

离散对称变换在人脸图像 眼睛定位中的应用*

刘文予 潘峰

(华中科技大学电子与信息工程系, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北, 武汉, 430074)

摘要 从计算离散对称值出发, 提出了一种自动定位人脸图像中眼睛的离散对称变换算法, 通过邻域灰度均匀度算子对各点邻域的检测, 去除处于规则区域的点, 并用圆环邻域代替对称算子圆形邻域, 大大降低了计算量, 提高了对称的准确性。实验结果表明: 在未进一步利用对称角度和人脸固有的几何比例关系的情况下, 该算法能准确地对正面人脸图像中的眼睛进行定位。

关键词 对称, 离散对称变换, 人脸识别, 人眼定位, 灰度均匀度算子, 圆环邻域。

APPLICATION OF DISCRETE SYMMETRY TRANSFORM IN EYES IMAGE FEATURES LOCATION*

LIU Wen-Yu PAN Feng

(Department of Electronics & Information Engineering,

Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A novel discrete symmetry transform (DST) algorithm of location of eyes in facial images was presented based on the value of discrete symmetry. The pixels on regular neighbor zone were removed by detecting the gray uniformity on neighbor zone of each pixel, and the circle mask of symmetry operator was replaced by an annular mask. Better accuracy and shorter computing time could be obtained by using DST than using generalized symmetry transform. Experimental results prove that this algorithm can locate the eyes in facial images automatically without using symmetry angle and geometric feature of human face.

Key words symmetry, discrete symmetry transform, face recognition, eyes location, gray uniformity operator, annular mask.

引言

在人脸识别中, 人脸特征的自动提取和描述是很重要的一个环节^[1]。人脸识别常用基于灰度的方法和基于结构的方法, 前者将整个人脸看成一个二维灰度变化的模板, 试图从整体上捕捉和描绘人脸的特征, 发现其中潜在的统计特性, 并采用一些标准的数理统计技巧进行处理; 后者通过分析人脸各组成部分, 将特征分成一个个单独的小模板, 然后对每个模板分别提取特征量。

文献[2]中的人脸识别算法在定位人脸上眼睛、鼻、嘴等五官的位置时, 主要是根据人脸图像的灰度

特性。例如对正面人脸图像, 在包含有双眼的条状区域内, 图像灰度变化曲线会在双眼处出现两个尖峰, 由此可确定尖峰处为眼睛中心位置。而文献[3]先用 Canny 算子提取人脸图像的边缘, 然后用 Hough 变换来定位眼睛中心位置。在此基础上, 使用眼睑弹性模板去匹配眼睛, 由此提取出眼睛轮廓作为人脸识别的特征量。

近年来, 计算机视觉研究领域中的一些方法被用于脸部特征的提取, 其中比较引人注目的是广义对称变换 GST (Generalized Symmetry Transform)^[4]。在计算机视觉研究中, 对称性被认为是物体的基本性质之一, 通常在将物体从背景中分割出来后, 用来简

* 国家自然科学基金(编号 69973018)资助项目
稿件收到日期 2001-03-05, 修改稿收到日期 2001-06-22

- The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69973018)

Received 2001-03-05, revised 2001-06-22

化物体形状的描述,或物体的近似.目前研究得最多的是点对称(也叫中心对称)和轴对称.对人脸而言,眼睛、嘴、鼻等都具有很强的点对称性,广义对称变换正是用来描述物体的点对称性.文献[4]利用广义对称变换提取脸部特征,进而实现人脸识别.文献[5]在广义对称变换的基础上,定义了一种方向对称变换 DST(Directional Symmetry Transform),用于人眼的精确定位.以上的对称变换利用了人眼的中心强对称性和脸部特征的生理几何分布,对人脸偏转、脸部表情变化、光照变化等因素的作用不敏感,因而具有很好的鲁棒性.但是,以上对称变换的计算需要在大规模的尺度上进行,计算量很大.而且,由于只是描述了各点的局部对称性,当它用于脸部特征的提取时,产生的候选特征点较多,不太利于特征点的精确定位.

本文结合广义对称变换和方向对称变换的优点,提出一种新的对称变换——离散对称变换,简称为 DST (Generalized Symmetry Transform),它不仅具有广义对称变换描述物体对称性大小的特点,而且通过对各点邻域的考察,去除那些处于规则区域的点,可大大降低计算量,实现脸部特征提取的快速算法.

