目标,但计算速度快,容易实现^[10],而且对于文中目标的粗提

取而言,最重要的就是如何快速获得目标的大体位置和灰度信息,对于目标是否完整并不关心。Otsu 法是基于最大类间方差的全局阈值法,利用该算法可对图像进行初步的目标背景分离,其原理如下^[11]:

设 $h(x, y)$ 为 $M \times N$ 个像素的图像在 (x, y) 点处的灰度值,灰度级为 L ,背景与目标的分割阈值记为 T ,目标像素数占整个图像的比例为 ω_0 ,目标像素的平均灰度为 μ_0 ;背景像素数占整个图像的比例为 ω_1 ,背景像素的平均灰度为 μ_1 。图像总体平均灰度为 μ ,类间方差为 g ,设每个灰度级像素出现的概率为 p_k ,目标类的方差为:

$$\sigma_1 = \frac{\sum_{k=T}^{L-1} (k - \mu_1)^2 p_k}{\omega_1} \quad (5)$$

背景类和目标类之间的类间方差为:

$$g = \omega_0 \sigma_0 + \omega_1 \sigma_1 \quad (6)$$

当类间方差最大时,目标和背景的分割效果越好,此时对应的阈值 T 则为最优阈值。算法步骤如图 1 所示。

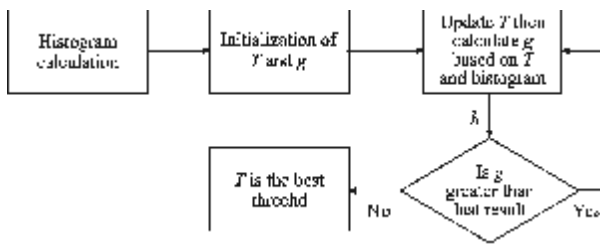


图 1 Otsu 法计算步骤
Fig.1 Otsu algorithm

2.2 基于空间定位的模糊 C 均值聚类

传统模糊 C 均值聚类法只利用到每个像素的灰度信息,会把同一目标上灰度值有差异的像素分为不同类别。文中传统算法加以改进,根据图像初步分割,将每个子目标的灰度信息和位置信息融合到聚类算法中,最终得出了基于空间定位的模糊 C 均值聚类。

针对图像灰度不均及存在噪点的特点,首先对其进行中值滤波处理,达到去噪和增强边缘的目的。再经 Otsu 法分割后,图像被分为背景区和目标区两部分区域。利用八邻域法对目标区进行归并划分,计算每个子目标的形心和平均灰度值,作为改进型聚类算法的加权信息。考虑到初步分割会将单个目标分割为多个子目标,若需要对图像中主要目标进行

分割,则对于面积小于阈值 T_s 的子目标进行删除处理,对于较大图像而言,将 T_s 设为 1 000,则可删除面积在 1 000 以下的目标,在一定程度上排除伪目标的干扰。至此,图像初步分割完成。

在完成目标的初步分割后,获得 C 个子目标类,加上背景类,整个聚类空间中共有 $C+1$ 个聚类集合。为了克服传统 FCM 算法对空间信息不敏感的缺陷,以每个子目标类的平均灰度值和形心作为聚类特征将传统聚类中心从一维扩展到二维,设像素为 $h(x, y)$, $V\{v_1, v_2, \dots\}$ 为聚类灰度中心集, $S\{s_1, s_2, \dots\}$ 为聚类空间中心集。同时,每个像素的隶属度也从一维扩展到二维,其表达式为:

$$\mu_{ij}' = \frac{1}{\sum_{k=1}^{C+1} \left[\alpha^* \left(\frac{dg_{ij}}{dg_{ij}} \right)^{\frac{2}{m-1}} + \beta^* \left(\frac{ds_{ij}}{ds_{ij}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]} \quad (7)$$

