

文章编号:1007-2780(2022)04-0483-11

相位相关性增强的自适应低重叠率 多光谱图像快速拼接算法

贾婷婷¹, 王慧琴^{1*}, 王 可¹, 王 展², 甄 刚², 李 源³

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省文物保护研究院, 陕西 西安 710075;

3. 西安博物院, 陕西 西安 710054)

摘要:在进行多光谱图像拼接时,由于成像需求及不同波段图像的信息差异,导致无法在低重叠率条件下完成全波段光谱图像快速拼接。针对该问题,本文提出一种相位相关性增强的自适应低重叠率多光谱图像快速拼接算法。以多光谱图像信息熵最大通道作为基准通道,设计图像相关性增强切分方法,切除基准通道下两幅相邻镜头光谱图像的特定步长,提高待匹配光谱图像重叠率;引入最小二乘法动态调整切分次数及切分步长,实现相对偏移量寻优的同时提高算法的自适应性和精确度;利用不同通道下两幅相邻分镜头图像偏移量一致原则,通过基准通道位移量定位映射,解决个别通道因信息量不足无法拼接问题的同时提高多光谱图像的拼接效率。实验表明,该方法可实现重叠率不低于5%的16个通道光谱图像的快速拼接,在整体拼接质量和时间成本上均优于Harris、SIFT、FAST-SURF、BRISK-ORB四种算法,具有一定的实用价值。

关键词:相位相关法;多光谱图像拼接;低重叠率;相关性增强;最小二乘法

中图分类号:TP751.1;TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0294

Adaptive low overlap multispectral image fast mosaic algorithm based on phase correlation enhancement

JIA Ting-ting¹, WANG Hui-qin^{1*}, WANG Ke¹, WANG Zhan², ZHEN Gang², LI Yuan³

(1. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, China;

2. Shanxi Provincial Institute of Cultural Relics Protection, Xi'an 710075, China;

3. Xi'an Museum, Xi'an 710054, China)

Abstract: In multispectral image mosaic, due to the imaging requirements and the information differences

收稿日期:2021-11-18; **修订日期:**2021-12-16.

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2021JM-377);陕西省科技厅科技合作项目(No. 2020KW-012);陕西省教育厅智库项目(No. 18JT006);西安市科技局高校人才服务企业项目(No. GXYD10.1)

Supported by Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Plan Project (No. 2021JM-377); Science and Technology Cooperation Project of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (No. 2020KW-012); Think Tank Project of Shaanxi Provincial Department of Education (No. 18JT006); University Talent Service Enterprise Project of Xi'an Science and Technology Bureau (No. GXYD10.1)

*通信联系人, E-mail: hqwang@xauat.edu.cn

of different band images, it is impossible to complete the fast mosaic of full band spectral images under the condition of low overlap rate. To solve this problem, an adaptive low overlap multispectral image fast mosaic algorithm based on phase correlation enhancement is proposed in this paper. Taking the maximum information entropy channel of spectral image as the reference channel, an image correlation enhancement segmentation method is designed to cut off the specific step of two adjacent lens spectral images under the reference channel to improve the overlap rate of spectral images to be matched. The least square method is introduced to dynamically adjust the number of divisions and the division step length to realize the optimization of the relative offset while improving the realization and rationality of the algorithm. Using the principle of consistent offset of two adjacent sub lens images under different channels, through the positioning mapping of the displacement of the reference channel, the problem that individual channels cannot be spliced due to insufficient information is solved, and the splicing efficiency of multispectral images is improved. Experiments show that this method can realize the fast mosaic of 16 channel spectral images with an overlap rate of no less than 5%, which is superior to Harris, SURF and ORB algorithms in overall mosaic quality and time cost.

Key words: phase correlation method; multispectral image mosaic; low overlap rate; correlation enhancement; least-square method

1 引言

多光谱图像为通过光谱相机获取到的不同通道的多幅图像,具有光谱分辨率和空间分辨率。近年来,多光谱成像技术在图像处理领域有很大突破,大多用于遥感图像^[1-2],也有学者将其应用于文物保护领域且取得了一定成就,如壁画的保护与修复^[3-4]。在实际拍摄过程中,多光谱图像的宽视角和高分辨率两方面需求存在冲突,可利用图像拼接技术将多幅窄视角、高分辨率的多光谱壁画图像拼接并融合,获得具有宽视角、高分辨率的多光谱壁画图像^[5-7],为壁画的保护与修复提供更详实的数据。

图像拼接一般包括图像采集与预处理、图像配准、图像融合 3 个步骤,其关键步骤为图像配准^[8-9]。在图像配准领域,Harris^[10]等提出 Harris 检测算子,虽算法稳定性高,但不具备尺度不变性;Lowe^[11]提出 SIFT 特征匹配算法,具有尺度不变性和旋转不变性,配准精度高、鲁棒性强但时间成本大;Bay^[12]等在对 SIFT 算法降维的基础上提出 SURF 算法,虽将配准速度大幅提高,但其精度有所降低;陈伟^[13]等将 FAST 算法与 SURF 算法进行结合,进一步提升了算法的匹配速率,但在精度上还是有所欠缺。Ruble^[14]等将 Fast 算法与 Brief 算法进行融合提出 ORB 算法,

提高了特征检测和特征匹配速率,但特征点检测不稳定,配准精度不及 SURF 算法。Wu^[15]将 BRISK 算法和 ORB 算法结合,提升配准精度的同时提升了配准速率,但精度还是低于 SIFT 与 SURF 算法。以上算法均在配准精度与效率之间存在一定冲突,且不可直接获取图像之间的偏移量,无法实现多光谱图像的准确快速拼接。

