

基于频谱和空域特征匹配的图像配准算法

陈泽锋¹, 吴庆阳^{1,2,*}, 陈顺治¹, 李奇锋¹, 卢晓婷¹, 黄浩涛¹

¹深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060;

²深圳技术大学大数据与互联网学院, 广东 深圳 518118

摘要 针对特征点不明显的图像配准场景,在保证相邻两幅待配准图像重叠面积超过 80%的前提下,提出了一种基于频谱和空域特征匹配的配准算法。该算法基于傅里叶频谱图的旋转中心不变性,将空域中两幅图像绕任意一点的旋转角转化成频域中绕频谱图中心的旋转角。利用极坐标系和笛卡尔坐标系的变换关系,将绕频谱图中心的旋转量转化为一维方向的平移量,使用 SAD(Sum of Absolute Difference)算法求取旋转角,再使用 SAD 算法求取平移矩阵。所提配准算法既适用于特征点明显的图像配准场景,也适应于特征点不明显的图像配准场景,且配准精度较高,配准速度较快。

关键词 图像处理; 图像配准; 傅里叶变换; 模板匹配

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.021005

Image Registration Based on Spectral and Spatial Feature Matching

Chen Zefeng¹, Wu Qingyang^{1,2,*}, Chen Shunzhi¹, Li Qifeng¹, Lu Xiaoting¹, Huang Haotao¹

¹College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Big Data and Internet, Shenzhen Technology University, Shenzhen, Guangdong 518118, China

Abstract Aiming at image registration scenes with inconspicuous feature points, we proposed a registration algorithm based on spectral and spatial feature matching to ensure that the overlapping area of two adjacent images to be registered exceeds 80%. Based on the invariance of the rotation center of the Fourier spectrogram, the rotation angle of the two images in the spatial domain around any point was converted into the rotation angle around the center of the spectrogram in the frequency domain. Using the transformation relationship between the polar and Cartesian coordinate systems, the degree of rotation around the center of the spectrogram was converted into a one-dimensional translation, and the rotation angle was obtained using the SAD (Sum of Absolute Difference) algorithm. The SAD algorithm was then applied to determining the translation matrix. The proposed registration algorithm proposed would be suitable for image registration scenes with both inconspicuous and obvious feature points. Moreover, it was characterized by a high speed and registration accuracy.

Key words image processing; image registration; Fourier transform; template matching

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.3008; 100.5760

1 引言

图像拼接^[1]就是将部分内容相关的多幅图像进行拼接,构成一幅具有较大视场的图像。由于普通相机获取的图像视场有限,为了获得高分辨率的大视场图像,人们提出了利用多张图像之间的相关性

进行大视场图像拼接的方法。目前,图像拼接技术已被广泛应用于医学影像分析、航空图像处理、虚拟现实技术、空间探测等领域。

图像拼接主要包括两个核心技术:图像配准^[2]和图像融合^[3]。图像配准是图像融合的基础,会直接影响图像拼接的质量,而且图像拼接的计算量主

收稿日期: 2019-05-05; **修回日期:** 2019-05-18; **录用日期:** 2019-09-19

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61827815)、深圳技术大学启动项目(201723)、深圳技术大学校企合作项目(2018010802013)

* **E-mail:** wuqingyang@sztu.edu.cn

要取决于配准算法。图像拼接技术的发展很大程度上取决于对图像配准技术的不断创新,因此图像配准技术是当下非常流行的研究课题。图像配准技术可大致分为基于图像区域配准和基于图像特征配准两类,如 SIFT (Scale Invariant Feature Transform)、SURF (Speeded Up Robust Features)^[4-6]、块匹配法和网格匹配法等算法^[7-9]。

