

结合相位和 SIFT 特征相关的图像自动配准算法

马超杰^{1,2}, 关平¹, 李瑞旺¹

(1. 武警指挥学院作战指挥系, 天津 300350; 2. 电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:提出一种鲁棒性较好的图像配准算法解决乱序输入图像序列自动拼接问题。首先为输入图像建立多分辨率金字塔,在较低分辨率图像层上进行相位相关区域搜索;接着对得到的相关区域进行 SIFT 特征相关验证,得到图像序列的配准关系和透视变换矩阵的初步估计;然后结合估计参数对原始图像的 SIFT 特征再次进行相关匹配,最终实现图像序列变换参数的精确求解。该算法结合相位相关和 SIFT 特征相关两种配准算法的优点并应用由粗到精的匹配策略提高了图像配准的速度和稳定性。

关键词:图像自动配准;相位相关;SIFT 特征;对数极坐标变换

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Image automatic mosaic method based on phase and SIFT feather correlation

MA Chao-jie^{1,2}, GUAN Ping¹, LI Rui-wang¹

(1. Combat Command Department of CAPF Command Institution, Tianjin 300350, China;

2. Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In this paper, a robust image alignment algorithm is presented for solving disorder sequential images' mosaic problem. Firstly, input images' multi-resolution pyramids are constructed, and phase-correlation sub area pairs are searched in the low resolution layer. Then, these area pairs' SIFT feathers are cross-correlated to verify the matching situation, input images' matching relation and each projective transformation matrix are initially estimated. Finally, the matched original images' SIFT feathers are cross-correlated again for exactly solving the transformation parameters. Phase-correlation method and SIFT feather correlation method are combined in this algorithm, and the multi-resolution method is also applied. So, the velocity and stability of image alignment operation are optimized by this algorithm.

Key words: image automatic mosaic; phase correlation; SIFT feather; log-polar coordinate transformation

1 引言

图像配准是图像拼接重要核心技术之一。目前配准算法大致分为灰度特征匹配和频域特征匹配两类^[1-2]。图像灰度特征多采用 Harris、SUSAN、MS-ER 和 SIFT 等特征点来描述,其中 SIFT^[3]虽具有较好的鲁棒性,但计算量较大且基于局部灰度分布的固有属性无法避免误匹配。图像频域特征匹配应用图像频谱相位相关特性推测图像间平移关系,随后开发出的结合对数极坐标变换的扩展相位相关可以

快速估计出图像间匹配关系及相应缩放、旋转和平移(RST)参数,但参数精度受限于坐标变换精度^[4]。

本文结合相位相关和 SIFT 特征相关两种图像配准算法的优点,设计出一种针对乱序输入图像序列的高效稳定图像序列自动配准算法。

基金项目:安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(No. 2007A011011F)资助。

作者简介:马超杰(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为光电工程。E-mail: coolwinterman@163.com

收稿日期:2010-10-30; **修订日期:**2010-12-14

2 基于相位相关的图像匹配算法

相位相关在频域利用图像频域整体结构信息得到一个比较可信的粗匹配结果,并且对于图像色调改变、加性噪声污染、目标区域部分遮挡等情况具有很强的鲁棒性和比较强的实用性^[5]。

设 $I_1(x, y)$ 为参考图, $I_2(x, y)$ 为经仿射变换 $T(\theta_0, c, (a, b))$ 后图像。 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别为对应的二维傅里叶变换。表达关系如下所示:

$$I_2(x, y) = I_1(cxcos\theta_0 + cysin\theta_0 - a, -cxsin\theta_0 + cycos\theta_0 - b) \quad (1)$$

$$F_2(u, v) = \frac{e^{-j(ua+vb)}}{c^2} F_1\left(\frac{ucos\theta_0 + vsin\theta_0}{c}, \frac{-usin\theta_0 + vcos\theta_0}{c}\right) \quad (2)$$

结合 $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$, $\theta = \arctan(u/v)$ 对数极坐标变换,将函数所在的空间由笛卡儿空间 (x, y) 投影到对数-极坐标空间 $(\log(r), \theta)$:

$$|F_2(\rho cos\theta, \rho sin\theta)| = |F_1(\rho cos(\theta - \theta_0)/c, \rho sin(\theta - \theta_0)/c)| \quad (3)$$