基于二维傅里叶变换的相位相关法具有算法简单、精确度高的特点^[16]。该方法由 Kuglin^[17]等首次提出,可计算出两张重叠率较大图像之间的偏移量,但无法对重叠率低,以及具有较大旋转角度和尺度变化的两幅图像实现精确配准。Reddy^[18]等将对数极坐标变换与相位相关法融合形成扩展相位相关法,解决了同时具有平移、旋转和尺度变换的两幅图像的配准问题。Li^[19]等提出一种基于图像金字塔改进的相位相关配准算法,在引入金字塔分解降低图像分辨率的基础上结合相位相关法,降低了算法复杂度且对目标部分丢失或被遮挡的情况具有很强的鲁棒性。因壁画拍摄现场情况复杂,需对目标壁画进行快速数据采集,因此采集的壁画多光谱图像分镜头间重叠率较低。上述针对相位相关法的改进均无法克服其在低重叠率时的误匹配问题,无法实现低重叠率多光谱图像的快速拼接。

本文提出一种相位相关性增强的自适应低

重叠率多光谱图像快速拼接算法。在相位相关法的基础上,设计图像相关性增强切分方法,增大相邻分镜头下两幅壁画光谱图像之间的重叠率,引入最小二乘法进行自适应偏移量寻优,然后利用相邻分镜头图像各通道偏移量一致原则,将基准通道图像偏移量定位映射到其他通道,实现低重叠率壁画光谱图像多通道快速拼接。最后,使用本文算法与Harris、SIFT、FAST-SURF、BRISK-ORB四种算法进行多光谱图像拼接对比实验,评价并讨论了实验结果。

2 相位相关法基本原理

在现有图像匹配算法中,相位相关法具有计算量小、抗噪声等优点,可精确计算出图像之间的相对偏移量,能快速高效地实现光谱图像的多通道拼接。当待拼接图像之间仅有平移关系时,设两者图像信号分别为 $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$,则两幅图像满足以下条件:

$$f_2(x, y) = f_1(x - dx, y - dy), \quad (1)$$

式中, dx 、 dy 为两张图像水平偏移量和竖直偏移量^[16]。根据傅里叶变换位移性质,将图像变化通

过频域反映得:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-i2\pi(udx + vdy)}, \quad (2)$$

式中: $F_1(u, v)$ 为图像 $f_1(x, y)$ 的傅里叶变换, $F_2(u, v)$ 为图像 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换,两幅图像的归一化互功率谱如下:

$$p(u, v) = \frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{i2\pi(ux + vy)}, \quad (3)$$

式中, F_2^* 表示 F_2 的复共轭, $|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|$ 为 $F_1(u, v) F_2^*(u, v)$ 的幅度谱。根据傅里叶变换平移定理,对互功率谱进行傅里叶逆变换可得两幅图像的相位相关函数为:

$$p(x, y) = F^{-1}(e^{i2\pi(ux + vy)}) = \delta(x - dx, y - dy), \quad (4)$$

式中, $\delta(x - dx, y - dy)$ 为脉冲函数^[20-21]。当两幅图像仅有平移差异时,脉冲函数峰值所在的位置对应两幅图像的相对偏移量^[22],峰值大小表示两幅图像的相关度,即当两幅图像完全相同时,脉冲函数峰值为1。当两幅图像配准成功时,其脉冲函数峰值个数唯一,如图1(a)所示;当配准误差较大时会存在多个比较接近的峰值,如图1(b)所示。

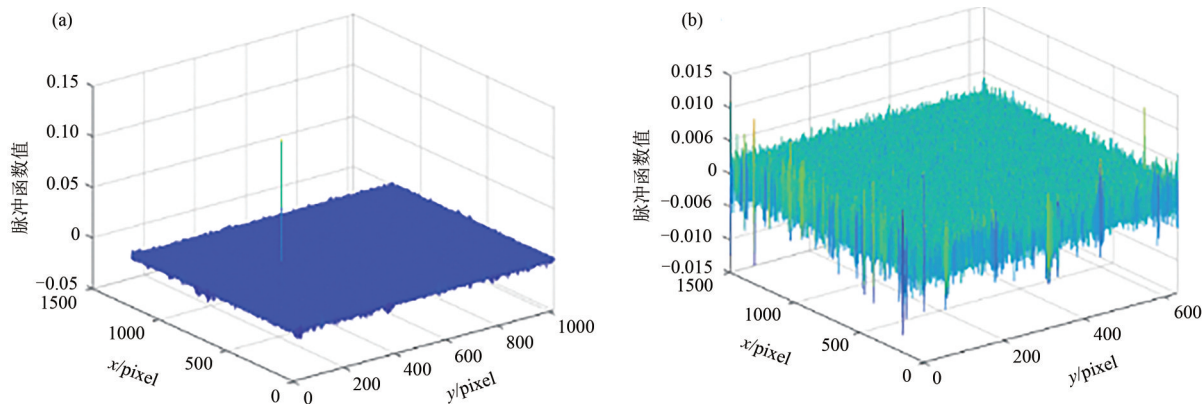


图1 图像的相位相关函数脉冲图。(a)正确匹配脉冲图;(b)错误匹配脉冲图。

Fig. 1 Pulse diagram of phase correlation function of image. (a) Correctly match the pulse diagram; (b) Error matching pulse diagram.

