

文章编号:1001-9081(2010)01-0068-03

一种融合局部与全局信息的距离约束角点匹配算法

吴恩生, 朱敏琛

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福州 350108)

(wuens@yahoo.com.cn)

摘要: 图像匹配技术在众多领域中都有重要应用。针对既有平移又有旋转的情形, 提出了基于距离约束的角点匹配方法, 首先利用角点值进行匹配点对的粗选, 然后利用局部角点间距离及全局角点间距离结合进行匹配点对的选取。实验结果表明, 该方法可以实现无误匹配的匹配点对, 准确性高, 对噪声具有一定鲁棒性, 且由于匹配过程中主要利用两点间的距离关系, 而不需要进行复杂的运算, 所以匹配时间大幅减少, 在现实中有一定的实用性。

关键词: 特征点提取; 角点匹配; 旋转不变; 距离约束; 图像拼接

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Corner matching method of constraints of distance combining local and global information

WU En-sheng, ZHU Min-chen

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: Image matching technology has important applications in many fields. A corner matching method of the constraints of distance was proposed to solve the rotation and translation problem between two images. Firstly the values of corners were utilized to achieve coarse matching election, and then the local and global distance between the corners was combined to select the matching corners. The experimental results show that the methods can achieve accurate matching of no unmatched corners with high accuracy, certain robustness to noise, and as a result of the main use of the distance relationship between two corners without complex calculations in the matching process, so it achieves a substantial reduction in matching time, and also has the practical value.

Key words: console point extraction; corner matching; rotation invariant; distance constrain; image mosaic

0 引言

图像匹配技术是将不同传感器在不同时间和成像条件下对同一景物获取的两幅或多幅图像在空间上进行校准。目前主要有基于区域的方法^[1-2]和基于特征的方法^[3-4]。基于区域的方法直接利用图像的灰度信息, 不适合辐射失真较大和多源图像之间的配准, 且计算量较大。而特征匹配对光照具有很好的鲁棒性, 匹配精度高, 速度快, 在视觉导航、目标识别及图像拼接等方面具有十分重要的意义。目前研究的主要方向是基于特征的匹配方法。

基于特征匹配的方法中具有代表性的相关的匹配方法^[5]对光强不敏感, 一定条件下匹配精度高, 但是运算量很大, 对图像质量要求高, 而且不能处理图像既有平移又有角度旋转。另外有采用3个特征点反复进行空间匹配以及插值的方法^[6], 但只能处理最多15°旋转。Lowe的SIFT匹配算法^[7]有着优良的鲁棒性和准确性, 且能得到大量的匹配点对, 可以用于大旋转和平移的图像, 但由于构造了128维特征进行匹配, 匹配速度慢。文献[8]提出的基于旋转不变的角点匹配方法, 将灰度相关法引入到旋转的匹配中, 能实现较高的匹配率, 但抗干扰能力有限, 且匹配速度较SIFT方法没有明显改善。文献[9]提出的旋转不变的方法简单可行, 匹配速度快, 但匹配准确率不够, 特别图像存在较多相似局部特征时, 匹配

容易失败。在匹配过程中, 单纯使用局部特征进行匹配, 它能够剔除部分误匹配点对(本文将错误匹配点对和角点定位偏差过大的正确匹配点对统称为误匹配点对), 但由于局部特征的相似性, 使得去除误匹配点对数有限, 容易导致算法失败。故匹配算法需要利用全局信息与局部信息结合, 才能获得令人满意的效果。

针对以上问题, 本文提出的融合局部与全局信息的距离约束角点匹配方法, 首先利用角点值进行匹配点对的粗选, 然后利用局部角点间距离约束及全局角点间距离约束结合进行匹配点对的筛选, 将局部信息与全局信息有机的相结合。本文方法能实现无误匹配的匹配点对, 并具有一定的抗干扰性。且由于匹配过程中主要根据点到点的距离, 计算简单, 不需要进行相关性等复杂的运算, 所以匹配速度快, 可以满足要求速度快的既有平移又有旋转的拼接等领域的要求。另外本文基于全局距离约束匹配可以作为其他针对平移旋转的特征匹配算法的最后精匹配筛选, 它快速准确, 能实现匹配点对的无误匹配。例如在LOWE算法之后加入全局距离约束匹配过程。

1 候选点的选取^[8]

