

DOI: 10.7652/xjtuxb201406004

利用空间序列描述子的快速准确的图像配准算法

靳峰^{1,2}, 冯大政²

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 710071, 西安; 2. 西安电子科技大学
雷达信号处理国防科技重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对基于局部结构特征的图像配准算法对特征描述不够精确、外点剔除过程运算复杂度高的问题,提出了一种利用空间序列描述子的快速准确的图像配准算法。算法定义了一种基于空间序列的特征点描述子,通过定义特征点间的连接权值和排列顺序构成点的特征来描述,融合了图像局部结构和全局信息;通过对随机采样一致性检验的改进,采用投票策略和随机采样一致性检测的方法,解决外点剔除问题;利用空间序列描述子进行图像配准,通过配准和外点剔除交替迭代进一步提高配准精度。定量分析与实验结果表明:与传统的特征点匹配算法相比,该算法具有结构简单、易于实现的特点,具有配准精度高和计算时间少的优点,具有较高的复现率和准确率。

关键词: 图像配准;图像特征点;空间序列描述子;随机采样一致性

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0019-06

A Fast and Accurate Image Registration Algorithm Using
Space Order Descriptor

JIN Feng^{1,2}, FENG Dazheng²

(1. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A fast and accurate image registration algorithm using the spatial order descriptor is proposed to improve existing image registration algorithms based on local structures that have the shortcomings of low registration accuracy on feature description and expensive computation on outlier removing. A simple shape descriptor for feature points is defined, and the definition is based on the space geometrical properties, uses the connective weights among the points and their rank order, and integrates the local structure and global information of the image. An efficient method to remove outlier is given to improve the registration accuracy, and the method is based on an improved random sample consistency test strategy. The registration accuracy is further improved by iteratively performing outlier removing and image registration. Experimental results show that the proposed algorithm has high registration accuracy and low computational cost.

Keywords: image registration; image feature point; spatial order descriptor; random sample consensus

图像配准是指对取自不同时间、不同传感器或
不同视角的同一景物的两幅图像或多幅图像进行配
准、叠加的过程^[1],它是影像处理和分析的一个最重

要的步骤。一直以来,图像配准都是计算机视觉、模
式识别、医学图像处理和遥感领域的热点。图像配
准技术可广泛应用于多源遥感数据的融合分析、复

杂场景下的小目标运动跟踪检测、图像拼接、地景与地图的匹配、基于模板匹配的目标识别和高程重建等方面。

在图像配准方面,已经展开了大量的研究工作,图像配准的方法主要包括基于灰度配准的方法和基于特征配准的方法^[1],目前应用较多的是后者。基于特征配准的方法首先从原始图像中提取特征,通过特征的匹配关系建立图像之间的配准映射变换,实现配准图像。特别是在基于点特征的配准方法^[2-6]中,特征点具有平移、旋转和尺度不变性,并且彼此具有较高的区分度,能够准确地反映图像特征,但是,特征点的描述方法比较复杂,在如何提高配准运算的效率上,许多学者提出了改进方法^[7-8]。

近年来,一种基于空间几何关系的配准方法越来越受到研究者的重视。该方法在光学图像或遥感图像的配准、图像分类、模式与目标识别以及三维重构等领域获得了许多的应用^[9-13]。文献[10]提出了一种基于最近邻图形结构的图像配准算法(Graph Transform Matching, GTM),该算法使用最近邻约束策略构造待配准特征的局部邻近结构作为特征描述方法。文献[11]提出了名为受限空间序列约束(Restricted Spatial Order Constraints, RSOC)的特征点配准算法,该算法同样使用最近邻约束策略,选取待配准点附近若干最近邻点与待配准点间的夹角序列作为特征点的描述方法。文献[12]提出了基于特征点间的相对距离和角度的特征点配准算法。

基于空间几何关系的配准算法对特征的描述过于简单,没有有效的外点剔除方法,因此其配准过程往往转变为通过迭代求目标函数的最优解的问题,目标函数一般为配准矩阵或者图像变换矩阵的表达式。

