

融合改进 SURF 和 Cell 加速的幂函数加权 图像拼接方法

赵潇洒¹, 陈西江^{1*}, 班亚², 张丹丹¹, 徐乐先¹

¹武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430079;

²重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401120

摘要 针对图像拼接过程中传统算法存在特征点匹配正确率低和图像融合过程中出现重影、色差及拼接缝隙等问题, 提出一种融合改进 SURF(Speeded Up Robust Feature)和 Cell 加速的幂函数加权图像拼接方法。首先利用余弦相似度初步判断特征点的相似性, 然后结合双向一致性算法和 MSAC 算法对粗匹配点进行精匹配, 最后使用 Cell 加速的幂函数权重对图像进行融合, 从而完成图像拼接。实验结果表明, 相比于其他算法, 所提算法的特征点匹配正确率高出约为 11 个百分点, 均方误差缩小约为 1.32%~1.48%, 信息熵提升约为 0.98%~1.70%, 拼接总时间消耗减少约为 2 s。所提算法在匹配正确率和融合效果上有较好的效果, 且同时拥有较好的拼接图像质量, 具有更好的普适性。

关键词 图像处理; 图像拼接; 余弦相似性; MSAC 算法; 加权融合; Cell 加速

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.241018

Power Function-Weighted Image Stitching Method Involving Improved SURF and Cell Acceleration

Zhao Xiaosa¹, Chen Xijiang^{1*}, Ban Ya², Zhang Dandan¹, Xu Lexian¹

¹School of Resource & Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430079, China;

²Chongqing Institute of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401120, China

Abstract In this study, a power function-weighted image stitching method with fusion-improved SURF (Speeded Up Robust Feature) and Cell acceleration is proposed to resolve problems, such as the low feature point matching accuracy associated with the traditional algorithms in the image stitching process and ghosting, color difference, and stitching gaps observed during the image fusion process. First, the similarity of the feature points is verified using cosine similarity. Then, the two-way consensus algorithm and the MSAC algorithm are combined to finely match the rough matching points. Finally, the power function weights obtained via cell acceleration are used to fuse images for obtaining the image stitching. Experimental results show that compared with other algorithms, the feature point matching accuracy of the proposed algorithm increases by approximately 11%, the mean square error decreases by approximately 1.32%-1.48%, the information entropy increases by approximately 0.98%-1.70%, and the total stitching time decreases by approximately 2 s. Compared with other algorithms, the proposed algorithm obtains better results with respect to the matching accuracy and fusion effect; furthermore, improved image splicing quality and universality can be obtained.

Key words image processing; image stitching; cosine similarity; MSAC algorithm; weighted fusion; Cell acceleration

OCIS codes 100.2000; 110.2960

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-05-28; 录用日期: 2020-06-24

基金项目: 长江科学院开放研究基金(CKWV2019758/KY)、重庆市质量技术监督局科研计划(CQZJKY2018004)、重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jscx-msxmX0051)

* E-mail: cxj_0421@163.com

1 引言

图像拼接是采用图像配准和图像融合技术将多幅存在部分重合的图像形成一幅宽视角和无缝隙的全景图像,并尽量保证图像不失真^[1],这些图像是在不同时间、不同高度、不同视角和不同传感器的条件下拍摄的。图像拼接技术在计算机视觉、医学图像处理、遥感技术、虚拟现实以及地质勘探都具有极其广泛的应用范围^[2]。

图像配准是图像拼接过程的核心环节,处理过程包括特征点提取和特征点匹配两个。2008年, Bay 等^[3]提出了 SURF (Speeded Up Robust Feature)算法,该算法是一种稳健的图像识别和描述算法。2013年,高素青等^[4]利用了 Hessian 矩阵迹的正负性来提高特征点匹配的速度,并对 SURF 算法进行改进,改进算法节省了特征点检测和匹配的时间。2016年,王亚迪等^[5]通过缩小特征点周围子区域的范围,将 SURF 特征点描述符由 64 维降到 36 维,该操作过程适用于处理旋转角度较大和亮度较低的图像。2018年, Wang 等^[6]提出了一种基于特征点的改进 SURF 算法,该算法可以提取图像的特征点,提高算法的速度和准确性,但存在算法复杂且耗时长的问题。2019年,刘鹏飞等^[7]提出了一种基于相位相关法与改进 SURF 算法的快速图像拼接方法。

图像融合在图像拼接的过程中可以起到重要的作用。2013年, Sun 等^[8]提出了一种基于马尔可夫随机场(MRF)的融合模型,使用该模型对图像进行融合。2015年,杜丙新^[9]提出了基于相对定向和小区域融合的改进方法,首先借助半角纠正法选取合适的拼接面,然后在图像重叠区域的中间部分选取一条形区域作为过渡区,并采用渐进渐出的方法对图像进行融合。2017年, Bavirisetti 等^[10]提出了一种自适应加权图像融合方法,该方法结合了基于 Curvelet 变换的模糊理论思想设计一种自适应加权图像融合策略。2019年,高晓倩等^[11]提出了一种 S 型非线性融合策略并完成图像融合,该策略可以有效地解决图像拼接有缝隙和重影等问题。上述方法虽然都有所相对的改进,但仍存在一些图像拼接质量的问题,而且拼接效率也有待改进。

本文针对图像拼接过程中存在特征点匹配准确率低以及融合过程中有拼接缝隙等问题,提出一种融合改进 SURF 和 Cell 加速的幂函数加权图像拼接方法。利用余弦相似性对 SURF 算法提取的特

征点进行粗匹配,结合双向一致性和 MSAC (M-Estimate Sample Consensus)算法对粗匹配点进行精匹配。然后在 $n \times n$ 大小的 Cell 加速器中采用幂函数加权融合算法求解 Cell 中心点的权重,将该权重作为整个 $n \times n$ 区域内的权重并进行图像融合。