基于区域的配准算法利用图像的灰度信息建立图像间的相似性,根据相似性度量值寻找两幅图像间的配准区域,从而建立两幅图像之间的变换关系。文献[9]中提出了基于块匹配的配准算法,取第1幅图像处于重叠部分中的图像块作为模板,在第2幅图像中搜索相似的对应该图像块,从而确定配准矩阵。该算法的精度较高,但计算量较大。文献[7]中提出了一种基于网格匹配的配准算法,在第2幅图像的重叠区域取一个网格,然后将网格在第1幅图像上移动,计算网格对应点的 RGB 值之差的平方和,记录差值最小时对应的网格位置,即为两幅图像的配准位置。将该算法应用于有相对旋转和平移的两幅图像的配准时,在每次进行网格匹配之前,都需要先旋转一定角度或平移一定距离,这不仅增加了时间复杂度,还大大降低了配准速度。基于区域的配准算法利用图像的灰度信息进行配准,配准精度较高,稳健性较强,但计算量大,配准速度慢。

基于特征的配准算法是目前图像配准技术中最常用的方法,如文献[10-12]中的配准方法主要利用图像中的不变特征(特征点、轮廓等)作为图像间配准的依据,其优点是提取图像特征的数量远远小于图像像素点的数量,从而大大降低了算法的时间复杂度和空间复杂度。但是基于特征的配准算法需要建立一系列的规则对待配准图像中的特征点进行提取,而在实际的配准场景中会出现图像特征点不明显的情况,容易导致特征点误匹配,大大降低了配准精度。

针对特征点不明显的图像配准场景,在保证两幅图像重叠面积超过 80% 的前提下,本文提出了一种基于频谱和空域特征匹配的图像配准算法。基于傅里叶频谱图的旋转中心不变性,将空域中图像绕着任意点的旋转量变成频谱图绕着中心的旋转量,利用极坐标系和笛卡尔坐标系之间的坐标变换关系,将两幅频谱图的旋转量转化为一维平移量,利用 SAD(Sum of Absolute Difference)算法求得角度量,再使用 SAD 算法求取平移量,最终得到两幅待配准图像之间的变换矩阵。

2 基本原理

2.1 图像变换

假设空间中的点 A 在两幅图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 中的像素坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 即有 $f_2(x_2, y_2) = f_1(x_1, y_1)$ 。已知 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 之间的空间坐标变换采用刚体平面变换模型,则 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的空间坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -t_x \\ -\sin \theta & \cos \theta & -t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: θ 为两幅图像的旋转角; (t_x, t_y) 为两幅图像的平移量。

2.2 图像配准

在实际应用中,两幅待配准图像常常会伴随着相对的旋转,进一步限制了基于区域的配准算法的应用,因此基于图像特征的配准算法便成为目前的主流算法。针对图像特征不明显的配准场景,基于图像特征的配准算法无法保证配准的精度。针对图像特征不明显的配准场景,需要利用图像内容进行配准。

本文提出的配准算法主要针对重叠区域足够大的配准场景(一般要求两幅待配准图像的重叠区域不低于 80%),比如常见的视频流拼接场景(相邻两幅待配准图像的重叠面积能够得到保证,且相邻两幅待配准图像的亮度、对比度对图像配准的精度影响较小)。

假设两幅待配准图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 有相对旋转和平移,根据(1)式有

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \theta + y \sin \theta - t_x, -x \sin \theta + y \cos \theta - t_y), \quad (2)$$

对(2)式进行傅里叶变换,得到两幅待配准图像的傅里叶频谱图表达式为

$$\mathcal{F}_2(\xi, \eta) = \mathcal{F}_1(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta, -\xi \sin \theta + \eta \cos \theta) \times \exp[-j2\pi(\xi t_x + \eta t_y)], \quad (3)$$

式中: $\mathcal{F}_1(\xi, \eta)$ 、 $\mathcal{F}_2(\xi, \eta)$ 分别为图像 $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$ 的傅里叶频谱图函数; (ξ, η) 为频谱图坐标。