为了解决这一问题,本文受排列顺序编码^[14]启发,定义了一种结构简单的特征描述子,该描述子与传统的特征点描述子相比,有效融合了图像局部信息和全局信息;对于外点剔除问题,采用投票策略和随机采样一致性检测的方法。与传统算法相比,本文算法使用空间上的几何关系特征对特征点进行描述,结构简单,易于实现;对特征点的描述综合了图像局部结构和全局信息,在图像中存在相似局部区域的情况下能取得更好的配准效果;将改进的随机采样一致性检测引入配准过程,在删除外点的同时保证了最大内点集合,具有配准精度高和计算时间少的优点。

1 特征点描述子

1.1 描述子定义

排列顺序编码(Rank Order Encoding)是一种基于序列的权值编码方法。该编码模型最早应用于脉冲发放神经网络^[15],其函数^[14]定义为

$$\text{Activation}(i, t) = \sum_{j \in [1, M]} w_{i,j} \delta^{\text{order}(j)} \quad (1)$$

式中: $\text{Activation}(i, t)$ 为 i 在某时刻 t 获得的 M 个连接 j 的输入之和; $w_{i,j}$ 是 j 到 i 的连接权值; δ 是一个取值在 0 到 1 之间的调制因子; $\text{order}()$ 表示 $w_{i,j}$ 在输入序列中的位置,取值为 $\{1, 2, \dots, M\}$ 之一。 i 获得的输入由连接权值 $w_{i,j}$ 的大小和 $w_{i,j}$ 在输入序列中的排列位置共同决定,这种表示方式称为排列顺序编码。

如果定义了特征点间的连接权值和空间序列,排列顺序编码可以很方便地应用于空间上的权值序列描述。图 1 显示了特征点 C 和其周围的特征点 L_j 组成的结构。

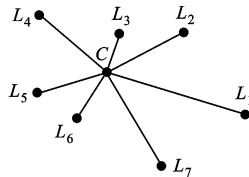


图 1 特征点连接

按照排列顺序编码的描述方式, L_j 对特征点 C 的连接权值可描述为

$$\text{Activation}(C) = \sum_{j \in [1, M]} \theta_{j,c} 2^{-\text{order}(d_{j,c})} \quad (2)$$

式中: M 为特征点的个数; $\theta_{j,c}$ 是点 L_j 到点 C 的连接权值; $d_{j,c}$ 是点 L_j 到点 C 的距离; $\text{order}()$ 为点 L_j 在其到点 C 的空间序列中的位置。图 1 中,点 L_j 到点 C 的距离按照从小到大排列的序列为 $[3, 6, 5, 2, 4, 7, 1]$, 因此 $\text{order}(3) = 1$, $\text{order}(6) = 2$, 以此类推。可以认为,特征点 C 周围的点 L_j 以 $\theta_{j,c}$ 为连接权值,按照 $d_{j,c}$ 的大小排成序列,构成了对点 C 的描述。

根据式(2)的描述,越是处在序列靠后位置的点 L_j 的连接权值,对点 C 的作用就越小。基于这一设定,可以使用最近邻原则在特征点的周围选取有限的局部最近邻点,这些最近邻点构成对特征点的描述。对于特征点 C 而言,定义空间序列描述子为

$$F(C) = [\frac{\theta_{j,c}}{2^{\text{order}(d_{j,c})}} \mid j \in [1, M], \text{order}(d_{j,c}) \leq K] \quad (3)$$

