

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.016

基于小波变换的新型 SURF 图像拼接方法*

魏利胜 甘泉

(安徽工程大学 电气工程学院 芜湖 241000)

摘要:针对传统图像拼接算法特征点计算量大、耗时较长等问题,提出了一种基于小波变换的新型加速鲁棒特征算法(SURF)图像拼接方法。首先通过 Haar 小波函数对图像进行二阶分解以获取图像低频成分,并利用小波梯度矢量对低频图像重合区域进行特征点提取,从而实现低频图像下快速获得特征点的变换参数以指导高频图像下的特征点提取;在此基础上,提出一种 SURF 图像匹配改进算法,利用特征点约束的单向匹配和方向一致等性质,有效剔除误匹配点对,以提高特征点匹配精度和实时性。最后,通过两组实验验证了所提出方法的有效性和可行性。

关键词: 图像拼接; 小波变换; 加速鲁棒特征算法(SURF); 特征点匹配

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Novel SURF image mosaic method based on wavelet transform

Wei Lisheng Gan Quan

(School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to solve the problem of large computation and long time consuming of traditional image mosaic algorithm, a novel SURF image mosaic method based on wavelet transform is proposed in this paper. Firstly, adopting the Haar wavelet image preprocessing method to get the second order decomposition, the low frequency components of image are obtained. And by using wavelet gradient vector, the feature point can be extracted for low frequency image overlap region. So, the transformation parameters of characteristic point are quickly acquainted in low frequency images, which can guide to select the feature point extraction in high frequency images. Based on that, an improved SURF image matching algorithm is proposed by using the properties of the single direction matching and the orientation coherence, which can effectively eliminate the mismatched point pair to improve the accuracy and real-time performance of feature point matching. Finally, two experiments are used to verify the feasibility and effectiveness of the proposed results.

Keywords: image mosaic; wavelet transform; SURF; feature points matching

1 引言

图像拼接技术是指利用各种图像配准算法和图像融合算法将具有重叠区域的多幅图像拼接成单幅宽视场、无缝、高分辨率图像或者动态全景图像^[1]。目前,图像拼接技术已被广泛应用于无人机监视和搜索、虚拟现实、空间探测、卫星遥感、医学及军事等领域^[2],国内外许多学者也对该技术进行大量的研究,并取得丰硕的成果。

Lowe 等人于 1999 年提出了尺度不变特征变换算法(scale-invariant feature transform, SIFT),该算法能有效提取图像特征点,但该算法生成的特征描述子维数较高,从而影响了图像匹配的实时性。Bay 等等^[3]提出了加速鲁棒特征算法(speeded up robust features, SURF),该算法通过利用 Hessian 矩阵确定候选点,并进行非极大抑制策略,既弥补了 SIFT 算法的不足之处,同时能有效保证图像尺度和仿射变换下的稳定性^[4]。在此基础上,胡敏等人^[5]针对用传统的归一化互相关(normalized cross

收稿日期:2016-11 Received Date: 2016-11

* 基金项目:国家自然科学基金(61203033)、安徽省自然科学基金(1608085MF146)、安徽省高校自然科学研究项目(KJ2016A062)、2016年安徽省高校优秀中青年骨干人才国内外访学研修项目(gxfzD2016108)资助

correlation, NCC) 图像配准方法运算复杂的问题, 提出一种快速区域质心图像配准算法, 该算法搜索最佳匹配点, 而非通常的图像左上角点位置, 同时该算法也提高了图像匹配的实时性。为进一步提高图像配准速度, 文献[6]提出一种新型优化 SIFT 图像快速配准方法, 通过采用图像降采样预处理法以有效减少特征点数量, 并采用图像重合区域极值特征提取法提高特征点匹配率。许佳佳等人^[7]采用改进的 Harris 角点检测算法提取尺度不变性的角点, 利用 Forstner 算子思想精确定位角点, 并采用 SIFT 描述算子对角点, 实现图像匹配的快速、稳定性。王帅等人^[8]则提出了一种利用多路图像序列内变换关系的算法, 通过提取多路图像中与时间相关的共同特征, 并利用改进奇异值分解方法以判定共同特征的相似度完成时间配准。刘佳嘉等人^[9]提出了基于改进小波变换的 SIFT 特征图像配准算法, 通过多分辨率小波分解对基准和后续图像进行预处理, 然后采用 SIFT 算法提取含有大量信息的图像低频成分的特征点, 并进一步使用 BBF 算法和 RANSAC 算法检验、搜索特征点对。詹曙等人^[10]提出了一种基于尺度限制 SURF 算法的图像匹配, 通过采用 SURF 算法和尺度限制处理分别对图像特征点进行粗匹配和精匹配, 并使用样本统计方法剔除误匹配, 有效改进传统 SURF 算法误匹配率高的问题。

