



融合颜色与光照信息的改进AKAZE图像匹配算法

张宇,胡立坤,黄彬

(广西大学电气工程学院,南宁 530004)

摘要:传统AKAZE算法主要以图像的灰度信息作为输入,忽略了颜色与光照信息,且存在过多的冗余特征点。提出一种融合颜色与光照信息的改进图像匹配算法。在图像原始灰度信息中增加颜色补偿量和光照补偿量,克服传统AKAZE算法未利用颜色和光照信息来区分同名点的缺点。在特征点邻域内计算欧式距离和区域重复率以确定重叠程度较高的相邻特征点,比较相邻特征点的响应强度,将响应强度值较小的特征点作为冗余点并删除。在图像匹配后利用随机一致性算法剔除误匹配点对,通过并行运算对算法进行加速。实验结果表明,该算法可以有效识别同名点并剔除图像中的冗余点,运行效率优于SIFT和SURF等算法。

关键词:图像匹配;AKAZE算法;颜色补偿;光照补偿;冗余特征点

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式:张宇,胡立坤,黄彬.融合颜色与光照信息的改进AKAZE图像匹配算法[J].计算机工程,2021,47(6):225-233.

英文引用格式:ZHANG Yu, HU Likun, HUANG Bin. Improved AKAZE image matching algorithm combining color and illumination information[J]. Computer Engineering, 2021, 47(6): 225-233.

Improved AKAZE Image Matching Algorithm Combining Color and Illumination Information

ZHANG Yu, HU Likun, HUANG Bin

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

[Abstract] The traditional AKAZE algorithm mainly takes the grayscale information of the image as the input and ignores the color and illumination information of the image, making it hard to distinguish identical points. In addition, it leaves too many redundant feature points unsolved. This paper proposes an improved image matching algorithm that combines color and illumination information. The algorithm introduces color compensation and illumination compensation into the original grayscale information of the image, to distinguish the identical points. To deal with the redundant feature points, the Euclidean distance and regional repetition rate in the neighborhood of feature points are calculated to determine the highly overlapped adjacent feature points. Then the response intensity values of neighboring feature points are compared, and the feature points with a low response intensity are deleted as redundant points. After image matching is done, the random consistency algorithm is used to eliminate the false matching point pairs, and the whole algorithm is accelerated through parallel operations. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively identify the identical points and eliminate the redundant points in the image. Its operation efficiency is also higher than that of SIFT, SURF and other algorithms.

[Key words] image matching; AKAZE algorithm; color compensation; illumination compensation; redundant feature point
DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0057709

0 概述

目前,图像匹配算法已广泛应用于计算机视觉、模式识别、自动驾驶和图像拼接等领域^[1-2]。基于特

征的匹配算法是最常用的图像匹配算法,大致分为基于特征点、基于特征线和基于特征区域的三类匹配算法^[3-4]。基于特征的匹配算法仅针对像素点进行运算,执行效率高且对图像的亮度、尺度和旋转等

基金项目:国家自然科学基金(61863002)。

作者简介:张宇(1993—),男,硕士研究生,主研方向为图像处理;胡立坤(通信作者),教授、博士;黄彬,硕士研究生。

收稿日期:2020-03-13 修回日期:2020-04-22 E-mail: hlk3email@163.com

变化具有较强的鲁棒性^[5-6]。

常用的特征点图像匹配算法 SIFT (Scale Invariant Feature Transform)^[7-8] 利用高斯核函数构造线性尺度空间, 保证特征点具备尺度不变性。SURF (Speed-Up Robust Features) 算法^[9] 采用 Hessian 矩阵构建尺度空间, 能够降低特征点描述符的维度, 相较 SIFT 算法缩短了整体运行时间。文献[10]提出一种 ORB (Oriented Fast and Rotated BRIEF) 算法, 其采用 FAST (Feature from Accelerated Segment Test) 算法^[11] 快速提取特征点, 在进行特征点描述时利用二进制描述子 BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features)^[12]。ORB 算法虽然提高了运算效率, 但特征点定位精度不高, 对图像旋转变化和尺度变化比较敏感。KAZE 算法^[13] 和 AKAZE (Accelerated-KAZE) 算法^[14] 通过构造非线性尺度空间, 有效保留了图像的边缘与细节。AKAZE 算法利用快速显示扩散 FED (Fast Explicit Diffusion) 算法构造非线性尺度空间, 其运算量低于 KAZE 使用的 AOS (Additive Operator Splitting) 算法, 且运行时间更短。AKAZE 算法使用的二进制描述符 M-LDB (Modified-Local Difference Binary) 对旋转和尺度变化具有很好的鲁棒性。文献[15]采用二进制特征描述子 FREAK 代替 M-LDB 描述符进行特征点描述, 利用 Grid-KNN 算法对特征点实现粗匹配, 能够兼顾匹配效率和匹配精度。

