第18卷第1期
1999年2月

红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 18, No. 1
February, 1999

基于霍夫变换和眼睑弹性模板的眼睛特征提取*

王 磊 莫玉龙** 戚飞虎
(上海交通大学计算机科学与工程系，上海，200030)

摘要 提出一种将新颖的眼睑弹性模板与霍夫变换相结合实现眼睛特征的自动提取的方法，即自动定位眼球并自动提取眼睛轮廓．与其它同弹性模板提取眼睛特征的方法相比，本方法可以处理对比度较低、下眼睑模糊的图像，提取特征准确度更高，且改进的能量函数和保守能量下降算法大大简化了经验参数的选择．经过百余幅眼睛图像的实验处理，验证了该方法的有效性．

关键词 弹性模板，霍夫变换，人脸特征提取．

引言

人脸特征的自动提取和描述是人脸识别系统中一个重要环节．特征量如形状、面积、周长等的获得必须利用人脸五官的轮廓．传统的边缘描述方法往往很难获得可靠度较高的连续边缘，有些对比度低的地方甚至连边缘都检测不到，即使获得了可靠度高的边缘，也很难从中自动提取所需的特征量．为此，用弹性模板提取特征显示出其特有的优越性[1~7]．弹性模板被一组根据特征形状的先验知识设计的参数所定义，这些参数是可调的．为了定出最符合特征形状的参数，需要利用图像的边缘、峰值、谷值和强度信息及特征形状的先验知识设计合适的能量函数．参数向能量减小方向作调整，当能量达到最小时，这组参数对应的模板最符合特征形状，从这组参数可以直接提取具体的特征量．弹性模板能提取完整的轮廓是因为它是基于全局考虑的，而边缘提取是基于局部的．Yuile 等人[1~2]的眼睛模板由两条抛物线和一个圆构成，分别对应内眼睑和眼球，用最速下降法最小化能量．其他研究人员设计的模板形状[3~7]都与此雷同，主要是在某些能量函数的设计或最小化能量的算法上有些变化．所有这些模板都存在两大问题：第一，模板形状都是为提取内眼睑设计的，强烈依靠图像峰值部分(眼白)的信息，当图像对比度低时，下眼睑很模糊，峰值区域可能提取不出来或不能被完整提取，边缘也不清楚，导致实验失败．此外，当眼角有阴影时，内眼睑模板甚至不能很好反映眼睛的实际大小；第二，无论用何种方法，都存在为能量函数选取经验系数的问题，这些系数对能量函数的收敛或模板匹配的正确程度有直接的影响，在上述诸方法[1~7]中，系数的选择需靠分析具体的数值凑试．针对这两个问题，本文先用霍夫变换检测眼球，然后用一个全新设计的上眼睑弹性模板定上眼睑，能量函数无须峰值信息，新的眼角能量函数比 Xie 的眼角能量函数[6]能更准确地定位眼角．此外，归一化能量函数和保守的能量最小化算法使

* 国家自然科学基金(编号 69475006 和 69572026)和上海市教委科学基金资助项目
** 上海大学(嘉定分区)通信与工程学院，上海，201800
稿件收到日期 1997-10-29，修改稿收到日期 1998-02-27

各能量项的权值容易选定，而且无需设定各能量项内的经验系数，因此本方法从根本上解决了上述两大问题，下眼睑很易利用上眼睑和眼球位置直接画出.

1 用霍夫变换检测眼球

假设经预处理已得到包含眼球的图像 E_p. 为了节省检测眼球的时间并避免镜片反光点边缘产生的干扰，先用小灰度值聚类法粗定眼球中心点，以此缩小检测范围. 聚类的过程是将图像 E_p 中灰度值最小的 n 个象素按列递增顺序排序，若相邻的列数差值都未超过预先设定的门限 T_1，说明只有一个聚类中心，求出这些象素行列的平均值就是要找的眼球中心点；若超过了门限 T_1，说明这 n 个象素可以聚成两类，对左眼，因为阴影、镜脚集中在左边，所以取右边那类的平均值；对右眼则取左边那类的平均值. n 的选择可根据图像 E_p 的总象素数目及眼球占图像的大致百分比决定.