$F(C)$ 的含义是,选取特征点 C 周围的 K 个最近邻

点,将这些最近邻点与点 C 的连接权值按照一定的排列顺序所组成的向量描述。这里的排列顺序使用的是空间上的距离 $d_{j,c}$ 的序列位置。

1.2 连接权值定义

最近邻点是一种常用的基于局部结构的特征描述方式,本文在连接权值 $\theta_{j,c}$ 的设计上引入了一个全局参照点,使得空间序列描述子融合了局部结构和全局信息。 $\theta_{j,c}$ 的几何描述如图 2 所示。点 O 为全局参照点, $\theta_{j,c}$ 为向量 $\overrightarrow{OL_j}$ 与 $\overrightarrow{OC}$ 的夹角。点 O 、点 C 和点 L_j 构成了一个三角形,根据三角形的性质, $\theta_{j,c}$ 具有平移、旋转和尺度不变性。为了达到仿射不变性,可使用仿射不变的 Mahalanobis 距离代替欧式距离进行几何关系的描述。Mahalanobis 距离是一种统计信息,不便于直观描述,因此图 2 和下文中的图例仍采用欧式距离进行描述。

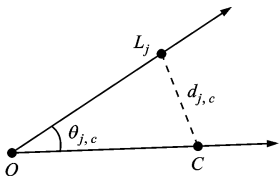


图2 连接权值的几何意义

为了使全局参照点 O 能够体现全局信息特征,本文使用特征点的样本空间均值来进行点 O 的定义,因此将 $\theta_{j,c}$ 称为统计偏转角度。全局参照点 O 是一个统计信息,稳定的特征点样本空间是选取点 O 的关键。本文使用式(4)来进行样本空间计算

$$V = \sum_{p \in [1, M_1]} \sum_{q \in [1, M_2]} \exp\left(-\left(1 - \frac{H(u, p)}{H'(v, q)}\right)^2\right) \quad (4)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为主辅图像待匹配点的个数; H 和 H' 分别为主辅图像中所有待匹配点间的距离构成的矩阵。若 $V(u_1, v_1)$ 是矩阵 V 在第 u 行和第 v 列的最大值, $V(u_2, v_2)$ 是矩阵 V 在第 u 行和第 v 列的次大值,并且 $V(u_1, v_1) - V(u_2, v_2) \geq T_1$, T_1 为指定常数,那么可以认为主图像中第 u 个点与辅图像中第 v 个点是一对匹配点。

本文将式(4)获得的匹配点称为内聚点。两幅图像中的内聚点具有数量相近、相对位置一致的特点。使用内聚点作为特征点样本空间,其均值点 O 的意义是主辅图像特征点构成的两个图中较大的相似子图(最优情况下为最大相似子图)的中心。因此,认为点 O 在一定程度上包含了图像特征点的全局信息,将其作为全局参照点引入特征点描述能够有效区分局部结构相近的特征点。如图 3 所示,由于统计偏转角度的定义中使用了全局参照点 D ,可

以直观地看到局部结构近似的特征点 C_1 和 C_2 的描述是完全不同的。

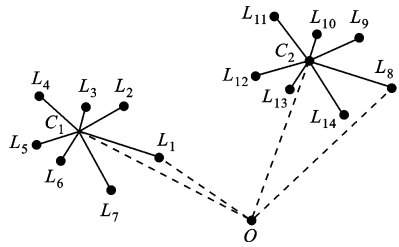


图3 特征点描述

2 图像配准

待配准图像的特征点匹配矩阵为

$$\Gamma = \{\phi_{gm}\}_{(g,m) \in \psi} \quad (5)$$

式中: ϕ_{gm} 为主副图像两个特征点 C_g 和 C'_m 的相对位置差异; ψ 为特征点对集合。若 $\Gamma(g, m)$ 是矩阵 Γ 在第 g 行和第 m 列的最小值,并且 $\Gamma(g, m) \leq T_2$, T_2 为指定常数,那么认为主图像中第 g 个点与辅图像中第 m 个点是一对匹配点。