基于特征点的匹配方法一般经过三个过程: 1) 特征点提取; 2) 对特征点进行描述; 3) 利用特征点描述进行特征匹配。特征点提取结果直接影响着后续特征匹配的过程, 选择好的

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-08-14。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0710008; 2009J01283); 福建省科技计划重点项目(2008H0026)。

作者简介: 吴恩生(1984-), 男, 福建屏南人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理、模式识别; 朱敏琛(1961-), 女, 上海人, 副教授, 主要研究方向: 图像处理、模式识别、智能技术。

提取算法是实现匹配成功的保证。本文采用 Harris^[10] 进行角点检测,并对两幅待拼接图像使用相同的特征阈值提取角点,特征阈值的选择要使得特征点分布相对均匀,而不至于分布过密或过稀疏,通常需要多次实验取得,本文取 5500。

在理想情况下,假设有一匹配点对 (a_i, a'_i) , 则它们的角点值 $R(a_i), R(a'_i)$ 相等。所以可以利用角点的角点值对特征点集进行粗匹配。但由于在图像获取过程中,经常可能受光线、噪声等因素影响,所以在粗匹配时需要设置一个允许的阈值。使用式(1)筛选候选点对:

$$|R(a_i) - R(a'_i)| \leq \varepsilon \quad (1)$$

其中 ε 为允许阈值,可根据图像质量和光照等进行适当调节。

在得到的候选匹配点对中,参考图像点集 A 与配准图像点集 A' 中的角点绝大多数不是一对一的关系,而是多对多的关系。其中匹配点对中点集 A 的点有三部分:一部分是不在两张图像重叠区域中的点;另一部分是点在重叠区域,但是在 A' 中不存在相匹配的点;第三部分是在 A' 中找到匹配的角点。匹配算法要解决的问题是找到第三部分的点,并找到 A' 中唯一匹配的角点。经过粗匹配后含有数量庞大的误匹配点对,必须进行进一步的筛选。

2 基于距离约束的匹配

文献[8]匹配算法第三步利用基于局部距离约束的匹配,能剔除大量的误匹配点对,但由于该步骤将一对一的匹配点对当成候选匹配点对,需设置很小的向量阈值,否则匹配点对大部分是多对多的关系,会导致匹配失败,这样抗噪性有限,且图像质量要求高。本文采用对向量的各维比较并设置阈值,而不使用向量之间的欧氏距离,这样更能符合正确匹配点的特征,可以更好地剔除误匹配点对和保留正确的匹配点对。另外,文中第四步全局筛选不能很有效地将误匹配点剔除。文献[11]整体算法适用于图像间存在平移而不旋转的匹配,匹配速度快,该算法中用全局距离约束对候选点对进行筛选可以实现无误匹配点对,但要求前一步候选点对含有大多数的正确匹配点对,且候选点对要求是一对一的关系。由于这些问题使得该算法应用范围大大受限。本文提出的全局距离约束可以用于候选点对含有部分正确匹配点对,且候选点对是多对多的关系,并且能实现匹配点对的无误匹配,这样可以放宽前一步基于局部距离约束的匹配过程的向量约束条件,从而增强整个匹配算法的抗噪性。最后本文将基于局部距离约束与全局距离约束相结合实现匹配。

2.1 基于局部距离约束的匹配

基于局部距离约束的匹配算法^[8]的基本步骤利用角点的局部特征来剔除误匹配点对。如图1所示。假设 a_i 与 a'_i 匹配,且邻域有 a_k 与 a'_k 匹配。在理想情况下,由于相匹配的角点各自的邻域具有相似性,在相同范围邻域内提取出的角点数应该相同,即 a_i 与 a'_i 邻域角点数相等,且 $d(a_i, a_k) = d(a'_i, a'_k)$, 其中 $d(*, *)$ 表示两点欧氏距离。

基于以上对文献[8]存在的问题,本文改进的基于局部距离约束的匹配过程主要步骤为:

1) 假设 a_i 有候选匹配点 $(a'_i, a'_j, a'_k \dots)$ 。取候选匹配点的一点 a'_i , 求取 a_i 与 a'_i 邻域的角点数,其中邻域为到该点距离等于 w 的圆形模板区域。如果 a_i 与 a'_i 的邻域角点数与 a_i 邻域角点数差值小于给定的阈值,则保留 a'_i 为候选匹配点,否则剔除;