2 优化 SURF 算法

2.1 特征点提取

SURF 算法中,利用 Hessian 矩阵 $\mathbf{H}(X, \sigma)$ 来检测特征点,每个像素点都可以求出一个 Hessian 矩阵,其中 $X(x, y)$ 为坐标 (x, y) 处的点, σ 为尺度。 $\mathbf{H}(X, \sigma)$ 可以表示为

$$\mathbf{H}(X, \sigma) = \begin{bmatrix} l(X, \sigma) & l_{xx}(X, \sigma) \\ l_{xy}(X, \sigma) & l_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: l_{xx} 、 l_{xy} 和 l_{yy} 为标准高斯函数 $g(X, \sigma)$ 的二阶偏导数与图像在点 (x, y) 处的卷积函数。与 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 算法不同, SURF 算法使用盒子滤波器来代替高斯二阶偏导。通过改变盒子滤波器的尺寸来形成多尺度的空间函数,并将空间函数与原图像在不同方向上进行卷积计算, l_{xx} 、 l_{xy} 和 l_{yy} 的卷积和可以表示为 D_{xx} 、 D_{xy} 和 D_{yy} , 所以 Hessian 矩阵可以简化为

$$D(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xx})^2, \quad (2)$$

式中: ω 为权重系数,一般取 0.9,目的是为了平衡因使用盒式滤波器近似所带来的误差。

利用 Hessian 矩阵来求解局部最大值的像素点,并将该点作为兴趣点,对应的二维数组下标即为兴趣点在图像中的位置;然后在半径为 $6s$ 的圆形区域中对图像进行 Haar 小波响应运算,响应之和最大的区域所对应的方向就是特征点的主方向,最终构建 64 维 SURF 特征描述子^[12],其中 s 为特征点的尺寸。

2.2 改进的特征点匹配

传统的 SURF 算法虽然比 SIFT 算法有了很大的优化,但仍然存在大量的误匹配点,而且这些误匹配点会影响拼接效果,并且耗时较长,效率较低。针对上述问题,提出一种余弦相似度、双向一致性和 MSAC 算法相结合的匹配方法。首先利用余弦相似度对特征点进行粗匹配,然后结合双向一致性和 MSAC 算法对粗匹配点进行精匹配。

2.2.1 利用余弦相似度进行粗匹配

余弦相似度是用来计算特征点间的相似程度,根据坐标将向量绘制到向量空间中,然后计算向量夹角的余弦值,该值就是两个特征点间的相似度。余弦值越小,表示两个特征点间的夹角越大,匹配相

似度越小,反之亦然。

具体的操作方法:首先使用欧氏距离来选取初步的特征点对,然后使用余弦相似度函数对其进行进一步筛选,如果两个向量的余弦值大于阈值 K 则保留,反之去除。向量 a 和向量 b 的余弦相似度可表示为

$$S(a, b) = \frac{a \cdot b}{\|a\| \cdot \|b\|} = \frac{\sum_{j=1}^J a_j b_j}{(\sum_{j=1}^J a_j^2 \sum_{j=1}^J b_j^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

式中: J 为向量个数。利用余弦相似度对产生缩放和旋转、亮度对比度改变、模糊以及视角变化的 4 类图像进行测试,4 类图像经过多次测试后可以得到最佳的阈值,如表 1 所示。从表 1 可以看到,实验选择 $K=0.975$ 作为最佳阈值。

表 1 K 值的测试结果
Table 1 Test results of K values

Test image	Rotate and zoom	Brightness	Blurry	Perspective
Optimal threshold	0.97	0.96	0.98	0.99

2.2.2 结合双向一致性和 MSAC 算法进行精匹配

余弦相似度匹配之后仍然存在一部分误匹配点,为了提高匹配的准确率,提出结合双向一致性和 MSAC 算法对粗匹配点进行精匹配。选择待匹配图像中的局部区域,利用双向一致性算法来筛选出该区域中的匹配点对。具体的操作方法:单向匹配完成后保存匹配点对,然后互换匹配图和待匹配图的关系进行反向匹配,选择公共匹配点对作为最终的匹配结果,将单一方向的匹配点对删除,对筛选得到的匹配点对进行相对位置的关系计算,可以有效地提高匹配结果的精确度。双向一致性约束的匹配过程如图 1 所示,其中 o 为点的序号。假设对待匹配点 P_i 进行正向匹配得到同名点 P'_i ,然后对 P'_i 进行反向匹配得到同名点 P_i ,则满足双向一致性约束,否则视为误匹配点,剔除该点对,其中 i 为点的序号。

采用 MSAC 算法对待匹配点在待匹配图像全部区域中进行精匹配,主要思想为将双向一致性算法得到的局部精匹配点作为 MSAC 中的样本数据,并计算变换矩阵 H ,记为模型 M 。利用模型 M 来测试所有数据,并计算满足这个模型数据点的个数与投影误差,即代价函数,若该模型为最优模型,则

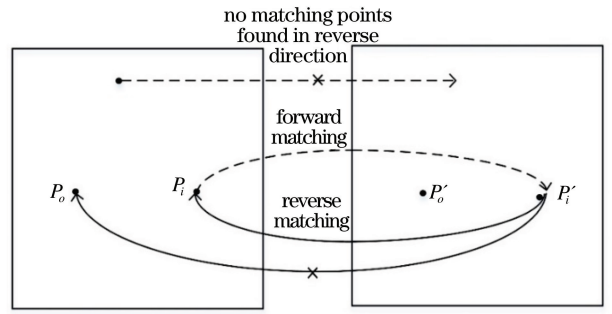


图 1 双向一致性约束的匹配过程

Fig. 1 Matching process of bidirectional consistency constraint

对应的代价函数值最小。将符合最优模型的测试点称为内点,反之称为外点,内点留下,外点舍弃,内点就是筛选后的正确匹配点,外点就是误匹配点。使用正确的匹配点对来计算相邻两幅图像间的单应矩阵 H ,最后使用该矩阵将待配准图像中的每一个点映射到参考图像的坐标系中,并采用双线性插值方法来实现图像的精匹配。

MSAC 算法是在 RANSAC (Random Sample Consensus) 算法的基础上进行优化。RANSAC 算法中,计算每一个局内点与拟合模型的误差,将小于特定阈值的误差视为该点误差,若误差大于特定阈值,将 1 视为该点误差。MSAC 算法中,将小于阈值的误差视为该点误差,若误差大于阈值,将该阈值视为该点误差。因此通过修改 RANSAC 算法中的代价函数,可以解决 RANSAC 算法对阈值敏感的问题。

3 改进的图像融合

3.1 渐进渐出加权融合算法

渐进渐出加权融合算法是在传统融合算法的基础上进行改进。在传统单一加权系数计算方法的基础上,利用重叠区域中像素点与边界的距离来确定权值,从而形成缓慢平滑过渡、改变拼接缝隙的拼接图像^[13],可以表示为

$$I(x, y) = \begin{cases} I_1(x_1, y_1) & (x, y) \in I_1 \\ \omega_1 I_1(x_1, y_1) + \omega_2 I_2(x_2, y_2) & (x, y) \in I_1 \cap I_2, \quad (4) \\ I_2(x_2, y_2) & (x, y) \in I_2 \end{cases}$$

