

基于平稳小波变换和亮度序的局部特征描述子

房贻广¹, 颜 普², 刘 武³, 张 骥⁴, 谭守标²

(1. 国网安徽省电力公司 安全监察质量部, 合肥 230022; 2. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230601;
3. 国网安庆供电公司 安全监察质量部, 安徽 安庆 246000; 4. 安徽南瑞继远电网技术有限责任公司, 合肥 230088)

摘 要: 局部区域的非线性亮度变化通常会造成局部特征描述子的不稳定。针对该问题, 在平稳小波变换和亮度序的基础上, 提出一种局部特征描述子。利用 Hessian-Affine 算子检测仿射协变区域, 对检测区域进行平稳小波变换分解, 将不同尺度的多个低频子带作为支持区域, 多支持区域的使用可以有效地降低图像扭曲带来的不利影响。采用亮度序对支持区域进行区域划分, 确保所构造描述子对单调亮度变化具有不变性, 并在局部旋转不变坐标系下计算局部特征描述子。实验结果表明, 该描述子在视角、线性亮度和 JPEG 压缩等变化下具有较好的鲁棒性。

关键词: 特征描述子; 局部特征; 平稳小波变换; 亮度序; 多支持区域; 旋转不变坐标系

中文引用格式: 房贻广, 颜 普, 刘 武, 等. 基于平稳小波变换和亮度序的局部特征描述子[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 272-276, 280.

英文引用格式: FANG Yiguang, YAN Pu, LIU Wu, et al. Local Feature Descriptor Based on Stationary Wavelet Transform and Intensity Order[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 272-276, 280.

Local Feature Descriptor Based on Stationary Wavelet Transform and Intensity Order

FANG Yiguang¹, YAN Pu², LIU Wu³, ZHANG Ji⁴, TAN Shoubiao²

(1. Safety Supervision Quality Department, State Grid Anhui Electric Power Supply Co., Hefei 230022, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China;

3. Safety Supervision Quality Department, State Grid Anqing Electric Power Supply Co., Anqing, Anhui 246000, China;

4. Anhui Nanrui Jiyuan Power Grid Tech Co., Ltd., Hefei 230088, China)

【Abstract】 The nonlinear illumination changes of local region frequently have a negative impact on the stability of local feature descriptor. In order to solve the problem, a local feature descriptor based on Stationary Wavelet Transform (SWT) and intensity order is proposed. The affine covariant region is detected by using Hessian-Affine detector. The detected region is decomposed by SWT to get multiple low-frequency subbands of different scales as support regions, and the used multiple support regions can effectively reduce the negative impact which is caused by image distortion. The support regions are divided by intensity orders and this ensures that the proposed descriptor is invariant to the monotonous illumination changes. The local feature descriptor is obtained under the local rotation invariant coordinate system. Experimental results show the robustness of the proposed descriptor for the image with viewpoint changes, linear illumination changes, JPEG compression changes and so on.

【Key words】 feature descriptor; local feature; Stationary Wavelet Transform (SWT); intensity order; multiple support region; rotation invariant coordinate system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.11.043

0 概述

图像局部特征的描述是计算机视觉技术中的一个基础热点问题, 目的是区分图像局部相似区域, 其成果已经被广泛应用于目标识别^[1]、图像检索^[2]、三维重建^[3]、图像配准^[4]等众多领域中。目前大量图

像局部特征描述子已经被提出, 如基于分布统计的描述子^[1]、基于空间频域分析的描述子^[5]等。其中, 尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT)^[1]是最常用的描述子之一, 在对比实验中常常用作基础算法, 位置和方向梯度直方图 (Gradient Location and Orientation Histogram,

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2014BAH27F01); 国家电网公司科技项目 (5212D01502DB)。

作者简介: 房贻广 (1969—), 男, 高级工程师、硕士, 主研方向为计算机视觉、电力安全监察技术; 颜 普, 博士; 刘 武, 工程师、硕士; 张 骥, 硕士; 谭守标 (通信作者), 副教授、博士。

收稿日期: 2016-10-10 **修回日期:** 2016-11-17 **E-mail:** starry226@ahu.edu.cn

GLOH)^[6]和DAISY^[7]描述子是2种SIFT描述子的延伸扩展算法。这些算法仅能保证对图像几何变换和线性亮度变化具有一定的不变性,然而图像局部区域的亮度变化通常不是线性的,图像局部区域的非线性亮度变化(如单调亮度变化)往往导致上述描述子性能急剧下降。

