

基于 U 弦长曲率的抗旋转性广义 Hough 变换算法

陈彬彬*, 邓新蒲, 杨俊刚

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

(*通信作者电子邮箱 borg_2013@163.com)

摘要: 针对广义 Hough 变换(GHT)算法匹配发生旋转图像中的目标形状时发生误匹配的问题,提出一种基于 U 弦长曲率的具有抗旋转性的广义 Hough 变换算法。首先,对模板形状采用边缘点的 U 弦长曲率和偏移向量等特征构建具有旋转不变性的修改的 R-表;其次,以图像中边缘点的曲率作为索引,查找构建的 R-表得到偏移向量等信息;最后,根据查得的信息计算图像中目标形状的可能的参考点位置进行投票。根据投票结果即可提取出图像中目标形状的位置。当图像中目标形状分别旋转 0°、2°、4°、5°、6° 时,提出的算法的匹配结果均在图像中目标形状位置具有非常明显的峰值。仿真结果表明,改进的广义 Hough 变换(I-GHT)算法具有良好的抗旋转性和抗噪性。

关键词: 广义 Hough 变换; 旋转不变性; U 弦长曲率; 目标识别; 形态分析

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Orientation-invariant generalized Hough transform algorithm based on U-chord curvature

CHEN Binbin*, DENG Xinpu, YANG Jungang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Focusing on the mismatch occurred in template matching when using Generalized Hough Transform (GHT) algorithm to extract the target shape from the rotated image, an improved orientation-invariant generalized Hough transform algorithm based on U-chord curvature was proposed. Firstly, the modified R-table with orientation-invariant performance was constructed by using features of U-chord curvature and displacement vectors of edge points of the template shape; secondly, the information such as the displacement vector was achieved by calculating the curvature of edge points as an index to lookup the constructed R-table; finally, the possible locations of reference points were calculated according to the information. The point with maximum voting was the location of the target shape of the image. When the target shape of the image is rotated by 0°, 2°, 4°, 5° and 6° individually, the sharper peaks occur in the target shape position of all the rotation images by using the proposed algorithm. The simulation results show that the Improved Generalized Hough Transform (I-GHT) algorithm has high stability in rotation and noise conditions.

Key words: Generalized Hough Transform (GHT); orientation-invariant; U-chord curvature; target recognition; shape analysis

0 引言

近些年来,图像中目标形状的检测和识别成为计算机视觉、目标识别等领域的重要研究内容之一。常用的从图像中提取目标形状的方法,主要包括基于像素层面和模板匹配进行形状提取。从像素层面提取目标形状是通过确定图像的背景像素来确定,比如背景差分法、阈值处理法等。模板匹配是一种基于模型的方法,通过搜索已知模型与一幅图像像素之间的最佳相关性来提取形状。Hough 变换^[1]是一种基于“证据收集”的模板匹配方法,主要用来提取图像中的规则形状,比如圆、直线、椭圆等形状。

1981 年, Ballard^[2] 提出了广义 Hough 变换 (Generalized Hough Transform, GHT),不仅可以检测和识别图像中的规则形状,而且可以用来检测和识别图像中的不规则形状,立即引起了计算机视觉、目标识别等领域学者的广泛关注。文献

[3]充分分析了 GHT 算法在考虑图像中的目标形状发生旋转或者缩放时,需要在参数空间增加旋转或者尺度因子,导致进行模板匹配时的运算复杂度大和内存开销大的问题。而且文献[3]对几种通过压缩参数来改进的 GHT 算法进行了性能比较分析,指出 Thomas^[4]改进的 GHT 算法的抗旋转性能优于另外几种。文献[5]对向参数空间映射时造成的大量冗余进行改进,从而提高变换的效率。文献[6]通过约束搜索空间提高 GHT 算法的性能。文献[7–8]运用改进的 GHT 算法进行图像分割和目标识别等处理,体现了较好的性能。

为了使 GHT 算法适应旋转,同时保持高效的性能,许多改进的 GHT 算法被提出^[3],改进的基本方法是将传统 GHT 算法构建的 R-表替换为点扩散函数 (Point Spread Function, PSF),在图像中提取目标形状时,对于图像中的每一个边缘点都需要遍历点扩散函数进行投票。但是,使用点扩散函数替代 R-表,一方面增大了模板匹配时的计算量,另一方面影响