在用霍夫变换检测眼球前，先用 Canny 算法提取边缘. 对于比较细长的眼睛，由于眼球的上半部分较多地被眼皮覆盖，所以与其他方法[5,10]不同，本文改用检测下半圆，这样更可靠且省时. 设图像空间为 (i,j)，i 和 j 分别表示行和列. 三维变换空间为 (i_e,j_e,R)，其中 i_e、j_e 分别代表眼球圆心的行和列，r 为半径. 下半圆表达式为

$$i = i_e + \sqrt{r^2 - (j - j_e)^2}. \tag{1}$$

对于变换空间的每一个坐标点 (i_e,j_e,R)，在图像空间都对应一个半圆，在这个半圆上存在的边缘点数就是变换空间上坐标点 (i_e,j_e,R) 对应的值. 变换空间上的峰值点坐标即为所求的眼球半圆参数. 实验证明，霍夫变换确实具有抗干扰能力强的优点. 当眼球与眼白的对比度较低时，提取出来的边缘是断裂或不很规则的，即使如此，仍能根据变换空间中的峰值点准确地定位眼球圆心.

2 眼睛弹性模板

对所有的图像，即使对比度低，下眼睑看不清楚，但上眼睑总有一条具有一定宽度的清晰的低灰度曲线，为此设计如图 1 所示的右眼模板. 曲线 L_1、L_2 和 L_3 分别是上眼睑的外轮廓、内眼睑的上轮廓和下轮廓，其中 L_2 还包括在眼睛坐标系 (x,y) 上 $(0\sim h)$ 和 $(v_3\sim v_4)$ 的两段水平线，眼球圆心 $Xe=(i_e,j_e)$ 和半径 r 由上一部分霍夫变换求出，$X_0=(x_0,y_0)$ 是眼睛坐标原点在图像坐标系上的坐标，$Yd=(y_d,j_e)$ 是下眼睑最低点的图像坐标系坐标.

在眼睛坐标系 (x,y) 上，曲线 L_1 由左右两段抛物线在极值点 $(v_1,-H)$ 处交汇而成，

对 $L_{1-\text{left}}$，有 $$y = \frac{H}{v_1^2}x^2 - 2\frac{H}{v_1}x, \qquad x \in [0,v_1] \tag{2}$$

对 $L_{1-\text{right}}$，有 $y = \dfrac{H}{(v_1 - v_2)^2}[x^2 - 2v_1x + v_2(2v_1 - v_2)]$. $x \in [(v_1 + 1),v_2]$ (3)

曲线 L_2 分 4 段，左右两段为水平线，中段由两段抛物线在极值 $(v_1,-(H+h))$ 处交汇而成，

对 $L_{2-\text{left}-H}$， $$y = 0, \qquad x \in [0,(h - 1)] \tag{4}$$

对 $L_{2-\text{left}-P}$， $y = \dfrac{H - h}{(h - v_1)^2}[x^2 - 2v_1x + h(2v_1 - h)]$, $x \in [h,v_1]$ (5)

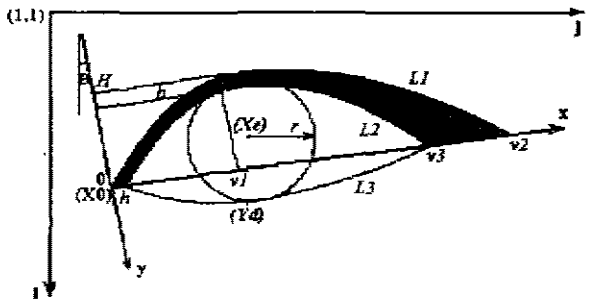


图 1　眼睛模板(i,j)为图像坐标系,(x,y)为坐标系,θ 为它们之间的夹角

Fig. 1 The eye template (i,j) is image coordinate, (x,y) is eye coordinate, θ is their included angle