其中,

$$dg_{ij} = \|h_j - v_i\| \quad (8)$$

式中: h 为像素的灰度值,

$$ds_{ij} = \sqrt{\|x_i - s_x\|^2 + \|y_i - s_y\|^2} \quad (9)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为像素的横坐标和纵坐标。

即 dg 为样本像素到聚类中心的灰度距离, ds_i 为样本像素到聚类中心的空间距离。 α 为灰度距离的加权指数,简称为灰度加权指数; β 为空间距离的加权指数,简称为空间加权指数。根据新的隶属度矩阵,对聚类中心进行更新。由于子目标的大体位置已经确定,每次聚类迭代时目标形心变化很小,而不同目标集合的灰度值会存在差异,在减少运算量且不影响聚类效果的前提下,该算法只对灰度中心进行更新,则更新后的灰度中心为:

$$v_{g_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}'^m h_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}'^m} \quad (10)$$

新的目标函数为:

$$W'(U, V_1, \dots, V_d) = \sum_{i=1}^{C+1} W_i' = \sum_{i=1}^{C+1} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}'^m (\alpha^* dg_{ij}^2 + \beta^* ds_{ij}^2) \quad (11)$$

在新算法中,加入的空间聚类中心 S 对聚类结果影响很大,由于对每个集合引入了空间约束的概念,在灰度值近似的情况下,像素距离子目标形心越近,被划分到该目标的可能性越大。而灰度加权指数 α 和空间加权指数 β 则对灰度距离和空间距离的贡献度加以了调节, α 越大,像素的灰度值对分类结果

影响较大;反之 β 越大,像素坐标到目标形心的距离对分类结果影响较为明显。通过空间和灰度两方面加权控制,可以减少同一目标上像素因灰度差异被误分为不同目标、以及不同目标像素上目标因灰度相似被误分为同一目标的现象发生。

3 算法流程

文中 SPFCM 算法的具体实现步骤为:

- (1) 对源图像进行中值滤波。
- (2) 对滤波后的图像进行 Otsu 法分割。
- (3) 将目标区进行八邻域连通域归并,删除面积小于设定阈值 T_s 的子目标,并求出每个剩余子目标的平均灰度值和形心。
- (4) 根据 Step3 中的子目标数(包含背景类)、目标平均灰度信息和形心位置信息确定初始聚类数量和聚类中心,同时初始化隶属度矩阵。
- (5) 根据公式(8)、(9)、(7)计算距离矩阵和隶属度矩阵。
- (6) 根据公式(10)更新聚类中心中的灰度信息,同时空间信息保持不变。
- (7) 根据公式(11)计算目标函数,若这一次与上一次 W 之差的绝对值小于阈值 ε ,则停止迭代,否则返回步骤(5)。

4 实验结果与分析

文中选取单目标和多目标的距离选通激光成像图片,分别用 Otsu 法、FCM 法、SPFCM 法对目标进行提取,图像大小均为 360×288 ,分割后的不同目标用不同灰度标识。处理计算机 CPU 为 Intel Core i5-2410 M,内存 4 GB。

图 2(a)是瑞典 FOI 机构获取的距离选通激光海上单目标源图像^[12],目标距离约 1 200 米,选通门宽 164 ns。由于激光回波能量较弱,船体对比度较低、边缘模糊,同时水面对激光的二次反射现象也比较明显。图 2(c)为 Otsu 法分割结果,受单一阈值的影响,船体边缘被划分为背景,完整性缺失严重;图 2(e)为利用 Otsu 法分割后灰度信息作为聚类依据的 FCM 分割结果,船体完整性得到改善,但仍存在缺失,且水面反射部分被划分为目标;图 2(f)为 SPFCM 分割结果,绝大部分船体被分割为目标,且仅有小部分水