根据傅里叶频谱图的旋转中心不变性,可以将空域中两幅图像绕任意一点的旋转量变换到频域中两幅频谱图绕频谱图中心的旋转量。与利用图像灰度值直接进行计算的基于区域的配准算法不同,本文算法通过对空域中的两幅待配准图像进行傅里叶变换,将两幅灰度图像的图像变化信息转化成数值化频谱图的幅值。频谱图像素值的大小表示不同频率的幅值,即频谱函数的模。用函数 M_1 、 M_2 分别

表示 $\mathcal{F}_1(\xi, \eta)$ 、 $\mathcal{F}_2(\xi, \eta)$ 的模, 则有

$$M_1(\xi, \eta) = M_2(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta, -\eta \sin \theta + \xi \cos \theta). \quad (4)$$

根据直角坐标系和极坐标系的坐标变换关系, 有

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta' \\ y = \rho \sin \theta' \end{cases}, \quad (5)$$

式中: x 和 y 为直角坐标系下频谱图的坐标值; ρ 为极坐标系下频谱图的极径; θ' 为极坐标系下频谱图的极角。

结合(4)式和(5)式得到极坐标系下两幅频谱图的坐标变换关系为

$$M_1(\rho, \theta) = M_2(\rho, \theta + \theta_0), \quad (6)$$

式中: θ_0 为极坐标系下两幅频谱图绕中心的旋转角。

可以看到, 极坐标系下两幅频谱图的模 M_1 和 M_2 只相差 θ_0 的旋转量。图 1(a)、(b) 为极坐标系下两幅图像的频谱图, 两幅频谱图相差旋转量 θ_0 。为了对 θ_0 进行快速求取, 利用极坐标系和直角坐标系之间的坐标转换关系, 将极坐标系下两幅频谱图绕中心逆时针方向的旋转量 θ_0 转化为直角坐标系下两幅频谱图沿 Y 轴的平移量 y_0 , 直角坐标系下的频谱图如图 1(c)、(d) 所示, 大大提高了求取旋转矩阵的运算速度。

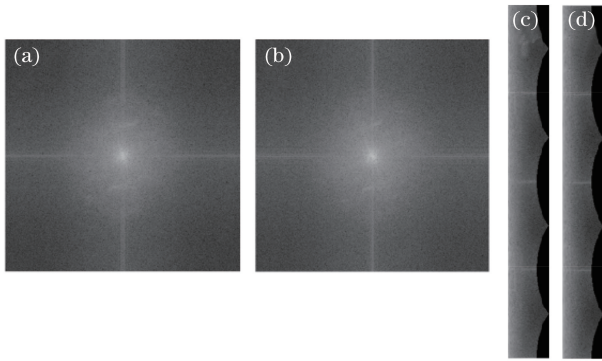


图 1 两幅图像的频谱图。(a)(b)极坐标系下的频谱图; (c)(d)直角坐标系下的频谱图

Fig. 1 Spectrograms of two images. (a)(b) Spectrograms in polar coordinate system; (c)(d) spectrograms in rectangular coordinate system

利用 SAD 算法对图 1(c)、(d) 进行 Y 方向的查找, 求得两幅频谱图的旋转量 θ_0 。则空域中两幅图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & 0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

通过求得的旋转矩阵对两幅待配准图像进行变

换, 得到两幅只有相对平移的图像 $f'_1(x, y)$ 和 $f'_2(x, y)$, 对 $f'_1(x, y)$ 和 $f'_2(x, y)$ 使用 SAD 算法求得的平移矩阵为 $[t_x, t_y, 1]^T$ 。

SAD 是一种基于图像灰度的网格匹配算法, 其基本思想就是取图像块中每个像素对应的像素值之差的平方均值, 以此来评判两个图像块的匹配度。设函数 S 表示两幅图像重叠区域的灰度差均方根和, 其表达式为

$$S = \sum_m^M \sum_n^N \frac{|f_1(m, n) - f_2(M - m, N - n)|^2}{m \times n}, \quad (7)$$

式中: (M, N) 为图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的大小; (m, n) 为重叠区域的大小。