1 离散对称变换的原理

广义对称变换把图像中的所有像素点同等对待,每像素点都计算其对称值.事实上,图像中物体的单一背景区或大面积的灰度均匀区域上的像素点在一定的尺度范围内不具有明显意义的对称性,而这样的像素点在人脸图像中占了很大一部分,如头发、脸部除眼、嘴等特征区域之外的区域及部分身体区域.眼、嘴、鼻等特征区域在大于其轮廓的范围内灰度有变化,这样的区域我们把它称为灰度不均匀区.离散对称变换以减少计算量为出发点,在计算对称之前加入一个对图像灰度不均匀区域的检测步骤,然后定义了一个与广义对称变换相似的对称算子来计算点对称.

为了叙述方便,按从左至右从上到下的顺序,将 2D 图像 I 视为大小为 K 的一维数组,设 p_k 表示 I 上任一像素 (x_k, y_k) ,其中 $k=1, 2, \dots, K$ (以下有关变量名均按此进行标注),像素 p_k 处的灰度值为 $g_k = I(p_k)$.定义计算每像素点在尺度因子 r 的邻域内灰度均匀度的算子为

$$U(p_k) = \sum_{p_m \in C_r, p_n \in C_{r+1}} |g_m - g_n|. \quad (1)$$

该算子中的 C_r 和 C_{r+1} 是以点 p_k 为圆心的同心圆,如图 1 所示. p_m 和 p_n 满足相邻条件 $|p_m - p_n| = 1$,亦即 $(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 = 1$.当 $U(p_k) = 0$ 时, p_k 处于灰度均匀区域,可以不用计算对称值; $U(p_k)$ 的值越大表明 p_k 处于圆形物体区域的可能性越大.考虑到光照等因素的影响,我们用 $U(p_k)$ 的平均值 μ 作阈值,得到二维图像

$$T(p_k) = \begin{cases} 1, & U(p_k) > \mu \\ 0, & U(p_k) \leq \mu \end{cases}$$

用此二值图像来决定是否计算某点的对称值.由图 1 可知,灰度均匀度算子实际上是一个圆环掩模,采用圆环而非一般的矩形邻域是因为作用的对象是近似于圆形的眼睛,圆形更符合几何意义分布.

类似于广义对称变换,我们定义的对称变换算子也作用在边缘图像上.对于任意 p_i 和 p_j 两点,设 L 为过 p_i 和 p_j 的直线, α_i 为 L 与水平 x 轴逆时针夹角.考虑到 L 的无方向性, α_i 的值域显然是 $[0, \pi)$.由于考察是点对称,对任意点 p_k ,在尺度 r 的邻域内对其点对称有贡献的点地集合记为

$$\Gamma(p_k) = \{(p_i, p_j) \mid \frac{p_i + p_j}{2} = p_k,$$

$$2(r - r') < \|p_i - p_j\| \leq 2r, 0 \leq r' \leq r\}.$$

(2)

公式(2)采用的邻域也是圆环邻域,类似于图 1,其中的 r' 用来调节圆环内圆半径.当 $r' = r$ 时,可回退到广义对称变化的邻域定义.定义点 p_k 的离散对称变换为

$$S(p_k) = \sum_{(p_i, p_j) \in \Gamma(p_k)} C(i, j), \quad (3)$$

其中

$$C(i, j) =$$

$$W(\theta_i - \alpha_j, \theta_j - \alpha_i) D(p_i, p_j) R(p_i) R(p_j)$$

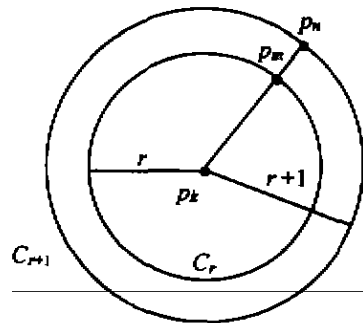


图 1 圆环邻域示意图

Fig. 1 A schematic representation of an annular mask

(4)

