

# 基于 Log-Gabor 和正交等度规映射的人脸识别

王庆军 张汝波

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

**摘要** 针对人脸识别中的特征提取问题,提出一种基于 Log-Gabor 和正交等度规映射(Orthogonal IsoProjection, OIsop)的人脸识别算法。算法首先采用 Log-Gabor 小波对图像进行滤波来提取高阶非线性统计信息。然后,在原始的优化问题中增加正交约束条件,推导出能得到一组具有正交性最优映射向量的迭代公式,使得算法更利于保留人脸非线性子流形空间与距离有关的结构信息和重构样本。通过 ORL 和 PIE 库上的人脸识别实验验证了算法的有效性。

**关键词** 子空间,等度规映射,Log-Gabor,流形,正交等度规映射,人脸识别

**中图法分类号** TP391.4 **文献标识码** A

## Face Recognition Based on Log-Gabor and Orthogonal IsoProjection

WANG Qing-jun ZHANG Ru-bo

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract** In view of the problems of feature extraction in face recognition, a Log-Gabor and orthogonal supervised IsoProjection based algorithm for face recognition was proposed in this paper. The proposed algorithm first gets the high-order nonlinear statistical information by calculating the Log-Gabor wavelet representation of face images. Then the orthogonal constrained conditions added to the original optimal problem and the iterative formulae for finding a set of orthogonal optimal projection vectors are deduced. The orthogonal basis can help to preserve the information of nonlinear sub-manifold space which is related to distance and reconstruct data. The experimental results on ORL and PIE face database illustrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords** Sub-space, IsoProjection, Log-Gabor, Manifold, Orthogonal IsoProjection, Face recognition

子空间分析法由于具有描述性强、计算代价小、易实现及可行性好等特点,成为计算机视觉、模式识别领域的研究热点,其中最典型的两个算法是 PCA(Principal Components Analysis)<sup>[1]</sup>和 LDA(Linear Discriminant Analysis)<sup>[2]</sup>。但算法由于基于全局欧式结构,因此对非线性结构数据无能为力。

自 2000 年以来,出现了很多非线性流形算法,比如等距映射(ISOMAP)<sup>[3]</sup>、局部线性嵌入(Locally Linear Embedding, LLE)<sup>[4]</sup>和拉普拉斯映射(Laplacian Eigenmap, LE)<sup>[5]</sup>等,但非线性流形学习算法的缺点就是对新数据处理困难,即只在训练数据上进行了处理,测试数据点在做识别时计算复杂度较高。为解决该问题,出现了几种非线性流形的线性化算法,如等度规映射(IsoProjection)<sup>[6]</sup>、邻域保护嵌入(Neighborhood Preserving Embedding, NPE)<sup>[7]</sup>及局部保局投影(Locality Preserving Projections, LPP)<sup>[8]</sup>。但是由于该类算法本身是通过求解一个不对称特征方程的特征值所对应的特征向量进行投影,因此,它并不能保证各向量之间均为正交而导致人脸数据重建困难。针对该问题,有学者提出了上述算法的正交化版本,如正交局部保持投影<sup>[9,10]</sup>、正交邻域保护嵌入<sup>[11]</sup>等。

流形学习算法不能有效地消除图像中如高阶相关等冗余

信息,影响了算法的识别性能。针对该问题,Zheng 等<sup>[12]</sup>提出将 Gabor 特征与监督保局映射(supervised LPP, SLPP)结合起来进行人脸识别,以及 Gabor 特征和判别保局投影结合<sup>[13]</sup>。多级小波分解<sup>[14]</sup>、多尺度 LBP 特征<sup>[15]</sup>以及 Gabor 小波变换<sup>[16]</sup>也都取得了较好的识别效果。但 Gabor 滤波器由于存在直流分量(direct current component, DC)与过度表达低频分量对高频分量表达不足等缺点,因而影响了图像特征的提取效果。为克服 Gabor 小波的缺点,文献[17]提出基于 Log-Gabor 和 LPP 的人脸识别,获得了较优效果,但该算法同样存在与传统 LPP 算法基向量非正交的缺陷。