针对图像非线性亮度变化问题,基于像素点相对序和对比关系的描述子已经被提出。文献[8]提出了有序空间强度分布(Ordinal Spatial Intensity Distribution, OSID)描述子,其利用亮度序和空间序构建三维直方图,统计三维直方图便得到一种鲁棒性较强的亮度不变局部特征描述子。文献[9]提出了局部强度阶型(Local Intensity Order Pattern, LIOP)描述子,该描述子利用亮度序对支持区域进行划分,进而在划分的子区域上建立特征直方图,其优势是不需要计算局部区域的主方向。文献[10]利用每个像素点与其邻域点之间的对比关系来构建局部二进制模式(Local Binary Pattern, LBP)描述子。文献[11]编码了对称邻域点之间的对比关系并将其嵌入到SIFT框架内,从而得到了中心对称局部二进制模式(Center Symmetric Local Binary Pattern, CSLBP)描述子。文献[12]建立了2种描述子:基于像素相对序列的相对强度直方图(Histogram of Relative Intensities, HRI)描述子和基于像素点之间对比关系的中心对称局部三值模式(Center Symmetric Local Ternary Patterns, CSLTP)描述子,将HRI描述子和CSLTP描述子串联起来便得到HRI-CSLTP描述子。上述方法均是在单支持区域中构建的,但单支持区域易受到图像扭曲的影响,不能保证描述子的鲁棒性^[13]。利用多支持区域构造描述子可获得比单支持区域更好的匹配准确率。

为了获得高效率的局部特征描述子,本文提出一种基于平稳小波变换和亮度序(Stationary Wavelet transform and Intensity Order, SWIO)的局部特征描述子。首先利用SWT构造多支持区域,并在多支持区域内计算局部特征描述子,以保证所构造的局部特征描述子具有较强的鲁棒性。其次利用亮度序划分局部区域,以保证所构造的局部特征描述子对非线性亮度变化具有一定的不变性。

1 基于平稳小波变换的多支持区域

本文采用Hessian-Affine检测算子^[14]来提取特征点的支持区域,并归一化到区域大小为 41×41 的标准圆形区域,在归一化前后分别利用高斯滤波进行平滑处理。现有的局部特征描述子大都在单支持区域内构造,然而单一的支持区域不足以确保图像局部特征描述子的稳定性。较常用的多支持区域策略是 N 嵌套的多支持区域^[13],但该策略仅体现关键区域的空间信息而忽略频率等重要信息。相对于二

维离散小波,平稳小波在变换的过程中不存在下采样操作,具有平移不变性^[15],其输出的高低频图像与原始图像大小一致,保留了原始图像的空间信息,因此利用SWT获取 N 个支持区域。令 u_k 为一个信号序列,则其SWT分解为:

$$\begin{cases} a_{j+1} = H^{[j]} a_j \\ b_{j+1} = G^{[j]} a_j \end{cases} \quad (1)$$

其中, H 和 G 是正交滤波器, $a_0 = u_k$, $H^{[0]} = H$, $G^{[0]} = G$ 。图1是利用SWT产生不同尺度的4个低频图像作为多支持区域。

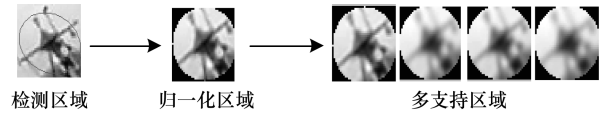


图1 基于平稳小波变换的多支持区域

2 基于亮度序的区域划分

利用亮度序进行区域划分是最近较为常用的方法^[9,13],其最大的优势是不需要计算支持区域的主方向,不仅提高了算法的时间效率,而且确保了所构造描述子的旋转不变性和单调亮度变化不变性。若 R 是一个支持区域,首先,将 R 内所有像素点进行非降排序:

$$\{X_{f(1)}, X_{f(2)}, \dots, X_{f(n)} : I(X_{f(1)}) \leq I(X_{f(2)}) \leq \dots \leq I(X_{f(n)})\} \quad (2)$$

其中, $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是该支持区域内 n 个像素点, $I(X_1), I(X_2), \dots, I(X_n)$ 表示像素点 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 对应的像素点亮度值, $f(1), f(2), \dots, f(n)$ 是 $1, 2, \dots, n$ 的一个排列。

