

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106439

一种基于高阶累计量的图像抗噪配准改进算法*

曹萌萌

(开封大学 信息工程学院 开封 475001)

摘要: 为了降低噪声对图像配准精度的影响,提出了一种基于高阶累计量的图像抗噪声配准改进算法,首先通过对图像作去均值处理,并利用三阶累计量的离散傅里叶变换得到三阶谱,然后计算出归一化互双谱,来有效抑制噪声的影响,最后利用傅里叶逆变换得到了精确的平移量、旋转角度和尺度缩放因子。仿真实验结果表明,提出的改进算法能够将含有较强噪声的图像进行更为精确的配准,得到平移量、旋转角度和尺度缩放的估计误差分别仅为0.58 pixel,0.19°和0.36%,且配准后的图像具有较小的均方根误差和较大的归一化相关峰置信度,进一步说明了提出算法对噪声影响具有更强的适应性和鲁棒性,能够获得更加精确的配准图像。

关键词: 高阶累计量; Fourier-Mellin 变换; 图像抗噪配准; 相关峰值; 归一化互双谱

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

An improved image anti-noise registration algorithm based on high order cumulant

Cao Mengmeng

(School of Information Engineering, Kaifeng University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: In order to reduce the influence of noise on image registration accuracy, an improved image anti noise registration algorithm based on high-order cumulant is proposed. Firstly, the image is deal with average value subtraction, and the third-order spectrum is obtained by using the discrete Fourier transform of the third-order cumulant, and then the normalized cross bispectrum is calculated to effectively suppress the influence of noise. Finally, the precise translation, rotation angle and scaling factor are obtained by inverse Fourier transform. The simulation results show that the improved algorithm can achieve more accurate registration of images with strong noise, and the maximum estimation errors of translation, rotation angle and scaling are only 0.58 pixel, 0.19° and 0.36% respectively, and the registered image has smaller root mean square error and large normalization peak correlation energy confidence, which further shows that the proposed algorithm has stronger adaptability and robustness to noise, so as to obtain more accurate registration image.

Keywords: high-order cumulation; Fourier-Mellin transform; image noise registration; correlation peak; normalized cross bispectrum

0 引 言

图像配准技术是图像解译的前提,也是图像融合、图像复原及变化检测等技术应用的关键,图像配准技术在卫星遥感、飞行器自动导航、医学图像处理、遥感图像处理和气象云图分析等诸多领域得到了广泛应用^[1-3]。由于相同目标可能在不同时期、不同视点或不同传感器中获得的图像具有不同的位置坐标,就需要后期对其进行配准处理^[4]。图像配准的目的是消除两图像之间的几何形变,令两幅图

像中具有相同坐标的像素代表相同的目标信息^[5]。但是由于成像设备和技术的差异,采集到的图像之间会有比较明显的区别,而且在采集图像过程中难免还会引入噪声,从而加大了配准难度。目前,常用的图像配准的技术主要分为基于特征和区域的两种途径^[6]。文献[7]借助 Harris 算子从叠加图上采集匹配特征信息,并设计了方向图和多尺度索引图组成局部特征符,最后通过特征匹配完成可见光与 SAR 图像的配准,但由于图像之间的灰度差异较大,不仅会导致配准精度下降,而且还容易受到噪声的影响;1994

收稿日期:2021-04-20

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61702185)、河南省高等学校重点科研项目(19B520014)资助

年,Chen等提出一种基于Fourier-Mellin变换的图像配准算法,通过计算两幅图像功率谱的反傅里叶变换所对应的峰值位置,来求解相对平移,然后对图像幅度谱进行对数-极(Log-Polar)变换,在对数极坐标空间计算图像功率谱的反傅里叶变换,进而求取相对旋转角度和尺度缩放因子,从而实现了满足旋转、尺度、平移变换关系的两幅二维图像之间的配准,该方法除具有较高的精度外,还具有较小的运算量^[8]。文献[9]借助Fourier-Mellin变换解算出待配准图像的功率谱,再通过逆傅里叶变换后的峰值坐标得出相对位移,从而用较少的计算量得到配准参数;文献[10]通过局部采样相位相关策略,在笛卡尔坐标系和对数极坐标域估计出平移、旋转和缩放因子,实现了快速和高精度的图像配准。但是当图像受到噪声污染后,这两种方法图像功率谱的反傅里叶变换均会出现多个脉冲峰值,从而影响配准精度。为此,本文提出了一种基于高阶累计量的图像抗噪配准改进算法,利用三阶累计量的离散傅里叶变换得到三阶谱,再计算出图像的归一化互双谱,通过利用傅里叶逆变换即可得更加精确的平移量、相对旋转角度和尺度缩放因子,有效抑制了噪声干扰的影响,最后通过仿真对比实验验证了提出的改进算法不仅具有更小的参数估计误差,还可以获得较高质量的配准结果。

