

文章编号: 1001-0920(2011)08-1131-05

## 指纹及指静脉双模态识别的二级分类融合法研究

王科俊, 马 慧, 李雪峰

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对单模态生物特征识别系统固有的局限性, 提出一种基于二级分类的指纹与指静脉识别的决策级融合方法. 首先, 针对指纹和指静脉进行一级分类器设计, 得出各自的识别结果; 然后将这两种模态的特征点集以特征串联的方式形成新的特征矢量并构成第3个分类器进行二级分类, 得出识别结果; 最后将这3个识别结果进行决策级融合, 得到最终的识别结果. 实验结果表明, 该方法有效地克服了单模态识别方法的局限性, 提高了系统的性能.

**关键词:** 多模态生物特征识别; 指纹识别; 静脉识别; 二级分类

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

## Research on dual-modal second-level decision fusion for fingerprint and finger vein recognition

WANG Ke-jun, MA Hui, LI Xue-feng

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: WANG Ke-jun, E-mail: wangkejun@hrbeu.edu.cn)

**Abstract:** In order to overcome the inherent limitations of single modal fingerprint and finger vein recognition systems, a second-level decision fusion algorithm based on fingerprint and finger vein dual-mode recognition is proposed. Firstly, two classifiers are designed for fingerprint and finger vein recognition respectively. Then extracted feature vectors from the first stage are then concatenated to make the third classifier for second-level decision. Finally, recognition is achieved by the fusion of the three classifiers' recognition results at the decision level. Experimental results show that this algorithm not only overcomes the limitations of single-modal biometrics, but also effectively improves the recognition performance of the system.

**Key words:** multibiometric; fingerprint identification; finger vein identification; second-level classifier

### 1 引言

传统的单模态生物特征识别系统易受时间、环境或其他因素的影响, 使其应用环境存在过多的限制, 因而每一种生物特征都不可能具有真正意义上的普遍性. 另外由于每种生物特征所能达到的身份识别准确率是有限的, 单纯对识别方法的改进很难从根本上解决问题. 多模态生物特征身份识别技术将多个生物特征结合起来以提供更充分的识别信息, 弥补了单种生物特征认证不稳定、错误率较高等缺点, 它提高了系统的识别率, 扩展了系统的适用范围, 因而具有良好的应用前景<sup>[1-2]</sup>.

Brunelli 等人<sup>[3]</sup>最早提出利用多个特征进行个人身份认证的方法, 并在匹配层上整合了人脸识别和语

音识别, 但是该方法需要准确构建正负样本集、选择若干映射参数, 实现起来有一定难度, 且无法克服小样本效应. Bigun 等人<sup>[4]</sup>提出了一种用贝叶斯方法在决策层上整合不同生物特征的方法. Hong 等人<sup>[5]</sup>从理论上定量地证明了多模态生物特征认证系统相对于单模态生物特征认证系统在实现效率上的提高. Jain 等人<sup>[6]</sup>提出将指纹与人脸识别的结果相融合, 并对多生物特征的融合进行了综述.

近年来, 国内外学者对多模态的研究大都基于指纹、人脸、声纹、掌纹及虹膜等模态的融合策略<sup>[7-11]</sup>. 而本文的多模态生物特征身份识别方法选择指纹和指静脉两种模态进行决策级融合, 是因为这两种模式在身份识别应用中具有较强的互补性. 指纹识别的识

收稿日期: 2010-04-22; 修回日期: 2010-08-25.

基金项目: 国家863计划项目(2008AA01Z148); 国家自然科学基金项目(60975022); 黑龙江省杰出青年科学基金项目(JC200703); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金项目(2007RFXXG009).

作者简介: 王科俊(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事模式识别、智能控制等研究; 马慧(1982-), 女, 博士生, 从事多模态生物特征识别及图像处理的研究.

