

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.02.011

基于 SIFT 算法的可见光宽带光谱图像配准方法研究

梁金星, 万晓霞, 刘 强

(武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 针对颜色与影像科学领域的可见光宽带光谱成像中存在的图像像素偏移问题, 提出了基于 SIFT 算法的可见光宽带光谱图像配准方法。先利用 SIFT 算法提取图像特征点, 再通过 k - d 树最近邻方法对特征点进行匹配, 利用欧氏距离约束方法剔除错误匹配点, 最后, 利用均匀采样方法解决 SIFT 特征点容易聚集的问题, 得到最优配准结果。在可见光宽带光谱图像配准实验中, 基于均匀采样方法确定的最优配准结果与未经采样处理匹配点集的配准结果相比, 配准之后的互信息值得到了显著提高。

关键词: 可见光宽带光谱成像; 图像配准; SIFT 算法; 均匀采样

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)02-0057-07

Research on Visible Broadband Spectral Image Registration Method Based on SIFT Algorithm

Liang Jinxing, Wan Xiaoxia, Liu Qiang

(Department of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To resolve the image shift problem of visible broadband spectral imaging in the field of color and imaging science, an improved image registration method based on Scale-invariant feature transforms (SIFT) algorithm is proposed. Firstly, the feature points are extracted by the SIFT algorithm. Secondly the feature points are matched by the nearest-neighbor rule of the k - d tree, and the euclidean distance is adopted to delete the false matching points. Finally, a uniform sampling method is applied to resolve the problem of SIFT feature points easy to gather and the optimal registration result is obtained. In the visible broadband spectral imaging registration test, the optimal registration result based on the uniform sampling method is compared to the result without sampling processing match points set, the former mutual information value is improved remarkably.

Keywords: visible broadband spectral imaging; image registration; SIFT algorithm; uniform sampling

0 引言

为克服 3 通道 RGB 数码相机同色异谱问题, 德国亚琛工业大学 B. Hill 等提出利用物体表面的光谱信息表征物体的真实颜色, 通过光谱成像技术对物体表面颜色进行高保真采集^[1]。在颜色与影像科学领域, 光谱成像技术主要包括 2 种方式: 一是由窄带滤光片

或窄带光源配合光电记录元件组成窄带光谱成像系统, 记录可见光范围内多个波段点的光谱反射率信息, 再利用插值算法完成光谱反射率的重建^[2]; 另一方法是由宽带滤光片配合 RGB 数码相机组成宽带光谱成像系统, 将滤光片顺序地放置于数码相机光路中拍摄, 组合获得物体的多通道图像, 再利用

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275172), 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2012CB725302)

作者简介: 梁金星(1989-), 男, 山东菏泽人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为光谱图像获取技术和数字图像处理,

E-mail: jxliang@whu.edu.cn

光谱重建算法计算得到物体表面的光谱反射率^[3]。后一种方法只需对 RGB 数码相机进行简单改造就能完成多光谱图像的获取,因此应用较为广泛,尤其是对文化遗产及博物馆艺术品的高保真数字化采集工作等^[4]。然而在实际条件下,由于系统本身的不稳定性以及不同型号滤光片本身厚度、折射率和非理想共面等因素存在,导致不同滤光片对应的数字图像之间存在几何偏移,给图像融合以及光谱重建带来了一定程度的误差,造成融合图像存在模糊和彩色条纹等问题,降低了光谱成像的精度,因此需要对图像几何偏移进行校正,可通过图像配准的方法消除图像间几何偏移误差。