传统的 AKZE 算法仅利用图像的灰度信息作为输入, 未考虑图像中的颜色与光照信息。文献[16]采用颜色不变量的灰度级变换代替传统灰度影像作为算法输入, 虽然其增加了图像匹配彩色信息, 但灰度变换的范围参数只能根据经验值确定。文献[17]通过在传统灰度信息上增加颜色补偿量与光照补偿量, 从而克服图像缺少颜色信息的缺点, 但与图像相应的预处理操作也会延长算法的总体运行时间。尺度空间使得同一个局部结构会存在多个特征点表示, 文献[18]提出一种聚类方法以删除冗余点, 通过遍历所有尺度空间, 将距离相近的特征点归为一类并保留响应值最大的特征点, 但该方法与文献[19]方法相同, 都仅利用距离作为判别标准, 容易删除稳定的特征点。文献[20]提出一种基于距离的冗余点删除方法, 通过欧式距离确定相邻特征点, 将每个特征点与其余特征点的距离作为约束条件以删除冗余点, 但是, 该方法的计算时间过长。

AKAZE 算法在传统的灰度信息上引入颜色补偿量和光照补偿量, 能够提高匹配精度但同时增加了冗余点。为了解决算法中存在过多冗余点的问题, 本文对 AKAZE 算法进行改进, 结合特征点间的距离和区域重复率快速精确地识别冗余点, 比较冗余点间的响应强度, 删除响应强度值较小的冗余点, 同时利用并行运

算进行加速, 从而保证算法的实时性。

1 AKAZE 算法分析及改进策略

AKAZE 算法利用非线性扩散滤波器构建尺度空间, 在尺度空间中, 图像的灰度在平缓区域以较快的速度扩散, 边缘处扩散速度较慢, 从而很好地保留图像边缘信息与局部细节。AKAZE 算法主要包括以下 5 个步骤:

1) 非线性尺度空间构造。非线性扩散滤波是一种各向异性的滤波方法, 可以用非线性偏微分方程表示, 如下:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \cdot \nabla L) \quad (1)$$

其中, L 为图像亮度, div 和 ∇ 分别表示散度和梯度, c 为传导函数, 其依赖于图像局部差分结构, 可以自适应于图像局部结构特性进行扩散, t 为时间参数。传导函数定义如下:

$$c(x, y, t) = g(\nabla L_o(x, y, t)) \quad (2)$$

其中, 函数 g 为传导核函数, 如式(3)所示, 其可以优先保留宽度较大的区域。

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla L_o|^2 / \lambda^2} \quad (3)$$

其中, 参数 λ 用来控制扩散程度。

非线性偏微分方程可以利用 FED 方法计算出近似解, 通过不断循环构造出具有 O 组、每组有 S 层的非线性尺度空间。将式(1)进行离散化可得到如下形式:

$$L^{i+1} = (I + \tau A(L^i))L^i, i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

其中, I 是单位矩阵, $A(L^i)$ 是图像 L^i 的传导矩阵, τ 为时间步长。为了保证所构造尺度空间的稳定性, τ 的值要小于 τ_{\max} , τ_{\max} 表示不破坏显示方程稳定性的最大迭代步长。

2) 特征点检测。AKAZE 算法在尺度空间的每一层中利用 Hessian 矩阵寻找局部极大值点, Hessian 矩阵的计算公式如式(5)所示:

$$L_{\text{Hessian}} = \sigma^2 (L_{xx} L_{yy} - L_{xy}^2) \quad (5)$$

其中, σ 为尺度参数, L_{xx} 与 L_{yy} 分别为二阶横向微分和二阶纵向微分, L_{xy} 为二阶交叉微分。

找到局部极大值点后, 会出现位置相差不大、代表同一局部结构的冗余点, 为剔除冗余点, 通常将每个点的响应值与本层的 8 个邻域点以及上下相邻层的 18 个点相比较, 以求出极值, 但是该方法不能完全删除冗余点。在求出特征点的位置之后, 根据泰勒展开式求解亚像素的精确位置, 如下:

$$L(x) = L + \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right)^T x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} x \quad (6)$$

其中, \mathbf{x} 为特征点的位置坐标, 特征点亚像素坐标的解为:

$$\hat{\mathbf{x}} = - \left(\frac{\partial^2 \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}^2} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{x}} \quad (7)$$

3) 特征点主方向求解。AKAZE算法以特征点为中心, 以 6σ 为半径确定圆形区域, 分别求取特征点邻域内点的一阶微分值 L_x 和 L_y 并进行高斯赋权运算, 以角度为 60° 的扇形窗口旋转, 叠加邻域中点的向量, 主方向选取单位向量和中的最长矢量方向。

4) 特征向量描述。M-LDB算法针对LDB(Local Difference Binary)算法的图像旋转与缩放性能进行改进。M-LDB算法并不使用所有划分网格的像素, 而是在划分好的网格中进行以尺度 σ 为间隔的重采样以得到离散点, 使用采样值代替该网格的梯度与强度信息, 从而提高计算效率。

5) 特征点匹配。特征点描述向量为二进制描述符, 通过异或操作计算特征向量间的汉明距离, 比较汉明距离与预设的阈值大小以判断特征点的相似程度。匹配完成后通过RANSAC算法剔除误匹配点, 以保证匹配精度。

为了克服AKAZE算法忽略图像颜色和光照信息以及存在过多冗余点的缺点, 本文提出一种融合颜色和光照信息的改进AKAZE图像匹配算法, 该算法通过OpenMP(Open Multi-Processing)^[21]并行运算对待匹配的图像进行颜色与光照补偿、特征点提取以及冗余特征点删除, 算法流程如图1所示。

