DOI: 10.13382/j.jemi.B1902514

能量制约耦合比值一致性约束的图像匹配算法*

张书波[1]　钟廷勇[2]　贾宇明[3]

(1.重庆科创职业学院　人工智能学院　重庆　402160; 2.重庆工商大学　会计学院　重庆　400067;
3.电子科技大学　通信与信息工程学院　成都　610054)

摘　要:针对当前较多图像匹配算法主要依靠阈值调节来完成特征匹配,导致算法的匹配正确度不高以及鲁棒性较差,设计了一种采用比值一致性约束的图像匹配算法。通过盒式滤波器替代高斯偏导函数,求取 SIFT 行列式,以提取图像特征。在特征点的邻域内计算 Hu 不变矩,求其特征向量。以特征点的向量为依据,并引入特征点邻域的区域能量,以获取特征匹配结果。利用匹配点对在空间上的距离关系,建立比值一致性约束方法,利用匹配点对的欧氏度量比值,搜索错误匹配,优化特征匹配结果。通过实验分析发现,与当前已有的图像匹配算法相比,所提算法的具有更高的匹配正确度和鲁棒性。

关键词: 图像匹配;Hessian 矩阵;Hu 不变矩;欧氏距离度量;能量制约;比值一致性约束

中图分类号: TP391;TN0　　**文献标识码**:A　　**国家标准学科分类代码**: 520.6040

Image matching algorithm based on energy constraints and ratio consistency constraints

Zhang Shubo[1]　Zhong Tingyong[2]　Jia Yuming[3]

(1.College of Artificial Intelligence, Chongqing Creation Vocational College, Chongqing 402160, China;
2.College of Accounting, Chongqing University of Industry and Commerce, Chongqing 400067, China;
3.College of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In view of the current many image matching algorithms that mainly rely on threshold adjustment to complete feature matching, resulting in low matching accuracy and poor robustness of the algorithm. In this paper, an image matching method using ratio consistency constraints is designed on the basis of matrix. The box filter is used to approximate the Gauss partial derivative function, and the determinant is obtained by convolution of the box filter and the image on the basis of the matrix. The image features are extracted by the determinant. Hu invariant moments are computed in the neighborhood of feature points and their eigenvectors are obtained. Based on the vectors of feature points, the region energy of the neighborhood of feature points is introduced to obtain the matching results. Using the distance relationship between matching points in space, the ratio consistency constraint method is established. The Euclidean metric ratio of matching points is used to search for wrong matching and optimize the result of feature matching. Through experimental analysis, it is found that the matching results of the proposed method have better matching accuracy and robustness than those of the current methods.

Keywords: image matching; Hessian matrix; Hu invariant moment; Euclidean distance measure; energy constraints; ratio consistency constraints

收稿日期:2019-08-27　　Received Date: 2019-08-27

* 基金项目:重庆市教委科学技术研究计划(KJQN201905404)、教育部人文社会科学重点研究基地重点项目(15JJD790044)资助

0 引 言

信息技术高速发展的今天,数字图像已成为人们生活中不可或缺的一种信息传递方式。而计算机科学技术的快速发展,也为数字图像的处理带来了便利,人们可以借助于计算机科学技术对数字图像进行处理,其中图像匹配就是其中一种较为热门的数字图像处理技术[1],被广泛应用在产品缺陷检测、商标检索、模式识别以及信息安全等多个领域。

伴随着图像匹配技术在人们生活中使用的越来越广泛,人们对图像匹配技术的研究也越来越深入[1-3],相继研究出了较多的图像匹配方法。Dou 等[3]通过 SURF 算法检测出图像的特征点,计算出特征点的方向及向量描述符,利用欧氏距离计算出初始特征匹配结果,接着将稀疏表示方法和 Delaunay 三角网方法相结合,获取匹配图像。但是,这种方法是通过将特征点的欧氏距离与预设阈值实施比较来完成特征匹配,导致匹配准确度与算法适应性不强。Saleem 等[4]利用 SIFT 检测图像的特征点,接着通过归一化梯度筛选方法形成特征描述符,进而通过阈值比较法完成图像的匹配。由于其采用的 SIFT 方法获取的图像特征中含有较多的伪特征点,而且此方法对阈值的设定依赖较为严重,易出现较多的误匹配。Gao 等[5]通过对特征点的描述方法进行研究,提出了基于学习框架的二进制描述方法,并将该方法用于图像的匹配。这种方法能够有效的降低描述符的复杂度,提高算法效率,但是,二进制描述符难以抵御旋转等仿射变换,导致其鲁棒性不佳。Yang 等[6]设计了基于曲率及方向特征的曲线滤波器对图像滤波,接着使用曲线长度场估计方法获取特征描述,进而完成匹配。但是,这种方法无法消除其存在的误匹配,使其匹配准确性有待提高。