S. Helling 等^[5]通过基于图像相关性分析的区域匹配方法完成了由 7 个滤光片构成的滤光片轮与单色 CCD 组成的多光谱相机的图像配准工作,但由于对多光谱相机获取的图像的偏移变形缺乏先验知识指导,配准的效果并不理想。V. Cappellini 等^[6]提出一种基于启发式搜索参数模型的自动配准方法,但由于缺少图像偏移的物理模型支撑和对色相差影响因素的分析,图像配准的效果也不理想。J. Brauers 等^[7]对由 7 个滤光片组成的滤光片轮配合单色 CCD 建立的多光谱相机的配准方法进行了深入研究^[7],首先对多光谱相机系统存在的几何偏移进行了分析和物理表征,建立图像基本的几何偏移物理模型,然后根据建立的模型设计合适的图像配准算法。该方法虽然取得了较为理想的效果,但对于多光谱相机的物理建模以及对滤光片光学效应和图像几何偏移的标定工作较为复杂,在不同的拍摄条件下,多光谱相机系统自身特性都存在微小变化,每次拍摄前都需对多光谱相机进行重新标定,并经过 6 次配准获得多光谱图像,工作量十分巨大。R. S. Berns 等^[3]对高分辨率 3 通道 RGB 数码相机进行改造,配合 2 个宽带滤光片组成 6 通道宽带多光谱相机,仅需一次配准即可进行光谱重建工作。虽然相对于 J. Brauers 等所提方法,该方法降低了图像的配准误差。但是,在拍摄多通道图像时需要手动更换相机光路的中带通滤光片,受滤光片和人为导致的物理震动等因素干扰,拍摄获得的 3 通道图像间同样存在几何偏移。而 R. S. Berns 等仅通过 Photoshop 等软件进行简单的图像配准,效果并不理想,因此有必要对几何偏移类型进行分析,用合适的图像配准方法来消除图像间几何偏移误差。

本课题组以 6 通道宽带光谱相机为研究对象。首先,对造成图像间几何偏移的因素进行分析,确定造成图像偏移的类型和阈值范围;然后,根据图像

偏移的类型和阈值范围,提出可行的图像配准方法;最后,将均匀采样方法确定的最优配准结果与未经采样处理匹配点集的配准结果进行比较。实验结果表明,本方法能有效地对可见光宽带光谱图像进行配准。

1 可见光宽带光谱图像的偏移类型分析

6 通道宽带光谱相机如图 1 所示。它是由 RGB 3 通道高分辨率数码相机配合 2 个宽带滤光片组成。该数码相机从 2 个方面进行了改造:

1) 数码相机光路中的内置红外截止滤光片 BK7 被移除,用可见光透过范围更加宽广的红外截止滤光片 SP785 代替,从而增加进入相机内的可见光范围,提高光谱相机记录的可见光信息成分;

2) 在数码相机的电子快门外侧设置了 2 个滤光片卡槽,方便在相机光路中加载红外截止滤光片 SP785 和其他待用滤光片。

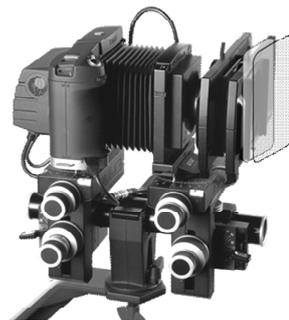


图 1 6 通道光谱相机

Fig. 1 Six-channel spectral camera

在拍摄物体的光谱图像时,先将 SP785 红外截止滤光片放置于电子快门外侧 2 个卡槽的里侧,然后依次手动加载和更换其他型号的 2 个滤光片,获得每个滤光片对应的 3 通道图像,融合组成 6 通道图像,通过光谱重建方法得到拍摄对象的高维光谱图像。但在实际拍摄条件下获得的 2 幅 3 通道图像中对应的特征点不能完全重合,2 幅图像间存在与图 2 类似的像素偏移现象。因此,本课题组通过试验分析了光谱图像的像素偏移情况。先将包含 27 个型号的滤光片库进行组合,产生 351 组滤光片组合,利用这些滤光片组合获得相应的 6 通道图像。试验结果表明通过 351 组滤光片组合获得的 3 通道图像均存在像素偏移现象,每组滤光片组合所获得的图像的像素偏移范围最大可达 ± 6 个像素,且不同滤光片组合所获得的图像的像素偏移情况也各不相同。利用 BG39+GG475 滤光片组获得的 2 幅图像的图像偏移情况如图 2 所示。像素偏移可分为以下 3 种情况:1) 像素的上下