式中: I_1 为参考图像; I_2 为待拼接图像; ω_1 和 ω_2 为 I_1 和 I_2 的权重,其中 $\omega_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$, $\omega_1 + \omega_2 = 1$, $0 < \omega_1, \omega_2 < 1$ 。

图 2 为渐进渐出加权融合算法的融合过程。渐进渐出加权融合算法具有简单易行、拼接速度快以及 ω_1 值和 ω_2 值在 $0 \sim 1$ 之间呈线性变化的优点,该

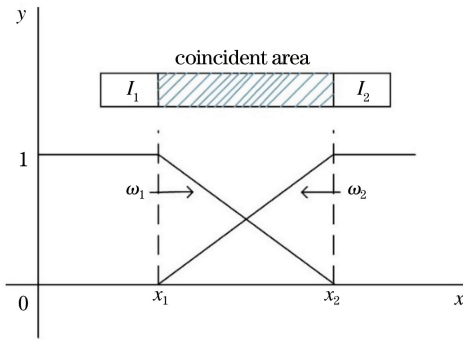


图 2 渐进渐出加权融合算法的融合过程

Fig. 2 Fusion process of slow in and out weighted fusion algorithm

fusion algorithm

算法的融合效果比直接融合算法佳,但是权值变化速度较快会导致图像重叠区域衔接过渡不自然,而两个权值函数交叉点为融合函数拐点。当两幅待拼接图像的亮度相差较大时,该算法的效果较差,由此可知,渐进渐出加权融合算法已不再适用于大多数图像融合的过程。

3.2 Cell 加速的幂函数加权融合算法

为了解决因亮度差异和图像获取过程中产生的噪声等导致图像拼接过程中存在拼接缝隙和重影等问题,提出一种 Cell 加速的幂函数加权融合算法,该算法不仅能够对像素进行更平滑的过渡以解决重影问题,还能节省时间,提高拼接效率。

根据人眼感知定律(即韦伯-费希纳定律)^[14]可知,人眼感知响应随着背景亮度的变大呈现幂函数非线性变化规律。该规律与植物生长的轨迹比较贴切,所以借用植物生长模型中常用的 Logistic 函数和 Cubic 函数作为幂函数加权融合模型的推导函数,表达式为

$$\frac{dh}{dt} = r(1 - h/h_{\max})h, \quad (5)$$

$$h(t) = -2 \frac{\Delta h}{T^3} t^3 + 3 \frac{\Delta h}{T^2} t^2 + h_{\min}, \quad (6)$$

式中: t 为时间; T 为植物生长周期,其中 $t \in [0, T]$; Δh 为高度差; h_{\min} 和 h_{\max} 分别为高度的最小值和最大值,当 $t = T$ 时,植物高度接近最大值; r 为常数。

整理(5)式和(6)式可得

$$h(t) = -\frac{r\Delta h}{3T^3} t^3 + \frac{r\Delta h}{2T^2} t^2 + h_{\min}. \quad (7)$$

在(7)式的基础上,令 $h_{\min} = 0, \Delta h = h_{\max} = 1, T = 1$,可以得到

$$h(t) = r \left[-\frac{1}{3} t^3 + \frac{1}{2} t^2 \right], \quad t \in [0, 1]. \quad (8)$$

为了使函数更贴切幂函数模型,应选择合适的 r 值。当 r 值从 1 逐渐增大时, $h(t)$ 值随着 t 值的变化趋势如图 3 所示。从图 3 可以看到,当 $r = 6$ 和 $t = 1$ 时,此时符合幂函数加权融合算法融合过程中权重最大值为 1 的设定,故令 $r = 6$,此时 $h(t)$ 可表示为

$$h(t) = 6 \left[-\frac{1}{3} t^3 + \frac{1}{2} t^2 \right], \quad t \in [0, 1]. \quad (9)$$

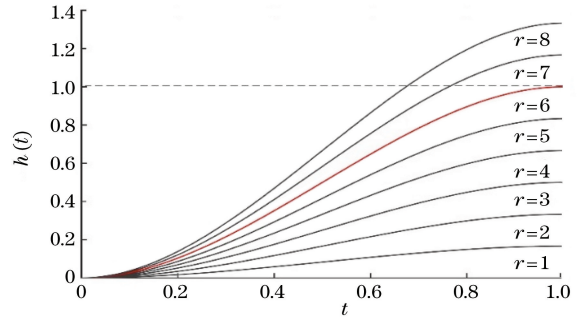


图 3 不同情况下的 $h(t)$ 函数曲线

Fig. 3 $h(t)$ function curves under different conditions

最后结合 ω_1 值从 1~0 的变化趋势对(9)式进行调整,可以得到

$$\omega_1 = -2 \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)^3 + 3 \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) + 1, \quad x_1 \leq x \leq x_2. \quad (10)$$

最终改进的加权融合过程如图 4 左图所示。

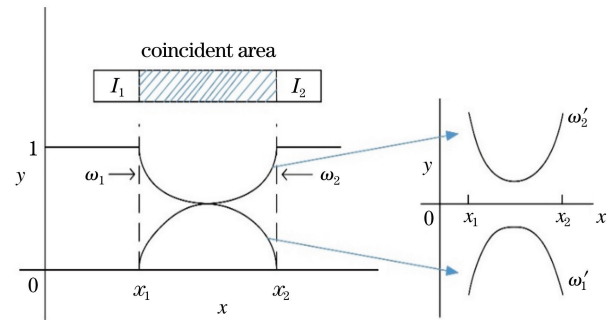


图 4 幂函数加权融合过程

Fig. 4 Power function weighted fusion process

为了清楚地表示 ω_1 的变化趋势,对(10)式进行求导,表达式为

$$\omega_1' = -\frac{6}{q^3} x^2 + \left(\frac{12x_1}{q^3} + \frac{6}{q^2} \right) x - \left(\frac{6x_1^2}{q^3} + \frac{6x_1}{q^2} + \frac{2}{q} \right), \quad (11)$$

式中: $q = x_2 - x_1 (q > 0)$,对(11)式化简可得 ω_2 。由抛物线性质可以得到,当 $x = 0$ 时, $y < 0$ 且 x^2 的

系数小于 0,一元二次方程判别式 $\Delta = -\frac{12}{q^4} < 0$, 此时说明抛物线与 x 轴无交点, 由此可以绘制 ω_1 的大致图像, 如图 4 右图所示。

从图 4 可以看到, 从重合区域图像边缘向中间位置逼近的过程中, ω_1 曲线呈先增大后减小的趋势, 这就使 ω_1 匹配遵循先快后慢再变快的趋势, 意味着左右图像再融合过程中, 像素所占的比重会相对变化, 进而解决两幅色差较大的图像在融合过程中的差异问题, 同时也可以解决拼接缝隙的问题。