为了改善特征点的匹配精度与鲁棒性,本文提出了一种能量制约耦合比值一致性约束的图像匹配算法。利用盒式滤波器替代高斯偏导函数,计算出 SIFT 行列式,提取图像特征。通过计算特征点矩形邻域中的 Hu 不变矩,求取特征点的特征向量。将特征点的特征向量带入到欧氏度量函数中,计算特征点的欧氏距离,并在特征点邻域的区域能量制约下,通过特征点间的最小欧氏距离完成特征匹配。采用匹配点间的欧氏距离比值,建立比值一致性约束方法,对匹配特征点对进行除错优化,进而获取匹配结果。最后,对所提算法的特征点陪陪准确性与鲁棒性实施了测试分析。

1 本文所提匹配算法设计

能量制约耦合比值一致性约束的图像匹配算法的过程如图 1 所示,可将其分为图像特征检测、求取特征向量、特征匹配、匹配优化等 4 个过程。其中图像特征检测时,需要利用盒式滤波器与图像卷积计算的结果,求取 Hessian 矩阵行列式,并通过非极大值抑制计算,以准确的检测图像的特征。求取特征向量时,通过计算特征点矩形邻域中的 Hu 不变矩,以获取仿射抵御功能较好的特征向量。在特征匹配时,需要利用欧氏距离度量函数,计算特征点的欧氏距离,并且利用特征点邻域的区域能量差值作为制约条件,错误匹配点进行制约,以获取较为正确的特征匹配结果。在优化匹配特征时,需要以匹配点对的欧氏距离比值为依据,建立比值一致性约束方法,从匹配点对中搜索出错误匹配,以进一步提高匹配特征的正确度。

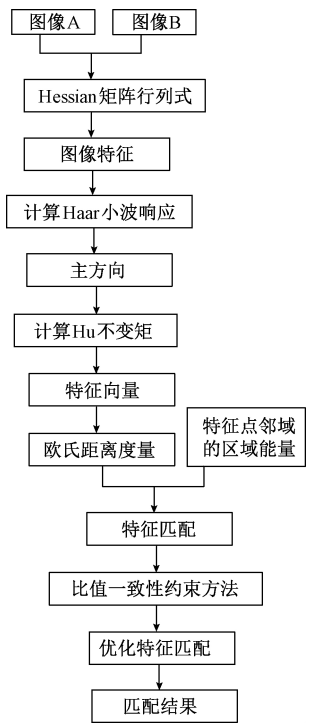


图 1 本文所提匹配算法的过程

Fig.1 The process of the proposed matching algorithm

1.1 图像特征检测

Hessian 算子能够对图像特征进行较为准确的检测。Hessian 算子在检测图像特征的过程中,需要利用盒式滤波器与图像卷积计算的结果,求取 Hessian 矩阵行列式,进而完成特征检测。对于一个可微函数 $f(x,y)$,其对应的 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{H}$ 可表述为[7]:

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \dfrac{\partial^2 f}{\partial x\partial y}\\ \dfrac{\partial^2 f}{\partial x\partial y} & \dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2}\end{bmatrix} \tag{1}$$

$\boldsymbol{H}$ 对应的 Hessian 矩阵行列式 $\det(\boldsymbol{H})$ 为：

$$\det(\boldsymbol{H}) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right)^2 \tag{2}$$

对于图像 I 中坐标和尺度分别为 (x,y) 与 α 的像素点，将其对应的高斯偏导函数 G 与 I 进行卷积计算，求取计算结果 $L_{xx}(x,y,\alpha)$、$L_{xy}(x,y,\alpha)$ 以及 $L_{yy}(x,y,\alpha)$，则该像素点对应的 Hessian 矩阵可表述为：

$$\boldsymbol{H}_I = \begin{bmatrix} L_{xx}(x,y,\alpha) & L_{xy}(x,y,\alpha) \\ L_{xy}(x,y,\alpha) & L_{yy}(x,y,\alpha) \end{bmatrix} \tag{3}$$

利用盒式滤波器替代高斯偏导函数 G，与 I 进行卷积计算，求取计算结果 U_{xx}、U_{xy} 以及 U_{yy}，则式(3)对应的 Hessian 矩阵行列式 $\det(\boldsymbol{H}_I)$ 可表述为：

$$\det(\boldsymbol{H}_I) = U_{xx}U_{xy} - (\beta U_{xy})^2 \tag{4}$$

其中，β 为误差补偿因子，其计算过程如下：

$$\frac{\| L_{xy}(1.2) \|}{\| L_{xx}(1.2) \|}\frac{\| U_{xx}(9) \|}{\| U_{xy}(9) \|} \approx 0.9 \tag{5}$$

