

文章编号: 1672-8785(2016)06-0040-07

基于超像素分割的红外图像 细节增强算法

杨 龙 李范明 刘士建

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 高动态范围的红外图像压缩和细节增强有利于提高人眼获取图像中关键细节信息的能力。因此, 它是红外成像的重要研究课题之一。针对传统的全局色阶重建不能最优呈现红外图像细节层和基础层的问题, 设计了对红外图像局部进行色阶重建的方案, 并提出了一种基于超像素分割的红外图像动态范围压缩和细节增强方法。该方法首先采用超像素分割算法将原始红外图像分割成多个自相似子区域, 然后对各个子区域进行压缩和细节增强。实验结果表明, 该方法可以更有效地压缩和增强红外图像, 在高动态范围压缩图像的同时能很好地保留原始图像的细节信息。

关键词: 红外图像; 动态范围; 细节增强; 色阶重建

中图分类号: T9391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.06.008

Detail Enhancement Algorithm of Infrared Images Based on Superpixel Segmentation

YANG Long, LI Fan-ming, LIU Shi-jian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The compression and detail enhancement of infrared images in high dynamic range is helpful to the improvement of the ability of human eyes to obtain key detail information in images. Therefore, it is one of the important research topics in the field of infrared imaging. To solve the problem that the traditional global tone reproduction can not present the detail layer and base layer properly, a scheme for local tone reproduction of infrared images is designed and a method for dynamic range compression and detail enhancement of infrared images based on superpixel segmentation is proposed. Firstly, the superpixel segmentation algorithm is used to segment an original infrared image into multiple self-similar subregions. Then, compression and detail enhancement are implemented for each subregion. The experimental results show that the method can compress and enhance infrared images in high dynamic range more effectively. Moreover, it can preserve the detail information of original images well while compressing images in high dynamic range.

Key words: infrared image; dynamic range; detail enhancement; tone reproduction

收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2011AA7031002G)

作者简介: 杨龙 (1989-), 男, 湖北汉川人, 博士研究生, 主要研究方向为红外成像电路与系统。

E-mail: yanglongsitp@163.com

0 引言

随着红外技术的发展, 红外探测器的成像质量越来越高, 高精度高分辨率模数转换芯片的成熟使得红外探测器采集的红外图像的动态范围越来越大。红外图像的动态范围越大, 就越能准确精细地反映现实场景。与之相矛盾的是市场上主流显示设备的动态范围通常只有 28:1, 不能高质量地显示高动态范围的红外图像。因此, 如何在低动态范围显示输出设备上显示高动态范围的红外图像并尽可能多地保留原始图像中的细节部分, 是红外成像领域重要的研究课题之一^[1]。将高动态范围图像显示在低动态范围的显示设备上, 需要通过图像压缩算法对原始图像的动态范围进行压缩, 这种方式称为色阶重建 (Tone Reproduction)^[2] 或者色阶映射 (Tone-Mapping)^[2]。目前, 色阶重建已经成为一种非常有效的显示技术, 其核心是将图像采集设备采集的高动态范围图像按一定的映射方式转换为显示输出设备能接受的低动态范围图像。

国内外出现了很多关于研究动态范围压缩的文献, 文献中的各种色阶重建算法大致分为 2 类: 全局色阶重建算法和局部色阶重建算法。其中, 全局映射算子对全部像素进行统一处理, 计算的复杂度较低, 并且能保持原始图像的整体印象, 但未考虑到图像的局部特征, 对于图像边缘和较多细节信息的处理不够完善。局部色阶重建算法增强了图像层次和局部细节信息的再现能力, 弥补了全局色阶重建算法的不足, 但局部色阶重建算法的计算量一般较大, 算法效率较低。

1 全局色阶重建算法

全局色阶重建算法是对图像中的每个像素使用预先指定的或者根据图像内容动态提取的变换曲线进行动态范围变换, 变换后图像的动态范围适于常规显示设备显示^[3]。以动态范围为 214:1 的红外图像为例, 为使其能在常用显示输出设备上显示, 需将原始高动态范围红外图像转换为低动态范围的红外图像, 最直接最简便的转换方法是 14 位的红外图像数据的灰度直