以上文献主要围绕提取图像特征点和提高图像匹配效果及效率进行的研究和改进, 并获得一定的成效。然而, 对于提高图像拼接的实时性和特征点的匹配率, 同时又保证图像拼接的质量来说, 其拼接效果不太理想。为此, 本文提出了一种基于小波变换的新型 SURF 图像拼接方法, 通过二维小波变换后, 利用小波梯度矢量提取低频图像重合区域的特征点, 从而实现低频图像下快速获得特征点的变换参数以指导高频图像下的特征点提取; 在此基础上, 利用图像特征点约束的单向匹配和方向一致性, 探讨了一种 SURF 图像匹配改进算法; 最后, 通过两组实验验证了本文所提出方法的有效性。

2 图像预处理和特征点提取及匹配

基于小波变换的新型 SURF 图像拼接方法的流程如图 1 所示, 其主要包括 3 个部分内容: 1) 基于 Haar 小波函数的图像预处理, 对待配准图像进行小波分解得到低频图像; 2) 基于小波梯度矢量的特征点提取, 通过小波梯度矢量对低频图像的重合区域进行特征点提取, 从而实现低频图像下快速获得特征点的变换参数以指导高频图像下的特征点提取; 3) 基于 SURF 算法的特征点匹配, 利用特征点约束的单向匹配和方向一致性, 有效剔除误匹配点对, 以提高特征点匹配精度和实时性。

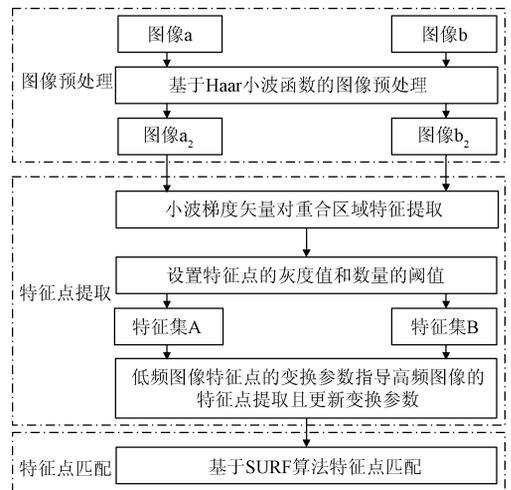


图 1 改进算法流程

Fig. 1 Flow chart of the improved algorithm

2.1 基于 Haar 小波函数的图像预处理

图像中的高频成份含有噪声影响, 使用小波变换进行多层分解可有效去除高频成分, 小波分解层数越多去除噪声干扰效果越好^[11-12]。因此, 本文将选用小波变换将待配准图像进行分解预处理, 以便对分解后的低频图像进行匹配。考虑到分解后的低频图像中的匹配特征点会减少, 如果图像经过小波多层分解再进行匹配可能会导致匹配特征点过少, 以至于无法满足正常匹配需求, 甚至多层分解在进行多次匹配反而会增加匹配时间, 本文将采用两层 Haar 小波分解方法进行图像预处理, 再对低频成分中提取匹配特征点。