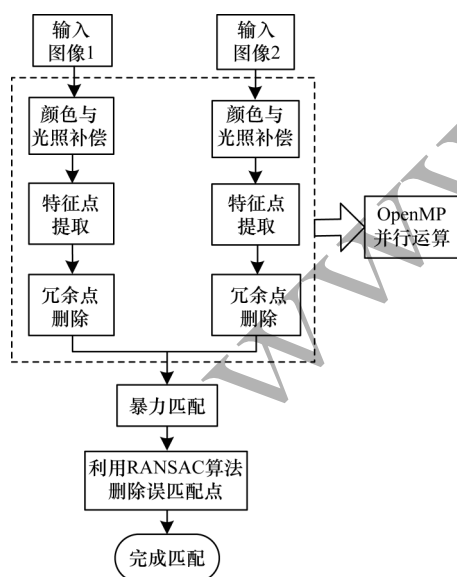


图1 改进AKAZE图像匹配算法流程

Fig.1 Procedure of improved AKAZE image matching algorithm

2 颜色光照补偿

本文通过在图像的灰度变换中增加颜色补偿量, 使灰度图像包含更多的颜色信息, 通过增加光照补偿量, 以解决图像匹配时忽略颜色信息以及图像成像时存在欠曝光或过曝光的问题, 从而降低环境光照变化对算法性能的影响。

2.1 颜色补偿量计算

$Y C_B C_R$ 颜色空间可以准确表示颜色变化特性, 本文选择 $Y C_B C_R$ 颜色空间来计算颜色补偿量和光照补偿量, $Y C_B C_R$ 可以通过RGB颜色空间变换得到, 变换公式如式(8)所示:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 127.5 \\ 127.5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, Y 表示亮度分量, C_B 与 C_R 分别代表蓝色色度分量与红色色度分量。

通过比较输入图像的平均蓝色色度分量 m_B 与平均红色色度分量 m_R 确定图像的颜色特征。综合考虑图像整体色度特征与单个像素的颜色差异, 得到颜色补偿量 Y_C 如下:

$$Y_C = k \operatorname{sgn}(m_R - m_B) \operatorname{sgn}(C_R - C_B) \times |C_R - C_B|^\alpha \quad (9)$$

其中, k 是对比度参数, 取值范围为 $[1, 4]$, 本文中取值为3, α 是范围参数, 取值范围为 $[0.4, 0.6]$, 本文中取值为0.5。增加了颜色补偿量的灰度值 P 如式(10)所示:

$$P = Y + k \operatorname{sgn}(m_R - m_B) \operatorname{sgn}(C_R - C_B) \times |C_R - C_B|^\alpha \quad (10)$$

2.2 光照补偿量计算

光照补偿量以增加了颜色补偿量的灰度值 P 为基础进行计算, 如下:

$$Y_E = (127.5 - m_p) \exp[-(i - 0.5)^2 / 2\sigma^2] \quad (11)$$

其中, i 是灰度值 P 的归一化值, σ 取值为0.2, m_p 为灰度均值, 因为曝光良好的图像的灰度均值在127.5左右, 所以通过减少或增加像素灰度值可以使图像灰度均值更接近127.5。为保留图像更多细节并提升对比度, 本文采用高斯权重函数调整图像光照强度, 使接近于0.5的归一化灰度值得到的权重系数更大。最终灰度值由原始亮度、颜色补偿量和光照补偿量3个部分组成, 如下:

$$W = Y + Y_C + Y_E \quad (12)$$

颜色光照补偿前后的图像对比结果如图2所示, 彩色效果见《计算机工程》官网HTML版。其中, 图2(c)为增加了颜色光照补偿后的灰度图, 对比原始灰度图, 可以看到图像局部细节得到保留和增强, 灰度级相似但色调不同的区域区别度更高。由图2(d)和图2(e)对比可知, 增加了颜色和光照补偿的图像, 其检测到的特征点数量更多。



图2 颜色光照补偿前后的图像对比结果
Fig.2 Image comparison results before and after color and illumination compensation

3 冗余点检测与删除

本文提出一种冗余点检测与删除方法,冗余点删除前后的图像对比结果如图3所示。

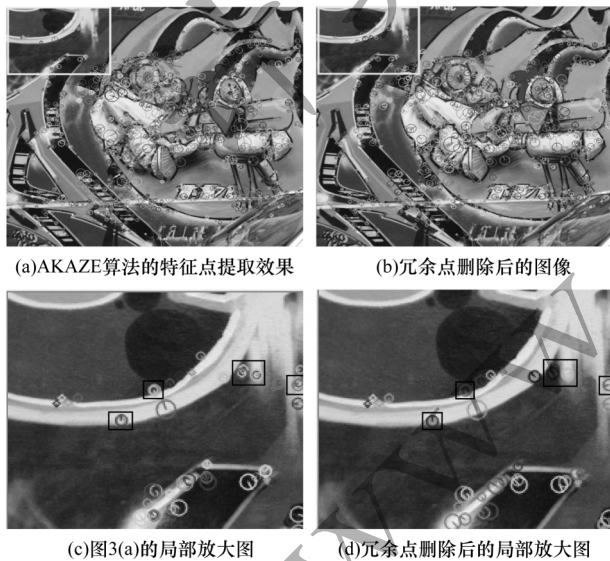


图3 冗余点删除前后的图像对比结果
Fig.3 Image comparison results before and after redundant points deletion

