

基于角点特征的眼睛轮廓提取

谭华春 章毓晋 李睿

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 提出了一种新的基于可变形模板的提取眼睛轮廓的方法。在新的方法中,利用了眼睛所有角点的信息来构造能量函数。同时,采用了 SUSAN (smallest univalue segment assimilating nucleus) 中的角点强度函数来描述角点的特性。通过结合角点的信息,眼睛轮廓能够得到更为鲁棒地提取。考虑到角点能量函数的局部特性,采用了三步优化的方法来对能量函数进行优化。为了测试新的能量函数的表现,随机设置眼睛模板的初始参数以模拟各种预处理方法得到的结果。实验结果表明,该方法能比以前的方法更精确地提取出眼睛的轮廓。

关键词 眼睛特征提取 可变形模板 能量函数 角点信息 角点强度函数

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)07-1224-06

Incorporating Corner Information for Extraction of Eye Features

TAN Hua-chun, ZHANG Yu-jin, LI Rui

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A new eye feature extraction method incorporating corner information with deformable template is proposed in this paper. In the energy function, the corner information of all corners in the eye template is used. The corner strength being used in SUSAN (smallest univalue segment assimilating nucleus) is introduced to define the corner energy term. Incorporating with corner information, the eye template is located more robustly. Considering the local property of eye corner energy term, three steps optimization process is adopted to deform the eye template. To test the robustness of the new energy function, the initial parameters of eye template are set randomly to simulate results of various preprocess. Experimental results show the new method is more accurate for eye feature extraction.

Keywords eye feature extraction, deformable template, energy function, corner information, corner strength function

1 引言

眼睛轮廓的提取在许多应用中,如视觉理解、人脸识别^[1]、智能编码系统和人机交互界面^[2]等占有重要的地位。在人脸识别和视觉理解中^[1],很多方法都是利用人脸特征的几何模型,根据这些模型的相对位置以及形状等特征进行识别或解释的。在人机交互界面的设计中,通常先提取出一些重要的人脸特征,包括眼睛轮廓,然后在后面的序列中对这些特征进行跟踪^[2,3]。

由 Yuille 等人^[4]首先提出的可变形模板是一个描述眼睛轮廓的强有力的模型。由于它利用了图像的全局信息,因而提高了定位特征轮廓的可靠性。然而, Yuille 提出的可变形模板还存在很多的问题,如收敛速度慢、对初始值敏感、虹膜收缩、陷入局部极值和提取精度不够等。为了解决这些问题,研究人员提出了很多改进的方法。其改进的途径可以分为以下两类:

(1) 提高预处理的性能,使得眼睛的初始参数尽可能地接近真实值^[5-9]。这样可以缓解对初始值敏感和陷入局部极值的问题,并在一定程度上提高

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(RFDP-20020003011);国家自然科学基金项目(NNSF60573148)

收稿日期:2005-09-07;改回日期:2006-05-30

第一作者简介:谭华春(1975~),男,清华大学信息与通信系统博士研究生,现在北京理工大学交通工程系工作。主要研究方向为图像分析。E-mail: tanhc@bit.edu.cn

了收敛的速度。一些预处理的方法如表 1 所示。

表 1 预处理方法
Tab.1 Some pre-processing techniques

预处理方法	
Brunelli ^[5]	采用积分投影得到关键点位置,然后估计初始参数
Xie ^[6]	利用人脸几何方面的先验知识搜索眼睛区域,然后估计初始参数
Lam ^[7]	利用头部轮廓得到眼睛区域,并检测眼睛角点以确定初始参数
Shan ^[8]	利用两个眼睛区域的谷点和频率特征定位虹膜,然后用积分投影估计关键点位置,以此估计初始参数
Liu ^[9]	利用鼻根点的位置,积分投影和模糊成员函数提取眼睛区域,然后估计初始参数

然而,由于光照,头部旋转,眼睛区域的复杂性以及噪声等原因,得到一个理想的初始参数是很困难的。由于初始参数的不稳定,导致了眼睛轮廓不能鲁棒地提取。考虑到预处理的困难性,设计一个使得眼睛轮廓能够在各种初始参数的情况下都能鲁棒地提取的方法是必要。

