

基于多尺度特征点识别与局部谱特征的离散数据匹配

吴维勇¹, 王英惠²

(1. 九江学院 信息科学与技术学院, 江西 九江 332005; 2. 九江学院 机械与材料工程学院, 江西 九江 332005)

(wuweiyong@263.net)

摘要:为了实现部分重叠且不同视角的测量数据配准,提出多尺度特征点检测算法,可以从大量的原始数据中提取少量特征点。该算法包括离散曲率计算、双边滤波和特征点计算等步骤,特征点个数可以由尺度参数粗略控制。提出局部形状谱描述器来描述每个特征点的局部形状特性,首先利用局域点的距离和曲率信息构造关系矩阵,然后通过计算关系矩阵的特征值来构造谱描述器,利用该描述器可以方便地计算不同点集中各个特征点的对应关系,进而实现两个数据点集的配准。通过实例验证了该算法有较好的抗噪性和运行速度。

关键词:多尺度;谱描述器;特征点;数据配准;离散数据

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A

Multi-scale feature points detection and local region spectral descriptor for matching unorganized points data

WU Wei-yong¹, WANG Ying-hui²

(1. School of Information Science and Technology, Jiujiang University, Jiujiang Jiangxi 332005, China;

2. School of Mechanical and Materials Engineering, Jiujiang University, Jiujiang Jiangxi 332005, China)

Abstract: In order to align partly overlapped data clouds measured from different view points, a multi-scale feature points detection algorithm was proposed. A few feature points can be extracted from large number of original data quickly. This algorithm consists of three steps: discrete curvature computing, bilateral filtering and feature points detecting. The number of feature points can be controlled by scale parameter approximately. For each feature point, the authors proposed local shape spectral descriptor to identify its local shape characteristic. Firstly, an affinity matrix was constructed using distance and curvature information of points in neighborhood of a feature point, and then a few of eigenvalues of affinity matrix were used to form a shape descriptor, with which the correspondence between different data sets can be computed easily. Some examples prove that the method is robust and efficient for aligning large number of data with noise.

Key words: multi-scale; spectral descriptor; feature point; data matching; discrete data

0 引言

近年来,三维曲面扫描技术得到快速发展和广泛应用,人们可以方便快捷地获取复杂形体表面数据。对于复杂形体一般需从不同视角进行多次扫描,获得多个彼此局部重叠的点云数据。在对扫描数据点进行造型之前,必须进行数据配准,即计算空间旋转和平移矩阵,将不同视角下的扫描点云变换到同一坐标系下,构成完整的几何形体。数据配准在逆向工程、计算机视觉、医学图像处理以及计算机游戏等领域都是基础性的问题,受到人们广泛的关注。

很多学者对数据配准问题进行了深入研究。文献[1]是一种随机配准算法,其算法的最大问题是运行效率低。文献[2]给出了共面4点配准方法,大大提高了效率,得到了理想的配准结果。目前,流行的方法是首先通过一定方法检测数据集少量特征点,然后对每个特征点定义局部形状描述器,通过形状描述器寻找重叠数据集间的对应点来计算变换矩阵,实现数据配准。文献[3]给出了球面小波描述器用于三维模型检索,文献[4]提出了坐标系无关的球面属性图方法,文献[5]定义了 spin image 方法描述局部形状特征,文献[6]使用

隐 Markov 链作为形状描述器。

1 相关工作

尺度空间方法在图像处理、计算机视觉等领域都有成功应用,文献[7]提出了网格显著性概念,利用网格顶点的多尺度高斯加权平均曲率计算显著特征点,并成功应用于网格化简和视点选择。文献[8]利用各向异性双边滤波算子代替高斯加权算子,弥补了文献[7]的不足,并以 Morse 理论为背景,给出了重要特征点提取算法。文献[9]利用测地线尺度空间进行特征点检测,并借用 spin image 作为描述器进行曲面配准。文献[10]基于移动最小二乘法构造多尺度特征点检测算法,实现数据配准。