AKAZE算法在进行特征点提取时,同一个局部结构会检测到多个冗余点,如图3(a)所示,图中仅标出了部分冗余点,图像结构越复杂的地方出现冗余点的概率越高。冗余点的存在不仅提高了算法的运算量,而且会影响匹配精度。本文冗余点检测与删

除方法主要包括以下4个步骤:

步骤1 利用AKAZE算法对输入图像构建非线性尺度空间,在尺度空间内检测特征点,确定特征点的具体位置。

步骤2 假设输入图像有M个特征点,搜寻每个特征点n×n邻域内的相邻特征点,计算该特征点与相邻特征点的欧式距离,如下:

$$d_2(p_m, p_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^l (p_m(i) - p_n(i))^2} \quad (13)$$

其中, p_m 为输入图像中提取的第m个特征点, p_n 为 p_m 邻域内的一个特征点, l 为特征点的维度。

设定距离阈值 T_{dis} , 由式(14)计算出特征点 p_m 的内点和外点。若 $S(p_m, p_n)$ 等于1, 则 p_n 为 p_m 的内点; 若 $S(p_m, p_n)$ 等于0, 则 p_n 为 p_m 的外点。

$$S(p_m, p_n) = \begin{cases} 1, & d_2(p_m, p_n) \leq T_{dis} \\ 0, & d_2(p_m, p_n) > T_{dis} \end{cases} \quad (14)$$

步骤3 设特征点 p_m 的内点集合为:

$$X_m = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (15)$$

利用式(16)分别求取特征点 p_m 及其内点集合 X_m 中的特征点所代表的局部区域:

$$are(p_m) = (1.5 \times \sigma / 2^t)^2 \times \pi \quad (16)$$

其中, σ 为特征点 p_m 所在尺度空间层的尺度因子, t 为 p_m 所在层数。

步骤4 由式(17)求出2个特征点的区域重复率 ϵ_t , 若区域重复率小于所设定的阈值, 则认定2个特征点相似, 比较特征点间的响应强度, 将响应强度值较小的特征点认定为冗余点并删除。

$$\epsilon_t = 1 - \frac{are(p_m) \cap are(x_i)}{are(p_m) \cup are(x_i)} \quad (17)$$

从图3(d)可以看出, 图像中距离相近并且重叠程度较高的位置, 在经过算法删除后只保留了响应强度值较高的特征点。冗余点的删除能够为后续特征点描述和特征点匹配减少计算量, 从而提高算法的运行效率。

4 实验结果与分析

4.1 图像匹配结果对比及分析

衡量一种图像匹配算法性能的重要指标包括图像的匹配时间以及匹配正确率。本文分别从图像光照变化、视点变化、模糊变化和旋转放大变化4个方面进行实验。用于匹配实验的图像选自标准测试库, 测试库中的部分图像如图4所示, 每个图像集包含6个图像序列, 第1幅为参考图像, 剩余5幅为待匹配图像。实现所用的编程软件平台为 Visual Studio 2017, 编程语言为 C++, 实验平台基于 OpenCV3.5.10实现。

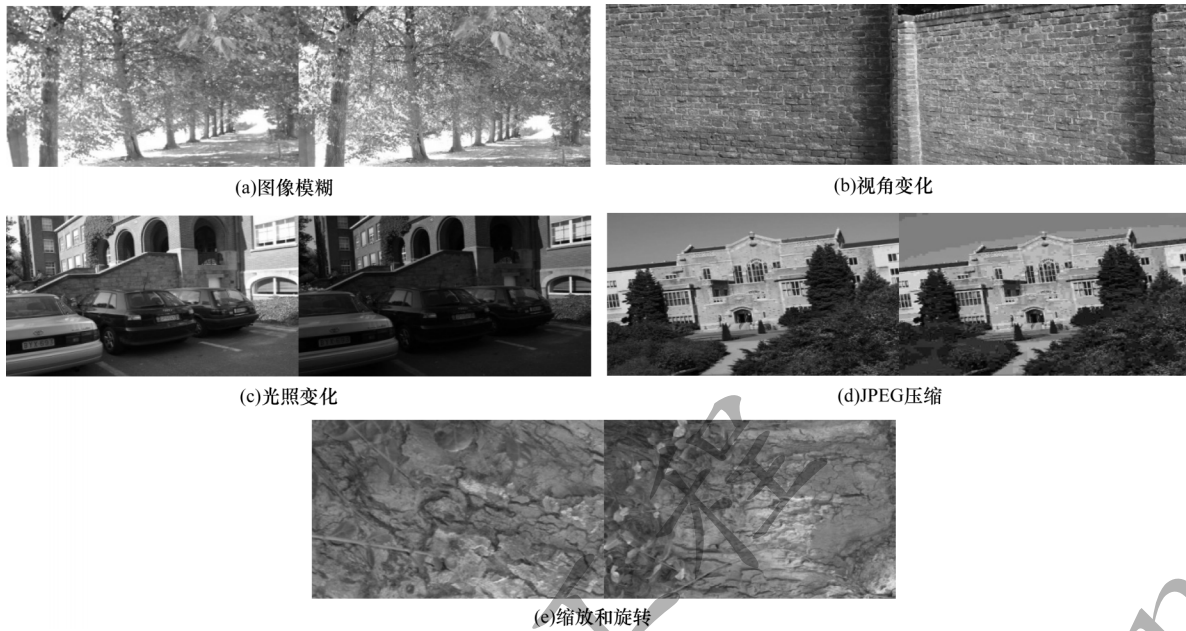


图4 仿真图像

Fig.4 Simulation images

实验对比算法包括本文增加颜色光照补偿的冗余点删除算法、SIFT算法、SURF算法、AKAZE算法和RKEM-AKAZE算法，RKEM冗余点删除方法来自于文献[20]。选取不同的 ϵ 值进行实验，可以得出，当 ϵ 取值为0.6时，匹配时间和匹配精度取得最佳结果。若 ϵ 阈值设置偏大而不能获得足够多的正确匹配点对，则阈值自动减少0.1再进行特征点提取与匹配。 n 取值为5，欧式距离 d_2 的阈值设为3。