(2) 改进能量函数,使得能量函数对眼睛的变形更为敏感来提高眼睛轮廓提取的性能^[6-10]。因此,研究人员根据他们所观察到的各种先验知识设计出了各种各样的能量函数。这些先验知识可以分为 3 类:区域信息、边沿信息和角点信息。表 2 给出了一些方法所采用的先验知识。其中,是/否表示在能量函数中采用/未采用这些先验知识。

表 2 能量函数中采用的信息

Tab.2 The information being used in some methods

	边沿信息		区域信息		角点信息	
	虹膜边沿	眼帘边沿	虹膜区域	眼白区域	左右眼角点	虹膜和眼帘的交点
Yuille ^[4]	是	是	是	是	否	否
Xie ^[6]	是	是	是	是	是	否
Lam ^[7]	是	是	是	是	是	否
Shan ^[8]	是	是	否	否	否	否
Liu ^[9]	是	否	是	否	否	否

本文用不同的初始参数对这些能量函数进行了测试。然而,从实验结果看,其结果并不理想,特别是所定位的左右眼角点精度不好。

为了提高眼睛轮廓提取的精度,提出了基于角

点的眼睛轮廓提取方法。在新的方法中,充分利用了眼睛角点的信息,包括左右眼角点以及被其他方法所忽略的虹膜和眼帘的交点,来构造能量函数。在表示眼睛角点的能量项中,采用了 SUSAN 算子中的角点强度函数^[11]来描述角点的特征。实验结果表明,本文提出的方法能够比以前的方法更精确地提取眼睛轮廓。

2 基于角点信息的可变形模板

2.1 眼睛轮廓几何模型

采用如图 1 所示的几何模型表示眼睛轮廓。分别用一个圆和两条抛物线来表示虹膜的轮廓和上下眼帘的轮廓。这样,模型可以用矢量 $(X_c, X_e, r, a, b, c, \theta)$ 来进行表示。其中, X_c 为虹膜的中心, X_e 为眼睛的中心, r 为虹膜半径, b 表示抛物线的长度, a 和 c 分别表示上下抛物线的高度, θ 表示眼睛(抛物线)的旋转角度。 $P_3 \sim P_6$ 是虹膜(圆)和眼帘(抛物线)的交点。根据不同的参数,虹膜与眼帘的交点个数也不相同。如图 1 所示的这 4 个点也同时描述了眼睛轮廓的特点。

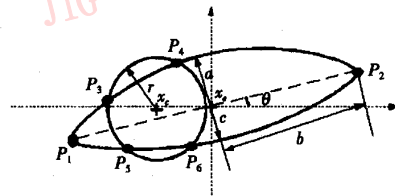


图 1 眼睛轮廓的几何模型

Fig.1 The geometric model of eye feature

2.2 基于角点信息的能量函数

表 2 对以前的方法在构造能量函数时所用到的先验知识进行了统计。经过分析,发现在利用角点信息的时候,以前的方法存在着下面的两个问题:

(1) 大部分的方法都忽略了虹膜和眼帘的交点信息。在这些方法中,只利用了图 1 中 P_1 和 P_2 的信息来构造能量函数,却忽略了 P_3 到 P_6 的信息。而这些角点对于眼睛轮廓的定位是非常有用的。 P_1 和 P_2 的信息有助于眼睛宽度的调整,而 P_3 到 P_6 则有助于眼帘高度的确定。同时,这些角点在很多应用中也具有重要的地位。例如,在人脸表情的分析中,需要在第 1 帧中精确地提取出这些角点,然后对这些角点进行跟踪,以提取人脸表情的特征。

(2) 在以前的方法中^[6,7],表示角点信息的能量项不能很好地表征角点的特征。在这些方法中,采用了下式的能量项来表征角点的特征。

$$E_c = 1 - \sum_{i=1}^2 \frac{1}{Area_{window_i}} \sum_{j \in window_i} b_j^{(v)} \quad (1)$$

其中, $b_j^{(v)}$ 为二值化后的谷点域中的数值, $Area$ 表示的是以第 j 个角点为中心的窗口。整个能量项表示的是在以第 j 个角点为中心的窗口中,对二值化后的谷点域的数值求和。从式(1)中,可以发现此能量项所产生的力将把角点拖到最黑的位置。图2(b)给出了此能量项的图像表示。其中,白色表示较大的数值。在这个图中,角点的位置并不明显,这表示此能量项并不能很好地表示角点的特征。因此其所产生的力不能将角点调整到正确的位置上去。



图2 Xie等人提出的角点能量项的图像表示

Fig.2 Image representation of corner energy term proposed by Xie et al.