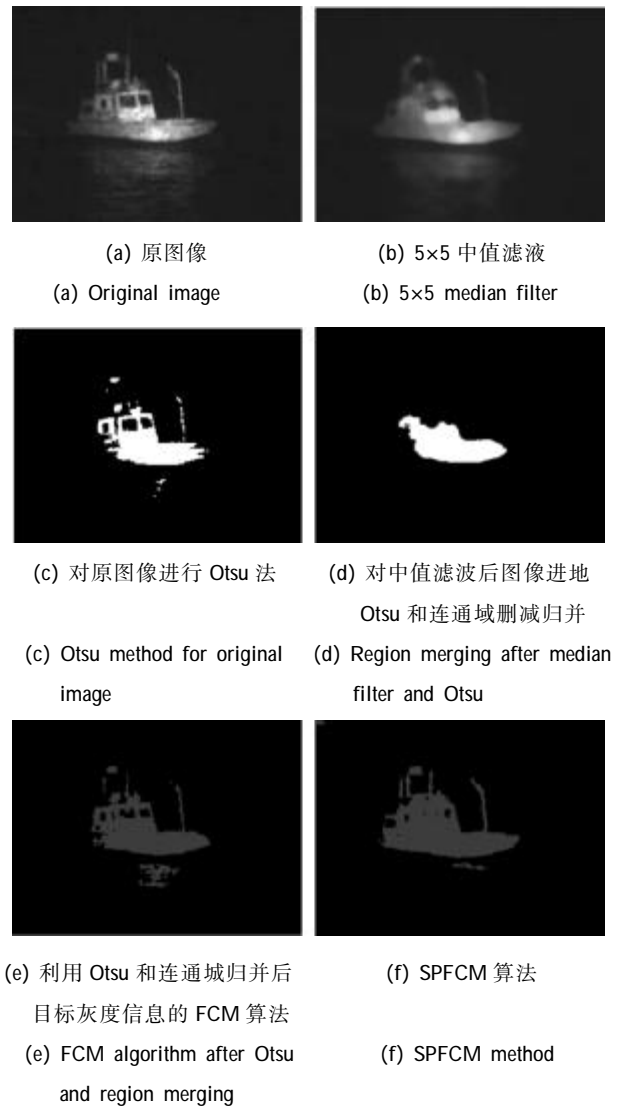


图 2 距离选通单目标成像分割结果

Fig.2 Segmentation of single-target range-gated image

面反射被误分类,分割结果较好。图 3(a)是通过实验室自行研制的设备获取的距离选通激光多目标源图像,目标距离约 130 m,选通门宽 80 ns。图 3(c)中的 Otsu 法虽然将大部分目标像素提取出来,但目标不完整,同时不能将三个目标区分开来;而图 3(e)中的 FCM 法由于只利用到灰度特征,受到背景物的严重影响,大部分像素存在误分类现象;图 3(f)为 SPFCM 分割结果,结果表明三个目标的完整性得到了很好地保留,每个目标上的大部分像素被划为不同类别,并以不同灰度标识出来,仅有少部分像素被误分类,误分类主要出现于边缘部分,这是由于这部分像素距离目标形心较远,空间加权较小造成的,在以后的工作中需要进一步改善。