左右平移; 2) 像素相对位置的旋转偏移; 3) 以图像中心为参考点的像素相对位置径向缩放。

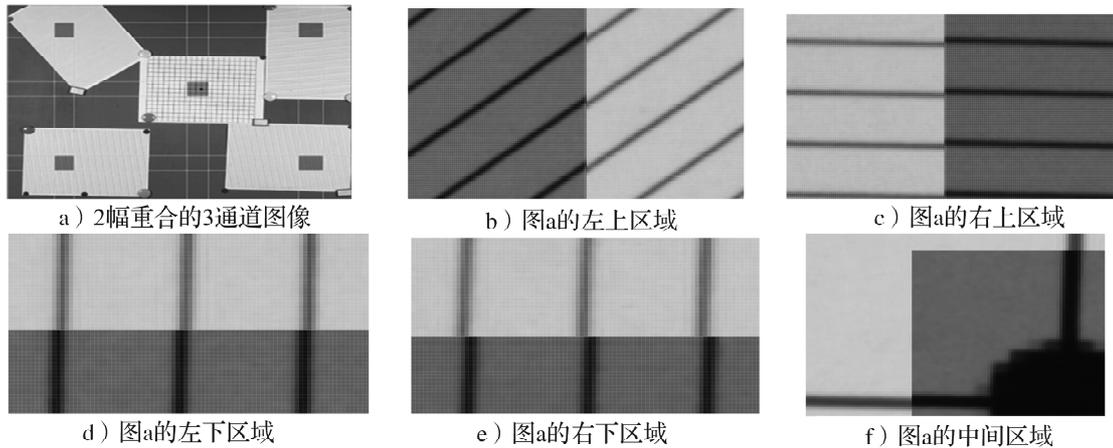


图2 一组滤光片(BG39+GG475)获得的2幅3通道图像间的像素偏移情况

Fig. 2 Pixel shift conditions between two three-channel images of filters BG39+GG475

导致上述3种像素偏移现象的产生, 有多种原因: 滤光片的厚度、折射率以及非理想平面; 光谱相机的镜头畸变; 实际拍摄过程中, 加载或更换的滤光片平面并未理想地垂直于相机光轴; 更换滤光片时, 使光谱相机绕光轴发生微小旋转等。虽然上述因素在实际拍摄过程中难以察觉, 但对于具有超高分辨率的CCD(charge-coupled device)数码后背来说, 这些因素导致的图像间像素的物理偏移已经被放大记录下来, 在图像融合和光谱重建之前若不对这些像素偏移进行校正, 会严重影响最终得到的光谱图像的正确性。

以6通道宽带光谱相机的结构简图(图3)为例, 对上述引起图像间像素偏移的因素进行详细说明。

1) 滤光片存在差异。不同的滤光片在折射率、厚度和表面平行度方面存在微小差异, 而这些差异将导致从被拍摄物体表面反射出来的光线经过滤光片折射后, 其传播方向和到达CCD的光程发生改变, 因此, 被拍摄物体表面的同一像素点经过不同的滤光片之后, 投射到CCD响应平面的不同坐标处, 产生像素偏移误差。不同的滤光片造成的这种像素偏移各不相同。

2) 光谱相机的镜头不理想。数码相机的镜头为凸透镜。而在凸透镜的制造过程中, 并不能得到完全理想的凸透镜, 越是靠近镜头边缘的部位, 透光特性差异性越大。因此, 经过滤光片的光线通过镜头后, 在CCD响应平面会产生径向偏移, 造成图像像素间的径向缩放偏移误差。

3) 加载或更换的滤光片平面未完全垂直于相机中心光轴。在实际拍摄过程中, 无法保证加载或更换的滤光片平面完全垂直于相机中心光轴。因此, 相对于理想垂直于相机中心光轴的位置, 加载到卡槽

中的滤光片位置(见图3中的虚线)发生向左向右, 或绕垂直于光谱相机中心光轴的竖直线发生正向逆向一定角度的偏转。这造成被拍摄物体表面的同一像素点经过不同的滤光片之后, 投射到CCD响应平面的不同坐标处, 或者在不同拍摄条件和时段下, 被拍摄物体表面的同一像素点经过相同的滤光片之后, 投射到CCD响应平面的不同坐标处, 产生像素偏移误差。