收稿日期: 2015-04-02; 修回日期: 2015-06-02。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401474)。

作者简介: 陈彬彬(1989–),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向: 空间信息获取与处理、图像处理; 邓新蒲(1966–),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向: 空间信息获取与处理、无源定位; 杨俊刚(1984–),男,江西樟树人,讲师,博士,主要研究方向: 空间信息获取与处理。

确定目标形状位置的性能。为了克服这个缺陷,本文提出基于 R-表的适应旋转的 GHT 算法。

1 广义 Hough 变换

1.1 传统的广义 Hough 变换

传统的 GHT 构建 R-表时,选用目标形状的边界点的梯度方向角 ϕ 作为 R-表的索引,索引项对应的是偏移向量 γ ,如图 1 所示。图中点 r 为目标形状的参考点,一般选为目标形状的中心,偏移向量 γ 为从点 r 指向目标形状的边界点 p 的向量,角 α 和距离 λ 分别为 γ 的方向角和 2-范数。遍历模板中目标形状的边界点,计算梯度方向角和偏移向量,完成构建 R-表。

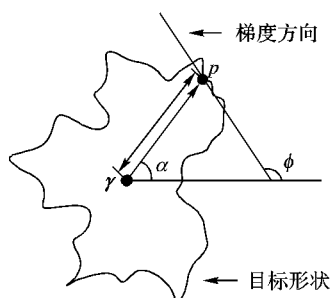


图 1 GHT 算法的几何关系

R-表构建完成以后,将 R-表作为查找表,从图像中提取目标形状,主要步骤如下:

步骤 1 计算图像中边缘点的梯度方向角 ϕ_i 。

步骤 2 根据梯度方向角 ϕ_i ,查找 R-表得到偏移向量 $\gamma_i(\lambda, \alpha)$ 。

步骤 3 根据 $\gamma_i(\lambda, \alpha)$ 和几何关系,计算图像中目标形状的可能参考点位置,并在累加器中的相应项加 1,即所谓的投票。

步骤 4 重复步骤 1 ~ 步骤 3,遍历图像中的边缘点,投票结果最大值的位置即为图像中目标形状的参考点位置。

上述计算过程,没有考虑图像中目标形状发生旋转的情况。若考虑图像中的目标形状发生旋转时,需要增加旋转因子,设置旋转角度步长,遍历所有的旋转角度,计算图像中目标形状的可能参考点位置,并进行投票,正如文献[3]所言,计算量大,耗用内存多。

1.2 改进的 GHT

本文将 Thomas 改进的 GHT 算法^[4] 称之为 T-GHT (T-Generalized Hough Transform),该 T-GHT 是一种抗旋转性的高效 GHT 算法。

T-GHT 算法与传统的 GHT 算法最主要不同的地方在于, T-GHT 不是根据模板形状构建 R-表,而是定义 PSF。其 PSF 使用边界点的相对角 β 和偏移向量的 2-范数来定义。如图 2 所示,相对角 β 为梯度方向角与偏移向量的夹角 ($\phi - \alpha$)。

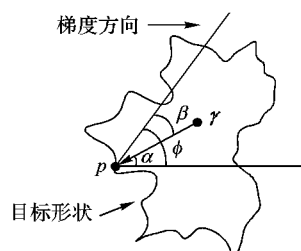


图 2 T-GHT 算法的几何关系

由于相对角 β 是梯度方向角与偏移向量的夹角,在图像发生旋转时,该角不变,且范数与方向无关,因此该算法具有抗旋转性。

2 基于 U 弦长曲率的抗旋转广义 Hough 变换

由于 T-GHT 算法为了压缩参数空间,使用 PSF 代替了传统 GHT 算法的 R-表,因此在计算图像中目标形状的可能参考点位置时,对图像中每一个边界点,都要遍历 PSF 项代入公式进行计算,引入大量的干扰,因此在进行模板匹配时,可能导致出现误匹配的问题。本文通过构建具有旋转不变性的 R-表,提出一种抗旋转性的 GHT 算法。在本文将该算法称为 I-GHT (Improved Generalized Hough Transform)。

