

# 基于动态手势的身份认证方法及其 在智能手机上的应用

高焕芝<sup>1</sup>, 曹秀莲<sup>2</sup>, 王 磊<sup>1</sup>, 邹北骥<sup>1</sup>

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心湖南分中心, 湖南长沙 410004)

**摘 要:** 基于生物特征的身份认证方法是当前信息安全技术领域的热点. 论文在分析当前各种生物特征认证方法的基础上, 针对其应用在智能手机上存在的问题, 提出一种基于动态手势进行身份认证的算法 EI-DTW. 算法结合放宽端点限制和提前终止的动态时间规整(DTW)高效算法, 取消了手势特征匹配时的端点对齐限制, 提高了认证精度, 并通过限定弯折斜率和提前终止策略进一步提高了认证效率.

**关键词:** 动态时间规整; 动态手势; 身份认证

**中图分类号:** TN91      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)09-1857-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.09.030

## An Identity Authentication Method Based on Dynamic Gesture and Its Application in Mobile Phone

GAO Huan-zhi<sup>1</sup>, CAO Xiu-lian<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZOU Bei-ji<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hunan Branch of National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Changsha, Hunan 410004, China)

**Abstract:** Biometric authentication is a hot topic in the current information security field. Based on the analysis of the current biometric authentication methods and the problems of their applications on smart phones, we propose an identity authentication method based on a dynamic gesture matching algorithm named EI-DTW, which combines relaxation of the endpoints restriction and early termination of authentication based on dynamic time warping(DTW) algorithm. The experimental results show our algorithm EI-DTW enhances the authentication accuracy by canceling the endpoint alignment restriction on gesture matching, and improves the authentication efficiency by the early termination strategy and limiting the warp slope.

**Key words:** DTW(Dynamic Time Warping); dynamic gesture; identity authentication

## 1 引言

基于人的生物特征的身份认证技术是当前信息安全技术领域的热点. 由于人的生物特征的唯一性, 使其应用于人的身份识别更安全、更可靠. 随着智能手机等移动终端的广泛普及和应用, 人们越来越多地应用它进行银行支付、机票订购、支付保险等各类需要身份验证的交易, 因此智能手机及各类移动终端的身份认证成为安全支付的一个重要保证. 传统的以简单用户名加密码的方式存在容易被破解的风险, 因此采用基于人的生物特征的方式对于提高这种支付的安全性具有重要的意义. 基于人的生物特征进行身份认证主要有基于指

纹<sup>[1]</sup>、人脸<sup>[2]</sup>、虹膜<sup>[3]</sup>、签名<sup>[4]</sup>等特征的身份认证方式, 但将它们应用于智能手机等移动终端时, 会由于智能手机资源的限制或其识别算法本身复杂性的问题, 导致身份识别效率低, 等待时间过长等问题, 让用户感到很不方便.

本文提出一种基于动态手势的身份认证方法, 利用智能手机自身的传感器, 获取用户持手机作手势时的各类运动信息, 构成手势特征, 将待认证手势特征与模板手势特征进行匹配, 计算手势间的差异, 通过该差异值与阈值的比较来判定用户身份的合法性, 实现用户身份认证.

模式匹配常用的算法有动态时间规整(Dynamic

Time Warping, DTW)<sup>[5]</sup>、隐马尔可夫(Hidden Markov Models, HMM)<sup>[6]</sup>、人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)<sup>[7]</sup>,其中 DTW 算法具有简单有效的特点,适合在资源受限的智能手机平台上运用. Kogure 和 Sato 首次将语音识别领域解决语速快慢不一的动态时间规整(DTW)算法应用到在线签名认证领域<sup>[8]</sup>. Wirtz<sup>[9]</sup>和 Huang<sup>[10]</sup>也在签名认证研究中采用了 DTW 算法. Bae 等人对 DTW 算法进行改进,将并行思想运用到 DTW 算法中,以减小算法的时间复杂度<sup>[11]</sup>. Hao Feng 等提出采用规整特殊点的序列来代替 DTW 算法中对整个数据序列的规整,以提高规整的效率<sup>[12]</sup>. 胡金平等<sup>[13]</sup>通过限定弯折的斜率来减少计算量,从而提高效率. 目前已有的各种方法在应用到智能手机时,精度都会出现不同程度的下降,主要原因是:智能手机的电池续航能力有限,且传感器获取数据时可能会出现一些时间延迟,获取到的手势数据的头部和尾部可能包含一些无意义的数,使得动态匹配的精度降低. 因此本文在 DTW 经典算法的基础上限定匹配路径的弯折斜率,同时,将放宽端点的思想和提前终止策略<sup>[14]</sup>相结合,尽快发现无效的匹配,减少计算量以适应智能手机的有限计算资源. 本文算法特点是:放宽端点限制和提前终止,我们称之为 EI-DTW 算法.