别率很高,但其存在着指纹纹路易受损坏、手指表面情况对图像采集影响较大以及易被窃取等弊端.与指纹相比,静脉模式具有如下优势:静脉识别采用的是手指内部的静脉图像特征,手指表面的情况对识别结果没有影响;静脉图像很难伪造并采用.但静脉模式存在可提取的特征少的缺点.鉴于指纹与指静脉识别存在的优缺点,考虑到指纹图像可提取的特征非常丰富,能有效弥补单一指静脉识别的不足,本文将指纹特征与指静脉特征结合起来,充分利用两者的优势,构建良好的身份识别系统.

鉴于决策级融合是在高层次上进行,所需要处理的数据量小,识别的速度高,本文提出一种新的基于二级决策的指纹与指静脉识别的决策级融合方法.首先,第一级分类的指纹识别采用基于细节点匹配的方法<sup>[12-13]</sup>得到识别结果;静脉识别则借鉴文献<sup>[14-15]</sup>中的方法,针对指静脉图像的特性,采用所提出的基于修正的 Hausdorff 距离的静脉识别方法得到识别结果.然后将这两种模态的特征点集以特征串联的方式构成二级分类器,这样,既尽可能多地保留了参与融合的多特征间的有效鉴别信息,又避免了多模态间由于特征量纲相差较大而导致直接串联出现的特征不平衡的情况.最后将上述3个分类器的识别结果进行决策级融合,并将融合后的结果作为最终的识别结果.该方法充分利用了指纹及指静脉的识别信息,有效地提高了识别系统的准确性,为多生物特征识别提供了一种有效的途径.

## 2 基于指纹与指静脉的身份识别方法

本文提出的二级分类融合方法充分考虑了指纹与指静脉两种模态的识别信息,以获得更加全面可靠的认证结果.融合模型如图1所示.在进行融合之前,先进行单独的指纹与指静脉身份识别.

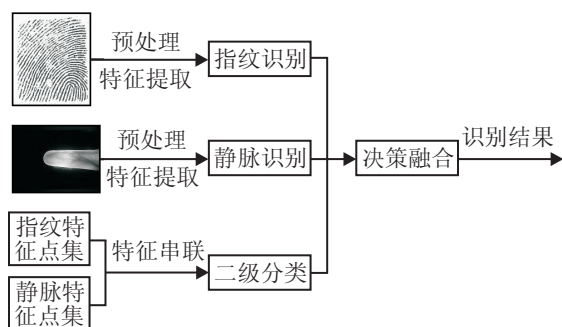


图1 指纹与指静脉决策级融合模型

### 2.1 基于指纹的身份识别

指纹识别采用基于细节点匹配的方法.首先求取指纹图像的方向图,采用方向滤波方式进行图像增强,依据指纹的方向信息对图像进行二值化,并采用基于八邻域的细化算法进行细化;然后对细化后的图像提

取出细节点(即端点与分叉点)和奇异点(即中心点与三角点),并采用纹路跟踪的方法去除伪特征点;最后,利用提取出的中心点和三角点进行配准,使输入图像与模板图像处于同一标准.

对配准后的图像进行细节点匹配操作.指纹图像的匹配是指纹特征点拓扑结构的匹配,若模板图像特征点的拓扑结构与样板图像特征点的拓扑结构大多相同,则认为两幅图像匹配;反之,则不匹配.其相似度的描述可转化为特征点相似的描述,即

$$\text{相似度} = \frac{4 \times \text{分数} \times \text{指纹特征最大相似数}}{\text{总特征点数} \times \text{总特征点数}}$$

其中:分数是指纹模板上的一个特征点和样板上对应特征点匹配成功的记录,若匹配成功,则增加分数,分数值可自行定义;总特征点数为两个进行比对的特征点数之和.

综上所述,匹配算法的具体步骤如下:

1) 读入模板特征点  $P$  和样本特征点  $P'$ , 并判断  $P$  和  $P'$  是否满足  $P \approx P'$ . 其中  $P \approx P'$ , 即  $P = P' + \Delta$ , 这里  $\Delta$  是界限盒的误差. 在匹配细节点  $P$  和  $P'$  时, 对于细节点  $P$ , 如果在一定的极角和半径误差容许范围内细节点  $P'$  落在其界限盒内, 且二者的方向和类型相符, 则判定这两个细节点  $P$  与  $P'$  相匹配.

