

基于 DTW 改进算法的在线签名鉴别方法

王珂敏

中国人民武装警察部队工程学院通信工程系, 西安 710086

摘要 在线手写签名认证是一种基于生物特征的身份认证技术, 识别正确率和防伪性能是签名识别的研究重点, 识别响应速度也是决定系统实用化的关键。为了提高签名认证效率, 提出了一种改进的在线签名鉴别算法。改进了传统的动态时间弯折算法结构, 对最佳匹配路径的动态规划方法进行改进并将其应用于在线签名鉴别系统。讨论了实际应用中训练样本不足、字体随时间变化等因素带来的系统识别率下降的解决方法。避免了动态特征点提取、时序段匹配等方法由于书写环境和人物即时的生理特性所带来的问题, 同时针对签名的稳定性提出了加权距离计算公式, 保证高识别率的同时降低了误拒率。在模板较多时对匹配距离进行限制, 节约了系统运算量, 提高了模板匹配速率。随着待识别模板数目的增多, 该算法效率优势更加明显。

关键词 签名认证; 动态时间弯折; 动态规划; 匹配距离; 模板匹配

中图分类号 TP391

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)13-0101-04

On-line Handwritten Signature Verification Based on Improved DTW Algorithm

WANG Kemin

Department of Communication Engineering, Engineering College of the People's Armed Police Force of China, Xi'an 710086, China

Abstract On-line handwritten signature verification is one kind of biometric identity recognition technology. Response rate of verification is a key factor for a handwritten signature verification system as well as recognition correct rate and noise robust property. An improved DTW algorithm is discussed to reduce the recognition time, which optimizes the conventional DTW algorithm's structure with the method of dynamic programming, and fastens the template matching speed in real-time handwriting identification. At the same time this paper puts forward a weighted distance calculation formula based on weighting to the stability of every stroke. The experiment has proved that this method is effectual. This method reduces the False Reject Rate (FRR) while guaranteeing high recognition rate. The matching distance is confined properly when the number of models increases. The experimental results show that the algorithm not only reduces the amount of calculation data, but also minimizes the duration of the whole processing. The advantage of the new algorithm is more obvious with the increment of models. Experiments show that this algorithm is highly efficient in computation, and generates nice result of stereo matching.

Keywords signature verification; DTW; dynamic programming; matching distance; template matching

0 引言

与其他身份认证技术相比, 手写签名认证技术具有明显的优点: 与口令、密码等方式相比, 不会丢失、遗忘; 与指纹、语音等其他生物特征识别相比, 不需要专门且复杂的采样设备。一个完整的签名鉴别系统包括签名识别和签名认证两部分, 前者目的在于找出签名对应的签名者, 后者鉴定签名的真伪。签名识别是个多分类问题, 比签名认证对应的二分类问题复杂得多。前人对签名鉴别的研究大多集中在签名认证上, 如

Nakanishi 等^[1]和 Ma 等^[2]对于在线签名认证的研究, Baltzakis 等^[3]和 Edson 等^[4]在离线签名认证方面的研究; 有关签名识别方面的研究相对较少。

1 DTW 算法原理分析

有些学者应用识别语音的方法来识别笔迹, 目前常用的有动态时间弯折 (Dynamic Time Warping, DTW) 及隐马尔可夫模型 (Hidden Markov Model, HMM)^[5]。这两种方法在笔迹识别

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2007F50)

作者简介: 王珂敏, 助教, 研究方向为信号处理及信息可视化, 电子邮箱: wkmwj@qq.com

中都取得了较好的效果,在相同条件下,DTW 算法和 HMM 算法的识别效果相差不大,但 HMM 算法复杂得多,主要体现在训练阶段 HMM 算法需要提供大量的笔迹数据,经反复计算才能得到模型参数,而 DTW 算法在训练中几乎不需要额外的计算。因此,在签名识别,尤其是非特定人签名识别中,DTW 算法得到了广泛的应用。

1.1 时间弯折的概念

动态时间弯折 DTW 算法的目的是在参考模式和测试模式的签名特征之间找到一条优化的时间校准匹配路径,具体实现过程如下。

设想有 2 个序列 $A=a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_l$ 和 $B=b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_J$ (假设 A 为模板特征序列, B 为用来测试的特征序列), A 、 B 特征序列对应的时间变化关系可以用下面的时间规范函数表示

$$f=c(1), c(2), \dots, c(k), \dots, c(K) \quad (1)$$

其中, $c(k)=(i(k), j(k))$, 代表 k 次特征匹配时, 测试特征序列 B 中第 $j(k)$ 帧与模板特征序列 A 中第 $i(k)$ 帧比较。 $c(k)$ 可视为 $i-j$ 平面上的一个点, 随着参数 k 在 $i-j$ 平面上移动形成一条曲线, 称为“时间弯折匹配曲线”或“匹配路径”, 如图 1 所示。