1 基于Fourier-Mellin变换的图像配准

1.1 傅里叶变换位移

设图像 $f_2(x, y)$ 是图像 $f_1(x, y)$ 的平移图像,即 $f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0)$,则 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 对应的傅里叶变换 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 的关系为 $F_2(u, v) = F_1(u, v)e^{j(ux_0 + vy_0)}$,对应的归一化互功率谱为:

$$\frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)| |F_2(u, v)|} = e^{-j(ux_0 + vy_0)} \quad (1)$$

式中: x_0 和 y_0 分别表示图像在 x 和 y 方向上的相对平移量; F_2^* 表示 F_2 的复共轭。由上式可以看出,互功率谱的相位等价于两幅图像间的平移位置差,通过对互功率谱求傅里叶反变换,可以在 (x_0, y_0) 处得到一个脉冲函数,脉冲函数峰值位置,即为两幅图像间的相对平移量 x_0 和 y_0 。

1.2 旋转和尺度缩放变换

假设两幅存在旋转和尺度缩放变换的图像,两者的变换关系描述如下:

$$f_2(x, y) = f_1[\alpha(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0), \alpha(-x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0)] \quad (2)$$

式中: θ_0 和 α 分别表示图像的旋转角度和尺度缩放比例。

则其频谱幅度满足:

$$|F_2(u, v)| = \frac{|F_1\left[\frac{u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0}{\alpha}, \frac{-u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0}{\alpha}\right]|}{\alpha^2} \quad (3)$$

根据傅里叶变换旋转的性质,很容易得到在对数-极空间图像 $f_2(x, y)$ 与 $f_1(x, y)$ 的傅里叶变换的关系如下所示:

$$\begin{cases} F_2(r, \theta) = F_1(\alpha^{-1}r, \theta - \theta_0) \\ F_2(\rho, \theta) = F_1(\rho - \log \alpha, \theta - \theta_0) \end{cases} \quad (4)$$

此时笛卡尔坐标系的尺度变换转换为对数-极空间在水平方向的平移,而旋转变换则相当于垂直方向发生位移。再利用傅里叶变换位移理论,得到两幅图像相对的旋转角度和尺度缩放因子^[11]。

1.3 含有噪声的Fourier-Mellin变换

图像在生成和传输过程中也容易受到噪声的污染,例如由摄像机和图像采集电路中的电子随机热运动引起的电子噪声、由入射光光子的统计特性和光电转换引起的散粒噪声和量化噪声,以及元器件材料本身引起的噪声等。受噪声污染的图像可表示为:

$$\begin{cases} f_1(x, y) = f_0(x - x_1, y - y_1) + n_1(x, y) \\ f_2(x, y) = f_0(x - x_2, y - y_2) + n_2(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 都为零均值的高斯噪声,则 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 对应的互功率谱为:

$$P(u, v) = \frac{\mathbb{E}[c_{f_2 f_1}(m_x, m_y)]}{\mathbb{E}[c_{f_1 f_1}(m_x, m_y)]} = \frac{\mathbb{E}[c_{f_0 f_0}(m_x - x_0, m_y - y_0)] + \mathbb{E}[c_{n_1 n_2}(m_x, m_y)]}{\mathbb{E}[c_{f_0 f_0}(m_x, m_y)] + \mathbb{E}[c_{n_1 n_1}(m_x, m_y)]} = \frac{e^{j(ux_0 + vy_0)} + F_{n_1 n_2}(u, v)/F_{n_1 n_1}(u, v)}{1 + F_{n_1 n_1}(u, v)/F_{f_0 f_0}(u, v)} \quad (6)$$

