

光学小波包变换及其滤波器的研究*

才 德 严 瑛 白 金 国 藩

(清华大学精密仪器与机械学系, 国家精密测试与仪器重点实验室, 北京 100084)

摘 要 基于对光学小波变换必要条件的分析, 提出光学小波包变换的概念. 选出虹膜图库的联合最优小波包基, 利用最优基的线性组合生成相应的复合光学小波包滤波器. 将滤波器用于光电混合虹膜识别系统中对待识别输入进行小波包特征提取预处理, 模拟结果不仅证明引入该滤波器可明显提升系统的识别效果, 也证明了光学小波包变换提出的意义.

关键词 光学小波变换; 小波包变换; 虹膜识别; 光学滤波器

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

0 引言

和离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT)^[1~3] 相比, 光学小波变换 (Optical Wavelet Transform, OWT) 具有高并行性和平移不变性的优点, 已有成功应用^[4,5]. Coifman 等人提出的小波包变换 (Wavelet Packet Transform, WPT)^[6,7] 可比小波变换进行更精细的信号分解, 更准确地适应信号的时-频结构, 已在降噪和压缩等方面取得广泛应用^[8,9], 但至今尚未在光信息处理领域实现. 为将 WPT 引入到光学中发挥其处理信号的优势, 在分析 OWT 的必要条件后, 利用层叠算法 (the cascade algorithm)^[10] 和二维离散可分离小波变换 (2D Discrete Separable Wavelet Transform, DSWT)^[1] 方法计算出不同分辨率层的小波包基函数的离散逼近序列, 实现了光学小波包变换 (Optical Wavelet Packet Transform, OWPT). 将 OWPT 应用于一个基于体全息的光电混合虹膜识别系统中, 设计了一个光学小波包滤波器, 对虹膜图像进行特征提取, 以提高系统的识别效果.

1 光学小波包变换的实现

小波包函数通常被定义为

$$u_0(x) = \phi(x) \quad u_{2l}(x) = \sqrt{2} \sum_k h_k u_l(2x-k) \quad (1)$$

$$u_1(x) = \Psi(x) \quad u_{2l+1}(x) = \sqrt{2} \sum_k g_k u_l(2x-k)$$

式中 h 和 g 是尺度函数和小波函数的滤波器. WPT 不能应于 OWT 的主要原因是其母小波基函数没有解析表达式. 实际上在模拟和滤波器制作中采用的都是连续函数的离散采样逼近序列, 有解析表达式利于求出这个序列, 但不是实现 OWT 的必要条件, 而能否计算出这个离散逼近序列才是实现

OWT 的必要条件. 对于没有解析表达式的母小波, 它们连续基函数的离散逼近序列可利用 Daubechies 提出的层叠算法计算. 下面命题是该算法的基础.

命题: 令 f 是 R 上的连续函数, 则对于所有点 $x' \in R$ 有

$$\lim_{j \rightarrow \infty} 2^j \int dy \cdot f(x+y) \cdot \overline{\phi(2^j y)} = f(x) \quad (2)$$

如果 f 是一致连续, 则上式为一致收敛. 如果 f 是指数为 α 的 Hölder 连续

$$|f(x) - f(y)| \leq C|x-y|^\alpha$$

则以指数 j 收敛

$$|f(x) - 2^j \int dy \cdot f(x+y) \cdot \overline{\phi(2^j y)}| \leq C2^{-j\alpha}$$