记 $M_i(\xi, \theta) = |F_i(\rho cos\theta, \rho sin\theta)|$ $i = 1$ or 2 , $\xi = \log\rho$, $\xi_0 = \log c$, 将函数图像的旋转角度和缩放因子变为对数-极坐标空间的加减运算:

$$M_2(\xi, \theta) = M_1(\xi - \xi_0, \theta - \theta_0) \quad (4)$$

因此,图像间的仿射变换参数求解转化为两次图像平移参数求解。若 $M_2^*(u, v)$ 记为 $M_2(u, v)$ 的共轭功率谱,从而两幅对数-极坐标图像互功率谱为:

$$\frac{M_1(u, v)M_2^*(u, v)}{|M_1(u, v)M_2^*(u, v)|} = e^{j(u\xi_0 + v\theta_0)} \quad (5)$$

对式(5)右边傅里叶逆变换得到 (a, b) 处的一个单位脉冲函数,其位置反映了图像间的相对平移量,即图像间相应的旋转角度 θ_0 和缩放因子 c 。然后将变换图像经过旋转和缩放的逆变换与参考图再进行相位相关计算便可求出平移参数 (a, b) 。

实际情况中由于非重叠区域干扰使得正确匹配峰值的尖锐性有所降低,我们通过子区域搜索策略提高重叠区域在运算面积中的比例,有效提升了相关峰锐度,实现图像序列匹配关系快速判断。

3 基于 SIFT 特征的图像匹配算法

SIFT 算法从空间域和尺度域两个角度进行特征分析,主要分为以下 3 个步骤^[3]:

(1) 检测和定位尺度空间极值点

首先将初始图像 $I_i(x, y)$ 重采样得到一组不同

分辨率的图像 $I_i(x, y)$, 其中 i 为图像序列, s 为分辨率因子。然后应用高斯核 $G(x, y, \sigma_k)$ 卷积,建立多尺度高斯金字塔图像 $L_i^s(x, y, \sigma_k)$ 和多尺度高斯差分(DoG)金字塔图像 $D_i^s(x, y, \sigma_k)$ 。接着在图像空间和尺度相邻空间的 27 个像素内进行极值点检测。最后精确求出特征点位置和尺度。将 DoG 空间函数 $D(x, y, \sigma)$ 在局部极值点附近泰勒展开至 2 次项,设导函数为 0,得特征点偏移量 \hat{X} 和对应极值 $D(\hat{X})$:

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (6)$$

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \frac{\partial D}{\partial X}, D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} \hat{X} \quad (7)$$

去除两类非稳极值点:一类是 $|D(\hat{X})| \leq 0.03$ 的弱特征点;另一类是根据特征点 Hessian 矩阵特征值的比值判断得到的边缘响应点。

(2) 确定特征点主方向并生成特征点描述向量

首先在特征点为中心的邻域窗口内应用梯度方向直方图统计邻域内像素的梯度方向,根据直方图最高峰值点和超过峰值 80% 能量的峰值确定特征点主方向和辅方向。然后将坐标轴旋转为特征点主方向并以特征点为中心选取 16×16 窗口区域建立具有旋转不变性的特征点描述向量:按照 4×4 方式将窗口平分为 16 个子图像块,在每一个子块内计算等间隔量化 8 方向的梯度方向累加直方图,长度归一化后即得到稳定性较好的 SIFT 特征点描述向量。

(3) 特征点对匹配

以特征点描述向量间的欧氏距离作为匹配相似度准则进行匹配判断。建立 $k-d$ 树提高匹配点对搜索速度,找出每个特征点两个最近邻特征点及相应欧氏距离,如果比值小于规定阈值(一般设为 0.6)视为匹配成功,否则视为不匹配。

SIFT 算法通过多种尺度空间图像分析和应用特征点主方向建立特征描述向量两种策略实现具有较大变换参数图像对的匹配,但在增加匹配成功率的同时也引起计算量的急剧增加。结合相位相关匹配得到的图像间初始缩放和旋转变换参数,可以为 SIFT 计算中尺度空间选择和特征点匹配范围约减提供初始估计。尺度空间参数根据图像间初始缩放参数进行适当选择,避免了单一 SIFT 算法在所有尺度空间上的计算,从而有效降低非相关特征点的计算。特征点匹配根据图像间初始变换参数估计出正

确匹配点附近邻域,从而降低了非匹配特征向量的匹配搜索运算量,同时也增强了特征点匹配的正确率。

4 图像自动配准算法原理及工作流程

应用相位相关方法对图像对进行匹配判断及变换模型的快速估计^[5],若得到的仿射变换参数为 $T(\theta_0, c, (a, b))$,则仿射变换矩阵 H_{affine} 表示为:

$$H_{\text{affine}} = \begin{bmatrix} c\cos\theta_0 & c\sin\theta_0 & -a \\ -\sin\theta_0 & c\cos\theta_0 & -b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