2) 设 $count = 0$, 依次取 a_i 的一个邻域角点 a_k , 计算它与

a_i 的距离 $d(a_i, a_k)$, 在待配准图像中查找到 a'_i 的距离最接近 $d(a_i, a_k)$ 的 a'_k 的邻域角点,如果距离差值小于给定的阈值,则 $count$ 自加1, 其中被选择的 a'_k 的邻域角点不能再进行下次选择对比,如果最终 $count$ 大于给定的阈值,则认为 a'_i 是 a_i 可能的匹配点予以保留,否则从 a_i 候选匹配的角点中剔除。为提高算法效率,可以先对 a_i 和 a'_i 到各自邻域角点距离按升序排列,进而按顺序查找;

3) 依次对 a_i 候选匹配点进行 1)、2) 同样的运算。

由于角点本身受噪声等的影响而造成的误差,以及含有局部特征相似的点比较多,且即使准确匹配的点对的局部特征也是有误差的,所以在此时仅仅把一对一的点对当成匹配结果,往往会导致实验失败。此时相当部分正确匹配点对还存在于多对多的关系中,所以不能用文献[10]的全局匹配过程。要达到准确的匹配,需要利用本文提出的基于全局的距离约束来进一步剔除误匹配点对。

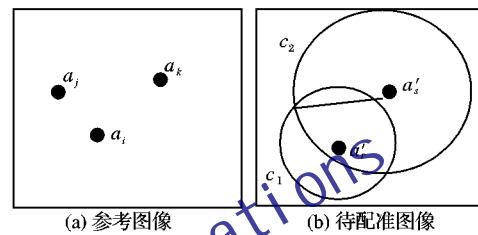


图1 基于距离约束原理

2.2 基于全局距离约束的匹配

如图1, a_i 与 a'_i 匹配, a_i 周围有一点 a_j , 在 a_i 的候选点到 a'_i 点距离等于 $d(a_i, a_j)$ 的点 x 有两种,一种为与 a_j 正确匹配的角点,另外一种是与 a_j 误匹配的角点,但它位于以 a'_i 为圆心,距离等于 $d(a_i, a_j)$ 的圆 c_1 上。依次对参考图像上另外的除 a_i 外的所有点在各自的候选角点里查找以上的点。并非每个参考图像中的点都能找到这样的点 x , 对能找到点 x 的点进行统计,总数计为 $S(a'_i)$ 。从理论上说,由于正确匹配的点对占有一定的数量,而第二种 x 点数量相对较少,所以能够实现正确匹配的角点 a'_i 的 $S(a'_i)$ 要比不能正确匹配的点的值要大。但由于本身角点检测的误差,即使是正确匹配点也可能存在角点位置的偏差。一般对于两幅配准图像而言,精确定位并匹配的点对明显比定位有偏差的点对多。这样,相对于定位有偏差的匹配点对,精确定位的匹配点对在进行 S 值统计时,既有包括精确匹配的角点,又有相当部分定位偏差的角点,以及少量误匹配的角点,所以精确定位匹配的点对的 S 值要大一些。因此可以认为, S 值越大的角点,是匹配越优良的角点。

对于点 a_j , 设有准确的匹配点对 (a_i, a'_i) , 到 a'_i 点距离等于 $d(a_i, a_j)$ 的点必须在圆 c_1 上。当有另一准确匹配点对 (a_k, a'_k) , 到 a'_k 距离等于 $d(a_j, a_k)$ 的点必须在以 a'_k 为圆心,半径为 $d(a_j, a_k)$ 的圆 c_2 上。而同时满足这两个条件的点只存在于圆 c_1 与 c_2 相交的点,显然这样点数只有1或者2个,而当更多的准确匹配点加入计算时,只剩下一个与 a_j 准确匹配的角点可以满足条件,而其他的角点都不满足,可以证明在大多数情况下只要三个准确匹配点对就能实现。

根据以上分析,基于全局距离约束的匹配过程实现如下:

1) 依次对经 2.1 节方法筛选后的 A 中的点 a_i , 取其中的一个候选匹配点 a'_i , 计算 $S(a'_i)$, 计算过程中对于 A 中的点 a_j 只要有一个候选点满足条件,就可以将 a_j 计入 S 计数中,对其他 a_i 的候选匹配点进行同样计算;

