

一种图像特征点迭代修正匹配算法^①

刘海峰, 张超, 林福良, 黄可嘉

(北京控制与电子技术研究所 信息系统工程重点实验室, 北京 100038)

摘要: 基于特征点的图像匹配被广泛应用于图像配准、目标识别与跟踪领域, 目前, 两阶段匹配(即先粗匹配, 后精匹配)是最常用的方法, 然而, 两阶段匹配存在两方面的问题, 一方面, 粗匹配阶段对精匹配阶段的影响是不可逆的, 即粗匹配的效果决定了精匹配的最优精度; 另一方面, 精匹配得到的后验知识没能反馈给粗匹配阶段, 以修正粗匹配结果. 为此, 提出一种基于迭代修正的图像特征点匹配算法, 该算法将精匹配得到的后验知识反馈给粗匹配阶段, 从而修正粗匹配结果, 使得粗匹配阶段得到更多的正确匹配对, 减少漏匹配特征点对, 这样经过多次迭代, 能够得到更多的正确匹配特征点对. 实验表明, 提出的算法比经典的两阶段匹配方法能够提取更多的正确匹配特征点对, 减少了漏匹配, 并提升了复杂图像匹配的稳定性.

关键词: 图像匹配; 特征点; 迭代修正; 粗匹配; 精匹配

Image Feature Point Matching Algorithm Based on Iterative Correction

LIU Hai-Feng, ZHANG Chao, LIN Fu-Liang, HUANG Ke-Jia

(Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Key Lab of Information System and Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on feature point, image matching has been widely applied in image registration, object recognition and tracking field. Now, two phase feature point matching (i.e., first coarse matching, then precise matching) is the most commonly used method. However, the two phase matching exists two issues, on the one hand, the impact of coarse matching for precise matching is irreversible, that is, the results of coarse matching will determine the optimal precision of precise matching. On the other hand, the post knowledge which can be obtained from precise matching cannot be regarded as feedback information to coarse matching, which can revise mismatching. Hence, the paper proposes a new feature point matching algorithm which is based on iterative correction. In the algorithm, post knowledge of precise matching is regarded as feedback information to coarse matching. The coarse matching can obtain more correct matching pairs and decrease missing correct matching pairs. After much iterations, better matching can be obtained. Experiments show that the proposed algorithm can extract more matching pairs than traditional two phase method and improves the matching stability.

Key words: image matching; feature point; iterative correction; coarse matching; precise matching

图像匹配通常指的是寻求两幅或多幅图像之间在同一个空间中景物在不同视点条件下所得到的图像像素之间的一一对应关系. 常用的图像匹配方法包括: 基于模板的匹配^[1]和基于特征的匹配^[2]. 基于模板的匹配对平坦区域、相同纹理区域具有较高的误匹配概率. 而基于特征的匹配特别是基于特征点, 如 Harris 角点^[3]、SUSAN 算子^[4]、SIFT^[5]、SURF^[6]等, 由于特

征点对灰度变化不敏感、计算速度快、以及具有较强的抗噪声和遮挡能力, 已经成为主流的图像匹配方法.

特征点匹配就是根据一定的准则找出在两幅或多幅图像中相同的特征点对. 为了提高匹配速度和准确性, 经典的特征点匹配算法一般分为粗匹配和精匹配两个阶段^[7]. 粗匹配常采用最大互信息、最大互相关、双向最大匹配、分块匹配等方法, 初步筛选出一部分

^① 收稿时间:2014-12-27;收到修改稿时间:2015-02-16

候选匹配特征点对。然后,精匹配阶段利用随机抽样一致性算法(RANSAC)^[8]、投票法、松弛法^[9]等消除误匹配特征点对,得到正确匹配特征点集合。

张波^[10]等人利用其改进的双向最大归一化相关系数作为粗匹配算法以提取初始特征点对,接着用其改进的随机抽样一致性方法来剔除伪特征点对。詹斌^[11]等人则针对提取的 SIFT 特征点使用特征向量的欧式距离实现特征点的粗匹配,并结合随机抽样一致性算法对匹配点进行优化。为了降低欧式距离进行高维特征向量匹配产生的误匹配问题,胡刚等人利用扩散距离代替欧式距离进行粗匹配^[12]。