当重叠区域所占比例过小时,两幅图像相关性低,相关峰能量会向非相关峰扩散,造成多峰值干扰,相位相关法无法精确获取两幅图像的相对偏移量。故其在图像重叠率大于50%时具有较好的拼接效果,重叠率较低时容易产生误匹配。

3 相位相关性增强的低重叠率多光谱图像拼接算法

3.1 图像相关性增强切分法

相邻分镜头光谱图像重叠率较低时,直接使用相位相关法进行拼接会造成较大误差。为保

证匹配准确性,设计图像切分方法,逐步切除光谱图像的非重叠部分,提高两幅子图像的重叠率,以增强子图像相关性。设图像宽为 c ,切分总次数为 num ,则切分步长 l 为:

$$l = \frac{c}{\text{num} + 1}, \quad (5)$$

每次切去一个步长的像素,则第 i 次切分后剩余子图像宽度为:

$$\text{div} = c - il, \quad 1 \leq i \leq \text{num}, \quad (6)$$

切分示意图如图 2 所示。

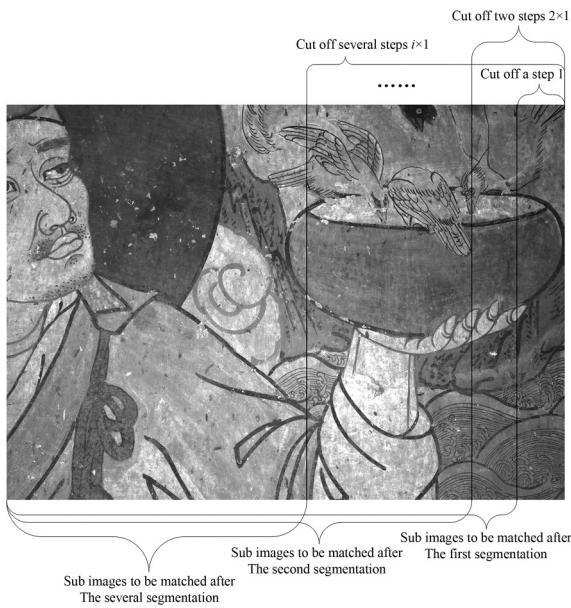


图 2 图像切分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of image segmentation

3.2 自适应相位相关性增强图像拼接算法

3.2.1 最小二乘偏移量寻优

不同大小子图像配准结果存在差异。为寻找最佳匹配结果并保证结果的准确性,引入最小二乘法对匹配结果进行验证,实现偏移量寻优,保证算法的精确度。通过使误差的平方和最小化去寻找与数据匹配的最佳函数^[23],形式如下:

$$\delta = \sum (y_0 - y_i)^2, \quad (7)$$

式中: δ 为累计误差, y_i 为预测值, y_0 为真值。

选取匹配结果对应的两幅图像的重叠部分进行验证,利用相位相关法计算重叠部分的相对偏移量 dx 、 dy ,其偏移量累计误差最小为:

$$\delta_{\min} = \min[(\text{dx})^2 + (\text{dy})^2], \quad (8)$$

偏移量累计误差最小即为最佳匹配结果。

3.2.2 分镜头图像自适应切分匹配算法

因拍摄环境以及人为因素,相邻分镜头光谱图像重叠率存在差异。为了对不同大小和重叠率的光谱图像实现拼接。提出一种自适应切分匹配算法,针对不同光谱图像动态调整总切分次数及切分步长,在保证拼接质量的同时提高算法自适应性。

由于相位相关法对重叠率高于 50% 的图像有比较好的拼接效果,为提高算法时间效率,从图像非重叠侧的 1/2 处开始切分,则切分步长为:

$$l = \frac{c}{2(\text{num} + 1)}. \quad (9)$$

对两张子图像进行相位相关法计算。理想情况下,当两张图片重叠部分完全一致时,其相位相关脉冲函数峰值只有一个。但在实际运算过程中,由于拍摄时光照不均、拍摄角度不一等因素,两张图像重叠部分并非完全相似,故脉冲函数峰值能量四处扩散,出现若干与最大峰值相近峰值,对匹配结果产生干扰。若直接将最大峰值所对应的偏移量作为最终图像偏移量,易导致误匹配。

针对上述问题,取切分后子图像使用相位相关法匹配,寻找脉冲函数阵列中最大峰值 max_value ,以及与最大峰值相差 $\lambda * \text{max_value}$ 以内的其他峰值,将各峰值对应相对偏移量进行存储,作为待验证偏移量。 λ 为范围参数,其取值根据实际应用场景调整,取值范围为 $[0.01, 0.1]$ 。 λ 取值越大,拼接准确率越高,但时间成本也会随之增加。因相位相关法计算速度快,为保证拼接质量,本文实验 λ 取 0.1。

为寻找最佳匹配结果,在相位相关性增强拼接算法基础上引入最小二乘法迭代验证自适应调整切分总次数及步长,寻找最佳匹配结果,实现低重叠率壁画光谱图像的拼接。具体步骤如下:

Step1 设初始切分次数 $\text{num} = 0$,切去的步长数 $i = 0$ 。

Step2 $\text{num} = \text{num} + 5$ 。

Step3 对图像进行切分,每次切去一个步长,切去总步长数 $i = i + 1$ 。

Step4 对子图像进行相位相关法匹配,保留不低于最大峰值 10% 的所有峰值对应偏移量。

Step5 将偏移量所对应的重叠区域再次进行匹配,保留最大峰值对应偏移量为 Δx 、 Δy 。若

有 n 组保留下来待验证平移量,可得 n 组对应的 Δx 、 Δy 。

Step6 根据图像重叠区域的高度一致性,在所得 n 组 Δx 、 Δy 中,利用最小二乘法对进行寻优,保留其对应的偏移量 x_1 、 y_1 。

Step7 当 $i < \text{num}$ 时,重复 Step3,否则执行 Step8。

Step8 因光谱图像本身存在噪点,易出现误判,出现位置接近原点峰值,导致 $\Delta x^2 + \Delta y^2$ 的值极小。为使结果更加可靠,取每次切分后所得

x_1 、 y_1 的众数,为总切分次数下的最佳偏移量。

Step9 为提高算法精确度,对切分次数和步长进行自适应调整。对 Step8 偏移量对应重叠部分再次验证,当 $\Delta x^2 + \Delta y^2 \leq \epsilon$ 时,其对应 x_1 、 y_1 即为两幅图像间最终偏移量 dx 、 dy ; 否则返回 Step2 直至找到误差范围内最佳匹配结果。