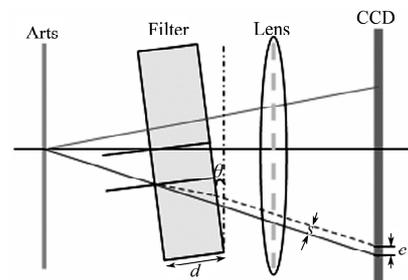


图3 6通道宽带光谱相机结构简图

Fig. 3 The structure diagram of the six-channel spectral camera

由以上分析可知, 不同的拍摄条件和时段下, 光谱相机系统各部件自身因素和人为操作因素都会引起并不固定的图像之间的偏移差异, 因此很难以一个参数固定的模型表征这种差异。但通过上述分析可以确定, 图像之间的偏移变形主要表现为平移、旋转和缩放。

2 配准方法介绍

本研究中, 图像配准的目的是通过特定的算法将待配准图像准确的配准到参考图像, 从而消除图像间的像素偏移。图像配准技术在遥感、医学和计算机视觉等领域已经发展比较成熟, 是医学图像分析、遥感图像分析、图像融合、检索以及目标识别

的基础^[8-9]。目前,图像配准方法主要分为3类。

1) 基于灰度的图像配准方法。该类方法是通过计算参考图像与待配准图像之间的模板区域内像素灰度差值来配准图像,灰度差值最小的是相同部分^[9]。该类方法简单直观,但计算量较高,且对目标亮度变化、旋转、变形、色彩差异以及尺度变化较为敏感,并不适用于可见光宽带光谱图像间的配准。

2) 基于图像解释的配准方法^[10]。该类方法将图像理解为一个可以被连续采样的物理模型(如弹性模型、光流场模型或热流场模型等),利用物理模型建立图像间的对应关系,以完成图像配准工作。但是,该类方法涉及到计算机视觉、模式识别、人工智能等众多领域,尚不成熟。

3) 基于特征的图像配准方法。该类方法首先从图像中提取含有图像重要特征信息的特征(点、线、面),然后通过相似性度量进行图像间特征的匹配。其中,基于不变特征(scale invariant features transformation, SIFT)的图像配准方法能够提取目标中对平移、旋转、尺度变换以及图像亮度变化具有不变性的特征点^[11],具有较高的鲁棒性,可以较好地应用于本研究的图像配准工作中。

根据可见光宽带光谱图像的偏移特点以及各类配准算法的优缺点,本文采用基于SIFT特征提取的图像配准方法,并根据其在文中的具体应用对其进行改进。由于高分辨率的光谱相机获得的图像数据量通常较大,处理过程中对计算机内存要求较高,为此对获得的3通道图像在灰度化和去噪处理之后进行降采样处理,获得降采样之后的SIFT特征点集,并对匹配之后的特征点集进行升采样,获得匹配特征点在原图像中的坐标位置,进行配准计算。此外,由于SIFT算法对图像噪声较为敏感,光谱相机在拍摄过程CCD中会因光电效应和热流子现象产生随机噪声,这些点不可作为图像配准时特征点,因此在提取图像特征点之前需要进行去噪声处理。算法具体步骤(见图4)如下。