2.1 构建旋转不变性的 R-表

传统的 GHT 算法构建的 R-表不能适应旋转性的原因在于,其作为 R-表索引的梯度方向角随着图像的旋转而变化。因此,若构建的 R-表的索引以及索引的内容具有旋转不变性,即可提出一种高效的具有旋转不变性的 GHT 算法。

2.1.1 R-表的索引

曲率是几何形状的重要特征之一,曲率的计算方法有很多^[9-11]。若存在一种曲率计算方法满足以下条件,则可以选择曲率作为 R-表的索引。

1) 丰富性。不同形状的边缘点计算的曲率值存在差异,能够通过曲率值区分不同形状的边界点。

2) 抗旋转性。目标形状旋转前后,其曲率值保持不变,或者在较小的范围内波动。

3) 抗噪性。目标形状的部分边界点在 4 邻域内波动,对曲率计算影响较小。

U 弦长曲率^[11] 在抗噪性、抗旋转性方面的性能较好,且满足上述 3 个条件,因此选用该算法计算离散曲率,且将曲率作为 R-表的索引。

如图 3 所示,对曲线上的边界点 p_i ,确定 p_i 的支持邻域的前端点 p_i^f 和后端点 p_i^b ,根据式(1)来计算 U 弦长曲率:

$$c_i = s_i \sqrt{1 - \left(\frac{D_i}{2U}\right)^2} \quad (1)$$

其中: $s_i = \text{sign}[(x_i - x_i^b)(y_i^f - y_i^b) - (x_i^f - x_i^b)(y_i - y_i^b)]$, $D_i = \|p_i^b p_i^f\|$, (x_i, y_i) 、 (x_i^b, y_i^b) 、 (x_i^f, y_i^f) 分别为 p_i 、 p_i^b 、 p_i^f 的坐标; U 为设置常数。

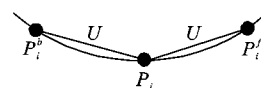


图 3 U 弦长曲率的支持邻域

2.1.2 R-表的内容

如图 2 所示,当图像发生旋转时,目标形状的边缘点的偏移向量 γ 的 2-范数 λ 和相对角 β 保持不变;同时,根据几何关系,利用 λ 、 β 和对应的曲率 c 便可计算图像中目标形状的可能参考点位置,因此可以选用这些具有抗旋转性的特征作为 R-表的内容,即 R-表中对应的索引下面保存的信息为 (λ, β) 。

2.2 I-GHT 算法的匹配步骤

实现了旋转不变性的 R-表的构建,就可以依据传统 GHT 算法的思想实现具有良好抗旋转性的 I-GHT 算法。其主要步骤如下:

步骤 1 根据模板中的目标形状构建 R-表。

对目标形状的边界点依次求取曲率 c 、 λ 和 β ,保存为 R-表中的一行;另外,曲率相同的边缘点的 λ 和 β 放在同一个 R-表中。遍历所有的边界点,即可完成 R-表构建。

步骤 2 计算图像中的边缘点的曲率 c_i 、梯度方向角 ϕ_i 。

步骤 3 将 c_i 作为索引,查询 R-表,得到 (λ, β) 。

由于旋转前后边界点的曲率存在一定的波动,因此在查询 R-表时,索引曲率在 $[|c_i| - \varepsilon, |c_i| + \varepsilon]$ 范围之内,即认为满足要求的项。其中 ε 为波动误差,本文仿真时选为 0.07。

步骤 4 根据式(2),计算图像中的目标形状的可能参考点坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \cos(\phi_i - \beta) \\ -\sin(\phi_i - \beta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 (x_i, y_i) 为当前边缘点坐标。