其次,等间距选取 $K+1$ 个亮度值 $t_1, t_2, \dots, t_K$:

$$t_i = I(X_{f(s_i)}) : t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_K \quad (3)$$

其中, $s_i = \begin{cases} \lceil \frac{n}{K} i \rceil, & i = 1, 2, \dots, K \\ 1, & i = 0 \end{cases}$ 。

最后,根据所选取的 t_i 值将 R 划分为 K 个子区域:

$$R_i = \{X_j \in R : t_{i-1} \leq I(X_j) \leq t_i\}, i = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

图2是利用亮度序将支持区域划分为6个相互独立的子区域。



图2 利用亮度序的区域划分

3 局部特征描述

对于任意像素点 $X_i \in R_k$,首先建立旋转不变坐标系^[13],如图3所示,其中, S 是利用Hessian-Affine算子获取的特征点, $X_i^0, X_i^1, \dots, X_i^7$ 是像素点

X_i 在该坐标系下给定半径圆上等间距分布的 8 个邻域点。

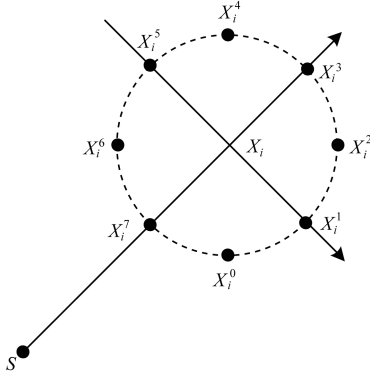


图 3 局部旋转不变坐标系

根据 CSLTP 描述子^[12]的构造策略,像素点 X_i 处的描述向量可以表示为:

$$\mathbf{P}_{R,T}(X_i) = s(I(X_i^0) - I(X_i^4)) + s(I(X_i^2) - I(X_i^6)) \times 3 \quad (5)$$

其中, $s(x) = \begin{cases} 0, & x < -T \\ 2, & x > T \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$ 。由文献[12]可知,

式(5)中的三值模式比 CSLBP 描述子中的二值模式更能精确反映图像像素点之间的大小关系,并且大大降低了描述向量的维数,仅产生 8 种不同的模式。

若令:

$$F_l = \begin{cases} 1, & \mathbf{P}_{R,T}(X_i) = l - 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $l = 1, 2, \dots, 9$, 则像素点 X_i 可以描述为:

$$\mathbf{F}(X_i) = (F_1, F_2, F_3, F_4, F_6, F_7, F_8, F_9) \quad (7)$$

由式(7)可知, $\mathbf{F}(X_i)$ 中不包含 F_5 。当 $F_5 = 1$ 时,则有 $\mathbf{P}_{R,T}(X_i) = 4$, 由式(5)可推出 $s(I(X_i^0) - I(X_i^4)) = 1$ 和 $s(I(X_i^2) - I(X_i^6)) = 1$, 这意味着像素点 X_i 的对角邻域非常接近,不具有很好的鉴别力^[12]。易知, $\mathbf{F}(X_i)$ 是 8 维的向量并且仅有一个元素为 1,其余元素全为 0。根据文献[12]的参数设置,本文设置式(5)中的参数 $R = 2$ 和 $T = 3$ 。则子区域 R_k 的描述向量为:

$$\mathbf{F}(R_k) = \sum_{X_i \in R_k} \mathbf{F}(X_i) \quad (8)$$

在单支持区域 R 上的描述向量可以表示为:

$$\mathbf{D}(R) = (\mathbf{F}(R_1), \mathbf{F}(R_2), \dots, \mathbf{F}(R_K)) \quad (9)$$

则在 N 个支持区域上的描述向量为:

$$\mathbf{D} = (\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{D}_N$ 是第 N 个支持区域上的描述向量,局部特征描述 $\mathbf{D}$ 被简单记作 SWIO,可知该描述子是 $8 \times K \times N$ 维向量。最后对 $\mathbf{D}$ 进行归一化使其每个元素的值不大于 0.2,以减少其较大元素的影响。

