

稀疏二值图像特征提取的数据场方法

吴涛¹ 陈一祥² 杨俊杰¹

(湛江师范学院信息学院 湛江 524048)¹ (武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430079)²

摘要 针对图像特征自动提取问题,以稀疏二值图像为例提出了一种模拟物理学场论机制的数据场方法。该方法首先建立二值图像数据场实现图像特征空间到数据场势值空间的映射关系,搜索每个非零像素的八连通区域;然后计算势值及其主方向角,生成势值矩阵和方向角矩阵;最后通过势值归一化和主方向归一化输出以势值和主方向为基础的特征向量及其对应的可视化曲线。新方法利用数据场解决图像特征提取问题,能兼顾图像灰度空间的局部性和数据场势值空间的全局性。手写数字图像的定性和定量实验表明,该方法特征提取效果较好、性能稳定,具有合理性和有效性。

关键词 数据场,认知物理学,图像特征,二值图像

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.065

Data Field-based Feature Extraction Method for Sparse Binary Image

WU Tao¹ CHEN Yi-xiang² YANG Jun-jie¹

(School of Information Science and Technology, Zhanjiang Normal University, Zhanjiang 524048, China)¹

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)²

Abstract In order to extract the image feature automatically, a novel data field-based method for sparse binary image was proposed from the point of view of the physics-like field theory. First, the method constructs a map from grayscale space to potential space by producing the data field for a given binary image. Next, it calculates the potential value and the principal direction for each pixel with non-zero value by scanning its 8-connected regions, and then obtains the potential matrix and the direction angle matrix. Finally, it generates the feature vectors and its corresponding visual curve after the normalization of potential value and principal direction. The proposed method solves the issue on image feature extraction using data field, and it can keep a balance between the locality of image grayscale space and the globality of potential space in data field. The quantitative and qualitative experiments with the handwritten digital images indicate that the proposed method yields accurate and robust feature extraction results, and is reasonable and effective.

Keywords Data field, Cognitive physics, Image feature, Binary image

1 引言

图像目标模式识别是计算机视觉领域的重要研究方向之一,其中特征提取是首要关键环节,一直以来都受到广大研究者的广泛关注,在安全监控、军事侦察、摄影测量、灾害监测、气象预报、产品检验、人机交互和医学诊断等方面也已经得到成功应用^[1-3]。特征是表征图像目标本质属性的信息集,是解决图像目标识别等问题的根本。特征提取的目标是获取一组少而精的特征量,独立、完备地反映图像内容。

迄今为止,国内外研究者对图像特征提取问题展开了系列研究,与之相关的新算法、新技术层出不穷。其中一类方法采用模拟物理学的机制研究图像特征问题。如 Nixon 提出了模拟万有引力的力场收敛变换法并将它应用到人耳识别研究中^[4], Liu 将其改进为多视角变换^[5],徐贵力等人利用该理论检测图像粗大边缘^[6];孙根云等人提出了模拟万有引力定律

的边缘检测方法^[7], Lopez 利用三角模对其进行了扩展^[8]; Direkoglu 提出了模拟热流的温度界面方法并进行形状提取^[9]; Cummings 等人提出了基于光流变换的结构特征检测方法^[10]。近年来出现了一类更新颖的方法,陈雪松等人将图像分析中的投影理论与物理学中的势能理论相结合,提出了基于图像势能的二值图像特征提取方法^[11],并进一步研究了图像目标轮廓特征提取方法^[12],蒋少华等人在此基础上研究了针对二值图像的灰度势特征提取方法^[13],理论和实验分析表明了现有方法的可行性和有效性。尽管如此,模拟物理学机制仍然没有引起计算机视觉领域的足够重视,至少在计算机视觉中的研究取得的成果和关注远远不如智能优化等其他领域那样丰硕和广泛^[4]。因此,模拟物理学机制的图像特征提取仍然是一个开放式课题,尚存在可拓展空间。

本文认为,各种物理模型和机制的根源都是物质之间的相互作用,统一场论是现代物理学的重要方向之一,其根据场

到稿日期:2013-12-05 返修日期:2014-03-23 本文受广东省自然科学基金(S2013040014926, S2012010009759),广东高校优秀青年创新人才培养计划(2012LYM_0092),湛江师范学院科学研究项目博士专项(ZL1301),国家 973 重点基础研究发展计划(2012CB719903)等资助。

吴涛(1980-),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究方向为智能图像处理, E-mail: taowu0706@gmail.com; 陈一祥(1984-),男,博士生,主要研究方向为智能空间信息处理; 杨俊杰(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为智能信息优化。

(或场的量子)的传递媒介性,用场统一地描述和揭示各种相互作用的共同本质和内在联系,在物理学对于客观世界的认知中起到了重要的作用。中国学者李德毅等人将现代物理学中对客观世界的认知理论引申到对主观世界的认知中,形成了数据场的思想^[14],通过考察数据对象间的相互作用并建立场描述原始、混乱、复杂、不成形的数据关联,来揭示不同抽象程度或概念层次上的知识,其理论体系相对完备,并广泛应用于数据挖掘与知识发现、空间信息处理、图像分析与处理、智能优化、物流管理等领域^[15-18]。

有鉴于此,本文抛开固有的物理形态,从场论的角度出发建立更一般的映射关系及其理论框架,进一步提出鲁棒、高效的二值图像特征提取方法,并根据二值图像建立了图像数据场;在此基础上,给出了基于二值图像数据场的特征提取方法(Binary image Data field-based Feature extraction method, BDF)。