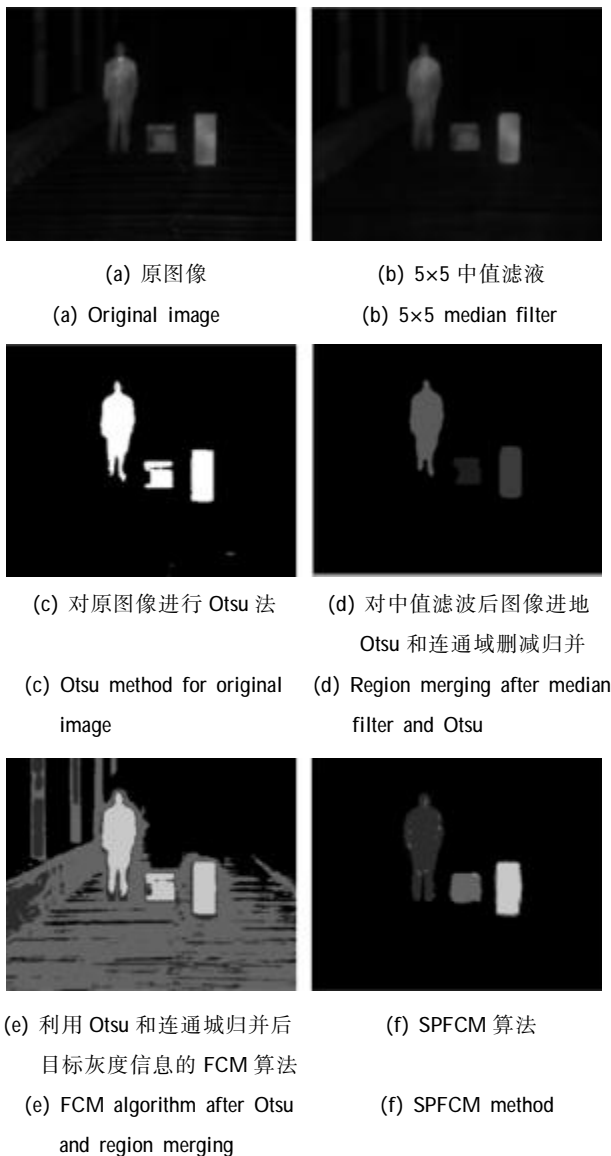


图 3 距离选通多目标成像分割结果

Fig.3 Segmentation of multi-target range-gated image

在聚类算法中,算法的复杂度和实时性主要由迭代次数和时间决定。通过比较发现,虽然 SPFCM 每次迭代时间要长于 FCM(见表 1),但迭代次数远小于 FCM(见表 2),因此无论是分割结果还是分割时间上都优于 FCM。而 Otsu 法虽然处理时间短,但由于其阈值的硬性,导致分类结果不理想。SPFCM 算法则使用了 Otsu 法初步分割的结果作为聚类依据,提供了有效目标的数量信息,并将聚类信息扩展为灰度信息和形心两个维度,在充分权衡了灰度和空间两方面贡献后,对像素的归属做出合理判断,与传统 FCM 算法相比分割效果更好。因此,SPFCM 法对低对比度目标分割是有优势的。

表 1 不同分割算法所耗时间比较(单位:ms)

Tab.1 Comparison of time consumption with different algorithms(unit: ms)

Image type	Otsu	FCM	SPFCM
Single-target	62	3 089	1 560
Multi-target	63	3 570	2 788

表 2 FCM 与 SPFCM 迭代次数比较

Tab.2 Comparison of times of iteration

Image type	FCM	SPFCM
Single-target	11	5
Multi-target	13	6

5 结 论

针对低对比度激光图像,文中对传统 FCM 法进行了改进和优化,提出了一种基于空间定位的聚类法,首先利用 Otsu 法对目标进行初步分割,利用分割后以面积大于一定阈值的子目标数量作为分类数,再以每个子目标的灰度信息和形心坐标信息作为聚类中心,并对这两个聚类中心维度赋予权值,以调节算法的柔性及鲁棒性。文中算法的主要优势在于:1.初步分割能够确定分类数量,便于聚类;2.充分利用了像素的空间信息,能够克服因灰度相近但空间距离较远而被误划分为同一目标、以及因灰度存在差异但空间距离较近而被误划分为不同目标的问题。同时减少了聚类迭代次数,增强了聚类分割的实时性。

参考文献:

- [1] Zhao Yan, Zhai Baichen, Wang Jianli, et al. Design and implementation of the laser range-gating imaging synchronization control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 526-529. (in Chinese)
赵岩, 翟百臣, 王建立, 等. 激光距离选通成像同步控制系统的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(5): 526-529.
- [2] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(24): 4705-4710.
- [3] Baker I M, Duncan S S, Copley J W. A low-noise laser-gated imaging system for long-range target identification[C]// *SPIE*, 2004, 5406: 133-140.

