

样条小波基的构造及其在汉字签名鉴别中的应用

赵永健¹, 袁胜忠², 王洪润³

(1. 山东大学威海分校信息工程学院, 威海 264209; 2. 山东大学威海分校现代教育技术部, 威海 264209;

3. 鲁东大学物理与电子学院, 烟台 264001)

摘 要: 基于笔画描述的汉字轮廓线, 小波变换能更有效地提取签字的字形特征。该文提出了一种基于小波变换的笔迹鉴别的新方法, 利用 B-样条函数更适合于计算机图形中的曲线与曲面处理的特性, 设计了适合系统特点的四阶样条小波, 对签字的每一笔画进行小波变换, 又设计了一组公式对各笔画的特征进行合成, 从而抽取出了更加稳定有效的签字特征。

关键词: 小波变换; 样条小波; 特征值; 样条函数

Construction of Spline Wavelet Bases and Its Application in Chinese Signature Identification

ZHAO Yong-jian¹, YUAN Sheng-zhong², WANG Hong-run³

(1. Information Engineering Institute, Shandong University(Weihai), Weihai 264209; 2. Department of Modern Education Technology, Shandong University(Weihai), Weihai 264209; 3. Physical and Electronic Institute, Ludong University, Yantai 264001)

【Abstract】 This paper presents a new approach to identify Chinese signatures based on the wavelet transform. The extracted shape eigenvalues are effective and accurate when the signature is decomposed into character strokes. The B-spline function has the significant characteristic of processing curve and surface in computer graphics. A group of 4-spline wavelet bases are proposed by B-spline function and applied in each stroke of the signature. It also designs a set of formulas to synthesize the extracted eigenvalues for each stroke so that the resulting signature eigenvalues are more effective and stable.

【Key words】 wavelet transform; spline wavelet; eigenvalue; spline function

1 概述

身份认证的重要手段之一就是签字鉴别, 特征抽取是整个计算机汉字签字鉴别系统的核心步骤, 它直接决定了鉴别系统的性能。小波变换是目前国际上公认的最新时间-频率分析工具, “自适应性”和“数学显微镜性质”使其在信号处理、信息处理领域中得到日益广泛的应用。目前利用小波变换的签字鉴别方法大都建立在把整个签字当作图像再对整幅图像通过 Mallat 塔式算法进行小波分解与合成的基础上, 所提取的签字特征中总体特征相对较多, 细节特征较少。签字可看作由若干轮廓曲线组成, 每条轮廓线由 B-样条曲线表示, 通过小波变换分解与合成 B-样条曲线, 可以抽取出更精确的签字特征。

本文的汉字签字鉴别系统原理如图 1 所示。

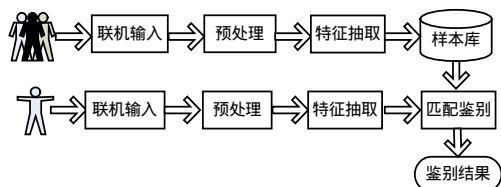


图 1 汉字签字鉴别原理

本方法建立在对签字的每一个笔画进行小波变换的基础上, 先对签字的每一笔画进行小波分解, 然后构造了一组新的特征公式对小波分解后的各笔画的数据信号进行合成, 在分解与合成过程中, 利用 B-样条函数更适用于曲线和曲面处

理的特性设计了适合系统特点的四阶样条小波, 从而抽取了具有旋转、平移及尺度不变性的签字特征。这些特征值既保留了签字的总体特征, 又注意了签字的细节特征, 从而大大提高了鉴别效果。

2 数据源与预处理

要利用计算机进行联机汉字签字鉴别, 首先必须设法把原始签字信号输入计算机。实验中采用清华紫光的 4050u 手写板作为数据采集设备, 该手写板具有 3048lpi 的超高解析度, 512 阶压感, 准确度误差 0.42mm, 通过用 VC 编程读取与手写板连接的 USB 端口, 采样点的时间间隔为 15mm。联机签字时, 笔尖在笔盘上的运动轨迹就被记录下来。对每个采样点记录一个三元组 (x_i, y_i, t_i) , 坐标 x_i, y_i 的值由笔尖在书写板上的位置及书写板的分辨率决定。抬笔状态把笔尖在书写板上的运动轨迹分隔成一个个笔画, 因此, 一个汉字又可用它的笔画集合来表示, 而每一个笔画又可用组成它的点列来表示。不妨设 M 为该汉字的笔画数, 则总体采样结果可表示为: $f_m(t) = x_m(t) + iy_m(t)$, 其中, $m=0, 1, \dots, M-1$ 。