Haar 小波函数是最简单也是最早用到拥有紧支撑性的一个正交小波基函数, 定义式为^[13]:

$$\psi_H = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其尺度函数为:

$$\phi = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

通过 Haar 小波函数对待配准图像 $f(x, y)$ 进行二维小波分解, 首先对待配准图像函数 $f(x, y)$ 的 x 方向分别用 $\psi_H(x)$ 和 $\phi(x)$ 做分析, 将 $f(x, y)$ 分解成低高频两部分; 并在此基础上沿 y 方向做类似的分析。待配准图像 $f(x, y)$ 经过 $\phi(x)$ 和 $\phi(y)$ 处理得到第一层小波分解后的图像 LL , 其余得到的三幅图像分别是 LH 、 HL 、 HH ; 再对图 1 所示 LL 做上述的同样处理, 得到待配准图像 $f(x, y)$ 的第 2 层小波分解后的图像 LL_1 , 如图 2 所示。

2.2 基于小波梯度矢量的特征点提取

在不同尺度范围上分布着图像的特征点, 为了解决

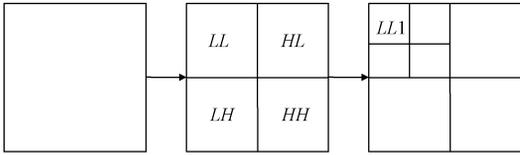


图 2 小波分解示意图

Fig.2 Schematic diagram of wavelet decomposition

检测特征点的尺度不变问题,而 SURF 算法采用高斯函数构造线性尺度空间,但在检测特征点时线性尺度空间有模糊图像轮廓等问题,小波函数相对高斯函数来说,拥有选择灵活性和紧支撑性等优点,在小波变换过程有可能更好地保留具有不同尺度的图像特征,所以从小波变换的多尺度性能角度出发,利用小波梯度矢量对尺度与旋转不变的图像特征点进行提取^[14]。

把得到的待配准图像 $f(x,y)$ 的第 2 层小波分解后的图像 LL_1 记为图像 $g(x,y)$,对图像 $g(x,y)$ 通过二维小波变换对图像重合区域进行特征点提取,即通过小波模极大值原理提取图像的特征点。根据二维小波函数定义可知 $t(x,y)$ 为 2D 光滑函数,考虑图像中含有高频因素的影响,直接求光滑函数 $t(x,y)$ 的拐点较为复杂,故求其一阶导数的模的极大值。

首先对函数 $t(x,y)$ 中的变量求偏导,得出二维小波函数分别为:

$$\psi^1(x,y) = \frac{dt(x,y)}{dx} \quad (3)$$

$$\psi^2(x,y) = \frac{dt(x,y)}{dy} \quad (4)$$

然后在尺度 2^j 下,当函数 $\psi^1(x,y)$ 、 $\psi^2(x,y)$ 符合二维小波变换的条件时,可得到小波母函数分别为:

$$\psi_j^1(x,y) = \frac{1}{2^j} \psi^1\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \quad (5)$$

$$\psi_j^2(x,y) = \frac{1}{2^j} \psi^2\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \quad (6)$$

再将式(5)、(6)与图像函数 $g(x,y)$ 进行卷积运算,在尺度为 2^j 时,可得到一幅图像 $g(x,y)$ 的二维小波变换为:

$$W_j^1 g(x,y) = g(x,y) * \psi_j^1(x,y) \quad (7)$$

$$W_j^2 g(x,y) = g(x,y) * \psi_j^2(x,y) \quad (8)$$

将式(3)和(5)代入式(7),将式(4)和(6)代入式(8)可得:

$$W_j^1 g(x,y) = g(x,y) * \psi_j^1(x,y) =$$

$$g(x,y) * (2^j \frac{dt_j}{dx})(x,y) = 2^j \frac{d}{dx}(g(x,y) * t_j)(x,y) \quad (9)$$

$$W_j^2 g(x,y) = g(x,y) * \psi_j^2(x,y) =$$

$$g(x,y) * (2^j \frac{dt_j}{dy})(x,y) = 2^j \frac{d}{dy}(g(x,y) * t_j)(x,y) \quad (10)$$