对 $L_{2-\text{right}-P}$，$$y=\frac{H-h}{(v_1-v_2)^2}[x^2-2v_1x+v_3(2v_1-v_3)],\quad x\in[(v_1+1),v_3] \tag{6}$$

对 $L_{2-\text{right}-H}$，$$y=0,\qquad x\in[(v_3+1),v_2] \tag{7}$$

曲线 L_3 由左右两段抛物线在极值 Yd 处交汇而成，左右两端与 L_2 曲线部分的端点重合，设 Yd 在眼睛坐标系(x,y)上的坐标为(x_{de},y_{de})，

对 $L_{3-\text{left}}$，$$y=-\frac{y_{de}}{(h-x_{de})^2}[x^2-2x_{de}x+h(2x_{de}-h)],\quad x\in[h,x_{de}] \tag{8}$$

对 $L_{3-\text{right}}$，$$y=-\frac{y_{de}}{(v_3-x_{de})^2}[x^2-2x_{de}x+v_3(2x_{de}-v_3)],\quad x\in[(x_{de}+1),v_3] \tag{9}$$

眼睛坐标系上某点(x_e,y_e)与图像坐标系上对应点(i_e,j_e)的转换关系为

$$\begin{cases} i_e=x_e\cos(\theta)+y_e\sin(\theta), \\ j_e=x_e\sin(\theta)-y_e\cos(\theta). \end{cases} \tag{10}$$

需要确定的可调参数有 8 个：$V=(x_0,y_0,\theta,H,h,v_1,v_2,v_3)$，它们完全由上眼睑曲线 L_1 和 L_2 确定。左眼的模板与右眼对称，参数和能量函数与右眼一样。

3　能量函数

能量函数被用于调节参数，当能量递减时，模板与眼睛越来越匹配。设总能量为

$$F=\sum_{i=1}W_iE_i. \tag{11}$$

其中 W_i 为各能量 E_i 的权值。为了便于设定权值，各个 E_i 被归一化。设图像颜色越深，象素灰度值越小。这个能量函数一共分 4 类。

第一类用于使模板的 L_1 和 L_2 包围的区域(图 1 阴影部分)与原灰度图像和谷值区域图像上的上眼睑匹配：

$$E_1=1-(\frac{0.4}{S_{\text{eyelid}-\text{left}}}\sum_{i\in\text{eyelid}-\text{left}}g_i^{(v)}+\frac{0.2}{S_{\text{eyelid}-\text{middle}}}\sum_{i\in\text{eyelid}-\text{middle}}g_i^{(v)}+$$

$$\frac{0.4}{S_{\text{eyelid-right}}}\sum_{i\in\text{eyelid-right}}g_i^{(v)}), \tag{12}$$

$$E_2=\frac{0.4}{S_{\text{eyelid-left}}}\sum_{i\in\text{eyelid-left}}g_i+\frac{0.2}{S_{\text{eyelid-middle}}}\sum_{i\in\text{eyelid-middle}}\sum_{i\in\text{eyelid-middle}}g_i+$$

$$\frac{0.4}{S_{\text{eyelid-right}}}\sum_{i\in\text{eyelid-right}}g_i. \tag{13}$$

其中上眼睑的中间部分的列范围是以眼球中心列为中心，一个眼球半径宽的范围. 这部分取较小的加权值 0.2 是为了突出左右两部分的作用并控制 L_2 不往内缩，$g_i^{(v)}$ 和 g_i 分别是谷值区域图像和灰度图像的灰度值，S 为对应区域的面积.