针对两幅大小为 $m \times m$ 的两幅待配准图像, 已知图像 $f'_1(x, y)$ 和图像 $f'_2(x, y)$ 只有相对的平移, 如图 2 所示。传统的网格匹配算法需要将图像 $f'_2(x, y)$ 在图像 $f'_1(x, y)$ 上进行 $m \times m$ 次移动, 计算每次移动时重叠区域的匹配度, 匹配度最高时对应的位置即为两幅图像的配准位置。

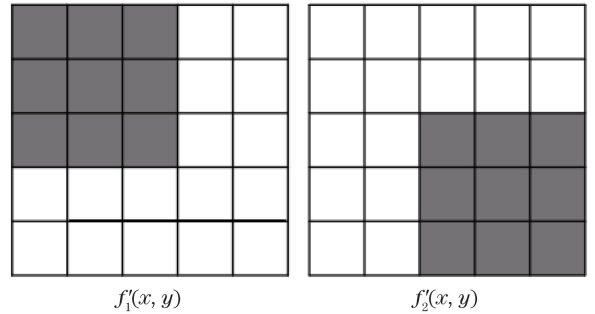


图 2 两幅只有相对平移的待配准图像

Fig. 2 Two images to be registered with only relative translation

由于本文中两幅待配准图像的重叠区域超过了 80%, 因此在进行网格匹配时, 可以通过建立相应的规则来避免无效的计算, 从而提高运算速度。在保证图像重叠区域足够大的前提下, 可以将网格匹配算法的查找起点进行更改, 如图 3 所示。图 3 中所示的灰色区域即为被跳过的查找区域, 通过该方法, 可以大大降低网格匹配算法的计算量。

如图 3 所示, 可以将 SAD 的遍历分为独立的 4 个查找区间, 最佳匹配位置位于其中的一个查找区间。本文采用先粗后细的查找方法, 先对 4 个区间进行粗查找, 确定最佳匹配位置所在的区间, 再对对应区间进行精细查找, 获取平移矩阵, 该方法极大地提高了 SAD 算法的运行速度。

如图 4 所示, 对 $f'_1(x, y)$ 和 $f'_2(x, y)$ 进行

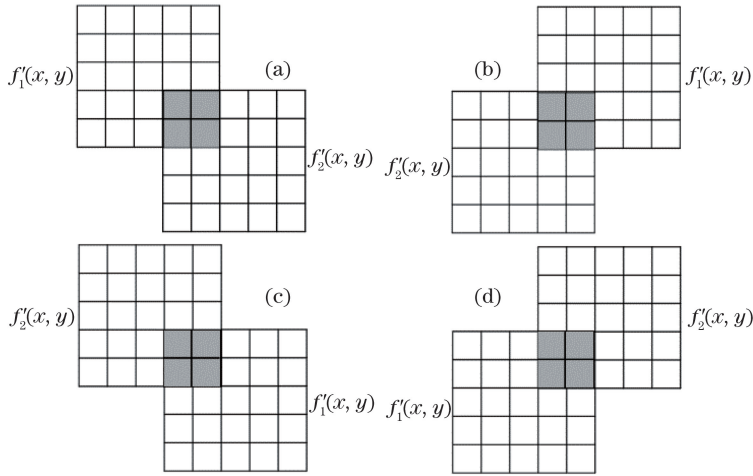


图 3 改进后的网格匹配算法示意图

Fig. 3 Diagram of improved mesh matching algorithm

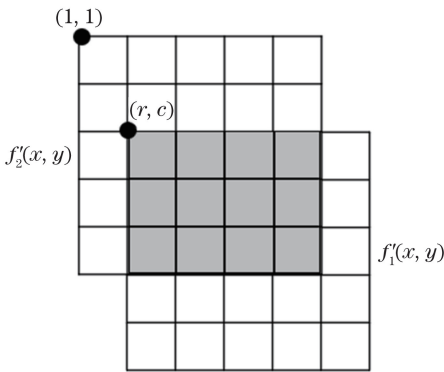


图 4 函数 S 取值最小时两幅待配准图像的相对位置

Fig. 4 Relative position of two images to be registered when value of function S is the smallest