式中：$\|\cdot\|$表示二范数。

当像素点的 $\det(\boldsymbol{H}_I) > 0$ 时，在以该像素点为中心的 3×3×3 区域 J 中，计算其响应值，若该值大于 J 中 26 个邻点的响应值，则检测该点为特征点[8]。

1.2　求取特征向量

检测出图像的特征后，需要对检测出的特征求出特征向量，用以对特征点进行描述，便于特征点的匹配及优化。Hu 不变矩能够较好的适应旋转、缩放等变换，能够对图像特征进行较好的表征。在此，将通过计算 Haar 小波与求取 Hu 不变矩的方法获取特征向量。

将特征点 p 为中心，以其尺度 α 的 6 倍作为半径，建立邻域圆 W。采用规格为 4α 的 Haar 小波，在 W 的 x、y 方向上计算 Haar 小波响应值[9]。利用角度为 60°，与 W 共原点的扇形，在 W 中旋转一圈，求取旋转过程中覆盖点的 Haar 小波响应值总和，主方向 θ 即为将最大总和值对应的方向[10]。

沿着 θ 以 $20\alpha \times 20\alpha$ 为尺寸，构建 p 的矩形邻域，并将其分解成 4 × 4 个子域。在每个子域中，求取其对应的 4 维 Hu 不变矩 $\xi_i(i=1,2,3,4)$。所有子域的 Hu 不变矩综合起来，可得到一个 64 维的向量 $\boldsymbol{V}$，将 $\boldsymbol{V}$ 归一化处理便可得到一个不受光照度影响的特征向量 $\bar{\boldsymbol{V}}$。其中，4 维 Hu 不变矩 $\xi_i(i=1,2,3,4)$ 的求取过程如下。

对于尺寸为 $M \times N$ 的图像 $f(x,y)$，其 $(p+q)$ 阶矩 m_{pq} 及中心矩 η_{pq} 分别为[11]：

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} x^p y^q f(x,y) \tag{6}$$

$$\eta_{pq} = \sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N} (x-x')^p (y-y')^q f(x,y) \tag{7}$$

其中，(x',y') 为 $f(x,y)$ 的灰度重心，$x' = m_{10}/m_{00}$，$y' = m_{01}/m_{00}$。

通过 η_{pq} 求取 $f(x,y)$ 的归一化中心矩 η'_{pq}：

$$\begin{aligned} &\eta'_{pq} = \eta_{pq}/\eta_{00}^{\varepsilon} \\ &\varepsilon = (p+q+2)/2, p+q = 2,3,\cdots \end{aligned} \tag{8}$$

在 η'_{pq} 的基础上，求取 Hu 不变矩 $\xi_i(i=1,2,3,4)$：

$$\begin{aligned} &\xi_1 = \eta'_{20} + \eta'_{02} \\ &\xi_2 = (\eta'_{20} - \eta'_{02})^2 + 4\eta'^2_{11} \\ &\xi_3 = (\eta'_{30} - 3\eta'_{12})^2 + (\eta'_{03} - 3\eta'_{21})^2 \\ &\xi_4 = (\eta'_{30} + \eta'_{12})^2 + (\eta'_{03} + \eta'_{21})^2 \end{aligned} \tag{9}$$

1.3　特征匹配

利用欧氏度量函数，对特征点的欧氏距离进行度量，以搜索匹配特征点是一种较为简单的特征匹配方法，过程如下。

特征点 A、B 的特征向量为 $\bar{\boldsymbol{V}}_A$、$\bar{\boldsymbol{V}}_B$ 时，其欧氏距离 $dis(A,B)$ 为[12]：

$$dis(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^{64} (\bar{V}_A(i) - \bar{V}_B(i))^2} \tag{10}$$

为了克服出现一个特征点匹配多个特征点，使得匹配结果不正确的情况。本文将利用特征点邻域的区域能量差值作为匹配约束，完成特征匹配，该过程如下。

首先，通过式(10)计算特征点 A 与其他所有特征点的 $dis(A,B)$ 值，并将最小 $dis(A,B)$ 值对应的点 B 作为准匹配点。

然后，建立特征点 $M \times N$ 尺寸的邻域 U，再计算特征点 A 与其他所有特征点的区域能量差值 ΔE。

令点 $p(x,y) \in U$，则该点的区域能量 E 为[13]：

$$E = \sum_{i=\frac{1-M}{2}}^{i=\frac{M-1}{2}}\sum_{j=\frac{1-N}{2}}^{j=\frac{N-1}{2}} \frac{p(x+i,y+j)}{M \times N} \tag{11}$$