但由于手持拍摄的随意性和拍摄相对位置的偏移,仿射变换模型通常只是粗略估计,我们应用更加符合实际情况的8参数平面透视变换模型描述匹配图像序列间的相对变换关系,即两幅图像的对应像素点满足 $X' = H_{\text{project}}X$,表示为:

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \\ 1 \end{bmatrix} = H_{\text{project}} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $X = (x_i, y_i, 1)^T$, $X' = (x'_i, y'_i, 1)^T$, $j = 1, 2, \dots$ 是SIFT特征匹配点对齐次坐标, 3×3 矩阵 H_{project} 是图像间透视变换的齐次矩阵。可见,透视变换是仿射变换的超集,且透视变换依据精确定位的特征点(SIFT特征点具有亚像素的精度)进行求解,能够更加完整精确地描述图像间的相对变换关系。

根据以上描述的图像序列配准原理,我们结合相位相关和SIFT特征相关两种算法的优点,采用由粗到精的匹配策略,设计乱序输入图像序列的自动配准算法。流程如图1所示。

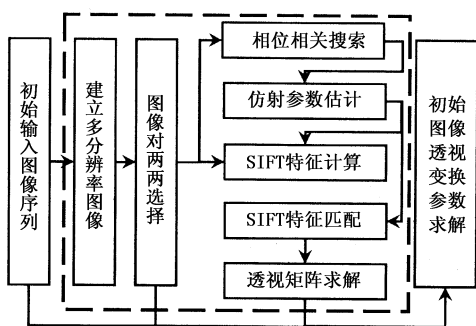


图1 图像配准算法流程图

Fig. 1 image alignment algorithm diagram

首先为输入图像序列建立多分辨率金字塔,在较低分辨率的图像层上进行相位相关区域搜索;对于相关性能良好的图像对应用SIFT特征相关进行匹配验证,其计算区域根据初始变换参数裁剪、SIFT计算参数根据缩放比自适应调整、SIFT特征点匹配搜索区域根据初始变换预测,从而为乱序输入图像

序列建立正确的匹配关系并得到匹配率较高的SIFT特征点对;以特征点对的对称投影位置误差最小化为目标函数,应用RANSAC算法^[6]进一步剔除误匹配点对,求出透视变换矩阵;将低分辨率图像求出的变换矩阵作为初步估计,对原始图像再次进行SIFT特征相关匹配,结合RANSAC和LM非线性优化算法^[7]估计出最优透视变换矩阵,最后将正确匹配的所有图像逐一变换得到图像拼接全景图。

5 试验结果

试验数据是数码相机拍摄的9张分辨率为 1024×768 的数码照片。为了验证算法的实用性,照片为手持拍摄且拍摄位置具有一定平移,排列顺序随机打乱如图2所示。应用Matlab进行算法测试^[8]。



图2 随机输入的数码照片序列

Fig. 2 random ordered images sequence

为了说明本文算法的配准流程,选取输入序列的前三幅图像进行配准区域搜索测试。首先选用高斯金字塔方法对图像进行欠采样处理,在分辨率为 256×192 的图像层上选用 128×128 分辨率的子图像区域进行相位相关区域搜索。搜索区域的尺度及位置选择方法根据图像间重合区域的比率进行设定,这里以图像纵向主轴为中心并根据对称性原则每幅图像等间隔选择3个 128×128 的子图像作为候选区域进行相位相关测试。图3(a)~图3(c)所示为其中的三个样本选择方法示意图。重合比率较高子图像对具有相对较高的峰值,例如子图像图3(b)图3(c)相位相关结果图3(e)的相关峰尖锐且峰值约为0.16,而子图像图3(a)图3(c)不是同一区域的图像,其相位相关结果图3(d)没有明显的峰。根据子图像相关结果对相关性能良好的子图像对进行SIFT特征相关验证,从而估计出与本图像重合率较高的所有候选图像。