联机输入的原始信号由于书写人书写停顿、笔画不平滑等原因会造成很多误差, 实验中对签字信号起始笔噪音、笔尖运动非平滑噪音等进行了消除^[1,2]。同时, 为了满足文中所述的样条小波变换的基本条件, 对签字笔画进行了线性插值

作者简介: 赵永健(1968 -), 男, 硕士、副教授, 主研方向: 模式识别, 计算机应用; 袁胜忠, 工程师; 王洪润, 副教授

收稿日期: 2006-10-05 **E-mail:** jian123cn@sina.com

和周期性拟合,使每个笔画取值采样的点的个数变成了 512 个,其中,0~489 点表示签字笔画的真实点,490~511 点为使笔画头端与尾端相连的插值点,这样就保持了每一笔画的离散信号在空间的延拓为离散周期为 512 的连续函数,其中, $f(512)=f(0)$ 。则所得的签字信号点是签字位置轨迹的复信号 $f(t)=x(t)+iy(t)$ 。预处理后的离散信号为

$$f_k(l) = x_k(l) + iy_k(l)$$

其中, $l=0,1,\dots,511$; k 表示该签字的笔画数。

3 四阶 B-样条小波的构造与稳定的签字特征抽取

3.1 四阶 B-样条小波的构造^[3~5]

小波变换的基本原理是寻找一组小波正交基系,原始信号可以按此基小波展开,最后再按一定方式合成。因此,基小波的性能优劣是小波变换效果好坏的关键,而结合具体的应用对象考虑最优基小波的选择对小波变换更有意义。B-样条函数存在:递推性,局部正支撑性,线性叠加性和最小支撑等性质,它所构造的曲线或曲面具有光滑、连续、易修改等特点,B-样条函数在几何图形中常用来构造参数曲线或者曲面。实验证明,在多分辨率分析的理论框架下,利用 B-样条函数的性质,由 B-样条函数构造 B-样条小波适用于计算机图形中的曲线或者曲面的多分辨率分析,且 B-样条小波更适用于封闭曲线的处理。

定义 B-样条函数

一阶 B-样条函数 $N_1(x)$ 是单位区间 $[0,1]$ 上的特征函数,而对于 $m \geq 2$, N_m 可用积分卷积递推定义:

$$N_m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} N_{m-1}(x-t)N_1(t)dt = \int_0^1 N_{m-1}(x-t)dt$$

定理 m 阶基数 B-样条 N_m 满足下述性质:

$$(1) N_m(x) = \frac{1}{(m-1)!} \Delta^m x_+^{m-1} = \frac{1}{(m-1)!} \sum_{k=0}^m (-1)^k \binom{m}{k} (x-k)_+^{m-1}$$

其中, $\Delta f(x) = f(x) - f(x-1)$, $x_+ = x(x \geq 0)$, $x_+ = 0(x < 0)$;

(2) $N_m(x)$ 的支撑集为 $[1,m]$, 其支撑中心为 $m/2$, 并且 $N_m(x)$ 关于其支撑中心对称;

(3) $N_m(x) > 0$, 对于 $0 < x < m$;

$$(4) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} N_m(x-k) = 1;$$

$$(5) N_m^1(x) = (\Delta N_{m-1})(x) = N_{m-1}(x) - N_{m-1}(x-1);$$

$$(6) N_m(x) = \frac{x}{m-1} N_{m-1}(x) - \frac{m-x}{m-1} N_{m-1}(x-1);$$

(7) $N_1(x)$ 的 Fourier 变换为

$$\hat{N}_1(\omega) = \frac{1-e^{i\omega}}{i\omega} = e^{\frac{i\omega}{2}} \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]$$

(8) $N_m(x)$ 的 Fourier 变换为

$$\hat{N}_m(\omega) = \left(\frac{1-e^{i\omega}}{i\omega} \right)^m = e^{\frac{im\omega}{2}} \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^m$$