表1所示为光照变化下5种算法对图像的匹配

正确率与匹配时间统计结果，从表1可以看出，5种算法的正确率相差不大，但本文算法在光照变化时正确率均保持在98%以上，有较好的稳定性。SURF算法相较其他算法所用时间最长。本文算法用时最短，效率比AKAZE算法大约提高10%，该算法不仅使特征点具备几何和颜色的双重特征，能够在不同光照条件下检测到足够多的特征点，而且删除了重复率高、稳定性低的冗余点，有效缩短了算法执行时间。图5所示为光照因素对AKAZE算法与本文算法图像匹配效果的影响。

表1 不同光照条件下5种算法的匹配性能对比

Table 1 Comparison of matching performance of five algorithms under different illumination conditions

图像序列	SIFT算法			SURF算法			AKAZE算法			RKEM-AKAZE算法			本文算法		
	匹配对数	正确率 /%	总时间 /s	匹配对数	正确率 /%	总时间 /s	匹配对数	正确率 /%	总时间 /s	匹配对数	正确率 /%	总时间 /s	匹配对数	正确率 /%	总时间 /s
a1-2	484	99.38	4.75	574	99.83	11.69	886	99.32	4.26	755	99.33	4.59	981	99.44	2.72
a1-3	395	99.75	4.69	412	100.00	8.33	629	99.52	3.73	416	99.28	4.57	671	99.11	2.73
a1-4	360	98.89	4.51	311	99.67	7.72	434	99.54	3.35	259	99.61	4.71	563	99.22	2.63
a1-5	319	99.37	4.89	125	100.00	5.74	255	99.59	3.17	164	98.78	4.63	381	99.48	2.74
a1-6	231	97.84	4.92	49	97.96	4.74	159	94.97	3.16	39	92.31	4.71	217	98.16	2.83



(a)光照因素对AKAZE算法的匹配效果影响

(b)光照因素对本文算法的匹配效果影响

图5 光照因素对匹配结果的影响

Fig.5 Influence of illumination factor on matching results

从表2和表3可以看出,在模糊因素、视角因素的影响下,本文算法与RKEM-AKAZE算法、SURF算法的配准精度基本相同,优于AKAZE与SIFT算法。随着图像模糊程度的提高,SIFT算法、SURF算法失效,无法获得正确的匹配点对。特征点数量较多时RKEM-

AKAZE算法与SURF算法执行时间较长,而本文算法所用时间比较稳定,与其他算法相比耗时最少。综上,本文算法对图像模糊和视角变化的鲁棒性更强。图6所示为AKAZE算法与本文算法在模糊、视角因素影响下的部分图像匹配结果。

表2 不同模糊条件下5种算法的匹配性能对比

Table 2 Comparison of matching performance of five algorithms under different fuzzy conditions

图像序列	SIFT算法			SURF算法			AKAZE算法			RKEM-AKAZE算法			本文算法		
	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s
b1-2	139	97.84	6.31	558	99.46	31.96	877	99.43	8.75	590	99.49	49.81	573	99.48	7.25
b1-3	94	95.74	6.89	352	98.86	28.54	639	99.84	8.34	287	98.97	47.93	287	99.30	6.89
b1-4	13	0.00	6.41	55	98.18	23.31	256	98.34	7.48	209	99.52	43.81	165	98.79	6.58
b1-5	14	0.00	6.89	19	0.00	21.42	25	88.00	6.85	33	97.06	41.34	24	95.83	6.06

表3 不同视角条件下5种算法的匹配性能对比

Table 3 Comparison of matching performance of five algorithms under different perspective conditions

图像序列	SIFT算法			SURF算法			AKAZE算法			RKEM-AKAZE算法			本文算法		
	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s
c1-2	516	97.87	5.98	1203	99.83	22.49	1763	98.81	7.26	1548	99.03	22.43	1137	99.56	4.27
c1-3	405	97.28	5.99	830	99.28	18.49	1221	98.94	6.27	922	99.02	22.37	664	99.25	4.62
c1-4	237	94.49	6.42	258	97.72	15.69	405	97.78	5.57	206	100.00	23.07	50	100.00	4.51