2) 累加分数和相似特征点个数.

3) 根据相似度计算公式计算匹配相似度, 并与合格阈值进行比较, 判断匹配是否成功.

### 2.2 基于静脉的身份识别

本文针对静脉识别模块提出了基于修正的 Hausdorff 距离(MHD)的指静脉匹配方法. Hausdorff 距离用于测量两个点集之间的匹配程度, 是两图像间相似性的一种度量方法. 它在计算时不需要建立两幅图像点与点之间的对应关系, 具有一定的抗平移、旋转变换的能力; 与只考虑点集中最近的两点, 而未考虑集合中其他点的位置的绝对距离相比, 该方法具有更好的识别效果.

在进行匹配之前, 首先对原始静脉图像进行一系列预处理操作, 得到细化图像; 然后对细化图像提取出特征点, 即端点和交叉点. 设模板图像提取出的特征点集为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , 待匹配图像特征点集为  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 则  $A$  与  $B$  之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)). \quad (1)$$

其中:  $h(A, B)$  和  $h(B, A)$  分别为集合  $A$  到集合  $B$  以及集合  $B$  到集合  $A$  的单向 Hausdorff 距离, 其数学描述为

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\|. \quad (3)$$

这里:  $\|*\|$  表示某种距离范数;  $h(A, B)$  表示对点集  $A$  中的每个点  $a_i$ , 求取距该点最近的  $B$  集中的任一点  $b_j$  之间的距离, 并将这样的距离进行排序, 取这个距离中的最大值作为  $h(A, B)$  的值. 同理可得  $h(B, A)$ .  $H(A, B)$  取  $h(A, B)$  和  $h(B, A)$  中的大者, 它反映了集合  $A$  与集合  $B$  的不匹配程度,  $H(A, B)$  的值越大, 表明两个集合相差越大.

从 Hausdorff 距离的定义可知, Hausdorff 距离在计算时选取集合中单独一个元素点代表整个集合, 并与另一个集合进行集合间距离的度量. 它将目标集合整体分解为独立元素进行分析度量, 仅选择集合中某一具有某种数学意义上的特殊性的元素来代表其所在的整个集合, 这使得它对干扰很敏感: 假定点集  $A$  与  $B$  非常相似, 且  $B$  中仅有一点与  $A$  相差较大时,  $h(B, A)$  和  $H(A, B)$  的值就会变得很大.

鉴于 Hausdorff 距离存在上述缺点, 本文使用修正的 Hausdorff 距离进行指静脉图像的匹配. 该方法在计算点集  $A$  中每一点到点集  $B$  中最近一点的距离之后, 将这些距离的均值作为两个点集之间的距离, 并将以单个元素代表整个集合的思想扩展为集合内所有元素的平均作用, 从而在很大程度上提高了算法对噪声的适应性. 其具体定义如下:

$$h(A, B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad (4)$$

其中  $N_A$  为点集  $A$  中特征点的个数.

MHD 距离的计算通常由距离变换来实现, 距离变换是计算一个点集中所有点到另一个点集的距离的过程. 本文选取欧氏距离变换 (EDT) 作为距离计算时的距离度量, 其具体定义为

$$\text{Dis}(p) = \min(d_M(p, q), q \in B). \quad (5)$$

其中:  $d_M(p, q)$  为特征点  $p$  与  $q$  之间的距离,  $B$  为目标物体的元素集合. 在进行距离变换时将其定义为

$$d_M(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2}. \quad (6)$$

为了减少计算量, 将上式改写为

$$d_M(p, q) = (p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2. \quad (7)$$

基于 MHD 的特征点匹配流程如下:

1) 根据距离变换公式 (5) 计算出特征点集  $A$  到特征点集  $B$  的平均 Hausdorff 距离  $\text{Dis}_{AB}$ .