方图压缩为图像深度为 8 的直方图。一种最简单的映射是对原始图像的每个像素进行统一缩放。

$$y = \begin{cases} k(x - h), & x > h \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中, y 为映射后图像的各像素值, x 为变换前图像的各像素值, k 为缩放因子。 h 为设定的阈值, 其值会直接影响映射后的图像质量; 取值过高会使变换后的图像失真, 取值过低会使变换后的图像对比度下降。

直接转换法的实现方式简单, 容易操作, 但原始图像失真严重, 转换后的图像显示不理想, 图像的细节信息丢失严重, 不利于在红外图像中观察目标, 甚至会丢失目标。全局色阶重建算法一种常见的方式是用一条固定的变换曲线对图像进行灰度重映射, 用到的变换曲线包括折线变换曲线、对数变换曲线、指数变换曲线以及正弦变换曲线, 其变换关系如图 1 所示。

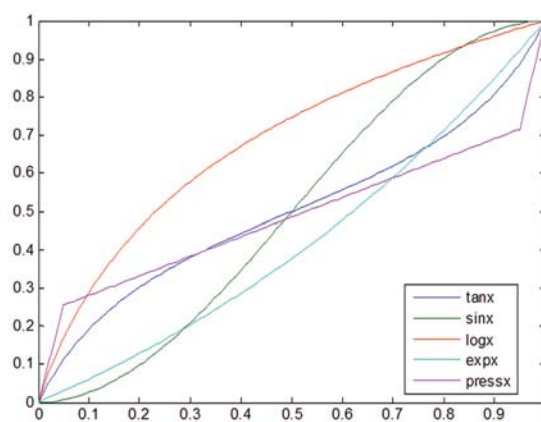


图 1 常用的变换曲线

整体变换公式表达:

$$y = \begin{cases} kf(x - h), & x > h \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

全局色阶重建算法对图像采用统一的映射方法, 算法简便且计算效率高, 但该算法对亮度分布比较均匀的图像很难取得较好的映射效果, 无法保证局部的对比度, 会导致图像的细节和亮度信息一定程度地丢失。由于全局色阶重建算法没有考虑图像的局部特征, 对图像边缘



图 2 全局色阶映射效果图

和细节信息较多的区域的处理也不够完整,因此图像的细节信息丢失严重,图像的视觉效果差。图 2 是采用常用的几种变换曲线对同一幅红外场景进行灰度重建的实现,不同的变换曲线能实现不同的效果。但从图 2 可以看出,这几种变换曲线的实现效果都不太理想,图像的细节部分没能很好地展现出来。

2 局部色阶重建算法

为克服全局色阶重建算法的缺点,国内外对高动态范围图像 (High Dynamic Range Image, HDRI) 色阶重建算法的研究由全局色阶重建转向局部色阶重建。局部色阶重建算法对图像的不同区域采用不同的变换曲线,在调整图像某像素的灰度值时也将该像素的空间信息考虑在内。因此,同一图像中两个灰度值相同的像素点能被映射到不同的值。

全局色阶重建算法存在一些固有的缺点,转换效果不理想,图像的细节信息丢失严重。为

克服全局色阶重建算法固有的缺点,保留原始图像中更多的细节信息,本文提出一种新型的局部色阶重建算法。该算法将区间转换和局部色阶重建相结合,通过超像素分割算法 (SCLI)^[4]实现红外图像按不同灰度级数的分割,将图像像素灰度值接近的像素点尽可能分割到同一个区域,最后对不同区域采用不同的方法进行色阶重建。为了增强图像的细节部分和得到红外图像中不同温度背景区域的细节图案,需要提取出红外图像的细节信息以进行增强处理。

3 本文算法流程

通过分析深度为 14 位的原始红外图像的特点,本文提出了一种基于超像素分割的局部色阶重建算法,实现了对高动态范围红外图像的细节增强处理。该算法用于红外图像细节增强时效果良好。