为 p_k 邻域内满足式(2)中点 p_i 和 p_j 对 p_k 对称的贡献. 式(4)中 $W(\alpha, \beta) = (1 - \cos(\alpha + \beta))(1 - \cos(\alpha - \beta))$, $D(p_i, p_j) = \frac{1}{\|p_i - p_j\|}$, $R(p_i)$ 表示 p_i 点的梯度大小的对数, θ_i 表示 P_i 的梯度方向^[4]. 式(4)的第一个表达式 $(1 - \cos((\theta_i - \alpha_{ij}) - (\theta_j - \alpha_{ij})))$ 在 $(\theta_i - \alpha_{ij}) + (\theta_j - \alpha_{ij}) = \pi$ 时取得最大值, 此时 p_i 和 p_j 两点的梯度方向处于相反或相对, 但不一定与 p_i 和 p_j 间的连线方向一致; 第二个表达式 $(1 - \cos((\theta_i - \alpha_{ij}) - (\theta_j - \alpha_{ij})))$ 起到补偿作用. 而且它对直线边缘这类我们不感兴趣的点有很好的抑制作用. 在直线边缘上两点 p_i 和 p_j , 其边缘方向与二者连线垂直即 $(\theta_i - \alpha_{ij}) = (\theta_j - \alpha_{ij}) = \pi/2$, 此时式(4)的第一个表达式取最大值, 但由于第二个表达式作用的抵消, 最终取值为 0.

离散对称变换实际上要看成是一种非线性滤波. 由于对每个像素点都进行相同的邻域处理, 适合于并行处理. 在定位圆形物体圆心时, 算子邻域采用圆环, 式(2)取 $r' = 1$, 算法的计算量约为 $O(Kr)$, 比广义对称变换的 $O(Kr^2)$ 大大降低了, 这里的 K 为图像中像素点的数目, r 为邻域大小.

2 基于离散对称变换的脸部特征定位

脸部特征定位过程首先是双眼中心点的定位, 然后利用脸部器官固有的几何比例、相对分布关系来定位嘴和鼻. 通过图像的离散对称变换后, 眼睛中心点附近像素的对称值一般都处在对称值最大的前四、五位. 对具有强对称值的候选点, 采用两条简单的规则进行筛选. 规则 1: 邻近像素合并, 一般选取对称值的最大前 10 位候选点, 将其中位置相邻的候选点合并到它们中对称值最大的像素处, 规则 2: 几何约束判别, 对经过规则 1 筛选后的候选点, 利用眼在脸部的几何分布性质进一步筛选, 取基本符合眼睛分布规律的两点作为最终的定位双眼结果.

规则 1 中的位置相邻定义为 $|p_i - p_j| \leq 2r$, p_i, p_j 为候选点中的任意两点, 指双眼球的中心点; 规

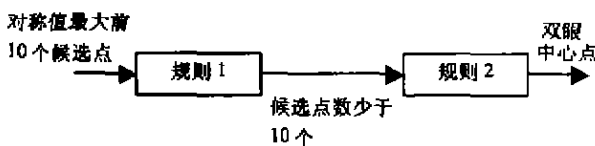


图 2 双眼中心点的筛选

Fig. 2 The process of selecting two midpoints on eyes

则 2 中眼睛分布规律是指双眼间水平距离大约在 1/3 到 1 倍的人脸宽度之间, 垂直距离与脸部的偏转角度有关, 我们限定这个角度在 $\pm 30^\circ$ 之间. 由于 r 为眼球的大小, 根据眼睛在脸部的几何分布性质, 符合此要求的两点 p_i 和 p_j 须满足 $3r \leq |x_i - x_j| < 8r$, $|y_i - y_j| \leq 2.5r$, r 是尺度因子. 筛选过程如图 2 所示. 实际上, 规则 2 的条件还可以适当放宽, 以增强筛选算法的鲁棒性.

由于离散对称变换计算时, 采用不同的尺度因子 r 会导致检测出的强对称点不同. 只有在合适尺度条件下才能准确地对人眼中心点进行定位. 尺度因子 r 与所要定位的对称物体的大小有关, 定位人眼取决于图像中人眼的大小. 如果不能确定尺度因子 r 大小, 那么就要在一个大范围内对不同的尺度进行对称变换, 这将是一个计算量惊人的耗时运算. 因此对尺度因子进行较准确的估计, 将会大大降低定位计算量. 我们采用颜色空间模型进行人脸大小的初步检测, 对尺度因子 r 进行估计. 一般而言, 尺度因子 r 可取为脸宽度约 1/20 左右. 事实证明, 通过这样的估计得到的结果是令人满意的.

计算对称值时, 边缘算子的选择没有特殊要求, 但必须能够计算水平和垂直方向的梯度. 对图像处理中常用的边缘算子都进行了实验, 包括 Sobel 算子、Prewitt 算子、Robert 算子、以及二维高斯算子. 最后选择了 Sobel 算子. 对彩色图像只利用灰度分量进行计算. 定位眼睛法过程可简单描述为: (1) 用 Sobel 算子计算边缘强度和方向, (2) 用灰度均匀算子选取灰度变化区域, (3) 在选取后的区域计算离散对称变换值, (4) 取对称值最大的前 10 个点进行筛选, 确定眼睛中心点.