4 实验结果及分析

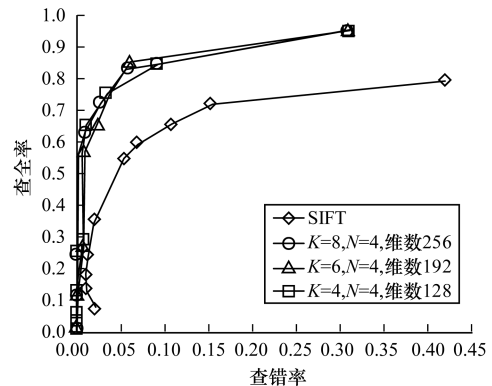
本文在 Oxford 标准数据库^[16]和复杂亮度数据库^[9]上对 SWIO 描述子进行测试,所使用的匹配准则是最近邻距离比(Nearest Neighbor Distance Ratio, NNDR)^[6],性能结果采用查全率-查错率曲线^[6]进行评价,其中变量查全率和查错率无单位。

$$\text{查全率} = \frac{\text{正确匹配数}}{\text{图像对间匹配区域的真实数目}}$$

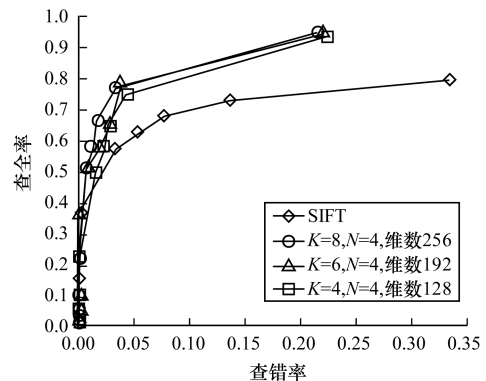
$$\text{查错率} = \frac{\text{错误匹配数}}{\text{正确匹配数} + \text{错误匹配数}} \quad (11)$$

4.1 参数设置

SWIO 描述子涉及到 2 个参数: N (支持区域个数)和 K (划分的子区域个数)。以 leuven 和 corridor 图像序列集为例,其中 corridor 图像序列集包含复杂亮度的实际采集图像集^[9]。在每个图像序列集中,第 1 幅图像作为参考图像,第 3 幅图像作为待匹配图像,记作 leuven1-3 和 corridor 1-3。图 4 和图 5 分别给出了参数 K 和 N 变化下的 SWIO 描述子的性能,从图 4 可以看出,随着参数 K 值的增加,SWIO 描述子的维数和性能也随之增加(括号内的数字代表 SWIO 描述子的维数),当 $K = 6$ 时 SWIO 描述子取得较好的性能。从图 5 可以看出,当 $N = 4$ 时 SWIO 描述子的性能最优,这说明使用多支持区域($N > 1$)构造的 SWIO 描述子性能远远优于单支持区域($N = 1$)下的 SWIO 描述子性能,因此设置参数 $K = 6$ 和 $N = 4$,此时 SWIO 描述子的维数为 192。

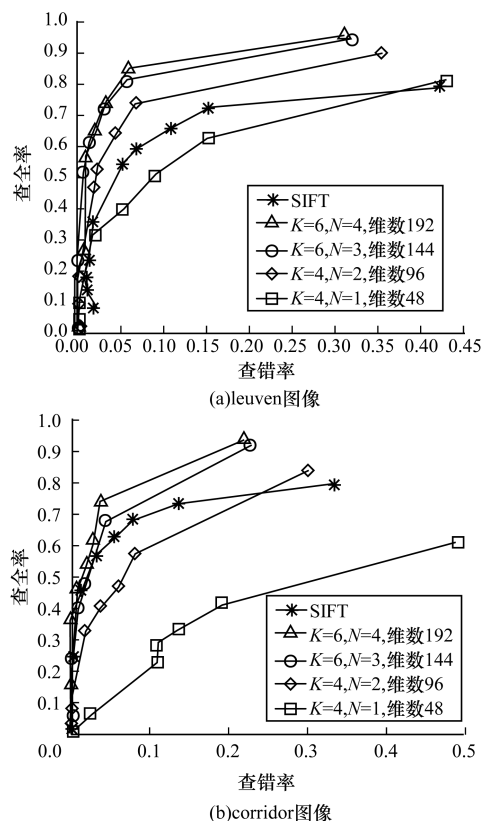


(a) leuven 图像



(b) corridor 图像

图 4 参数 K 变化情况下 SWIO 描述子的性能

图 5 参数 N 变化情况下 SWIO 描述子的性能

4.2 描述子性能分析

为了验证 SWIO 描述子的有效性, 比较了 SIFT、GLOH、DAISY、HRI-CSLTP、LIOP 和 SWIO 描述子在 Oxford 数据库和复杂亮度数据库上的性能。其中 SIFT、GLOH 和 DAISY 描述子是最常用的基于分布的描述子, 而 HRI-CSLTP 和 LIOP 描述子分别是最近提出的基于相对序和亮度序的描述子, 它们的维数分别为 128、128、136、384、144 和 192。