算法的操作步骤如下:

(1) $F(x)$ 为待增强的红外图像;

(2) 超像素分割算法完成对红外图像 $F(x)$ 的分割, 得到过分割图像 $F(x)[SP]$;

(3) spDbscan 算法对过分割图像 $F(x)[SP]$ 进行合并, 得到局部区域图像 $W(x)[N]$;

(4) 获取分割后每个图像区域 $W(x)$ 的灰度均值 u 和方差 var ;

(5) 完成对分割后的各个区域的色阶重建或图像增强;

采用超像素分割和合并算法将红外图像分割为几个灰度值相近的区域后, 分析各区域的特点, 对不同的区域采用不同的映射算法。

3.1 超像素分割算法

超像素分割算法是由 Achanta 等人^[4,5]提出的将数字图像细分为多个图像子区域的算法。该算法速度较快, 能生成紧凑、近似均匀的超像素。其核心思想是将彩色数字图片转化为由三维向量彩色空间和两维向量平面空间组成的五维特征向量(对于灰度图像而言则是三维特征向量)^[5], 再对转化后的五维特征向量构造度量标准, 最后根据初始化的种子点对数字图像进行小范围的聚类。具体分为如下几个步骤:

种子点的初始化。初始化种子点的一般方式是, 设定数字图像的总像素点为 N 个, 分割后的超像素块数为 K 个, 则分割之后的每个超像素块包含的像素个数为 $SP = N/K$, 相邻种子点的距离近似为 $S = \sqrt{(N/K)}$ 。对于种子点落在数字图像边缘位置的情况, 可在该种子点邻近的 3×3 窗口内按梯度值最小的方位调整; 同时为区分不同的种子点, 可为每一个种子点分配一个独立的标签号。

像素点的分类方法。对于数字图像中的每一个像素点, 分别计算该像素点与距离最近的种子点之间的相似程度, 使之与最相似的种子点的标签号一致, 即把该像素点与种子点归为一类。像素点与种子点的相似度量关系为

$$D_i = D_s + \frac{s}{m} D_c \quad (3)$$

式中, D_c 表示像素点间的色彩差异, D_s 表示像素点间的空间距离, D_i 表示两个像素点的相

似度, S 表示种子点的平均间距, m 为平衡 D_c 和 D_s 的平衡参数。 D_i 取值越小, 说明两个像素点的差异越小, 也就是相似度越高。

为了提高该算法的实时性, 在搜索相似像素点时, 搜索的范围并不是整张图片, 而是在以种子点为中心的 $2S \times 2S$ 区域内搜索^[4]。搜索范围如图 3(a) 所示。

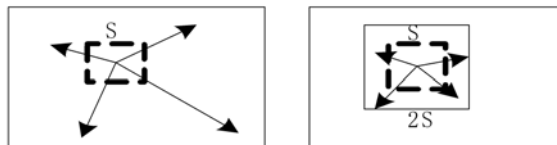


图 3 超像素分割算法的搜索区域图

对聚类后的非连续点进行连通区域分割或合并。上一部迭代的结果包含很多聚类的非连续点。对于不连续的散点或小区域(区域点数小于 $SP/4$), 寻找附近的区域类并将其合并。连通方式有 4 连通或 8 连通, 最后得到整块连续分割的超像素。

超像素分割算法将图像中一系列位置相邻和颜色、亮度、纹理等特征相似的像素点分割成小区域, 这些小区域大多保留了进一步分割图像的有效信息。对于红外图像, 可以将灰度值相近且位置较邻近的像素点划分为一个超像素, 一般不会破坏图像中物体的边界信息。图 4 是两个不同场景背景下采用超像素分割红外图像的效果图。

由图 4 可以看出, 采用超像素分割算法分割的红外图像, 其每个子区域有如下特点:

