

基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法

蔡舒舒, 余乃春, 师利中

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 为准确高效地为飞机结构损伤分析和智能维修决策提供支持, 提出一种改进的飞机机体损伤区域划分方法。根据机体损伤区域的特点, 引入数学形态学理论对灰度熵阈值划分图像进行修复, 并以此为基础给出单像素初始轮廓提取方法。通过对边界稳定点的自动判定和边界点的动态添加, 对 Snake 模型进行改进。选用不同类型的飞机机体损伤图像进行验证, 结果表明, 与经典 Snake 方法相比, 该方法可有效解决初始轮廓的不确定性对结果的影响, 避免邻接区域的干扰, 边界清晰有效, 运算效率高。

关键词: 区域划分; Snake 模型; 单像素初始边界提取; 数学形态学; 灰度熵

中文引用格式: 蔡舒舒, 余乃春, 师利中. 基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 298-302, 308.

英文引用格式: Cai Shuyu, Yu Naichun, Shi Lizhong. Airframe Damage Region Division Method Based on Improved Snake Model[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 298-302, 308.

Airframe Damage Region Division Method Based on Improved Snake Model

CAI Shuyu, YU Naichun, SHI Lizhong

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] In order to support aircraft structure damage analysis and intelligent maintenance decision accurately and efficiently, an improved airframe damage region division method is proposed. According to the features of airframe damage region, mathematical morphology is introduced to repair the image which is divided by gray level entropy. On the basis, the single pixel initial contour extraction method is proposed. Snake model is improved by automatic judgment of stable boundary points and dynamic addition of new boundary points. Airframe damage region division experiments are performed by different types of damage image. Experimental results show that, compared with the classical Snake methods, the proposed method solves the influence of initial contour uncertainty on the results effectively, and avoids disturbance of neighboring regions. The damage region divided by the proposed method is clear and accurate and the operation efficiency is improved obviously.

[Key words] region division; Snake model; single pixel initial boundary extraction; mathematical morphology; gray level entropy

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.07.050

0 概述

随着飞机智能维修技术的发展, 机体损伤的图像化立体化处理日益成为支持维修的重要手段^[1]。飞机机体损伤区域的划分成为飞机结构损伤分析和智能维修决策的基础。目前图像划分方法主要有基于阈值的分割方法、基于区域的分割方法、基于边缘的分割方法以及基于特定理论的分割方法等^[2]。然而, 飞机常见局部损伤存在一定的作用范围, 损伤邻

接区域的形貌存在不同程度的改变, 这对损伤区域的精确划分有着显著的不利影响^[3], 获取准确的损伤区域和连续的损伤边界仍需进一步研究。

主动轮廓线模型, 即 Snake 模型, 是一种目标轮廓提取模型, 广泛地用于边缘检测、区域分割、运动跟踪等领域。国内外专家学者对此进行了研究。文献^[4]提出一种联合线性混合人物模型蒙皮和 Snake 变形模型的算法框架。文献^[5]提出一种融合 Kinect 和 GVF Snake 的手势轮廓提取算法, 以提

基金项目: 国家部委基金。

作者简介: 蔡舒舒(1985—), 女, 讲师、硕士, 主研方向为飞机故障协同诊断、三维模型重构; 余乃春, 硕士研究生; 师利中, 讲师、硕士。

收稿日期: 2016-11-11 **修回日期:** 2016-12-19 **E-mail:** csy0313@163.com

取完整清晰的手势轮廓。文献[6]基于 Snake 模型提出一种点模型的谷脊线提取与优化方法。文献[7]提出了利用 Snake 模型实现的黄土地貌沟沿线栅格点的自动连接方法,解决了由于黄土地形复杂性造成的沟沿线局部断点问题。文献[8]研究了 Snake 提取遥感影像中水域边界的方法,但需手工获取靠近边缘的初始轮廓。文献[9]采用条带检测结果初始化道路轮廓,进而利用 Snake 模型提取道路轮廓。文献[10]针对雨雪对图像处理的不利影响,提出基于改进 Snake 模型的雨雪去除方法。