利用式(11)计算不同特征点 A 与 B 对应的区域能量 $E(A)$ 与 $E(B)$，则 A 与 B 的区域能量差值 $\Delta E(A,B)$ 为：

$$\Delta E(A,B) = |E(A) - E(B)| \tag{12}$$

最后，比较所有区域能量差值 ΔE，若特征点 B 与特征点 A 的能量差值 $\Delta E(A,B)$ 最小，则判定特征点 A 与特征点 B 为匹配特征点。

1.4　优化匹配特征

根据匹配特征点的特性可知，两对匹配点间的欧氏距离之比具有相等性[14-15]。因此，本文将利用这一特性，将特征点间的比值作为约束，用以搜索错误匹配点，优化匹配特征。

令图像 I 中的特征点 e_1 与图像 I' 中的特征点 e'_1 为一对匹配点，且图像 I 与图像 I' 中的匹配点对总数为 k，分别置于集合 $E = \{e_1, e_2, e_3, \cdots, e_k\}$ 和集合 $E' = \{e'_1, e'_2, e'_3, \cdots, e'_k\}$ 中。

首先，计算 e_1 与 E 中所有点的欧氏距离，e'_1 与 E' 中

所有点的欧氏距离，并将结果分别置于集合 $dis(E)=\{d_{12},d_{13},d_{14},\cdots,d_{1k}\}$ 和集合 $dis(E')=\{d'_{12},d'_{13},d'_{14},\cdots,d'_{1k}\}$ 中。然后，将 d_{12} 与 $dis(E)$ 中其他欧氏距离做比值操作，将 d'_{12} 与 $dis(E')$ 中其他欧氏距离做比值操作。最后，对比值结果进行比较，若比值结果都相等，则判断特征点 e_1 与特征点 e'_1 为正确匹配点，反之为伪匹配点。

$$\frac{d_{12}}{d_{13}}=\frac{d'_{12}}{d'_{13}},\frac{d_{12}}{d_{14}}=\frac{d'_{12}}{d'_{14}},\cdots,\frac{d_{1k}}{d_{1k}}=\frac{d'_{1k}}{d'_{1k}} \tag{13}$$

2 实验结果与分析

为了突出本文所提算法的优势，将文献[16-19]作为对照组。以 IntelI5CPU，500 GB 硬盘，的 PC 作为实验平台，在 MATLAB7.10 仿真软件中，对不同算法的匹配性能进行测试。

2.1 匹配结果测试

图 2~5 所示分别为不同方法对无变换、光照度变换、旋转变换以及缩放变换图像的匹配结果。观察图 2 不同算法的匹配结果可以知道，较对照组的匹配结果而言，本文算法的匹配结果中，具有更多的匹配点数，而且错误匹配也更少。对图 3 不同算法的匹配效果进行比较发现，图 3(c)匹配图像中漏匹配较多，图 3(d)匹配图像中错误匹配较多，图 3(e)匹配图像中也具有较多的错误匹配，图 3(f)匹配图像中也存在一定的错误匹配和漏匹配，图 3(g)匹配图像中漏匹配与错误匹配都较少。将图 4 不同算法对旋转图像的匹配结果进行对比发现，文献[16-19]的匹配图像中，存在的错误匹配以及漏匹配都比所提算法的匹配图像多。从图 5 所示不同算法对缩放图像的匹配结果可见，所提算法的匹配图像较文献[16-19]算法的匹配图像，具有最少的错误匹配现象，以及匹配点数量也最多。因此，所提算法具有较好的匹配性能，能实现较好的图像匹配效果。因为所提算法采用 Hessian 矩阵行列式实现了对图像特征的准确检测，提高了算法匹配的准确度。同时所提算法还在通过旋转、缩放等变换适应性较强的 Hu 不变矩求取了特征向量，提高了所提算法对缩放等仿射变换的适应性，从而使得所提算法的匹配效果与适应性能较好。

为了进一步对所提算法的匹配性能进行测试，从 Mikolajczyk 图像集中，选取 boat 子集的一组图像[20]。并将其中一幅图像设置不同的旋转角度，利用不同算法对旋转后图像进行匹配。并根据匹配正确度，量化分析其匹配性能。

图 6 所示为匹配正确度统计结果。由图 6 发现，所提算法匹配图像的正确度最高，对旋转 50°图像匹配时，所提算法的匹配正确度为 90.94%。说明所提算法匹配性能较好。因为所提算法在欧氏距离度量的基础上，引入了图像的区域能量信息，用于制约特征匹配时，错误匹配的出现。另外所提算法还利用匹配点间的欧氏距离之