1) 对参考图像进行灰度化、去噪声处理。

2) 对图像进行降采样,并利用SIFT算法提取图像的尺度不变特征点。

3) 利用基于 k - d 树的最近邻方法对特征点进行匹配,并对匹配点进行坐标升采样处理,获得匹配点在原图像中的坐标位置。

4) 根据统计的图像像素偏移阈值范围,利用匹配点之间的欧式距离对错误匹配点进行约束,获得正确的匹配点集。

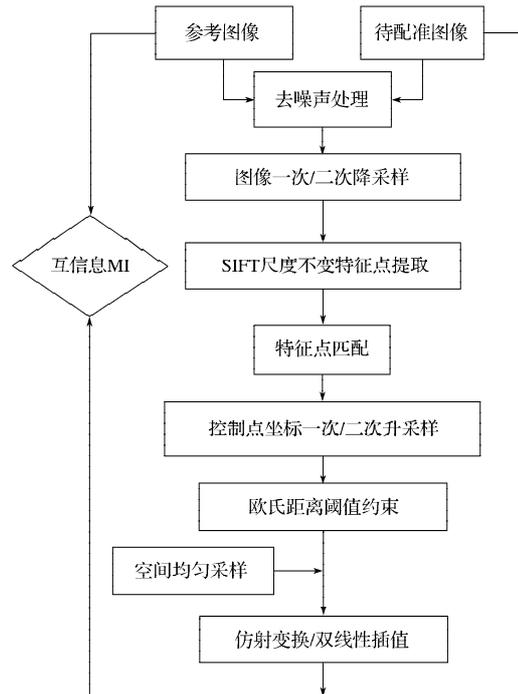


图4 可见光宽带光谱图像配准方法流程图

Fig. 4 Flowchart of visible broadband spectral image registration method

5) 挑选3对匹配点之后,每次增加一对匹配点,对匹配点集进行均匀采样,计算采样匹配点集对应的仿射变换矩阵,结合双线性插值算法对待配准图像进行仿射变换,计算基准图像与配准后图像互信息值(mutual information, MI),互信息最大的一组确定为最优配准图像。由于在颜色及影像科学领域视图像的整体质量为首要品质,故本研究采用互信息值MI作为配准的评价指标。

利用SIFT算法提取图像不变特征点和利用基于 k - d 树的最近邻方法对特征点进行匹配,在多个研究^[12-13]中已有详细说明,故本文在此不详述。下面对升采样之后,匹配点集的欧式距离约束方法及均匀采样方法进行说明。

假设经过基于 k - d 树的最近邻方法对基准图像和参考图像提取SIFT特征点进行匹配后,共得到 M 对匹配点, $\mathbf{P}_{\text{base},i}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{warp},i}$ ($i=1,2,\dots,M$)分别为基准图像和待配准图像的匹配点集二维空间坐标矩阵。对应匹配点之间的欧式距离可以表示为

$$\text{dist}(i) = \|\mathbf{P}_{\text{base},i} - \mathbf{P}_{\text{warp},i}\|_2 \quad (1)$$

设基准图像和待配准图像的像素最大偏移阈值为 T 。约束之后,得到 $N(N < M)$ 对匹配点,即

$$\text{dist}(j) = (\text{dist}(i) \leq T), j=1,2,\dots,N. \quad (2)$$

此时,基准图像和待配准图像匹配点集的二维空间坐标矩阵分别为 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{warp},j}$ 。

以基准图像的匹配点集坐标矩阵 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 为对象, 进行均匀采样。首先选择 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 中具有最大方差的匹配点作为第一个空间均匀匹配点, 同理从 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 中选择其他匹配点作为空间均匀匹配点。匹配点集 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 的最大方差式为

$$S_1 = \max_{\mathbf{P}_{\text{base},j}} \text{VAR}(\mathbf{P}_{\text{base},j}), j=1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中 $\text{VAR}(\mathbf{P}_{\text{base},j})$ 为基准图像匹配点集坐标矩阵 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 的方差。

剩余空间均匀匹配点的选择也是遵循使当前挑选的匹配点与距离自身最近的已选匹配点的欧式距离最大化原则。设从匹配点集 $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 中已经选择了 m ($m < N$) 个空间均匀匹配点, $\mathbf{P}_{\text{base},j}$ 中剩余 $N-m$ 个匹配点。利用式 (4) 计算剩余 $N-m$ 个匹配点的欧氏距离指标矩阵 \mathbf{Q}_k 阵维度为 $1 \times (N-m)$, 即

$$\mathbf{Q}_k = \min_{l=1}^{k-1} \mathbf{D}_{k,l}^T, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{D}_{k,l}$ 为在二维坐标空间中剩余匹配点中的第 k ($k=1, 2, \dots, N-m$) 个匹配点与已选空间均匀匹配点中的第 l ($l=1, 2, \dots, m$) 个匹配点之间的欧式距离矩阵, 维度为 $(N-m) \times m$ 。