通常情况下,经过两阶段匹配可以消除全部误匹配对,然而这种方法仍然存在一定的问题:首先,粗匹配的性能将直接影响精匹配的精度,因为,精匹配的匹配特征点对来自于粗匹配结果;其次,一旦精匹配阶段产生误匹配特征点对,这些误匹配对将得不到消除,从而影响后续的处理任务,如图像配准、目标识别与跟踪以及图像拼接等;第三,由于相似特征点会造成粗匹配阶段产生较多误匹配对,同时遗漏部分正确匹配特征点对,如果不进行修正,那么,精匹配阶段会丢失大量的正确匹配特征点对,甚至导致后续图像配准、目标识别等工作的失败。产生这些问题的原因在于:精匹配阶段得到的后验知识(即已经知道哪些是正确匹配特征点对,哪些是误匹配对)没能反馈给粗匹配阶段,以便消除相似特征点等因素带来的影响,从而使粗匹配阶段得到尽量多的正确匹配的特征点对,反过来,提高精匹配的正确匹配数目。

因此,基于对现有两阶段特征点匹配存在缺陷的分析和研究,本文提出一种基于迭代修正的图像特征点匹配算法,简称为迭代修正匹配算法(Iterative Correction Matching Algorithm-ICMA),该算法利用精匹配得到的后验知识来修正粗匹配,通过迭代达到提高精匹配的匹配性能的目的。

1 经典两阶段匹配算法

1.1 算法原理

特征点匹配算法的性能由最终得到的正确匹配特征点对数、匹配正确率、漏匹配率等决定。两阶段匹配的原理如图 1 所示:从图像中提取特征点后,先利用粗匹配从两幅图像中初步提取特征点匹配对作为候选匹配对,该阶段的目的是尽量多的找出正确的匹配

对,同时尽量减少漏匹配和误匹配对;然后,经过精匹配剔除所有的误匹配对,得到完全正确匹配的特征点对集合。

双向最大匹配法是两阶段匹配中的粗匹配阶段最常用的算法,其基本思想为:首先,从基准图像中选择一个特征点,记为 F_B ;然后,根据给定的特征点相似性算法(如归一化互相关系数^[13]、互信息^[14]等),从待匹配图像中寻找与 F_B 最相似的特征点,记为 F_M ;接着,根据同样的相似性算法,从基准图像中寻找与 F_M 最相似的特征点 F'_B ,如果 F_B 和 F'_B 为同一个特征点,那么,认为特征点 F_B 和 F_M 是一对正确匹配对,这样对基准图像和待匹配图像中的每个特征点都进行上述匹配步骤,可以得到一个候选匹配特征点集合。

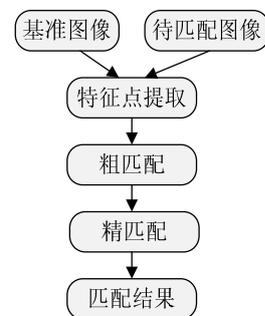


图 1 经典两阶段图像特征点匹配算法流程

而精匹配阶段最常用的方法则是随机抽样一致性(RANSAC)算法,其基本思想是:从随机抽取的 N 组样本(候选匹配特征点对集合)中找出最优的抽样,并根据最优抽样来选择参与最后计算的原始数据。具体步骤为:重复地从输入数据中采样所谓的最小点集(如:对应于仿射变换,就是抽取 3 对特征点),并利用每次抽取的最小点集计算需要确定的模型参数,同时,根据一定的准则判定剩余输入数据中哪些是与该参数相一致的,即内点(如在得到的仿射变换参数下,计算哪些特征点经过变换后的距离小于给定的阈值),当内点比例达到一定阈值时,或者经过采样一定次数后,将对应内点比例最高时估计的参数和筛选出来的原始数据作为输出。

1.2 存在的不足

大部分情况下,经过两阶段匹配可以筛选出一个有效的特征点匹配集合,然而,对于一些复杂情况,如噪声、大旋转等,得到的匹配集合可能无效,即正确匹配点对数目太少或得不到正确匹配特征点对,从而