谱分析方法在计算机图形学、计算机视觉、机器学习等领域有着广泛应用,在几何分析与处理方面主要应用在网格分割、网格光滑、曲面重构以及网格水印等^[11]。文献[12]使用谱嵌入技术来计算三维模型的相似性,用于三维模型检索。

本文综合利用尺度空间和谱分析方法实现离散数据配准,首先基于多尺度方法计算不同视角数据集的特征点,然后提出局部形状谱描述器来描述每个特征点的局部形状特

收稿日期:2009-05-11;修回日期:2009-07-01。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60863012);江西省自然科学基金资助项目(0611063);江西省教育厅科技资助项目(GJJ08435;GJJ09346)。

作者简介:吴维勇(1972-),男,辽宁抚顺人,教授,博士,CCF 会员,主要研究方向:图形图像处理;王英惠(1973-),女,江苏无锡人,教授,博士,主要研究方向:CAD/CAM、逆向工程。

性,通过谱描述器寻找两个数据集的对应点,实现数据集的配准。

2 多尺度特征点提取

2.1 主要步骤

提取特征点的主要步骤如下:

1) 计算离散数据的平均曲率 $\vartheta(\mathbf{v})$ 。对于三角网格曲面,已有很多离散曲率的计算方法,对于离散数据点的曲率计算,本文采用双二次 Bezier 曲面拟合^[13]方法,计算数据点的平均曲率。图 1 给出了 Dinosaur^[14]模型的平均曲率点计算结果。

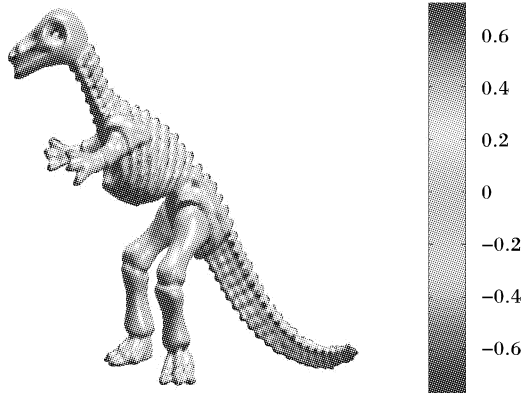


图 1 Dinosaur 平均曲率

2) 进行双边滤波去噪声:

$$B(\vartheta(\mathbf{v}), \sigma) = \frac{\sum_{\mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)} (\vartheta(\mathbf{x}) - \vartheta(\mathbf{v})) W_c(\|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|) W_s(|\vartheta(\mathbf{x}) - \vartheta(\mathbf{v})|)}{\sum_{\mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)} W_c(\|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|) W_s(|\vartheta(\mathbf{x}) - \vartheta(\mathbf{v})|)}$$

其中, $W_c(\mathbf{x}) = \exp[-\mathbf{x}^2/(2\sigma_c^2)]$, $W_s(\mathbf{x}) = \exp[-\mathbf{x}^2/(2\sigma_s^2)]$ 。 $N(\mathbf{v}, 2\sigma)$ 为点 \mathbf{v} 的邻域。

3) 定义多尺度特性:

$$R(\mathbf{v}) = |G(\vartheta(\mathbf{v}), \sigma) - G(\vartheta(\mathbf{v}), 2\sigma)|$$

其中:

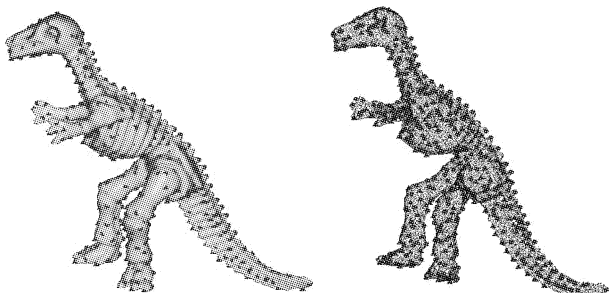
$$G(\vartheta(\mathbf{v}), \sigma) = \frac{\sum_{\mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)} \vartheta(\mathbf{x}) \exp[-\|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|^2/(2\sigma^2)]}{\sum_{\mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)} \exp[-\|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|^2/(2\sigma^2)]}$$