由 B-样条函数的上述性质选取函数 $\phi_l(x) = N_m(x+m/2)$, 其 Fourier 变换为

$$\hat{\phi}_l(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^m$$

令 $e_n(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\omega+2k\pi)^{n+2}}$, 则

$$e_n^1(\omega) = -(n+2) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\omega+2k\pi)^{n+2+1}} = -(n+2)e_{n+1}(\omega)$$

$$\text{即 } e_{n+1}(\omega) = -\frac{1}{n+2} e_n^1(\omega).$$

$$\text{又因为 } e_0(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\omega+2k\pi)^2} = \frac{1}{4\sin^2(\omega/2)}$$

可得

$$\begin{cases} e_{n+1}(\omega) = -\frac{1}{n+2} e_n^1(\omega) \\ e_0(\omega) = \frac{1}{4\sin^2(\omega/2)} \end{cases}$$

则有

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} |\hat{\phi}(\omega+2k\pi)|^2 = 2^{2m} \sin^{2m}\left(\frac{m}{2}\right) e_{2(m-1)}(\omega)$$

从而有

$$\hat{\phi}(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^m \cdot \frac{1}{\sin^m(\omega/2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\omega+2k\pi)^{2m}}}} = \frac{1}{\omega^m} \cdot \frac{1}{\sqrt{e_{2(m-1)}(\omega)}}$$

并且函数 $\phi(x)$ 满足多尺度的定义:

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} |\hat{\phi}(\omega+2k\pi)|^2 = 1$$

由于 $\hat{\phi}(2\omega) = H(\omega)\hat{\phi}(\omega)$, 则

$$H(\omega) = 2^{-m} \sqrt{\frac{e_{2(m-1)}(\omega)}{e_{2(m-1)}(2\omega)}}$$

实验中取 $m=4$, 由此即完成了四阶样条小波的构造。

$H(\omega)$ 的离散付里叶变换即为尺度函数 $\psi(t)$ 的脉冲响应 $\{h_l\}_{l=0,\dots,511}$, 可以给出其 512 个值。

对应小波函数 $\psi(t)$ 的 $\{g_k\}$ 与 $\{h_k\}$ ($k=0,\dots,511$) 的关系是

$$g_k = (-1)^{k-1} h_{512-k}, \quad k=1,\dots,511, \quad g_0 = (-1)h_1$$

因篇幅所限, h_l, g_l ($l=0,\dots,511$) 的值在此略。

3.2 汉字签字笔画的小波表示^[6,7]

汉字签字经预处理后, 签字的每个笔画都是由 512 个离散复信号点表示, 设其共有 M 个笔画, 第 m 个笔画表示为

$$\{f_m(k) = x_m(k) + iy_m(k), \quad k=0,1,\dots,N-1, \quad N=512, \quad m=0,\dots,M-1\}$$

此笔画信号为有限的复信号, 其多尺度分析的多分辨率分解公式为

$$\begin{aligned} A_j^d f_m(n) &= \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} h(l) A_{j+1}^d f_m(k) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} h(l) A_{j+1}^d x_m(k) + i \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} h(l) A_{j+1}^d y_m(k) \\ D_j^d f_m(n) &= \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} g(l) A_{j+1}^d f_m(k) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} g(l) A_{j+1}^d x_m(k) + i \sum_{k=0}^{2^{j+1}N-1} g(l) A_{j+1}^d y_m(k) \end{aligned}$$

其中, $l=[k-2(2n+1)] \bmod (2^{j+1}N)$; $n=0,\dots,2^jN-1$, $j=-1,-2,\dots,-J$, $J>0$; $A_0^d f_m(K) = f_m(K) = x_m(K) + iy_m(K)$, $k=0,\dots,N-1$ 。

当分解到第 j 层时, 其 $A_j^d f_m(k)$ 与 $D_j^d f_m(k)$ 的样本数为 2^jN 个, 其中, $j<0$, $k=0,\dots,2^jN$, 如果把笔画信号共分解 J ($J>0$) 层, 则此笔画的小波表示为

$$\begin{aligned} &\{A_{-j}^d f_m(k), \quad k=0,\dots,2^{-j}N\} \\ &\{D_j^d f_m(k), \quad j=-J,-J+1,\dots,-2,-1, \quad k=0,\dots,2^jN\} \end{aligned}$$