提出了一种新型的基于 Log-Gabor 和正交等度规映射(LGOIsop)的人脸识别算法,该算法首先用 Log-Gabor 小波来去除图像的高阶冗余信息,提取图像新的 Log-Gabor 小波特征,然后正交化等度规映射的基向量,使得算法更利于保留人脸非线性子流形空间与距离有关的结构信息。

## 1 Log-Gabor 小波

经研究证明,人类的视觉特性具有非线性,且这种非线性具有对数性质,而在对数频率尺度上,滤波器的传递函数大致是对称的,使用在对数频率尺度上传递函数为高斯函数的滤

到稿日期:2010-03-21 返修日期:2010-06-28 本文受国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA04Z215)资助。

王庆军(1982—),男,博士生,主要研究方向为图像处理、人脸识别及检测等,E-mail, Qingjunwangfast@163.com;张汝波(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能机器人与智能控制、机器学习与计算智能等。

波器可以对图像进行更有效的编码。Field<sup>[18]</sup>提出的 Log-Gabor 滤波器是在对数频率尺度上传递函数为高斯函数的滤波器, Log-Gabor 滤波器的带宽更接近人类视觉通道带宽的特性。二维 Log-Gabor 小波在频域的直角坐标上定义为:

$$G(u, v) = \exp\left\{-\frac{(\log(u_1/u_0))^2}{2(\log(k/u_0))^2}\right\} \exp\left\{-\frac{v_1^2}{(2\sigma_v)^2}\right\} \quad (1)$$

式中,  $u_1 = u \cos\theta + v \sin\theta$ ,  $v_1 = -u \sin\theta + v \cos\theta$ ;  $\theta$  为滤波器的方向,  $u_0$  为中心频率,  $k$  控制在  $u_1$  方向的带宽,  $\sigma_v$  控制在  $v_1$  方向的带宽。

Log-Gabor 滤波器除具备 Gabor 滤波器的多通道及多分辨率等优点外, 还具备两个主要特点: 一是无 DC, 带宽可不受限制; 二是传递函数在高频端有一个延长的尾巴, 弥补了 Gabor 滤波器过度表达低频分量而对高频分量表达不足的缺点。

一幅人脸图像的 Log-Gabor 特征就是该图像和一组 Log-Gabor 小波卷积的结果。假设  $I(x, y)$  表示一幅灰度图像, 其 Log-Gabor 特征表示为  $\psi_{u,v}(x, y) = I(x, y) \otimes G_{u,v}(x, y)$ 。其中,  $\otimes$  表示卷积,  $G_{u,v}(x, y)$  是尺度为  $u$ 、方向为  $v$  的 Log-Gabor 小波,  $\psi_{u,v}(x, y)$  就是相应的 Log-Gabor 小波卷积结果。考虑到后处理的复杂性, 首先对每一个  $\psi_{u,v}(x, y)$  进行间隔为  $2^k$  的下采样,  $k$  一般取值为 3, 以减小  $\psi_{u,v}(x, y)$  的图像大小, 然后将图像所有的行向量依次连接成一个向量。图 1 给出了一幅人脸图像经 Log-Gabor 小波滤波后在 5 个尺度、8 个方向上的卷积结果。