则:

$$\begin{bmatrix} W_j^1 g(x,y) \\ W_j^2 g(x,y) \end{bmatrix} = 2^j \begin{bmatrix} \frac{d}{dx}(g(x,y) * t_j)(x,y) \\ \frac{d}{dy}(g(x,y) * t_j)(x,y) \end{bmatrix} =$$

$$2^j \nabla(g(x,y) * t_j)(x,y) \quad (11)$$

式中: $\nabla(g(x,y) * t_j)(x,y)$ 为梯度矢量。

由式(11)可知,二进制小波系数 $W_j^1 g(x,y)$ 、 $W_j^2 g(x,y)$ 分别正比于在尺度 2^j 下被 $t_j(x,y)$ 所平滑图像 $g(x,y)$ 沿 x 轴方向和 y 轴方向的偏导数。

则特征点提取步骤如下。

1) 在尺度 2^j 下,图像 $g(x,y)$ 的二进制小波变换的模和角度分别为:

$$M_j g(x,y) = \sqrt{|W_j^1 g(x,y)|^2 + |W_j^2 g(x,y)|^2} \quad (12)$$

$$A_j g(x,y) = \arg(W_j^1 g(x,y)) + i(W_j^2 g(x,y)) \quad (13)$$

根据小波梯度矢量进行局部非极大值进行抑制,就是与周围 8 个点进行梯度值进行比较,只有当前点的梯度值最大,则该点是待定特征点,否则就将该点从特征点检测算法中剔除^[15]。

2) 若是待定特征点的灰度值大于设定的阈值 λ 就是被称为候选特征点,否则剔除灰度值小于阈值 λ 的点。

3) 若是候选特征点数超过设定的阈值 μ ,选取灰度值越大的候选特征点为图像特征点,若是候选特征点数低于设定的阈值 μ ,则候选特征便是图像特征点。

4) 利用低频图像提取特征点的变换参数指导高频图像特征点提取,并且更新变换参数。

2.3 基于 SURF 算法的特征点匹配

在特征点配准过程中,为了提高图像特征点配准精度,本文采用 SURF 的图像匹配改进算法,通过单向和方向一直性约束结合的配准方法来确定待配准图像的特征点之间的对应匹配关系^[16]。首先对带匹配图像进行单向匹配,再计算出每个匹配点对之间的特征向量方向差值,当差值在一定阈值范围内认为特征点匹配成功,否则剔除其他误匹配点对,提高图像特征点匹配准确精度。具体实现过程如下。

1) 计算出每一个匹配点对特征向量主方向之间的差值:

$$H_i = H1_i - H2_i \quad (14)$$

式中: $H1$ 为待匹配图像 a 特征向量主方向角度, $H2$ 为待匹配图像 b 特征向量主方向角度, $i = 1, 2, \dots, n$, n 是所有匹配点对数。

2) 统计所有匹配点对的差值生成直方图,以 10° 为 1 柱,共 36 柱。

3) 求出直方图中的峰值对应的角度作为成功匹配点对的标准差值,保留峰值所在 10° 范围内的匹配点对,剔除其他匹配点对。

3 实验验证

通过借助编程软件 MATLAB7.0 完成所提出改进算法的可行性验证,现采用两组实验进行拼接仿真实验,实验 1 从两个角度通过摄像头拍摄的有视角差图像作为待匹配图像,实验 2 采用无视角差图像作为带匹配图像,分别使用传统 SURF 算法、文献[6]方法以及本文所提方法进行特征点提取和匹配,并对实验结果进行比较。

3.1 实验 1 有视角差图像拼接

待拼接的原始图像如图 3 所示,其中拍摄图像尺寸大小为 768×1280 ,从两个角度通过摄像头拍摄的有视角差待匹配图像分别为图 3(a)和(b)所示。在实验中特征点的灰度值阈值设置为 50,且特征点数上限为 100,图像重合区域检测的特征点结果如图 4 所示。