本文的签字鉴别取 $J=5$ 。

3.3 签字鉴别的旋转、平移及尺度不变性特征的抽取^[8,9]

由离散复信号小波变换的性质可知: $A_j^d f(k)$ 与 $D_j^d f(k)$ 保持信号的旋转及尺度同变性; $A_j^d f(k)$ 保持信号的平移同变性; $D_j^d f(k)$ 保持信号的平移不变性。

根据上述性质, 可以构造签字笔画的具有旋转、平移及其尺度不变性的特征公式。签字的每个笔画的小波表示为

$$\begin{aligned} &\{A_{-j}^d f_m(k) \quad k=0,\dots,2^{-j}N\} \\ &\{D_j^d f_m(k), \quad j=-J,-J+1,\dots,-2,-1, \quad k=0,\dots,2^jN\} \quad m=0,1,\dots,M-1 \end{aligned}$$

其中, $N=512$ 。

$A_{-j}^d f_m(k)$ 与 $D_j^d f_m(k)$ ($j=-J,\dots,-1$) 分别表示如下:

$$A_{-j}^d f_m(k) = A_{-j}^d x_m(k) + i A_{-j}^d y_m(k), k=0, \dots, 2^j-1, m=0, \dots, M-1$$

$$D_j^d f_m(k) = D_j^d x_m(k) + i D_j^d y_m(k), j=-J, \dots, -1, k=0, \dots, 2^j-1, m=0, \dots, M-1$$

对于 $A_{-j}^d f_m(k)$ 与 $D_j^d f_m(k)$, 令

$$A_{-j}^d \overline{x_m} = \frac{1}{2^{-j}N} \sum_{k=0}^{2^j-1} A_{-j}^d x_m(k)$$

$$A_{-j}^d \overline{y_m} = \frac{1}{2^{-j}N} \sum_{k=0}^{2^j-1} A_{-j}^d y_m(k)$$

$$D_j^d \overline{x_m} = \frac{1}{2^{-j}N} \sum_{k=0}^{2^j-1} D_j^d x_m(k)$$

$$D_j^d \overline{y_m} = \frac{1}{2^{-j}N} \sum_{k=0}^{2^j-1} D_j^d y_m(k)$$

对于 $FA_{-j}^d f_m$ 与 $FD_j^d f_m$, 令

$$FA_{-j}^d f_m =$$

$$\sqrt{\sum_{k=0}^{2^j-1} ((A_{-j}^d x_m(k) - A_{-j}^d \overline{x_m})^2 + (A_{-j}^d y_m(k) - A_{-j}^d \overline{y_m})^2)}$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sqrt{\sum_{k=1}^{2^j-1} ((A_{-j}^d x_m(k) - A_{-j}^d \overline{x_m}(k-1))^2 + (A_{-j}^d y_m(k) - A_{-j}^d \overline{y_m}(k-1))^2)}$$

$$FD_j^d f_m =$$

$$\sqrt{\sum_{k=0}^{2^j-1} ((D_j^d x_m(k) - D_j^d \overline{x_m})^2 + (D_j^d y_m(k) - D_j^d \overline{y_m})^2)}$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sqrt{\sum_{k=1}^{2^j-1} ((D_j^d x_m(k) - D_j^d \overline{x_m}(k-1))^2 + (D_j^d y_m(k) - D_j^d \overline{y_m}(k-1))^2)}$$

其中, $j=-J, -J+1, \dots, -1$; $m=0, \dots, M-1$ 。

显然, 上述公式具有旋转、平移及尺度不变性、那么, 对于该签字的第 m 个笔画其特征为 $\{FA_{-j}^d f_m, FD_j^d f_m, j=-J, -J+1, \dots, -2, -1\}$, 共有 $J+1$ 个不同层次的特征。本文取 $J=5$, 并经过试验 $\{FA_{-5}^d f_m, FD_{-5}^d f_m, j=-5, -4, -3\}$ 具有良好的稳定性。选取 $\{FA_{-5}^d f_m, FD_{-5}^d f_m, j=-5, -4, -3\}$ 作为该签字的第 m 个笔画的签字特征, 则该签字的特征为