2.2.1 角点能量项

根据上面的讨论,提出一个新的角点能量项来描述眼睛模板中角点的特征。在新的角点能量项中,包括了所有可能存在的角点(由参数计算得到)的信息。同时,采用了在SUSAN算子^[11]中描述角点相似性的角点强度函数来构造角点能量项。这样,新的角点能量项就定义为

$$E_c = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n str_i \quad (2)$$

其中, str_i 为第 i 个角点的角点强度, n 表示眼睛模板中可能的角点数目。其他的能量项和Xie等人^[6]提出的能量项是完全相同的。

2.2.2 角点强度函数

角点强度函数必须能够描述角点的特征^[12,13],如鲁棒性和精确性等。角点应位于角点强度域的局部最大值/最小值处。这样,当眼睛模板中的角点位于其真实值的邻域时,角点能量项所产生的力就可以将眼睛模板拖到正确的位置上去。

采用了SUSAN算子^[11]中提出的角点强度函数来计算角点强度域。对于坐标为 (x,y) 的像素,其角点强度定义为

$$str(x,y) = \begin{cases} g - n(x,y) & n(x,y) < g \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $n(x,y)$ 表示位于USAN中的像素数目。固定的几何阈值 g 设置为 $n_{max}/2$ 或者更低,其中, n_{max} 为 n 的最大值。为了和别的能量项保持一致,将角点强度也归一化到 $(0,1)$ 区间。

对眼睛区域的每个像素计算其角点强度,就得到了角点强度域。图3给出了一个合成眼睛图像的角点强度域,并给出了所检测到的角点的位置。在此表示中,白色像素表示具有较高的角点强度。

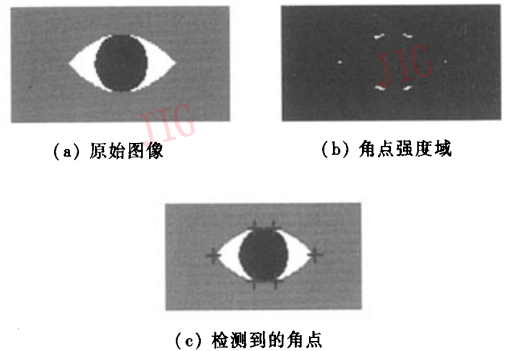


图3 角点强度域示例

Fig.3 An example of corner strength field

图4给出了一个更为直观的角点强度域的3D表示。从图中可以发现,虹膜和眼帘交点的角点强度很大,很容易根据角点强度域对角点的位置进行定位。同时,角点强度对噪声也非常地鲁棒。这些特性都有助于眼睛轮廓的提取。

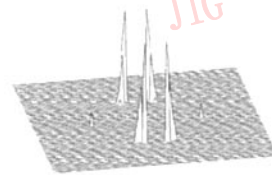


图4 角点强度的3D表示

Fig.4 3D representation of corner strength

对于角点能量项的作用,可以通过图5来进行分析。假设眼睛模板已经被拖到如图5所示的位置上,这时,角点能量项就可以将角点定位到其真实的位置,从而达到精确定位眼睛轮廓。其中, F_{corner} 表示由角点能量项所产生的力。

2.3 优化过程

根据以前的方法以及实验结果,发现虹膜在没有眼帘轮廓的帮助下就可以很好地进行定位。同时,考

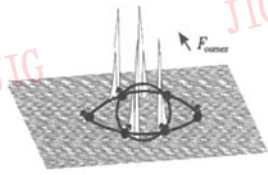


图 5 角点能量项与模板交互示意图

Fig. 5 Principle of corner energy term in locating eye template

虑到角点能量项的局部性,只有当眼睛模板位于真实值附近的时候,角点能量项才能很好地工作。否则,将可能由于角点能量项的干扰,使眼睛模板陷入局部极值。因此,在优化过程中,首先利用与虹膜的区域信息和边沿信息相关的能量项对虹膜进行定位。然后,将和眼帘相关的能量项加入,保持虹膜的参数不变,对眼帘的轮廓进行提取。最后所有的能量项,包括外部和内部能量项,一起对眼睛模板进行调整。