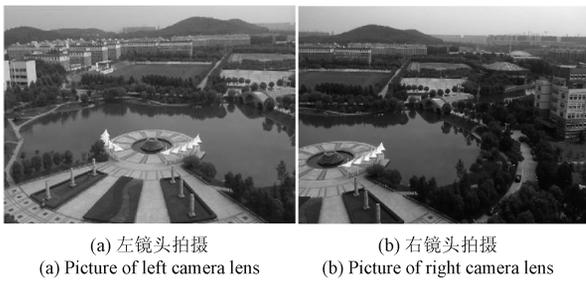


图 3 待匹配图像
Fig. 3 The matched images

经过 SURF 的图像匹配改进算法后,将本文方法得出的实验效果图与传统 SURF 算法以及文献[6]方法得出的实验效果图进行对比,如图 5 所示。

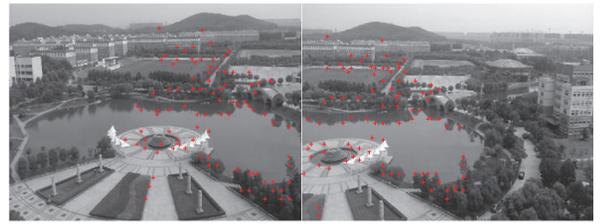
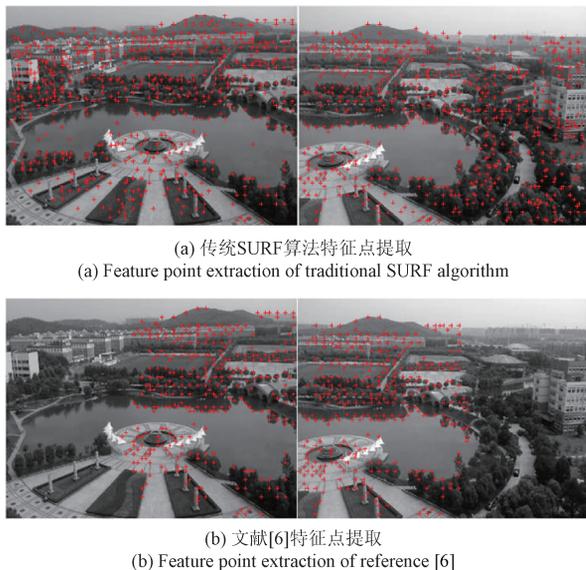


图 4 特征点提取图

Fig. 4 Image of feature point extraction



图 5 拼接效果

Fig. 5 Mosaic results

从上述的拼接效果图可知,对于有视角差图像拼接,本文所提方法图像拼接的效果比传统 SURF 算法和文献[6]方法图像拼接的效果较好。3 种图像拼接方法的主要比较参数如表 1 所示。

表 1 图像拼接参数对比表

Table 1 Comparison of image mosaic parameters

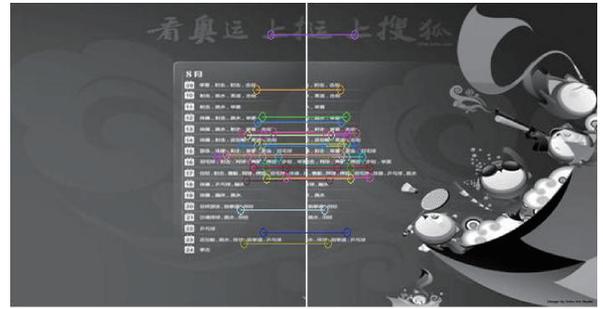
方法	图像拼接参数			
	提取特征 点对数	匹配特征 点对数	提取特征 点时间/s	图像拼接 时间/s
SURF 算法	997	126	26.07	33.26
文献[6]	320	29	5.39	19.92
本文方法	94	27	2.72	13.86

在表 1 中可发现,相比于传统 SURF 算法,匹配率由原来 12.6% 提高到 28.7%,提取特征点的时间由 26.07 减少到 2.72 s,图像拼接时间由 33.26 减少到 13.86 s;相比于文献[6]方法,匹配率由 9.1% 提高到 28.7%,提取特征点的时间由 5.39 减少到 2.72 s,图像拼接时间由 19.92 减少到 13.86 s,同时本文方法提取的特征点对数目和匹配特征点对数目均有所减少,从而有效提高了图像拼接的实时性。