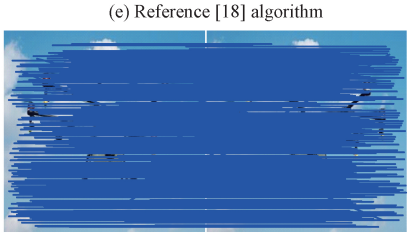
(a) 图像A
(a) Image A

(b)图像B
(b) Image B

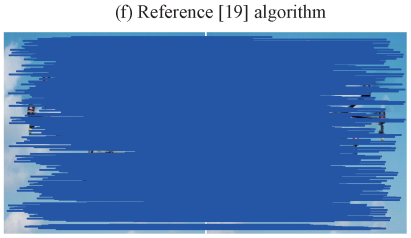
(c) 文献[16]算法
(c) Reference [16] algorithm

(d) 文献[17]算法
(d) Reference [17] algorithm

(e) 文献[18]算法
(e) Reference [18] algorithm



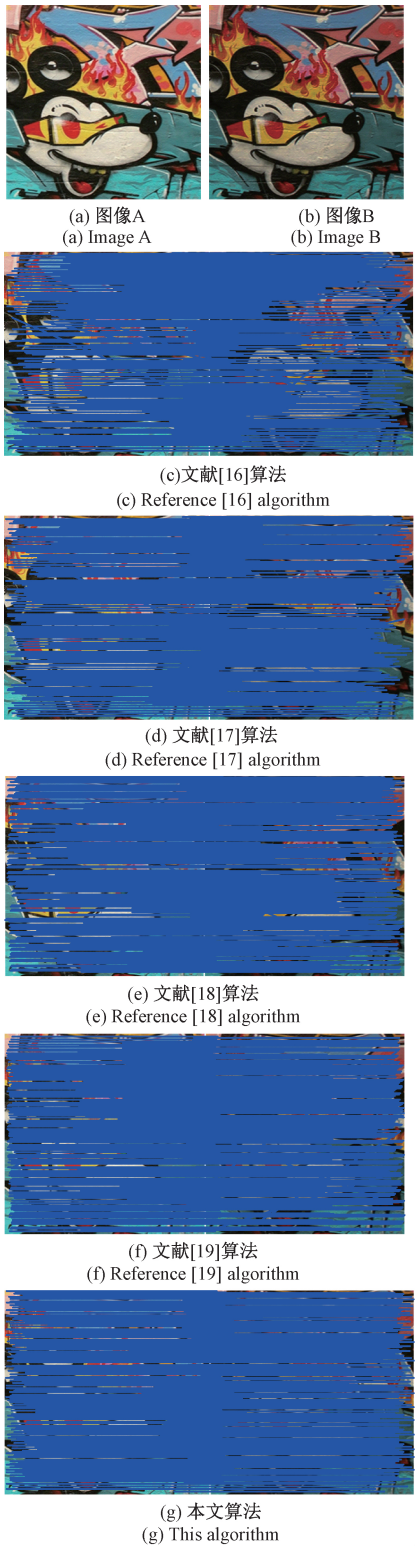
(f) 文献[19]算法
(f) Reference [19] algorithm



(g) 本文算法
(g) This algorithm

图 2 不同算法对无变换图像的匹配结果

Fig.2 Matching results of different algorithms for non- transformed images



(a) 图像A
(a) Image A

(b) 图像B
(b) Image B

(c)文献[16]算法
(c) Reference [16] algorithm

(d) 文献[17]算法
(d) Reference [17] algorithm

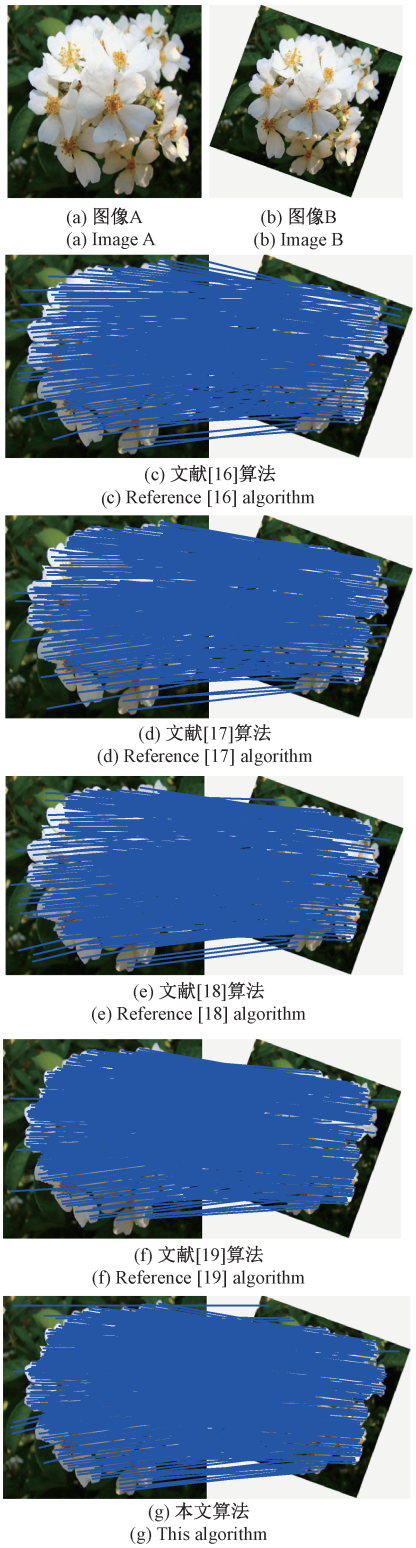
(e) 文献[18]算法
(e) Reference [18] algorithm