4) 提取特征点。文献[15]根据网格顶点的邻接关系,将特征点分为极大值点、极小值点以及鞍点,本文只定义邻域内极大值与极小值特征点:

$$\text{极大值点: } \{\mathbf{v} | R(\mathbf{v}) > R(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)\}$$

$$\text{极小值点: } \{\mathbf{v} | R(\mathbf{v}) < R(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in N(\mathbf{v}, 2\sigma)\}$$

图 2 给出了 Dinosaur 模型提取特征点的结果,其中圆形点为极大值特征点,三角形点为极小值特征点。



(a) Dinosaur光照模型

(b) Dinosaur点模型

图 2 Dinosaur 特征点

特征点数粗略估算:假设数据点数为 m ,邻域内平均点数为 n ,由于在一个邻域内最多存在一个极大值点和一个极小值点,所以特征点个数 $s < 2m/n$ 。

本文算法有较强的抗噪声性能,对 Dinosaur 模型加入一定的随机噪声,然后采用与图 2 相同的参数进行特征点提取,如图 3 所示,其结果与图 2 基本相同。

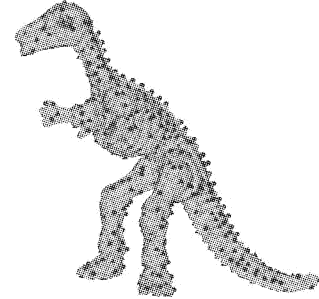


图 3 加噪声模型特征点识别

与文献[8]不同的是,我们采用尺度参数 σ 来控制特征点的个数,根据数据含噪声情况进行双边滤波器去噪是可选的。而文献[8]是通过双边滤波的迭代次数来控制特征点个数,迭代次数越多特征点越少,相比之下,本文算法有更高的灵活性和运行效率。

2.2 参数选取

文献[7]采用数据包围盒对角线的长度乘以一个常数项来确定上述算法中的参数 σ_c 和 σ_s 。本文采用邻域点数来控制 σ_c ,首先指定邻域点数 N ,然后随机选取少量数据点,搜索这些点 N 个邻域点对应的最大半径,然后取这些邻域半径的平均值为 σ_c, σ_s 。采用动态方法选取,即对每个点及其邻域点,计算 $\max(|f(\mathbf{v}) - f(\mathbf{x})|)$ 为 σ_s 。

3 边界点检测

在实际计算中发现,边界点会带来较大计算误差,需将其剔除。文献[16]给出了识别边界点的方法,本文通过考查邻域点分布均匀性,给出更为简单的边界点检查方法。在理想情况下,某点的邻域点应该均匀分布在以该点为圆心的球域内,但在实际中邻域点分布是不均匀的,将边界点视为邻域不均匀点进行检查。对于某点 \mathbf{v} ,首先搜索 \mathbf{v} 的邻域点并拟合一个平面,这一步在进行曲率计算时已完成,无需重复计算。对邻域点集进行空间变换,使拟合的平面法向量与 z 轴重合,并将点 \mathbf{v} 移至坐标原点,然后统计在坐标轴四个象限中数据点个数,若最大点数减去最小点数大于指定的阈值,则该点为边界点。图 4 给出了 Stanford Bunny^[17] 一个视角测量数据的边界点检测结果。

4 局部形状谱描述器

对于每个特征点,我们采用谱特征来描述特征点局部形状特性,首先定义特征点邻域的关系矩阵 \mathbf{A} :

$$A_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma_c^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\zeta_{ij}^2}{2\sigma_s^2}\right)$$

其中: d_{ij} 为邻域内两点间的距离,若采用测地线距离可以使描述器具有弯曲不变性,由于本文只考虑刚体变换,所以 d_{ij} 采用欧式距离; σ_c 为特征点的邻域半径; $\zeta_{ij} = |\vartheta(\mathbf{x}_i) - \vartheta(\mathbf{x}_j)|$,是特征点 \mathbf{v} 邻域内两点曲率差的绝对值; σ_s 为邻域内最大曲率与最小曲率的差值。