2 二值图像数据场

设 $P = \{p = \langle x, y \rangle | x = 1, 2, \dots, w; y = 1, 2, \dots, h\}$ 为给定的二维像素空间, $f: P \rightarrow \{0, 1\}$ 是映射,二值图像可以表示为元组 $I = \langle P, f \rangle$,其中 h, w 分别为该图像的高、宽。二值图像在多数情况下是极端稀疏的。以图 1 中手写数字 5 的二值图像说明其中的稀疏性。

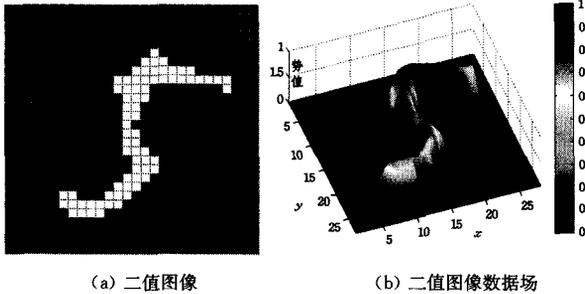


图 1 示例二值图像及其数据场

假设用一个尺寸 28×28 的二维矩阵存储图 1(a) 的图像,每个像素点可取 0 或 1,其中 0 表示暗背景,1 表示亮目标。显然,该矩阵仅包含 72 个非零值,约占图像全部像素的 9.2%,也就是零值约占总体的 90% 以上,这在形式上无疑是稀疏的。若有效表征非零值信息、发现图像内容,将有利于消除零值信息在大存储量和高速处理性能方面的不利影响。

为此,本文模拟物理学中引力场的概念,假设二维图像空间 P 上的任意像素 p 都是具有一定质量的质点,由映射 f 确定的像素亮度 $f(p)$ 是其重要特征,于是空间 P 上所有非零像素的相互作用就确定了一个二值图像数据场。

给定图像空间 P 中的数据对象 q ,如果 $f(q) = 1$,那么对象 q 在像素 p 产生的势值为:

$$\varphi_q(p) = m^q e^{-(\max(|x_p - x_q|, |y_p - y_q|) / \sigma)^2} \quad (1)$$

其中, $\sigma > 0$ 控制对象间的相互作用力程,即影响因子; $m^q = 1$ 表示场源强度,即数据对象的质量。

根据高斯函数的 3Sigma 规则,式(1)中所涉及到的影响半径约为 $3\sigma/\sqrt{2}$ 。因此,考虑到二值图像的稀疏性,同时为全面考察非零像素之间的影响,可在式(1)中设置 $\sigma = \sqrt{2} \max(h, w) / 6$ 。

更进一步,根据场的叠加原理,整个图像空间 P 中任意

一个像素 p 的势值为:

$$\varphi(p) = \sum_{q \in P, f(q)=1} m^q e^{-(\max(|x_p - x_q|, |y_p - y_q|) / \sigma)^2} \quad (2)$$

以图 1(a) 所示的手写数字 5 为例,所生成的二值图像数据场如图 1(b) 所示,总体上,二值图像数据场势值能够反映出该手写数字 5 的基本形态和主要特点。为便于不同特征比较,势值进行了归一化,具体技术细节在下文详述。

3 所提出的方法

3.1 关键技术

(1) 计算像素的势值

式(2)提供了二值图像数据场中任意非零像素对应的势值计算方法。与此对应,一种最直接、最常见的实现方式是根据作用像素的影响范围,以模板的形式进行图像像素势值的计算,但是,以整个图像尺寸大小的模板操作计算量非常大。考虑到二值图像的稀疏性,对于图像空间 P 上某个像素 p 的势值计算,可以沿着八连通区域寻找非零像素 q ,并根据式(1)计算当前像素 q 对 p 的作用势值,经过场叠加获得 p 在二值图像数据场中的实际势值。

具体地,以待处理像素 p 为中心,令作用像素 q 坐标初始值为 $x_q = x_p, y_q = y_p$,在像素 p 的上($x_q, y_q - 1$)、下($x_q, y_q + 1$)、左($x_q - 1, y_q$)、右($x_q + 1, y_q$)、左上($x_q - 1, y_q - 1$)、左下($x_q - 1, y_q + 1$)、右上($x_q + 1, y_q - 1$)、右下($x_q + 1, y_q + 1$)共 8 个方向上依次展开,搜索非零像素 q ,并根据式(1)计算 $\varphi_q(p)$,一旦到达图像的边界或遇到 $f(q) = 0$ 的像素时搜索停止,此时所有 q 对 p 的作用总和 $\sum \varphi_q(p)$ 即为像素 p 的势值。

从图 1(a) 中截取以 (8, 16) 为中心像素的子图,如图 2 所示,按照上述方法在 8 个方向上搜索,每个方向上遇到零值像素停止,当所有方向迭代停止后计算出该像素在场中被作用的实际势值约为 12.5。

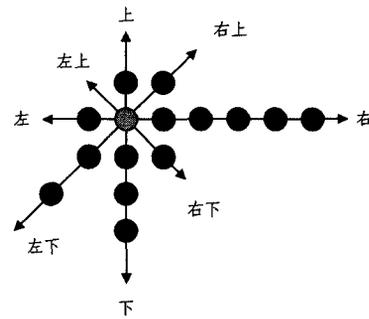


图 2 势值计算

类似地,按照上述方法,依次计算所有像素 $p(x_p, y_p)$ 为中心的势值,构成关于图像像素势值的稀疏矩阵 PM 。

(2) 确定像素的主方向

在计算势值的过程中,分别保存最终搜索停止时在 8 个方向上的像素 q 相对当前待处理像素 p 的最大位移(即最大位置改变量,可以为负数),其中右、右上、上、左上、左、左下、下、右下等方向的位移依次记作 $s_0, s_{45}, s_{90}, s_{135}, s_{180}, s_{225}, s_{270}, s_{315}$ 。首先在 $s_0, s_{90}, s_{180}, s_{270}$ 的基础上分别计算最大水平位移和垂直位移 s_h, s_v ,然后判断 $\sqrt{s_h^2 + s_v^2}$ 与 $s_{45}, s_{135}, s_{225}, s_{315}$ 的位移量大小,最后将位移量最大时所对应的方向作为像素 p 的主方向角,也就是任意像素 p 在二值图像数据场中的被作用