图 6 ~ 图 13 给出了不同算法在图像模糊、视角变化、尺度和缩放变化、亮度变化、JPEG 压缩变换和复杂亮度变化下的性能。从图 6 ~ 图 13 可以看出, SWIO 描述子在纹理场景的图像序列集下表现最佳, 如图像模糊 trees 和视角变化 wall, 这是由于所使用的平稳小波变换和类似于 CSLTP 描述子的构造策略均能有效刻画图像局部区域的纹理信息, 而 SWIO 描述子在结构场景的图像序列集下表现较差, 如视角变化 graffiti 及尺度和缩放变化 boat。从图 6 ~ 图 13 还可以看出, SWIO 描述子在亮度变化序列集 leuven 下的性能远优于其他描述子, 在复杂亮度变化序列集 desktop 和 corridor 下的性能优于 SIFT、GLOH、DAISY、HRI-CSLTP 描述子, 这是因为亮度序的使用确保了 SWIO 描述子对复杂亮度变化具有不变性。同时可以观察到, SWIO 描述子在 JPEG 压缩序列集 ubc 下也表现出不错的性能。

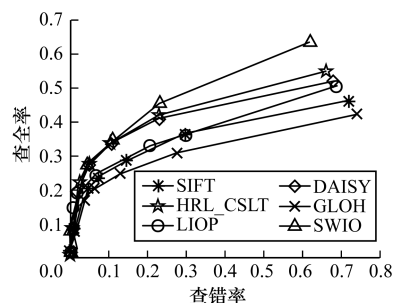


图 6 trees 图像的模糊变化

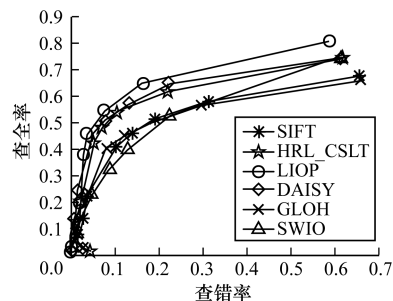


图 7 graffiti 图像的视角变化

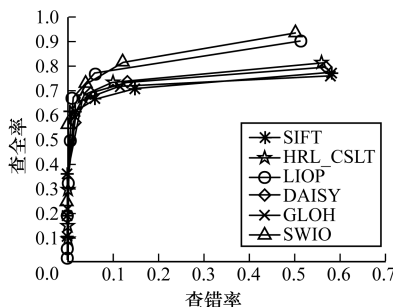


图 8 wall 图像的视角变化

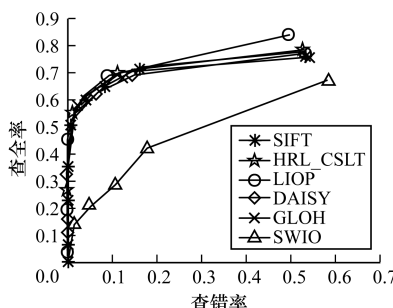


图 9 boat 图像的尺度和缩放变化

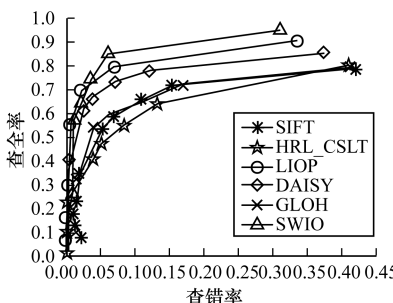


图 10 leuven 图像的亮度变化

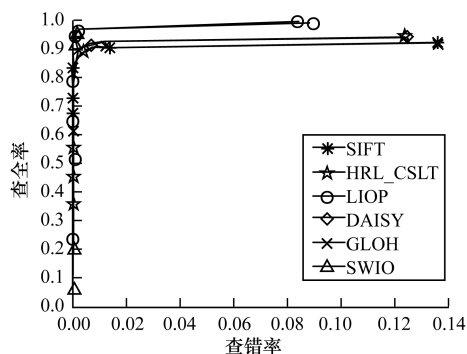


图 11 ubc 图像的 JPEG 压缩

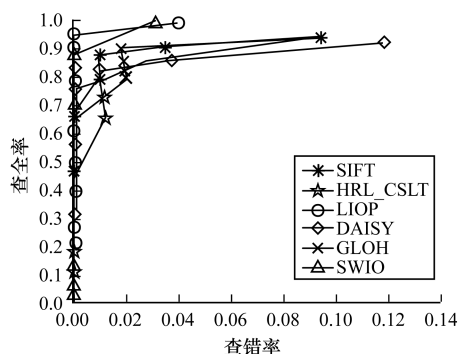


图 12 desktop 图像的复杂亮度变化

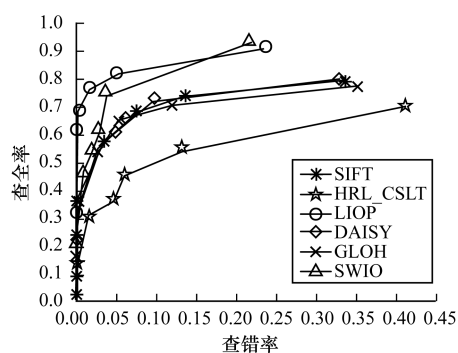


图 13 corridor 图像的复杂亮度变化

对于一幅图像,获取不同尺度和不同方向的多支持区域仅需要运行一次 SWT 分解,任意特征点的多支持区域均可以在事先计算好的低频分量上获得。所以,SWIO 描述子的复杂度主要和局部特征描述有关。对于任意一个特征点,其支持区域内包含 n 个像素点。根据 SWIO 描述子的构造策略,每个像素点需要进行 2 次对比操作得到 8 维的描述向量(见式(5)),再进行 n 次加法(见式(8))和 $K+N$ 次合并最终得到 192 维的 SWIO 描述子。因此,SWIO 描述子的时间和空间复杂度仅与参数 K 和 N 有关,由于本文中 SWIO 描述子取 $K=6$ 和 $N=4$ (K 和 N 远小于 n),则 SWIO 描述子的时间和空间复杂度近似于 $o(n)$ 。

5 结束语

针对现有局部特征描述子不能很好地处理非线性亮度变化的问题,本文提出一种基于平稳小波变换和亮度序的局部特征描述子(SWIO)。使用 SWT 获取多支持区域,其目的是提高所构造描述子的鲁棒性,亮度序的使用确保了所构造描述子的单调亮度变化不变性。SWIO 描述子结合了 SWT 和亮度序两者的优点,能够有效地刻画图像局部区域的纹理信息和亮度变化信息。实验结果表明,所提出的 SWIO 描述子在图像模糊变化、视角变化、线性亮度变化和 JPEG 压缩变化下具有较好的性能,特别在包含丰富纹理信息的图像序列集下表现更佳。但该局部特征描述子对结构性较强的图像序列集表现不佳,下一步将结合能够刻画图像结构信息的理论(如谱图理论)来进一步提高该描述子的鲁棒性。

参考文献

- [1] LOWE D G. Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [2] YANG Yi, NEWSAM S. Geographic Image Retrieval Using Local Invariant Features [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(2): 818-832.
- [3] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, Dense, and Robust Multi-view Stereopsis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362-1376.
- [4] WANG Shanhu, YOU Hongjian, FU Kun. BFSIFT: A Novel Method to Find Feature Matches for SAR Image Registration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 649-653.
- [5] 刘仰龙,王从庆,高珏,等. 基于小波描述子的水果果形分类 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(3): 322-328.
- [6] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A Performance Evaluation of Local Descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [7] TOLA E, LEPETIT V, FUA P. Daisy: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-baseline Stereo [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(5): 815-830.
- [8] TANG Feng, LIM S H, CHANG N L, et al. A Novel Feature Descriptor Invariant to Complex Brightness Changes [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 2631-2638.
- [9] WANG Zhenhua, FAN Bin, WU Fuchao. Local Intensity Order Pattern for Feature Description [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 603-610.