(1) 分割后各子区域的灰度值相近, 灰度值变化范围较小。

(2) 各子区域的连通性很好, 没有单个散点或区域不连通的情况。

由于分割后的各子区域图像的灰度变化范围较小, 在对图像的各子区域进行色阶重建时, 各子区域的细节部分将得到更好的拉伸, 更有利于图像细节的展现。

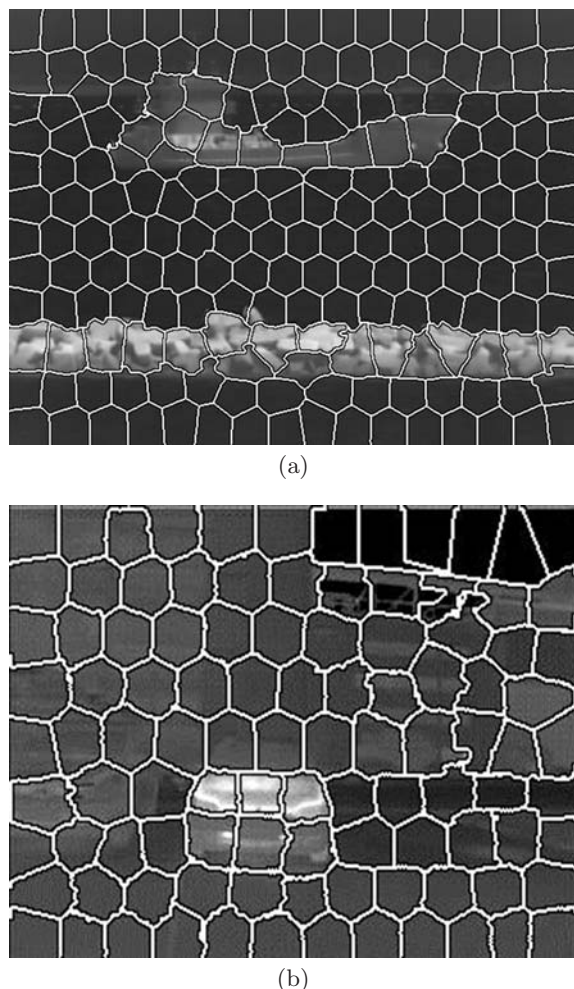


图 4 超像素分割的效果图

3.2 区域合并算法

原始图像通过超像素分割得到许多尺寸相似的小块区域,这是一种过分割现象。之后需要进一步对小块区域进行合并,以得到更符合预想的结果。本文使用了基于超像素的 dbscan 聚类算法^[6],简称 spDbscan 算法。

dbscan 算法的原理很简单,将所有点标记为核心点、边界点或噪声点。核心点一般是指在邻近区域点分布密度较大的点。将任意两个距离小于 ϵ 的核心点归为同一类,将任何与核心点足够近的边界点也放到与之相同的类中。

spDbscan 的原理与 dbscan 相同,聚类度量的原则是空间区域连通,像素值距离 D_c 小于设定的阈值 E_c 。其中 D_c 是指相邻两个超像素的像素差值。用公式表达为

$$D_c = \text{abs}(SP(i) - SP(j)) < E_c, j \in \text{adjacent}(i) \quad (4)$$

当两个超像素的像素平均值差值的绝对值在设定阈值 E_c 之内时,就合并超像素 i 和超像素 j ,其中 $SP(i)$ 和 $SP(j)$ 分别是该超像素的像素平均值。分割超像素之后再连续采用两次该合并算法,结果如图 5 所示。采用该合并算法有利于将灰度值相近且位置相邻的超像素合并为一个区域。