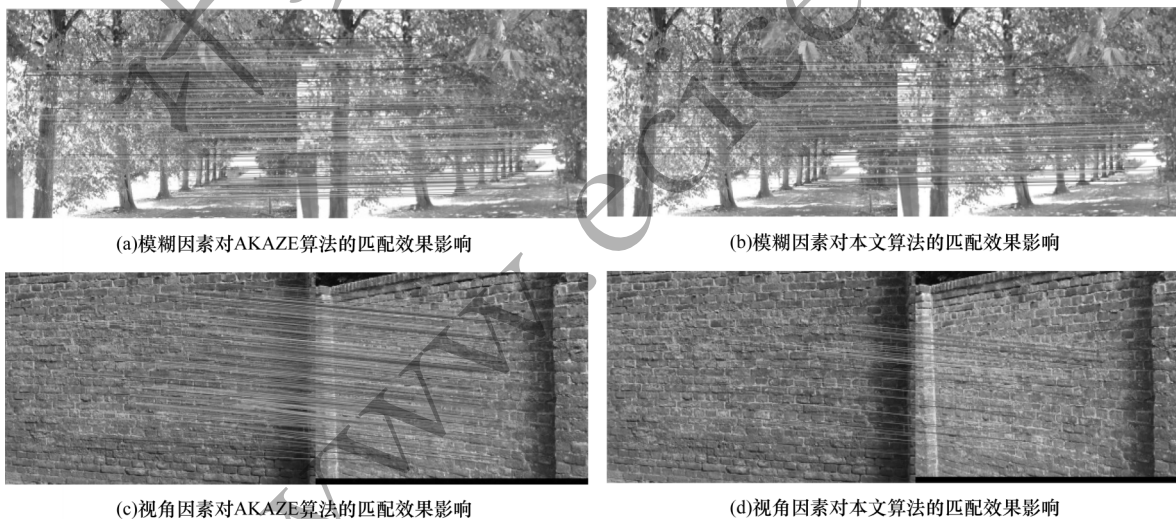


图6 部分图像的仿真结果

Fig.6 Simulation results of some images

图7所示为JPEG压缩影响下5种算法的匹配时间和匹配正确率对比结果,图8所示为AKAZE算法与本文算法在JPEG因素影响下的部分图像匹配结果。从图7可以看出,本文算法与SURF算法匹配正确率略优于其他算法,SURF算法牺牲一定的匹配速度从而保证匹配正确率。本文算法的匹

配正确率均保持在98.5%以上,同时保证了一定的匹配速度,匹配时间优于SURF算法、SIFT算法、AKAZE算法与RKEM-AKAZE算法,相较AKAZE算法,本文算法的平均匹配效率大约提高25%,由以上分析可知,本文算法能够较好地适应图像的JPEG压缩变化。

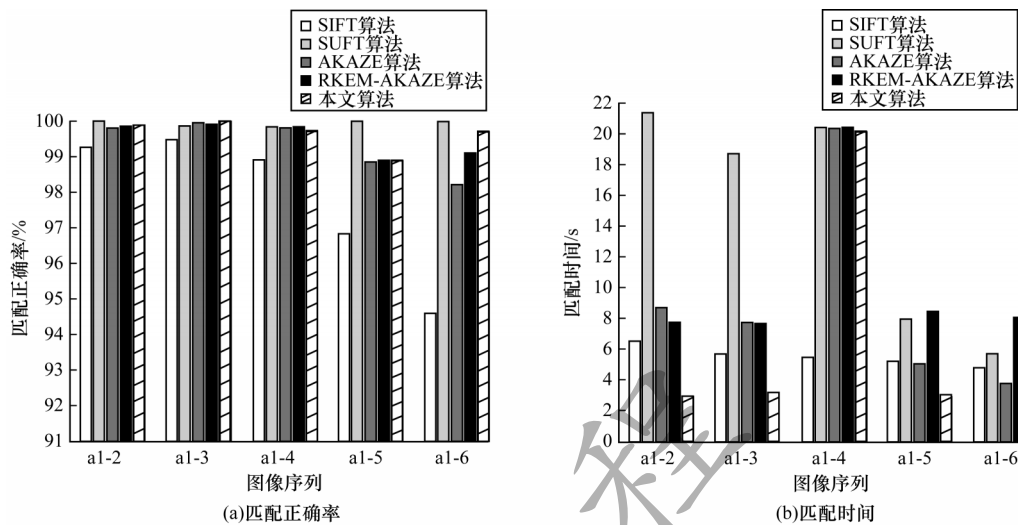
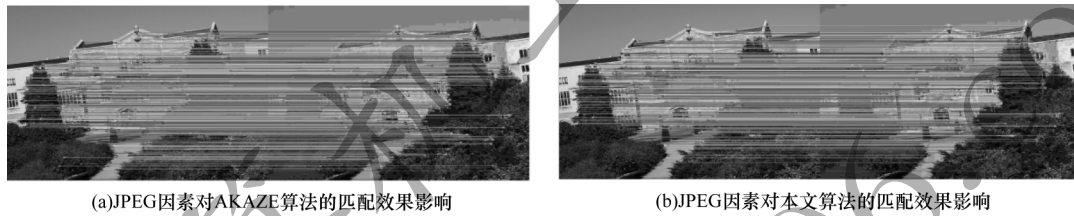


图7 JPEG压缩情况下5种算法的匹配正确率与匹配时间对比结果

Fig.7 Comparison of matching accuracy and matching time of five algorithms under JPEG compression