## 2 身份认证流程

采用动态手势进行身份认证包括数据采集、预处理、特征提取、匹配认证四个模块,流程如图 1 所示.



图1 采用手势进行身份认证的流程

手势数据采集的过程是通过手机自身传感器获取用户执行手势时速度、加速度、力等动态特征.

预处理是对传感器获取的原始数据进行平滑、去噪等操作,以消除用户执行手势时抖动等随机因素对数据产生的干扰.

特征提取是从预处理后的数据中选取能反映手势习惯的稳定的特征. 手势特征可分为两大类:全局特征、局部特征,全局特征是针对整个手势数据序列,通常为数据序列的平均值、最大值等;局部特征是针对手势中每个采样点的数据. 全局特征量少,但是容易丢失手势信息,本文采用局部特征.

匹配认证采用 EI-DTW 算法将待测手势特征与模板手势特征进行匹配,通过其差异值与阈值的比较来验证用户的合法性. 为了提高计算效率,从众多手势模

板中选择一个最优手势模板,待测手势只需与最优模板进行比较. 假设手势样本服从正态分布,选择处于正态分布中心的样本作为最优模板,最优模板距离其他样本的最大距离为阈值.

## 3 基于动态手势的身份认证算法 EI-DTW

### 3.1 DTW 基本原理

假设手势模板  $R = \{r_m | 1 \leq m \leq M\}$ , 其中,  $m$  为手势模板的时序标号,  $M$  为手势模板含有的数据帧总数,  $m = 1$  为手势模板的起始帧,  $m = M$  为手势模板结束帧,  $R(m)$  表示手势模板的第  $m$  帧; 测试样本  $T = \{t_n | 1 \leq n \leq N\}$ , 其中,  $n$  为测试样本的时序标号,  $N$  为测试样本含有的数据帧总数,  $n = 1$  为测试样本的起始帧,  $n = N$  为测试样本的结束帧,  $T(n)$  表示测试样本第  $n$  帧.

DTW 算法采用欧几里得距离来计算两数据帧之间的失真度<sup>[8]</sup>, 测试样本第  $n$  帧与模板第  $m$  帧之间失真度计算公式如式(1)所示.

$$d[T(n), R(m)] = \sqrt{(t_n - r_m)^2} \quad (1)$$

计算测试样本与模板之间的总体失真度时, 寻找合适的时间规整函数  $m = w(n)$ , 非线性规整测试样本时间轴  $n$  到模板时间轴  $m$  上并使其总体失真度最小, 即需满足如式(2)中所示条件.

$$D[T, R] = \min_{w(n)} \sum d[T(n), R(w(n))] \quad (2)$$

$D[T, R]$  即是测试样本与模板之间最优的时间校准的匹配路径. DTW 算法原理如图 2 所示, 手势模板的  $M$  个数据帧在纵轴上标出, 测试模板的  $N$  帧在横轴上标出, 测试样本和手势模板各个数据帧之间形成网格, 网格中交叉点  $(n, m)$  对应测试样本  $T(n)$  与手势模板  $R(m)$  匹配, 其失真度为  $d[T(n), R(m)]$ .