主方向,可能为 $\{\arctan(s_v/s_h), 45, 135, 225, 315\}$ 。例如,图 2 中的像素,最大水平和垂直位移分别在右方和下方取得,其原始主方向角就位于 $[225\ 315]$ 之间。

按照上述方法,依次计算所有非零像素 $p(x_p, y_p)$ 的被作用主方向,构成关于图像像素方向角的稀疏矩阵 OM 。

(3) 势值归一化

显然,实际势值不利于一致性地反映图像内容。为此,统计势值矩阵 PM 中的最大值 PM_{max} 和最小值 PM_{min} ,将 PM 矩阵中的所有像素势值 $PM(p)$ 按式(3)归一化到 $[0, 1]$ 区间。

$$PM(p) = (PM(p) - PM_{min}) / (PM_{max} - PM_{min}) \quad (3)$$

(4) 主方向归一化

计算出势值矩阵 PM 中最大值 PM_{max} 所对应的主方向角 θ_m ,将方向角矩阵 OM 中的主方向角均沿着该方向角逆时针旋转,并按式(4)归一化到 $[0, 360]$ 区间。

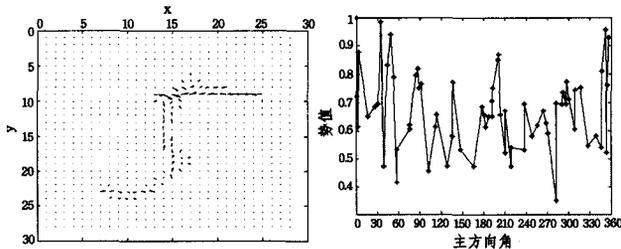
$$OM(p) = \begin{cases} OM(p) - \theta_m, & \text{if } OM(p) - \theta_m \geq 0 \\ OM(p) - \theta_m + 360, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

以图 1(a)所示二值图像为例,建立了相应的二值图像数据场,用射线段的方向和长短分别表示二值图像数据场中像素被作用的主方向和势值大小,绘制了如图 3(a)所示的主方向示意图,所反映的总体特征与图 1(b)基本相似,区别仅在于所展示的维数不同。

(5) 特征向量与特征曲线

由像素 p 的归一化势值 $PM(p)$ 、主方向角 $OM(p)$ 所构成的二元组 $\langle PM(p), OM(p) \rangle$ 就可以作为唯一度量该像素处的特征量,对于整个图像而言,所有非零像素处的势值和主方向角 $[PM\ OM]$ 就可以独立、完备地刻画二值图像的内容。因此,将所有非零像素的特征量按照主方向角排序,所形成的二维矢量最终就可视作表征该二值图像的特征向量。

在此基础上,根据各非零像素的势值和主方向角可以绘制该二值图像的联合特征曲线,如图 3(b)所示,横纵坐标分别表示主方向角和势值,下文其他特征曲线与此类似,不再一一标注。这种特征曲线既能够通过数据场的方法顾及非零像素及其局部特征的影响,也以更易于比较的方式实现了图像内容的全局表达,将二维矩阵形式的图像亮度信息转换为可比较的势值-主方向角曲线,能够在一定程度上保持图像某些方面的不变性,下文实验将进一步展开验证。



(a) 二值图像数据场的主方向

(b) 联合特征曲线

图 3 二值图像数据场及其特征

3.2 算法描述

综上所述,文中所提出的算法描述如下:

输入:待处理二值图像

输出:图像特征

算法步骤:

Step1 读取二值图像;

Step2 扫描图像,对每个非零像素,搜索其 8 个方向的连通区域,计

算势值,同时确定主方向,生成势值矩阵 PM 和方向角矩阵 OM ;

Step3 统计势值最大值 PM_{max} 和 PM_{min} ,按式(3)将非零像素势值归一化;

Step4 计势值最大值对应的主方向 θ_m ,按式(4)将非零像素的主方向旋转归一化;

Step5 特征向量 $[PM\ OM]$ 输出,对应的特征曲线可视化。

3.3 时间复杂度分析

在上述算法中,Step1 整体扫描一次图像,是所有方法都必需的时间开销。Step3、Step4 和 Step5 均相当于扫描一次图像中的非零像素,假设二值图像中非零像素为 N_n 个,上述步骤的时间复杂度均约 $O(N_n)$ 。Step2 扫描非零像素及其邻域,在最坏情况下,任意非零像素在其邻域的 8 个方向上均存在相连通的其他非零像素,该步骤时间复杂度为 $O(N_n^2)$ 。事实上,这种最坏情况几乎不会发生。一般情况下,Step2 的时间复杂度近似为 $O(N_n N_a)$,其中 N_a 表示任意非零像素的连通相邻区域像素个数,通常远小于 N_n 。总体上,除去同类算法都必需的时间耗费,所提出的算法时间复杂度近似为 $O(N_n)$,与图像中非零像素的个数近似呈线性关系,理论上说明了算法具备有效性。

3.4 讨论

与本文相关的方法包括基于图像势能的二值图像特征提取方法^[11]以及灰度势方法^[13](Gray Scale Potential, GSP)。本文方法与这些方法的关系如下:

(1)位于不同空间位置的非零像素扩展关联性显然是不一致的,相对位置越远,相互关联也越小。文献[11,13]的现有方法采用投影的方式能够考察非零像素值之间的相互关联,但是不具体、不全面,未能充分顾及到像素空间位置所带来的影响,忽略了二值图像邻域空间的变化过程及其扩展,这也是导致现有方法对噪声图像处理能力较弱的主要原因。本文所提出的 BDfF 方法建立图像数据场,适合表达上述空间扩展关联性,通过势值将二值图像的邻域特征细化,可以预见其抗噪性能将进一步增强。

(2)文献[13]是针对文献[11]所提出方法的进一步研究,改进的方法增强了算法的鲁棒性和可操作性,但是仍然需要人为选择两个全局参考点,而且相关参数的设置也存在困难。本文所提出的 BDfF 方法利用图像数据场实现类似参考点的功能,一方面,在计算特定像素的势值时,搜索邻域内连通的非零像素,充分考虑图像特征的局部性;另一方面,根据二值图像各非零像素势值之间的等势特性,全面把握图像特征的整体性。当然,按主方向的旋转也是出于这方面的考虑。

需要指出的是,文献[13]的 GSP 方法是对文献[11]的改进,两者属递进关系,因此,下文实验仅与前者进行比较分析。

4 实验及其分析

4.1 实验设置

为了验证文中方法的可行性和有效性,本文采用 Matlab 编程实现了所提出的算法,也实现了同类型的 GSP 方法。所采用的实验图像主要来源于 MNIST Handwritten Digits 字符库^[19],是美国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 手写数字字符库的一个子集,该字符库含有 0-9 的训练数据集和 0-9 测试数据集两种图像,训练库有 60000 幅手写数字图像,测试库有 10000 幅,分别由 500 个志愿者独

立书写。所有图像已经利用 Matlab 自带的 $im2bw()$ 函数进行过二值化预处理,原始图像尺寸 $h=w=28$ 。

除了采用可视化的特征曲线进行定性直观比较,实验在考察单个二值图像特征时,也引入了特征曲线的定量测度指标,包括特征曲线的长度 L 、特征曲线与坐标轴围成的面积 S 。在考察两个二值图像特征的相似性和相异性时,采用了特征向量的相关性 C 作为距离测度,其计算直接采用 Matlab 自带的 $corr()$ 函数实现。在考察二值图像特征不变性时,还引入了特征曲线长度的变化率 ΔL 和特征曲线与坐标轴所围成面积的变化率 ΔS ,当二值图像本身发生变化时,变化率越小,表明特征度量的不变性越好。

4.2 实验结果

实验 1 为了测试所提出的特征提取方法在可区分性方面的能力,随机选择了不同风格的不同手写数字图像进行实验,分别记作图像 0-9。手写 0-9 的实验图像及采用本文提出的 BDfF 方法生成的特征曲线如图 4 所示,限于篇幅,仅记录了 GSP 方法相关的定量结果,但未列出 GSP 方法生成的特征曲线图,下文其他实验也因同样的原因采用了类似的处理。直观上看,对于不同的手写数字图像,其特征曲线也各不相同。换句话说,这些特征曲线能够有区分度地测量二值的手写数字图像及其内容,较完备地反映相应二值图像的本质特征,是特征提取与模式识别的一种备选方案,可以作为传统方法的有效补充。

为了定量地刻画不同方法对不同手写数字的区分度,计算了不同数字特征向量的相关性,分别将 0-9 的特征两两之间的相关性罗列在表 1 中,其中左下角对应于所提出的 BDfF 方法,右上角为 GSP 方法。理论上说,相关性越小,表明类间可分性越好,特征区分度越明显。

例如,0 所对应的第一列,表示所提出的 BDfF 方法提取 0 特征与 1-9 特征的相关性,其中最后一行是 BDfF 方法的 0 特征与其他数字的平均绝对相关性;0 所对应的第一行,表示 GSP 方法提取 0 特征与 1-9 特征的相关性,其中最后一列是 GSP 方法的 0 特征与其他数字的平均绝对相关性。从表 1 可以看出,所提出的 BDfF 方法在大多数情况下取得了比 GSP 方法更小的相关值,也就是说,BDfF 方法所提取的特征具有更好的可区分度。更进一步,两种方法提取的所有数字特征之间的平均绝对相关性用下划线标出,BDfF 方法的平均绝对相关性更小,因此,BDfF 方法提取的数字特征在类间可比性方面优于 GSP 方法。