3.2 实验 2 无视角差图像拼接

在本实验中,特征点的灰度值阈值设置为 50,且特征点数上限为 100,图像特征点匹配结果如图 6 所示。

经过 SURF 的图像匹配改进算法后,将本文方法得出的实验效果图再与传统 SURF 算法以及文献[6]方法得出的实验效果图进行对比,如图 7 所示。



(c) 本文方法匹配结果
(c) Matching results of our algorithm

图 6 匹配结果

Fig. 6 Matching results



(a) 传统SURF算法拼接效果
(a) Mosaic effect of traditional SURF algorithm



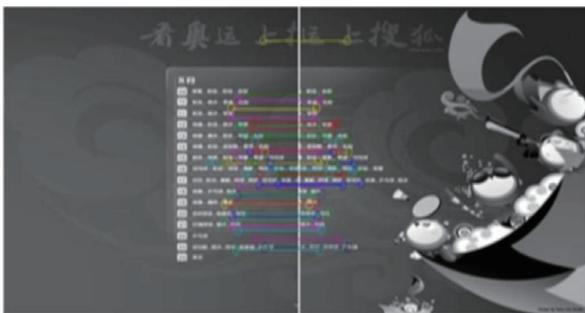
(b) 文献[6]方法拼接效果
(b) Mosaic effect of reference [6]



(c) 本文方法拼接效果
(c) Mosaic effect of our algorithm

图 7 拼接效果

Fig. 7 Mosaic results



(a) 传统SURF算法匹配结果
(a) Matching results of traditional SURF algorithm



(b) 文献[6]方法匹配结果
(b) Matching results of reference [6]

表2 图像拼接参数对比表

Table 2 Comparison of image mosaic parameters

方法	图像拼接参数			
	提取特征 点对数	匹配特征 点对数	提取特征 点时间/s	图像拼接 时间/s
SURF 算法	146	45	7.78	17.03
文献[6]	97	32	4.86	14.91
本文方法	66	25	2.31	11.65

从上述的拼接效果图和图像拼接参数对比表可知,无视角差图像拼接效果对比图如图7所示,本文方法的图像拼接的效果与传统 SURF 算法基本一致。但从图像拼接参数对比表2可发现,本文所提方法相比于传统 SURF 算法而言,匹配率由原来 30.8% 提高到 37.8%,提取特征点的时间由 7.78 减少到 2.31 s,图像拼接时间由 17.03 减少到 11.65 s;与文献[6]方法相比,匹配率由 32.9% 提高到 37.8%,提取特征点的时间由 4.86 减少到 2.31 s,图像拼接时间由 14.91 减少到 11.65 s,可见本文方法特征点匹配率以及图像拼接时间方面均有所改善。

4 结 论

本文在传统的 SURF 图像拼接算法的基础上,提出了一种基于小波变换的 SURF 图像拼接方法。通过 Haar 小波函数的图像预处理得到二阶分解的低频成分,利用小波梯度矢量对低频图像重合区域进行特征点提取,对提取的特征点进行灰度值和数量阈值限定来降低特征点对的数量,减少提取特征点时间,并在此次基础上,采用改进 SURF 算法进行特征点匹配,以有效地剔除误匹配点对,提高特征点匹配精度和实时性。实验采用有视差图像和无视差图像作为待配准图像,分别与传统 SURF 算法和文献[6]方法进行图像拼接对比,实验结果表示本文所提方法图像拼接的效果好、快速性强,同时特征点的匹配率高。