Step10 利用最终偏移量对图像进行拼接。

因本文方法无需涉及亚像素,实验表明,当 ϵ 取值为 1 时均能达到较好匹配效果,同时验证了本算法的精确度。

自适应切分算法流程如图 3 所示。

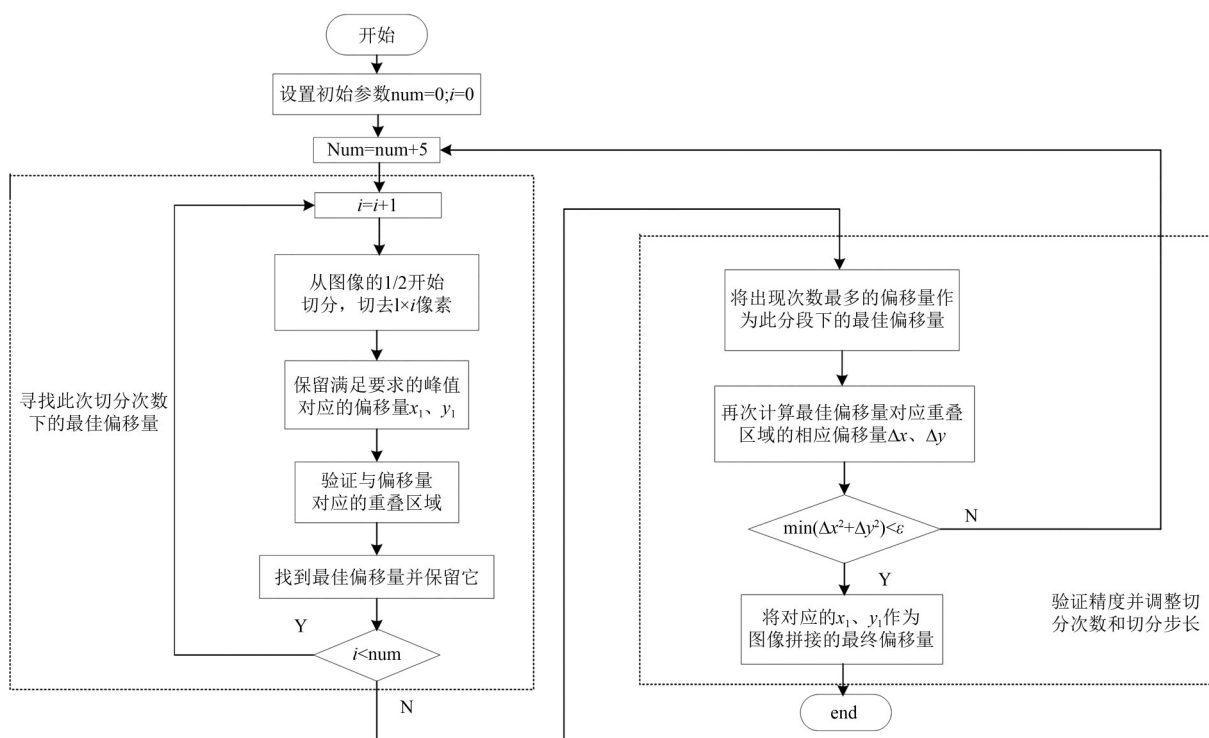


图3 自适应切分算法流程图

Fig. 3 Flow chart of adaptive segmentation algorithm

3.3 多光谱图像拼接与融合处理

多光谱图像各通道所含信息各有差异,研究时需对每个通道进行拼接,将多通道进行融合以增加图像信息量。考虑到匹配效率及个别通道信息量不足等问题,其过程不可简单视为对所有通道逐一配准拼接。此外,单通道拼接时误差各异,导致多通道融合时累计误差较大。故需选取信息量最大波段光谱图像为基准进行匹配运算,利用所得偏移量信息对其余通道定位映射,完成多通道快速拼接^[24]。保证各通道误差及拼接后

大幅图像维度一致性,降低多通道融合时的累计误差。本文所用多光谱图像通道数为 16,若计算出在基准通道下 A1、A2 两幅光谱图像偏移量分别为 Δx 、 Δy ,则其对应通道的拼接如图 4 所示,其中 P 为图像长度, Q 为图像宽度, R 为波段数。

采集过程中光照强度的不同会使两幅图像亮度存在差异,导致配准后图像拼接处存在明显缝隙。为了使图像拼接处过渡自然,需对图像进行融合处理以消除缝隙^[25-26]。本文引入加权平均法对两幅图像的重叠部分进行融合处理。设处

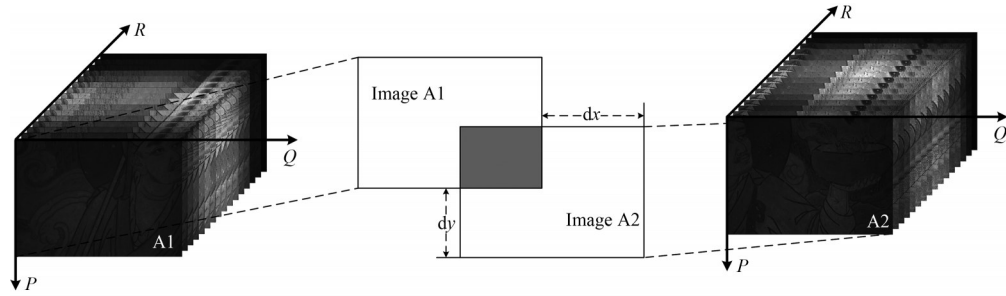


图4 多光谱图像A1和A2拼接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multispectral image A1 and A2 splicing