步骤 5 根据计算出来可能参考点位置进行投票。

步骤 6 重复步骤 2 ~ 步骤 5,遍历图像中的边缘点。

投票最大值的位置即为图像中存在的目标形状对应的参考点位置。

3 仿真实验

使用 Matlab 软件,对本文改进的 GHT 算法的性能进行测试。测试使用的目标形状和待匹配图像如图 4 所示。

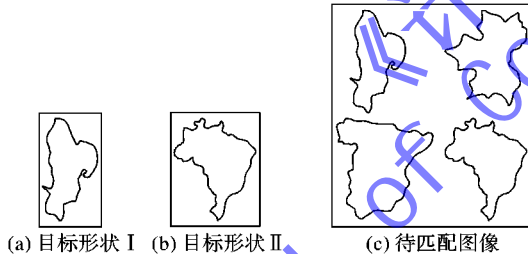


图 4 目标形状和待匹配图像

仿真主要分无噪声和存在噪声两种情况。将目标形状依次旋转 0° 、 2° 、 4° 、 5° 、 6° ,使用 T-GHT 算法和 I-GHT 算法提取待匹配图像中目标形状的位置。统计两种算法对图像中目标形状的可能参考点位置的投票结果,并绘出归一化后的投票结果线框图。目标形状旋转角度记为 θ 。

3.1 无噪声的情况

不加噪声时 T-GHT 与 I-GHT 的抗旋转性能对比如图 5、图 6 所示。

3.1.1 目标形状 I 的匹配结果

如图 5 所示,T-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置有明显的峰值; θ 为 5° 、 6° 时,出现误匹配。

如图 5 所示,I-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 、 5° 、 6° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置有明显的峰值。

3.1.2 目标形状 II 的匹配结果

如图 6 所示,T-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 时,该算法投票

结果在图像中目标形状位置有明显的峰值; θ 为 5° 、 6° 时,出现误匹配。

如图 6 所示,I-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 、 5° 、 6° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置有明显的峰值。

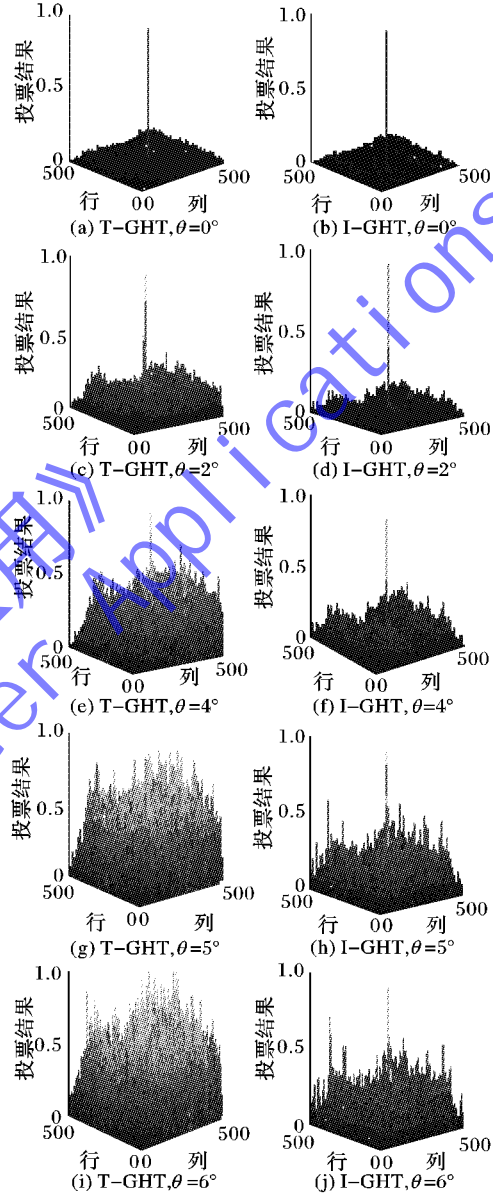


图 5 不加噪声时匹配目标形状 I 的 T-GHT 和 I-GHT 的抗旋转性能

3.2 存在噪声的情况

对待匹配图像中的目标形状,每隔若干个边界点,使一个边界点随机调整到其 4-邻域位置,以此为图像添加噪声。通过添加噪声,使图像中的目标形状的轮廓发生波动。在待匹配图像中目标形状存在噪声的情况下,T-GHT 算法与 I-GHT 算法的抗旋转性能对比如图 7、图 8 所示。