2) 同理, 计算出特征点集  $B$  到特征点集  $A$  的平均 Hausdorff 距离  $\text{Dis}_{BA}$ .

3) 将  $\text{Dis}_{AB}$  与  $\text{Dis}_{BA}$  中的大者作为求得的相似性度量值并与预设阈值进行比较, 判断匹配是否成功. 进行识别时, 将与待识别样本不匹配程度最小的样本

作为最终的识别结果.

### 3 基于二级决策的融合方法

由于指纹识别与指静脉识别是两个独立的模块, 为了充分利用这两个模块的鉴别信息, 本文提出了二级分类的融合方法, 即针对指纹和指静脉识别先进行第一级分类器的设计, 得到分类程度值 (如前所述); 然后将指纹与指静脉特征进行融合形成第二级分类器, 进而得到一个分类程度值; 最后根据这 3 个分类器的识别结果进行综合分析, 得到一个决策分界值, 从而实现了分类.

#### 3.1 二级分类器的设计

在二级分类器的设计上, 采用特征串联的方式将指纹与指静脉特征首尾相连形成一个新的特征矢量, 并在高维的特征空间进行识别. 这种方式属于特征级融合的范畴, 其优势是明显的: 对同一模式提取的不同的生物特征矢量总是反映模式的不同特性, 对这些特征进行优化组合, 不仅能利用特征间的互补信息来提高系统的准确性, 从而更充分地利用各个生物特征提供的有效信息, 而且在一定程度上消除了由于主客观因素带来的冗余信息, 对分类识别具有重要意义.

本文的指纹与指静脉识别均采用基于特征点的方式, 因此将这两种模态的特征点集以特征串联的方式构成二级分类器时, 可避免因不同模态间特征量纲相差较大而导致直接串联出现的特征空间不相容, 或特征在融合中不平衡等现象. 二级分类器匹配方法如下:

1) 计算模板指纹图像和模板指静脉图像的融合特征向量集合  $\gamma_1$ . 设模板指纹图像特征点集合为  $\alpha_1 = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , 模板指静脉图像特征点集合为  $\beta_1 = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ , 则特征串联后的模板融合特征向量集合  $\gamma_1 = (\alpha_1, \beta_1) = (a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_n)$ .

2) 计算待匹配的指纹图像和指静脉图像的融合特征向量集合  $\gamma_2$ . 设待匹配指纹图像特征点集合为  $\alpha_2 = (s_1, s_2, \dots, s_c)$ , 待匹配指静脉图像特征点集合为  $\beta_2 = (t_1, t_2, \dots, t_d)$ , 则特征串联后的待匹配融合特征向量集合  $\gamma_2 = (\alpha_2, \beta_2) = (s_1, s_2, \dots, s_c, t_1, t_2, \dots, t_d)$ .

3) 利用上述指静脉特征点集匹配方法进行融合特征向量集合  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的匹配. 首先根据式 (5) 求得特征点集  $\gamma_1$  到特征点集  $\gamma_2$  的欧氏距离  $\text{Dis}_{\gamma_1\gamma_2}$  以及特征点集  $\gamma_2$  到特征点集  $\gamma_1$  的欧氏距离  $\text{Dis}_{\gamma_2\gamma_1}$ ; 然后将这两个距离中的大者作为相似性度量值并与预设阈值进行比较, 判断匹配是否成功. 进行识别时, 将与待识

别样本不匹配程度最小的样本作为最终识别结果。

### 3.2 决策级融合方法

决策级融合是一种高层次的融合,其通信量小、抗干扰能力强、容错性好,能有效地反映目标各个侧面不同类型的信息.因此,本文在得到上述3个分类器的结果后,采用决策级融合方法得到最终的识别结果。