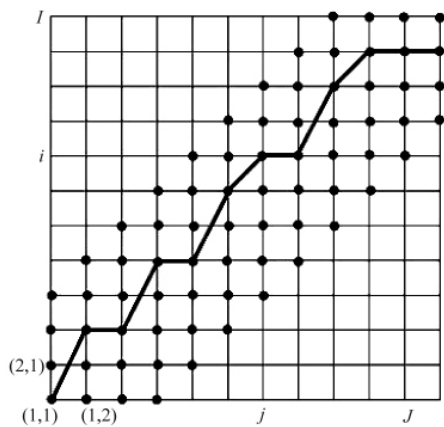


图 1 匹配路径

Fig. 1 Matching distance

令 $d(k)=(i(k), j(k))$ 或 $d(k)=(c(k))$ 为模板中的第 i 帧和测试序列中第 j 帧进行匹配的局部匹配距离。当两特征序列之间由相对瞬时时间变化时, DTW 的目标是找出满足两特征序列的总体平均匹配距离 $D(A, B)$ 。

$$D(A, B) = \min \frac{\sum_{k=1}^K d(c(k))w(k)}{\sum_{k=1}^K w(k)} \quad (2)$$

将式(2)的匹配路径 $f=c(k)$ 作为模板 A 和测试序列 B 的匹配路径, 将此时的匹配距离作为模板 A 和测试序列 B 的匹配距离。其中, $w(k)$ 为匹配点 $c(k)$ 匹配距离的加权系数。这样便得到了两签名规整到最相似的情况下的距离, 为了使路径不至于过分倾斜, 可以约束斜率在 0.5~2.0。对训练集中多个本人签名样本进行规整并求出彼此间规整距离的范围, 再将待

测签名与本人样本进行规整, 求出距离, 通过判断此距离是否在上述范围内判断是否为本人签名。

1.2 现有的高效 DTW 算法

DTW 算法在模板匹配过程中限定了弯折的斜率 (图 2), 平行四边形之外的格点对应的帧匹配距离无须计算; 另外, 由于每一列格点上的匹配计算只用到了前一列的 3 个网格, 因此没有必要保存所有的帧匹配距离矩阵和累积距离矩阵。利用以上 2 个特点对算法进行改进, 实现减少计算量和存储空间的目的。

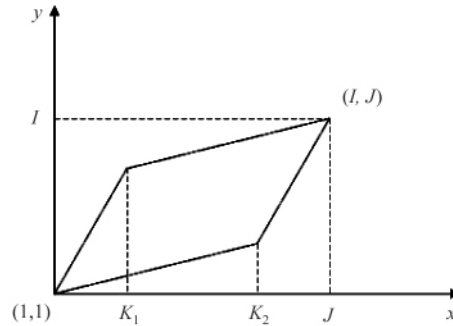


图 2 匹配路径约束示意图

Fig. 2 Constraint of matching distance

文献[6]提出把实际的动态弯折分为 3 段: $(1, K_1)$, (K_1+1, K_2) 和 (K_2+1, N) 。其中, $K_1 = \frac{1}{3}(2M-N)$, $K_2 = \frac{2}{3}(2N-M)$ 都取最相近的整数。从而得出 M 和 N 长度的限制条件为

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

不满足式(3)时, 认为两者差别太大, 无法进行动态弯折。

文献[6]提出, x 轴上的每一帧不再需要与 y 轴上的每一帧进行比较, 只与 y 轴上 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 间的帧进行比较。其中, y_{\min} 和 y_{\max} 的计算如下

$$y_{\min} = \begin{cases} \frac{1}{2}x & 0 \leq x \leq K_2 \\ 2x + (M - 2N) & K_2 < x \leq N \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{\max} = \begin{cases} 2x & 0 \leq x \leq K_1 \\ \frac{1}{2}x + (M - \frac{1}{2}N) & K_1 < x \leq N \end{cases} \quad (5)$$

可能出现 $K_1 > K_2$ 时, 弯折匹配的 3 段为 $(1, K_2)$, (K_2+1, K_1) 和 (K_1+1, N) 。以上高效算法缩小了进行相似度判断的测试帧和参考帧的范围 (减少了计算 x 轴上测试帧和 y 轴上参考帧矢量距离的次数), 同时缩小了所选路径的矢量累加和的范围 (减少了计算累加矢量和的次数), 提高了匹配速度, 但计算范围并没有缩到最小。