3.2.1 目标形状 I 的匹配结果

如图 7 所示,T-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置有明显的峰值; θ 为 5° 、 6° ,出现误匹配。

如图 7 所示,I-GHT 算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 、 5° 、 6° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置均有明显的峰值。

3.2.2 目标形状Ⅱ的匹配结果

如图8所示,T-GHT算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置有明显的峰值; θ 为 5° 、 6° 时,出现

误匹配。

如图8所示,I-GHT算法: θ 为 0° 、 2° 、 4° 、 5° 、 6° 时,该算法投票结果在图像中目标形状位置均有明显的峰值。

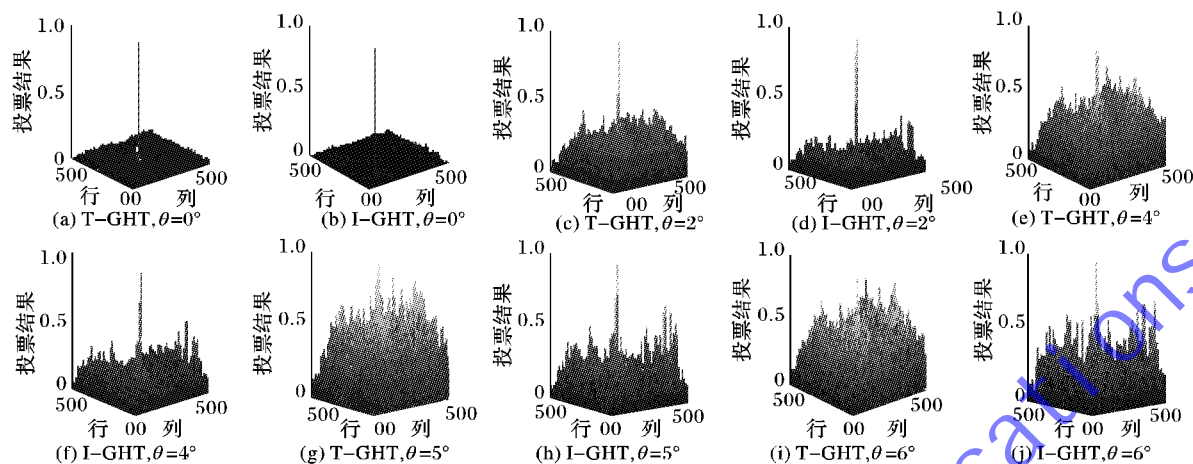


图6 不加噪声时匹配目标形状Ⅱ的T-GHT和I-GHT的抗旋转性能

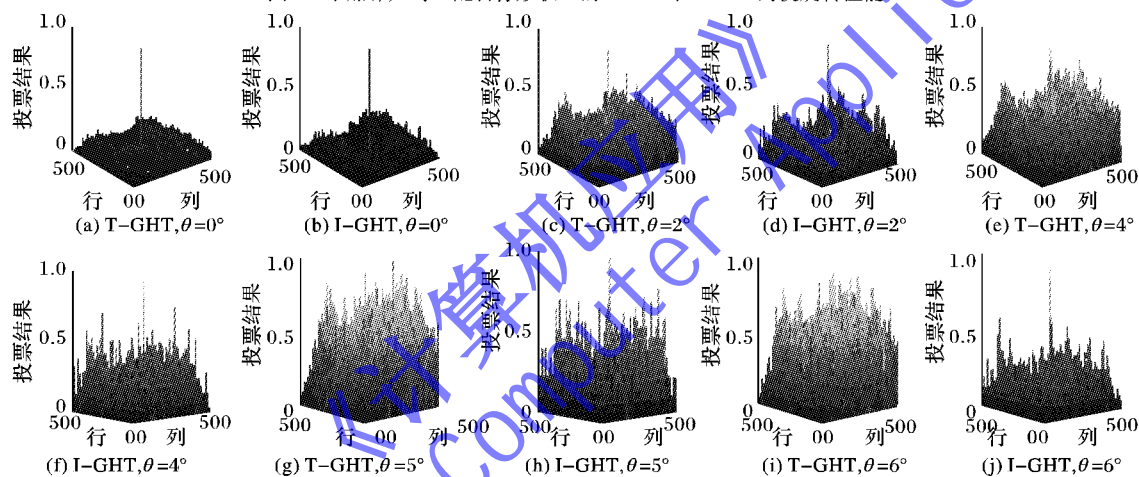


图7 加噪声时匹配目标形状Ⅰ的T-GHT和I-GHT的抗旋转性能

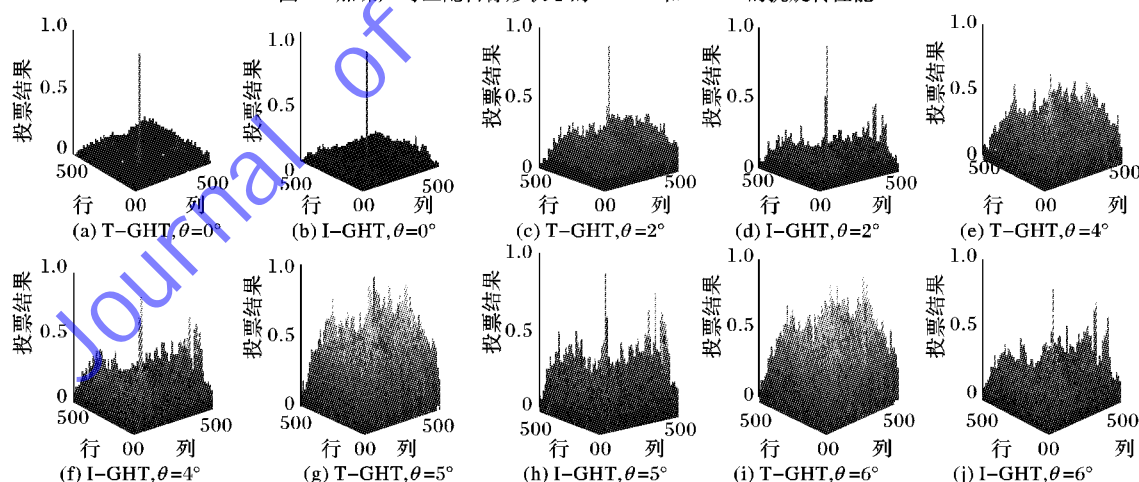


图8 加噪声时匹配目标形状Ⅱ的T-GHT和I-GHT的抗旋转性能

3.3 仿真结果分析