2) 依次对 A 中的点 a_i 选取候选匹配点中 S 的最大值的点, 剔除其他的候选匹配点, 并将 S 值当成 a_i 的特征;

3) 选取 A 中点的 S 值的最大值 S_{\max} , 并按 S 值从大到小顺序选取 A 中前 S_{\max} 个的点;

4) 对 A 的点按 S 值从大到小顺序选取点 a_i , 并取其唯一匹配对 (a_i, a'_i) , 将它作为参考点对, 然后依次对另外的匹配点对 (a_j, a'_j) 计算 $d(a_i, a_j), d(a'_i, a'_j)$, 如果两个距离相等则保留 (a_j, a'_j) 匹配点对, 否则认为该匹配对为误匹配进行剔除。如果某次选择参考点对计算时得到的匹配点对数不变, 则停止, 否则如果次数达到 n 次停止;

算法第2)步是依据能够实现正确匹配的候选点的 S 值要比不能正确匹配的候选点的值要大, 在该运算完成后, 待匹配的两幅图像的匹配点对成一对一的关系。第3)步对 A 中存在正确的匹配点的点进行筛选, 第四步是用精确匹配的点对剔除误匹配点对。经过以上4步运算后, 有效地将误匹配点对剔除, 可以得到无误匹配的匹配点对。以上得到的匹配点对可以进行准确的变换矩阵的计算, 如用 Ransac^[12]。

2.3 融合局部与全局信息的角点匹配算法

融合局部与全局信息的角点匹配算法实现为在基于局部距离约束的匹配过程后再进行基于全局距离约束的匹配。在匹配过程中, 单纯使用局部距离约束进行匹配, 由于局部特征的相似性, 不能有效去除误匹配点对, 得到的大多是多对多关系的匹配点对, 这样容易导致算法失败。因此需要再进行全局距离约束的匹配进一步精筛选, 最终得到无误匹配的匹配点对, 两个匹配过程得到了很好的结合。另外本文提出的基于全局距离约束针对多对多的匹配点对, 可以放宽基于局部距离约束的匹配的阈值限制, 提高了算法的抗噪性和稳健性。算法的主要步骤为:

1) 基于局部距离约束的匹配;

2) 基于全局距离约束的匹配;

经过这两个匹配过程后, 获得最终准确的匹配结果。算法整个过程主要使用两点距离关系, 匹配速度快。

3 实验结果

实验平台为 CPU AMD Sempron 2400 + 1.66 GHz, 内存 768 MB, Matlab R2007a。实验图片大小为 410 pixel × 310 pixel。

表1 本文方法与 LOWE 方法比较结果

旋转 角度/°	运行时间/s		匹配率/%	
	本文方法	LOWE 算法	本文方法	LOWE 算法
15	2.07	5.83	100	89.5
40	2.41	6.51	100	86.9
80	1.95	6.23	100	90.6

表1为本文算法和 LOWE^[7]算法进行对比。其中本文算法运行时间为角点检测和匹配时间之和。表中结果表明, 本文算法在不同旋转角度下, 匹配率高, 都能达到完全匹配, 且匹配时间都较 LOWE 算法大幅减少。这是由于基于全局距离约束的匹配保证了高的匹配率, 而 LOWE 算法由于局部特征的相似性导致了误匹配点对的出现。本实验证明了本文算法对大旋转图像匹配的有效性, 特别是基于全局的距离约束的匹配有效地剔除了误匹配点对, 实现了匹配点对的无误匹配。另外在大量的实验过程中发现, 本文算法偶尔会出现极少数的误匹配点对, 这些匹配点对大多是角点检测误差过大

的点对。这是由于在角点定位沿某一方向上有偏差一段位移, 而用于筛选的多个参考点对在角点偏差的位移的中线附近的方向上, 这样就造成了极少数误差过大的点对未被剔除。

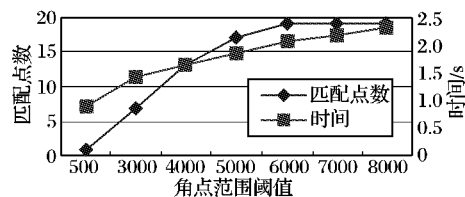


图2 角点值范围阈值 ε 与匹配点数、匹配时间关系

实验中 ε 的取值取决于两张图像的质量, 光照等因素, 从图2可以得出, 在一定范围内, ε 的增加会使得最终得到的匹配点对增加, 随之匹配时间会有相应增加, 而匹配率不会发生变化, 在增加到一定数量时达到稳定。而 ε 取太小将使大部分准确匹配点对在第一步骤就剔除, 结果导致实验失败。在本文对比实验中 ε 全部取 6000。旋转 15° 的匹配结果如图 3, 4。