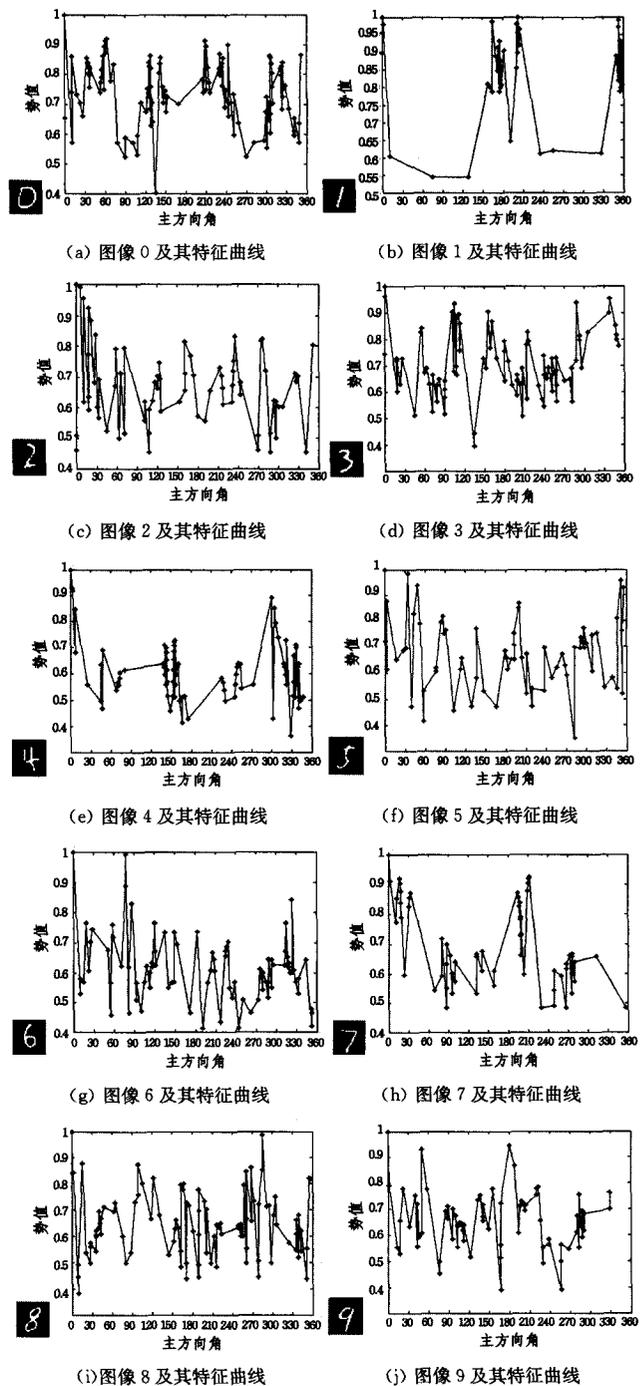


图 4 不同数字的定性比较

表 1 不同数字的相关性 C 比较

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	GSP 方法
0	/	0.1598	0.1867	0.2167	0.0719	0.1337	0.1491	0.1538	-0.0266	0.0877	0.1318
1	-0.0004	/	0.2412	0.2389	-0.0023	0.2961	0.0013	0.2805	0.1407	0.0139	0.1519
2	0.4049	0.0329	/	0.2769	0.1237	0.3833	-0.0052	0.2184	0.2329	0.0553	0.1836
3	0.3416	-0.0052	0.3779	/	0.0596	0.3329	0.2918	0.3321	0.1583	0.0135	0.1980
4	0.0282	0.0036	-0.0367	0.0726	/	0.0321	0.1394	0.0468	0.0345	0.0324	0.0570
5	0.0113	0.0213	0.0301	-0.0261	-0.0996	/	0.1445	0.1771	0.1951	0.0332	0.1375
6	0.1451	-0.0464	0.1671	0.2218	0.0305	-0.0667	/	0.0259	0.0451	0.1247	0.0652
7	-0.0168	0.0108	0.0680	-0.0187	-0.0233	0.1373	0.0217	/	0.0548	-0.0004	0.0276
8	-0.0705	0.0130	-0.0035	-0.0048	0.1094	0.1055	-0.1184	-0.0561	/	0.0317	0.0317
9	-0.0359	0.0565	0.0603	0.1669	-0.0214	0.0667	0.1545	0.0871	0.0847	/	<u>0.1094</u>
BDfF 方法	0.1172	0.0237	0.1062	0.0851	0.0568	0.0941	0.0982	0.0716	0.0847	<u>0.0819</u>	

为了定量比较所提出的方法及与之相关的 GSP 方法,计

算了特征曲线长度 L 和面积 S ,定量的结果如表 2 所列,这些

数据从某种程度上刻画了特征曲线的基本形状,将作为后续验证不变性的基础资料。

表 2 不同数字的定量比较

图像	L		S	
	BDf 方法	GSP 方法	BDf 方法	GSP 方法
0	355.1	384.5	248.9	1872.7
1	360.1	396.3	239.7	671.7
2	354.3	374.3	229.4	1517.9
3	354.8	385.1	250.7	1180.9
4	349.8	391.3	206.9	1048.6
5	358.9	384.2	227.7	1299.9
6	353.4	373.9	214.6	1349.9
7	358.8	334.3	233.4	1236.0
8	361.6	467.0	232.5	1319.6
9	330.7	389.2	217.7	1128.5

实验 2 为了测试所提出的特征提取方法在相似性方面的能力,随机选择了手写数字 5 的 6 种不同风格图像进行实验,分别记作图像 51-56。原始图像及 BDf 方法提取的对应特征如图 5 所示。虽然数字 5 的手写风格各异,所提取出的特征也不尽相同,但是各特征曲线仍然反映了总体基本一致的规律性。对比图 4 和图 5 可以看出,相比图 4 中其他数字的特征曲线,图 5 中的各个特征曲线与图 4(f)中数字 5 的特征曲线在总体趋势上具有更大的相似度。