理后图像灰度值为 $I(i, j)$ 待拼接图像灰度值分别为 I_1 与 I_2 ,则有:

$$I(i, j) = \begin{cases} I_1(i, j) & (i, j) \in I_1 \\ eI_1(i, j) + (1 - e)I_2(i, j) & (i, j) \in I_1 \cap I_2 \\ I_2(i, j) & (i, j) \in I_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, e 为权重系数,一般情况下为:

$$e = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (11)$$

式中, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 为两幅图像相同部分在X轴方向上的极大值和极小值。图像的融合可使图像灰度值进行缓慢过渡,消除光照不均对拼接效果造

成的影响,实现无缝拼接。

4 实验与结果分析

4.1 算法性能分析

为验证本文算法的有效性与普适性,采用5组不同光谱壁画图像作为实验数据。首先将本文算法与传统相位相关法在图像低重叠率时的拼接有效性进行对比。选取像素大小为 1363×965 ,重叠率为11.4%的A1、A2两幅分镜头多光谱壁画图像,使用相位相关法与本文算法进行拼接,结果如图5所示。

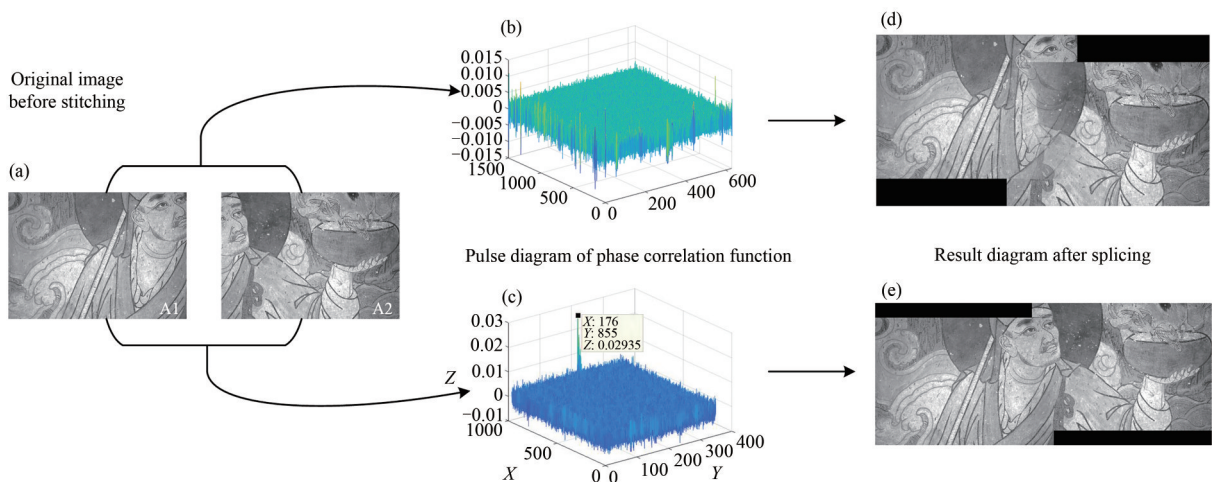


图5 传统相位相关法与本文算法拼接效果对比。(a)待拼接图像;(b)传统相位相关脉冲图;(c)本文算法脉冲图;(d)传统相位相关法拼接结果图;(e)本文算法拼接结果图。

Fig. 5 Comparison of stitching effect between traditional phase correlation method and this algorithm. (a) Image to be spliced; (b) Traditional phase correlation pulse diagram; (c) Pulse diagram in this paper; (d) Splicing result diagram of traditional phase correlation method; (e) Stitching results of this algorithm shown in the figure.

由图5传统相位相关脉冲图像(b)可得,在光谱壁画图像重叠率11.4%,即在重叠率较低情况

下,脉冲图出现多处明显尖峰,虽有最大峰值,但峰值能量较低,对应偏移量也存在较大误差。由

图5中本文算法脉冲图像(c)可以看出,本文算法通过对图像进行合理切分,增强图像的相关性,在此基础上进行相位相关法配准,其脉冲图像得到明显改善,存在明显尖峰且相关峰值能量变大。但由于壁画光谱图像本身存在噪声,导致脉冲图像仍存在其他小峰值,因此引入最小二乘法进行偏移量寻优,检测出A1、A2两幅图像的最优水平及竖直偏移量分别为176像素、110像素,并以此作为定位映射标准进行拼接和融合。与传统相位相关法拼接结果(d)相比,本文方法拼接结果(e)无拼接错位误匹配问题,且拼接效果远优于传统相关相位法。

为验证本文所提算法的普适性,分别对剩余

4组大小、重叠率各异的壁画光谱图像利用本文方法进行拼接实验,实验效果如图6所示。

由图6可以看出,对于5组大小、重叠率各异的光谱图像,本文方法均有比较好的拼接效果,其客观指标如表1所示。

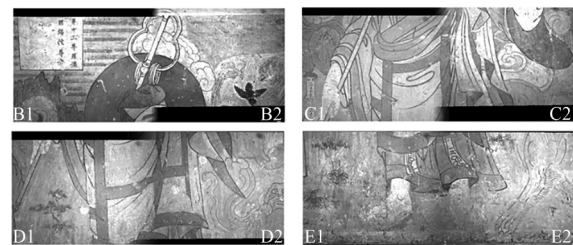


图6 不同壁画光谱图像拼接结果

Fig. 6 Mosaic results of spectral images of different murals

表1 5组壁画光谱图像拼接结果

Tab. 1 Mosaic results of five groups of mural spectral images

Image	Image size/pixel	Overlap rate/%	Segmentation times	Δx	Δy	time/s
A1 A2	1 363×965	11.4	5	176	110	0.412
B1 B2	1 382×997	5	5	77	106	0.405
C1 C2	1 356×998	7.8	10	116	85	0.793
D1 D2	1 378×1 000	20.3	10	300	68	0.817
E1 E2	1 361×947	15.8	5	219	16	0.415