图3 本文算法匹配结果

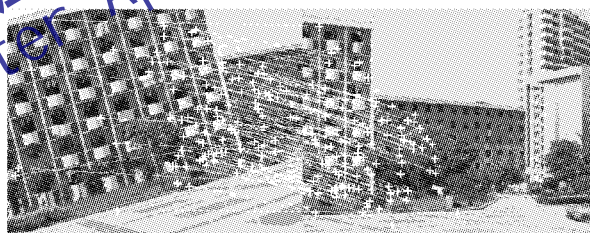


图4 LOWE 算法匹配结果

从实验匹配结果图可以看出, 本文算法提取出的匹配点对分布合理, 且无误匹配点对。而 LOWE 方法提取出的匹配点对含有部分的误匹配点对, 主要分布在楼房左边, 这是由于房间外部局部特征比较相似。另外 LOWE 提取出数量众多的匹配点对, 而本文方法明显数量少。这是由于一方面 LOWE 方法提取了数量众多的精确度高的角点, 另一方面是 LOWE 方法利用 128 维特征很好描述了角点特征, 当然这也使得算法运算量增大; 而本文方法利用 Harris 角点值和邻域距离约束描述角点特征, 描述简单, 使得获得的匹配点对数量少, 相应的匹配过程时间大幅减少。虽然本文方法提取的匹配点对数量较 LOWE 方法略少, 但在大多数情况下, 特别针对大幅图像时, 由于算法的高匹配率, 提取的匹配点对可以满足需要。

4 结语

基于特征的图像拼接过程中, 图像间特征点的准确配对是难点之一。本文解决了存在旋转平移关系的图像间的特征点匹配, 并且对噪声具有一定鲁棒性, 匹配速度快, 具有一定的实用价值。算法首先利用角点值进行匹配点的粗选, 然后利用局部角点间距离及全局角点间距离结合进行匹配点对的

(下转第 81 页)

实验2 几种方法对含噪图像进行去噪后的图像的视觉效果比较。选用纹理信息比较丰富的 Barbara 图像作为实验对象,添加标准差为 30 的高斯随机噪声,截取了去噪后 Barbara 的局部图像来对比分析,如图 5 所示。

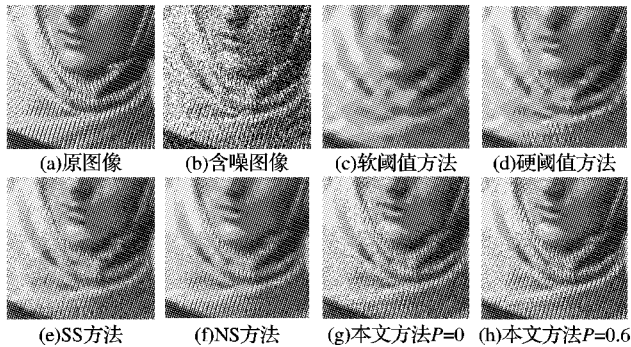


图5 Barbara 图几种方法在 $\sigma = 30$ 时去噪后的局部图像

通过观察图 5 中的所有图像可看到,用软阈值方法处理得到的图像比较模糊;硬阈值方法得到的图像显得视觉失真;SureShrink 方法得到的图像残存了较多的伪像;用本文方法处理得到的图像(g)、(h)视觉效果最好,比 NeighShrink 方法得到的图像清晰。从图 5 中各图的头巾的纹理可以看出,随着 P 值的增加,图(h)的细节明显被增强了,而且增强效果优于图(g),另外,从视觉上看,噪声增强的现象并不明显。针对以上两个实验分析可知,在实际处理时,本文方法的 P 值选取应在峰值信噪比和增强细节之间寻求平衡。

5 结语

本文提出了一种基于优化的小波域图像去噪方法,对 NeighShrink 方法(邻域阈值萎缩法)进行了改进。该方法先利用均方差准则的无偏估计,为小波域每一个子带,优化阈值和邻域窗口,减少了偏差;接着,引入一个细节增强因子 P ,通过映射函数优化了小波系数的收缩因子,增强了图像的细节。实验结果表明,经过本文方法去噪后图像的峰值信噪比