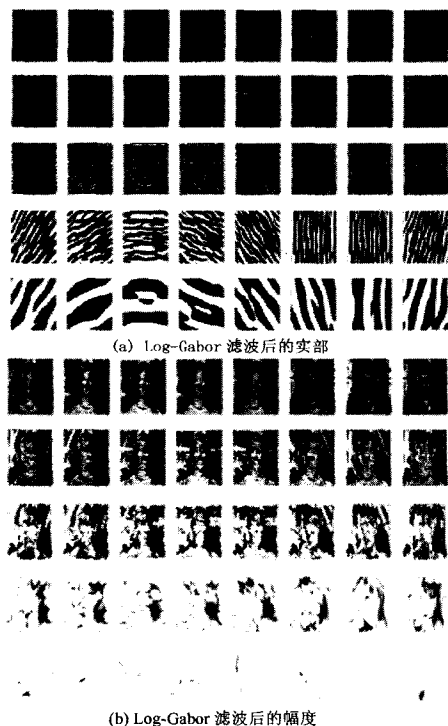


图 1 Log-Gabor 小波滤波后的人脸图像描述

## 2 等度规映射

等度规映射 (IsoProjection) 是等距映射的线性近似。假设原始数据集  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  所处高维空间为  $R^m$ ,  $M^p$  为嵌入的低维流形,  $p \leq m$ , 算法的目的是寻求一个投影矩阵  $A$ , 并将这些样本投影到一个低维的特征空间中, 得到  $X$  的低维嵌入  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ , 并满足  $Y = A^T X$ 。

考虑低维投影函数  $f: R^m \rightarrow R^d$  ( $d \leq m$ ), 为保持数据的流形结构, 设计如下式的目标函数:

$$f^{opt} = \min_{f_j} \sum_i (d_{M^p}(x_i, x_j) - d_{R^d}(f(x_i), f(x_j)))^2 \quad (2)$$

假设  $D_{ij}$  为求得的样本间最短路径, 令  $S_{ij} = D_{ij}^2$ , 采用中心化矩阵  $H = I - ee^T/N$  中心化后可得  $\tau(D_G) = -HSH/2$ 。令  $D_Y$  表示数据降维后的欧式距离矩阵,  $\tau(D_Y)$  表示相应的内积矩阵, 则有  $\tau(D_Y) = Y^T Y = X^T A A^T X$ 。则目标函数可表示为最小化下式:

$$a = \min \|\tau(D_G) - \tau(D_Y)\|^2 = \min \|\tau(D_G) - X^T A A^T X\|^2 \quad (3)$$

通过推导<sup>[15]</sup>, 低维子空间的转换矩阵可转化为如式(4)的特征求解问题:

$$X[\tau(D_G)]X^T a = \lambda X X^T a \quad (4)$$

由于一般情况下  $(X X^T)^{-1} X[\tau(D_G)]X^T$  不是对称的, 因此等度规映射算法获得的基向量也不是正交的。

## 3 正交等度规映射

两个样本降维后在低维空间的欧式距离可表示为:  $\text{dist}(y_i, y_j) = \|y_i - y_j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^T A A^T (x_i - x_j)}$ , 当基向量正交时, 转换矩阵满足  $A A^T = I$ , 则样本间的度量结构信息能够得以保持, 同时也希望能获得一组正交基向量来更好地重构数据, 因此进一步提出等度规映射的正交化算法。

对等度规映射算法添加基向量正交约束  $a_k^T a_1 = a_k^T a_2 = \dots = [a_k^T a_{k-1} = 0]$ , 则正交等度规映射的目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} \max J(a) &= a^T X \tau(D_G) X^T a \\ \text{s. t. } a_k^T a_1 &= a_k^T a_2 = \dots = a_k^T a_{k-1} = 0 \\ a^T X \tau(D_G) X^T a &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$a_1$  可由求解  $X[\tau(D_G)]X^T a = \lambda X X^T a$  最大特征值对应的特征向量组成, 假设已计算得前  $k-1$  个特征向量  $[a_1, a_2, \dots, a_{k-1}]$ , 采用拉格朗日函数, 以上约束问题可构造方程  $T^{(k)}$  为:

$$T^{(k)} = a_k^T X \tau(D_G) X^T a_k - \mu_1 a_k^T a_1 - \dots - \mu_{k-1} a_k^T a_{k-1} - \lambda (a_k^T X \tau(D_G) X^T a_k - 1) \quad (6)$$