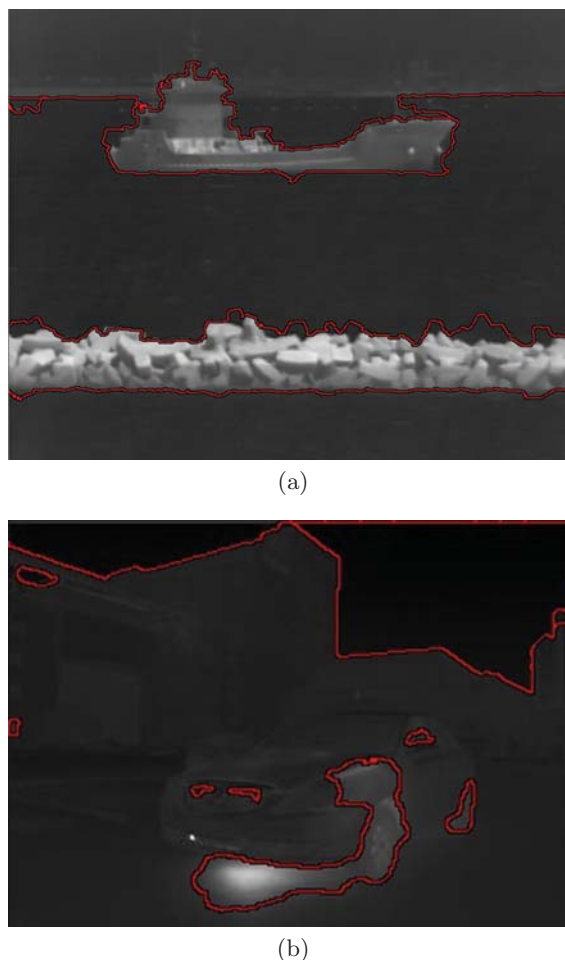


图 5 超像素合并的效果图

3.3 局部区域增强算法

通过以上几个步骤得到了有限的几块局部区域。每个局部区域的像素比较类似,但包含诸多的细节。为了达到细节增强的目的,对每个局部区域 i 计算其像素均值 u_i 和方差 var_i 。