$$\{FA_{-5}^d f_m, FD_{-5}^d f_m, j=-5, -4, -3, m=0, 1, \dots, M-1\}$$

实验中对“赵”字签字及模仿签字实验。主人与另外 2 个模仿人各签 20 个“赵”字。对每个“赵”字, 用上述方法对签字进行分解与合成从而抽取出了稳定的签字特征。

4 分类器设计与签字鉴别

获得特征向量后, 签字鉴别的问题就是一个典型的模式匹配问题。本算法在理论上可以使用任何一种分类器。为简单起见, 采用了加权欧氏距离分类器: 把未知签字的特征向量同已经训练好的已知样本的签字进行比较, 当且仅当它的特征向量与第 k 类样本的加权欧氏距离 WED 最小时, 输入签字被分类为第 k 类签字。加权欧氏距离按式(1)计算:

$$WED(k) = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f_i^{(k)})^2}{(\delta_i^{(k)})^2} \quad (1)$$

其中, f_i 表示未知样本的第 i 个特征; $f_i^{(k)}, \delta_i^{(k)}$ 分别表示第 k

类样本的第 i 个特征特征的均值和方差; N 表示每个样本所提取的特征总数。

5 实验和结果

实验中采用 10 个人的中文笔迹进行了测试, 每个人通过联机手写板各签名 10 次, 模仿其他人的签名各一次(介于随机伪签名与训练伪签名之间), 对预处理后的签名信息按本文所述方法进行特征抽取, 从而求得每个人的签名样本库(类模板)和模仿签名特征向量, 最后利用式(1)进行距离匹配。

表 1 汉字鉴别实验结果对照表

特征抽取方法	平均识别率/%	最优识别率/%
基于笔画特征和 样条小波的算法	91.8	93.0
基于整个汉字的 Mallat 塔式算法	87.7	88.8

由于本文所述的特征抽取方法是建立在对签字的每一个笔画进行小波变换的基础上, 且在小波变换过程中利用 B-样条函数的优良性质设计了更加适合系统特点的四阶样条小波, 因此抽取的签字特征在保留了签字总体特征的同时, 更加涵盖了签字的细节特征, 其识别率明显高于现有的对整个签字进行小波变换的鉴别方法。

参考文献

- 戴汝为, 郝卫红, 肖旭红. 汉字识别的系统与集成[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1998-04.
- Plamondon R, Lorret G. Automatic Signature Verification and Writer Identification——The State of the Art[J]. Pattern Recognition, 2005, 22(2).
- Meyer F G, Averbuch A Z. Fast Adaptive Wavelet Packet Image Compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 5(9).
- Srihari S N, Cha S H, Arora H, et al. Handwriting Identification: Research to Study Validity of Individuality of Handwriting & Develop Computer-assisted Procedures for Comparing Handwriting [R]. University at Buffalo, 2001.
- Mallat S. A Theory for Multi-resolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11(7).
- Rinaldo R, Calvagno G. Hibird Vector Quantization for Multi-resolution Image[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(5).
- Meyer F G, Averbuch A Z. Fast Adaptive Wavelet Packet Image Compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5).
- Yoon W K, Devaney M J. Power Measurement Using the Wavelet Transform[J]. IEEE Trans. on Instrument and Measurement, 2000, 49(2).
- Said H E S, Baker K D, Tan T N. Personal Identification Based on Handwriting[C]//Proc. of the 14th Int'l Conf. on Pattern Recognition. 2004.

(上接第 198 页)

- Peng Yun, Zou Youyong, Luan Xiaocheng. Semantic Resolution for E-commerce[C]//Proceedings of the 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2002.
- Cardelli I, Gordon A D. Mobile Ambients[C]//Proc. of Conf. on Foundations of Software Science and Computational Structures. 1998.

- Content Networking and Edge Services: Leveraging the Internet for Profit[Z]. (2001). <http://www.iipl.fudan.edu.cn/research/Knowledge-Science/Knowledge-Science.htm>.
- Andrade N, Costa L, Germoglio G, et al. Peer-to-peer Grid Computing with the OurGrid Community[C]//Proceedings of the 23th Brazilian Symposium on Computer Networks. 2005.