NeighShrink 方法有较大的改善,比 NeighShrink 方法得到的图像清晰。同时,随着 P 值的增大,图像的细节得到了增强,并且噪声增强的现象并不明显。

参考文献:

- [1] DONOHO D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613 - 627.
- [2] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425 - 455.
- [3] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of the American Statistical Assoc, 1995, 90(12): 1200 - 1224.
- [4] CAI T T, SILVEMAN B W. Incorporating information on neighbouring coefficients into wavelet estimation[J]. The Indian Journal of Statistics, 2001, 63(2): 127 - 148.
- [5] CHEN G Y, BUI T D, KRZYSAK A. Image denoising using neighbouring wavelet coefficients[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2005, 12(1): 99 - 107.
- [6] 周登文, 申晓留. 基于最大似然估计的自适应图像降噪[J]. 计算机工程, 2009, 4. 35(8): 236 - 238.
- [7] CAI T T, SILVEMAN B W. Incorporating information on neighbouring coefficients into wavelet estimation[J]. The Indian Journal of Statistics, 2001, 63(2): 127 - 148.
- [8] CHEN G Y, BUI T D, KRZYSAK A. Image denoising using neighbouring wavelet coefficients[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2005, 12(1): 99 - 107.
- [9] ZHANG FENGXIA, CHENG LIZHI, PENG SILONG. A new interscale and intrascale orthonormal wavelet thresholding for SURE-based image denoising[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15(1): 139 - 142.
- [10] 傅彩霞, 杨光. 一种新的具有增强效果的小波域图像去噪方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 51 - 55.
- [11] BALSTER E J, ZHENG Y F, EWING R L. Feature-based wavelet shrinkage algorithm for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2024 - 2039.
- [12] PROTILLA J, STRELA V, WAINWRIGHT M J, et al. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(11): 1338 - 1351.

(上接第 70 页)

选取。实验结果表明,该方法可以实现匹配点对的无误匹配。不足之处在于不能像 LOWE 算法一样得到数量众多的匹配点对,这也是下一步要改进的地方。

另外本文提出的基于全局距离约束匹配过程可以单独作为其他针对平移旋转的特征匹配算法的最后精匹配筛选,它快速准确,能实现匹配点对的无误匹配。

参考文献:

- [1] HARTLEY R, GUPTA R. Linear pushbroom cameras[C]// 3rd European Conference on Computer Vision. New York: Springer-Verlag, 1994: 555 - 566.
- [2] 李志刚. 边界重叠图像的一种快速拼接算法[J]. 计算机工程, 2000, 26(5): 37 - 38.
- [3] CHALECHALE A, NAGHDY G, MERTINS A. Sketch-based image matching using angular partitioning systems[J]. IEEE Transactions on Man and Cybernetics, 2005, 35(1): 28 - 41.
- [4] ZHU Q, WU B, XU Z. Seed point selection method for triangle constrained image matching propagation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(2): 207 - 211.
- [5] FAUGERAS O. Realtime correlation-based stereo: Algorithm, implementations and applications [EB/OL]. [2009 - 05 - 20]. [ftp://ftp.inria.fr/INRIA/publication/publi-pdf/RR/RR-2013.pdf](http://ftp.inria.fr/INRIA/publication/publi-pdf/RR/RR-2013.pdf).

- [6] DANI P, CHADHURI S. Automated assembling of images: Image montage preparation[J]. Pattern Recognition, 1999, 28(3): 431 - 445.
- [7] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- [8] 庄志国, 孙惠军, 董继扬, 等. 基于角点检测的图像匹配算法及其在图像拼接中的应用[J]. 厦门大学学报, 2007, 46(4): 501 - 505.
- [9] 李海超, 张广军. 基于旋转不变的角点匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 561 - 564.
- [10] HARRIS C G, STEPHEN M. A combined corner and edge detector [EB/OL]. [2009 - 05 - 20]. http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/Spatial/Docs/Harris/A_Combined_Corner_and_Edge_Detector.pdf.
- [11] 胡明昊, 任明武, 杨静宇. 一种快速实用的特征点匹配算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(9): 31 - 33.
- [12] TORDOFF B J, MURRAY D W. Guided-MLESAC: Faster image transform estimation by using matching priors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1523 - 1533.