令式(6)对  $a_k^T$  偏导为零, 有:

$$2X \tau(D_G) X^T a_k - 2\lambda X \tau(D_G) X^T a_k - \mu_1 a_1 - \dots - \mu_{k-1} a_{k-1} = 0 \quad (7)$$

式(7)两边同时左乘  $a_i^T (X X^T)^{-1}$ ,  $i=1, \dots, k-1$  得:

$$\mu_i a_i^T (X X^T)^{-1} a_1 + \dots + \mu_{k-1} a_i^T (X X^T)^{-1} a_{k-1} = 2a_i^T (X X^T)^{-1} X \tau(D_G) X^T a_k \quad (8)$$

令  $\mu^{(k-1)} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{k-1}]^T$ ,  $P^{(k-1)} = [v_1, v_2, \dots, v_{k-1}]$ ,  $Q^{(k-1)} = [P^{(k-1)}]^T (X X^T)^{-1} P^{(k-1)}$ ,  $Q_{ij}^{(k-1)} = a_i^T (X X^T)^{-1} a_j$ 。代入式(8)可得:

$$\mu^{(k-1)} = 2(Q^{(k-1)})^{-1} [P^{(k-1)}]^T (X X^T)^{-1} X \tau(D_G) X^T a_k \quad (9)$$

式(7)两边同时左乘  $(X X^T)^{-1}$ , 有:

$$2(X X^T)^{-1} X \tau(D_G) X^T a_k - (X X^T)^{-1} P^{(k-1)} \mu^{(k-1)} = 2\lambda a_k \quad (10)$$

式(9)代入式(10)可得:

$$\{I - (X X^T)^{-1} P^{(k-1)} (Q^{(k-1)})^{-1} [P^{(k-1)}]^T\} \cdot (X X^T)^{-1} X \tau(D_G) X^T a_k = \lambda a_k \quad (11)$$

因此, 在得到前  $k-1$  个基向量后,  $a_k$  为式(11)最大的特征值对应的特征向量。上述给出了求取正交等度规映射算法基向量的迭代方法, 由最终求解可得正交等度规映射算法的

转换矩阵  $A=[a_1, a_2, \dots, a_d]$ 。

## 4 实验

为了验证算法的有效性,分别在 ORL 和 PIE 人脸库上进行了仿真实验对比,所有实验都采用欧式距离度量下的最近邻分类器进行分类。ORL 人脸库有 40 个人,每人由不同表情或不同视点的 10 幅图像组成,一共 400 张。图 2 是取自 ORL 人脸库的部分样本。PIE 人脸库包含 68 个人组成的 41368 幅人脸图像,其中包括每个人的 13 种姿态、43 种光照和 4 种表情下的图像。这些图像充分反映了人脸的位置、光照和表情的变化。图 3 是取自 PIE 人脸库的部分样本。这两个人脸库上的复杂程度由简单到复杂变化。为方便计算,在预处理阶段,所有的人脸图像都经过手动眼睛定位、校准,最终归一化为  $32 \times 32$  的图像,然后对两个人脸库中的每幅图像都进行标准化。



图 2 ORL 库中的部分人脸图像



图 3 PIE 库中部分人脸图像

在对 ORL 库进行实验时,对每人选择 4 幅图像用作训练样本,其它图像用于测试样本。在对 PIE 人脸库实验时,由于该人脸库比较大,对每人选择 40 张接近正面图像进行实验,组成  $68 \times 40 = 2720$  大小的人脸库,这些图像充分反映了人脸的光照和表情的变化。每次实验时对每人随机选取 20 幅图像进行训练,剩余 20 张图像用于测试。每种算法运行 10 次,最后取平均值作为识别结果。