该算法可以对任意点 x 以任意准确度计算对应尺度和小波原函数值的近似值. 用尺度函数 ϕ 替代 f 且 $x = 2^{j-J}K$, 则式(2)变为

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \lim_{j \rightarrow \infty} 2^j \int dy \cdot \phi(x+y) \cdot \overline{\phi(2^j y)} = \\ &= \lim_{j \rightarrow \infty} 2^j \int dy \cdot \phi(2^{-j}K + y) \cdot \overline{\phi(2^j y)} = \\ &= \lim_{j \rightarrow \infty} 2^j \langle \phi, \phi_{-j, 2^{j-J}K} \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $2^j \langle \phi, \phi_{-j, 2^{j-J}K} \rangle$ 是快速小波变换 (Fast Wavelet Transform, FWT)^[1] 计算出的低频变换系数, 则层叠算法可用 FWT 中重构运算来实现. 令低频输入序列为 $c_n^0 = \delta_{0,n}$, 高频输入序列为 $d_n^0 = 0$, 用 FWT 重构算法计算可得 $c_n^{-1} = \sum_k h_{n-2k} c_k^0$, 其中 h 是尺度函数的滤波器. 以高频输入 $d_n^{-j} = 0$ 持续计算下去可得 $c_n^{-j} = \sum_k h_{n-2k} c_k^{-(j-1)}$. 令 $\eta_j(2^{-j}n) = c_n^{-j}$, 文献[10]中命题 6.5.2 证明离散序列 $\{\eta_j(2^{-j}n)\}_n$ 可以任意准确度逼近对应的函数值 $\{\phi(2^{-j}n)\}_n$. 类似也可以求出逼近连续小波函数 Ψ 的离散值序列. 将它们输入式(1)就可以得到一维小波包基函数的离散逼近序列.

由于光学变换是二维的, 所以利用二维可分离小波变换 (见式(4)) 构建二维 WP 基函数的离散近似序列, 从而实现 OWPT.

* 国家自然科学基金(60277012)资助项目

Tel: 010-62781187 Email: caide00@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-02-28

$$\begin{aligned}
 U_{4l}(x, y) &= u_{2l}(x) \cdot u_{2l}(y) \\
 U_{4l+1}(x, y) &= u_{2l}(x) \cdot u_{2l+1}(y) \\
 U_{4l+2}(x, y) &= u_{2l+1}(x) \cdot u_{2l}(y) \\
 U_{4l+3}(x, y) &= u_{2l+1}(x) \cdot u_{2l+1}(y)
 \end{aligned} \quad (4)$$

2 用于虹膜特征预处理的光学小波包滤波器

作为生物特征的一种,虹膜特征具有唯一性、稳定性、可采集性、非侵犯性等优点,已成为近年的研究热点^[11,12].而光电混合虹膜识别系统可充分利用光学的高度并行性优点和计算机计算准确的特点,从而可以快速、准确地识别.为进一步提高识别效果,利用 OWPT 设计一个小波包滤波器进行特征预处理.

光学小波包滤波器将应用于一个基于体全息的光电混合虹膜识别系统(图 1).系统采用基于联合最优小波包基的特征图像相关识别方法^[13],用少数几个特征图像替换整个模板图存储于晶体中和待识别图像相关,可解决存储大图库的串扰噪声的问题^[14],大大减少后处理的数据量.利用物光(SLM-FL-M₂)同参考光(L₁-S₁-L₂)干涉,通过角度复合方式将模板图像库的特征图像存储于体全息晶体(PR Crystal).识别时挡住参考光,待识别图像显示于物光光路,同存储的所有特征图像相关,这一过程在光学子系统中完成.相关结果图用 CCD 检测并传送到计算机提取统计特征,生成特征向量进行分类识别,这部分识别后处理工作在电学子系统中完成.系统采用 Fe:LiNbO₃ 体全息晶体作光学相关器,掺 Fe 浓度 0.03%,尺寸为 20×10×3 mm³.激光波长 0.6328 μm.物光和参考光夹角约为 45°.

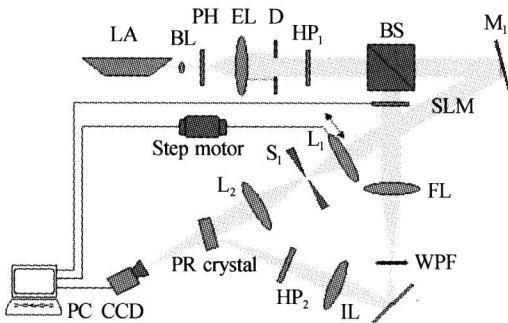


图 1 基于体全息的光电混合虹膜识别系统图
Fig. 1 The volume holographic opto-electronic hybrid iris recognition system

