

基于无人机航拍路面的拼接算法研究

韩建峰^{1,2*}, 张妍^{1,2}

¹内蒙古工业大学信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010080;

²内蒙古自治区感知技术与智能系统重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010080

摘要 为快速得到较大范围且清晰度足够的路面图像, 提出一种针对航拍路面图像的拼接算法, 可以快速准确地处理图像, 得到路面的拼接图像, 为无人机航拍应用道路交通领域提供便利。路面图像拼接时, 图像包含较大的相似区域, 导致配准正确率较低, 且图像信息量大, 拼接时间长。为解决这一问题, 本文提出在特征点提取前确定相邻图像的重叠区域, 在重叠区域内使用尺度不变特征变换特征点结合稀疏表示匹配的方法, 对相邻图像进行配准, 随后利用小波变换方法, 将图像进行融合, 改善拼接效果。经过实验证明, 本文方法可以有效处理航拍路面图像, 得到效果较好的路面拼接图像。

关键词 图像处理; 图像拼接; 稀疏表示; 图像配准; 图像变换; 小波变换

中图分类号 TP971.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.201003

Research on Stitching Algorithm Based on UAV Based on Aerial Photography

Han Jianfeng^{1,2*}, Zhang Yan^{1,2}

¹College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010080, China;

²Inner Mongolia Key Laboratory of Perception Technology and Intelligent Systems, Hohhot, Inner Mongolia 010080, China

Abstract In order to quickly obtain a wide range of pavement images with sufficient clarity, a stitching algorithm for aerial pavement images is proposed, which can quickly and accurately process the images to obtain the stitched images of the pavement surface so as to provide convenience for the application of unmanned aerial vehicle aerial photography in the field of pavement transportation. When pavement images are stitched, the images contain large similar areas, resulting in a low registration accuracy, a large amount of image information, and a long stitching time. In order to solve this problem, this paper proposes to determine the overlapping area of adjacent images before feature point extraction. Scale-invariant feature transform feature points combined with sparse representation matching method in the overlapping area to register adjacent images. Then, wavelet transform method is used fuse the images to improve the stitching effect. Experimental results prove that the proposed method can effectively process aerial pavement images and obtain better pavement stitching images.

Key words image processing; image stitching; sparse representation; image registration; image transformation; wavelet transform

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.2960

1 引言

随着道路交通建设的逐步完善, 国家对道路交

通的建设已经由铺设为中心转化为养护为中心。及对公路的健康状况进行检测, 发现并解决公路出现的病害, 是道路养护的主要内容。现阶段利用机

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-02-12; 录用日期: 2020-02-24

基金项目: 2019 年度内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2019GG271)、内蒙古自治区高等学校科学研究重点项目(NJZZ19068)

* E-mail: hanjianfeng@imut.edu.cn

器视觉进行路面检测是最有效的,路面检测图像算法越来越受到国内外学者重视^[1-4]。现在普遍采用的依旧是最开始的检测车检测手段,检测车受道路限制,检测速度与效果受路面状况影响。近年来,无人机(UAV)以便捷、高速等优势,迅速进入人们的生产生活,利用无人机进行路面检测是一种新型高效的方法。但与检测车存在同样的问题,虽然无人机采集的图像扩大了检测范围,但单张图像对应的路面范围依旧有限制,有时难以对一个较大的破损目标进行完整的描述,且当需要对路面破损进行统计时,对单张图像进行检测容易出现漏检、错检情况。因此本文提出,为提高检测效率,对采集到的单张图像进行拼接,然后对拼接图像进行检测,有效避免上述情况。针对拼接算法,陈月等^[5]提出对尺度不变特征变换(SIFT)算法提取特征点之前,分析图像局部特征,自适应地简化提取方法,有效降低拼接的时间,提高拼接效率。何宾等^[6]提出结合 SIFT 与区域配准方法,提高配准的运算速度。李静等^[7]提出一种基于鲁棒弹性变形的视差宽容图像拼接方法,旨在降低拼接成本,提高拼接效率。但因为路面图像较特殊,存在较大区域的相似图像,且对路面的拼接结果要求尽可能保留原图的信息,要求路面信息的完整性,同时无人机航拍时环境复杂,对拼接的工作也造成一定的困难,利用传统的拼接算法无法得到效果较好的路面图像。所以本文提出一种 SIFT^[8]特征点结合稀疏表示(SR)^[9]的拼接方法。根据稀疏表示的优势,可以对相似图像的相似匹配点进行隔离处理,避免因图像相似点的存在,导致配准结果错误率较高,最后造成拼接不理想等情况。在融合部分,利用小波变换,将图像变换到频域进行融合^[10-11],避免出现空间域融合时对比度下降情况,得到便于进行路面破损检测的拼接图像。