$$y = k_i(x - u_i) + u_i \quad (5)$$

通过式 (5) 进行变换。式中, x 是原像素值 (8 位数据), y 是变换后的像素值 (如果 y 超出 0~255

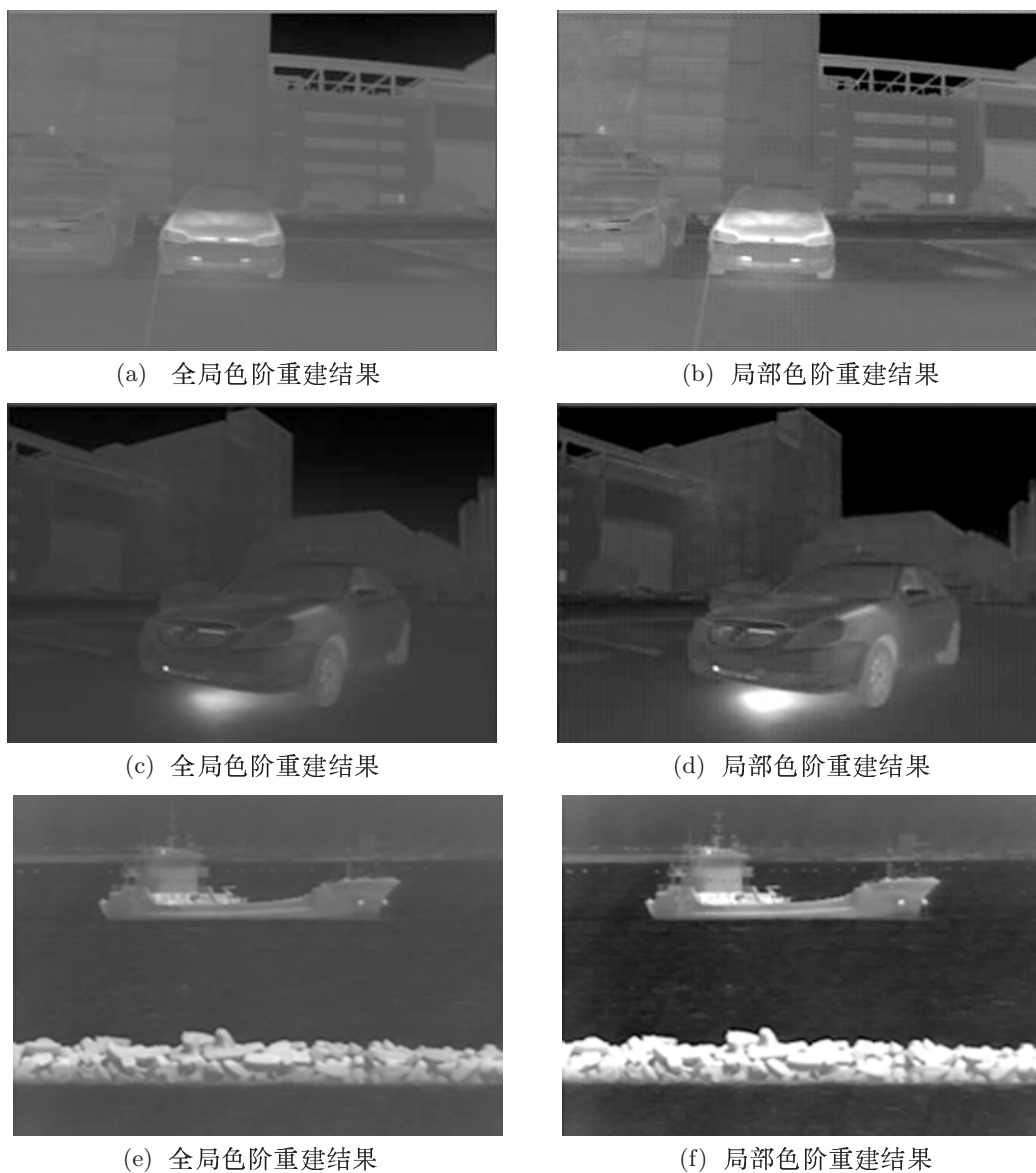


图 6 全局色阶和本文局部色阶重建算法的效果对比图

的范围, 则进行截断), k_i 是细节增强系数 (一般大于 1), 与 var_i 有关。一般 var_i 比较小, k_i 可以设置一个定值 (比如 $k_i=2$); 如果 var_i 比较大, 表示该区域细节已经比较明显, k_i 值可以偏小。

4 实验结果与分析

图 6 为实验效果图, 图 6(a)、6(c)、6(e) 为采用传统的全局色阶重建算法的结果, 图 6(b)、6(d)、6(f) 为采用本文提出算法的结果图。从图中可以看出, 用本文算法的显示效果明显优于传统的全局色阶重建算法, 细节信息也更突出。

原始图像深度为 14 位的红外图像由于动态范围大, 含有丰富的场景和细节信息。目前, 基于全局色阶重建算法的线性映射 (Automatic Gain Control, AGC)^[2] 或非线性映射 (如灰度直方图均衡)^[7] 等方法在将 14 位数据压缩至 8 位数据时会丢失原始图像中的许多细节信息, 特别是像素数目较少的小目标和图像边缘的细节信息, 如图 6(a)、6(c)、6(e) 所示。因此, 增强压缩后的 8 位数据的细节信息比在将 14 位数据压缩到 8 位数据的过程中保留细节难得多, 这也是目前许多算法的效果不理想的根源所在。本文从 14 位数据到 8 位数据的压缩过程着手, 结合超像

素分割算法与局部色阶重建来增强红外图像,取得了较好的效果。因超像素分割算法将红外图像中位置相邻、灰度相近和纹理特征相似的像素点分割为一个小区域,采用局部色阶重建对分割后的不同区域采用不同的映射曲线对图像动态范围进行压缩,尽可能多地保留了各个区域的细节信息。实验证明,超像素分割算法处理简单,计算速度快,图像的分割效果好。基于超像素分割算法的局部色阶重建能有效地增强红外图像的细节信息,提高图像的对比度,有较好的可视化效果。