(f) 文献[19]算法
(f) Reference [19] algorithm

(g) 本文算法
(g) This algorithm

图 3　不同算法对光照度变换图像的匹配结果

Fig.3　Image matching results of illumination transformation by different algorithms



(a) 图像A
(a) Image A

(b) 图像B
(b) Image B

(c) 文献[16]算法
(c) Reference [16] algorithm

(d) 文献[17]算法
(d) Reference [17] algorithm

(e) 文献[18]算法
(e) Reference [18] algorithm

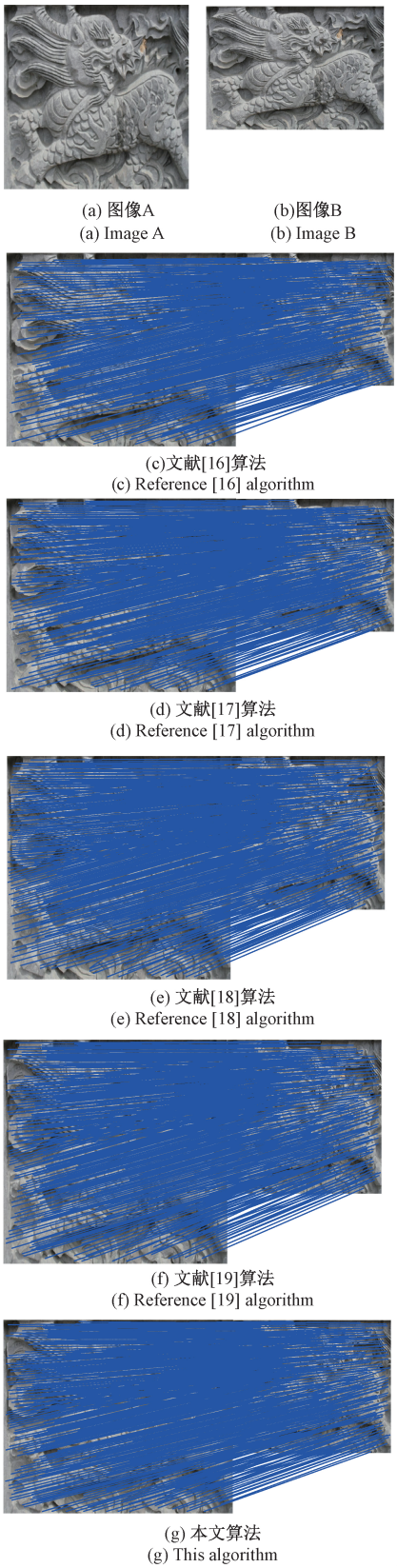
(f) 文献[19]算法
(f) Reference [19] algorithm

(g) 本文算法
(g) This algorithm

图 4　不同算法对旋转变换图像匹配结果

Fig.4　Image matching results of rotation transformation by different algorithms

比具有相等性的特性，建立了比值一致性约束方法，搜索出错误匹配点，优化匹配结果，从而提高了所提算法的匹配性能，使得匹配正确度较高。文献[16]通过学习滤波器，将局部图像块线性投影到子空间上以捕获图像特征，



(a) 图像A
(a) Image A

(b)图像B
(b) Image B

(c)文献[16]算法
(c) Reference [16] algorithm

(d) 文献[17]算法
(d) Reference [17] algorithm

(e) 文献[18]算法
(e) Reference [18] algorithm

(f) 文献[19]算法
(f) Reference [19] algorithm

(g) 本文算法
(g) This algorithm

图 5 不同算法对缩放变换图像的匹配结果

Fig.5 The matching results of different algorithms for scaling transformed images