2 SIFT-SR 配准及融合

航拍图像配准时为了尽可能地保留原图像的信息,采用了较稳定的 SIFT 特征点作为配准基元。因路面本身具有大量相似的结构,加入了稀疏表示进行特征点的匹配,目的是去除相似点部分误匹配带来的影响。同时,加入随机抽样一致(RANSAC)算法进行配准之后错误点的去除,提高配准的准确率。最后利用加权小波变换^[12-13]完成图像的融合。总体分为以下四部分:重叠区域确定、特征点提取与描述、稀疏匹配、图像融合。

2.1 重叠区域确定

无人机在进行不同的航拍作业时,会根据不同的应用场景,设置不同的飞行参数。例如:飞行速度、飞行高度、拍照间隔等。在特征提取前,根据相应的飞行参数,计算相邻图像的重叠区域,在重叠区域内进行特征提取,可有效降低特征提取的时间,同时避免无效特征点对特征匹配时的影响。

2.2 特征点提取与描述

无人机飞行时易受环境干扰,要求特征点在图像发生细微变化时,对特征点匹配的影响尽量小。本文选择 SIFT 特征点作为匹配的配准基元,SIFT 特征点对于图像变换及噪声而言具有很好的鲁棒性。

2.2.1 差分尺度空间建立

首先利用高斯核函数建立尺度空间,利用尺度空间同组不同层之间作差值,建立差分尺度空间。在差分尺度空间进行极值点检测,保证特征点在各个尺度空间都具有相应表示。所构建的图像差分尺度空间表示为

$$D(x, y, \delta) = [G(x, y, k) - G(x, y, \delta)] * I(x, y) = L(x, y, k * \delta) - L(x, y, \delta), \quad (1)$$

式中: x, y 表示该点在图像中的位置; $I(x, y)$ 是原图像; $G(x, y, \delta)$ 是高斯核函数; δ 是尺度空间因子,反映空间的模糊程度; k 是比例因子,是相邻层之间比例差值; $L(x, y, \delta)$ 为 δ 层是尺度空间; $D(x, y, \delta)$ 为构建的差分尺度空间。同层之间反映图像不同的模糊程度,同组之间反映图像的不同尺寸。

2.2.2 特征点描述

检测极值点作为图像存在于尺度空间的特征点,在重叠区域内寻找极值点,要求极值点满足:与上下两层 18 个邻域点及同层 8 个邻域点相比皆为极小值。

检测出来的极值点,存在对比度较低及在图像边缘的点,稳定性较弱,直接利用极值点作为特征点,易产生误匹配,因此去除对比度低及边缘上的一些点,保留稳定的极值点作为待匹配的特征点,保留特征点的尺度信息及方向信息。在特征点检测的当前尺度上统计特征点邻域的梯度方向,求出梯度直方图,建立特征点的描述向量。

2.3 稀疏匹配

经典 SIFT 算法在对描述向量进行匹配时,对比相应特征点描述向量间的欧氏距离,但单从欧氏距离判断同名点,容易产生误匹配。且路面图像存在大量的相似区域,相似区域内特征点的描述向量

相似性较强,仅判断描述向量的欧氏距离,往往不能准确地特征点正确匹配。为避免这一缺点,本文采用稀疏表示对描述向量进行计算,通过特征点描述向量间的稀疏系数能量谱,正确匹配图像的特征点。

利用稀疏表示进行匹配时,通过特征点的局部不变描述子构建参考字典。通过计算字典与信号之间的关系,判断是否为同名点。

$$\mathbf{X} = \operatorname{argmin} \|\mathbf{Y} * \mathbf{D}\mathbf{x}\|_{\kappa} + \lambda \|\mathbf{x}\|, \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 为图像间的稀疏系数矩阵; \mathbf{Y} 为观测数据; \mathbf{D} 为字典; \mathbf{x} 为待估稀疏向量; λ 为正则参数; $\kappa(1 \leq \kappa < 2)$ 为稀疏度量。稀疏表示是通过对每个样本进行对比,求出稀疏系数,求出与信号一致性最强的样本,即求出不同图像间的同名点。