式中: $(x_0, y_0) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$; $c(m_x, m_y)$ 表示相关函数; $F_{n_1 n_1}(u, v)$ 表示噪声的功率谱; $F_{n_1 n_2}(u, v)$ 表示互功率谱; $F_{f_0 f_0}(u, v)$ 表示原始图像的功率谱。当 $F_{n_1 n_1}(u, v)$ 和 $F_{n_1 n_2}(u, v)$ 对 $F_{f_0 f_0}(u, v)$ 能够忽略时,两幅图像的互功率谱 $P(u, v)$ 才可近似于 $e^{j(ux_0 + vy_0)}$,所以需要噪声过程不相关,还得具有较高的信噪比^[12-13],但很多情况并不符合该要求,故本文提出了基于高阶累计量的图像配准方法。

2 高阶累计量的图像去噪及配准算法

2.1 高阶累计量的去噪

高阶统计量通常指高于二阶的统计量,一般包括高阶矩、高阶累计量及高阶谱。其中,由于高阶累计量对数操作具有非常优良的特性,所以可以完全抑制高斯噪声以及其他的影响,因此通常利用高阶累计量和高阶谱作为主要的分析工具^[14]。对于一个零均值、三阶实平稳随机过程 $\{x(n)\}$,其各阶累计量表达式如下:

$$c_{1x} = E[x(n)] \quad (7)$$

$$c_{2x}(m) = E[x(n)x(n+m)] \quad (8)$$

$$c_{3x}(m_1, m_2) = E[x(n)x(n+m_1)x(n+m_2)] \quad (9)$$

那么三阶谱的定义为:

$$B_x(u, v) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(m_1, m_2) e^{-j(um_1+vm_2)} \quad (10)$$

$$B_x(u, v) = X(e^{ju})X(e^{jv})X^*(e^{j(u+v)}) \quad (11)$$

通常称三阶谱为双谱,由双谱定义可知, $B_x(u, v)$ 一般为复函数,含有功率谱没有的相位信息。由于高斯序列的不相关特性,其对应的双谱为 0,这就为去除信号中的噪声提供了一条重要的途径。对于高阶累计量来讲,两个统计独立的随机过程之和的累计量等于各个随机过程累计量之和,如果一个非高斯信号在与其独立的加性高斯有色噪声中被观测的话,那么观测过程的累计量就等于原非高斯过程的累计量,故可完全抑制高斯有色噪声的影响^[15-16]。

2.2 配准算法改进

由于对于零均值的高斯平稳随机过程,其高阶累计量为零。假定 $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 为零均值的高斯噪声,原始图像 $f_0(x, y)$ 为非高斯过程,在计算前需要对图像作去均值处理,则图像表示为:

$$\begin{cases} f_1(x, y) = f_0(x - x_1, y - y_1) + n_1(x, y) \\ f_2(x, y) = f_0(x - x_2, y - y_2) + n_2(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

则三阶累计量分别为:

$$c_{f_1 f_1 f_1}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y}) \triangleq E[f_1(x, y)f_1(x + m_{1x}, y + m_{1y})f_1(x + m_{2x}, y + m_{2y})]c_{f_0 f_0 f_0}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y}) \quad (13)$$

$$c_{f_2 f_1 f_2}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y}) \triangleq E[f_2(x, y)f_1(x + m_{1x}, y + m_{1y})f_2(x + m_{2x}, y + m_{2y})]c_{f_0 f_0 f_0}(m_{1x} - x_0, m_{1y} - y_0, m_{2x}, m_{2y}) \quad (14)$$

式中: $c_{f_0 f_0 f_0}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y})$ 表示图像 f_0 的三阶累计量, $(x_0, y_0) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ 。通过三阶累计量的离散傅里叶变换,得到三阶谱分别为:

$$F_{f_1 f_1 f_1}(u_x, u_y, v_x, v_y) = \mathbb{E} [c_{f_1 f_1 f_1}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y})] F_{f_0 f_0 f_0}(u_x, u_y, v_x, v_y) \quad (15)$$

$$F_{f_2 f_1 f_2}(u_x, u_y, v_x, v_y) = \mathbb{E} [c_{f_2 f_1 f_2}(m_{1x}, m_{1y}, m_{2x}, m_{2y})] F_{f_0 f_0 f_0}(u_x, u_y, v_x, v_y) e^{-j(u_x x_0 - u_y y_0)} \quad (16)$$

进一步计算得到归一化互双谱为描述如下:

$$P(u_x, u_y, v_x, v_y) = \frac{F_{f_2 f_1 f_2}(u_x, u_y, v_x, v_y) F_{f_1 f_1 f_1}^*(u_x, u_y, v_x, v_y)}{|F_{f_2 f_1 f_2}(u_x, u_y, v_x, v_y) F_{f_1 f_1 f_1}(u_x, u_y, v_x, v_y)|} = e^{-j(u_x x_0 - u_y y_0)} \quad (17)$$