若邻域点数为 n ,则 \mathbf{A} 为 $n \times n$ 实对称矩阵,计算 \mathbf{A} 的特征值

$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n$, 并进行归一化处理, $\lambda_i = \lambda_i / (\text{trace}(A)) = \lambda_i / (\sum_{j=1}^n \lambda_j)$ 。

这样处理后降低了描述器对点集密度的敏感性。取前 K 个特征值作为特征点 v 的局部特征描述器(本文取 $K = 8$)。

在数据获取过程中,由于测量角度不同或受噪声影响,在不同测量数据中对应的相同区域上,测量数据点的密度是不完全相同的。为了测试局部数据密度变化对谱描述器的影响,取 Dinosaur 模型头部数据进行局部采样。如同 5 所示,原始数据 Data0 有 500 个数据点,然后进行 5 次数据缩减,每次随机缩减 10 个数据点,得到新的数据集 Data1, Data2, ..., Data5。计算所有点集的特征值,并取最大的 10 个特征值构成向量 eig0, eig1, ..., eig5。取 eig1, ..., eig5 与 eig0 差的绝对值得到向量 Diff1, ..., Diff5。如图 6 所示,特征值最大绝对偏差近似为 4×10^{-3} ,可以看出数据点集密度变化对谱描述器的影响是比较小的。

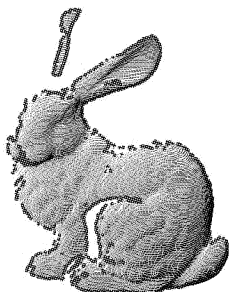
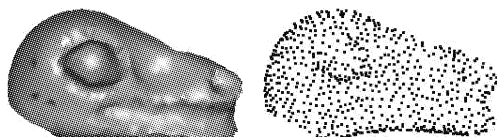


图 4 边界点检测



(a) 原始数据光照模型

(b) 重采样数据

图 5 Dinosaur 头部数据局部采样

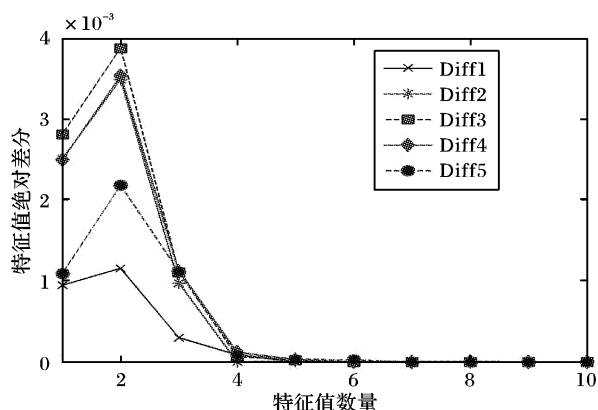


图 6 不同采样密度对特征值的影响

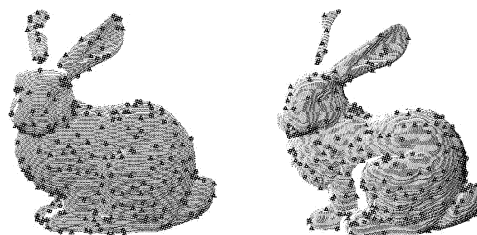
文献[12]是将模型整体变换到谱域进行处理,用于三维模型检索,当数据量较大时,计算矩阵特征值的效率很低。而本文是一种局部谱特征描述方法,有较高的运行效率。此外,在定义关系矩阵时引入了曲率信息,使谱描述器能更好地表达局部形状信息。