联合最优基选取过程如图 2.先把每幅库图像分别进行 WPT 得到各自的系数四叉树,所有图像对应系数平方后求和,生成整个图像库的平方和系数四叉树 Σ,求每个小波包基的熵值.比较相邻层母小波包基熵值和它四个子小波包基熵值之和:如

果母节点熵值大于子节点熵值之和,则保留子节点;反之则保留母节点.自底向上选出图库的联合最优小波包组,并生成对应最优基的特征图像.具体结合虹膜识别,采用识别能力指标替代熵指标,找出使识别能力最好的最优小波包基.识别能力指标即对每个小波包通道提取的特征分别进行识别所得的识别率,它可反映出该通道提取信息对识别的贡献大小.为进一步提高虹膜光学识别的效果,用最优基的线性组合构成一个复合滤波器,插入到物光光路的谱面上(如图 1 中的滤波器 WPF),提取待识别图像的小波包特征,用提取的复合特征同存储的特征图像相关,进行识别后处理.

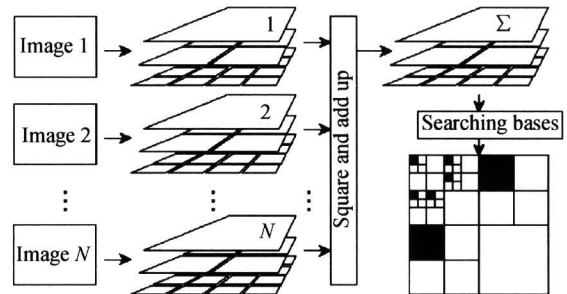


图 2 联合最优小波包基优选过程
Fig. 2 The process of best basis selection

在相关结果后处理中对整个相关结果图像提取统计特征后再进行识别,可以使系统更好地适应光学相关准确度不高、易受光学系统微小变化影响的问题.设有 L 个不同虹膜(即有 L 个虹膜类),每个虹膜在不同条件下拍摄 K 幅图像,所构成的图像库有 K×L 幅虹膜图像.设图像 I^{l,k} (l=1,⋯,L, k=1,⋯,K) 为第 l 个虹膜拍摄的第 k 幅图像,和 W 个特征图像相关后将每个相关结果图像分成 C 个局部区域,则和第 w 个特征图像相关的结果图中第 c 个局部区域通道的子图像为 I_{c,w}^{l,k} (c=1,⋯,C, w=1,⋯,W),所求统计值(均值和标准差)为

$$\begin{aligned}
 E_{c,w}^{l,k} &= \frac{1}{N_c} \sum_{i=m_{c-1}}^{m_c} \sum_{j=n_{c-1}}^{n_c} I_{c,w}^{l,k}(i, j) \\
 D_{c,w}^{l,k} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=m_{c-1}}^{m_c} \sum_{j=n_{c-1}}^{n_c} [I_{c,w}^{l,k}(i, j) - E_{c,w}^{l,k}]^2}{N_c - 1}}
 \end{aligned} \quad (5)$$

其中子图像有 m_c×n_c=N_c 个像素.对应整个虹膜图像的统计特征向量为 {E_{c,w}^{l,k}, D_{c,w}^{l,k}} |_{c,w}.用类中所有图像的统计特征向量求出类的统计特征值

$$\begin{aligned}
 fE_{c,w}^l &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E_{c,w}^{l,k} \delta E_{c,w}^l = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K [E_{c,w}^{l,k} - fE_{c,w}^l]^2}{K-1}} \\
 fD_{c,w}^l &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K D_{c,w}^{l,k} \delta D_{c,w}^l = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K [D_{c,w}^{l,k} - fD_{c,w}^l]^2}{K-1}}
 \end{aligned} \quad (6)$$