迭代计算特征点匹配矩阵 Γ 和图像变换矩阵 Λ ,直到获得满足精度条件的图像变换矩阵,具体步骤如下。

步骤1 计算特征点匹配矩阵 Γ ,得到特征点对集合 Π_1 , Π_1 大小为 s_1 ;使用 Π_1 更新全局参照点位置。

步骤2 使用随机采样一致性检验计算内点的点对集合 Π_2 , Π_2 的大小为 s_2 。

步骤3 比较 s_1 、 s_2 和 s_m (初值为 T_3),若 s_1 最大,将没有包含在 Π_1 中的点作为外点删除, $s_m = s_1$,返回步骤1;若 s_2 最大,将没有包含在 Π_2 中的点作为外点删除, $s_m = s_2$,返回步骤1;若 s_m 最大,返回步骤2。

步骤4 迭代运行以上步骤,直到 s_m 的值稳定不变,或者迭代次数达到上限 λ 。认为此时的 Π_2 是最大内点集合 Π_m ,使用 Π_m 得到最终的 Γ 和 Λ 。

上述过程是对于随机采样一致性算法的改进,一方面删除了外点,另一方面保留了最大内点集合。步骤2使用了随机采样一致性检验,利用随机点对求出图像变换矩阵,然后根据容错误差进行外点删除。本文算法在每一次的外点剔除之后,重新计算特征点匹配矩阵,采用更接近最优解的样本空间进行图像变换矩阵估计,提高了随机采样的效率。这是因为随机采样一致性检验的时间复杂度取决于概率 $(s_m/M)^\eta$,概率越大随机采样一致性检验的效率越高,这里 $\eta=3$ 。本文的检验过程时间复杂度取决于 $(s_m/s_1)^\eta$,在迭代的过程中趋向于1。同时,为了

防止过收敛,每一次计算得出的图像变换矩阵对全体特征点进行误差检测,保证了获得最大有效点对集合。最后, s_m 的初值 T_3 为式(4)中定义的内聚点的数量,若迭代结束时 $s_m = T_3$,内聚点集合就是最优的内点集合。即使在最差的情况下,全局参照点的位置在每一次的迭代中也趋向于内点中心。

3 实验分析

与传统的基于空间几何关系的特征点匹配算法相比,本文定义的描述子具有更高的匹配准确率,尤其是待配准图像中存在大量重复的局部区域时。

图4a为不同角度下拍摄的光学自然图像,图4b和图4c为采用LOG算子进行特征点检测之后,基于空间几何关系的典型算法——空间序列约束算法(SOC)和本文算法得到的特征点匹配结果。前者在处理图像中重复出现的规则网格结构时出现了错配的现象,该类问题必须依靠引入全局信息的描述算法来解决。



(a)输入图像



(b)SOC 算法



(c)本文算法

图4 自然图像配准效果

本文算法在图像外点较多的情况下,全局参照点的初值选取将受到外点的干扰。以图5为例,图5b变换图像包含了对图5a图像尺度上的变化和剪裁,两幅图像的特征点数量分别为417、301,特征点匹配后剩余外点的比例为43%。在该种情形下,全局参照点的精度如图6所示。

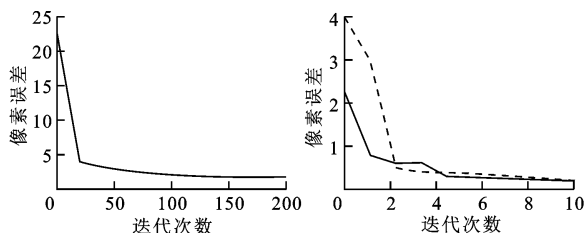
由内聚点得到的配准精度反映了全局参照点的



(a)配准图像

(b)变换图像

图5 自然图像特征点



(a)初值精度

(b)迭代过程

图6 全局参照点精度

精度。通过调节参数 T_1 的值,内聚点的配准精度可以达到4个像素以内。以此作为全局参照点的初值,图6b反映了随着外点的剔除,内聚点的匹配精度进一步提高,最终和内点的匹配精度趋于一致。