在完成一级和二级分类识别后,得到指纹识别结果  $I_{\text{finger}}$ , 静脉识别结果  $I_{\text{vein}}$  以及二级分类器的识别结果  $I_{\text{fusion}}$ . 这3个结果的取值为0或1,0代表识别失败,1代表识别成功. 最终的识别结果  $f_r$  由上述得到的  $I_{\text{finger}}$ ,  $I_{\text{vein}}$  与  $I_{\text{fusion}}$  采用投票的方式获得,当有两个及以上的分类器识别结果为通过时,  $f_r$  的结果为通过. 具体表达式为

$$f_r = \begin{cases} 1, & I_{\text{finger}} + I_{\text{vein}} + I_{\text{fusion}} \geq 2; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

## 4 实验结果分析

为了验证本文方法的有效性,选用实验室建立的指纹指静脉双模态图像库中的图像进行测试. 该库包含300个人的指纹及指静脉图像. 其中:每人采集指纹图像5幅,共1500幅,图像大小为  $256 \times 300$ ; 采集静脉图像5幅,共1500幅,图像大小为  $320 \times 240$ . 本文实验数据库中的部分图像如图2所示。

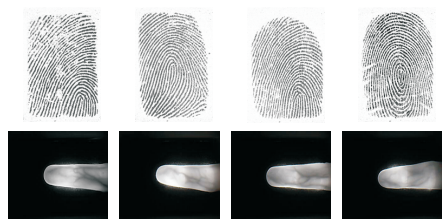


图2 指纹与指静脉实验数据库

融合模块进行实验时,首先对样本库中样本进行单样本认证实验. 此处选取两组具有代表性的样本来展示实验结果,如图3所示。

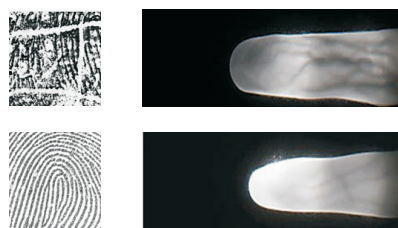


图3 多模态系统单样本认证的指纹和手指静脉示例图像组

第1组样本中,指纹图像质量很差而指静脉图像质量良好,指纹识别结果为失败,即  $I_{\text{finger}} = 0$ ,手指静脉识别结果为成功,即  $I_{\text{vein}} = 1$ ,而最终的多模态

系统的结果为通过,即  $I_{\text{fusion}} = 1$ ; 第2组样本中,指纹图像质量较好而指静脉图像质量较差,指纹识别结果为  $I_{\text{finger}} = 1$ ,手指静脉识别结果为  $I_{\text{vein}} = 0$ ,融合后的多模态识别系统结果为  $I_{\text{fusion}} = 1$ . 由此可见,融合后的系统能克服单一的指纹识别及指静脉识别中由于图像质量过差而造成的认证失败现象,从而验证了多模态识别方法能克服单模态生物特征识别方法的局限性。

为了比较指纹识别、静脉识别以及基于二级决策融合方法的识别性能,这里分别对这3种识别方式进行1:1认证实验和1:N识别实验. 实验时从每个人的5幅指纹图像中,任选一幅作为待识别样本构成验证库,其余4幅构成模板库;静脉识别及融合识别以同样的方式构成验证库和模板库. 实验结果如表1和表2所示。

表1 3种识别方式的1:1认证结果

识别模态	匹配次数	拒识次数	拒识率/%
指纹识别	1200	41	3.4
静脉识别	1200	62	5.2
融合识别	1200	18	1.5

表2 3种识别方式的1:N识别结果

识别模态	识别次数	误识次数	误识率/%
指纹识别	300	3	1
静脉识别	300	10	5.2
融合识别	300	1	1.5

从指纹识别和指静脉识别的实验结果可以得出,本文所采用的指纹及指静脉识别算法能够较好地实现对大多数指纹和指静脉图像实现匹配、识别;但对少数图像质量过差的图像,其识别效果并不理想. 图4给出了3种识别方法的roc曲线. 从图4可以看出,本文融合方法的整条roc曲线均位于指纹和指静脉roc曲线的下方,说明该方法不仅识别率高于单模态系统,而且拒识率也低于单一的生物特征识别技术,从而证明了多模态识别技术的性能高于单一模态的指纹识别或手指静脉识别技术。