当图像间的特征点匹配利用描述向量间的欧氏距离时,判断描述向量的欧氏距离值是否在合适的阈值内,在阈值范围内的特征点作为匹配点。但当图像出现大量相似结构时,特征点局部信息相似性较强,描述向量相似性也较强,特征点易与相似非正确匹配点发生匹配,造成误匹配。且在匹配完成后的再次检测时,因特征点间的相似性,未被检测为误匹配,最终导致图像间变换关系错误,影响拼接最终结果。

本文利用稀疏匹配进行描述向量的匹配,信号值在字典中有匹配特征的稀疏系数具有稀疏性与唯一性,此时的稀疏系数能量谱表现唯一。而对于错误的匹配结果,稀疏系数能量谱表现不同,可以通过稀疏能量谱判断特征点匹配情况。其中当特征点存在相似特征点时,稀疏能量谱存在多个峰值,如图1所示,直观地展现了当前比较的特征点情况。通过隔离相似点的匹配,避免出现相似点的误匹配。稀疏匹配可以解决相似结构的误匹配。

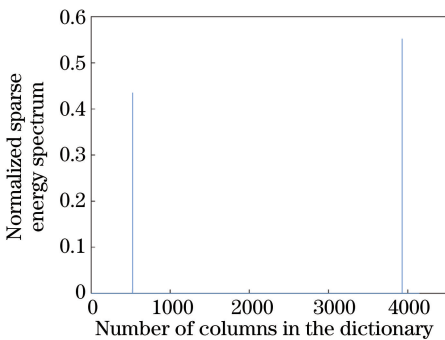


图1 相似点稀疏匹配能量谱图

Fig. 1 Sparse matching energy spectrum of similar points
根据稀疏系数的稀疏性与唯一性进行特征点的

匹配,有利于避免相似区域相似点的误匹配,提高图像特征匹配的正确率。为了保证匹配点对的准确性,本文加入RANSAC算法进行错误点的去除。因去除了相似点的匹配,RANSAC算法可以有效发挥作用。利用RANSAC算法多次迭代,去除误匹配,寻找最优内点集,有效筛选错误匹配的点对。

2.4 图像融合

图像配准完成后,将待拼接图像利用空间投影关系,变换到同一坐标系下,便于进行图像融合。考虑航拍图像图像特点 为避免拼接图像的亮度差异对应用产生影响,在图像融合时,将图像的距离比作为融合时的权值,使图像灰度过渡平缓。同时为避免图像融合后对比度下降,降低图像的可分辨率,在融合时采用更符合人眼视觉感受的小波变换。融合规则采用在低频处,即细节部分利用距离比作为权值进行融合,得到视觉效果较好的拼接图像。在高频处,选择保留较大值作为融合后的系数值。通过本文融合算法实现图像间的融合,完成拼接。

3 实验与结果分析

为验证算法的有效性,对沥青路面进行图像采集,并将经典SIFT算法、文献[5]算法及本文方法分别对图像进行拼接实验。实验最终比较拼接图像质量,同时比较配准的准确率与拼接时间。对拼接图像要求是无明显错位,尽可能保留原图像信息,且过渡平缓,无明显拼接痕迹。

依据我国对沥青路面的破损类检测标准,例如裂缝,当宽度大于3 mm时,此类裂缝被当做重度破损,应及时发现。而在实际路面图像采集过程中,对于此类裂缝,观测其长度聚集在3~8 m不等。

本文图像采集设备为大疆无人机Mavic 2专业版相机,照片尺寸为5472 pixel×3648 pixel,无人机最大飞行速度为72 km/h。实验中,采集环境为双向两车道,单车道宽度为4 m,飞行高度为6 m,可检测精度为2 mm。单张图像覆盖实际路面面积约为50 m²,单张可覆盖裂缝长度约为6 m,为保证拼接后可以完整展现裂缝信息,设置拼接图像数量为2。同时增加4张图像的拼接实验,证明算法不因图像数量的增加而降低效率。实验是在Intel Core i7-6700处理器,仿真实验平台Matlab的PC机上完成的。

根据本文提出的重叠区域求取方法,在进行拼接开始前,根据不同的飞行任务初始设置,读入无人机飞行参数,如图2所示。



图 2 无人机飞行参数输入图

Fig. 2 UAV flight parameter input map

针对公路路面拼接可能遇到的情况,多次反复实验,针对以下几种情况进行说明。

实验 1:在进行路面图像采集的过程中,连续拍摄的图像存在着光照变化,相邻图像间可能存在亮度不一,对同一物体的图像表现不一,从而对拼接造成了一定的困难,如图 3~5 所示。