(a)JPEG因素对AKAZE算法的匹配效果影响

(b)JPEG因素对本文算法的匹配效果影响

图8 JPEG因素对匹配结果的影响

Fig.8 Influence of JPEG factor on matching results

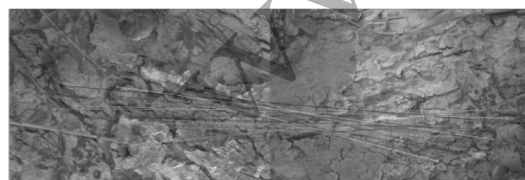
表4的数据由图4(e)图像仿真得到,从表4可以看出,本文算法与RKEM-AKAZE算法在旋转缩放变化下匹配正确率明显优于其他算法,SIFT算法匹配正确率最低。在算法运行时间方面,SIFT算法与SURF算法所用时间较长,本文算法

用时最少。综上,本文算法在旋转缩放条件下能够保证匹配精度,同时兼顾算法的执行效率,具备良好的可区分性。图9所示为旋转缩放因素影响下AKAZE算法与本文算法的部分图像匹配结果。

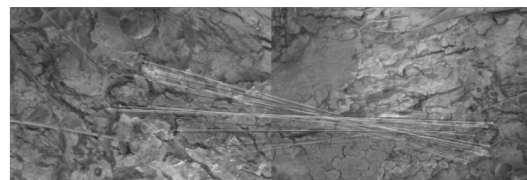
表4 不同旋转缩放条件下5种算法的匹配性能对比

Table 4 Comparison of matching performance of five algorithms under different rotation and scaling conditions

图像序列	SIFT算法			SURF算法			AKAZE算法			RKEM-AKAZE算法			本文算法		
	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s	匹配对数	正确率/%	总时间/s
e1-2	135	97.78	6.74	113	96.46	5.65	130	99.23	2.61	34	100.00	2.84	105	100	2.24
e1-3	70	92.86	7.04	53	96.23	5.09	25	96.00	2.25	31	96.78	2.58	45	100	2.58



(a)旋转缩放因素对AKAZE算法的匹配效果影响



(b)旋转缩放因素对本文算法的匹配效果影响

图9 旋转缩放因素对匹配结果的影响

Fig.9 Influence of rotation and scaling factors on matching results

4.2 时间效率分析

本文算法在匹配图像中增加了颜色光照信息,使提取的同名点更具区分度,利用区域重复率删除

冗余特征点,将并行运算应用于算法的特征提取与特征描述阶段。在相同的实验环境中,分别统计本文算法、KAZE算法与SIFT算法在特征点提取、特征

点描述与特征点匹配3个阶段的耗时,结果如表5所示。

表5 3种算法的效率对比结果
Table 5 Efficiency comparison results of three algorithms

阶段	SIFT算法时间	KAZE算法时间	本文算法时间
特征点提取	1.45	12.27	1.24
特征点描述	0.87	4.12	0.81
特征点匹配	1.95	1.16	0.87

从表5可以看出,本文算法利用快速显示扩散FED算法构造非线性尺度空间,相较KAZE使用的可变传导扩散算法和加性算子分裂算法AOS减少了运算量,并且本文算法利用局部区域特征点信息代替RKEM^[20]全局特征点信息作为冗余点判断依据,有效节省了算法运行时间,冗余点删除也相应减少了后续特征点描述与特征点匹配的用时。SIFT算法与KAZE算法均采用浮点型描述子描述特征,本文算法采用二进制描述子描述特征,其运行速度得到大幅提升。综上,本文算法在特征点提取、特征点描述与特征点匹配阶段的时间效率更具优势。

4.3 航拍图像拼接

图10所示为无人机航拍图像,利用本文算法对航拍图像进行匹配,采用加权平均法融合图像重叠区域以实现图像拼接。

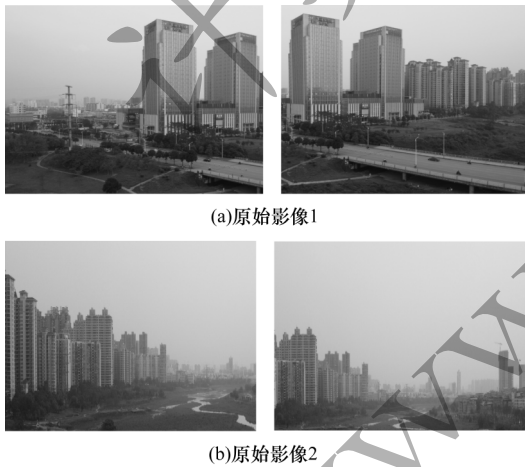


图10 实验图像

Fig.10 Experimental images

均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为图像拼接结果的重要评价指标之一, RMSE越低,说明匹配精度越高,拼接效果越好。RMSE的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|(x_i, y_i) - (x'_i, y'_i)\|^2} \quad (18)$$

其中, (x_i, y_i) 为图像2中的特征点坐标, (x'_i, y'_i) 为图像1中的特征点经过单应性矩阵变换得到的坐标, M 为

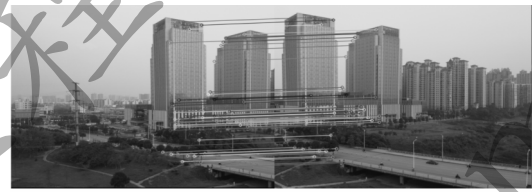
匹配的特征点对数量。

从表6可以看出,本文算法在保证匹配精度的同时可以有效提升匹配速度。图像匹配结果如图11所示,拼接结果如图12所示,从图12可以看出,拼接后的图像无明显重影,整体色度变化均匀,拼接处没有缝隙,即本文算法较好地实现了图像拼接。