3 实验结果及分析

为验证离散对称变换算子对定位人眼的有效性和准确性, 从实验图像中切割出一张正面人脸图像, 大小为 131×174 . 取尺度因子 $r = 3$, 得到实验结果如图 3, 定位标志是白色小十字架. 在图 3(d) 中, 经过式(1)灰度均匀算子 $U(I)$ 作用后, 用来计算对称值的像素点大约只占原图的一半左右, 并且都分布在人脸的重要特征区域, 背景区、头发和脸部区域都已作为灰度均匀区域被除去. 图 3(e)~(h) 标出了经过离散对称变换后强对称点的分布情况. 可以看出, 对称值最大的 10 个候选点都集中在眼睛的中心附近. 把候选点扩大到前 40 个最大对称值, 它们的绝大部分依然分布在眼睛处, 从图 3(i) 所示的对称

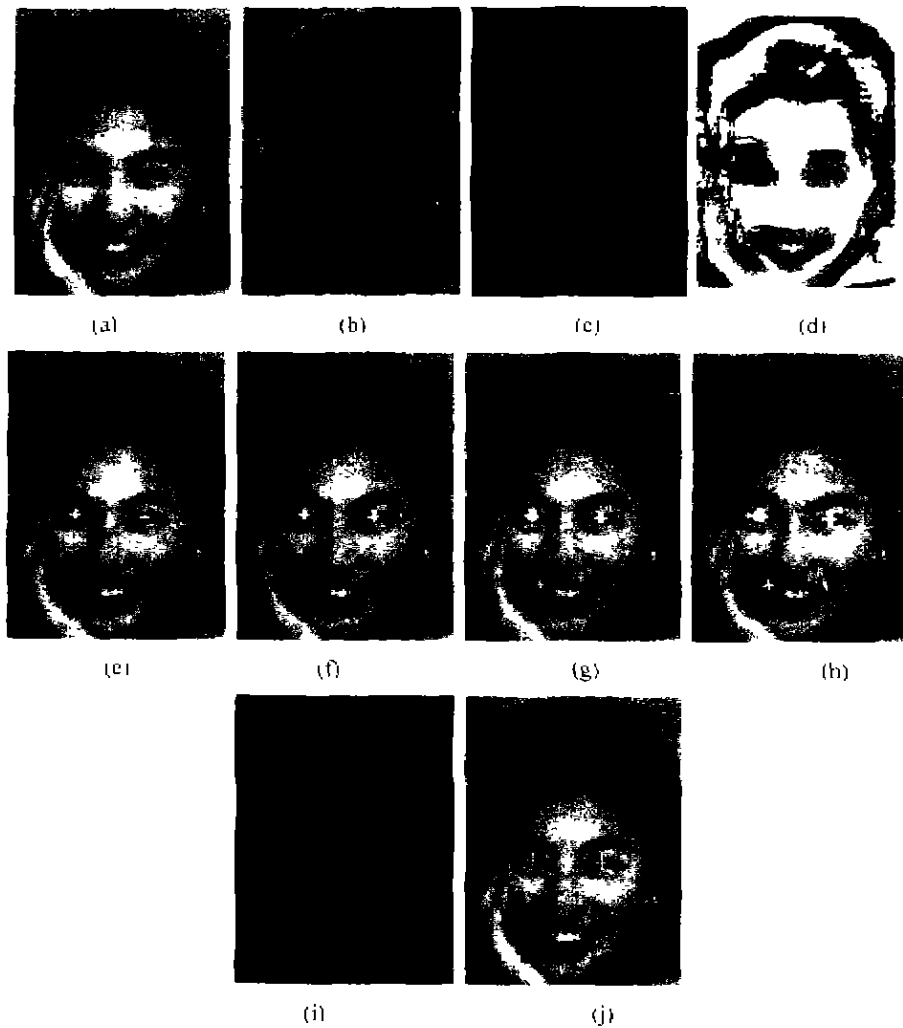


图3 离散对称变换实验结果

(a) 原图, (b) 梯度图像 $T(I)$, (c) 灰度不均匀算子的计算结果 $U(I)$,
(d) $U(I)$ 门限化后 $T(I)$ 与 (a) 的合成图像, (e)~(h) 分别为前 5、10、20、
30 个强对称点分布, (i) 对称变换后的图像, (j) 最终定位结果

Fig. 3 The results of DST

(a) original image, (b) gradient image $T(I)$, (c) result $U(I)$ of gray nonuniformity transform,
(d) composing result of $T(I)$ and (a), (e)~(h) are the results of firsts 5, 10, 20, 30 symmetry
points, (i) result of DST, (j) final eyes localization result

值图像中也可看出这种分布规律. 图 3(j) 显示了经过筛选后最终的定位结果, 这个结果是相当准确的.