2 改进的 DTW 算法

如图 3 所示, 原有的 DTW 算法的相似度计算和矢量距离累加的区域为虚线所围区域, 改进后的计算区域如全部阴影

部分所示,但是真正需要参与相似度计算和矢量距离累加的区域如斜线阴影部分所示^[6]。

利用实时处理中分批进行固定的 N 帧和 M 帧匹配的特点,可以进一步把计算区域缩小到图 3 中的阴影部分区域,最大限度地提高 DTW 算法的识别速度,由此提出了对最佳匹配路径的动态规划方法。

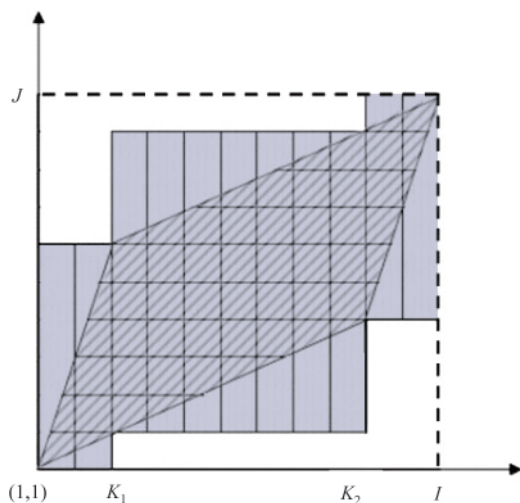


图 3 匹配路径约束示意图

Fig. 3 Constraint of matching distance

将距离的加权系数规定为 $w(k)=[i(k)-i(k-1)]+[j(k)-j(k-1)]$,其中, $i(0)=j(0)=0, i(K)=I, j(K)=J$ 。因此,有

$$\sum_{k=1}^K w(k)=I+J \quad (6)$$

此时,式(2)中分母变成了与路径无关的常数。求 $D(A, B)$ 最小值等价于寻找满足 $g(A, B)=\min_f \{ \sum_{k=1}^K d(c(k))w(k) \}$ 的匹配路径 f 。

易证明,限定范围内的任一匹配点只可能有一条搜索路径通过,通过该点的最佳路径与以后的路径无关。因此,有

$$g(c(k))=d(c(k))w(k)+\min_{c(k-1)} g(c(k-1)) \quad (7)$$

其中, $g(c(k))$ 为进行到 k 步时 $d(c(k))w(k)$ 的累积量,定义合法的 $c(k-1)$ 是为了进一步减少计算量,根据具体签名瞬时速度变化的波动性做出的进一步合理限制。并且,为了满足路径的斜率在 $[0.5, 2.0]$,如果路径已通过了 (m_{i-1}, n_{i-1}) 匹配点,那下一个匹配点 (m_i, n_i) 存在 3 种情况:① $(m_i, n_i)=(m_{i-1}+1, n_{i-1}+2)$; ② $(m_i, n_i)=(m_{i-1}+1, n_{i-1}+1)$; ③ $(m_i, n_i)=(m_{i-1}+2, n_{i-1}+1)$ 。那么,对于这 3 种可能路径采用加权系数修正得

$$g(i, j)=\min \begin{cases} g(i-1, j-2)+2d(i, j-1)+d(i, j) \\ g(i-1, j-1)+2d(i, j) \\ g(i-2, j-1)+2d(i-1, j)+d(i, j) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)即为改进后的 DTW 算法的基本算式。测试特征序列 B 与模板 A 的总体平均距离为

$$D(A, B)=\frac{1}{I+J} g(c(K)) \quad (9)$$

每一个匹配点 $c(K)$ 可以沿几个不同路径匹配得到,因此在寻找最优路径过程中,设置一个匹配距离的最大允许值。匹配距离很差的路径很快会超过这一限制,可以将这条匹配路径提前终止,从而减少了 A 和 B 匹配的计算量。

3 算法验证

通过硬件采集设备实时采集手写签名信号,包含 x 和 y 方向的位置。手写板的空间分辨率为 4096×4096 , 采样间隔 $\Delta t=10\text{ms}$ 。首先去掉笔画之间的间隔,这些间隔反映了签名者在签名时书写笔没有接触到手写板的时间以及起笔和落笔的位置;为了消除签名过程中断笔和连笔的影响,可以通过线性插值生成两相邻点之间的笔画,称之为“虚拟笔画”;同时对签名进行大小、长度等归一化处理^[7],处理后的效果如图 4 所示。