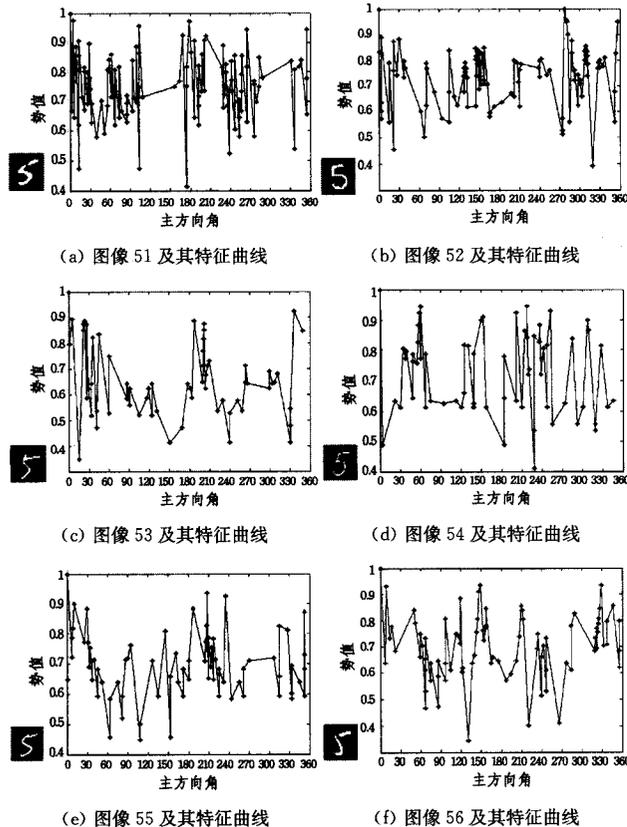


图 5 同一数字不同风格的定性比较

为了定量地评价前述特征曲线的效果,计算了特征曲线长度 L 和面积 S ,并与实验 1 中的手写数字图像 5 进行比较,统计其长度变化率 ΔL 、面积变化率 ΔS ,也用 GSP 方法进行同样的实验,相关结果均列在表 3 中。长度变化率 ΔL 和面积变化率 ΔS 越小,表明不同手写风格的数字 5 特征之间的差异度越低。

表 3 同一数字不同风格的定量比较

图像	$\Delta L(\%)$		$\Delta S(\%)$	
	BDf	GSP	BDf	GSP
51	0.622	5.058	18.139	0.810
52	0.353	2.961	10.364	17.362
53	2.420	0.171	4.741	11.146
54	3.114	6.365	4.473	16.665
55	1.249	3.324	7.101	6.773
56	0.334	8.249	6.621	3.086
平均变化率	1.349	4.355	8.573	9.307

从表 3 可以看出,相比图 4(f)中的手写风格,提出的 BDf 方法基本上对大多数其他不同风格的数字 5 图像都取得了较低的 ΔL 和 ΔS ,表明即使风格各异,BDf 方法仍然稳健地提取了数字 5 的整体特征。总体来说,BDf 方法生成的特征曲线在平均长度变化率和平均面积变化率方面均较小,这也从一定程度上说明,该方法提取特征类内相似性较大。

实验 3 为了测试所提出的方法在各种不变性方面的特征保持能力,将二值图像中的数字 5 进行了水平平移、垂直平移、镂空、旋转 90 度等,分别记作图像 H5、V5、B5、R5 等。二值图像及其特征曲线如图 6 所示。

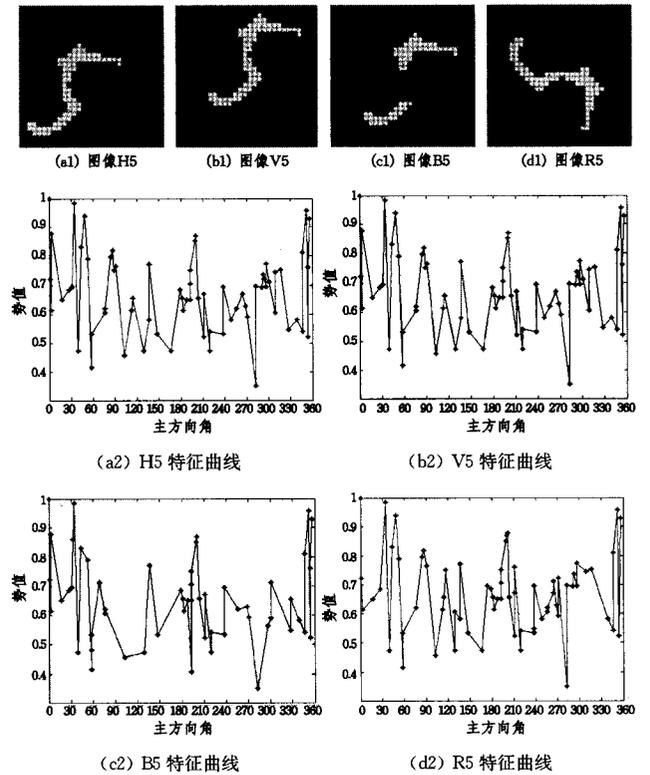


图 6 同一数字变形的定性比较

对比图 4 和图 6 可以看出,图 6 中的特征曲线与图 4(f)几乎完全一致,特别是图 6(a2)、(b2)、(d2),肉眼很难找出其差异性,这就表明提出的 BDf 方法对平移、旋转具有较好的特征不变性。虽然从图 6(c2)中可以发现与图 4(f)的差异之处,但是差异非常微弱,特征曲线的总体趋势保持良好。

为了进一步定量地比较同一手写数字经变形后的实验结果,也统计了与图 4(f)原始图像之间的特征曲线长度变化率 ΔL 和面积变化率 ΔS ,计算了相关性 C ,如表 4 所列。总体来说,表 4 与图 6 反映出了相同的结果。提出的 BDf 方法同时取得了较小的 ΔL 和 ΔS ,以及较大的 C ,这表明相比 GSP 方

法,文中所提取的特征曲线变化量更小,对特征不变性的保持更好,对二值图像变形的容忍度更大。

表4 同一数字变形的定量比较

图像	$\Delta L(\%)$		$\Delta S(\%)$		C	
	BDfF	GSP	BDfF	GSP	BDfF	GSP
H5	0.005	-0.006	0.013	-0.001	1.0000	1.0000
V5	0.005	-0.006	0.013	-0.001	1.0000	1.0000
B5	-0.074	-16.442	-3.461	7.150	0.7929	0.1887
R5	-0.054	-2.967	1.852	-5.335	0.9072	-0.1125

实验4 为了测试所提出的方法在抗噪声方面的能力,对图4(f)中的二值图像数字5有针对性地加入了3种不同形式的噪声,分别记作图像N51-N53。其中N51中的噪声同时靠近目标的质心和边缘,N52中的噪声远离目标的质心但靠近目标的边缘,N53中的噪声同时远离目标的质心和边缘。含噪图像及其特征曲线如图7所示。