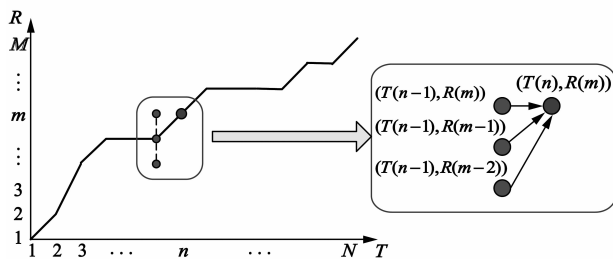


图2 DTW算法原理图

动态时间规整算法原理就是寻找一条从起始点  $(1, 1)$  到终点  $(N, M)$  的、经过各交叉点并且所经过交叉点的失真度总和最小的最优匹配路径. 路径在寻找时并不是任意的, 为了保证最优匹配的有效性, 必须满足以下约束条件:

(1) 单调性限制. 匹配路径只能从网格的左下角通往右上角, 时间规整函数须确保手势间的匹配路径不破坏手势数据在时间上的有序性, 须满足的条件如式

(3)所示.

$$w(n+1) \geq w(n) \quad (3)$$

(2)连续性限制. 规整函数对测试样本与模板进行匹配时,不能跳过任何一个匹配点. 为了使匹配路径不过分倾斜,对匹配路径进行局部约束,如图 2 中的蓝色框中所示,为了描述该局部约束条件,函数  $\Phi(n, m)$  表示匹配路径到达交叉点  $(n, m)$  时路径的前一个点,  $\Phi(n, m)$  须满足式(4)中三个条件中的一个.

$$\begin{aligned} \Phi(n, m) &= (n-1, m) \\ \Phi(n, m) &= (n-1, m-1) \\ \Phi(n, m) &= (n-1, m-2) \end{aligned} \quad (4)$$

(3)端点对齐限制. 时间规整函数必须满足  $w(0) = 0, w(N) = M$ .

针对智能手机电池续航能力的限制,基于动态手势的身份认证系统在确定手势开始时才对传感器进行监听. 从点击“开始”按钮到点击“结束”按钮期间内加速度传感器采集到的手势数据为一个手势样本. 用户点击“开始”、“结束”按钮获取数据时,可能会出现一些时间延迟,获取到的手势数据的起始帧和结束帧并不是真正意义上手势的开始和结束. 由于时间延迟阶段内手势加速度数据变化比较小,而时间延迟是在一定范围内随机的,即使同一个用户也不是每次手势时延迟都完全一样,贸然将测试样本和模板的端点对齐,只会增大最优匹配路径的累积距离,一旦累积距离超过了阈值,便会使得真实用户认证失败,从而增大了认证系统的 FRR 值,降低了认证系统的有效性. 因此,经典 DTW 算法对测试样本和模板进行端点对齐的限制不适用于本文. 本文 EI-DTW 算法在 DTW 经典算法的基础上放宽了算法中匹配路径端点对齐的限制,在动态规划思想的基础上,通过设置端点放松额度,可以忽略正常采集过程中的时间延迟对累积距离的影响,限定匹配路径的弯折斜率,旨在提高算法认证精度的同时,尽可能提高认证效率.

### 3.2 EI-DTW 算法

#### 3.2.1 匹配区域的边界条件

在基于手势的身份认证过程中,手势模板和待认证手势在样本两端存在一些延迟数据. 而延迟数据在一定范围是随机的,有可能手势模板两端的延迟数据帧比待认证手势多,也可能待认证手势两端的延迟数据帧比模板样本多. 考虑到智能终端的资源受限性,本文不对延迟数据进行额外处理,无论是模板样本还是待认证手势的数据中的延迟数据都直接在匹配认证算法中进行处理. EI-DTW 算法取消了 DTW 算法的端点对齐限制,端点放松至一定范围内,假设端点放松的额度为  $L$  帧,允许动态规划匹配路径的起点可在线段  $[(1,$

$1), (1, L)]$  或  $[(1, 1), (L, 1)]$  上,而终点也可在线段  $[(M - L + 1, N), (M, N)]$  或  $[(M, N - L + 1), (M, N)]$  上<sup>[14]</sup>. 如图 3 所示.