由于需要计算重叠区域中每个像素点的加权系数, 且加权系数不呈线性变化, 这会造成计算的复杂度较高, 耗时较长。针对这种情况, 提出基于 Cell 的融合加速策略, 具体步骤如下。

1) 将融合过程中的重叠区域尽可能分为大小相等的 $n \times n (n \geq 1)$ 的小方块, 并定义为 Cell, 如图 5 所示。

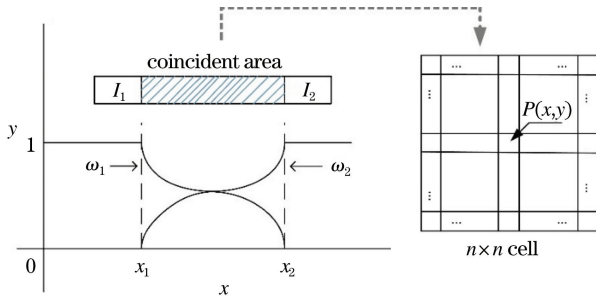


图 5 Cell 加速的幂函数加权系数

Fig.5 Power function weighting coefficient of Cell acceleration

2) 取 Cell 的中心点或靠近中心的点 $P(x, y)$, 使用(10)式计算该点的值, 将点 P 的加权系数作为整个 Cell 内每个像素点的加权系数。

3) 靠近重叠区域的边缘位置且未参与 Cell 的点需要单独计算加权系数, 可以根据待拼接图像之

间重叠区域的大小和形状来选择合适的 n 值。

由此, 加权系数的数量就会成倍的缩减, 融合效率会显著提高。

4 实验结果与分析

实验是在 CPU 为 Intel i5 处理器、内存为 12 G 的 Windows 10 系统下使用 MATLAB 2014 进行编程和图像拼接处理的, 用来验证所提算法的可行性和优越性。

4.1 特征点的配准分析

为了验证所提算法的普适性, 使用 4 组不同状态下的图像进行匹配, 并使用传统 SURF 算法与所提算法分别对图像进行处理, 结果如图 6~9 所示。

从图 6~9 可以看到, 使用传统 SURF 算法处理后的图像出现许多误匹配的现象, 且存在冗余匹配的问题, 已用圆圈和方块标记, 使用所提算法可以有效剔除误匹配点对, 并将产生较稳定的兴趣点作为匹配点, 这可以提高算法的效率。

上述是图像的视觉分析结果, 为了确保结果的准确性, 对传统算法和所提算法进行数据分析, 用来进一步验证算法的优越性。评价标准为正确匹配率^[15], 表达式为

$$1 - p_{\text{precision}} = \frac{f_{\text{falmatches}}}{c_{\text{corretmatches}} + f_{\text{falmatches}}}, \quad (12)$$

式中: $p_{\text{precision}}$ 为正确率; $f_{\text{falmatches}}$ 为错误匹配率; $c_{\text{corretmatches}}$ 为正确匹配率。

使用(12)式分别计算 4 组实验的正确匹配率, 结果如表 2 所示。

从表 2 可以看到, 所提算法的正确匹配率较传统 SURF 算法高出约 11 个百分点, 耗时比传统算法平均减少约 1.7 s, 因此所提算法无论是在速度上还是准确率上都有明显优势。

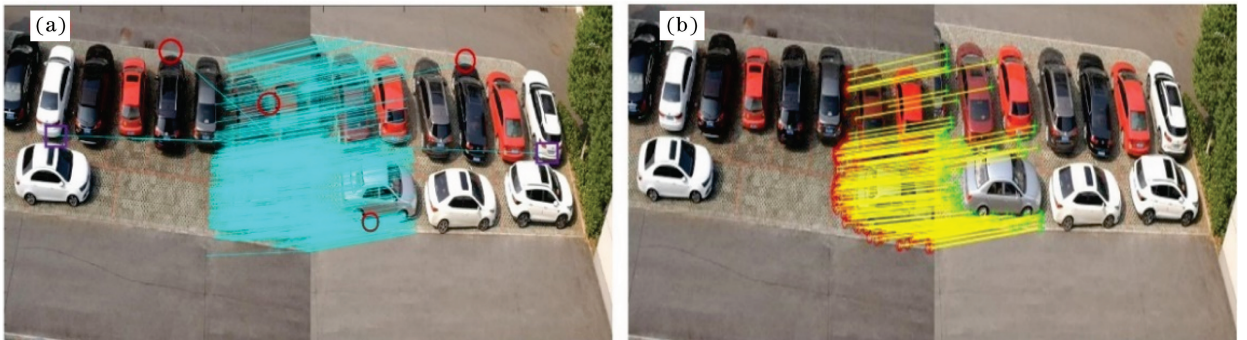


图 6 不同算法在不同亮度下图像特征点的匹配结果. (a) 传统 SURF 算法; (b) 所提算法

Fig.6 Matching results of image feature points under different luminance by different algorithms.

(a) Traditional SURF algorithm; (b) proposed algorithm

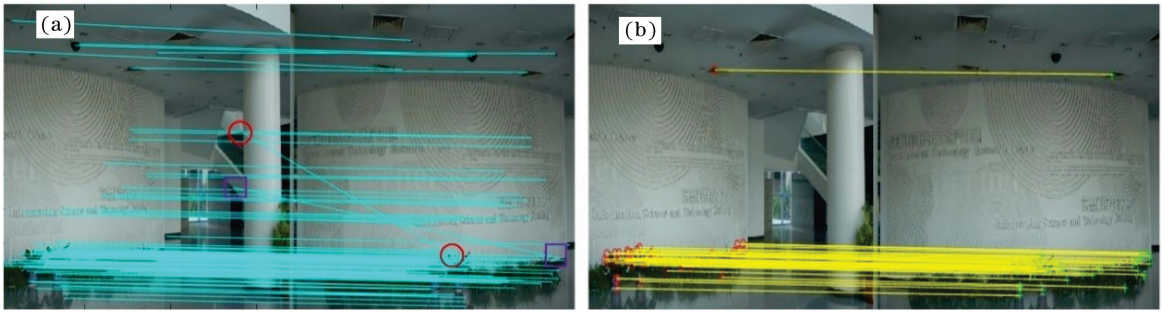


图 7 不同算法在不同角度下图像特征点的匹配结果。(a) 传统 SURF 算法；(b) 所提算法
Fig.7 Matching results of image feature points under different angles by different algorithms.