为了进一步检验本文算法的有效性,采用特征点的复现率和准确率进行定量分析。此处的复现率是指如果在两幅图像中分别有 r_1 和 r_2 个特征点在变换后的图像中存在匹配点,而在两幅图像中实际检测到的对应匹配点对的数目为 r_3 ,则复现率为 $R_1 = 2r_3 / (r_1 + r_2)$,准确率为 $R_2 = 1 - r_4 / r_3$,其中 r_4 为配准错误的点对数目。匹配点对的复现率和准确率越高,说明特征检测的性能越稳定,配准的准确率越高。

本文使用实际拍摄的自然光学图像和图像处理中常用的测试图像进行配准算法的验证。图4a、图5a是实际拍摄的自然光学图像,图4a包含了拍摄视角的变化,图5反映了尺度变换。图7a~图7f是图像处理中常用的测试图像,涵盖了视角变换、尺度变换、大角度旋转和图像的仿射变换。

为了保证配准的准确性,图像特征点检测使用经典的DOG算子,实验平台和环境为CPU2.1 GHz,内存2 GB,win7系统,matlab2012。将本文算法与目前常见的基于空间几何关系的GTM算法^[10]和RSOC算法^[11]进行对比,在复现率、查准率和运行时间上的效果如图8所示。图8a~图8c中横坐标表示图4、图5和图7中的测试图像对,其中1为图4,2为图5,3~5为图7b中3幅变换图像与图7a的配准结果,6~8为图7d中变换图像与图7c的配准结果,9、10为图

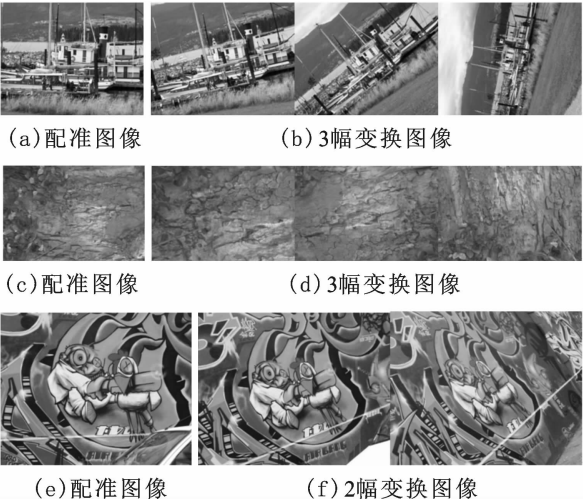


图 7 测试图像

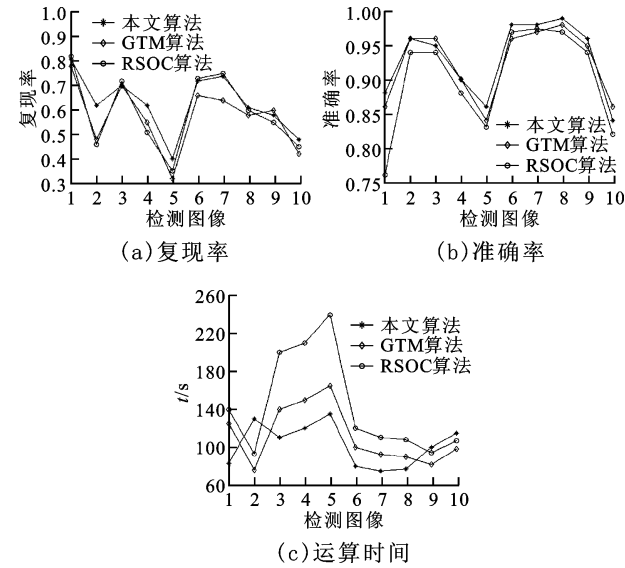


图 8 算法效果对比

7f 中变换图像与图 7e 的配准结果。

图 8a 和图 8b 描述的分别是各算法配准结果的复现率和准确率,图 8c 描述的是各算法的运算时间。DOG 算子检测到的特征点普遍存在复现率不高的问题,本文算法由于融合了鲁棒性较高的随机采样一致性检验,因此在 3 种算法中取得了最高的复现率。尤其是第 5 对检测图像,图像信息复杂,检测特征点数量多,图像变换在角度和尺度上都比较明显,本文算法仍然保持了 40% 以上的复现率。在准确率上,第 1 对检测图像由于含有较多重复出现的局部相似结构,容易出现误配的情况,本文使用的描述子有效避免了这种情况,取得了最高的查准率。同时,在该种情况下,本文算法在运算时间上的优势比较明显。在运行时间上,本文算法存在这样的情