这样就可以得到不受噪声影响的相位信息,再通过傅里叶逆变换即可得到精确的平移估计量 (x_0, y_0) 。对于旋转、尺度变换的图像,变换到对数-极空间计算互双谱去除噪声的影响,再求解出相对旋转角度和尺度缩放因子,最后通过逆变换完成图像的配准。

3 仿真实验与对比分析

3.1 仿真实验环境及参数设置

实验采用运算的处理器为 Intel-i5-10400, 32 GB 的内存和 500 GB 的 SSD 硬盘,安装了 Windows10 操作系统,并运行仿真软件 MATLAB R2018a。选取具有明显边缘特征且灰度分布均匀的卫星图像进行配准,卫星图像如图 1 所示。



图 1 卫星图像

首先在原始图像 A 中加入噪声 $n_1(x, y)$ 为加性高斯白噪声,然后对原始卫星图像 A 进行平移、旋转和尺度缩放后得到图像 B ,并在图像 B 中加入的噪声 $n_2(x, y)$,且 $n_2(x, y)$ 由 $n_1(x, y)$ 通过线性系统产生,因此噪声 $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 是相关的;实验中设置平移参数 $x_0 = 96, y_0 = 80$;旋转角度 $\theta_0 = 45^\circ$;尺度缩放因子 $\alpha = 0.35$;最后得到的变换后图像,如图 2 所示。

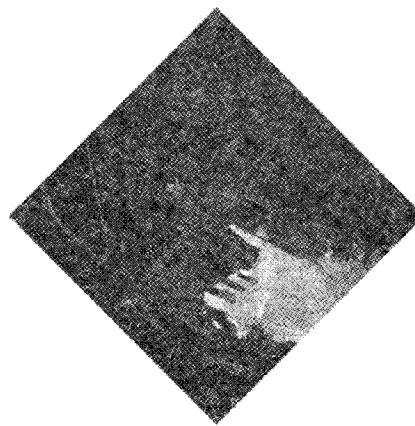


图 2 加入噪声和变换后的卫星图像

加入噪声的图像采用信噪比(SNR)来表征其噪声强度,表达式如下:

$$SNR = 10 * \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f^2(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_x(i, j) - f(i, j)]^2} \quad (18)$$

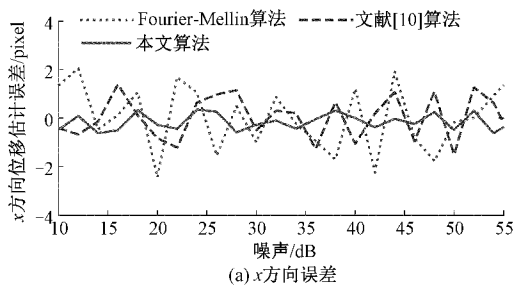
式中: M 和 N 为图像大小,本文 $M = N = 480$; $f(i, j)$ 为原始图像在像素点坐标 (i, j) 处的灰度值; $f_x(i, j)$ 为加入噪

声后对应的灰度值。

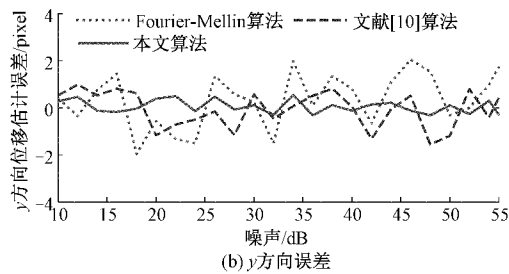
实验将加入噪声的图像 A 和变换后的图像 B 进行配准,通过改变加入噪声的大小,观察配准后图像在不同维度和变换方式下的配准参数估计误差,如果误差越小,说明配准精度越高,即受到噪声的干扰越小。

3.2 配准参数估计

实验中,设置在图像中加入的高斯噪声大小从 10 dB 增加到 55 dB,在这个过程中势必会影响到最终的配准精度。为了验证本文提出改进高阶累计量配准算法的有效性和优越性,分别采用 Fourier-Mellin 算法、文献[10]算法和本文提出的改进算法对加入噪声的图像进行配准,得到的配准参数的平移、旋转和尺度缩放因子随噪声大小变化关系,如图 3~5 所示。