(a) Traditional SURF algorithm; (b) proposed algorithm

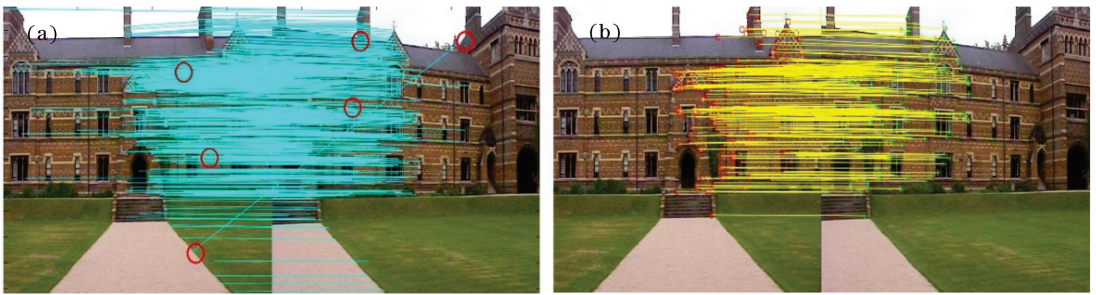


图 8 不同算法在不同分辨率下图像特征点的匹配结果。(a) 传统 SURF 算法；(b) 所提算法
Fig.8 Matching results of image feature points under different resolutions by different algorithms.

(a) Traditional SURF algorithm; (b) proposed algorithm

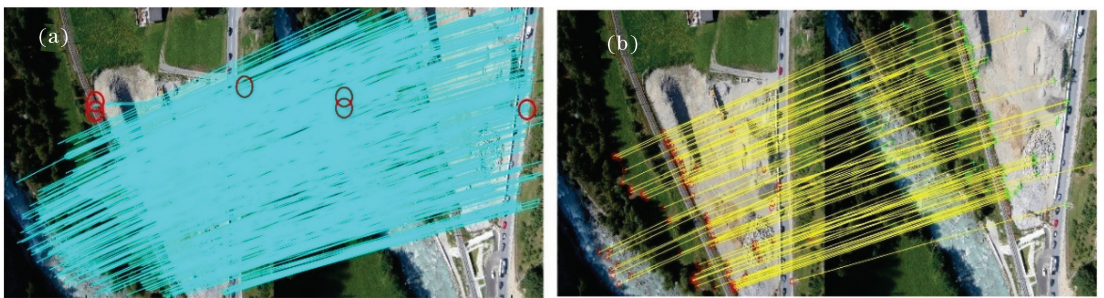


图 9 不同算法在不同尺度下图像特征点的匹配结果。(a) 传统 SURF 算法；(b) 所提算法
Fig.9 Matching results of image feature points under different scales by different algorithms.

(a) Traditional SURF algorithm; (b) proposed algorithm

表 2 相关算法的数据对比

Table 2 Data comparison of related algorithms

Algorithm	Different brightness		Different angles		Different resolutions		Different scales	
	Correct matching rate / %	Time /s	Correct matching rate / %	Time/s	Correct matching rate / %	Time/s	Correct matching rate / %	Time/s
	Traditional SURF algorithm	74.07	3.59	65.52	3.58	70.52	4.16	78.25
Proposed algorithm	85.18	2.01	76.80	2.02	82.10	2.10	90.15	2.00

4.2 图像融合结果分析

为了验证所提算法在图像融合方面的有效性,选择渐进渐出加权融合算法、文献[16]与所提算法进行多组实验对比。为了验证所提算法的普适性,选择不同亮度、不同角度、不同分辨率和不同尺度的图像进行融合。

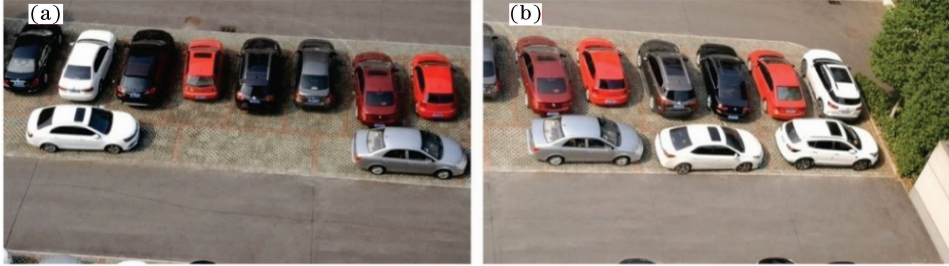


图 10 两幅不同亮度的原图像序列。(a) 图像 1; (b) 图像 2

Fig. 10 Two original image sequences with different brightness. (a) Image 1; (b) image 2

采用优化的 SURF 算法对特征点进行提取与匹配。首先使用 Hessian 矩阵对特征点进行检测,构成 64 维特征描述子。然后使用余弦相似度来初步判断特征点间的相似性,利用双向一致性再次筛选特征点对,将反向匹配错误或反向误匹配的点对剔除。接着采用 MSAC 算法对粗匹配点进行精匹配以确定最终的特征点。最后将所提算法与其他两种算法进行对比,结果如图 11 所示。

4.2.1 不同亮度的图像融合结果

在停车场的不同位置布设摄像头,利用相邻摄像头来采集不同时刻的停车场图像,如图 10 所示。图 10(a)为阴天拍摄的停车场图像,图 10(b)为晴天拍摄的停车场图像。从图 10 可以看到,两幅图像的亮度明显有差别。

从图 11(a)可以看到,采用传统的渐进渐出加权融合算法处理后的图像有两处很明显的拼接缝隙,并且融合之后色差严重,已用圆圈标出。从图 11(b)可以看到,采用文献[16]处理后的待拼接图像,其拼接缝隙明显消除,而融合之后仍然存在轻微色差。从图 11(c)可以看到,采用所提算法处理后的效果与文献[16]相似,说明所提算法可以有效解决拼接缝隙及色差问题。

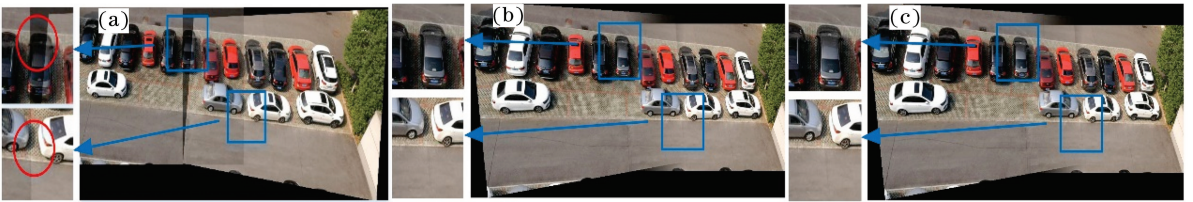


图 11 三种融合算法对不同亮度图像的结果对比。(a)渐进渐出加权融合算法;(b)文献[16];(c)所提算法

Fig. 11 Comparison of results of three fusion algorithms on images for different brightness. (a) Slow in and slow out weighted fusion algorithm; (b) Ref. [16]; (c) proposed algorithm