第二类能量函数用于使模板的 L_1 和 L_2 与边缘区域图像和灰度图像上的边缘匹配：

$$E_3=1-(\frac{0.6}{S_{L_1}}\sum_{i\in S_{L_1}}g_i^{(E)}+\frac{0.4}{S_{L_2-P}}\sum_{i\in S_{L_2-P}}g_i^{(E)}), \tag{14}$$

$$E_4=1-(\frac{0.6}{S_{L_1}}\sum_{i\in S_{L_1}}g_i+\frac{0.4}{S_{L_2-P}}\sum_{i\in S_{L_2-P}}g_i). \tag{15}$$

式(14)的 $g_i^{(E)}$ 是边缘图像的灰度值. 由于边缘图像上的边缘有一定的宽度，所以曲线 L_1 的边缘取 3 个象素的宽度，L_1 位于中间；曲线 L_2 的边缘取 2 个象素的宽度，L_2 位于上边.

第三类能量函数用于使模板的眼角与原灰度图像和谷值区域图像上的眼角匹配：

$$E_5=1-(\frac{0.5}{S_{\text{corner-left}}}\sum_{i\in\text{corner-left}}g_i^{(v)}+\frac{0.5}{S_{\text{corner-right}}}\sum_{i\in\text{corner-right}}g_i^{(v)}), \tag{16}$$

$$E_6=1-(\frac{0.5}{S_{\text{corner-left}}}\sum_{i\in\text{corner-left}}g_i+\frac{0.5}{S_{\text{corner-right}}}\sum_{i\in\text{corner-right}}g_i). \tag{17}$$

眼角的作用是非常重要的，尤其是此模板不能利用眼白峰值的信息控制眼睛的旋转角度. 为此，求平均灰度值的眼角窗口要仔细选择. 如图 2 所示，在谷值区域图像上，左眼角窗口分 3 部分：上窗口在眼睑内，下窗口和左窗口在相邻背景上，它们的宽为 h，高度自定，取较小值. 当然在求这个窗口的平均灰度值前，要先将下窗口和左窗口灰度值求补以与上窗口统一. 在灰度图像上眼角与周围的对比度不大，所以窗口可以简单地分左右两部分，左边对应背景，右边在眼睑内. 这样设计可以防止左眼角往上、往内缩进. 右眼角的低灰度值区域比较宽，因此只要设一个宽为(v_2-v_3)，在眼睑内的窗口即可.

第四类能量函数用于约束一些参数之间的关系，它们起着控制模板形状的作用. E_7 用于约束 H 和 h，其中 h_{ini} 是预处理时求到的眼睛的大致高度；E_8 用于约束 v_1、v_2 和 v_3；E_9 用于控制(x_0,y_0)的位置，都用眼睛半径 r 归一为

$$E_7=(|(H+y_{de})-h_{ini}|+|H-5y_{de}|+|h-3|)/3/r, \tag{18}$$

$$E_8=(|(v_2-v_3)-r/2|+|x_{de}-v_1|+|v_2-5r|)/3/r, \tag{19}$$

$$E_9=(|(j_e-x_0)-2r|+|(y_d-y_0)-5|)/2/r. \tag{20}$$

4 能量最小化算法

在诸如 Yuille 等人的串行算法中[2,4,7]，能量最小化用最速下降法，必须预先通过实验

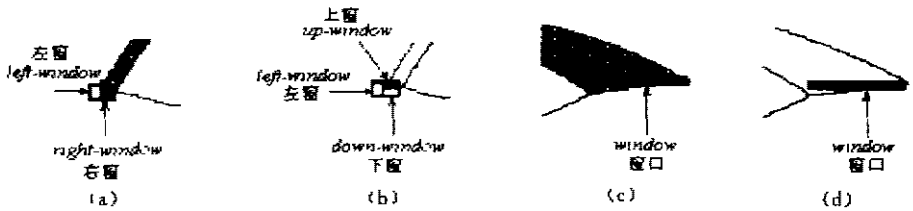


图 2　眼角窗口示意图
(a) 灰度图像上的左眼角，(b) 谷值区域图像上的左眼角
(c) 灰度图像上的右眼角，(d) 谷值区域图像上的右眼角
Fig. 2 Diagram of the eye corner
(a) Left corner on intensity image, (b) Left corner on valley field image
(c) Right corner on intensity image, (d) Right corner on valley field image