选定矩阵 \mathbf{Q}_k 的最大值作为第 $m+1$ 个空间均匀匹配点, 即

$$S_{m+1} = \max_{\mathbf{Q}_k} (\mathbf{Q}_k). \quad (5)$$

算法简图如图 5 所示。

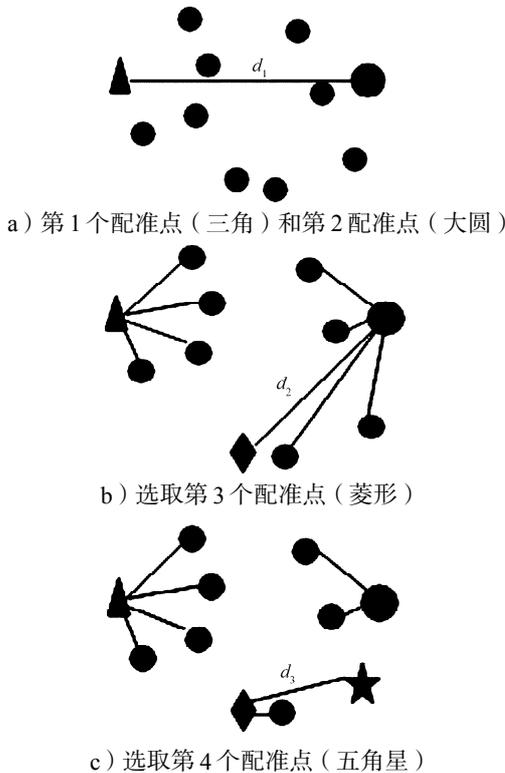


图5 均匀采样方法示例

Fig. 5 Examples of uniform sampling method

互信息值是指 2 个变量统计相关性的一种度量, 被广泛应用于多种图像配准中^[41]。因此, 利用互信息值对空间均匀匹配点集对应的配准结果进行评价, 它是图像配准的关键步骤。最大的互信息值对应最好的配准结果。对于给定的基准图像 X 和待配准图像 Y , 它们之间的互信息值可通过式 (6) 计算得到。

$$MI(X, Y) = H(X) + H(Y|X) = H(X) + H(Y) - H(X, Y), \quad (6)$$

$$\text{式中: } H(X) = -\sum_{x=X} p(x) \log p(x),$$

$$H(Y) = -\sum_{y=Y} p(y) \log p(y),$$

$$H(X, Y) = -\sum_{x=X} \sum_{y=Y} p(x, y) \log p(x, y),$$

其中, $p(x)$ 和 $p(y)$ 分别为基准图像 X 和待配准图像 Y 的灰度概率分布, $p(x, y)$ 为图像 X 和图像 Y 的灰度值的联合概率密度。

3 实验结果分析

为验证本文所提可见光宽带光谱图像配准方法的有效性, 采用瑞士 Sinar 公司生产的 Sinarback eVolution 75H 彩色滤光片阵列数码相机、Sinaron Digital HR 4.0/100 CAB 数码镜头, 和 Dalsa 公司生产的分辨率为 4992 像素 \times 6668 像素的 FTF5066 自制冷 CCD 传感器。按照第 2 章介绍的改造方式搭建了 6 通道宽带光谱相机系统 (见图 1), 宽带光谱成像的可见光透过范围为 $360 \sim 800$ nm。再从 27 个带通滤光片中随机挑选 2 个滤光片 BG39 和 GG475, 拍摄了 2 幅 3 通道图像, 如图 6 所示。

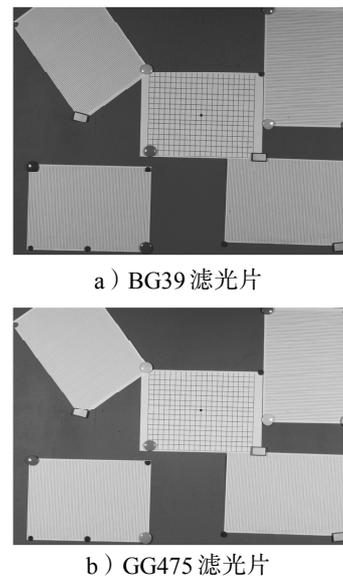


图6 利用6通道宽带光谱相机拍摄获得的2幅3通道图像
Fig. 6 Two three-channel images captured by six-channel spectral camera

图像配准前, 2幅图像之间的像素偏移情况见图2。从图2可以看出, 2幅图像的像素间存在平移、缩放以及微小旋转。

2幅图像配准的具体流程如下。

1) 图像预处理。先将通过滤光片BG39获得的3通道图像作为基准图像, 将通过滤光片GG475获得的3通道图像作为待配准图像, 再分别对这2幅图像进行灰度化和去噪声处理。