仿真实验,分别采用目标形状Ⅰ和目标形状Ⅱ进行模板匹配。由图5~8可知,目标形状发生旋转角度较小时,T-GHT算法匹配效果较好,然而当旋转角度在一定范围内增大时,其计算图像中目标形状的可能参考点位置时引入的无关干扰项逐渐增大,使其匹配性能变差,甚至出现误匹配的情

况。而本文提出的I-GHT算法,由于建立了R-表,计算图像中目标形状的可能参考点位置过程中滤除大量无关项的干扰,当旋转角度在同样的范围内增大时,仍能保持较好的匹配性能。

另外,在待匹配图像中的目标形状存在噪声的情况下进行模板匹配,I-GHT算法能够保持比较好的匹配性能,说明该

算法具有较好的抗噪性。

因此,在一定的旋转范围内,本文提出的I-GHT算法的抗旋转性能优于T-GHT算法。

4 结语

大多数改进的广义Hough变换算法,为了适应旋转的情况,通常采用PSF替代R-表的方法,然而,在计算图像中目标形状可能的参考点位置时,无法对PSF进行筛选,因此引入了大量的干扰,造成误匹配。针对这种情况,本文采用U弦长曲率和偏移向量等特征构建R-表,通过曲率建立起模板中目标形状的边界点与图像中目标形状的边缘点之间的联系,在模板匹配的过程中,根据曲率查询R-表,起到边界点的筛选作用,从而减少误匹配,增强图像发生旋转时的匹配性能。通过仿真表明,本文改进的GHT算法具有抗旋转性和抗噪性。另外,目标形状的曲率特征比较丰富的情况下,I-GHT算法的计算效率高于T-GHT算法。下一步工作是继续研究和优化抗旋转性的GHT算法,探讨影响该算法稳定性的因素,进而提高算法的稳定性,并将该算法应用到工程中去。