3 实验结果与分析

3.1 预处理

预处理的主要目的是提供眼睛模板的初始参数。一些预处理的方法在第 1 节中进行了讨论。初始参数越接近真实值越好。然而,由于眼睛区域的复杂性以及获取眼睛图像的条件不同,不同的预处理方法得到的初始参数并不相同。在本文中,不考虑初始参数的设置,而集中对提出的能量函数的性能进行测试。因此,首先手工标定眼睛中的 6 个特征点,计算得到眼睛模板的真实值,然后在真实值的基础上加入一个随机的偏移,以模拟各种不同的方法得到的初始参数。在和其他方法的比较过程中,都采用了同样的预处理过程和同样的初始参数。

在优化能量函数之前,提取出输入图像的谷点域、峰值域、边沿域以及角点强度域。其中,谷点域、峰值域和边沿域都是利用形态学算子计算得到。角点强度域则根据第 2 节中的式(3)计算得到,其中,设置 USAN 中圆的半径为 3。在提取这些域之前,用直方图均衡和高斯低通滤波器对输入图像进行平滑去噪。图 6 给出了这些域的例子。其中,图 6(a)为输入图像。

本文算法采用 Matlab 进行实现,并对真实的眼睛图像在 Pentium 700, 256M 内存的计算机上进行了测试。在测试的眼睛图像集中,有 110 幅来自 Cohn-Kanade 人脸表情数据库^[14], 10 幅来自网上下

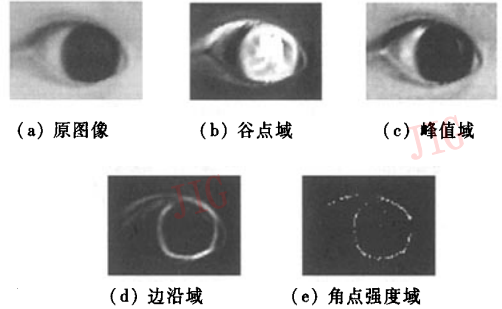


图 6 预处理结果

Fig. 6 The results of preprocess

载的眼睛图像。典型的眼睛图像大小为 101×56 。

3.2 匹配精度的度量

目前没有一个统一度量来表示眼睛轮廓定位的精度,各种不同的度量方法存在着各种不同的优缺点。同时,角点的位置能够确定眼睛轮廓的参数,角点定位的精度直接影响了眼睛轮廓定位的精度。因此,在实验中,采用了平均角点定位误差来表示眼睛轮廓定位的精度,其定义为

$$ER_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|XT_{i,j} - XE_{i,j}\| \quad (4)$$

其中, $XT_{i,j}$ 表示的是第 i 幅眼睛图像中第 j 个角点的真实值, $XE_{i,j}$ 则是采用各种方法提取的眼睛模板上的位置。由于虹膜和眼帘的交点数目并不固定,因此,采用左右两个眼角点的平均定位误差来表示眼睛轮廓定位的精度。

3.3 新的能量函数的性能测试

得到初始参数后,对能量函数进行优化。能量函数达到最小值时的眼睛参数就对应着所匹配的眼睛轮廓的参数。图 7 给出了一些眼睛轮廓提取的例子。从图中可以看到,在虹膜正确定位后,角点能量项能很好地帮助模板调整参数。

3.4 比较实验

对文献[6]~[8]中提出的 3 种方法进行实现,并采用相同的数据、相同的预处理过程,和本文方法进行了比较实验。

图 8 给出了一些眼睛图像的定位结果。其中,为了方便进行对比,只给出了最后的结果。

表 3 给出了平均角点定位误差的统计结果。由于充分利用了所有角点的信息,本文方法能够得到比其他方法更为精确的定位眼睛轮廓。在 Xie 等人^[6]提出的方法中,虽然利用了角点的信息,但其表征角点特征的能量项并不能很好地表示角点的特