SAD 查找,求得 S 的最小值(表示两幅图像重叠区域的相似度最高)。如图 4 所示,在进行 SAD 查找过程中,两幅待拼接图像中一定有一幅图像的顶点位于另一幅图像区域内,则该点在两幅图像上的坐标值之差即为两幅图像的平移矩阵,即 $(t_x, t_y) = (r, c) - (1, 1)$ 。

2.3 图像连续拼接

已知相邻两幅待配准图像之间的变换矩阵后,对图像序列进行连续配准就可以得到全景图像。本文以第一帧图像作为基准坐标系,则第 n 帧图像变换到基准坐标系下的变换矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_T \times \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{T1} \cdots \mathbf{R}_{Tk-2} \cdot \mathbf{R}_{Tk-1} \times \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: \mathbf{R}_T 为第 k 帧图像变换到第 1 帧图像坐标系的变换矩阵, \mathbf{R}_{Tk-1} 为第 k 帧图像变换到第 $k-1$ 帧图

像坐标系的变换矩阵; $[x_k, y_k, 1]^T$ 为第 k 帧图像的图像坐标系下的坐标; $[x_1, y_1, 1]^T$ 为基准坐标系下的坐标。

2.4 图像融合

通过对图像序列进行连续变换,可以将待配准的图像序列变换到基准坐标系下,对于基准坐标系下的每一个坐标,在每一帧图像的图像坐标系下都可以找到对应的坐标。所以基准坐标系下的每一个坐标的像素可能对应于 k 帧图像的对应该像素集合 $\{p_1, \dots, p_{l-1}, p_l\}$,其中, l 的取值范围为 $[0, k]$ 。如果基准坐标系下的点在第 k 帧图像的图像坐标系下的对应坐标超过了图像区域,则该点在第 k 帧图像所取得的像素值为 $p_k = 0$ 。

对于基准坐标系下每一个坐标对应的像素集合 $\{p_1, \dots, p_{l-1}, p_l\}$,取出所有不为 0 的像素值,并剔除最大值和最小值,对剩余的像素值求平均值,将平均值作为当前点的像素值。

3 实验结果

本实验的运行环境如下:处理器为 Intel(R) Core i7-8750H CPU @ 2.20 GHz,显卡为 NVIDIA GeForce GTX1050 Ti,运行内存 RAM 为 8 GB,编译平台为 MATLAB 2018。本文针对的主要是视频流的连续配准,相邻两幅待配准图像之间的重叠区域都在 80% 以上,且相邻两幅待配准图像之间的亮度、对比度等因素对配准精度的影响较小。

对于因待配准图像特征点不明显而导致特征点提取和匹配精度难以保证的场景, SURF 算法不再适用,而本文算法对于特征点不明显的待配准图像的配准效果如图 5 所示,其中,图 5(a) 中两幅图像

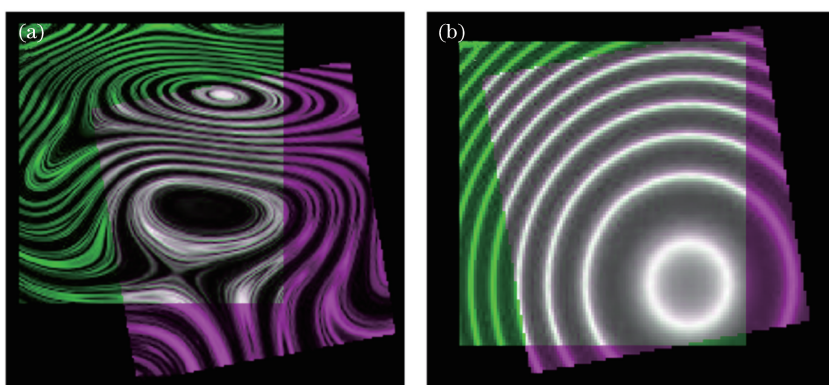


图5 采用本文算法对两幅特征不明显的图像进行配准后的图像。(a)重叠区域灰度差均值为 6.4564×10^{-4} 的图像;