在能量函数中设定一些很重要的系数，否则模板无法正确收敛. Xie 等人的并行算法[6]也要靠能量项内部的系数来控制参数改变量的合理性，系数的设置与 Yuille 等人的方法一样需要实验凑试，无具体规律可循，而且有可能随图像的改变而要稍加改变. 本文采用归一化能量函数，各函数内没有需要用实验设定的系数，仅需预先通过少量实验设立 9 个权值 W_i 即可. 这些易于设置的权值只与各能量项在模板匹配过程中的重要性有关，与灰度分布无关，所以不随图像的改变而改变. 此外，本文提出一种保守的能量下降算法(conservative energy descent algorithm，简称 CEDA)，采用固定的参数改变量. 由于初值选择已经使模板在眼睛附近，所以能保证在能量减小过程中，参数是往能量函数曲线的全局最小方向改变，而且计算时间并不很长. 在计算过程中，所有能量项是同时起作用的.

该算法(CEDM)的过程如下：设定初始参量矢量 V_0 和一组参数改变量 $dV_0=[1\ 1\ \pi/80\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$，这 8 个参数在矢量 dV_0 和 V_0 中的排列顺序为 $(x_0, y_0, \theta, H, h, v_1, v_2, v_3)$. 从初始值开始，各参数按如下公式改变以使能量逐渐减小：

$$dV(i)=\begin{cases} dV_0(i), & dF/dV_0(i)<0 \\ 0, & dF/dV_0(i)=0 \\ -dV_0(i), & dF/dV_0(i)>0 \end{cases} \qquad i=1,2,\ldots 8 \tag{21}$$

由于能量很易落入局部极小并振荡，用 F_{min} 和 V_{min} 记录计算过程中的能量最小值及其对应的参数矢量. 当出现振荡时，用随机数给予一个扰动，使参数略偏离 V_{min} 后再次用式(21)进行调整. 可以多产生几次随机数，尽量使扰动后的能量比 F_{min} 更小. 这样的过程可以重复 2 至 3 次. 最终结果为 V_{min}.

5　实验过程及结果

5.1　预处理

预处理时用形态算子[11]求得原灰度图像上的边缘区域和谷值区域图像，然后用二值化的谷值区域图像求取模板的初始值. 边缘和谷值区域图像有必要与如下的指数函数进行卷积[5~7]，这个平滑过程可以使模板与眼睛图像的交互作用能在较长距离内有效，即

$$I' = e^{-\alpha\sqrt{x^2+y^2}} * I, \qquad x = -1:0.5:1, y = -1:0.5:1 \tag{22}$$

经形态滤波和平滑后的灰度值有可能不在[0,1]区间，所以要用下式进行灰度级的归一：

$$Y = (X - X_{min})/(X_{max} - X_{min}). \tag{23}$$

当原图像对比度低时，边缘和谷值区域图像的对比度也很低，为此用如下灰度变换公式增强对比度，突出边缘和谷值区域：

$$y = \begin{cases} 0, & x \le T_{low}, \\ x, & T_{low} < x < T_{high} \\ 1. & x \ge T_{high} \end{cases} \tag{24}$$

实验结果如图3所示，其中3(a)为原始灰度图像，3(b)为边缘区域图像，3(c)为谷值区域图像，3(d)是3(c)的二值化结果，它被用于设置模板的初始值. 图中的 yu、yd、xl、xr 和 $X0$ 分别为粗定的眼睛的上、下、左、右边界和左眼角点坐标. 其中 yd 被直接用于画下眼睑曲线 L_3. 参数的初值可以利用这些数据和已求出的3个眼球参数共同设置. 初值可以取得偏大一点. 实验用的有关参数列于表1.