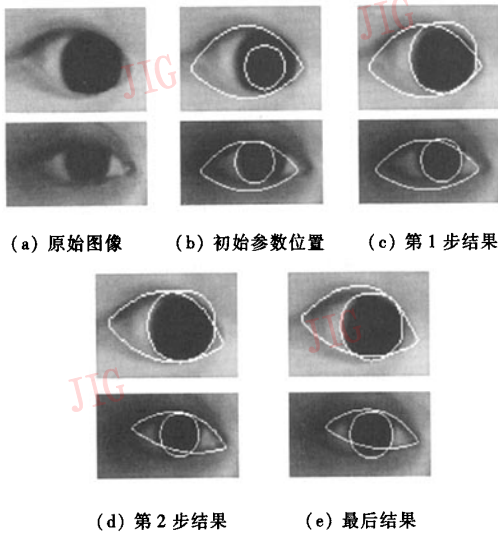


图 7 眼睛轮廓提取示例

Fig. 7 Eye templates at the end of each epoch

表 3 平均角点定位误差比较

Tab. 3 Average error of corner of some methods

	Xie ^[6]	Lam ^[7]	Shan ^[8]	本文方法
平均角点定位误差(像素)	6.0	4.4	5.1	1.8

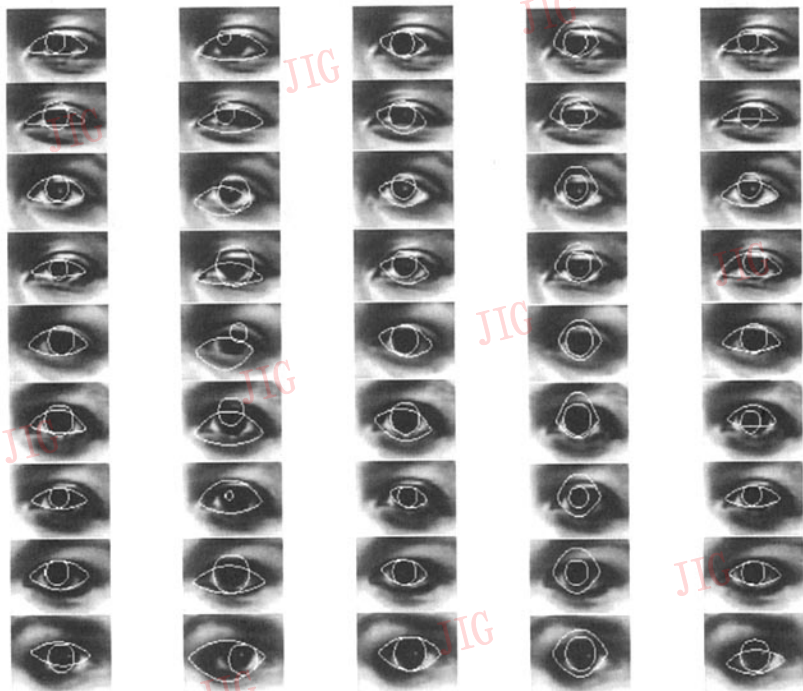
表 4 优化时间比较

Tab. 4 Comparison of process time

方法	Xie ^[6]	Lam ^[7]	Shan ^[8]	本文方法
优化时间(s)	57.8	66.6	5.1	33.8

征,因此其定位的误差很大。在 Lam 等人^[7]提出的方法中,考虑到了一些能量项的局部性,将优化过程分为多个子步骤,因此其对眼睛轮廓定位的结果比 Xie 等人^[6]提出的方法中采用一步优化的结果要好。对于 Shan 的方法^[8],由于没有充分利用眼睛的先验知识,包括角点和一些区域的信息,因此其定位的精度比前两种方法差。

本文对这些方法的优化时间也进行了比较。虽然这些方法都是在 Matlab 中实现的,总的运行速度比较慢,但其优化的相对时间仍具有参考价值。表 4 给出了这些方法的平均优化时间。在这些方法中,Shan 等人提出的方法是最快的,这主要是因为其能量函数非常简单。当然,这也影响了眼睛轮廓提取的精度。对其他两种方法,本文方法要稍快一些。这主要是由于在优化过程中,前两步都只需要调整一部分参数,而在最后一步中,调整的步长很小。