通过尺度 LBP 和局部相位量化特征形成描述子,进而将特征相似测量结果与相似阈值比较完成图像匹配。由于这种方法中基于 LBP 的描述子的抗仿射变换性较差,且其通过调节阈值完成匹配,易出现误匹配,从而导致其匹配性能不佳。文献[17]利用 SIFT 方法提取特征并形成描述子,接着通过图像的面积比定义了一种仿射不变坐标系,并在该坐标系下实现图像匹配。由于 SIFT 方法提取的特征点纯度不高,降低了该算法的匹配性能。文献[18]利用小波变换自适应的提取图像的特征,并通过 SURF方法形成描述子,并在 K 均值聚类的基础上实现匹配。由小波变换的多方向性较弱,其对图形变换的过程中易丢失图像信息,使得提取的图像特征完整性不理想,从而导致该算法的匹配效果欠佳。文献[19]在尺度空间的基础上提取特征点,再借助汉明距离完成匹配。但是,该方法利用汉明距离完成匹配时,需要设置距离阈值,易导致匹配错误,从而限制了该算法的匹配准确性。

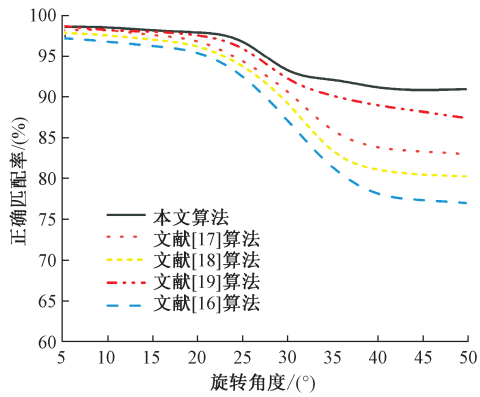


图 6 不同算法的匹配正确度测试结果

Fig.6 Matching accuracy test results of different algorithms

2.2 本文算法复杂度分析

根据本文所提算法可知,其复杂度主要集中在特征点的提取、Hu 不变矩的计算、基于区域能量的匹配,以及匹配优化等 4 个过程。令初始图像尺寸为 $M\times N$,则采用 Hessian 矩阵来检测图像特征点的复杂度为 $o[(M\times N)^2]$。对于特征点的 Hu 不变矩的计算复杂度为 $o[a+\log(M\times N)]$。其中,a 为特征点的数量。基于区域能量的匹配的复杂度为 $o(a^2)$。在优化匹配过程中,其复杂度为 $o(k)$,其中,k 为特征点匹配的对数。综上可知,所提算法的复杂度为 $o[(M\times N)^2+a+\log(M\times N)+a^2+k]$。可见,相对于文献[17-18]而言,所提算法的复杂度较低,是可以接受的。但是,要高于文献[16,19]。

为了具体量化所提算法的匹配耗时,对图 2~5 的匹配时间进行统计,结果如表 1 所示。对于不同的图像而言,文献[16]的复杂度最低,其效率最高,例如对于图 5 而言,其耗时仅为 3.17 s。而所提算法也有较高的匹配

效率,其耗时与文献[19]较为接近。另外,文献[17-18]两种技术的复杂度较高,匹配耗时最高。

表 1　不同算法的匹配时间测试

Table 1　Matching time test of different algorithms (s)

算法	图 2	图 3	图 4	图 5
本文	3.02	3.37	2.89	3.68
文献[16]	2.69	2.84	2.54	3.17
文献[17]	4.96	5.12	3.73	5.52
文献[18]	4.68	4.85	3.62	5.22
文献[19]	2.87	3.12	2.67	3.43

3　结　论

本文将 SIFT 矩阵引入图像匹配过程,利用其形成的行列式准确提取图像的特征。利用特征点邻域的 *Hu* 不变矩,获取特征向量。采用欧氏距离度量函数对不同特征点的特征向量进行度量,并利用图像的区域能量信息差值作为约束,实现特征匹配。利用匹配特征的距离特性,建立比值一致性约束方法,删除错误匹配点,优化匹配结果。实验结果显示,所提算法具有较好的匹配性能,能够较为准确的实现图像匹配。

参考文献

[1] 余震, 何留杰, 王振飞. 基于点线投影模型与几何误差制约规则的图像匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 87-94.
YU ZH, HE L J, WANG ZH F. Image matching algorithm based on point-line projection model and geometric error restriction rule [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4): 87-94.

[2] 林宁. 改进的多尺度 Retinex 耦合夹角约束的图像匹配算法[J]. 包装工程, 2018, 39(23):191-199.
LIN N. An improved multi-scale retinex coupling angle constraint image matching algorithm [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23):191-199.

[3] DOU J F, QIN Q, TU Z M. Robust image matching with cascaded outliers removal[J]. Pattern Recognition and Image Analysis,2017,27(3):480-493.

[4] SALEEN S, BAIS A, SABLATNIG R. Towards feature points based image matching between satellite imagery and aerial photographs of agriculture land[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2016,126(8):12-20.