(下转第 2696 页)

- 黄红莲, 黄印博, 饶瑞中. 内混合强吸收气溶胶粒子光散射的等效性[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1066-1070.
- [4] Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by external mixture of atmospheric aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1099-1108. (in Chinese)
饶瑞中. 外混合气溶胶粒子光散射的等效性 [J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1099-1108.
- [5] Xu bo, Huang Yinbo, Fan Chengyu, et al. Analysis of equivalent optical properties of heterogeneous aerosols in stratosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1587-1592. (in Chinese)
徐博, 黄印博, 范承玉, 等. 平流层非均匀气溶胶粒子等效光学特性的数值分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1587-1592.
- [6] Bazell D, Dwek E. The effects of compositional in homogeneities and fractal dimension on the optical properties of astrophysical dust[J]. Astrophysical Journal, 1990, 360(9): 142-150.
- [7] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption by non-spherical dielectric grains [J]. Astrophys J, 1973, 186: 705-714.
- [8] Draine B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. Astrophys J, 1988, 333: 848-872.
- [9] Liu Yafeng, Huang Chaojun, Lou Benzhuo. Numerical calculation of aerosol optical properties based on infrared band [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1605-1609. (in Chinese)
刘亚锋, 黄朝军, 娄本浊. 红外波段气溶胶粒子光学特性的数值计算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1605-1609.
- [10] Jullien R, Botet R. Aggregation and Fractal Aggregates[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1987: 46-50.
- [11] Choy T C. Effective Medium Theory: Principles and Applications[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999: 10.
- [12] Rouleau F, Martin P G. Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon[J]. The Astrophysical Journal, 1991, 377(8): 526-540.
- [13] Draine B T. Tabulated optical properties of graphite and silicate grains [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1985, 57: 587-594.

.....
(上接第 2686 页)

- [4] Wang Dongmei, Zhang Tao, Yan Feng. Research on range-gated Laser active illuminating technology [J]. Control and Automation Publication Group, 2006, 7(1): 48-50. (in Chinese)
王冬梅, 张涛, 闫丰. 基于距离选通的激光主动照明技术的研究[J]. 微计算机信息, 2006, 7(1): 48-50.
- [5] Dai Dede, Sun Huayan, Han Yi. Image quality assessment of laser active imaging system [J]. Laser and Infrared, 2009, 40(9): 986-990. (in Chinese)
戴得德, 孙华燕, 韩意, 等. 激光主动成像系统目标图像质量评价参数研究[J]. 激光与红外, 2009, 40(9): 986-990.
- [6] He Yue, Shen Xuanjing, Zeng Zheng. Effective noise reduction fuzzy C-means algorithm for image segmentation [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(29): 211-213. (in Chinese)
何月, 申铨京, 曾铮. 一种有效抑制噪声的模糊 C 均值图像分割算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(29): 211-213.
- [7] Alan Weechung Liew, Hong Yan. An adaptive spatial fuzzy clustering algorithm for 3-D MR image segmentation [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(9): 1063-1075.
- [8] Meng Limin, Song Yuqing, Zhu Feng. Research on fuzzy C-means clustering algorithm based on spatial weighted and its application [J]. Application Research of Computers, 2010, 10: 3968-3970. (in Chinese)
孟丽敏, 宋余庆, 朱峰. 基于空间邻域加权的模糊 C_均值聚类及其应用研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 10: 3968-3970.
- [9] Shan Lijie. Target extraction method based on sub-block feature [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(6): 597-599. (in Chinese)
单丽杰. 基于子图像特征的目标提取方法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(6): 597-599.
- [10] Wang Haiyang, Pan Delu, Xia Deshen. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(9): 101-106. (in Chinese)
汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现[J]. 自动化学报, 2007, 33(9): 101-106.
- [11] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.
- [12] Richard L. Espinola, Ove Steinvall, Magnus Elmquist. Modeling of 1.5 μm range gated imaging for small surface vessel identification[C]//SPIE, 2010, 7835.