参考文献

- [1] 金伟其,刘斌,范永杰,等. 红外图像细节增强技术研究进展 [J]. **红外与激光工程**, 2011, **40**(12): 2521-2527.
- [2] 杨克虎,姬靖,郭建军,等. 高动态范围图像和色阶映射算子 [J]. **自动化学报**, 2009, **35**(2): 113-122.
- [3] 谢德红,万晓霞. 基于颜色视觉过程的高动态范围图像映射方法 [J]. **北京理工大学学报**, 2011, **31**(10): 1217-1222.
- [4] 饶倩,文红,喻文,等. 超像素及其应用综述 [J]. **电子与信息技术**, 2013, **21**(5): 1-3.
- [5] 吕丽丽,高昆,邵晓光,等. 基于人眼视觉特性的高动态范围彩色图像自适应增强方法 [J]. **北京理工大学学报**, 2012, **32**(4): 415-419.
- [6] Radhakrishna A, Appu S, Kevin S, et al. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-art Superpixel Methods. [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2012, **34**(11): 2274-2282.
- [7] 杨家红,向锦,李翠红,等. 一种新的红外图像细节增强算法 [J]. **激光与红外**, 2012, **42**(5): 579-583.
- [8] Liu L, Xing J, Ai H, et al. Semantic Superpixel Based Vehicle Tracking [C]. *IEEE Conference on Pattern Recognition*, 2012: 2222-2225.
- [9] Branchitta F, Diani M, Corsini G, et al. Dynamic-range Compression and Contrast Enhancement in Infrared Imaging Systems [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(7): 076401.
- [10] 刘军,艾力·斯木吐拉,马晓松. 一种改进的 DB-SCAN 聚类算法的研究与应用 [J]. **交通信息与安全**, 2008, **26**(3): 60-64.

(上接第 29 页)

参考文献

- [1] 屈恒阔,张清源,阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达 [J]. **中国光学**, 2012, **5**(3): 1-6.
- [2] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势 [J]. **中国光学**, 2016, **9**(1): 1-9.
- [3] 何伟基,司马博羽,苗壮,等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正 [J]. **光学精密工程**, 2013, **21**(10): 1-7.
- [4] 杨芳,张鑫,贺岩,等. 采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统 [J]. **红外与激光工程**, 2013, **42**(12): 1-5.
- [5] Liang Y, Huang J H, Ren M, et al. 1550-nm Time of Flight Ranging System Employing Laser with Multiple Repetition Rates for Reducing the Range Ambiguity [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 1-4.
- [6] 侯利冰. 运动平台条件下光子计数激光成像雷达关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2013.
- [7] 潘秋娟,房庆海,杨艳. 高重复率卫星激光测距的关键技术及其进展 [J]. **激光与光电子学进展**, 2007, **44**(7): 33-39.
- [8] Min S O, Kong H J, Kim T H, et al. Multi-hit Mode Direct-detection Laser Radar System Using a Geiger-mode Avalanche Photodiode [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(33109): 1-7.
- [9] Krichel N J, Carthy A M, Buller G S. Resolving Range Ambiguity in a Photon Counting Depth Imager Operating at Kilometer Distances [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9192-9206.
- [10] Degnan J J. Photon-counting Multikilohertz Micro-laser Altimeters for Airborne and Spaceborne Topographic Measurements [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, **34**: 503-549.
- [11] Ricklefs R L, Shelus P J. Poisson Filtering of Laser Ranging Data [C]. *Proceeding of the 8th International Workshop on Laser Ranging*, 1992, **9**: 26-32.
- [12] 纪英军,石柱,覃文治,等. 用于光子计数的 InGaAs/InP SPAD 设计 [J]. **红外与激光工程**, 2015, **44**(3): 934-940.
- [13] 孙建锋,阎爱民,刘德安,等. 远距离激光成像雷达进展 [J]. **激光与光电子学进展**, 2009, **46**(8): 49-54.
- [14] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Geiger-Mode Avalanche Photodiodes for Three-Dimensional Imaging [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 335-350.
- [15] 杨子健,陈锋,李抄,等. 微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应 [J]. **光学精密工程**, 2015, **23**(2): 408-414.