然而,Snake 模型在机体损伤划分领域的应用仍存在不适应性。机体损伤图像往往存在损伤区域边界模糊、损伤与邻接区域颜色较为相似等特点,这使得损伤区域轮廓获取容易存在偏差。此外,初始边界获取的不确定性,模型运算效率低下,均成为制约 Snake 模型应用的因素。因此,本文引入灰度熵和数学形态学理论,实现初始轮廓提取方法,通过对 Snake 模型算法进行改进,进而实现对机体损伤边界的高效提取。

1 Snake 模型算法

设轮廓曲线 $C: v(s) = (x(s), y(s))$ 为轮廓曲线的集合表示,其中, $v(s)$ 为 C 上的二维坐标点, $s \in [0, 1]$ 为归一化弧长,则曲线的能量函数:

$$E_{\text{Snake}} = \int_0^1 (E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s))) ds \quad (1)$$

其中, E_{int} 表示内部约束力,用于保证曲线的收缩和弯曲性; E_{ext} 表示由图像数值特征决定的外部约束力,用于吸引轮廓曲线收敛到图像的目标。其表达式为:

$$\begin{cases} E_{\text{int}}(v(s)) = \frac{\alpha(s) |v'(s)|^2 + \beta(s) |v''(s)|^2}{2} \\ E_{\text{ext}}(v(s)) = -\xi_{\text{ext}}(G_{\sigma}(v(s)) \times \nabla^2 v(s))^2 \end{cases}$$

其中, $v'(s)$ 为活动曲线长度; $v''(s)$ 为曲率的变化率; $\alpha(s)$ 为弹力系数; $\beta(s)$ 为强度系数; ξ_{ext} 为正权重系数; $G_{\sigma}(v(s))$ 表示方差为 σ 的高斯核函数。

Snake 模型将轮廓曲线的特征通过能量函数来表示,可通过获取能量函数最小值,使对应的目标轮廓既保持一定的光滑性同时又趋近于图像的特征,从而满足图像划分的要求。轮廓线为能量函数极小的曲线,即:

$$E_{\text{Snake}}^* = \operatorname{argmin}\{E_{\text{Snake}}\} \quad (2)$$

为简化运算,利用有限差分法进行离散,设轮廓曲线上有 n 个控制点,对于当前某控制点 v_i ,其在图像空间中的各阶微分:

$$\begin{cases} v' \Leftrightarrow \frac{v_{i+1} - v_i}{h} \\ v'' \Leftrightarrow \frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{h^2} \end{cases}$$

其中, h 为等间隔采样距离。这样,式(1)可通过离散方程的多次迭代简化运算,即:

$$\begin{aligned} E_{\text{Snake}} &= \sum_{i=1}^n (E_{\text{int}}(v_i) + E_{\text{ext}}(v_i)) \\ &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i |v_i - v_{i-1}|^2 + \beta_i |v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}|^2 + E_{\text{ext}}(v_i)) \end{aligned} \quad (3)$$

2 单像素初始轮廓提取方法

Snake 模型算法在图像分割时对轮廓曲线初始位置比较敏感。为取得较好的轮廓效果和处理效率,要求初始曲线尽可能靠近目标边界。因此,可通过灰度熵区域划分方法,获取机体损伤区域。利用数学形态学方法对损伤区域中的孔洞、噪点、断裂等缺陷进行修复。最后,提取完整连续边界的单像素点轮廓信息。

2.1 基于数学形态学的图像修复方法

数学形态学通过设计不同的结构元,实现对数字图像进行各种不同的集合运算,从而达到对数字图像的各种分析及处理^[11-12]。

数学形态学的基本运算为膨胀和腐蚀。

1) 膨胀

假设像素点经灰度熵损伤区域划分,像素点位于损伤区域内部由 1 表示,位于损伤区域外部由 0 表示,得到二值图像。

设 A 为待处理二值图像, B 为简单的紧集合,即为结构元素,则 A 被 B 膨胀的结果可定义为:

$$A \oplus B = \{(x, y) | B_{xy} \subseteq A \neq \emptyset\} \quad (4)$$

膨胀运算将目标物体 B 接触的所有背景点合并到物体 A 中的过程。

2) 腐蚀

设 A 为待处理的二值图像, B 为结构元素,则 A 被 B 腐蚀的结果可定义为:

$$A \ominus B = \{(x, y) | B_{xy} \subseteq A\} \quad (5)$$

腐蚀运算是消除边界点的过程。

2.2 损伤区域单像素轮廓提取方法

为了提取损伤区域单像素轮廓,可对邻域像素灰度信息进行计算,判断损伤区域图像中的所有内部像素并去除,从而得到损伤区域轮廓图像。

设二值图像中某像素点 P ,其 8-邻域像素点均位于损伤区域内部,即取值均为 1,则该点 P 为 8-邻域内部点;某像素点 P ,其周围 4-邻域像素点均位于损伤区域内部,即均为 1,则该像素点 P 为区域的 4-

邻域内部点^[13-14],如图1所示。

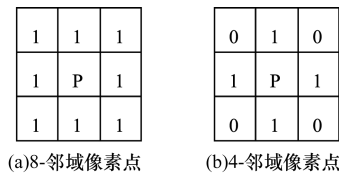


图1 损伤区域内部邻域像素示意图

通过对图像进行逐行扫描,如果当前像素点为邻域内部点,则在输出图像中该坐标像素点标注为0;否则,标注为1。用原损伤区域图像与标注后图像进行运算,得到目标损伤区域的单像素轮廓。

3 改进的机体损伤区域划分方法

针对 Snake 模型在机体损伤划分领域的诸多不适应性进行改进,具体流程如图2所示。

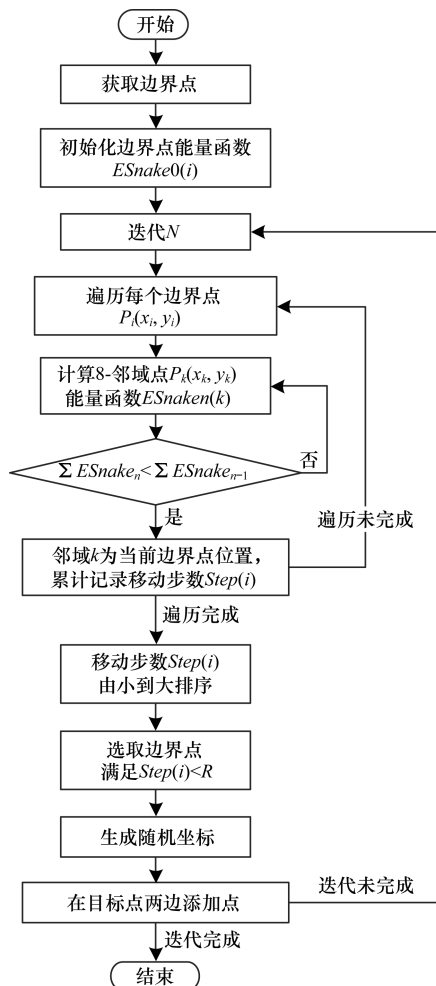


图2 基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法流程

1) 获取边界点。获取边界点坐标 (x_i, y_i) 及个数

N , 边界点由初始轮廓提取方法获得。

2) 计算初始能量函数。根据式(3), 计算边界点的初始能量函数, 第 i 个边界点 (x_i, y_i) 的初始能量函数为 $E_{Snake}(i)$ 。

3) 进入迭代子流程, 重复步骤4)~步骤11)。

4) 遍历每个边界点, 重复步骤5)~步骤7)。

5) 计算8-邻域点能量函数。

根据式(3), 第 j 次迭代边界点的8-邻域点 (x_k, y_k) 的能量函数为 $E_{Snakei}(k)$ 。

6) 选择能够使能量函数取值较小的邻域点 (x_k^*, y_k^*) 。设第 i 边界点的第 k 邻域点对应的边界能量函数为:

根据式(3), 第 j 次迭代边界点的8-邻域点 (x_k, y_k) 的能量函数为 $E_{Snakei}(k)$ 。

7) 选择能够使能量函数取值较小的邻域点 (x_k^*, y_k^*) 。设第 i 边界点的第 k 邻域点对应的边界能量函数为:

$$E_d(k) = \sum_{d=0}^{i-1} E_{Snake}(d) + E_{Snakei}(k) + \sum_{d=i+1}^N E_{Snake}(d)$$

则满足: $E_d(k^*) = \operatorname{argmin}\{E_d(k)\}$ 。

8) 移动边界点。

将原边界点移动至邻域点位置, 即:

$$x_i = x_{k^*}, \quad y_i = y_{k^*}$$

累计记录边界点移动距离, 即:

$$\operatorname{step}(i) = \sqrt{(x_i - x_{k^*})^2 + (y_i - y_{k^*})^2}$$

9) 按边界点累计移动距离由小到大排序。

10) 选取稳定点。选取累计移动距离小于阈值的点为稳定点, 即 $\operatorname{step}(i) < R$ 。

11) 生成新边界随机坐标。

于边界点两侧生成新边界点 $(x_{\text{new}}, y_{\text{new}})$, 以替代稳定点, 即:

$$\begin{cases} x_{\text{new}} = x_i + \operatorname{rand}(|x_i - x_{i-1}|) \\ y_{\text{new}} = y_i + \operatorname{rand}(|y_i - y_{i-1}|) \end{cases}$$

根据式(3), 计算新边界点的初始能量函数。

12) 若迭代未完成, 则继续循环; 否则, 程序结束。

4 实例验证与结果分析

为验证基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法, 选取蒙皮腐蚀损伤图像与蒙皮补片裂纹损伤图像进行验证, 如图3所示。

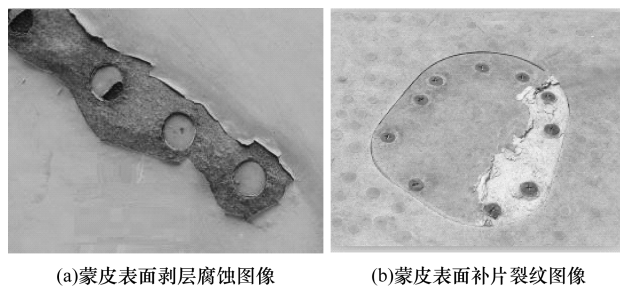


图 3 实例图像验证

首先对初始轮廓的提取进行验证。通过采用传统边缘检测方法,为本文方法作对比验证。传统边缘检测算子分别选用了 Laplacian 算子、Prewitt 算子、Robert 算子、Sobel 算子等,边界提取结果如图 4、图 5 所示;本文初始轮廓提取方法结果如图 6 所示。