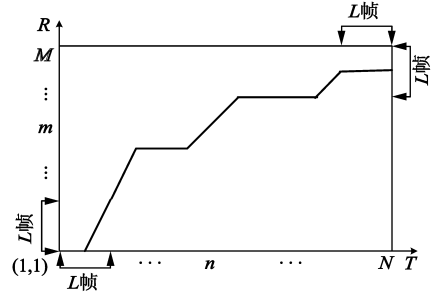


图3 手势匹配路径端点放松示意图

根据路径有效性的约束条件,坐标系网格中许多格点是不需要计算的,为提高计算效率,限定弯折斜率在区间  $[0.5, 2]$  上,根据弯折斜率和端点放松额度计算 EI-DTW 算法匹配区域边界. 模板样本和待认证手势的数据所带的延迟数据参与匹配认证,匹配路径约束范围如图 4 所示,放宽端点限制后,动态规划最优匹配路径过程中只需计算图中实线六边形内格点的欧氏距离.

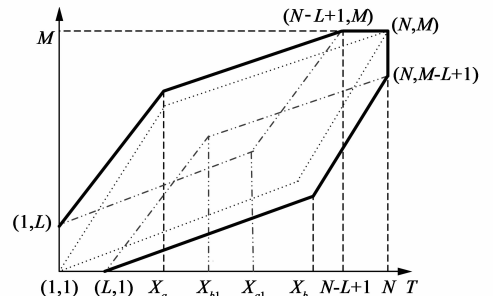


图4 放宽端点限制后匹配路径约束示意图

计算得到的  $X_a = (2M - N - L)/3, X_b = (2(2N - M) + L)/3$  都就近取整,由此得出最优模板长度  $M$  和测试数据长度  $N$  的关系如式(5)所示.

$$\begin{cases} 2M - N \geq 3 + L \\ 2N - M \geq L \end{cases} \quad (5)$$

不满足式(5)的测试数据可以认为与手势模板相差太大,无需进行动态折弯便知其与模板不属于同一类. 满足式(5)时,测试样本的数据帧  $x$  也无需计算与模板每一帧之间的欧氏距离,只要计算它和模板  $[y_{\min}, y_{\max}]$  之间帧的欧氏距离,其中  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$  对于  $x$  的表达式分别如式(6)和式(7)所示.

$$y_{\min} = \begin{cases} 0, & 1 \leq x \leq L \\ \frac{1}{2}(x - L), & L + 1 \leq x \leq X_b \\ 2(x - N) + M - L, & X_b + 1 \leq x \leq N \end{cases} \quad (6)$$

$$y_{\max} = \begin{cases} 2x + L, & 1 \leq x \leq X_a \\ \frac{1}{2}(x - N + L) + M, & X_a + 1 \leq x \leq N - L \\ M, & N - L + 1 \leq x \leq N \end{cases} \quad (7)$$

通过给定端点限制放宽的额度和弯折斜率,可构造出动态规划路径匹配的区域边界,最优路径匹配计算只需计算区域边界内格点,在提高算法认证精度的同时也提高其计算效率。

### 3.2.2 提前终止思想

DTW 算法中某格点的累积距离是匹配路径上从起点开始到当前格点间所有格点的欧氏距离总和,表示到匹配路径当前格点时测试样本和模板间的累积失真度.经典 DTW 算法先计算出所有格点的欧氏距离,然后动态规划出左下角到右上角的最优匹配路径,得到最终的累积距离.由于累积距离的计算是递进式的,如果测试样本某数据帧所在列上所有格点的累积距离都大于阈值,则表示最优匹配路径至该帧时的累积失真度已超过阈值,不需要再计算测试样本后续部分数据帧与模板数据帧之间的欧氏距离,所以经典 DTW 算法存在不必要的计算量。

本文 EI-DTW 算法采用提前终止思想,测试样本某数据帧所在列上所有格点的累积距离都大于阈值时,不再计算测试样本后续数据帧与模板数据帧之间的欧氏距离,减少认证过程中的计算量<sup>[13]</sup>,如图 5 所示。