(b)重叠区域灰度差均值为 8.0699×10^{-4} 的图像

Fig. 5 Registered images of two images with inconspicuous features. (a) Gray difference mean value of overlapped area is 6.4564×10^{-4} ; (b) gray difference mean value of overlapped area is 8.0699×10^{-4}

重叠区域灰度差的均值为 6.4564×10^{-4} , 图 5(b) 中两幅图像重叠区域灰度差的均值为 8.0699×10^{-4} 。可以看到, 采用本文算法对特征点不明显的待配准图进行配准, 能够得到较好的配准效果。

如图 6 所示为两幅特征点比较明显的待配准图像, 可以看到两幅图像的旋转角度较小, 且两幅图像的重叠面积超过了 80%。



图6 两幅待配准图像

Fig. 6 Two images to be registered

对图 6 中的两幅图像进行傅里叶变换, 得到两幅图像的频谱图, 如图 7 中(a)、(b)所示。对极坐标系下的频谱图进行坐标变换, 将频谱绕着频谱图中心逆时针方向分为 3600 份, 并沿着 Y 轴方向依次变换到直角坐标系下, 得到直角坐标系下的频谱图, 如图 7(c)、(d)所示。

根据上述讨论可知, 只需要遍历 $(0^\circ, 15^\circ] \cup [-15^\circ, 0^\circ]$ 的区间, 则 SAD 对应的搜索范围为 $(1, 150] \cup [3451, 3600]$, 得到的相似度曲线如图 8 所示。相似度曲线取值最大的点对应的横轴的值即为角度值, 求得旋转角度为 10.9° 。

采用求得的旋转角对两幅图像进行变换, 得到只有相对平移的两幅图像, 再进行 SAD 查找求取平移矩阵。如图 9(a) 所示, 进行 SAD 粗匹配得到的

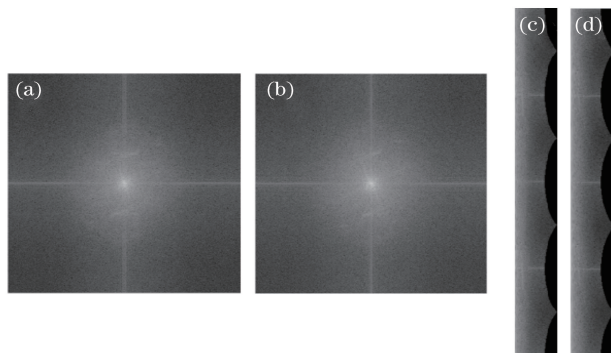


图7 两幅图像的频谱图。(a)(b)极坐标系下的频谱图; (c)(d)直角坐标系下的频谱图

Fig. 7 Spectrograms of two images. (a)(b) Spectrograms in polar coordinate system; (c)(d) spectrograms in rectangular coordinate system

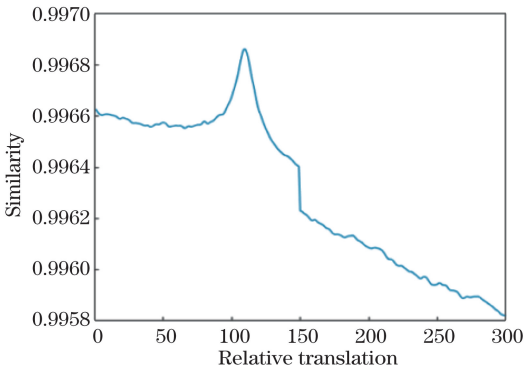


图 8 直角坐标系下两幅频谱图进行 SAD 后得到的相似度曲线

Fig. 8 Similarity curve of two spectrograms in rectangular coordinate system obtained by SAD