参考文献:

- [1] HOUGH V, PAUL C. Method and means for recognizing complex patterns: United States, 3069654 [P]. 1962-12-18.
- [2] BALLARD D H. Generalized the Hough transform to detect arbitrary shapes [J]. Pattern Recognition, 1981, 13(2): 111-122.
- [3] KASSIM A A, TAN T, TAN K H. A comparative study of efficient generalised Hough transform techniques [J]. Image and Vision Computing, 1993, 17(10): 737-748.
- [4] THOMAS A D H. Compressing the parameter space of the generalised Hough transform [J]. Pattern Recognition Letters, 1993, 13(2): 107-112.
- [5] ULRICH M, STEGER C, BAUMGARTNER A. Real-time object recognition using a modified generalized Hough transform [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(3): 2557-2570.
- [6] WANG X, JING J, GE Q. Improved generalized Hough transform for the recognition of irregular objects [J]. Computer Engineering, 2007, 33(8): 178-179. (王鑫, 荆晶, 葛庆平. 检测不规则图形的改进广义Hough变换[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 178-179.)
- [7] CHUNG C H, CHENG S C, CHANG C C. Adaptive image segmentation for region-based object retrieval using generalized Hough transform [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(10): 3219-3232.
- [8] XU J, FU K, SUN X. An invariant generalized Hough transform based method of inshore ships detection [C]// Proceedings of the 2011 International Symposium on Image and Data Fusion. Piscataway: IEEE, 2011: 1-4.
- [9] ROSENFELD A, WESZKA J S. An improved method of angle detection on digital curves [J]. IEEE Transactions on Computers, 1975, 24(9): 940-941.
- [10] HE X C, YUNG N H C. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1-12.
- [11] GUO J, ZHONG B. U-chord curvature: a computational method of discrete curvature [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(8): 683-691. (郭娟娟, 钟宝江. U弦长曲率: 一种离散曲率计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(8): 683-691.)
- [3] SERGIENKO R B, SEMENKIN E S. Competitive cooperation for strategy adaptation in coevolutionary genetic algorithm for constrained optimization [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2010: 1-6.
- [4] LEUNG Y W, WANG Y. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(1): 41-53.
- [5] LEE C-Y, YAO X. Evolutionary programming using mutations based on the Levy probability distribution [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(1): 1-13.
- [6] SUN J, ZHANG Q, TSANG E P K. DE/EDA: a new evolutionary algorithm for global optimization [J]. Information Sciences, 2005, 169(3/4): 249-262.
- [7] WANG Y, DANG C. An evolutionary algorithm for global optimization based on level-set evolution and Latin squares [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(5): 579-595.
- [8] XING H, LIU X, JIN X, et al. A multi-granularity evolution based quantum genetic algorithm for QoS multicast routing problem in WDM networks [J]. Computer Communications, 2009, 32(2): 386-393.
- [9] CHENG Y, WANG X, HAO M. An estimation of distribution algorithm with diversity preservation [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 333-339. (程玉虎, 王雪松, 郝名林. 一种多样性保持的分布估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 333-339.)
- [10] VALIAN E, MOHANNA S, TAVAKOLI S. Improved cuckoo search algorithm for global optimization [J]. International Journal of Communications and Information Technology, 2011, 1(1): 31-44.
- [11] ZHANG Y, McCORD R P, HO Y J, et al. Spatial organization of the mouse genome and its role in recurrent chromosomal translocations [J]. Cell, 2012, 148(5): 908-921.
- [12] NOMAN N, IBA H. Accelerating differential evolution using an adaptive local search [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(1): 107-125.
- [13] SUGANTHAN P N, HANSEN N, LIANG J J, et al. Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2005 special session on real-parameter optimization [EB/OL]. [2015-01-04]. http://www.researchgate.net/publication/235710019_Problem_Definitions_and_Evaluation_Criteria_for_the_CEC_2005_Special_Session_on_Real-Parameter_Optimization.
- [14] AHMED F, DEB K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms [J]. Soft Computing, 2013, 17(7): 1283-1299.

(上接第2589页)