无法满足图像配准、目标识别等任务的需求。

从两阶段的匹配过程可以得出以下结论: 1)粗匹配的结果对精匹配的影响是直接的和不可逆的, 这是因为, 粗匹配和精匹配是“烟囱式”的, 虽然粗匹配可以消除大部分误匹配特征点对, 但是, 很可能也会丢失很多正确匹配点对, 即粗匹配的效果决定了精匹配的最优精度; 2)虽然大多数时候精匹配可以去掉所有的误匹配对, 从而得到正确匹配特征点对集合, 然而, 由于粗匹配存在丢失现象(即: 有效正确匹配对没有提取出来), 可能会导致精匹配得不到有效的正确匹配对; 3)精匹配得到的后验知识没能反馈给粗匹配阶段(即: 粗匹配和精匹配构成一个环, 而不是烟囱), 以修正粗匹配过程丢失的正确匹配对, 以及纠正误匹配对, 从而避免相似特征点对造成的误匹配现象(特别是在重复纹理、噪声较大的图像中)。以修正粗匹配产生的误匹配对; 4)对于图像间存在大旋转等复杂条件下的匹配稳定性不够高。

这些不足, 在一定程度上减少了能够得到的正确匹配特征点对数目, 增大了匹配结果中存在误匹配特征点对的概率, 导致基于特征点匹配任务的失败, 如图像配准、目标识别等。

2 基于迭代修正的匹配算法

经典的基于两阶段的特征点匹配方法之所以存在以上问题, 其根本原因在于精匹配的精度受限于粗匹配过程, 而粗匹配过程不能有效利用精匹配得到的后验知识, 以修正自身的不足。

因此, 本文提出了基于迭代修正的特征点匹配算法(ICMA), 其基本思想是: 将精匹配得到的后验知识通过反馈输入给粗匹配过程, 从而进一步提升粗匹配的精度, 进而反向提升精匹配的性能。图 2 给出了迭代修正匹配示意图。

与经典的两阶段匹配方法相比较, 其不同点在于, 本文提出的基于迭代修正的方法引入了反向修正机制。通过反向修正, 就可以有效的利用精匹配过程得到的后验知识, 借助于后验知识的辅助, 粗匹配过程可以修正上一次粗匹配的误匹配特征点对, 同时可以消除相似特征点带来的影响, 使得筛选出真正正确的匹配特征点。

本文提出的基于迭代修正的特征点匹配算法过程如下:

- 1) 假设从基准图和待匹配图提取的特征点集

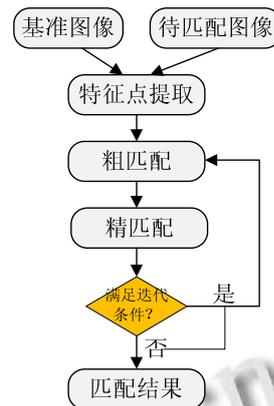


图 2 基于迭代修正的图像特征点匹配算法流程

合分别为 $SetB$ 和 $SetM$, 特征点数目分别为 N_B 和 N_M 。

2)采用归一化互相关系数作为粗匹配的相似性准则, 初始化归一化互相关系数矩阵 S 所有元素为 0, 矩阵大小为 $N_B \times N_M$, 初始化误匹配列表 $ErrorMatch$ 为空, 粗匹配列表 $CoarseMatch$ 初始化为空。

3)初始化总迭代次数 $IteNum$ 等于 N_B 与 N_M 的最小值, 最优特征点匹配数目 $Inliner$ 为 0, 令最优匹配列表 $OpMatch$ 为空。

4)精匹配采用 RANSAC 算法, 并初始化采样次数为 $SNum$, 将 $SNum$ 次采样匹配的最优匹配特征点数目 $InNum$ 设置为 0, 初始化采样匹配的特征点匹配结果列表为 $PreciseMatch$ 空。

5)若迭代次数 $IteNum$ 大于零, 则进行下一步, 否则结束迭代。

6)计算特征点集合 $SetB$ 中的每个特征点与集合 $SetM$ 中的每个特征点的归一化互相关系数, 并将值保存到矩阵 S 中, 若列表 $ErrorMatch$ 非空, 则列表 $ErrorMatch$ 中的特征点对不需要计算归一化互相关系数, 同时, 将矩阵 S 中对应的位置设置为零。

7)采用双向最大匹配法进行粗匹配, 其中, 根据矩阵 S 选择匹配对, 规则为: 若某个元素在所在行和列中都取的最大值, 那么, 该行号和列号所对应的特征点编号被认为是一对正确匹配对, 匹配结果记录在序列 $CoarseMatch$ 中。