灰度差曲线的横轴范围为 $[0, 4096]$,将该区间分为等间距的 4 个区间,分别为 $[0, 1014]$ 、 $[1015, 2029]$ 、 $[2028, 3042]$ 、 $[3042, 4096]$ 。由图 9(a)可知,最佳匹配位置位于第 1 个区间,即 $[0, 1014]$ 。对该区间进行 SAD 精匹配,得到的灰度差曲线如图 9(b)

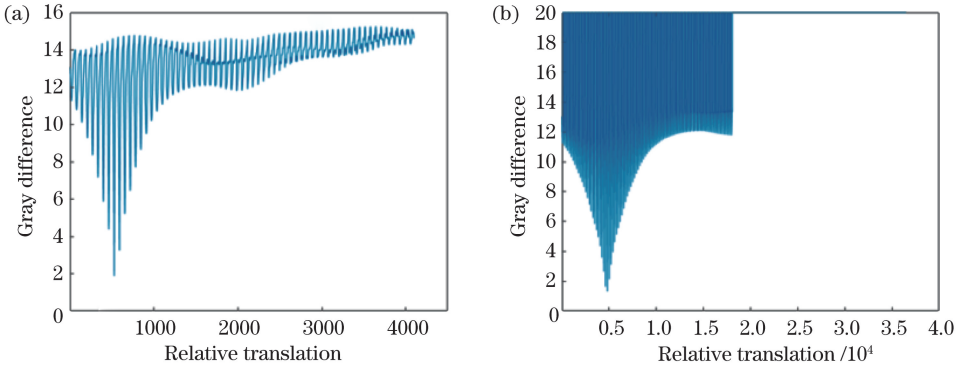


图 9 进行 SAD 粗匹配和精匹配得到的灰度差曲线。(a)粗匹配;(b)精匹配

Fig. 9 Gray level difference curves obtained by coarse matching and fine matching of SAD.

(a) Coarse matching; (b) fine matching

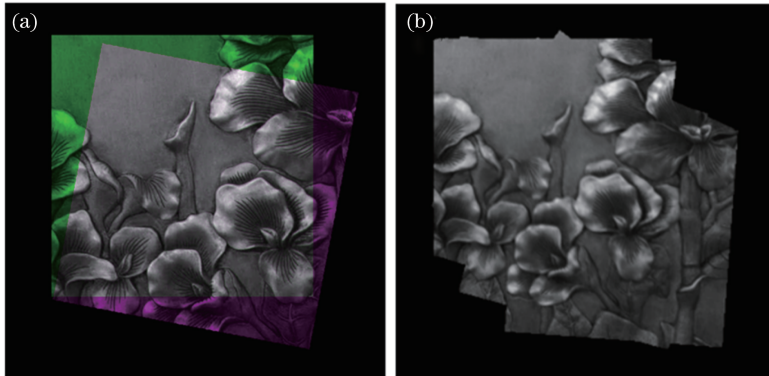


图 10 坐标变换后的图像。(a)两幅图像进行配准后的图像;(b)多幅图像连续拼接得到的图像

Fig. 10 Images after coordinate transformation. (a) Image after registration of two images; (b) image after continuous mosaic of multiple images

所示,灰度差均值最小的点表示当两幅图像处于该位置时,其重叠区域的相似度最高,求得平移矩阵为 $[18, 2, 1]^T$ 。

用上述求得的旋转量和平移量构造变换矩阵 R_T ,对两幅图像进行坐标变换。从图 10(a)可以看出,两幅图像已经实现了准确配准,两幅图像进行坐标变换后的重叠区域的灰度差均值为 7.9933×10^{-6} ,拼接耗时为 20 s,验证了本文算法所求变换矩阵的准确性。