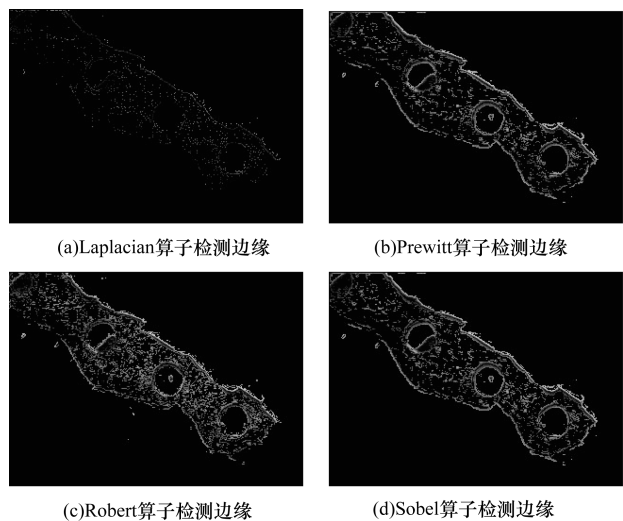


图 4 图 3(a) 传统边缘检测结果

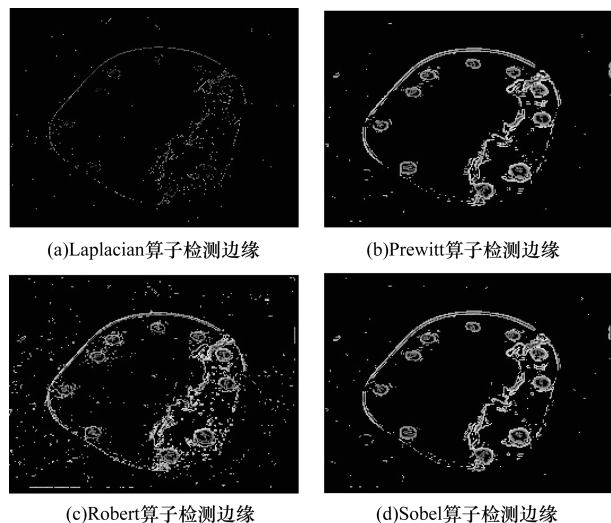


图 5 图 3(b) 传统边缘检测结果

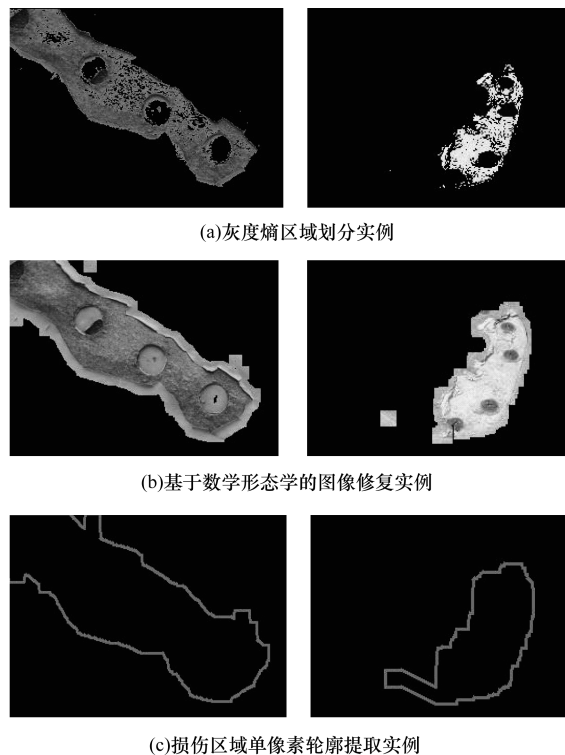


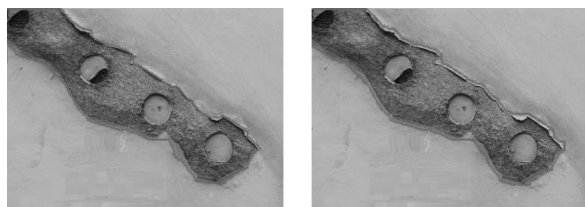
图 6 初始轮廓提取方法实例图像

通过验证结果的比较可以看出,传统的边缘检测方法存在一定局限性。Laplace 算子对噪声较为敏感,在机体损伤图像的处理中,噪点较多,为减小噪声影响,降低阈值,使得边界模糊;Prewitt 算子、Roberts 算子、Sobel 算子对噪声敏感,无法获取完整边界信息。

此外,传统边界检测方法无法区分闭合性裂纹损伤和区域损伤,如图 5 所示。对于蒙皮补片裂纹图像,右侧为蒙皮补片断裂脱落后的区域性损伤,为损伤区域划分的目标区域,左侧为蒙皮和补片间的闭合裂纹损伤,不属于划分的目标区域。传统边缘检测方法均提取了闭合裂纹损伤,使得初始轮廓获取有所偏差,直接影响了后续的精划分处理。

初始轮廓提取方法通过灰度熵区域划分仅获取区域性损伤;通过数学形态学图像修复消除噪点、平滑边界;最后提取单像素轮廓,用于后续精确划分。

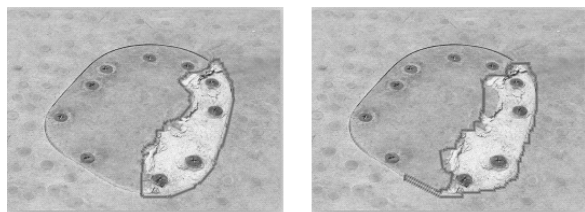
选用经典 Snake 方法,与基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法进行对比验证。考虑到经典 Snake 方法对于初始轮廓的敏感性,以初始轮廓提取的边界信息为输入。机体损伤区域划分结果如图 7、图 8 所示。