4.2.2 不同角度的图像融合结果

在室内大厅的某一固定位置放置一架普通照相机,拍照过程中设置不同的旋转角度,利用不同的拍

摄角度来拍出具有重叠区域的室内大厅图像,如图 12 所示。图 12(a)为正对大厅的角度拍摄,图 12(b)为将摄像头左右旋转 30° ,上下旋转 15° 得到的图像。

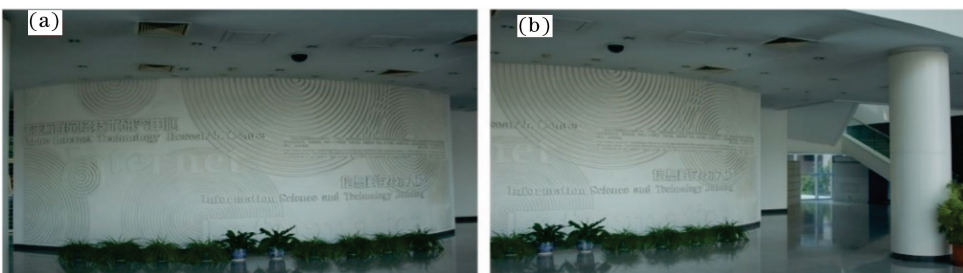


图 12 两幅不同角度的原图像序列。(a) 图像 1; (b) 图像 2

Fig. 12 Two original image sequences with different angles. (a) Image 1; (b) image 2

使用 Hessian 矩阵对两幅不同角度的待拼接图像中的特征点进行提取,根据 1.2 节的处理过程对特征点进行匹配以剔除误匹配点。最后将所提算法与其他两种算法进行对比,结果如图 13 所示。

从图 13(a)可以看到,采用传统渐进渐出算法

处理后的图像存在很明显的拼接缝隙,将该区域放大可以清晰地看到融合缝隙。从图 13(b)可以看到,文献[16]的加权系数呈非线性的趋势,为此能够很好地解决拼接缝隙的问题。从图 13(c)可以看到,所提算法在视觉效果上与文献[16]相似,在拼接效率上有很大的改善。

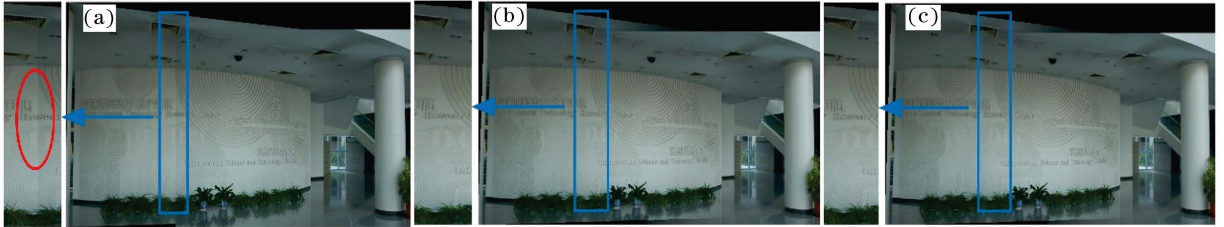


图 13 三种融合算法对不同角度图像的结果对比。(a)渐进渐出加权融合算法;(b)文献[16];(c)所提算法

Fig.13 Comparison of results of three fusion algorithms on images from different angles. (a) Slow in and slow out weighted fusion algorithm; (b) Ref. [16]; (c) proposed algorithm

4.2.3 不同分辨率的图像融合结果

实验使用的待匹配图像来源于网络,将待拼接原图像设置成不同的分辨率,如图 14 所示。图 14(a)的分辨率为 720 pixel×568 pixel,图 14(b)的分辨率为 650 pixel×513 pixel。

将两幅不同分辨率的待拼接图像采用优化的

SURF 算法构成 64 维特征描述子,使用余弦相似度来初步判断特征点间的相似性并进行粗匹配,然后结合双向一致性和 MSAC 算法对粗匹配点进行精匹配,将反向匹配错误或反向误匹配的点对剔除,从而确定最终的特征点。最后将所提算法与其他两种算法进行对比,结果如图 15 所示。

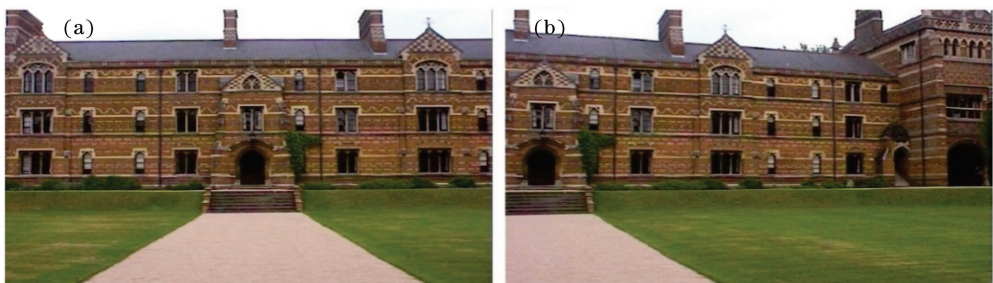


图 14 两幅原图像序列。(a)图像 1;(b)图像 2

Fig.14 Two original image sequences. (a)Image 1 (b)Image 2

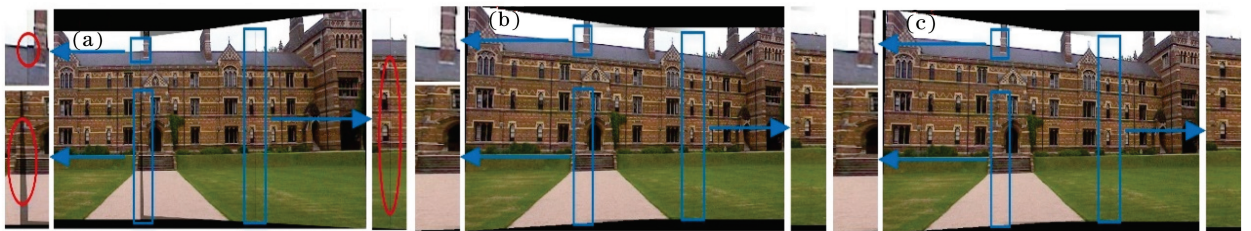


图 15 三种融合算法对不同分辨率图像的结果对比。(a)渐进渐出加权融合算法;(b)文献[16];(c)所提算法

Fig.15 Comparison of results of three fusion algorithms on images with different resolutions.