2) 特征点匹配。对图像进行2次隔行降采样, 获得分辨率为1 248像素 \times 1 667像素的灰度图, 利用SIFT算法提取图像的不变特征点并构造描述算子, 采用基于k-d树的最近邻算法对特征点进行匹配(以0.6作为最近距离除以次近距离比例接受阈限)。

3) 剔除错误匹配点。对匹配点坐标进行升采样等处理, 利用限定阈值的欧式距离对匹配点进行约束, 剔除错误匹配点。根据统计的像素偏移结果, 约束阈值 T 取6个像素距离, 处理数据如表1所示。经过约束和坐标升采样处理之后的84个匹配点分布如图7(图中所有点)所示。从图7可知, 经过阈值约束后的匹配点(图中圆点表示)分布于原图像的各个部分, 总体分散性较好, 但在有些区域匹配点比较聚集。若将全部的匹配点用于仿射变换参数的求解, 则比较集中的匹配点对变换参数的影响较大, 这不利于图像全局配准。因此, 需对匹配点集进行均匀采样。

表1 图像的SIFT特征点、匹配特征点和约束后匹配特征点个数

Table 1 The number of SIFT points, matching points and matching points under constrained

SIFT特征点		匹配特征点	约束后的匹配特征点
基准图像	待配准图像		
1 620	1 434	159	84

4) 图像全局配准。均匀采样中, 采样个数影响最终的配准精度, 合适的采样个数才能保证图像的高质量配准, 因此, 本文选取3~84个匹配点均匀采样。对匹配点集进行均匀采样后, 再利用空间均匀分布的匹配点集求解图像仿射变换参数, 对图像进行全局配准。计算每个采样数目下配准图像的互信息值, 将互信息值最大的一组作为最优匹配点集, 对应最高的图像配准精度。不同均匀采样数目下的互信息值分布如图8所示。在图8中, 水平虚线表示配准前基准图像与待配准图像的互信息值, 为2.191 3。由图可知, 当采样数为20个时, 配准图像的互信息值达到最大, 为2.379 4(图中垂直虚线表示), 此时达到最佳配准效果。相应的均匀采样坐标分布如图

7中白色方形点所示。

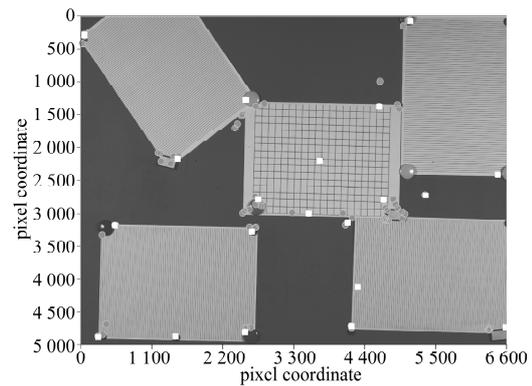


图7 经阈值约束的匹配点(圆圈)与均匀采样之后(白色方形)的分布情况

Fig. 7 Distribution of matching points after threshold constraint (circle) and space uniform sampling (white square)

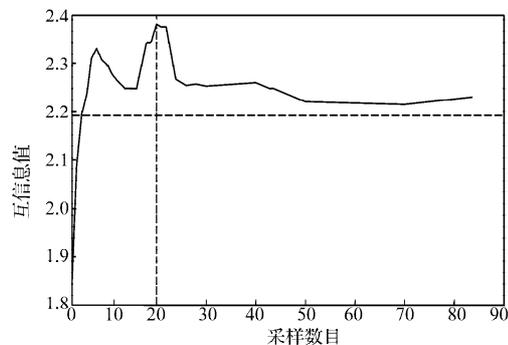


图8 不同均匀采样数目下的互信息值分布

Fig. 8 Distribution of the MI in different space uniform sampling numbers

为验证本配准方法的优越性, 本文将图像配准前、均匀采样20个匹配点的最优配准结果与利用约束后得到的84个匹配点的配准结果进行比较, 其相应的图像配准互信息值如表2所示。

表2 84个配准点集与均匀采样20的最优配准点集的图像配准互信息值

Table 2 Mutual information values of the registration image using 84 matching points and the uniform sampling optimal 20 matching points