我们对 50 幅图像进行了眼睛定位实验, 设定候选点数为 6 个, 尺度因子 r 根据图像中人脸大小在 2、3、4 参数中手动选取. 图 4 是几幅标出定位结果的实验图像, 图 (b) 存在背景干扰, 图 (d) 在衣服条状图案的干扰和头部偏转的情况下仍然准确定位出双眼, 实验结果表明定位基本准确.

我们首先考察尺度因子对离散对称变换和广义

对称变换的影响. 对同一幅实验图像(图 4(a)), 取不同的尺度因子分别计算离散对称和广义对称变换, 实验数据如图 5, 可知两种对称变换计算耗时近似与尺度因子成正比. 在相同的尺度下, 离散对称变换算子比广义对称算子耗时少. 另外, 我们选用了 10 幅大小不同的图像, 在给定尺度因子 $r=3$ 的条件下进行眼睛的定位实验. 图 6 为两种对称变换算子时间的曲线, 图中 n 为图像像素总数, 可以看出对同样大小的图像, 离散对称变换比广义对称变换所

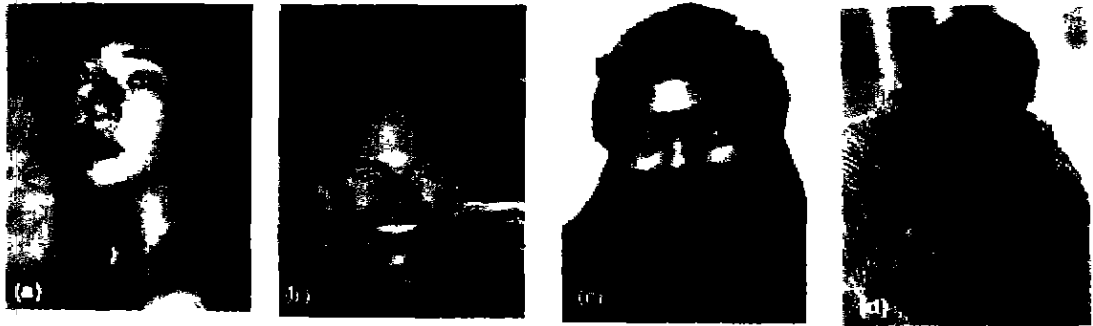


图 4 离散对称变换的眼睛定位结果
Fig. 4 Eyes location results of DST.

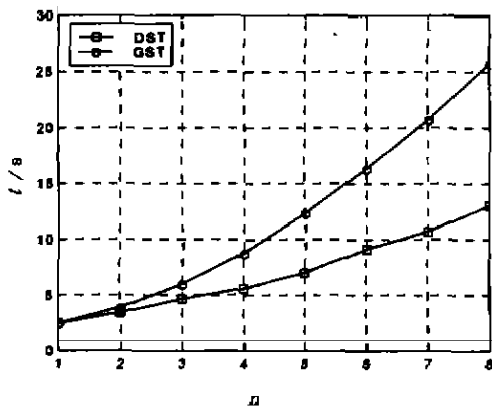


图 5 尺度因子与计算时间的关系
Fig. 5 Relationship between scale factor and calculation time

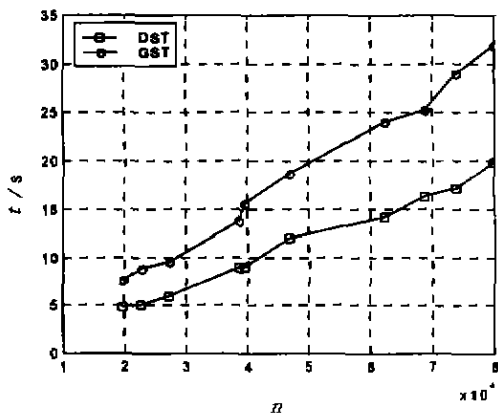


图 6 DST 与 GST 计算时间对比
Fig. 6 Comparison of the calculation time between DST and GST