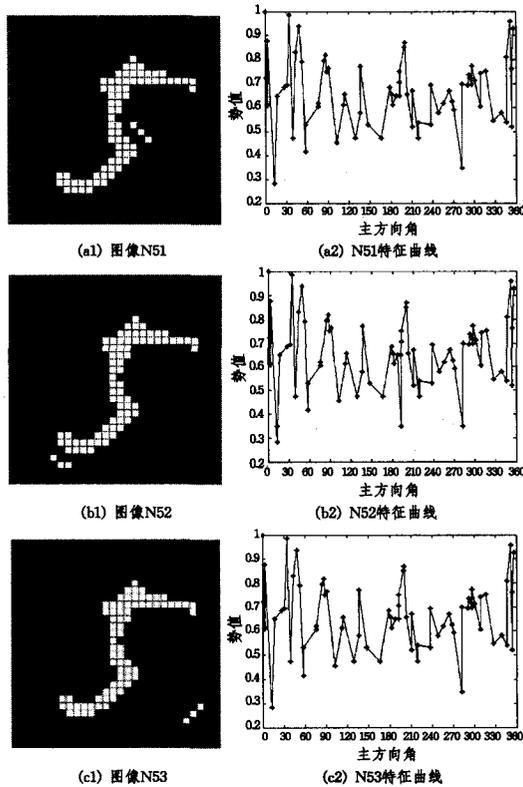


图7 同一数字抗噪性比较

注意到图7中的噪声像素个数约为3-4个,占非零像素的5%,有效信号与噪声的比例为19:1,也就是信噪比并不高,噪声比率并不低。尽管如此,通过对比仍可看出,图7与图4(f)的特征曲线比较接近。换句话说,即使加入一定量的噪声,特征曲线的总体趋势仍然保持良好。这就表明所提出的BDfF方法对3类噪声均具有较好的抑制能力。

为了进一步定量比较含噪二值图像的实验结果,同样统计了与图4(f)原始图像之间的特征曲线长度变化率 ΔL 和面积变化率 ΔS ,计算了相关性C,结果如表5所列。总体上,表5与图7反映出了相同的结果。所提出的BDfF方法同时取得了较小的 ΔL 和 ΔS ,以及较大的C,这就表明,相比GSP方法,文中所提取的特征曲线变化量更小,对特征不变性的保持更好,对二值图像噪声的容忍度更大。

表5 同一数字不同噪声的定量比较

图像	$\Delta L(\%)$		$\Delta S(\%)$		C	
	BDfF	GSP	BDfF	GSP	BDfF	GSP
N51	0.014	2.211	-1.372	-3.797	0.9983	0.2849
N52	0.118	-3.972	-1.618	-14.769	0.9974	0.3429
N53	0.014	-5.011	-1.372	9.886	0.9983	0.2379

结束语 针对图像特征自动提取问题,研究了模拟物理学机制的一类策略。以稀疏二值图像为例,提出了一种新的特征提取方法。该方法引入数据场,从场论的角度建立图像内容特征与场模式之间的一般映射关系,通过势值向量和主方向向量共同表征图像特征,充分顾及像素灰度空间的局部性,全面把握图像势场空间的整体性。为了验证文中方法的可行性和有效性,以手写数字图像为例展开了4组实验。定性、定量的分析表明,与同类方法相比,文中方法具有较好的类间区分度,能保持类内相似性,具备平移旋转等不变性,抗噪声性能较强的特点。总体来说,文中方法所提取的特征曲线能够有区分度地测量二值图像及其内容,较完备地反映相应二值图像的本质特征,是特征提取与模式识别的一种备选方案,可以作为传统方法的有效补充。下一步将研究文中方法的灰度级扩展以及该方法在手写数字识别、可计算人脸美学等方面的工程应用。

参考文献

- [1] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述 [M]. 北京:国防工业出版社,2010
- [2] 曹健. 图像目标的表示与识别 [M]. 北京:机械工业出版社,2012
- [3] Li Jing, Allinson N M. A comprehensive review of current local features for computer vision [J]. Neurocomputing, 2008, 71(10-12):1771-1787
- [4] Nixon M S, Liu X U, Direkoglu C, et al. On using physical analogies for feature and shape extraction in computer vision [J]. The Computer Journal, 2011, 54(1):11-25
- [5] Liu Heng. Force field convergence map and Log-Gabor filter based multi-view ear feature extraction [J]. Neurocomputing, 2011, 76(1):2-8
- [6] 曹传东,徐贵力,陈欣,等. 基于力场转换理论的图像粗大边缘检测方法 [J]. 航空学报, 2011, 32(5):891-899
- [7] Sun Gen-yun, Liu Qin-huo, Liu Qiang, et al. A novel approach for edge detection based on the theory of universal gravity [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(10):2766-2775
- [8] Lopez-Molina C, Bustince H, Fernandez J, et al. A gravitational approach to edge detection based on triangular norms [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(11):3730-3741
- [9] Direkoglu C, Nixon M S. On using an analogy to heat flow for shape extraction [J]. Pattern Analysis and Applications, 2013, 16(2):125-139
- [10] Cummings A H, Nixon M S, Carter J N. The image ray transform for structural feature detection [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(15):2053-2060
- [11] 陈雪松,徐学军. 一种二值图像特征提取的新理论 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(6):31-37
- [12] Tang Wen-sheng, Jiang Shao-hua, Wang Shu-lin. Gray scale potential: a new feature for sparse image [J]. Neurocomputing,

- [13] 陈雪松,徐学军,朱洪波. 基于图像势能理论的目标轮廓特征提取方法[J]. 计算机科学,2011,38(6):270-274
- [14] 李德毅,杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005
- [15] 淦文燕,赫南,李德毅. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报,2009,20(8):2241-2254
- [16] 杨炳儒,高静,宋威. 认知物理学在数据挖掘中的应用研究[J].