配准前	84个配准点集	均匀采样20最优配准点集
2.191 3	2.228 9	2.379 4

由表2中配准结果可知, 相对于配准前的图像互信息值, 将本文所提的均匀采样方法和约束后得到的84个匹配点进行图像匹配方法相比, 前者配准互信息值提高幅度0.188 1, 后者配准互信息值提高幅度0.037 6, 提高幅度前者约是后者的5倍。

表3为图像配准前、84个匹配点集配准以及均匀采样20个的最优匹配点配准下, 图像的左上、右上、左下、右下以及中间部分配准效果。表3中的配准结果从视觉效果可知, 使用本文的均匀采样方法得到

的最优配准图像在整体上都有好的配准结果;而采用约束后得到的84个匹配点的配准图像仅在右上和右下部分具有较好的配准结果,在其他部分的配准结果都不理想。

综上所述,利用本文所提的可见光宽带光谱图像配准方法得到的图像配准效果较好。

表3 84个匹配点集配准和均匀采样20的最优匹配点集配准结果比较

Table 3 The registration results comparison between using 84 match points and the uniform sampling optimal 20 matching points

方位	配准前	84个配准点集	均匀采样20最优配准点集
左上			
右上			
左下			
右下			
中间			

4 结语

针对可见光宽带光谱图像的偏移类型和阈值范围,提出了一种基于SIFT算法改进的可见光宽带光谱图像配准方法。采用匹配点之间的欧式距离作为约束策略,进一步去除了基于 k -d树的最近邻匹配集中的错误匹配点,通过对正确匹配点进行均匀采样,并以图像互信息作为评价指标来确定最优采样点集,从而获得最优的图像配准效果,其中,匹配点集欧式距离约束的阈值根据不同拍摄系统可调。实验结果表明,本文所提的基于SIFT算法的可见光宽带光谱图像配准方法具有较高的配准精度,能应

用于可见光宽带光谱图像的配准工作中。

参考文献:

- [1] Liang H. Advances in Multispectral and Hyperspectral Imaging for Archaeology and Art Conservation[J]. Applied Physics A, 2012, 106(2): 309-323.
- [2] Shrestha R, Hardeberg J Y. Multispectral Imaging Using LED Illumination and an RGB Camera[C]//Color and Imaging Conference. [S. l.]: Society for Imaging Science and Technology, 2013, 2013(1): 8-13.
- [3] Berns R S, Taplin L A, Nezamabadi M, et al. Practical Spectral Imaging Using a Color-Filter Array Digital Camera [J/OL]. Studies in Conservation, 2006: 1-30. [2015-01-12]. <http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/reports.php>.
- [4] Berns R S, Byrns S, Casadio F, et al. Rejuvenating the Color Palette of Georges Seurat's A Sunday on La Grande Jatte — 1884: A Simulation[J]. Color Research & Application, 2006, 31(4): 278-293.
- [5] Helling S, Seidel E, Biehlig W. Algorithms for Spectral Color Stimulus Reconstruction with a Seven-Channel Multispectral Camera[C]//Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision. [S. l.]: Society for Imaging Science and Technology, 2004, 2004(1): 254-258.
- [6] Cappellini V, Del Mastio A, De Rosa A, et al. An Automatic Registration Algorithm for Cultural Heritage Images[C]//IEEE International Conference on Image Processing. [S. l.]: IEEE, 2005, 2. doi:10.1109/ICIP. 2005. 1530118.
- [7] Brauers J, Aach T. Geometric Multispectral Camera Calibration[J]. Image Analysis, 2009, 5575: 119-127.
- [8] Han J, Pauwels E J, De Zeeuw P. Visible and Infrared Image Registration in Man-Made Environments Employing Hybrid Visual Features[J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(1): 42-51.
- [9] Zitová B, Flusser J. Image Registration Methods: A Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [10] Fonseca L F, Hewer G A, Kenney C, et al. Registration and Fusion of Multispectral Images Using a New Control Point Assessment Method Derived from Optical Flow Ideas [C]//Aero Sense' 99. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 1999: 104-111.
- [11] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [12] Gao Ting, Xu Yu, Xu Tingxin, et al. An Infrared and Visible Image SIFT Registration Based on MESR[C]//ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic

(下转第93页)