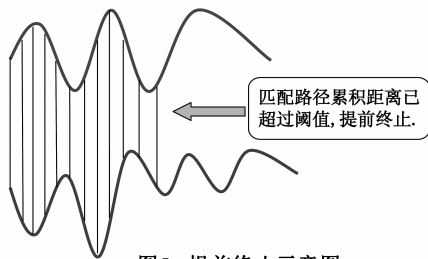


图5 提前终止示意图

由于测试样本每一帧的匹配计算过程中,每个格点的累积距离只跟前一帧的 3 个格点相关,所以算法实现时,不必先计算测试样本与模板间所有帧的欧氏距离,而是边搜索路径边计算帧匹配距离. EI-DTW 算法的提前终止策略就是测试样本某数据帧所在列上所有格点的累积距离都大于阈值时,便可结束计算,从而减少潜在的计算量,提高认证效率。

### 3.2.3 EI-DTW 算法描述

#### 算法 1 EI-DTW 算法

输入:手势模板  $R = \{r_m | 1 \leq m \leq M\}$ , 测试样本  $T = \{t_n | 1 \leq n \leq N\}$ , 端点放松额度  $L$ , 阈值  $\tau$ ;

输出:最优匹配路径累积距离小于阈值时返回 true, 否则返回 false;

过程:

```

1) if  $(2M - N < 3 + L) \parallel (2N - M < L)$  return false;
2) 声明列矢量  $D[1], d[1]$ , 并初始化
    $D[1, \dots, L] \leftarrow 0, D[L+1, \dots, M] \leftarrow \infty, d[1, \dots, M] \leftarrow 0$ ;
3) for  $x \leftarrow 2$  to  $N$ 
4) 根据式(6)和(7), 计算  $x$  对应的  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$ ;  $\text{overflow} \leftarrow \text{true}$ ;
5) for  $y \leftarrow y_{\min}$  to  $y_{\max}$ 
6) if  $(x, y)$  在线段  $\{(1, 1), (1, L)\} \cup \{(1, 1), (L, 1)\} \cup \{(M - L + 1, N), (M, N)\} \cup \{(M, N - L + 1), (M, N)\}$  上
    $\text{eucDistance} \leftarrow 0$ ; // 放松端点限制
7) else  $\text{eucDistance} \leftarrow \sqrt{(t_n - r_m)^2}$ ; // 两帧间欧氏距离
8)  $d[y] \leftarrow \text{eucDistance} + \min\{D[y], D[y-1], D[y-2]\}$ ;
9) if  $(d[y] \leq \tau)$   $\text{overflow} \leftarrow \text{false}$ ;
10) end for
11) if ( $\text{overflow}$ ) return false; // 溢出则提前终止
12)  $D[1, \dots, M] \leftarrow d[1, \dots, M]$ ;
13) end for
14)  $\text{EI\_DTW}(R, T) \leftarrow \min\{D[M-L, \dots, M]\}$ ;
15) return  $(\text{EI\_DTW}(R, T) \leq \tau)$ ;
   // 返回 EI-DTW 累积距离与阈值的比较结果

```

EI-DTW 算法在限定 DTW 弯折斜率为  $[0.5, 2]$  的基础上,结合放松端点限制和提前终止策略.从表 1 中算法伪代码的第 3 行和第 5 行组成的双重循环可以看出, EI-DTW 算法最多循环  $M \times N$  次,所以 EI-DTW 的时间复杂度是  $O(MN)$ ,算法中使用了两个长度为  $M$  的列矢量,所以算法空间复杂度是  $O(M)$ 。

## 4 实验与评估

### 4.1 手势测试集

训练样本集用来测试和选择最优模板和相应的阈值,认证样本集用来测试各实验的认证效果.手势测试集中包含的手势种类有两个,符号:“a”,“中”.参与搭建手势集的用户 15 个,其中 10 名男性,5 名女性,整个手势集分 11 天进行采集.第一天每个用户每种手势采集 30 次,作为训练样本集.从第二天开始到第 11 天,每个用户每种手势每天采集 10 个以上,共采集 3000 多个手势样本,作为认证样本集。

### 4.2 实验结果及评估

#### 实验 1 端点放松额度对认证系统性能的影响

$L$  取值不同时,对应的平均 ROC 曲线如图 6 所示.从图看出,  $1 \leq L \leq 10$  时, EER 随  $L$  的增大而减小,同一 FAR 值下, FRR 的值也随  $L$  增大而减小,即算法认证精度随  $L$  的增大而提高;  $L > 10$  之后,算法的认证精度趋于稳定,不同  $L$  值下的 EER 基本相等,甚至 ROC 曲线都基本重合。