类的统计特征向量为 {fE_c^l, δE_c^l, fD_c^l, δD_c^l} |_c.用加

权欧氏距离分类器 (the Weighted Euclidean Distance WED classifier, WED)^[10] 识别, 设待识别图像的统计特征向量 $\{E_{c,w}, D_{c,w}\}_{c,w}$, 求它和第 $l(l=1, \dots, L)$ 类虹膜的加权欧氏距离 (WED)

$$\text{WED}(l) = \sum_{c=1}^C \sum_{w=1}^W \frac{(E_{c,w} - fE_{c,w}^l)^2}{(\delta E_{c,w}^l)^2} + \sum_{c=1}^C \sum_{w=1}^W \frac{(D_{c,w} - fD_{c,w}^l)^2}{(\delta D_{c,w}^l)^2} \quad (7)$$

如果它和第 p 类虹膜的 WED 最小则被识别为第 p 类虹膜

$$\text{WED}(p) = \min_{1 \leq l \leq L} \{\text{WED}(l)\} \quad (8)$$

最优基优选中使用 Db4 母小波, 预处理后得的虹膜图像 (图 3)。所用图库 $L=22, K=2$, 共 44 个虹膜图像。优选时小波包分解到第三层 ($J=3$)。

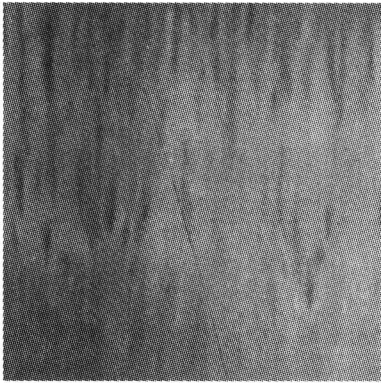


图 3 虹膜图像
Fig. 3 An example image of iris

由于虹膜特征主要是垂直方向的, 故舍弃了水平和对角方向小波包基。第一层仅保留小波包基 (1,0)。由于 1,2 层小波包通道信息能量很弱, 所以只保留了第 3 层的 (3,8) 和 (3,10)。优选小波基时不对图像进行局部区域划分。待选小波包基的识别率如表 1。为了使识别能力最大, 不同于以熵为标准的优选, 母节点 (3,2) 和它的子节点 (3,8) 和 (3,10) 都被选中以提高识别率。最终选定的联合最优小波包基为 (2,2)、(3,2)、(3,8) 和 (3,10), 并生成相应的特征图像。最优小波包基生成的复合滤波器的振幅如图 4, 组合因子均为 1。没有光学小波包滤波器时, 所有图像识别结果为 90.91%, 加入小波包滤波器后识别率为 95.45%, 有了明显提升, 证明该滤波器的引入可以有效提高系统的整体识别能力。

表 1 待选小波包基识别能力指标

| 基的标号 | (1,0) | (2,0) | (2,2) | |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 识别率 | 45.45% | 31.82% | 72.73% | |
| | (3,0) | (3,2) | (3,8) | (3,10) |
| | 11.36% | 65.91% | 47.73% | 52.27% |

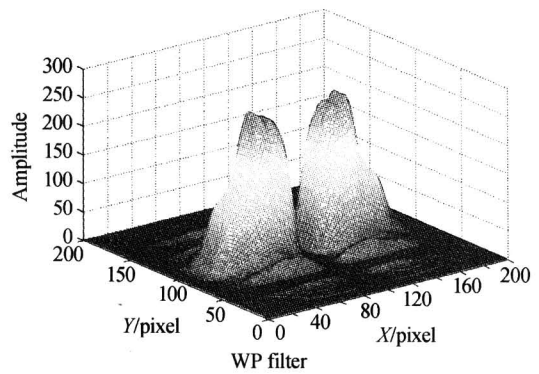


图 4 最优小波包基复合光学滤波器
Fig. 4 The amplitude of the WP filter spectrum

3 结论

OWPT 概念的提出是对 OWT 理论的丰富。它不仅提供了更为精细的信号表示方式, 同时将拓展光学小波变换的应用领域。设计制作光学小波包滤波器是其实现方式之一。在基于体全息的光电混合虹膜识别系统中, 引入复合光学小波包滤波器做小波包特征提取预处理被证明可以提高系统的识别能力。OWT 目前主要作为特征提取器, 光学小波包滤波器可以针对问题的需要做更准确地特征提取, 提高 OWT 处理信号的能力, 同时仍具有光学高并行性的优点。另外, OWPT 也可通过将小波包基函数存储在晶体里, 通过体全息晶体相关来实现, 该变换方式有待深入研究。