实验 2:当对路面进行图像采集时,可能存在车辆等明显物体,与背景对比明显,利用传统方式拼接可能会造成物体产生鬼影、错位等情况,如图 6~8 所示。

实验 3:无人机采集图像时,因自身及环境原因,图像存在较大视角变化,如图 9~11 所示。



图 3 实验 1 原图

Fig. 3 Original image of experiment 1

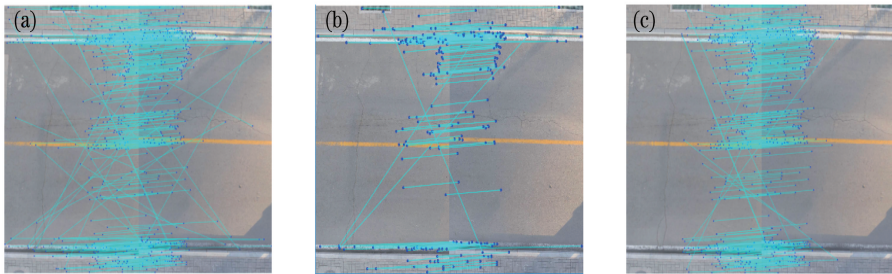


图 4 图像配准结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 4 Image registration results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

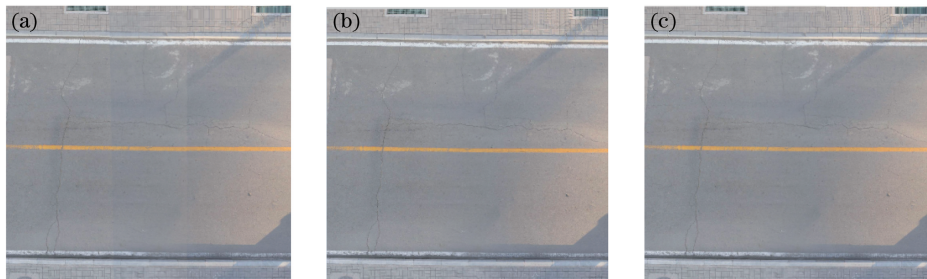


图 5 图像拼接结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 5 Image stitching results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method



图 6 实验 2 原图

Fig. 6 Original image of experiment 2

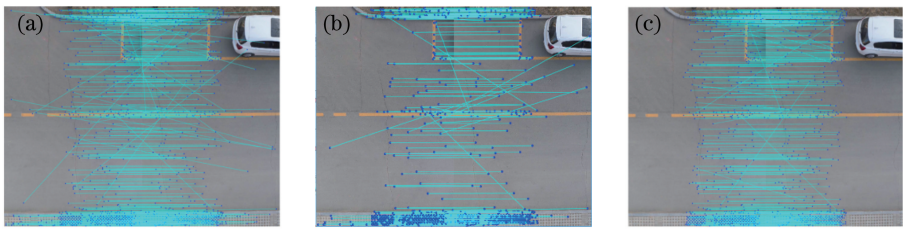


图 7 图像配准结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 7 Image registration results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

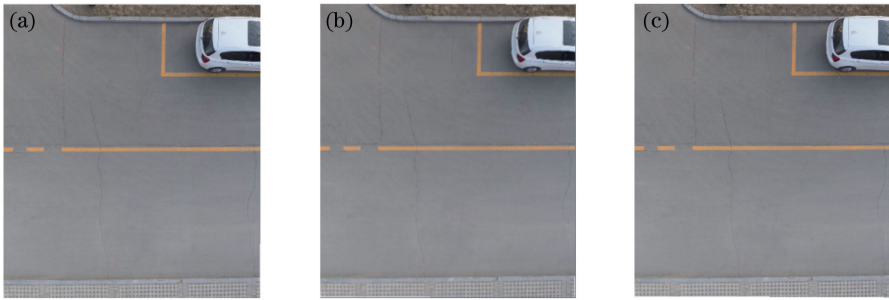


图 8 图像拼接结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 8 Image stitching results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