依次求取图像序列相邻两幅图像之间的变换矩阵,并以第 1 幅图像的图像坐标系作为基准坐标系,将剩下的 $k-1$ 帧图像分别变换到基准坐标系下,并对重叠区域进行像素均值融合,得到的连续拼接图如图 10(b)所示,可以看到图像没有拼接错位,重叠区域的亮度变换均匀,没有明显的拼接缝,证明本文提出的配准算法求得的变换矩阵的精度适用于连续拼接,而且本文使用的图像融合方法能够有效解决图像亮度不均匀的问题。

4 结 论

对于相邻两幅待配准图像重叠区域超过 80% 的图像配准场景,本文提出的配准算法既适用于常见的特征点不明显的配准场景,也适用于特征点明显的配准场景,拼接精度较高,配准速度较快,可以满足图像连续拼接的要求。与基于特征点的 SURF 算法相比,本文算法适用于特征点不明显的配准场景,而与基于区域匹配的 SAD 算法相比,本文算法的配准速度较快,能够满足连续拼接中对配准速度的要求。

参 考 文 献

- [1] Xu Z G, Tian Q, Zhang L X. Discussion of image mosaic methods[J]. *Control & Automation*, 2006, 22(30): 255-256, 188.
徐正光, 田清, 张利欣. 图像拼接方法探讨[J]. *微计算机信息*, 2006, 22(30): 255-256, 188.
- [2] Luo X Q, Lü W X. Medical image registration technology[J]. *Foreign Medical Sciences Biomedical Engineering*, 1999, 22(1): 1-8.
罗述谦, 吕维雪. 医学图像配准技术[J]. *国外医学生物医学工程分册*, 1999, 22(1): 1-8.
- [3] Hu L M, Gao J, He K F. Research on quality measures for image fusion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(z1): 218-221.
胡良梅, 高隽, 何柯峰. 图像融合质量评价方法的研究[J]. *电子学报*, 2004, 32(z1): 218-221.
- [4] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C] // *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004. CVPR 2004., June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE, 2004: 8161522.
- [5] Bay H, Tuytelaars T, van Gool L. SURF: speeded up robust features [M] // Leonardis A, Bischof H, Pinz A. *Computer vision-ECCV 2006. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [6] Shi L, Su G, Han F. An improved algorithm based on SIFT and SURF image stitching algorithm [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(6): 72-74, 78.
史露, 苏刚, 韩飞. 基于 SIFT 和 SURF 图像拼接算法的改进算法 [J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(6): 72-74, 78.
- [7] Zhu Y P, Xia L M. A robust template matching algorithm for automatic image stitching [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(31): 109-111, 139.
朱远平, 夏利民. 一种适用于图像拼接的自适应模板匹配算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(31): 109-111, 139.
- [8] Li Z G, Ji Y B, Xue Q. A fast stitching algorithm for edge overlapping images[J]. *Computer Engineering*, 2000, 26(5): 37-38.
李志刚, 纪玉波, 薛全. 边界重叠图象的一种快速拼接算法[J]. *计算机工程*, 2000, 26(5): 37-38.
- [9] Liu X, Ren H, Yang Y, et al. Sub-aperture synthesis method for detecting defects of optical components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(S1): 234-238.
刘旭, 任寰, 杨一, 等. 适合表面疵病检测的图像拼接方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(S1): 234-238.
- [10] He J W, Yang J F, Xue B, et al. Reserch on the automatic stitching of panorama camera image based on system similarity matching principle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 989-993.
何建伟, 杨建峰, 薛彬, 等. 基于系统论匹配准则的尺度不变特征变换的图像自动拼接研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 989-993.
- [11] Xu X, Sun S Y, Sha Y J, et al. A method of infrared image mosaic based on improved RANSAC[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 111001.
徐鑫, 孙韶媛, 沙钰杰, 等. 一种基于改进 RANSAC 的红外图像拼接方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 111001.
- [12] Wang P, Geng G H, Zhang Y H. Fragment splicing method based on surface texture characteristic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081012.
王飘, 耿国华, 张雨禾. 基于表面纹理特征定义的碎片拼接方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081012.