(a)经典Snake方法

(b)本文方法

图 7 图 3(a) 机体损伤区域划分方法对比验证结果



(a)经典Snake方法

(b)本文方法

图 8 图 3(b) 机体损伤区域划分方法对比验证结果

通过验证结果可以看出,对凹形边界的提取效果方面,经典 Snake 方法的损伤区域边界提取效果不如本文方法。由于经典 Snake 方法通过搜索邻域能量最小点作为节点的新位置,在凹形区域会导致节点陷入局部最小值,从而使得曲线不能收敛到真正边界。

本文方法在提取损伤区域边界的过程中,对于某次迭代中累计移动距离小于阈值的稳定点,在其左右两边的边界邻域内,添加随机点替代稳定点。对于凹形区域陷入局部最小值的稳定点,可通过添加的随机点替换,从而得到精确有效的边界信息。

在边界划分精度方面,采用 Pratt 品质因数 (Pratt's Figure of Merit, PFM) 进行客观评价^[15]。

Pratt 品质因数可评价边界的定位精度:

$$PFM = \frac{1}{\max\{N_D, N_I\}} \sum_{i=1}^{N_D} \frac{1}{1 + \partial d_i^2} \quad (6)$$

其中, N_D 为划分的边缘像素个数; N_I 为理想的边缘像素个数; ∂ 为常数; d_i 为划分的第 i 个点与真实边缘点的距离。

在 2 个实例图像上,通过手动提取边界,作为各自的理想边缘,通过式(6)计算,得到 Pratt 品质因数。验证运算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 图 3(a) 运算结果验证

方法	Pratt 品质因数	耗时/s
经典 Snake 方法	0.726	22
本文方法	0.949	13

表 2 图 3(b) 运算结果验证

方法	Pratt 品质因数	耗时/s
经典 Snake 方法	0.194	19
本文方法	0.906	11

从表 1、表 2 可以看出,本文方法 Pratt 品质因数较高,说明本文方法提取的边界在定位精度上较优。由于经典 Snake 方法在凹边界部分的局限,影响了其定位精度。同时本文方法耗时较短,通过对迭代中每个边界点移动步数的统计,确定稳定点,并以稳定点为中心动态添加新的边界点,可降低对初始边界点样本容量的要求,从而减少了迭代环节的计算量,提高了计算效率。

综上所述,基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法能够快速有效地对机体损伤区域图像进行划分。

5 结束语

本文通过结合灰度熵和数学形态学理论,设计了初始轮廓提取方法,通过对 Snake 模型的改进,提出了基于改进 Snake 模型的机体损伤区域划分方法。实例验证结果表明,划分效果方面,初始轮廓提取方法避免了损伤邻接区域引入的不确定性,使得本文方法划分的损伤边界准确连续,效果明显优于传统边缘检测方法。划分效率方面,通过对 Snake 模型的改进,降低了迭代运算量,运算效率更优。

参考文献

- [1] 蔡舒舒,师利中. 飞机机体损伤区域的快速划分方法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(3): 737-741.
- [2] 方玲玲. 图像分割的活动轮廓模型研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [3] 蔡舒舒,师利中. 一种改进谱聚类的机体损伤图像过渡区提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(10): 1732-1739.
- [4] 陈加,吴晓军. 联合 LBS 和 Snake 的 3D 人体外形和运动跟踪方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 357-363.
- [5] 陈解元,韩 燮,熊风光. 融合 Kinect 与 GVF Snake 的手势轮廓提取方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 35(27): 54-58.
- [6] 张若男,王仁芳. 基于 Snake 的点模型谷脊线提取与优化[J]. 图学学报, 2015, 36(5): 662-670.
- [7] Zhou Yi, Tang Guo'an, Yang Xin, et al. Positive and Negative Terrains on Northern Shaanxi Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(1): 64-76.
- [8] Sheng Guofeng, Yang Wen, Deng Xinping, et al. Coastline Detection in Synthetic Aperture Radar (SAR) Images by Integrating Watershed Transformation and Controllable Gradient Vector Flow (GVF) Snake Model[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(3): 375-383.