况,在复现率较高的情况下,本文算法运行时间少于其他两种算法;在复现率较低的情况下,本文算法的运行时间略有上升,例如图 5 中两幅图像的配准。这是因为在低复现率情况下,内聚点的初始精度比较低,也即图像配准步骤 1 中的特征点对集合 Π_1 中含有匹配错误的点和匹配精度不高的点,因此 Π_1 的大小 s_1 远大于实际的匹配点对数量 s_m ,而本文算法的时间复杂度取决于 $(s_m/s_1)^7$,因此运算时间上升。

4 结 论

参照排列顺序编码方法提出了一种基于空间上的几何关系特征的特征点描述子,给出了改进的随机采样一致性检测的外点剔除方法。本文算法提出的空间序列描述子融合了特征点的局部结构和全局信息,以相对简单的结构定义实现了特征点描述。结合外点删除策略,实现了快速、准确的图像配准。

参考文献:

[1] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21 (11): 977-1000.

[2] 张艳, 张志成. 混合 Forstner 算法和 SIFT 灰度图像特征点提取 [J]. 科学通报, 2012, 28(10): 94-95.

ZHANG Yan, ZHANG Zhicheng. Hybrid Forstner algorithm and SIFT gray image feature extraction [J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(10): 94-95.

[3] 罗亚威, 魏本昌, 管涛, 等. 面向移动设备的快速特征点匹配方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (2): 591-594.

LUO Yawei, WEI Benchang, GUAN Tao, et al. Research on fast feature match method for mobile devices [J]. Application Research of Computers, 2013, 30 (2): 591-594.

[4] 徐正光, 陈宸. 鲁棒且快速的特征点匹配算法 [J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 294-296.

XU Zhengguang, CHEN Chen. Robust and fast feature points matching [J]. Computer Science, 2013, 40 (2): 294-296.

[5] 吴伟交, 王敏, 黄心汉, 等. 基于向量夹角的 SIFT 特征点匹配算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26 (1): 123-127.

WU Weijiao, WANG Min, HUANG Xinhan, et al. SIFT feature matching algorithm based on vector angle [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 123-127.

- [6] 李俊山, 朱英宏, 朱艺娟, 等. 红外与可见光图像自相似性特征的描述与匹配 [J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 339-343.
LI Junshan, ZHU Yinghong, ZHU Yijuan, et al. Description and matching of self-similarities for IR and visual images [J]. Laser and Infrared, 2013, 43(3): 339-343.
- [7] 唐朝伟, 肖健, 邵艳清, 等. 一种改进的 SIFT 描述子及其性能分析 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(1): 11-16.
TANG Chaowei, XIAO Jian, SHAO Yanqing, et al. An improved SIFT descriptor and its performance analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(1): 11-16.
- [8] 陈伟, 刘丽. 结合角点特征与 SIFT 特征的加速图像匹配 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 104-108.
CHEN Wei, LIU Li. Combining corner and SIFT features to accelerate image matching [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(1): 104-108.
- [9] QIAN Wei, FU Zhizhong, LIU Lingqiao, et al. Voting-strategy-based approach to image registration [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(10): 86-91.
- [10] AGUILAR W, FRAUEL Y, ESCOLANO F, et al. A robust graph transformation matching for non-rigid registration [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(7): 897-910.
- [11] LIU Zhaoxia, AN Jubai, JING Yu. A simple robust feature point matching algorithm based on restricted spatial order constraints for aerial image registration [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2011, 8(4): 805-841.
- [12] XIONG Zhen, ZHANG Yun. A novel interest-point-matching algorithm for high-resolution satellite images [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2009, 47(12): 4189-4200.
- [13] ALAJLAN N, RUBE I E, KAMEL M S, et al. Shape retrieval using triangle-area representation and dynamic space warping [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7): 1911-1920.
- [14] DELORME A, PERRINET L, THORPE S J. Networks of integrate-and-fire neurons using rank order coding B: spike timing dependent plasticity and emergence of orientation selectivity [J]. Neuroncomputing, 2001, 38(40): 539-545.
- [15] VANRULLEN R, THORPE S J. Surfing a spike wave down the ventral stream [J]. Vision Research, 2002, 42(23): 2593-2615.