参考文献

- [1] 杨艳伟. 基于 SIFT 特征点的图像拼接技术研究[D]. 西安:电子科技大学, 2009.
YANG Y W. Research on image mosaic based on SIFT feature points [D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [2] 魏利胜,张平改. 基于分层模型与局部复原的多聚焦图像融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 161-169.
WEI L S, ZHANG P G. Multi-focus image fusing method based on hierarchical model and partial recovery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 161-169.
- [3] BAY H, ESS A, TUYTELAAR T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [4] 张开玉,梁凤梅. 基于改进 SURF 的图像配准关键算法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2875-2879.
ZHANG K Y, LIANG F M. Research on the key algorithm for image matching based on improved SURF [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(10): 2875-2879.
- [5] 胡敏,贺晓佳,王晓华. 快速区域质心图像匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 27(5): 455-462.
HU M, HE X J, WANG X H. Fast image matching algorithm with area centroid [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 27(5): 455-462.
- [6] 魏利胜,周圣文. 新型优化 SIFT 的图像快速配准方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(5): 167-171.
WEI L SH, ZHOU SH W. Research on novel optimization SIFT algorithm based fast mosaic method [J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(5): 167-171.
- [7] 许佳佳,张叶,张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
LIU J, FU W P, WANG W, et al. Fast image registration algorithm based on improved Harris-SIFT descriptor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 29(1): 48-54.
- [8] 王帅,李迎春,张廷华. 相机阵列中无视场重合图像时间配准方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 53-58.
WANG SH, LI Y CH, ZHANG T H. Method suitable for image registration of camera array used in space target observation [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(10): 53-58.
- [9] 刘佳嘉,何小海,陈为龙. 一种结合小波变换的 SIFT 特征图像匹配算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 257-260, 335.
LIU J J, HE X H, CHEN W L. Image matching algorithm by wavelet transform combined with SIFT characteristics [J]. Journal of Computer Simulation, 2011, 28(1): 257-260, 335.
- [10] 詹曙,王少武,蒋建国. 基于尺度限制 SURF 的图像配准[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10): 963-967.
ZHAN SH, WANG SH V, JIANG J G. Image registration

- based on scale restricted SURF [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(10): 963-967.
- [11] 刘佳, 傅卫平, 王雯, 等. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(05): 1107-1112.
LIU J, FU W P, WANG W, et al. Image matching based on improved SIFT algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1107-1112.
- [12] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection unstinting a boosted cascade of simple feature [C]. IEEE Computer Society Conference, Computer Vision and Pattern Recognition, 2001(1): 511-518.
- [13] 龙英, 何怡刚, 张镇, 等. 基于信息熵和 Haar 小波变换的开关电流电路故障诊断新方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(03): 701-711.
LONG Y, HE Y G, ZHANG ZH, et al. Switched-current circuit fault diagnosis based on entropy and Haar wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 701-711.
- [14] 周韬, 张茂军, 熊志辉. 使用 M 进制小波对尺度与旋转不变的图像特征点进行检测[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10): 2034-2039.
ZHOU T, ZHANG M J, XIONG ZH H. Feature points detection of scale and rotation invariant image using M-band wavelet [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2012, 23(10): 2034-2039.
- [15] 雷俊锋, 郭勇, 肖进胜, 等. 移动平台上四邻域梯度阈值的 SIFT 匹配优化[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(4): 967-971.
LEI J F, GUO Y, XIAO J SH, et al. Optimized SIFT matching algorithm based on gradient threshold of 4

neighborhoods on mobile devices [J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(4): 967-971.

- [16] 张凤晶, 王志强, 吴迪, 等. 基于 SURF 的图像配准改进算法[J]. 长春理工大学学报, 2016, 39(1): 112-115.
ZHANG F J, WANG ZH Q, WU D, et al. Improved algorithm of image registration based on SURF [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2016, 39(1): 112-115.

作者简介



魏利胜(通讯作者), 1978 年出生, 2009 年于上海大学获得博士学位, 现为安徽工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像识别与应用、网络控制系统建模和仿真。

E-mail: lshwei_11@163.com

Wei Lisheng (Corresponding author) was born in 1978, and received Ph. D. from Shanghai University in 2009. Now, he is an associate professor and M. Sc. supervisor at Anhui Polytechnic University. His main research interest includes image recognition and application, networked control systems modeling and simulation.



甘泉, 1991 年出生, 安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为智能信息处理与应用。

E-mail: gq2150210103@163.com

Gan Quan was born in 1991. He is a M. Sc. candidate in Anhui Polytechnic University. His main research interest includes intelligent information processing and application.