8)采用 RANSAC 进行精匹配, $CoarseMatch$ 和 $ErrorMatch$ 作为精匹配的输入, 与传统 RANSAC 算法相比, 本文算法除了检测当前迭代粗匹配列表

CoarseMatch 中的匹配结果外, 还要检测历史误匹配序列 *ErrorMatch* 中是否存在漏匹配的正确匹配对. 采样 *SNum* 次后, 返回最优匹配特征点数目为 *InNum*, 以及最优匹配特征点对序列为 *PreciseMatch*;

9) 如果精匹配特征点对数目 *InNum* 大于最优匹配对数目 *Inliner*, 那么令 $Inliner = InNum$, 并将序列 *PreciseMatch* 中的匹配对存入序列 *OpMatch* 中, 同时, 将剩余的(即序列 *CoarseMatch* 减去序列 *PreciseMatch* 的匹配对)匹配对存入误匹配对序列 *ErrorMatch* 中.

10) 将迭代次数 *SNum* 减一, 转入 5).

迭代结束后, 最优特征点匹配结果记录在序列 *OpMatch* 中, 而匹配数目为 *Inliner* ..

由算法步骤可以看出, 与经典两阶段匹配方法相比, 本文的核心在于第 6)步、第 8)步和第 9)步, 一方面, 利用精匹配的后验知识得到误匹配特征点对序列 *ErrorMatch*, 用该序列修正初始的归一化相关系数矩阵 *S*, 以消除相似特征点的干扰; 另一方面, 借助于历史误匹配序列 *ErrorMatch* 记录每次迭代精匹配得到的误匹配对, 同时, 作为精匹配的输入, 目的是防止漏匹配, 即: 当前迭代精匹配时, 不仅检测当前粗匹配的结果, 而且检测历史误匹配中是否存在遗漏的正确匹配对. 此处的后验知识指的是: 在精匹配得到一定比例的正确匹配对的同时, 也知道了哪些匹配对可能是(并不一定真的是)误匹配对, 那么, 记录这些误匹配对, 将其反馈给粗匹配, 以修正这些误匹配对.

3 实验与分析

为验证本文提出的基于迭代修正算法的有效性, 本文针对不同的场景选择了有代表性的图像进行了大量的实验, 包括: 红外图像与可见光图像、彩色图像与灰度图像、具有大位移量的图像、具有大角度旋转图像、具有重复纹理图像、具有不同灰度的图像等, 并假设图像之间满足仿射变换关系.

在本文的实验中, 各算法的参数设置如下: 归一化互相关系数的匹配模板大小为 11×11 ; 随机抽样一致性算法的抽样次数为 1000 次, 正确匹配特征点的衡量标准是, 通过变换得到的像素位置与匹配点的位置的欧式距离不超过 4 个像素.

表 1 给出了实验中用到的各种图像的大小以及基

于传统 Harris 角点算法提取的特征点的数目. 表 2 给出了经典两阶段匹配与本文提出的迭代匹配的正确匹配特征点对数, 以及迭代匹配相对经典两阶段匹配算法的提升率.

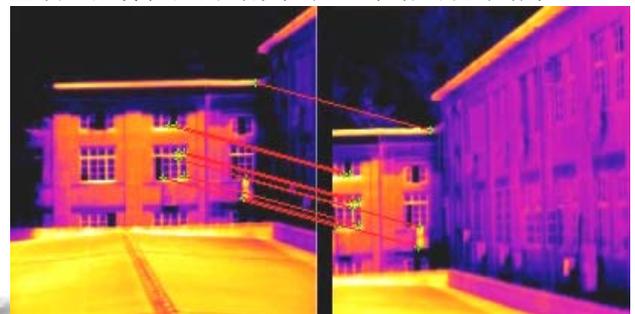
表 1 实验图像的大小以及提取特征点的数目

图	图像大小		特征点数目	
	左图	右图	左图	右图
图 3	202*184	196*184	47	28
图 4	172*172	176*171	67	80
图 5	202*219	204*221	49	21
图 6	319*232	317*237	134	129

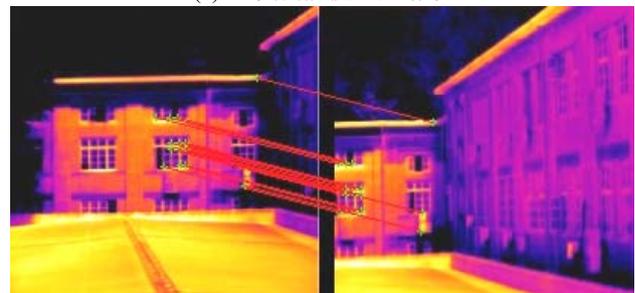
表 2 本文提出的基于迭代修正的特征点匹配与经典的两阶段匹配对比结果, 以及迭代修正算法的提升率.