为更好地对 Gabor 小波和 Log-Gabor 小波进行对比,选择 8 个方向、5 个尺度,然后采用  $\rho=8$  进行下采样。实验结果与 PCA、等度规映射以及文献[12]中的 Gabor+SLPP 算法进行了比较,为了避免由对  $XX^T$  的逆运算产生的奇异问题,先进行 PCA 投影。图 4 和图 5 分别给出了 ORL 人脸库和 PIE 人脸库不同嵌入维数下的识别率。表 1 给出了各个算法的最高识别率和对应的维数。

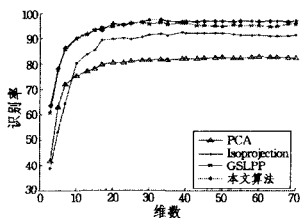


图 4 ORL 人脸库识别率及特征维数间的关系

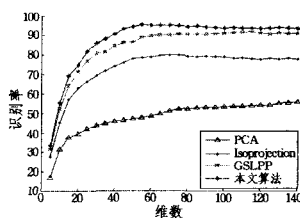


图 5 PIE 人脸库识别率及特征维数间的关系

从实验结果可以看出,提出的算法在 ORL 和 PIE 人脸库的识别结果是最佳的。结合 Gabor 和 Log-Gabor 小波的算法识别率较高,说明 Gabor 或者 Log-Gabor 小波可以有效地消除图像中的冗余信息,使流形学习算法能够充分地提取人脸图像中更为有效地鉴别特征。利用 Log-Gabor 小波相对于 Gabor 小波的算法识别性能更为有效,这也进一步验证了

Log-Gabor 小波更符合人类的视觉特性。此外,算法中的正交化思想有效地保留了人脸非线性子流形空间与距离有关的结构信息,进一步提高了识别率。

表 1 在两个人脸库上的最高识别率及特征维数

方法	ORL 人脸库		PIE 人脸库	
	最高识别率	维数	最高识别率	维数
PCA	83.33	119	48.6	387
Isoprojection	92.1	39	79.87	70
GSLPP	95.15	33	92.35	115
LGol sop	98.30	31	98.71	55

**结束语** 本文在对 Log-Gabor 小波和等度规映射算法进行分析后提出了一种结合 Log-Gabor 小波特征和正交等度规映射的人脸识别算法,该算法对传统的等度规映射算法进行了改进。算法首先用 Log-Gabor 小波对图像进行滤波来提取高阶统计信息,然后正交化等度规映射的基向量,算法充分利用了 Log-Gabor 小波优异的图像特征的表征能力和正交等度规映射有效的保持数据拓扑结构及鉴别的能力。在 ORL, PIE 库上的人脸识别实验证明提出算法的识别性能优于 PCA、原始等度规映射和 Gabor+SLPP 算法,在 4 个训练样本的 ORL 库和 20 个训练样本的 PIE 库的识别率都达到了 98% 以上。但是由于对 Log-Gabor 小波滤波后的图像特征直接下采样有可能丢失信息,因此如何有效地进行 Log-Gabor 小波图像特征提取以提高复杂条件下的人脸识别的正确率和效率有待深入研究。

## 参考文献

- [1] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition[J]. Journal of cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 72-86
- [2] Belhumeur P N, Hespanha J P, Kriegman D J. Eigenfaces vs. fisherfaces: Recognition using class specific linear projection[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and machine Intelligence, 1997, 19(7): 711-720
- [3] Tenenbaum J B, de Silva V, Langford J C. A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction[J]. Science, 2000, 290(5500): 2319-2323
- [4] Roweis S T, Saul L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science, 2000, 290(5500): 2323-2326
- [5] Belkin M. Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation[J]. Neural Computation, 2003, 15(6): 1373-1396
- [6] Cai Deng, He Xiao-fei, Han Jia-wei. Isometric projection[C]// Proceedings of AAAI'2007. Vancouver, British Columbia, 2007: 528-533
- [7] He Xiao-fei, Cai Deng, Yan Shui-cheng, et al. Neighborhood preserving embedding[C]// Tenth IEEE International Conference on Computer Vision. Beijing, China, 2005: 1208-1213
- [8] He Xiao-fei, Yan Shui-cheng. Face recognition using laplacian-faces[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3): 328-340
- [9] 金一, 阮秋琦. 基于核的正交局部保持映射的人脸识别[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 283-287
- [10] 林宇生, 郑宇杰, 杨静宇. 一种基于 Schur 分解的正交鉴别局部保持投影方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 701-706