(a) Gradual fade weighted fusion algorithm; (b) Ref. [16]; (c) proposed algorithm

从图 15(a)可以看到,采用传统渐进渐出融合算法处理后的图像有三处拼接的问题;将左上方

小方块标记处放大,可以看到该处的屋顶出现明显的错位现象;将左下方和右方长方形标记处放

大,可以看到有一条很宽的拼接缝隙,以上错误均用圆圈标出。从图 15(b)可以看到,文献[16]可以解决错位与拼接缝隙的问题。从图 15(c)可以看到,所提算法可以有效地解决错位与拼接缝隙的问题。

4.2.4 不同高度的图像融合结果

使用无人机通过设置不同的飞行高度来获取具有重叠区域的待拼接图像,如图 16 所示。图 16(a)

为在 90 m 高度的高空拍摄的图像,图 16(b)为在 100 m 高度的高空拍摄的图像。

首先将使用无人机拍摄的原图像进行预处理,解决拍摄过程中产生的噪声问题。然后挑选出两张具有重叠区域的图像,采用所提算法对图像中的特征点进行提取和匹配。接着将处理之后的图像采用渐进渐出算法、文献[16]和所提算法进行图像融合,实验结果如图 17 所示。



图 16 两幅不同高度的原图像序列。(a)图像 1;(b)图像 2

Fig. 16 Two original image sequences of different heights. (a) Image 1; (b) image 2



图 17 三种融合算法对不同高度图像的结果对比。(a)渐进渐出加权融合算法;(b)文献[16];(c)所提算法

Fig. 17 Comparison of results of three fusion algorithms on images of different heights. (a) Slow in and slow out weighted fusion algorithm; (b) Ref. [16]; (c) proposed algorithm

从图 17(a)可以看到,传统渐进渐出加权融合处理后的图像有些许错位,将方框内区域放大看到有明显缝隙。从图 17(b)可以看到,文献[16]处理后的图像存在轻微缝隙,但可以有效地消除拼接缝隙,并未出现错位等现象。从图 17(c)可以看到,采用所提算法处理后的图像,其拼接错位问题可以有效解决,拼接缝隙可以有效消除,说明所提算法可以有效解决融合过程中因为权重配比不正确而导致的重影或拼接缝隙等问题。

4.3 融合图像的质量分析

由于在不同亮度、不同角度、不同分辨率和不同尺度的条件下,不能明显地区分所提算法的效果比文献[16]好,因此从耗时、均方误差(MSE)及信息熵方面来验证所提算法的优越性。

4.3.1 耗时分析

为了更直观地对比各类算法的耗时,采用柱状

图来展现所提算法的优势,如图 18 所示。由于渐进渐出加权融合算法的系数呈线性相关,所以算法的总耗时较少。从图 18 可以看到,文献[16]的总耗时比渐进渐出加权融合算法多 2 s 以上,这是由于文

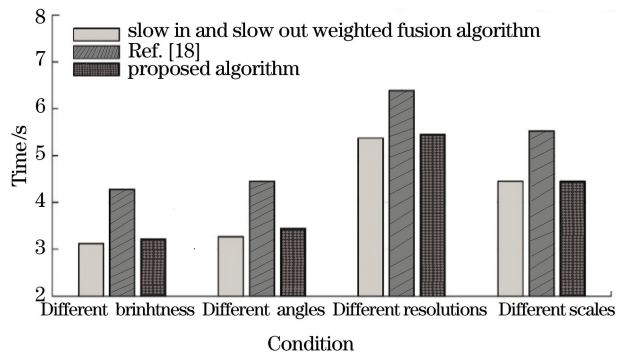


图 18 4 组实验耗时对比柱状图

Fig. 18 Time-consuming comparison histogram of 4 groups of experiments

献[16]所用的加权系数比较复杂,所提算法采用 Cell 加速幂函数加权系数会成倍地缩减幂函数加权系数的计算量。

4.3.2 MSE 分析

MSE 是用来对比处理后的图像与原图像之间的误差,用于度量“平均误差”^[17]。MSE 越小,说明处理后的图像与原图像之间的误差越小,与原图像越接近,融合效果越佳。相关算法的 MSE 对比结果如图 19 所示。从图 19 可以看到,所提算法的 MSE 指标明显小于渐进渐出加权融合算法,略微小于文献[16],分别缩小 1.32%、1.48%、1.39% 和 1.33%,对比之下,文献[16]比渐进渐出加权融合算法仅缩小约为 1.00%。实验结果表明,所提算法不但可以修复融合拼接缝,还可以明显缩小与原图像的误差。

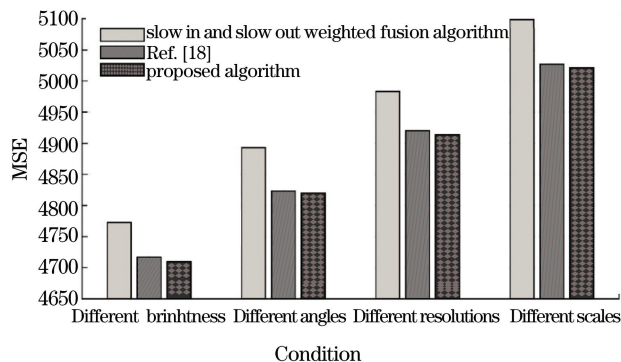


图 19 相关算法的 MSE 对比

Fig. 19 MSE comparison of related algorithms

4.3.3 信息熵分析

信息熵是用来描述图像的平均信息量以衡量图像信息的丰富程度^[18]。信息熵越大,说明融合结果图像包含的信息量越大。信息熵可以表示为

$$E = - \sum_{l=0}^{L-1} P(l) \lg P(l), \quad (13)$$

式中: $P(l)$ 为灰度值 l 的像素数与图像总数的比值; L 为灰度级总数。

实验数据对比结果如图 20 所示。从图 20 可以看到,渐进渐出加权融合算法的信息熵与文献[16]几乎相等,所提算法的优势较为明显;与渐进渐出加权融合算法相比,所提算法的信息熵分别提升 1.70%、0.98%、1.42% 和 1.04%,文献[16]的信息熵提升 0.17%、0.16%、0.09% 和 0.13%,对比之下,文献[16]的效果明显没有所提算法好。所提算法在解决改善图像的信息量和消除重影等问题的同时,图像整体的信息含量有明显提升。