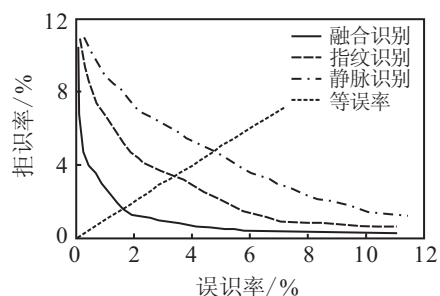


图4 3种识别方式的roc曲线

## 5 结 论

本文针对单一模态的生物特征识别系统存在的认证不稳定、错误率较高等缺点,提出了一种新的基于二级分类的指纹与指静脉双模态系统的决策级融合方法.该方法综合考虑了静脉识别与指纹识别的优缺点,将静脉特征点集与指纹特征点集以特征串联的方式形成新的特征矢量来构成二级分类器,这种二级分类思想充分利用了不同模态间的鉴别信息来提高系统的准确性.实验结果表明,本融合方法有效弥补了单一模态识别系统的不足,其识别率优于单一的指纹识别及指静脉识别,且拒识率低于单一的生物特征识别技术,融合系统整体性能好于单一的指纹识别及指静脉识别,效果十分理想.但由于增加了融合过程,本文方法的识别时间相对于单一的指纹识别或指静脉识别要长,因此,如何在保持融合系统识别性能的基础上进一步提高多模态系统的识别速度是今后研究中要重点解决的问题.

### 参考文献(References)

- [1] Snelick R, Uludag U, Mink A, et al. Large scale evaluation of multimodal biometric authentication using state-of-the-art systems[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(3): 450-455.
- [2] Liu C J, Wechsler H. A shape-and texture-based enhanced fisher classifier for face recognition[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(4): 598-608.
- [3] Brunelli R, Falavigna D. Person identification using multiple cues[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(10): 985-966.
- [4] Bigun E S, Bigun I, Due B, et al. Expert conciliation for multimodal person authentication systems by Bayesian statistics[C]. *Proc of the Audio Video-based Personal Authentication*. Switzerland: Switzerland Press, 1997: 985-966.
- [5] Hong L, Jain A K. Integrating faeces and fingerprints[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 3(1): 765-771.
- [6] Jain A K, Ross A. Multibiometric systems[J]. *Communication of the ACM, Special Issue on Multimodal Interface*, 2004, 47(1): 34-40.
- [7] Chibelushi C, Feravi F, Mason J S D. A review of speech-based bimodal recognition[J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2002, 4(1): 23-37.
- [8] 刘红毅, 王蕴红, 谭铁牛. 基于改进 ENN 算法的多生物特征融合的身份验证[J]. *自动化学报*, 2004, 30(1): 78-85.  
(Liu H Y, Wang Y H, Tan T N. Multi-modal data fusion for person authentication based on improved ENN[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(1): 78-85.)
- [9] Chibelushi C, Feravi F, Mason J S D. A review of speech-based bimodal recognition[J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2002, 4(1): 23-37.
- [10] Shukla, Anupam. Fusion of face and speech features with artificial neural network for speaker authentication[J]. *IEEE Trans on Systems*, 2007, 24(5): 357-370.
- [11] Frischholz R W, Dieckmann U. A multimodal biometric identification system[J]. *IEEE Trans on Computer*, 2000, 33(2): 64-68.
- [12] 罗希平, 田捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法[J]. *软件学报*, 2002, 13(5): 946-956.  
(Luo X P, Tian J. Image enhancement and minutia matching algorithms in automated fingerprint identification system[J]. *J of Software*, 2002, 13(5): 946-956.)
- [13] 李昊, 傅曦. 精通 VisualC++ 指纹模式识别系统算法及实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 88-93.  
(Li H, Fu X. Master Visual C++ fingerprint recognition algorithm and implementation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008: 88-93.)
- [14] Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W A. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993: 322-328.
- [15] Dubuisson M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching[C]. *Proc of the 12th Int Conf on Pattern Recognition*. Israel: Jerusalem Press, 1994: 566-568.