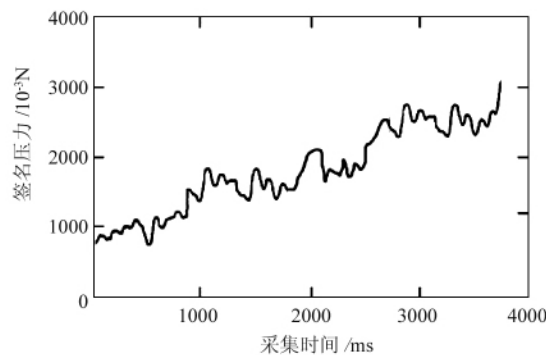


图 4 原始签名及压力曲线

Fig. 4 Original signature and pressure cure

实验过程中考虑签名验证系统两类错误率:① 误拒率 (False Rejection Rate, FRR) 指系统将本人签名误认为非本人签名而拒绝接受的概率;② 误纳率 (False Acceptance Rate, FAR) 指系统将非本人签名错当成本人签名而接受的概率。FRR 和 FAR 是相互矛盾的。对同一系统来说, FRR 下降必然使 FAR 升高,反之亦然,要从 FRR 和 FAR 两方面综合权衡产品性能。在线签名的鉴别要尽量避免 FAR, 在选取匹配距离时,要尽可能使 FAR 为 0。

实验选择 10 个签名者,每人提供 30 个真实签名;为了保证签名风格有所变化,签名分为多次录入,签名者再刻意模仿其他 9 人的签名各 5 个。针对每个签名者,随机抽取 15 个真实签名和 20 个伪签名进行训练,其余的样本用于测试,测试集包含 150 个真实签名和 250 个伪签名,结果如表 1 所示。

表 1 本文算法与其他文献算法的结果比较

Table 1 Comparison of the algorithm efficiency between this paper and others

实验 序号	参考模 板数	原始 DTW 算法		文献[6]算法		本文改进算法	
		FRR/%	执行时间/ms	FRR/%	执行时间/ms	FRR/%	执行时间/ms
1	10	2.5	114	3.2	95	4.1	77
2	50	3.7	479	4.3	311	4.9	235
3	100	3.9	931	5.1	526	5.5	418

4 结论

改进的 DTW 算法比传统的 DTW 算法的平均耗时显著减少,以 100 个模板为例,平均耗时省了 55.1%。但随着模板数的增加,正确识别率会有所下降,这与不同人的书写习惯、签名稳定准确性有关,由于生理原因,签名者签名的压力特征不够稳定。平均识别率在 94% 以上,达到了预期的效果。

本文提出了基于 DTW 算法的最佳匹配路径的动态规划方法,并将其应用于在线签名鉴别系统中,提高了模板匹配效率及签名验证系统运行速率,基本上达到了令人满意的效果。DTW 算法在在线签名识别中是非常适用的,但对于比较繁琐的签名和压力特征不够稳定的签名需要较多的样本,算法还不够完善,尚需进一步改进。如何进一步减少 DTW 算法的运算量的同时提高识别率,仍需继续探讨。

参考文献 (References)

- [1] Nakanishi I, Nishiguchi N, Itoh Y, *et al.* On-line signature verification method utilizing feature extraction based on DWT [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 38(2): 691-712.

- [2] Ma M M, Wijesoma W S, Eric S. An automatic on-line signature verification system based on tree models[C]//2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax, 2000, 2: 890-894.
- [3] Baltzakis H, Papamarkos N. A new signature verification technique based on a two-stage neural network classifier [J]. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2001, 14(1): 95-103.
- [4] Justino E, Yacoubi E A, Bortolozzi F, *et al.* An off-line signature verification system using HMM and graphometric features [DB/OL]. 2000. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.18.2901&rep=rep1&type=pdf>.
- [5] Rabiner L R, Juang B H. Fundamentals of speech recognition [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [6] 李邵梅, 刘力雄, 陈鸿昶. 实时说话人辨识系统中改进的 DTW 算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(4): 218-219.
Li Shaomei, Liu Lixiong, Chen Hongchang. *Computer Engineering*, 2008, 34(4): 218-219.
- [7] 郑建彬, 徐陶祎. 基于 DTW 的在线手写签名验证算法[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 30(2): 212-215.
Zheng Jianbin, Xu Taoyi. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 30(2): 212-215.

(责任编辑 刘志远)

2010全国植物生物学研讨会

时间: 2010年7月18—22日
地点: 天津

主办: 中国植物生理学会
中国遗传学会
中国细胞生物学学会
中国植物学会

网址: <http://www.cscb.org.cn>