(下转第 295 页)

切分,以获取 RTL 级数据通路。

步骤 3 通过路径覆盖测试,采用贝叶斯网络学习方法训练获得各通路权重(使用频率),以形成加权数据通路。

步骤 4 为减少电路中冗余状态翻转,以降低功耗,将路径权重作为控制逻辑产生或合并的依据。给定阈值  $T, T \in (0, 1)$ , 则可根据下面的规则来控制门控逻辑的合并与插入。这里  $T$  的取值与逻辑复杂度有关。

$$\begin{cases} \text{插入冗余门控逻辑,} & \text{if } w_i > T \\ \text{合并或关闭相应门控逻辑,} & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

步骤 5 对低功耗优化后的 RTL 代码进行逻辑综合。

步骤 6 使用 RTL Compiler 工具<sup>[8]</sup>对优化后的设计进行功耗、时序和面积的评估。

#### 4 优化仿真测试与性能分析

实验测试中,选择 ITC99 基准电路<sup>[10]</sup>进行实际测试,阈值  $T$  取值为 0.08。由 RTL Compiler 工具读入 Verilog 设计代码,利用程序切片技术对数据通路模拟矢量进行化简,通过贝叶斯网络训练生成加权数据通路,最后根据路径权重控制门控逻辑的合并或插入。

表 1 文献[7]ODC 策略与本文算法生成数据通路节点数比较

测试电路	RTL 数据通路中节点数		
	文献[7]算法	本文算法	改进(%)
bch. 03	173	146	15.61
bch. 04	81	72	11.11
bch. 05	119	104	12.61
bch. 07	126	108	14.29
bch. 08	57	53	7.02
bch. 09	78	71	8.97
bch. 10	332	266	19.88

本文采用程序切片技术对设计进行化简,表 1 列出了孟建熠等的改进 ODC 策略<sup>[7]</sup>与本文算法生成的数据通路节点数量的对比,对比结果显示本文算法大大减少了基准电路中 RTL 数据通路的数量,从而有助于大幅降低系统功耗。

表 2 本文方案与 ODC 优化算法性能比较

测试电路	ODC 优化算法 <sup>[7]</sup>		本文方案			
	面积 [ $\mu\text{m}^2$ ]	功耗 [ $\mu\text{W}$ ]	面积 [ $\mu\text{m}^2$ ]	面积减 少(%)	功耗 [ $\mu\text{W}$ ]	功耗优 化(%)
bch. 03	1489	430.23	1396	6.24	384.41	10.65
bch. 04	4120	875.42	3769	8.53	842.33	3.78
bch. 05	3942	253.51	3778	4.17	228.41	9.90
bch. 07	2950	426.65	2764	6.30	396.27	7.12
bch. 08	1240	220.28	1121	9.58	205.46	6.73
bch. 09	1461	377.77	1387	5.06	344.38	8.84
bch. 10	7756	927.9	7158	7.71	820.17	11.61
平均	\	\	\	6.80	\	8.38

本文利用贝叶斯网络训练获得各路径权重,根据权重选择合并或插入相应门控逻辑,以降低 SoC 芯片总功耗,表 2 给出了本文提出的基于加权数据通路的低功耗策略与 ODC 优化策略<sup>[7]</sup>的性能对比。