本刊相关文献链接

- 张琳彦, 朱利. 以多幅图像非几何约束线段匹配重建建筑物外立面三维线段模型. 2014, 48(4): 15-19. [doi: 10.7652/xjtuxb201404003]
- 杨隽楠, 史忠科, 舒甜. 车辆行驶转向角的图像检测方法. 2013, 47(6): 73-78. [doi: 10.7652/xjtuxb201306013]
- 华莉琴, 许维, 王拓, 等. 采用改进的尺度不变特征转换及多视角模型对车型识别. 2013, 47(4): 92-99. [doi: 10.7652/xjtuxb201304016]
- 高燕华, 刘玉欢, 喻罡. 多尺度非参数化水平集的超声心动图分割. 2013, 47(2): 53-57. [doi: 10.7652/xjtuxb201302009]
- 章为川, 水鹏朗, 朱磊. 利用各向异性高斯方向导数相关矩阵的角点检测方法. 2012, 46(11): 91-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201211018]
- 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法. 2012, 46(10): 83-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201210015]
- 马元魁, 张树生, 白晓亮. 用球面混合曲率图像比较三角网格模型的相似性. 2012, 46(5): 97-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201205017]
- 吴攀超, 王宗义, 林欣堂. 采用局部差分模型描述的彩色图像配准技术. 2011, 45(10): 30-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201110006]
- 徐胜军, 韩九强, 赵亮, 等. 用于图像分割的局部区域能量最小化算法. 2011, 45(8): 7-12. [doi: 10.7652/xjtuxb201108002]
- 罗涛, 牟轩沁. 一种胸部 X 射线摄影图像中结节检测的多尺度匹配滤波器. 2011, 45(4): 30-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201104006]
- 赵海峰, 姚丽莎, 罗斌. 改进的人工鱼群算法和 Powell 法结合的医学图像配准. 2011, 45(4): 46-52. [doi: 10.7652/xjtuxb201104009]
- 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法. 2010, 44(11): 51-55. [doi: 10.7652/xjtuxb201011011]
- 杨艺, 韩崇昭, 韩德强. 一种多源遥感图像分割的融合新策略. 2010, 44(6): 88-92. [doi: 10.7652/xjtuxb201006017]
- 徐海黎, 花国然, 庄健, 等. 采用小世界免疫克隆算子的频率域图像配准. 2009, 43(6): 38-42. [doi: 10.7652/xjtuxb200906009]
- 唐荣年, 韩九强, 张新曼. 一种 Log-Gabor 滤波器结合多分辨率分析的虹膜识别方法. 2009, 43(4): 31-33. [doi: 10.7652/xjtuxb200904008]
- 王崴, 李培林, 张宇红, 等. 地貌测量中图像特征的匹配算法. 2008, 42(7): 870-874. [doi: 10.7652/xjtuxb200807019]
- 孙文方, 宋蓓蓓, 赵亦工. 一种新颖的图像多尺度几何变换及其应用. 2007, 41(8): 982-985. [doi: 10.7652/xjtuxb200708023]

(编辑 武红江)