由表1得5组壁画光谱图像重叠率最低为5%,最高为20.3%,A、B、E三组壁画光谱图像只需切分5次即可算出相对偏移量,平均时间成本只需0.411 s。C、D两组壁画光谱图像合适切分次数为10,平均时间为0.805 s;虽时间成本与切分次数呈正相关,但其拼接时间均在可接受范围内。实验表明,对于大小、重叠率不同的5组壁画光谱图像,本文所提算法均可找到合适的切分次数,并计算出各图像间最优偏移量,达到低重叠率壁画光谱图像快速无缝拼接的效果。

4.2 多通道光谱图像实验对比分析

对于多通道图像拼接而言,不同通道图像亮度、信息量存在较大差异,对拼接质量也会造成一定的影响。因大幅壁画图像难以获取,为更好地验证本文算法的优越性,对D1分镜头的520,740,900 nm通道光谱图像进行分割并重新拼接,将本文算法分别与经典的Harris、SIFT算法以及最新的FAST-SURF、BRISK-ORB算法进行比较,实验结果如图7所示。

由图7可得,基于特征点检测的SIFT、FAST-SURF、BRISK-ORB算法在740 nm通道有较好的拼接效果,Harris算法拼接结果边缘存在轻微的几何形变,但在低照度通道下,图像亮度比较低,检测到的特征点数量减少,导致拼接误差增大,在520 nm、900 nm通道图像拼接时,4种算法均出现了不同程度的几何形变,其中Harris、BRISK-ORB两种算法的几何变形较严重。本文算法在3个通道均有比较好的拼接效果,验证了本文算法在图像亮度变化方面相对于其他上算法有较强的鲁棒性。

以D1为参考,采用结构相似性(Structural Similarity Index, SSIM)、峰值信噪比(Peak Signal to-Noise Ratio, PSNR)、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)3个全参考评价指标及时间成本对不同算法拼接结果进行评价。其中SSIM由亮度、对比度、结构对比3部分组成,其值越大,图像的相似度越高;PSNR利用两幅图像对应像素之间的误差来评价拼接质量,其值

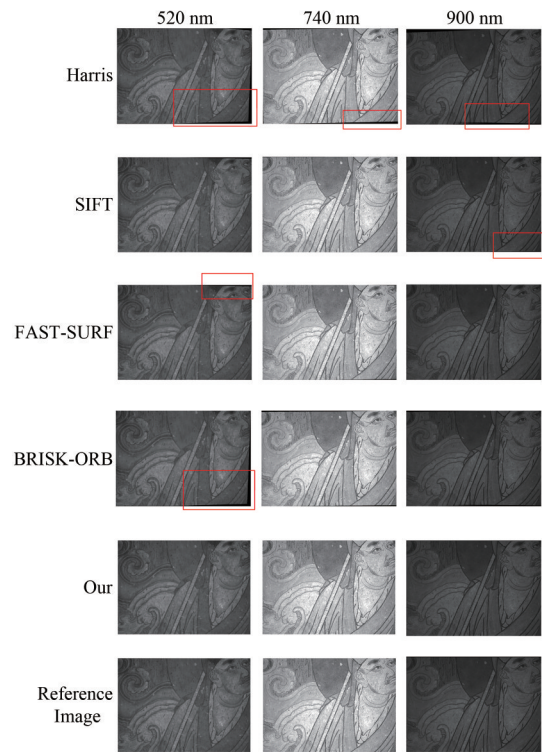


图 7 不同算法拼接效果对比图

Fig. 7 Comparison of splicing effects of different algorithms

越大,拼接质量越好;RMSE反映了参考图像与拼接图像之间的偏差,其值越小,表示两幅图像越相近。对比结果如表 2 所示。

由表 2 可得,在 740 nm 通道下,5 种算法均有较好的拼接效果,本文算法拼接效果略优于其他算法;在 520 nm、900 nm 低照度通道下,本文算法在 SSIM、PSNR、RMSE 均明显优于其他 4 种算法。在 4 种对比实验中 SIFT、FAST-SURF 拼接效果优于 Harris、BRISK-ORB 算法。在拼接时间成本上,本文算法略快于 BRISK-ORB 算法,相对于 Harris、SIFT、FAST-SURF 三种算法有明显的时间优势。验证了本文算法在多通道光谱图像拼接准确性与时间成本方面有更好的效果。

为了实现多通道光谱图像的快速拼接,选取光谱图像信息量最大通道作为基准通道,获取拼接偏移量后定位映射其余通道,实现多通道图像的快速拼接。图像信息熵反映图像信息的丰富程度,其值越大图片质量越好。图像信息熵公式为:

$$H=\sum_{i=1}^{255} p_i \log p_i, \tag{12}$$

式中, p_i 表示灰度值为*i*的像素在图像中所占的比例,即此灰度值在整幅图像中出现的概率。分别对 A1、A2 16 个通道的壁画光谱图像信息熵进行计算,得到各通道图像信息熵曲线如图 8 所示。

由图 8 可得,在 400~740 nm 波段,两幅图像信息熵随波长增大而增加,当波长为 740 nm 时,

表 2 不同算法拼接结果对比

Tab. 2 Comparison of stitching results of different algorithms

Wavelength	Algorithm	Evaluation index			
		SSIM	PSNR	RMSE	Time/s
520 nm	Harris	0.814 6	28.245 1	9.869 2	1.325 4
	SIFT	0.966 2	36.248 9	2.345 7	1.742 5
	FAST-SURF	0.943 2	32.854 1	5.421 3	0.972 4
	BRISK-ORB	0.915 4	31.125 8	7.235 4	0.391 5
	Ours	0.987 8	42.563 2	1.754 2	0.361 8
740 nm	Harris	0.945 3	31.254 6	5.426 5	1.425 6
	SIFT	0.985 6	41.265 4	1.863 4	1.845 9
	FAST-SURF	0.981 5	40.786 9	2.045 8	1.043 6
	BRISK-ORB	0.952 3	32.865 7	5.102 3	0.405 3
	Ours	0.990 2	44.882 3	1.452 3	0.395 2
900 nm	Harris	0.808 0	28.453 6	9.632 1	1.386 5
	SIFT	0.956 4	33.245 1	3.852 4	1.802 3
	FAST-SURF	0.952 1	32.742 5	3.245 7	1.005 0
	BRISK-ORB	0.892 5	29.213 5	8.334 3	0.398 7
	Ours	0.972 4	39.564 2	2.564 2	0.372 4