通过融合图像的效果图对比和数据对比,可以

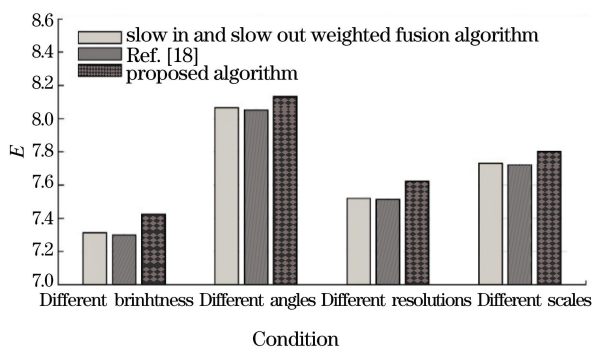


图 20 信息熵数据对比

Fig. 20 Information entropy data comparison

有效验证所提算法的优越性。在融合图像的效果对比方面,所提算法不仅能够适用于亮度、角度、分辨率和尺度的变化,而且还可以解决传统渐进渐出加权融合算法常常出现的重影和拼接缝隙等问题。在融合图像的数据对比方面,通过耗时、均方误差和信息熵三个指标与其他算法进行对比,所提算法的耗时较少,而且有更好的细节描述及更丰富的信息含量,较其他两个融合算法而言,所提算法能够得到更高的拼接融合质量。

5 结 论

在传统的 SURF 算法的基础上,首先在特征点匹配阶段进行改进,采用余弦相似度、双向一致性选择和 MSAC 算法对特征点进行匹配,可以有效解决传统算法中匹配点误识别的问题。在图像融合阶段,提出一种基于 Cell 加速的幂函数加权融合算法。实验结果表明,在图像匹配阶段,所提算法的特征点匹配正确率比传统 SURF 算法高,耗时少;在图像融合阶段,利用消耗总时间、均方误差与信息熵三个指标对算法进行评价,所提算法的消耗总时间较渐进渐出加权融合算法减少至少 2 s、均方误差缩小约 1.32%~1.48% 和信息熵提升约 0.98%~1.70%;所提算法在匹配正确率和融合效果上有较好的效果,且同时拥有较好的拼接图像质量,较传统的融合算法而言有更好的普适性;但 MSAC 算法对参数的设定较为严格,如果选取不合适就会导致大部分的有效特征点对被剔除,从而造成拼接失败,针对这一问题将进一步展开研究。

参 考 文 献

- [1] Yao W, Hu H. Research on seamless mosaic algorithm of adaptive rotating image based on SIFT [J]. Journal of Nanjing University of Science and

- Technology, 2019, 43(2): 250-254.
- 姚伟, 胡虹. 基于 SIFT 的自适应旋转图像无缝拼接算法[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(2): 250-254.
- [2] Qi M L, Shao F. A stitched image quality assessment method for color correction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 031102.
- 齐美玲, 邵枫. 一种面向颜色校正的拼接图像质量评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 031102.
- [3] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [4] Gao S Q, Tan X J, Huang C X. Improved algorithm of image registration based on SURF[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(4): 372-376.
- 高素青, 谭勋军, 黄承夏. 一种基于 SURF 的图像配准改进算法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(4): 372-376.
- [5] Wang Y D, Li X H. Improved SURF image matching algorithm [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2016, 37(2): 141-144.
- 王亚迪, 李秀华. 改进 SURF 快速图像匹配[J]. 长春工业大学学报, 2016, 37(2): 141-144.
- [6] Wang G F, Liu L, Zhang Y M. Research on scalable real-time image mosaic technology based on improved SURF [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1069(1): 012162.
- [7] Liu P F, Gao R X. Image stitching method based on phase correlation and improved SURF [J]. Software Guide, 2019, 18(11): 157-160, 164.
- 刘鹏飞, 高如新. 基于相位相关法与改进 SURF 算法的图像拼接方法[J]. 软件导刊, 2019, 18(11): 157-160, 164.
- [8] Sun J, Zhu H Y, Xu Z B, et al. Poisson image fusion based on Markov random field fusion model [J]. Information Fusion, 2013, 14(3): 241-254.
- [9] Du B X. Video image mosaic based on relative orientation and small region fusion [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(1): 220-223, 230.
- 杜丙新. 基于相对定向和小区域融合的视频图像拼接[J]. 计算机应用, 2015, 35(1): 220-223, 230.
- [10] Bavirisetti D P, Dhuli R. Multi-filtering based edge preserving image fusion technique [J]. International Journal of Services Technology and Management, 2017, 23(4): 275.
- [11] Gao X Q, Yang F, Fan H R, et al. Remote sensing image S-type fusion/stitching via low-error matching strategy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 211005.
- 高晓倩, 杨帆, 范海瑞, 等. 低误差匹配策略下的遥感图像 S 型融合拼接[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 211005.
- [12] Li Z Y, Tian Y, Chen F J, et al. Aerial image stitching algorithm for unmanned aerial vehicles based on improved ORB and PROSAC [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231003.
- 李振宇, 田源, 陈方杰, 等. 基于改进 ORB 和 PROSAC 的无人机航拍图像拼接算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231003.
- [13] Xu H Z, Li S C, Ji Y H, et al. Panoramic camera image mosaic method based on feature points [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 150-158.
- 徐弘祯, 李世超, 季宇寒, 等. 基于特征点匹配的全景相机图像拼接方法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 150-158.
- [14] Zheng T. Research on image contrast enhancement algorithm based on human visual perception [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- 郑婷. 基于视觉感知的图像对比度增强算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [15] Zhang X Y, He W S, Duan H Y, et al. The improved algorithm for SURF feature extraction and matching [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(11): 58-62.
- 张晓宇, 何文思, 段红燕, 等. 改进的 SURF 特征提取与匹配算法[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(11): 58-62.
- [16] Li J L, Jiang P Q. Image stitching by combining deformation function and power function weight [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(10): 3060-3064.
- 李加亮, 蒋品群. 结合变形函数和幂函数权重的图像拼接[J]. 计算机应用, 2019, 39(10): 3060-3064.
- [17] Cai H Y, Wu X Y, Zhuo L R, et al. Fast SIFT image stitching algorithm combining edge detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1126003.
- 蔡怀宇, 武晓宇, 卓励然, 等. 结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1126003.
- [18] Tsai D Y, Lee Y, Matsuyama E. Information entropy measure for evaluation of image quality [J]. Journal of Digital Imaging, 2008, 21(3): 338-347.