图	两阶段匹配	迭代匹配	提升率(%)
图 3	10	15	50.0
图 4	15	26	73.3
图 5	0	11	100.0
图 6	11	12	9.0

本文提出的基于迭代修正的特征点匹配结果与经典两阶段匹配结果的比较如图 3 到图 6 所示, 实验中涉及到不同场景的图像. 而两种匹配方法最终获得的正确匹配特征点的对数在表 2 中给出统计结果.



(a) 经典两阶段匹配结果



(b) 基于迭代修正的匹配结果

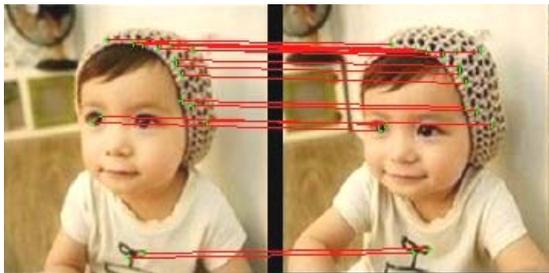
图 3 红外图像(大位移)图像对比结果

迭代匹配算法的提升率计算公式为:

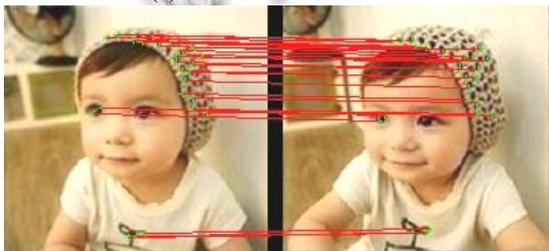
$$R_{improve} = \frac{\text{迭代匹配对数} - \text{两阶段匹配对数}}{\text{两阶段匹配对数}} \times 100\%$$

其中,“两阶段匹配对数”指的是经典两阶段匹配过程最终得到的正确匹配对数目,“迭代匹配对数”是由迭代匹配算法得到的匹配特征点对数目.

从图 3 到图 6 的对比以及表 2 可以发现,本文提出的算法具有更强的匹配能力,即迭代匹配算法比经典两阶段匹配算法提取得到了更多的正确匹配对.例如在图 4 中,图像具有大量的相同纹理(小孩的帽子),本文算法比经典两阶段匹配方法多提取出了 11 对特征点匹配对,提升率超过 70%.



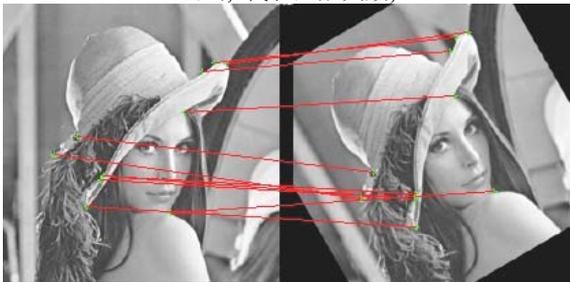
(a) 经典两阶段匹配结果



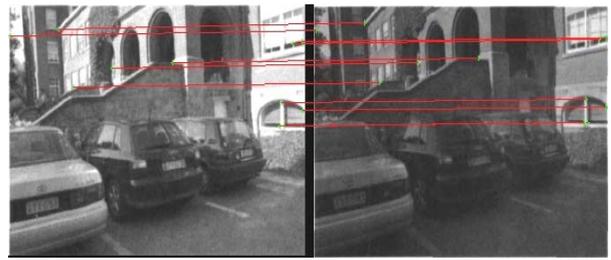
(b) 基于迭代修正的匹配结果
图 4 重复纹理图像对比结果



(a) 经典两阶段匹配结果(其实有 4 对错误匹配对,此处没有画出,代表匹配失败)