从放宽端点限制的原理可知,  $L$  取值越大时,手势匹配过程需要计算欧氏距离的格点就越多,即  $L$  越大,算法计算量越大.  $L$  取不同值时,6000 次手势(3000 个

正样本,3000个负样本)匹配认证过程所耗费的时间比较如图7所示。

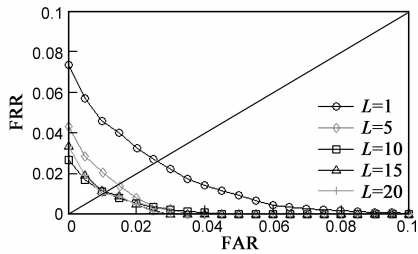


图6  $L$ 值不同时的平均ROC曲线比较

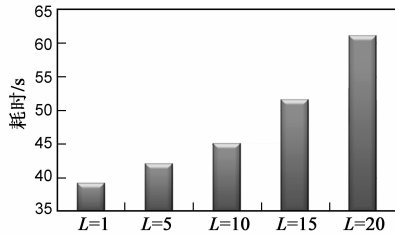


图7  $L$ 值不同时对6000次手势匹配认证的总耗时比较

认证系统根据  $L$  取值不同进行多次认证实验过程中可能会因为一些随机因素而导致获取的时间出现一点偏差,但是大体的趋势是不会变的,那就是  $L$  取值越大,认证过程耗费的时间就会越多。由于  $L \geq 10$  之后认证精度趋于稳定,所以本文 EI-DTW 算法端点放松的额度  $L$  选取为 10。

## 实验2 EI-DTW 算法与现有 DTW 算法的比较

本实验主要将本文算法 EI-DTW 与经典 DTW 算法,以及现有的高效 DTW 算法(FastDTW)<sup>[13]</sup>进行比较。首先比较算法的认证精度,三种算法的平均 ROC 曲线如图8所示。

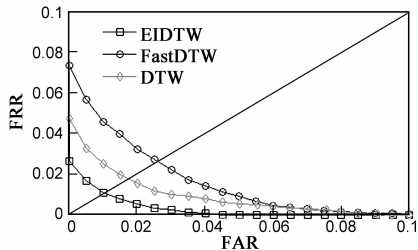


图8  $L$ 值不同时的平均ROC曲线比较

$y = x$  直线与各曲线的交点为各算法的 EER 值,从图中可直观看出,本文 EI-DTW 算法的 EER 最小,其值为 1%;同时,同一 FAR 值下, EI-DTW 算法的 FRR 值也最小。

采用本文的最优模板和阈值选取方法,分别为三种算法确定最优模板和阈值,三种算法在各自阈值下的认证效果比较如表2所示。

表2 三种算法的认证效果比较

	本文 EI-DTW 算法	FastDTW <sup>[5]</sup>	经典 DTW 算法
FRR	0.029	0.086	0.053
FAR	0.0	0.0	0.0

为身份认证系统安全性考虑,阈值对应 FAR 值都为 0,对表2中的数据进行比较后可知,本文 EI-DTW 算法的 FRR 值最小。结合图8的结果分析可知,本文 EI-DTW 算法的认证精度比经典 DTW 算法、FastDTW 算法都高。

继续比较 EI-DTW 算法、经典 DTW 算法、FastDTW 算法的认证效率,如图9所示。

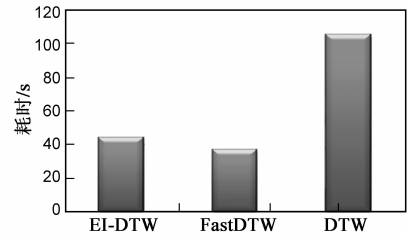


图9 三种算法对6000次手势匹配认证的总耗时比较

本文的 EI-DTW 算法由于其放宽端点限制原理,耗时稍多于 FastDTW 算法, EI-DTW 算法牺牲了少量的计算时间换取更高的认证精度。不过 EI-DTW 算法认证的实时性还是非常高的,单次手势匹配认证过程大概是 10ms 左右,待认证手势与最优模板相差较大时,由于算法的提前终止策略,认证过程的耗时将会更少。