表6 4种算法的RMSE比较

Table 6 RMSE comparison of four algorithms

影像	SIFT算法	SURF算法	AKAZE算法	本文算法
影像1	0.39	0.44	0.35	0.39
影像2	0.48	0.58	0.46	0.38



(a)影像1匹配结果



(b)影像2匹配结果

图11 图像匹配结果

Fig.11 Image matching results



(a)影像1拼接结果



(b)影像2拼接结果

图12 图像拼接结果

Fig.12 Image mosaic results

5 结束语

本文在图像的灰度信息中增加颜色补偿量和光照补偿量,克服传统图像匹配算法忽略颜色信息和光照信息的缺点。针对图像同一局部结构存在多个特征点的情况,提出一种基于欧式距离和区域重复率的冗余点删除算法,在特征提取阶段删除冗余点。图像匹配完成后利用RANSAC算法删除误匹配点

对,通过OpenMP并行运算进行加速。分别针对图像模糊、旋转、光照、视点和压缩等变化因素进行仿真验证,结果表明,与SIFT、SURF、AKAZE和RKEM-AKAZE等算法相比,该算法可以有效识别同名点,剔除图像冗余点,缩短图像匹配时间,在保证图像匹配精度的同时高效实现无人机图像的无缝拼接。下一步考虑将图像匹配算法与神经网络相结合,以提高匹配算法的精度、实时性和通用性。

参考文献

- [1] NASROLLAHI K, MOESLUND T B. Super-resolution: a comprehensive survey [J]. *Machine Vision and Applications*, 2014, 25(6): 1423-1468.
- [2] LI Yali, WANG Shengjin, TIAN Qi, et al. A survey of recent advances in visual feature detection [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149(5): 736-751.
- [3] GHOSH D, KAABOUCH N. A survey on image mosaicing techniques [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 34: 1-11.
- [4] WANG Zhicheng, CHEN Yufei, ZHU Zewei, et al. An automatic panoramic image mosaic method based on graph model [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(5): 2725-2740.
- [5] WU Hanqian, LI Chengchao, XIE Jue. Application of improved A-KAZE algorithm in image registration [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2017, 47(4): 667-672. (in Chinese)
吴含前,李程超,谢珏.一种改进的A-KAZE算法在图像配准中的应用[J].*东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(4): 667-672.
- [6] KWON O S, HA Y H. Panoramic video using scale-invariant feature transform with embedded color-invariant values [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2): 792-798.
- [7] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//*Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1999: 1150-1157.
- [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [9] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. SURF: speeded up robust features [C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*. Berlin, Germany: Springer, 2006: 404-417.
- [10] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C]//*Proceedings of International Conference on Computer Vision*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 2564-2571.
- [11] ROSTEN E, DRUMMOND T. Machine learning for high-speed corner detection [C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*. Berlin, Germany: Springer, 2006: 430-443.
- [12] CALONDER M, LEPETIT V, STRECHA C, et al. BRIEF: binary robust independent elementary features [C]//*Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision*. Berlin, Germany: Springer, 2010: 778-792.
- [13] ALCANTARILLA P F, BARTOLI A, DAVISON A J. KAZE features [C]//*Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*. Berlin, Germany: Springer, 2012: 214-227.
- [14] WEICKERT J, GEWENIG S, SCHROERS C, et al. Cyclic schemes for PDE-based image analysis [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2016, 118(3): 275-299.
- [15] HAN Min, YAN Kuo, QIN Guoshuai. A mosaic algorithm for UAV aerial image based on improved KAZE [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(2): 305-314. (in Chinese)
韩敏,闫阔,秦国帅.基于改进KAZE的无人机航拍图像拼接算法[J].*自动化学报*, 2019, 45(2): 305-314.
- [16] LING Huangqing, XIE Yi, FU Sizhou. UAV image registration algorithm using color and AKAZE feature [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7): 900-909. (in Chinese)
梁焕青,谢意,付四洲.颜色不变量与AKAZE特征相结合的无人机影像匹配算法[J].*测绘学报*, 2017, 46(7): 900-909.
- [17] ZHAO Y, ZHAI Y, ERIC D, et al. Image matching algorithm based on SIFT using color and exposure information [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(3): 691-699.
- [18] WANG Wei, WANG Zhanqing. Image of multi-scale feature points clustering [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(11): 2597-2603. (in Chinese)
王薇,王展青.多尺度特征点聚类的图像配准算法[J].*小型微型计算机系统*, 2017, 38(11): 2597-2603.
- [19] GAO Fei, WANG Cong, JIAO Donghang. An image registration algorithm based on block information entropy characteristic scale [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(11): 1194-1199. (in Chinese)
高飞,王聪,矫东航.基于分块信息熵和特征尺度的图像配准算法[J].*北京理工大学学报*, 2016, 36(11): 1194-1199.
- [20] HOSSEIN-NEJAD Z, NASRI M. RKEM: redundant keypoint elimination method in image registration [J]. *IET Image Processing*, 2017, 11(5): 273-284.
- [21] ZOU Guoliang, ZHANG Shiming, CHEN Changji. Design of image matching parallel algorithm based on improved minimum distance method [J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(9): 218-223. (in Chinese)
邹国良,张石明,陈长吉.基于改进最小距离法的图像匹配并行算法设计[J].*计算机工程*, 2018, 44(9): 218-223.