(下转第 280 页)

为 0.027 的耦合处理后相位差与孔径为 0.5 未经耦合处理的相位差一致,也就是耦合处理使孔径由 0.027 扩展为 0.5。所以耦合处理有效地扩展了阵列孔径,为小孔径阵列的高性能应用奠定理论基础。在具体应用中,可依据要求的覆盖范围和性能指标等来确定孔径的大小。

4 结束语

小孔径阵列由于其体积小、重量轻、便于携带和适用于空间狭小的环境而受到青睐,但与此同时其性能较差。本文提出基于寄生蝇听觉结构能将两耳接收信号间的微小差异进行放大,构建仿生耦合处理模型,设置适合的耦合参数,对小孔径阵列接收的信号进行仿生耦合处理。仿真结果表明仿生耦合处理放大了阵元间信号的相位差,虚拟地扩展了阵列孔径,使同时实现高性能和小型化成为可能,对于工程应用具有重要的价值。下一步将研究基于耦合处理的小孔径阵列的工程实现,以及用它实现短波、超短波测向。

参考文献

- [1] MILES R N, ROBERT D, HOY R R. Mechanically Coupled Ears for Directional Hearing in the Parasitoid Fly *Ormia Ochracea* [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 98(6): 3059-3070.
- [2] 王庆生, 饶柱石, 塔娜. 微型仿生声定位结构的设计及定位方法的研究 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 122-129.
- [3] XU Huping, XU Xiangyuan, JIA Han, et al. A Biomimetic Coupled Circuit Based Microphone Array for Sound Source Localization [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(3): 270-275.
- [4] 杨铭, 朱鑫磊, 张雅琼, 等. 基于奥米亚棕蝇听觉定向机制声定位系统仿生学设计 [J]. *中国科技论文*, 2014, 9(8): 870-873.
- [5] BEHDAD N, LI Meng, JOUMAYLY M A. Biologically-inspired Antenna Arrays Based on the Hearing Mechanism of the Parasitoid Fly *Ormia Ochracea* [C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1526-1529.
- [6] MASOUMI A R, YUSUF Y, BEHDAD N. Biomimetic Antenna Arrays Based on the Directional Hearing Mechanism of the Parasitoid Fly *Ormia Ochracea* [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(5): 2500-2510.
- [7] MASOUMI A R, BEHDAD N. An Improved Architecture for Two-element Biomimetic Antenna Arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 6224-6228.
- [8] AKCAKAYA M, MURAVCHIK C H, NEHORAI A. Biologically Inspired Coupled Antenna Array for Direction of Arrival Estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4795-4808.
- [9] AKCAKAYA M, NEHORAI A. Performance Analysis of *Ormia Ochracea*'s Coupled Ears [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(4): 2100-2105.
- [10] AKCAKAYA M, MURAVCHIK C H, NEHORAI A. Performance Analysis of Biologically Inspired Coupled Circular Antenna Array [C]// *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1530-1533.
- [11] 徐斌, 高跃飞, 余龙. MATLAB 有限元结构动力学分析与工程应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [12] KUNTZMAN M L, HALL N A. Sound Source Localization Inspired by the Ears of the *Ormia Ochracea* [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 701-704.
- [13] MASON M J. Internally Coupled Ears in Living Mammals [J]. *Biological Cybernetics*, 2016, 110(4): 1-14.
- [14] 戴红飞, 杨秋翔, 秦品乐, 等. 仿生 MEMS 声定位传感器的设计与仿真 [J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(11): 2985-2990.
- [15] 塔娜. 奥米亚寄生蝇听觉定位机理及其动力学特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [10] OJALA T, PIETIKAINEN M, MAENPAA T. Multiresolution Gray-scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971-987.
- [11] HEIKKILÄ M, PIETIKÄINEN M, SCHMID C. Description of Interest Regions with Local Binary Patterns [J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(3): 425-436.
- [12] GUPTA R, PATIL H, MITTAL A. Robust Order-based Methods for Feature Description [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 334-341.
- [13] FAN Bin, WU Fuchao, HU Zhanyi. Rotationally Invariant Descriptors Using Intensity Order Pooling [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 2031-2045.
- [14] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al. A Comparison of Affine Region Detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65(1-2): 43-72.
- [15] NASON G P, SILVERMAN B W. The Stationary Wavelet Transform and Some Statistical Applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 1995.
- [16] MIKOLAJCZYK K. Oxford Dataset [EB/OL]. (2007-07-15). <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine>.

编辑 顾逸斐

编辑 顾逸斐