## 5 结论和未来的工作

本文针对智能手机用户的身份认证问题,提出一种基于动态手势的身份认证方法,通过待认证手势与模板手势之间的匹配来认证用户身份,实现成本低、认证准确实时、方便易用。根据智能手机上手势匹配认证过程的实际需求,提出了一种结合放松端点限制和提前终止的 DTW 高效算法,简称“EI-DTW”。EI-DTW 算法取消了手势特征匹配时的端点对齐限制,以提高认证的精度;并通过限定弯折斜率和提前终止策略提高认证的效率。EI-DTW 算法的 EER 为 1%,本文实现系统的 FRR 为 2.9%, FAR 为 0。

本文动态手势匹配认证时的阈值对系统的错误拒绝率和错误接受率有一定的影响,继续对阈值的选择方法进行研究。

## 参考文献

- [1] 贺琦.基于指纹识别的身份认证系统设计[D].合肥:合肥工业大学,2008.
- [2] 章毓晋,程正东,谭华春.基于子空间的人脸识别[M].北

- 京:清华大学出版社,2009.1-5,40-64.
- [3] 王风华,韩九强,姚向华.一种基于虹膜和人脸的多生物特征融合方法[J].西安交通大学学报,2008,42(2):133-137.  
Wang F H, Han J Q, Yao X H. Multimodal biometric fusion approach based on iris and face [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 133-137. (in Chinese)
- [4] Argones Rua E, Alba Castro J L. Online signature verification based on generative models[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2012, 42(4): 1231-1242.
- [5] 胡金平,陈若珠,李站明.语音识别中 DTW 改进算法的研究[J].微型机与应用,2011,30(3):30-32.  
Hu J P, Chen R Z, Li Z M. Discussion of improved DTW algorithm in speech recognition[J]. Microcomputer & Its Application, 2011, 30(3): 30-32. (in Chinese)
- [6] Martinez-Diaz M, Fierrez J, Freire M R, et al. On the effects of sampling rate and interpolation in HMM-based dynamic signature verification [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Document Analysis and Recognition [C]. USA: IEEE, 2007. 1113-1117.
- [7] Quek C, Zhou R W. Antiforgery: a novel pseudo-outer product based fuzzy neural network driven signature verification system [J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(14): 1795-1816.
- [8] Sato Y, Kogure K. On-line signature verification based on shape, motion, and writing pressure [A]. Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition [C]. USA: IEEE Computer Society, 1982. 823-826.
- [9] Wirtz B. Stroke-based time warping for signature verification [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Document Analysis and Recognition [C]. USA: IEEE, 1995. 179-182.
- [10] Huang K, Yan H. On-line signature verification based on dynamic segmentation and global and local matching [J]. Optical Engineering, 1995, 34(12): 3480-3487.
- [11] Bae Y J, Fairhurst M C. Parallelism in dynamic time warping for automatic signature verification [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Document Analysis and Recognition [C]. USA: IEEE, 1995. 426-429.
- [12] Feng H, Wah C. Online signature verification using a new extreme points warping technique [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(16): 2943-2951.
- [13] 陈胜利,李俊奎,刘小东.基于提前终止的加速时间序列弯曲算法[J].计算机应用,2010,30(4):1068-1071.  
Chen S L, Li J K, Liu X D. Early abandon to accelerating exactly warping matching of time series [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 1068-1071. (in Chinese)
- [14] 张军,李学军.一种基于 DTW 的孤立词语语音识别算法 [J].计算机仿真,2009,26(10):348-351.  
Zhang J, Li X J. A method of isolated word recognition based on DTW [J]. Computer Simulation, 2009, 26(10): 348-351. (in Chinese)

#### 作者简介



**高焕芝** 女,1976年7月生,河北唐山人.中南大学博士研究生,研究方向:信息安全与软件工程.

E-mail: ghzygc\_1976@163.com



**曹秀莲** 女,1988年5月生,湖南郴州人.2013年5月毕业于中南大学,工学硕士.现于国家计算机网络应急技术处理协调中心湖南分中心工作,研究方向:信息安全与软件工程.

E-mail: caoxiulian511@163.com