(下转第 308 页)

障碍,通过融合图像信息,可以在视野中进行持续跟踪,解决了单线激光雷达丢失目标的问题,由此为低速无人车提供负障碍的信息,提高无人车躲避负障碍的能力。本文算法主要是为满足低速、低成本无人车平台检测负障碍的需求,在不考虑成本、功耗等因素的限制下,多线激光雷达具有更好的负障碍检测效果。

参考文献

- [1] Shang E, An Xiangjing, Wu Tao, et al. LiDAR Based Negative Obstacle Detection for Field Autonomous Land Vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 33(5): 591-617.
- [2] Matthies L, Rankin A. Negative Obstacle Detection by Thermal Signature [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003: 906-913.
- [3] Lalonde J F, Vandapel N, Huber D F, et al. Natural Terrain Classification Using Three-dimensional Ladar Data for Ground Robot Mobility[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 839-861.
- [4] Heckman N, Lalonde J F, Vandapel N, et al. Potential Negative Obstacle Detection by Occlusion Labeling[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 2168-2173.
- [5] 史鹏波. 基于单线激光雷达的道路特征检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [6] Larson J, Trivedi M. Lidar Based Off-road Negative Obstacle Detection and Analysis [C]//Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 192-197.
- [7] Morton R D, Olson E. Positive and negative Obstacle Detection Using the HLD Classifier [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1579-1584.
- [8] 王 盛, 项志宇. 基于多谱融合的植被环境中障碍物检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(11): 2223-2229.
- [9] 张建勋, 汪 波, 侯之旭, 等. 图像多特征融合的障碍物检测[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(3): 65-70.
- [10] Bouguet J Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL]. [2016-03-10]. http://www.cvg.ethz.ch/teaching/2011spring/3dphoto/Misc/Calib_toolbox_instructions.pdf.
- [11] 刘大学, 戴 斌, 李 政, 等. 一种单线激光雷达和可见光摄像机的标定方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(s1): 77-80.
- [12] 彭 梦, 蔡自兴. 一种基于双平行平面的激光雷达和摄像机标定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4735-4742.
- [13] Zhang Q, Pless R. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (Improves Camera Calibration) [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 2301-2306.
- [14] 张宏志, 张金换, 岳 卉, 等. 基于 CamShift 的目标跟踪算法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(11): 2012-2014.
- [15] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-Learning-Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [16] Hare S, Saffari A, Torr P H S. Struck: Structured output tracking with kernels [C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 263-270.
- [17] Nebel G, Pflugfelder R. Clustering of Static-adaptive Correspondences for Deformable Object Tracking [C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 2784-2791.

编辑 张 帆

(上接第 302 页)

- [9] 吴 亮, 胡云安. 膨胀系数可调的 Ballon Snake 方法在道路轮廓提取中的应用[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 71-77.
- [10] 孙毅刚, 段晓晔, 张红颖, 等. 基于改进 snake 模型的图像中雨雪去除算法研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1991-1993.
- [11] 王祖进, 黄筱调. 基于形态学的元件图像边缘检测算法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 115-118.
- [12] 薛岚燕, 程 丽. 基于融合技术的小波变换和数学形态学的边缘检测算法[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(1): 27-30.
- [13] 邹柏贤, 张 然, 苗 军. Prewitt 图像边缘检测方法的改进[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(5): 23-26.
- [14] 蒋 伟, 杨庭庭, 刘亚威, 等. 数字图像处理研究性实验教学的改革与实践——基于分数阶偏微分的图像边缘检测[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(6): 124-128.
- [15] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. New York, USA: John Wiley and Song, 1991.

编辑 刘 冰 顾逸斐