(a) x方向误差



(b) y方向误差

图3 平移估计误差

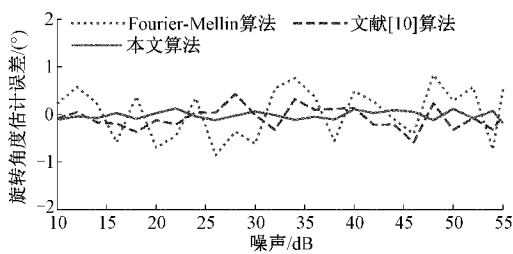


图4 旋转估计误差

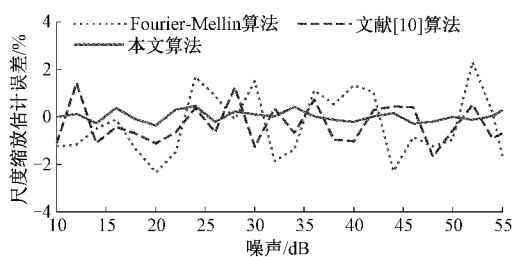


图5 尺度缩放估计误差

从图 3~5 的结果可以看出,由于受高斯噪声的影响,采用 Fourier-Mellin 算法得到的平移、旋转和尺度缩放的估计误差均有较大波动,最大估计误差分别达到了 2.45 pixel, 0.86° 和 2.35%,从而会严重影响最终的配准精度;采用文献[10]的方法得到的平移旋转和尺度缩放的估计误差波动较小,最大估计误差也分别达到了 1.52 pixel, 0.58° 和 1.67%,也会对配准结果产生较大的影响;而采用本文算法得到的平移、旋转和尺度缩放因子的估计误差波动均非常小,最大估计误差分别仅为 0.58 pixel, 0.19° 和 0.36%,说明随噪声的增强而不会使估计误差出现较大波动,即配准过程中受噪声的影响很小,具有更强的适应性和鲁棒性,能够得到较高精度的配准结果。

3.3 配准精度定量分析

本文通过均方根误差^[17]和相关峰置信度^[18]对配准的效果和正确性进行定量评价。其中,均方根误差可以表征配准的效果,其值越小说明配准图像跟原始图像的差异越小,即配准的精度就越高。本文对相关峰置信度进行归一化处理,其数值越大,说明配准的结果越精确。同样,在不同强度噪声影响下,对采用上述 3 种算法配准的图像求解出均方根误差和归一化相关峰置信度,得到的结果分别如表 1 和 2 所示。

表1 均方根误差

噪声/dB	Fourier-Mellin	文献[18]	本文算法
10	2.772	2.468	2.153
15	2.779	2.474	2.164
20	2.788	2.479	2.169
25	2.802	2.487	2.178
30	2.821	2.499	2.185
35	2.849	2.512	2.194
40	2.885	2.536	2.206
45	2.930	2.568	2.225
50	2.986	2.605	2.231
55	3.074	2.647	2.239

通过表 1 的数据可以看出,在相同的噪声影响下,采用本文算法配准得到图像的均方根误差与 Fourier-Mellin 算法和文献[10]算法相比,均始终保持着较小值,说明采用本文算法配准后的图像与原始图像具有较小的差异,即配准精度更高。另外,随着加入噪声强度的增大,3 种算法下的均方根误差均有增大的趋势,但本文算法的增大幅度最小,说明本文算法受噪声的影响较小,具有更强的适应性和鲁棒性。

通过表 2 的数据也可以看出,随着加入噪声强度的增大,在 Fourier-Mellin 算法和文献[10]的算法下,相关峰置信度值会急速下跌,说明噪声严重影响到了配准的正确性,主要是由于在归一化互功率谱的中心出现了多个相关峰,

表 2 归一化相关峰置信度

噪声/dB	Fourier-Mellin	文献[18]	本文算法
10	0.914	0.932	0.958
15	0.910	0.929	0.955
20	0.906	0.925	0.952
25	0.901	0.920	0.948
30	0.894	0.915	0.944
35	0.881	0.909	0.939
40	0.868	0.899	0.935
45	0.854	0.888	0.931
50	0.835	0.875	0.926
55	0.812	0.862	0.921