(a) (b) (c) (d)

图3 (a)原始灰度图像，(b) 边缘区域图像，(c) 谷值区域图像，(d) 谷值区域二值图像

Fig. 3 (a) Original image, (b) edge field image, (c) valley field image, (d) valley field binary image

表1 从灰度图像获取边缘区域图像和谷值区域图像的各项参数和过程(从左向右)

Table 1 The parameters and procedure (from left to right) of getting edge field image and valley field image from intensity image

势能场	形态滤波	灰度变换	平滑系数 α	灰度变换	对比度增强 $[T_{low}, T_{high}]$
边缘场 φ_e	膨胀(3)*－腐蚀(3)	灰度级归一化	15	灰度级归一化	[0.05,0.6]
谷场 φ_v	结构闭(21)－原图	灰度级归一化	15	灰度级归一化	[0.05,0.6]

* 括号内为结构元之大小，所有结构均为方形，其大小与图像尺寸有关. 本实验用图约为(60,100).

5.2 实验结果

实验所用的权值取 $W=[4\ 5\ 4\ 5\ 10\ 10\ 5\ 4\ 4]$，眼角点的能量项权值取得最大，因为眼角的正确判断很重要. 当然不一定非取这组权值，只要权值的相对大小相仿即可. 图4给出一组模板在计算过程中不同时刻的变化情况，由图可见，模板随着能量的减小逐步与眼睛轮廓匹配. 图5给出若干幅眼睛图像的结果模板. 其中有的眼睛图像对比度较低，有的眼角有阴

影干扰，但是最终模板和眼睛都匹配得较好. 此外，本文设计的非对称上眼睑曲线使最后的模板更符合原来眼睛形状. 图中下眼睑标出的一点是画下眼睑用的眼睛最低点 *yd*.

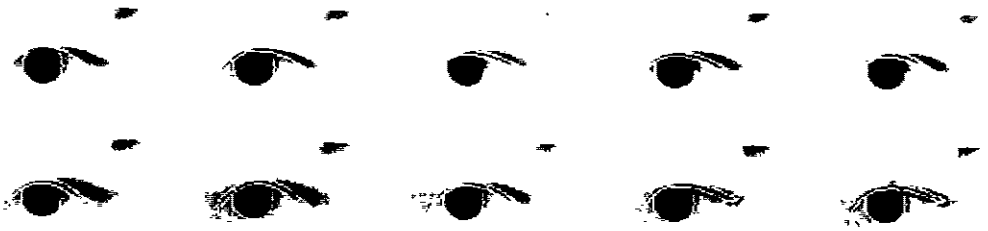


图 4　能量最小化过程中不同时刻的眼睛模板
（第一幅为初始模板、最后一幅为结果模板）
Fig. 4 The eye template change during the energy minimizing procedure
(the initial templates in the first image, the result template is in the last image)