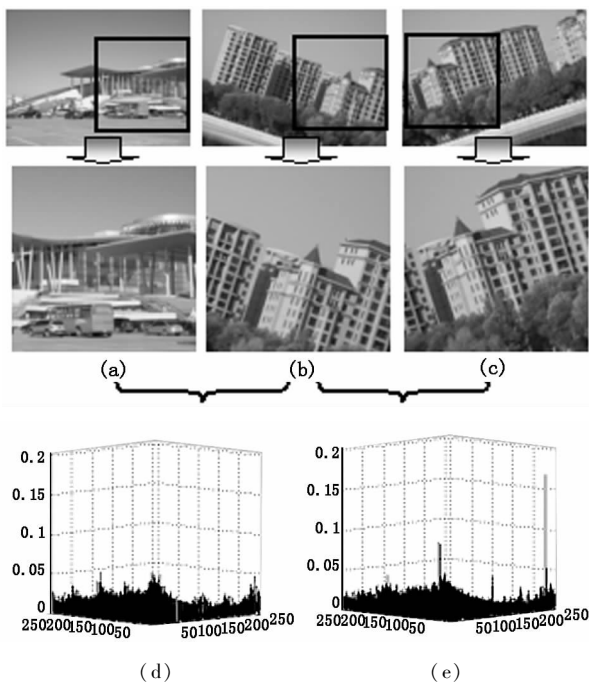


图3 图像子区域搜索及相位相关结果示意图

Fig.3 sub-image searching and phase correlation result

用 RANSAC 方法对图 3(b)图 3(c) 对应原图像 SIFT 匹配特征点对进行分析,如图 4 所示,只留下正确匹配特征点对进行透视变换矩阵估计和优化。



图4 正确匹配的图像 SIFT 特征点对

Fig.4 matching pairs of SIFT points

依据同样方法求出输入图像序列中所有正确匹配图像对的变换矩阵,最终得到图 5 所示拼接全景

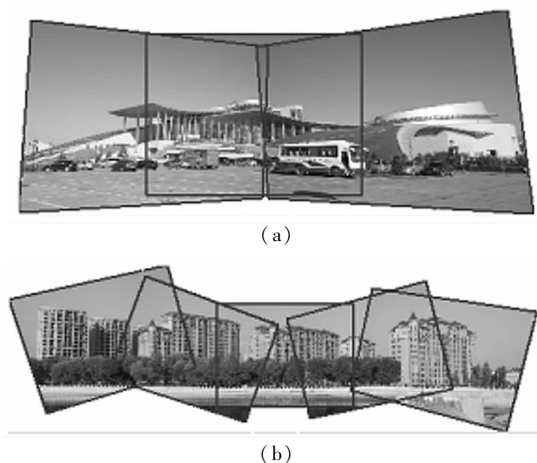


图5 图像自动配准及拼接结果图

Fig.5 image auto-alignment and mosaic result

图。本文算法自动区分出输入图像的相对关系,建立对应景物的全景图,并排除了一幅干扰图像,达到乱序输入图像序列自动配准的要求。

6 结论

应用本文提出的算法多种图像序列进行自动配准测试,均得到了满意的结果。该算法相对于基本 SIFT 特征匹配算法有效减少了运算量,同时应用相位相关方法进行变换参数的初步估计实现了匹配关系的双重验证。所以,该算法兼顾图像自动匹配的速度和稳定性,具有较强的使用和推广价值。

参考文献:

- [1] Richard Szeliski. Image alignment and stitching; A Tutorial, Technical Report[R]. MSR-TR-2004:92.
- [2] Yu Hongsheng, Jin Weiqi. Evolvement of research on techniques of digital image mosaics from video sequence [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (10): 1040 - 1045. (in Chinese)
- [3] 余宏生,金伟其. 基于视频序列的数字图像拼接技术研究进展 [J]. 激光与红外, 2009, 39 (10): 1040 - 1045.
- [4] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60 (2): 91 - 110.
- [5] G Wolber, S Zokai. Image registration using log-polar transform[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Canada, Sep, 2000.
- [6] Ma Chaojie, et al. Image automatic mosaic method based on image inherent characteristic [J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (11): 1151 - 1155 (in Chinese)
- [7] 马超杰,等. 基于图像内在特征的图像自动拼接方法 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (11): 1152 - 1155.
- [8] Chen Jie, et al. Method of infrared and visible image registration based on similar triangles matching [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (2): 215 - 218. (in Chinese)
- [9] 陈洁,等. 基于相似三角形匹配的红外与可见光图像配准方法 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (2): 215 - 218.
- [10] K Levenberg. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares [J]. Quart. Appl. Math., 1944, (2): 164 - 166.
- [11] Rafael C Gonzalez, et al. Digital image processing using matlab [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.