参考文献

- Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation. *IEEE Trans Patt Anal And Mach Intell*, 1989, **11**(7): 674~693
- 杨静, 王岩飞, 刘波. 一种新的非抽取提升结构小波变换图像融合算法. *光子学报*, 2004, **33**(6): 728~731
Yang J, Wang Y F, Liu B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 728~731
- 李明, 吴艳, 吴顺君. 基于小波多通道特征级融合的彩色纹理图像分析. *光子学报*, 2004, **33**(8): 999~1003
Li M, Wu Y, Wu S J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 999~1003
- Sheng Y, Roberge D, Szu H. Optical wavelet transform. *Opt Eng*, 1992, **31**(9): 1840~1845
- Wang W L, Jin G F, Yan Y B, et al. Joint wavelet transform correlator for image features extraction. *Applied Optics*, 1995, **34**(2): 370~376
- Coifman R, Meyer Y, Wickerhauser M V. Progress in wavelet Analysis and Applications. France: Editions Frontieres, 1993. 1~12

- 7 那彦, 史林, 杨万海. 小波包变换与遥感图像融合. 光子学报, 2004, **33**(6): 736~738
Na Y, Shi L, Yang W H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 736~738
- 8 Walczak B, Massart D. Noise suppression and signal compression using the wavelet packet transform. *Chemom Intell Lab Syst*, 1997, **36**(2): 81~94
- 9 Tikkanen P E. Nonlinear wavelet and wavelet packet denoising of electrocardiogram signal. *Biol Cyber*, 1999, **80**(4): 259~67
- 10 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets, Philadelphia. PA:SIAM, 1992. 202~213
- 11 Daugman J G. Recognition people by their iris patterns. *Information Security Technical Report*, 1998, **3**(1): 33~39
- 12 Ma L, Wang Y H, Tan T N. Iris recognition based on multichannel gabor filtering. *Proceedings of ACCV' 2002*, 2002, I: 279~283
- 13 Ding L, Yan Y B, Xue Q Z, et al. Wavelet packet compression for volume holographic image recognition. *Optics Communications*, 2003, **216**(1): 105~113
- 14 Goertzen B J, Mitkas P A. Volume holographic storage for large relational databases. *Optical Engineering*, 1996, **35**(7): 1847~1853

Research on Optical Wavelet Packet Transform and Its Filter for Iris Recognition

Cai De, Yan Yingbai, Jin Guofan

¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084

Received date: 2005-02-28

Abstract To introduce wavelet packet transform into optical transform and improve the recognition performance of optical iris recognition, optical wavelet packet transform is proposed based on the analysis of the necessary condition for optical wavelet transform. Using the eigen-image based correlation recognition method and replacing the entropy criterion with the identification rate for iris recognition, the joint best wavelet packet bases for the whole image bank are chosen. Corresponding eigen images are generated. To further improve the performance of optical iris recognition, an optical wavelet packet filter is designed through linearly combining these wavelet packet bases. The filter is inserted in a volume holographic opto-electronic hybrid iris recognition system for feature extraction. The wavelet packet features extracted correlate with the eigen images stored in the photorefractive crystal. The correlation results are captured and transferred to a computer for post processing. In simulation, the mother wavelet, Db4, is utilized. Four wavelet packet bases are selected. The filter can obviously improve the identification rate from 90.91% to 95.45%. This result not only proves the efficiency of the filter designed but also shows that the capacity of optical information processing is enhanced after the introduction of wavelet packet transform into optics.

Keywords Optical wavelet transform; Wavelet packet transform; Iris recognition; Optical filter

Cai De was born in 1973. Currently he is a Ph. D. candidate of Tsinghua University. His research interests include pattern recognition, wavelet transform and volume holography.