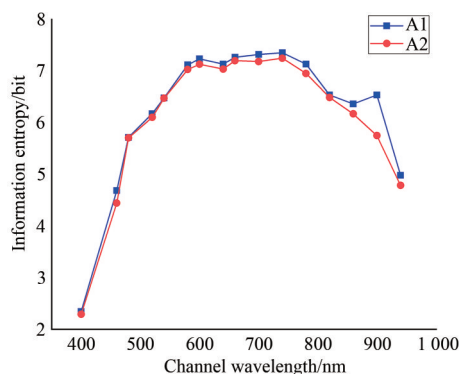


图8 A1和A2图像的16个通道信息熵变化图

Fig.8 Information entropy change diagram of 16 channels of A1 and A2 images

两幅图像信息熵最大;在740~940 nm波段,图像信息熵随波长增大而下降。故实验选择A1、A2的740 nm波段光谱图像作为基准图像。

将本文算法应用于实际16通道的光谱图像拼接。因无原图像参考,使用信息熵(Information Entropy, IE)、平均梯度(Average Gradient, AG)与总体拼接时间作为评价标准与Harris、SIFT、FAST-SURF、BRISK-ORB四种算法进行对比。其中平均梯度反映图像中的微小反差和纹理特征变化,其值越大,图像层次越丰富,图像越清晰。实验结果如表3所示。

表3 16通道拼接结果对比

Tab.3 Comparison of 16-channel splicing results

Evaluation index		Algorithm				
		Harris	SIFT	FAST-SURF	BRISK-ORB	Ours
IE/bit	Max	7.439 6	7.545 4	7.529 6	7.486 4	7.625 4
	Min	2.214 7	2.352 7	2.295 7	2.258 4	2.601 2
	Mean	6.027 5	6.175 4	6.135 4	6.100 6	6.254 1
AG	Max	8.863 2	9.653 6	9.542 5	9.011 5	10.235 1
	Min	1.145 2	1.615 4	1.496 7	0.215 3	1.738 7
	Mean	4.845 5	4.956 2	4.945 1	4.825 0	5.008 1
Time/s	Sum	7.852	9.563	5.867	4.351	3.424

由表3可得,本文算法所得壁画多通道光谱拼接图像信息熵、平均梯度均大于其他4种算法,拼接效果最优。总体时间成本较其他4种算法也有比较大的优势,说明了该算法在多通道

光谱壁画拼接质量和速度上的优越性,可满足多通道低重叠率光谱图像的快速拼接需求。图9所示为使用本算法对16通道光谱图像拼接结果。

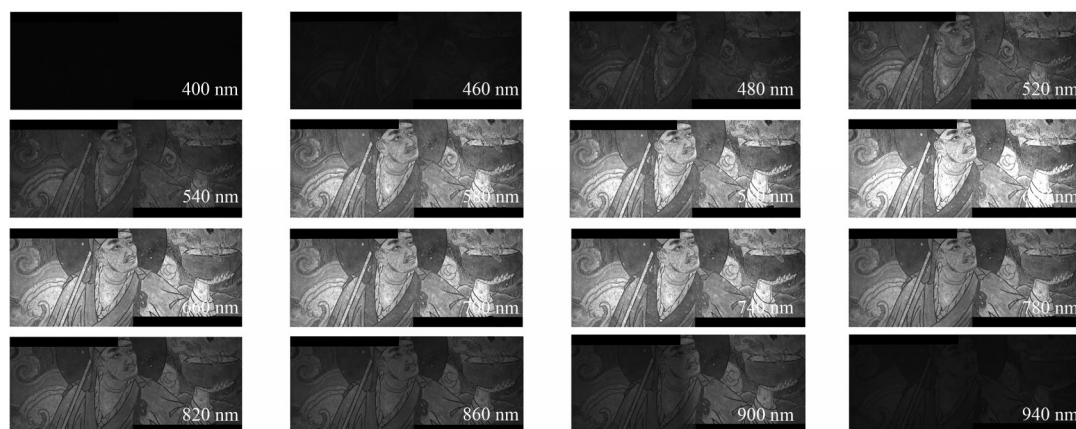


图9 16通道光谱图像拼接效果

Fig.9 16 channel spectral image mosaic effect

如图9所示,本文算法可将基准通道光谱图像对应偏移量进行定位映射,对图像信息量较少

通道实现较好拼接,完成多通道低重叠率光谱图像的快速拼接。

5 结 论

本文提出了一种相位相关性增强的自适应低重叠率多通道光谱图像拼接算法。设计了相关性增强图像切分法与相位相关法进行融合;在此基础上引入最小二乘法进行迭代验证,动态调整切分次数与步长进行偏移量寻优,解决了相位相关法在低重叠率时易出现误匹配问题,保证了匹配准确度的同时提高了算法自适应性;通过计算对比各通道图像信息熵,选取最大信息熵通道