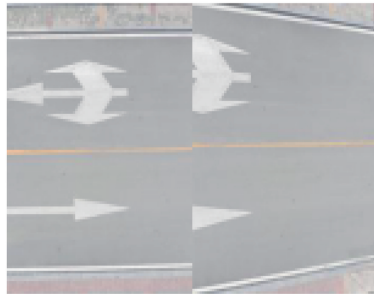


图 9 实验 3 原图

Fig. 9 Original image of experiment 3

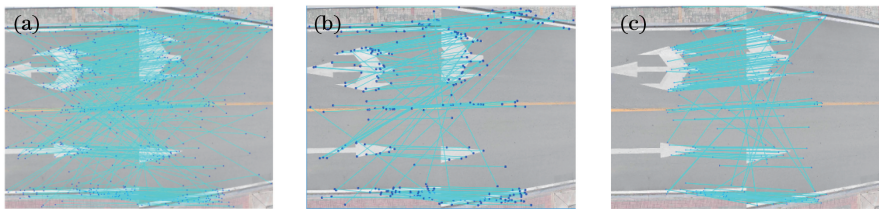


图 10 图像配准结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 10 Image registration results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

实验 4: 当需要连续进行拼接时, 取连续 4 张图像, 将其拼接一起, 展现较大范围的路面, 如图 12、13 所示。

由拼接图像观察可以看出: SIFT 算法拼接结果基本可以完成图像的拼接, 但当图像间光照差异较大时, 拼接结果易出现拼接带(如图 5 所示), 且随着拼接次数的增加, 拼接图像质量会有所下降(如图 13 所示)。当图像存在较大视角变化时(如实验 3

所示), 使用经典 SIFT 算法拼接图像可以看出, 已经产生较明显的错位现象。文献 5 算法的拼接结果较好, 图像过渡平缓, 无明显的拼接错位及鬼影现象。但特征点数量明显降低, 且配准特征点集中在纹理性较强的边缘区(如图 8 所示), 若采集过程出现缺少边缘部分, 会影响图像的拼接结果。使用本文算法, 配准特征点分布在图像重叠区域, 且避免相似区域相似点的匹配。拼接结果无拼接带、错位、鬼

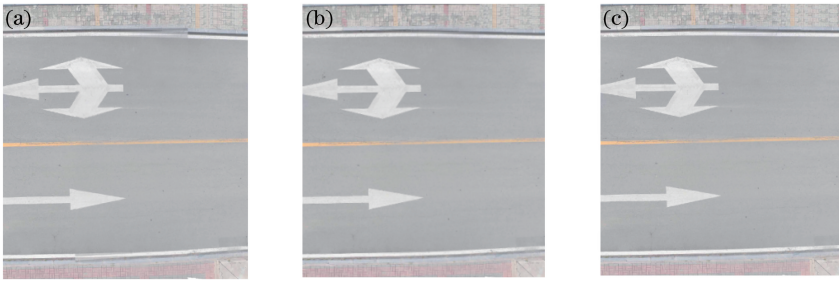


图 11 图像拼接结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 11 Image stitching results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

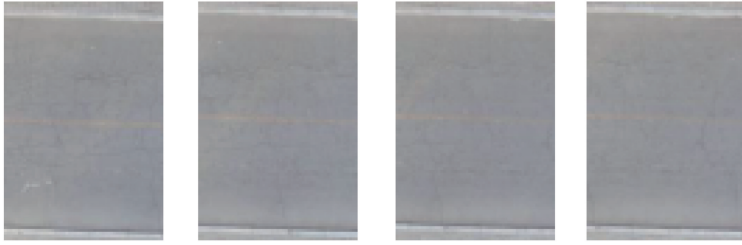


图 12 实验 4 原图

Fig. 12 Original image of experiment 4



图 13 图像拼接结果。(a)经典 SIFT 方法;(b)文献[5]方法;(c)本文方法

Fig. 13 Image stitching results. (a) Classic SIFT method; (b) method in Ref. [5]; (c) proposed method

影等现象,且随着拼接次数的增加,拼接图像质量不会下降。

同时本文采用图像间的配准正确率与拼接图像拼接总体耗时来评价拼接算法,其中配准正确率计算公式为

$$R_{acc} = \frac{N_c}{N_c + N_e} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: N_c 代表正确匹配的点对数; N_e 代表错误匹配的点对数。图像拼接总体耗时的计算区间为,拼接算法实现两张或多张图像拼接的总运行时间。表 1 为统计图像间的配准正确率与图像拼接所用时间。