- [17] 王树良,邹珊珊,操保华,等. 利用数据场的表情脸识别方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2010,35(6):738-742
- [18] 吴涛,金义富,侯睿,等. 不确定性边缘表示与提取的认知物理学方法[J]. 物理学报,2013,62(6):171-183
- [19] Yann Le-cun, Corinna Cortes, Christopher Burges. The MNIST database of handwritten digits [OL]. <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>

(上接第 294 页)

综合以上分析,本文算法既提高分类精度,又大大减少特征基因个数,提高算法效率,充分说明该算法能剔除微阵列数据中的无关和冗余基因,揭示数据的本质特征和结构,提高分类精度和泛化性能,该算法是一种有效的特征基因选择方法。

表 2 不同算法的实验结果

数据集	SVM		ReliefF+SVM		本文算法		
	精度	基因	精度	基因	精度	基因	半径
Leukemia	56%	7129	88.2%	100	94.2%	3	0.89
SRBCT	60%	2308	95%	1000	100%	5	0.72
ALL	68%	12625	94%	900	97%	13	0.79

表 3 本文算法选择的特征基因

数据集	特征基因
Leukemia	{U05259_rna1_at,X03934_at,L09209_s_at}
SRBCT	{770394,782811,812105,796258,207274}
ALL	{8745_at,38682_at,37643_at,40551_at,36496_at,37085_g_at,40711_at,41517_g_at,32984_s_at,37106_at,36089_at,35580_at,947_at}

结束语 本文针对微阵列数据的高维小样本特点以及高噪声和高冗余特性,提出了一种特征基因混合选择方法。ReliefF 算法剔除大量无关基因,利用优化的邻域粗糙集模型进一步清除了存在的冗余基因,所以最终获得最优特征基因子集。实验说明该算法能用较少的基因获得较大的分类精度,在提高泛化性能的同时降低了时间代价,是一种可行的、有效的特征基因选择方法。

参 考 文 献

- [1] Derisi J L, Iyer V R, Brown P O. Exploring the metabolic and genetic control of gene expression on a genomics [J]. Science, 1997,278(5338):680-686
- [2] Zhao Y H, Wang G R, Li Y, et al. Finding novel diagnostic gene patterns based on interesting non-redundant contrast sequence rules[C]// International Conference on Data Mining. 2011:972-981
- [3] Zhao Y H, Yin Y, Wang G R. Identifying top-k vital patterns from multiclass medical data[C]//BioMedical Information Engineering. 2009:536-39
- [4] Zhao Y H, Yu X J, Wang G R, et al. Maximal subspace coregulated gene clustering[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2008,20(1):83-98
- [5] Golub T R, Slonim D K, Tamayo P, et al. Molecular classification of cancer: class discovery and class prediction by gene expression monitoring[J]. Science, 1999,286:531-537
- [6] Arfin S M, Long A D, Ito E T. Global gene expression profiling in esherichia coliK12; the effects of integration host factor[J].

Journal of Biological Chemistry,2000,275:29672-29684

- [7] Tusher V G, Tibshirani R, Chu G. Significance analysis of microarrays applied to the ionizing radiation response[J]. PNAS, 2001,98:5116-5121
- [8] Pan W. A Comparative review of statistical methods for discovering differentially expressed genes in replicated microarray experiments[J]. Journal of Bioinformatics,2002,18:546-554
- [9] Kira K, Rendell L A. A practical approach to feature selection [C]//Proceedings of the Ninth International in Machine Learning Conference. 1992:145-156
- [10] Kononenko I. Estimating attributes; analysis and extensions of RELIEF[C]//Proceedings of the European Conference on Machine Learning, Lecture Notes in Computer Science. 1994,784:171-182
- [11] 张文修,仇国芳. 粗糙集属性约简的一般理论[J]. 中国科学 E 辑:信息科学,2005,12:1304-1313
- [12] Yao Y, Yao B. Covering based rough set approximations[J]. Information Sciences,2012,200:91-107
- [13] 胡清华,于达仁. 基于邻域粒化和粗糙逼近的数值属性约简[J]. 软件学报,2008,15(3):121-125
- [14] 胡清华,赵辉,于达仁. 基于邻域粗糙集的符号与数值属性快速约简算法[J]. 模式识别与人工智能,2008,21(6):89-95
- [15] Storn R, Price K. Differential evolution simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [R]. Berkeley: University of California, 2006
- [16] Zhao H. Intrusion Detection Ensemble Algorithm based on Bagging and Neighborhood Rough Set[J]. International Journal of Security and Its Applications,2013,7(5):193-204
- [17] Chen T. Classification algorithm on gene expression profiles of tumor using neighborhood rough set and support vector machine [J]. Advanced Materials Research,2014,850:1238-1242
- [18] 赵晖. 融合邻域粗糙集与粒子群优化的网络入侵检测[J]. 计算机工程与应用,2013,18:73-77
- [19] 赵晖. 基于邻域粗糙集与 KNN 的网络入侵检测[J]. 河南科学, 2013,9:1404-1408
- [20] 雍龙泉. 求解一类多目标优化问题的极大熵差分进化算法[J]. 中南大学学报,2013,S2:160-164
- [21] Khan J. Classification and diagnostic prediction of cancers using gene expression profiling and artificial neural networks[J]. Nature Medicine,2001,7(6):673-679
- [22] Yeoh E J. Classification, subtype discovery, and prediction of outcome in pediatric acute lymphoblastic leukemia by gene expression profiling[J]. Cancer Cell,2002,1(2):133-143
- [23] 周艳平,顾幸生. 差分进化算法研究进展[J]. 化工自动化及仪表,2007,34(3):1-5