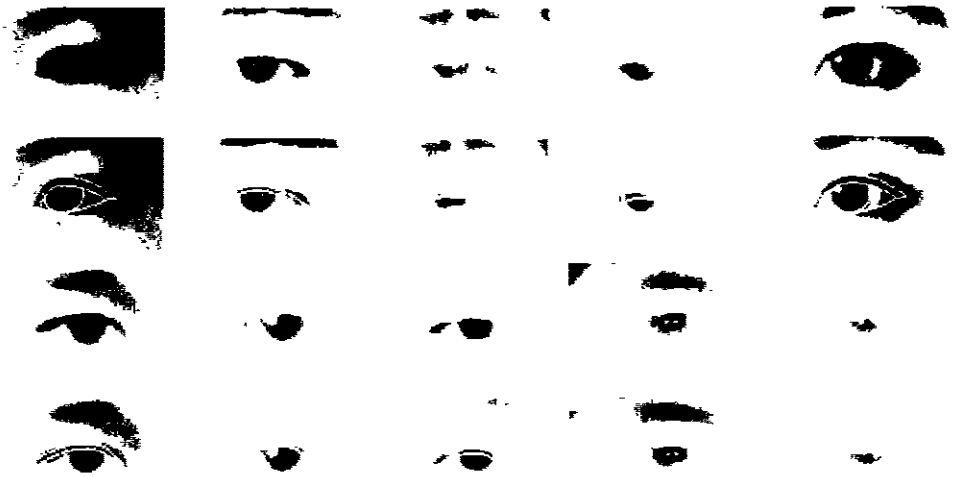


图 5　部分实验图像的实验结果（每一组的下幅图像为上幅图的结果模板）
Fig. 5 Experimental results of some images (the result images are lower ones)

6　结论

本文提出的眼睛特征提取方法分两步：先用霍夫变换检测图像上眼球的圆心位置及半径，然后再用一个新颖的眼睑弹性模板去匹配眼睑. 用该方法提取到的眼睛轮廓较其它文献的结果更准确. 针对该模板设计了新的归一化能量函数，着重于眼角和上眼睑的匹配，因此对于下眼睑模糊从而无法求得峰值区域图像的眼睛图像照样能提取到准确的轮廓特征，这也是本方法优于其它方法的重要特点. 此外，本文采用一种保守的能量最小化算法，简化了能量项权值选取的困难性，并能使权值在整个运算过程中都保持不变，对于不同的图像也无

需改变，而且各能量项内没有需要设置的经验系数. 初始模板的确定方法总能使其靠近眼睛，从而加快了处理速度. 实验结果证实了本方法的有效性及优越性.

REFERENCES

1 I Yuille A, Cohen D, Hallinan P. *IEEE Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition*, 1989: 104—109
2 Yulle A L, Hallinman P W, Coken D S. *Inter. J. Computer Vision*, 1992, **8**(2): 99—111
3 Shackleton M A, Welsh W J. *IEEE Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition*, 1991: 573—579
4 Chen C W, Huang C L. *Inter. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1992, **6**: 571—593
5 Chow G, Li X B. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(12): 1739—1755
6 Xie X, Sudhakar R, Zhuang H. *Pattern Recognition*, 1994, **27**(6): 791—799
7 Lam K M, Yan H. *Pattern Recognition*, 1996, **29**(5): 771—779
8 Canny J. *IEEE Trans. PAMI*, 1986, **8**(6): 679—698
9 WANG Lei, MO Yu-Long, QI Fei-Hu. *Chin. J. Image and Graphics*(王磊，莫玉龙，戚飞虎. **中国图像图形学报**), 1996, **1**(3): 191—195
10 Nixon M. *SPIE. Proc.*, 1989, **575**: 279—285
11 Maragos P. *Optical Engineering*, 1989, **26**(7): 623—632

AUTOMATIC EYE FEATURE EXTRACTION BASED ON HOUGH TRANSFORM AND EYELID DEFORMABLE TEMPLATE*

WANG Lei MO Yu-Long** QI Fei-Hu

(Department of Computer Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract This paper proposes an automatic eye feature extraction method based on Hough transform and eyelid deformable template. It could locate the iris center and the contour of the eye automatically and correctly. Compared with other similar deformable template methods, this approach has the following advantages: It could be used to process those low contrast images in which the lower eyelid is blur. It could extract accurate feature. It simplifies the difficulty in selecting empirical coefficients by this improved energy functions and conservative energy descent algorithm (CEDA). Its efficiency and superiority are clarified by experimenting on about one hundred eye images.

Key words defromable template, Hough transform, facial feature extraction.

* The project supported by the National Natural Science Foundation and by Shanghai Education Committee Science Foundation of China

** School of Communication & Information Engineering, Shanghai University (Jia Ding Campus), Shanghai 201800, China)

Received 1997-10-29, revised 1998-02-27