对比测试中,文献[7]算法中的 ODC 概率阈值  $P_T$  取值为 10%。从表 2 中测试结果可发现,与 ODC 优化算法<sup>[7]</sup>相比,本文方案芯片功耗总体下降了 8.38%,面积平均减少了 6.8%。

**结束语** 功耗管理是当前芯片设计面临的一个日益严峻的问题,本文设计了一种基于加权数据通路的低功耗优化方案,其利用程序切片技术简化低功耗设计的 RTL 代码,并生成简化的 RTL 级数据通路,明显降低了系统设计计算负荷。通过路径覆盖测试与贝叶斯网络训练得到各数据通路权重(使用频率),以形成加权数据通路,根据各路径权重自适应控制门控逻辑的合并或插入,大幅降低了芯片面积与总功耗。SoC 低功耗优化是一个综合过程,实际电路设计过程中,需要在系统设计的各个层次进行考虑,同时权衡功耗、面积与性能多个因素,才能获得满意的优化效果。

#### 参考文献

- [1] 魏敬和,吴晓洁,虞致国. SoC 低功耗设计及其技术实现[J]. 电子与封装,2009,9(5):20-23
- [2] 井刚. 数字集成电路 RTL 级低功耗设计技术[J]. 中国集成电路,2003(11):33-36
- [3] 中国电子报. 互连技术引入 SoC 低功耗设计始自 RTL[EB/OL]. <http://www.hqew.com/info-178903.html>,2010-10-20 / 2010-10-20
- [4] Papachristou C A, Nourani M, Spining M. A Multiple Clocking Scheme for Low Power RTL Design [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems,1999,7(2):266-276
- [5] 罗旻,杨波,高德远,等. 寄存器传输级低功耗设计方法[J]. 小型微型计算机系统,2004,25(7):1207-1211
- [6] 李杰,毕宗军,卜爱国,等. 基于功能仿真的 RTL 级低功耗优化[J]. 现代电子技术,2006(23):112-115
- [7] 孟建熠,丁永林,严晓浪,等. 一种 RTL 级数据通路 ODC 低功耗优化算法[J]. 电子学报,2010,38(7):1654-1659
- [8] Cadence. Datapath Synthesis in Encounter RTL Compiler [P]. U. S. Patents [5,892,687],[6,470,486],[6,772,398],[6,772,399],[6,807,651],[6,832,357],and [7,007,247]. 2007
- [9] 李曦,郭阳,李思昆. RTL 级模拟矢量自动生成设计化简方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(5):671-677
- [10] Davidson S. ITC99 Benchmark Home Page [EB/OL]. <http://www.cerc.utexas.edu/itc99-benchmarks/bench.html>,2010-10-08
- [15] 王玮,黄非非,李见为,等. 使用多尺度 LBP 特征描述与识别人脸[J]. 光学精密工程,2008,16(4):698-705
- [16] 聂祥飞,郭军. 利用 Gabor 小波变换解决人脸识别中的小样本问题[J]. 光学精密工程,2007,15(6):973-977
- [17] 黄鸿,李见为,冯海亮. 融合 Log-Gabor 小波和监督保局映射的人脸识别算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(10):1332-1337
- [18] Field D J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells[J]. Journal of the Optical Society of America,1987,4(12):2379-2394

(上接第 276 页)

- [11] 陶晓燕,姬红兵,景志宏. 一种用于人脸识别的正交邻域保护嵌入算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2008,35(3):539-443
- [12] Zheng Z L, Yang F, Tan W A, et al. Gabor feature-based face recognition using supervised locality preserving projection[J]. Signal Processing,2007,87(10):2473-2483
- [13] 祝磊,马莉,厉力华. 一种基于 GDLPP 的人脸识别算法[J]. 光电工程,2008,35(6):108-112
- [14] 龚卫国,杨利平,辜小花,等. 基于多级小波分解的人脸图像光照补偿方法[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1459-1464