需时间缩短 1/3 以上。

表 1 列出了分别采用离散对称变换和广义对称

变换的实验结果. 定位准确的判决标准定义为算子定位位置与手动定位位置相差在 2 个像素以内. 设眼睛中心点坐标为 (X_c, Y_c) , 算子定位的点坐标为 (x_n, y_n) , 如果满足 $|x_n - X_c| \leq 2, |y_n - Y_c| \leq 2$, 则认为定位是准确的. 这里限定候选点的数目是为了更好地比较两种对称变换, 如果扩大候选点数, 必然会提高定位的准确性, 但相应的筛选时间也增加了.

实验数据表明, 采用离散对称变换与采用广义对称变换的方法相比, 不仅定位准确率大大提高, 而且计算速度也显著提高. 特别是对正面人脸且眼睛张开的情况, 离散对称变换定位准确率可以达到 95% 以上. 对在那些不能成功定位的图像, 主要原因是背景复杂 (存在假眼睛图像)、光照条件不好、眼睛几何特征不明显 (即眼睛几乎没张开或张开程度太小), 这种图像广义对称变换同样不能成功定位.

广义对称变换定位失败的原因可以从算子的邻域形状进行分析. 广义对称变换对圆形邻域内的点对都计算其对圆心点对称值的贡献, 因此会受到小于邻域面积的假眼睛物体 (如小块的斑点) 的影响, 在不感兴趣的地方产生很大的对称值, 干扰最终的定位结果. 而离散对称变换采用圆环邻域, 不考虑圆内的点, 从而避免了这类错误产生的可能性.

4 结论

本文从考察物体对称性的角度出发, 在广义对称变换的基础上, 提出一种新的对称变换-离散对称

表 1 两种对称变换定位结果

Table 1 The location results of DST and GST

对称算子	定位准确率	候选点数 (个)
广义对称变换	85%	6
离散对称变换	92%	6

变换,能使脸部特征区域经过变换后特征被突出,并将其用于眼睛中心点的定位。由于眼睛关于中心的对称具有旋转不变性,因此离散对称变换受人脸偏转的影响很小,而且计算机模拟实验显示,它对一定程度的背景干扰以及光照的变化不敏感。由于灰度不均匀算子的引入,以及对称算子邻域改为圆环邻域,离散对称变换比广义对称变换大大减少了计算量,缩短了定位时间。在合适的尺度下,对双眼闭合程度较小的人脸图像,采用离散对称变换准确定位眼睛中心点的概率是很高的。在图像大小已知的应用场合(如视频会议、人脸识别),可采用事先估计的平均尺度因子,以提高定位算法的自动化程度。在进一步的工作中,尺度因子的选取和改进对称算子对尺度因子依赖性将是离散对称变换研究的方向,一种可行的方法是对图像大小进行归一化处理,使尺度因子可事先确定。

REFERENCES

- [1] PEI Soo-Chang, KO Ching-Wen, SU Ming-Shung. Global motion estimation in model-based image coding by tracking three-dimension contour feature points. *IEEE Trans. Circuits and System for Video Technology*, 1998, 2(8): 181—190
- [2] YAN Chao, SU Guang-Da. Facial feature location and extraction from front-view image. *Journal of Image and Graphics* (严超, 苏光大. 人脸特征的定位与提取, *中国图像图形学报*), 1998, 3(5): 375—379
- [3] WANG Lei, MO Yu-Long, QI Fei-Hu. Automatic eye feature extraction based on Hough transform and eyelid deformable template. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王磊, 莫玉龙, 戚飞虎. 基于霍夫变换和眼睑弹性模板的眼睛特征提取, *红外与毫米波学报*), 1999, 2(18): 53—60
- [4] Reisfeld D, Yeshurun Y. Preprocessing of face images: detection of features and pose normalization. *IEEE Trans. Computer Vision and Image Understanding*, 1998, 3(71): 413—420
- [5] ZHOU Jie, LU Chun-Yu, ZHANG Chang-Shui, et al. Human face location based on directional symmetry transform. *Acta Electronica Sinica* (周杰, 卢春雨, 张长水, 等. 基于方向对称变换的人脸定位方法, *电子学报*), 1999, 27(8): 12—15
- [1] PEI Soo-Chang, KO Ching-Wen, SU Ming-Shung,