5 数据配准

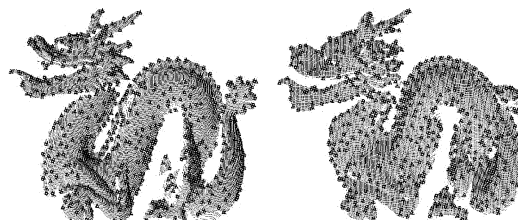
在求得每个点的谱描述器后,采用 L^2 距离来定义特征点的相似性。即 $d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^K (\lambda_k^i - \lambda_k^j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, λ^i 、 λ^j 为对应谱描述器

的特征值。假设两个待配准的数据点集为 M 和 R ,其对应的特征点数为分别 m 和 r 。对于 M 中的每个特征点 v_M ,其谱描述器为 $SD(v_M)$,计算 R 中与其距离最小的特征点 v_R 作为对应点,其谱描述器为 $SD(v_R)$,即 $d_{ij} = \min(\|SD(v_M) - SD(v_R)\|)^{\frac{1}{2}}$ 。对 d_{ij} 进行由小到大排序,取前 N (本文取 $N = 10$) 个距离最小的数据点对作为原数据集的对应点,使用四元素法^[18]计算旋转和平移矩阵,即可实现两个原始数据集的配准。

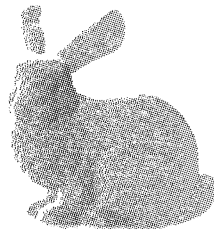
图 7(a) 为 Stanford Bunny 两个视角的测量数据,首先采用上述方法计算特征点和谱描述器,然后进行配准得到图 7(c);图 7(b) 为 Dragon^[17] 两个视角测量数据的特征点,图 7(d) 为配准结果。



(a) Bunny两个视角的数据及提取的特征点



(b) Dragon两个视角的数据及提取的特征点



(c) Bunny配准结果



(d) Dragon配准结果

图 7 实验结果

本文算法在 VC++ 6.0 和 OpenGL 环境下实现,CUP 为 Intel T2300 1.6 GHz, RAM 为 512 MB。为了提高效率,在算法实现时采用 ANN^[19] 算法库进行点的邻域搜索。表 1 为各个数据集相关计算时间的统计,特征提取时间包含了特征点提取和各个特征点谱描述器的计算时间。实验中发现,增大尺度参数获取较少的特征点时,需要的时间反而增多,这是因为增大尺度参数会增加特征点的邻域数据点个数,使 ANN 算法的效率降低。在表 1 中没有列出配准时间,因为在正确找到对应数据点后,数据配准都可以在 1 s 内完成。

表 1 运行时间统计

数据集	数据点个数	特征点个数	运行时间/s	
			曲率计算	特征提取
Dinosaur	56 194	471	10	37
Bunny (左)	40 256	236	7	39
Bunny (右)	40 097	222	7	40
Dragon (左)	42 595	516	9	23
Dragon (右)	35 774	561	7	16

6 结语

本文给出了多尺度特征点检测和局部形状谱描述方法,成功应用于散乱数据点集配准,并且具有抗噪性和对数据点密度不敏感等特点。本文算法对数据点个数以及初始位置都没有限制,但仍属于粗配准算法,可以与 ICP^[20] 算法结合进行精确配准。在本文算法基础上,下一步将研究多个视角测量数据自动配准点问题。此外本文使用尺度参数来粗略控制特征点个数,但无法实现精确控制,这是本算法需要研究改进的地方。

参考文献:

- [1] CHEN C-S, HUNG Y-P, CHENG J-B. RANSAC-based DARCES: A new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(11): 1229–1234.
- [2] AIGER D, MITRA N J, COHEN-OR D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 85.
- [3] LAGA H, TAKAHASHI H, NAKAJIMA M. Spherical wavelet descriptors for content-based 3D model retrieval [C]// SMI 2006: IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications. Washington, DC: IEEE Press, 2006: 15–25.
- [4] HEBERT M, IKEUCHI K, DELINGETTE H. A spherical representation for recognition of free-form surfaces [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(7): 681–690.
- [5] JOHNSON A E, HEBERT M. Surface registration by matching oriented points [C]// Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1997: 121–128.
- [6] CASTELLANI U, CRISTANI M, FANTONI S, *et al.* Sparse points matching by combining 3D mesh saliency with statistical descriptors [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(2): 643–652.
- [7] LEE C H, VARSHNEY A, JACOBS D W. Mesh saliency [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005. New York: ACM Press, 2005: 659–666.
- [8] LIU YU-SHEN, LIU MIN, KIHARA D, *et al.* Salient critical points for meshes [C]// Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York: ACM Press, 2007: 277–282.
- [9] ZOU GUANG-YU, HUA JING, DONG MING, *et al.* Surface matching with salient key points in geodesic scale space [J/OL]. Computer Animation And Virtual Worlds, 2008, 19: 399–410 [2009–02–15]. <http://www.cs.wayne.edu/~jinghua/publication/2008-cavw-surface-matching.pdf>.
- [10] LI XIN-JU, GUSKOV I. Multi-scale features for approximate alignment of point-based surfaces [C]// Proceedings of the third Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2005: 217.
- [11] ZHANG HAO, van KAICK O, DYER R. Spectral methods for mesh processing and analysis [EB/OL]. [2009–03–02]. www.cs.sfu.ca/~haoz/pubs/zhang_eg07star_spectral.pdf.
- [12] JAIN V, ZHANG HAO. Robust 3D shape correspondence in the spectral domain [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications. Washington, DC: IEEE Press, IEEE Computer Society, 2006: 19.
- [13] RAZDAN A, BAE M. Curvature estimation scheme for triangle meshes using biquadratic bezier patches [J]. Computer Aided Design, 2005, 37 (14): 1481–1491.
- [14] Stuttgart range image database [EB/OL]. [2009–03–05]. <http://range.informatik.uni-stuttgart.de/htdocs/html/>.
- [15] NI X, GARLAND M, AND HART J C. 2004. Fair morse functions for extracting the topological structure of a surface mesh [C]// ACM SIGGRAPH 2004: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2004: 613–622.
- [16] LI XIN-JU, GUSKOV I, BARHAK J. Robust alignment of multi-view range data to CAD model [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 17.
- [17] The Stanford 3D scanning repository [EB/OL]. [2009–03–05]. <http://www-graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>.
- [18] HORN B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4): 629–642.
- [19] MOUNT D M, ARYA S. ANN: A library for approximate nearest neighbor searching [EB/OL]. (2006–08–04) [2009–03–02]. <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>.
- [20] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239–256.

(上接第 2945 页)

- [5] AGAIAN S S, AKOPIAN D, CAGLAYAN O, *et al.* Lossless adaptive digital audio steganography [C]// Conference Record of the 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Washington, DC: IEEE Press, 2005: 903–906.
- [6] 陶智, 赵鹤鸣, 顾济华, 等. 基于心理声学模型和临界频带子波变换的数字声频水印[J]. 声学学报, 2006, 31(2): 114–119.
- [7] 贾俊, 王朔中, 张新鹏. 一种基于人耳听觉特性的数字音频水印方案[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(4): 652–656.
- [8] CRANDALL R. Some notes on steganography [EB/OL]. (1998–12–18) [2009–04–23]. <http://os.inf.tu-dresden.de/~westfeld/crandall.pdf>.
- [9] WESTFELD A. F5-A steganographic algorithm: High capacity despite better steganalysis [C]// Proceedings of International Workshop on Information Hiding, LNCS 2137. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 289–302.
- [10] 张涛, 平西建. 空域 LSB 信息伪装的隐写分析及对策[J]. 通信学报, 2003, 24(12): 156–163.
- [11] 张晓明, 殷雄. 基于混沌序列的小波域语音信息隐藏方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2113–2117.
- [12] SWANSON M D, ZHU B, TEWFIK A, *et al.* Robust audio watermarking using perceptual masking [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 337–355.
- [13] SWELDENS W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. Journal of Applied Computing and Harmonic Analysis, 1996, 3(2): 18–200.
- [14] 王让定, 徐达文. 基于提升小波的多重数字音频水印[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1820–1826.