(b) 基于迭代修正的匹配结果
图 5 大角度旋转图像对比结果



(a) 经典两阶段匹配结果



(b) 基于迭代修正的匹配结果

图 6 低亮度、亮度差异图像对比结果

表 3 给出了经典两阶段匹配中粗匹配的匹配结果,以及粗匹配中的错误匹配特征点对数目.再结合表 2 可以得出:迭代匹配算法通过将精匹配得到的后验知识作为粗匹配的输入,以修正粗匹配的匹配结果,可以有效减少误匹配特征点对.例如图 3 中左右两幅图像提取的特这点数目分别为 47 和 28 对(见表 1),经典两阶段匹配算法中的粗匹配得到了 17 对特征点(见表 3),两阶段匹配得到的正确匹配特征点对数目为 10,而迭代匹配得到了 15 对正确匹配的特征点对,可以看出迭代匹配减少了漏匹配对数目和误匹配对数目.

表 3 实验图像的粗匹配对数及其误匹配对数

	粗匹配对数	误匹配对数
图 3	17	6
图 4	34	7
图 5	11	9
图 6	17	5

此外,在匹配稳定性方面,本文提出的迭代匹配也比经典两阶段匹配具有优势.例如图 5 具有大旋转的情形,经典的两阶段匹配方法由于粗匹配产生的较多误匹配的影响,没有得到任何正确匹配特征点对(只产生了 4 对错误匹配对),而本文提出的迭代匹配算法可以得到 11 对正确匹配特征点对.同样,在亮度差别较大的场景中(图 6),本文迭代匹配算法也具有更好的表现.

通过实验可以得出,本文提出的利用精匹配的后

验知识作为粗匹配的反馈信息,可以有效消除由于重复纹理、灰度差、拍摄角度、噪声等因素对粗匹配产生的影响,从而有效的提升了特征点匹配的能力,能够提取更多的正确特征点匹配对数目以及降低漏匹配率.这对于目标识别、图像配准等应用具有重要意义.

4 结语

本文在分析经典两阶段特征点匹配算法的基础上,针对存在的不足提出了一种基于迭代修正的特征点匹配算法.该算法将精匹配得到的后验知识作为粗匹配的输入,以修正粗匹配的匹配结果,进一步减少漏匹配和粗匹配,增加正确匹配特征点的对数.最后,通过在多种类型的图像上进行实验,表明提出的迭代修正算法具有更强的特征点匹配能力.后续工作将对迭代匹配对不同图像变换关系、噪声的适应能力.

参考文献

- 1 冯春贵,祝诗平,王海军,贺园园.基于改进模板匹配的限速标志识别方法研究.西南大学学报(自然科学版),2013,35(4):167-172.
- 2 彭真明,张启衡,魏宇星,张覃平.基于多特征融合的图像匹配模式.强激光与粒子束,2004,16(3):281-285.
- 3 Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector. Alvey Vision Conference Manchester, 1998, 15(2): 147-151.
- 4 Smith SM, Brady JM. SUSAN-A new approach to low level image processing. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- 5 陈抒榕,李勃,董蓉,陈启美.Contourlet-SIFT 特征匹配算法.电子与信息学报,2013,35(5):1215-1221.
- 6 Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van GL. Speeded - up robust features (SURF). Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- 7 张波,王天召,李科,陈金玉.一种改进的Harris特征点匹配算法.计算机系统应用,2013,22(7):100-103.
- 8 Fischler MA, Bolles RC. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- 9 唐俊,周洪伟,梁栋,王年.基于近似距离序的重复模式图像匹配算法.电子与信息学报,2012,34(12):3034-3039.
- 10 张波,王天召,李科,陈金玉.一种改进的Harris特征点匹配算法.计算机系统应用,2013,22(7):100-103.
- 11 詹斌,李华格,蒋迪星,秦绪佳.遥感图像拼接系统.计算机系统应用,2014,23(5):31-36.
- 12 胡刚,刘侍刚,吴清亮,王刚.基于扩散距离的SIFT特征匹配算法.计算机系统应用,2012,21(9):92-96,52.
- 13 郭伟,赵亦工,谢振华.一种改进的红外图像归一化互相关匹配算法.光子学报,2009,38(1):189-193.
- 14 Wang LL, Wang HQ, Cheng YQ, Qin YL. A novel SINR and mutual information based on radar jamming technique. Journal of Central South University, 2013, 20: 3471-3480.