[5] GAO Y Q, HUANG W L, QIAO Y. Learning multiple local binary descriptors for image matching [J]. Neurocomputing, 2017,266(1):239-246.

[6] YANG J F, SHI Y H, JIA G M. Finger-vein image matching based on adaptive curve transformation [J]. Pattern Recognition, 2017, 66(1): 34-43.

[7] CHAZA C, CORINNE V L, YASMINA C. Information fusion for unsupervised image segmentation using stochastic watershed and Hessian matrix[J]. IET Image Processing, 2018, 12(4): 525-531.

[8] ZHU S Z, LIU L Z, CHEN S. Image feature detection algorithm based on the spread of Hessian source [J]. Multimedia Systems, 2017, 23(1): 105-117.

[9] 张志斌,赵帅领,罗锡文. 基于 SURF 算法的绿色作物特征提取与图像匹配方法[J].农业工程学报, 2015, 14(31): 172-178.
ZHANG ZH B, ZHAO SH L, LUO X W. Matching method of green crops based on SURF feature extraction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14):172-178.

[10] SUN X B, CHEN X D, XU Y. Fast CU partition strategy for HEVC based on Haar wavelet [J]. IET Image Processing, 2017, 11(9): 717-723.

[11] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. Transactions on Information Theory Ire, 1962, 8(2): 179-187.

[12] 王卫兵,白小玲,徐倩. SURF 和 RANSAC 的特征图像匹配[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(1): 117-121.
WANG W B, BAI X L, XU Q. Feature image matching of SURF and RANSAC [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23 (1): 117-121.

[13] ZHANG Q, MALDAGUE X. An adaptive fusion approach for infrared and visible images based on NSCT and compressed sensing[J]. Infraed Physics & Technology, 2016, 74(1):11-20.

[14] LIU J F. Feature matching of fuzzy multimedia image based on improved SIFT matching[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2016, 9(1): 34-38.

[15] KIM S, HAM B, KIM B. Mahalanobis distance cross-correlation for illumination-invariant stereo matching [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(11):1844-1859.

[16] ARASHIOO S. Multiscale binarised statistical image features for symmetric face matching using multiple descriptor fusion based on class-specific LDA[J]. Pattern Analysis and Applications,2017,20(1):113-126.

[17] LI J Y, HU Q W, AI M Y. Robust feature matching for geospatial images via an affine-invariant coordinate system[J]. Photogrammetric Record, 2017, 159(32): 317-331.

[18] ZHANG X Q, LIU Y Y, CAO Y C. A fabric image matching algorithm based on improved SURF and K-means clustering[J]. Journal of East China University of

Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,43(1):105-112.

[19] LIN T, LOU X P, LIU F. Improved feature points matching algorithm on sequence image[J]. Computer Engineering and Applications,2017,53(9):141-145.

[20] 王双玲,龙成章,刘辉. 基于双向异步投票策略医学图像特征点匹配[J]. 中国医学物理学杂志,2016,33(4):423-426.
WANG SH L, LONG CH ZH, LIU H. Medical image feature point matching based on two-way asynchronous voting strategy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(4):423-426.

作者简介

张书波,2007年于北京航空航天大学获得学士学位,2018年于电子科技大学获得硕士学位,现为重庆科创职业学院讲师,主要研究方向为图像处理、计算机应用技术、软件信息服务。
E-mail: Zhangsbo1984bjdz@163.com

Zhang Shubo received B.Sc. from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2007, M.Sc. from University of Electronic Science and Technology in 2018. Now he is a lecturer at Chongqing Vocational College of Science and Technology. His main research interests include image processing, computer application technology and software information service virtual reality technology.

钟廷勇,分别在2006年,2009年和2013年于东北师范大学获得学士学位,硕士学位和博士学位,现为重庆工商大学副教授,主要研究方向为计算机图像、大数据与决策。
E-mail: zyyong1984cqgd@sina.com

Zhong Tingyong received B.Sc., M.Sc. and Ph.D. al from Northeast Normal University in 2006, 2009 and 2013, respectvely. Now he is an associate professor at Chongqing University of Commerce and Industry. His main research interests include computer image, big data and decision.

贾宇明,1982年于成都电讯工程学院获得学士学位,2010年于电子科技大学获得硕士学位,现在电子科技大学教授,主要研究方向为信息处理、物联网、嵌入式系统、软件工程与测试。
E-mail: JiaY1957ele@126.com

Jia Yuming received B. Sc. from Chengdu Institute of Telecommunication Engineering in 1982, M.Sc. from University of Electronic Science and Technology of China in 2010. Now he is a professor at University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include information processing, Internet of things, embedded system, software engineering and testing.