且峰值与理论峰值大小相当,所以会导致配准精度不高;而在本文方法下,在噪声的变化中相关峰置信度值变化不大,说明加入的噪声对配准正确性的影响不大,主要由于本文方法算法仅在理论峰值位置出现一个明显、干净的相关峰值,且归一化互双谱的相关峰等价于图像间的相位差,由此得到的相位信息不受高斯噪声的影响,即在高斯噪声的干扰下仍能够得到较为精确配准参数,从而使配准精度得到了大幅提升。

4 结 论

为了能够在噪声影响下依然可以对图像进行更加精确的配准,本文提出了一种基于高阶累计量的图像配准改进算法,通过对图像作去均值处理,并利用三阶累计量的离散傅里叶变换得到三阶谱,再经过计算得到归一化互双谱,有效抑制了噪声的影响,最后利用傅里叶逆变换得到了精确的平移量、旋转角度和尺度缩放因子。通过对比仿真实验得到如下结论。

1) 本文提出的改进算法对平移、旋转和尺度缩放量的估计更为精确,最大估计误差分别仅为 0.58 pixel, 0.19° 和 0.36%;

2) 采用本文改进算法配准得到图像的均方根误差最小,说明采用本文算法配准后的图像与原始图像具有较小的差异;

3) 采用本文改进算法配准得到图像的归一化相关峰置信度较高,说明加入的噪声对配准正确性的影响不大。

综上所述,采用本文改进算法在对图像配准受噪声变化的影响非常小,具有较强的鲁棒性,可以获得更精确的配准结果。虽然本文算法对含有噪声图像的配准有显著效果,但实际上采集图像时还会受到其他因素的影响,如:采集倾斜角度、光照不均匀和局部被遮挡等各种情况,在接下来的研究中将针对此类问题,对基于高阶累计量的配准方法进行深入的研究,以便使其具有更优的适应性。

参考文献

[1] 申伟,石平. 单演信号随机加权融合的 SAR 图像目标识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):

181-187.

- [2] 刘忠强,钟涛,曹晓欢,等. 基于组织修复的脑肿瘤图像配准方法[J]. 南方医科大学学报, 2021, 41(2): 292-298.
- [3] 孙艳丽,周伟,张亚周,等. 基于 SIFT 的航空侦查图像拼接算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19):112-116.
- [4] 唐颖复,王忠静,张子雄. 基于改进 SIFT 和 SURF 算法的沙丘图像配准[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(2):161-169.
- [5] LIU T, ZHANG X G, WANG Y X, et al. Sonar image registration and mosaic based on line detection and triangle matching [J]. Instrumentation, 2020, 7(2):20-35.
- [6] 李帮娜,贺兴时,贺飞跃. 基于 SAR-SIFT 和快速稀疏编码的合成孔径雷达图像配准[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2021, 34(1):34-41.
- [7] 孙明超,马天翔,宋悦铭,等. 基于相位特征的可见光和 SAR 遥感图像自动配准[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3):616-627.
- [8] 雷超阳,刘军华,李桥. 基于 Fourier-Mellin 变换的医学图像配准算法[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2017, 38(1):28-35.
- [9] 高东阳,刘亚琼. 基于投影变换与 Fourier-Mellin 变换结合的图像配准[J]. 现代测绘, 2017, 40(6):19-22.
- [10] 袁恒,柏财勋,许逸轩,等. 快速高精度 Fourier-Mellin 变换图像配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8):231-239.
- [11] 康国华,张琪,张晗,等. 基于点云中心的激光雷达与相机联合标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):118-126.
- [12] 王福斌,王宜文,王尚政. 微尺度目标的图像拼接与测量[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2020, 42(4):117-124.
- [13] 汪鹏,金立左. 基于 Canny 边缘 SURF 特征的红外与可见光图像配准算法[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(4):64-65.
- [14] 周玫君,赵辽英,厉小润. 一种高精度的亚像素级图像配准算法[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2020, 40(5):67-72.
- [15] 范雪婷,赵朝贺,潘九宝,等. 改进尺度不变特征变换算法的图像配准[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(5):1185-1190.
- [16] 周全,于志强. 基于生物地理学优化算法的医学图像配准[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2020, 29(6):614-618.
- [17] 王珊,王春阳. 基于特征点匹配的三维点云配准算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12):23-28.
- [18] 孙红辉,王红霞,李爱君. 功率谱处理技术在图像相关识别中的应用[J]. 应用物理, 2020, 10(9):399-407.

作者简介

曹萌萌,硕士,讲师,主要研究方向为计算机应用与人工智能。

E-mail:caomm81@126.com