表 1 实验配准正确率与拼接时间

Table 1 Experimental registration accuracy and splicing time

| Experiment | Classic SIFT method | | Method in Ref. [5] | | Proposed method | |
|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | Registration accuracy /% | Splicing time /s | Registration accuracy /% | Splicing time /s | Registration accuracy /% | Splicing time /s |
| Experiment 1 | 79.11 | 12.057 | 84.71 | 10.367 | 96.86 | 9.411 |
| Experiment 2 | 91.21 | 15.488 | 94.76 | 14.066 | 96.61 | 12.159 |
| Experiment 3 | 63.04 | 13.413 | 67.44 | 12.803 | 87.35 | 9.303 |
| Experiment 4 | 88.66 | 41.453 | 88.06 | 36.004 | 94.43 | 34.342 |

由表 1 可以看出,本文算法配准正确率相比经典 SIFT 算法和文献[5]算法均有所提高,除图像存

在较大视角变化外,均保持在 94% 以上,当图像存在较大视角变化时,相邻图像的配准正确率也达到

87%, 远高于经典 SIFT 和文献[5]算法的正确率, 比较稳定, 同时拼接的总体耗时也相应降低, 整体提高了图像间的拼接效率。

4 结 论

本文根据路面图像特点, 结合无人机航拍, 提出一种基于 SIFT-SR 的图像配准方法, 结合小波变换融合, 实现了路面图像的拼接。与其他改进拼接算法相比, 本文算法根据路面检测应用环境, 利用稀疏匹配避免了相似点存在的误匹配情况。通过实验证明, 该方法有效提高了配准正确率, 降低了拼接时间, 提高了拼接效率。同时针对可能遇到的情况多次反复实验, 实验结果表明该方法较稳定, 受环境影响较小, 可以较成功地实现路面图像的拼接。

参 考 文 献

- [1] Zhang L, Yang F, Daniel Zhang Y, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network[C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 25-28 Sept. 2016, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2016: 3708-3712.
- [2] Oliveira H, Correia P L. Road surface crack detection: improved segmentation with pixel-based refinement [C] // 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 28 Aug.-2 Sept. 2017, Kos, Greece. New York: IEEE Press, 2017: 2026-2030.
- [3] Akagic A, Buza E, Omanovic S, et al. Pavement crack detection using Otsu thresholding for image segmentation[C]//2018 41st International Convention on Information and Communication Technology. New York: IEEE Press, 2018.
- [4] Chatterjee A, Tsai Y C. A fast and accurate automated pavement crack detection algorithm[C]//2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). New York: IEEE Press, 2018.
- [5] Chen Y, Zhao Y, Wang S G. Fast image stitching method based on SIFT with adaptive local image feature[J]. Chinese Optics, 2016, 9(4): 415-422.
陈月, 赵岩, 王世刚. 图像局部特征自适应的快速 SIFT 图像拼接方法[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 415-422.
- [6] He B, Tao D, Peng B. High real-time F-SIFT image mosaic algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 440-444.
何宾, 陶丹, 彭勃. 高实时性 F-SIFT 图像拼接算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 440-444.
- [7] Li J, Wang Z M, Lai S M, et al. Parallax-tolerant image stitching based on robust elastic warping[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(7): 1672-1687.
- [8] Zhang J, Chen G X, Jia Z Y. An image stitching algorithm based on histogram matching and SIFT algorithm [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 31(4): 1754006.
- [9] Zhan S, Wang J, Yang F M, et al. Gaussian mixture sparse representation for image recognition Gabor features and dictionary learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 523-528.
詹曙, 王俊, 杨福猛, 等. 基于 Gabor 特征和字典学习的高斯混合稀疏表示图像识别[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 523-528.
- [10] Yang X M, Zhu C Q. Mult band wavelet transform and its applications in image analysis[J]. Journal of Image and Graphics, 1999(2): 157-160.
杨晓梅, 朱长青. 多进制小波变换及其在影像分析中的应用[J]. 中国图象图形学报(A辑), 1999(2): 157-160.
- [11] Xu X J, Wang Y R, Chen S. Medical image fusion using discrete fractional wavelet transform [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2016, 27: 103-111.
- [12] Zhou L, Wang Z Y, Jin J Q, et al. A new wavelet image fusion algorithm based on human visual system [J]. Journal of Image and Graphics, 2004(9): 1088-1094.
周礼, 王章野, 金剑秋, 等. 基于 HVS 的小波图像融合新算法[J]. 中国图象图形学报, 2004(9): 1088-1094.
- [13] Shi J, Liu X P, Sha X J, et al. A sampling theorem for fractional wavelet transform with error estimates [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(18): 4797-4811.