为基准通道,采用本文算法计算基准通道图像相对偏移量,通过对各通道偏移量定位映射实现了多光谱壁画的多通道快速拼接。在多光谱壁画图像的拼接实验中,实现了重叠率不低于 5% 多光谱壁画的无缝拼接,且可对多通道光谱图像快速拼接。与主流的拼接算法进行对比,本文算法整体拼接质量与时间成本均优于其他方法,验证了该方法在低重叠率多通道壁画图像拼接方面的有效性与可行性,可为壁画的光谱分析与重建、壁画虚拟修复等研究提供大空间高分辨率数据支持,具有一定的现实意义和实用价值。

参 考 文 献:

- [1] 魏晴,刘晋铭,徐其志. 基于分类分块的全色多光谱图像比值变换融合方法[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(5): 108-117.
WEI Q, LIU J M, XU Q Z. Panchromatic and multispectral image fusion by ratio enhancement based on classification and block [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(5): 108-117. (in Chinese)
- [2] 宁纪锋,倪静,何宜家,等. 基于卷积注意力的无人机多光谱遥感影像地膜农田识别[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 213-220.
NING J F, NI J, HE Y J, *et al.* Convolutional attention based plastic mulching farmland identification *via* UAV multispectral remote sensing image [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 213-220. (in Chinese)
- [3] CHAI B L, SU B M, ZHANG W Y, *et al.* Standard multispectral image database for paint materials used in the Dunhuang murals [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(10): 3289-3306.
- [4] 王雪培,赵虹霞,李青会,等. 多光谱成像技术分析彩色艺术品的相关基础研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1030003.
WANG X P, ZHAO H X, LI Q H, *et al.* Relevant fundamental research of colored artworks by multispectral imaging technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1030003. (in Chinese)
- [5] 程宇峰,金淑英,王密,等. 一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度影像拼接方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828003.
CHENG Y F, JIN S Y, WANG M, *et al.* An high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0828003. (in Chinese)
- [6] 赵婷,康海林,张正平. 结合区域分块的快速 BRISK 图像拼接算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031005.
ZHAO T, KANG H L, ZHANG Z P. Fast image mosaic algorithm based on area blocking and BRISK [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031005. (in Chinese)
- [7] 罗杰超,郭俊达,米凤文,等. 基于变形目镜和 OLED 的全景周视成像与显示技术[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 752-759.
LU J C, GUO J D, MI F W, *et al.* Panoramic peripheral vision imaging and display technology based on a deformation eyepiece and OLED [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 752-759. (in Chinese)
- [8] 于国栋,王春阳,兰孝野,等. 基于离线标定的快速图像拼接算法[J]. 液晶与显示, 2021, 36(10): 1430-1436.
YU G D, WANG C Y, LAN X Y, *et al.* Fast image mosaic algorithm based on offline calibration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1430-1436. (in Chinese)
- [9] 蔡怀宇,韩晓艳,姜世良,等. 扫频光学相干层析视网膜图像配准去噪算法[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 289-297.
CAI H Y, HAN X Y, LOU S L, *et al.* Speckle noise reduction in swept-source optical coherence tomography by retinal image registration [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 289-297. (in Chinese)

- [10] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//*Alvey Vision Conference 1988*. Manchester: AVC, 1988: 147-151.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [12] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, *et al.* Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [13] 陈伟,刘宇,王亚伟,等. 基于改进的FAST-SURF快速图像拼接算法[J]. *应用光学*, 2021, 42(4): 636-642.
CHEN W, LIU Y, WANG Y W, *et al.* Fast image stitching algorithm based on improved FAST-SURF [J] *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 636-642. (in Chinese)
- [14] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, *et al.* ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C]//*2011 International Conference on Computer Vision*. Barcelona: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [15] WU M Y. Research on optimization of image fast feature point matching algorithm [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, 2018(1): 106.
- [16] 张晗,谢妮慧,于飞,等. 基于相位相关方法的像移估计精度研究[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(4): 92-100.
ZHANG H, XIE N H, YU F, *et al.* Study on the image motion estimate precision based on the phase correlation method [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(4): 92-100. (in Chinese)
- [17] KUGLIN C D, HINES D C. The phase correlation image alignment method [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society*. New York: IEEE, 1975: 163-165.
- [18] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [19] LI Y, WANG J L, YAO K N. Modified phase correlation algorithm for image registration based on pyramid [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(1): 709-718.
- [20] ITO K, NAKAJIMA H, KOBAYASHI K, *et al.* A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2004, E87-A(3): 682-691.
- [21] DONG Y Y, LONG T F, JIAO W L, *et al.* A novel image registration method based on phase correlation using low-rank matrix factorization with mixture of Gaussian [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(1): 446-460.
- [22] XIE X W, ZHANG Y J, LING X, *et al.* A novel extended phase correlation algorithm based on Log-Gabor filtering for multimodal remote sensing image registration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(14): 5429-5453.
- [23] GAVIN H P. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems [R]. Durham: Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, 2019: 1-19.
- [24] 易俐娜,许筱,张桂峰,等. 轻小型无人机高光谱影像拼接研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(6): 1885-1891.
YI L N, XU X, ZHANG G F, *et al.* Light and small UAV hyperspectral image mosaicking [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(6): 1885-1891. (in Chinese)
- [25] ZHAO Y S, GAO F R, YU J, *et al.* Underwater image mosaic algorithm based on improved image registration [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(13): 5986.
- [26] 徐一帆,王新华,张广,等. 一种改进720°全景相机底部图像拼接方法[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(10): 1412-1419.
XU Y F, WANG X H, ZHANG G, *et al.* Improved bottom image mosaic method of 720° panoramic camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1412-1419. (in Chinese)

作者简介:



贾婷婷(1994—),女,陕西韩城人,硕士研究生,2018年于西安建筑科技大学获得学士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。
E-mail:1571995944@qq.com



王慧琴(1970—),女,博士,教授,2002年于西安交通大学获得博士学位,主要从事智能信息处理、信息理论与应用、信息技术与管理、数字建筑等研究。E-mail: hqwang@xauat.edu.cn