(a) 本文方法 (b) Xie 等人的方法 (c) Lam 等人的方法 (d) Shan 等人的方法 (e) 跟踪性能测度的方法

图 8 实验结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental results

3.5 关于角点特征描述的选择

在本文的研究中,曾经采用了跟踪性能测度(tracking ability)来描述角点的特征^[15]。它和 SUSAN 中的角点强度函数都可以用来描述角点的特征。然而,采用 SUSAN 中的角点强度函数能够更好地提取眼睛轮廓。采用相同的数据、相同的预处理过程,利用 SUSAN 中的角点强度函数来描述角点特征的方法可以达到 1.8 个像素的匹配误差,而采用跟踪性能测度来进行描述的方法的匹配误差为 3.5 个像素,高出了约 1 倍。这主要是因为 SUSAN 中的角点函数对噪声更为鲁棒,这样在复杂的眼睛区域中能够更好地定位这些角点的位置。

4 结 论

提出了一个基于角点特征的眼睛轮廓提取方法。在该方法中,采用 SUSAN 中的角点强度函数对眼睛模板中所有可能的角点进行描述,并将它加入到能量函数中,使得通过将眼睛角点的跟踪性能测度加入到新的能量函数中,使眼睛轮廓得到更精确的定位。在优化能量函数的过程中,考虑到角点能量项的局部性,采用了三步优化的方法,让角点能量项在眼睛模板移动到真实值附近时才进行作用。

本文对提出的方法进行了测试并和其他的方法进行了比较。在测试过程中,采用了随机获取的初始参数以模拟各种不同的预处理方法得到的结果。实验结果表明,本文方法能够精确地提取眼睛的轮廓。和 Lam^[7], Xie^[6] 以及 Shan^[8] 等人提出的方法相比,本文方法的平均角点定位误差分别为原来的 41%, 30% 和 35%。在优化的速度方面,本文方法比 Lam^[7] 和 Xie^[6] 提出的方法都要快一些。

本文还对角点特征的描述进行了讨论。和原来所提出的跟踪性能测度相比,采用 SUSAN 中的角点强度函数作为角点能量项的方法^[15]能减小平均角点定位误差约 1 倍。

对于眼睛轮廓的提取,还有很多的工作要做。例如,寻找一个合适的预处理方法来设置眼睛模板的初始参数,使得初始参数更接近于真实值。这样将有助于提高眼睛轮廓定位的精度和速度。

参考文献 (References)

- 1 Zhao W, Chellappa R, Phillips P, et al. Face recognition: a literature survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2003, 35(4): 399~458.
- 2 Tian Y, Kanade T, Cohn J. Recognizing action units for facial expression analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(2): 97~115.
- 3 Tian Y, Kanade T, Cohn J. Dual-state parametric eye tracking [A]. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, 2000: 46~53.
- 4 Yuille A, Cohen D, Hallinan P. Feature extraction from faces using deformable templates [A]. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, San Diego, USA, 1989: 104~109.
- 5 Brunelli R, Poggio T. Face recognition features versus templates [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(10): 1042~1052.
- 6 Xie X, Sudhakar R, Zhuang H. On improving eye feature extraction using deformable templates [J]. *Pattern Recognition*, 1994, 27(6): 791~799.
- 7 Lam K, Yan H. Locating and extracting the eye in Human face images [J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(5): 771~779.
- 8 Shan S, Gao W, Chen X. Facial feature extraction based on facial texture distribution and deformable template [J]. *Journal of Software*, 2001, 12(4): 570~577.
- 9 Liu R, Yuan B. Automatic eye extraction in human face images [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2001, 10(3): 397~400.
- 10 Deng J, Lai F. Region-based template deformation and masking for eye-feature extraction and description [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 29(3): 403~419.
- 11 Smith S, Brady J. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45~78.
- 12 Jain A, Zhang Y, Dubuisson-Jolly M. Deformable template models: A review [J]. *Signal Processing*, 1998, 71(2): 109~129.
- 13 Laganieri R, Vincent E. Wedge-based corner model for widely separated views matching [A]. In: *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition [C]*, Quebec, Canada, 2002, 3: 672~675.
- 14 Kanade T, Cohn J, Tian Y. Comprehensive database for facial expression analysis [A]. In: *Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Grenoble, France, 2000: 46~53.
- 15 Tan H, Zhang Y, Li R. Robust eye extraction using deformable template and feature tracking ability [A]. In: *Proceedings of International Conference on Information Communications & Signal Processing [C]*, Singapore, 2003: 1747~1751.