

始于凸包络线的闭主曲线学习算法研究^{*}倪劲松¹ 王宜怀²(苏州大学数学科学学院 苏州 215006)¹ (苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)²

摘要 本文提出了将凸包技术与自组织拓扑映射技术相结合的一种针对封闭曲线特征提取的主曲线学习算法,解决了一般主曲线算法无法有效模拟封闭和较为复杂分布数据集的难题。算法以数据集的凸包络线为起始步,通过分析数据集的全局和局部特征,逐步逼近数据集分布并获得封闭主曲线。算法的关键在于凹点挖掘算法的研究。实验结果表明,对于一般封闭曲线点集,该方法均能在较短的时间步内较好地逼近源数据集。该算法结构简单,复杂性在最坏情况下也不超过 $O(n^2)$,同时对图像的有界连通区域外部边界特征的提取与图形识别亦将具有较高的应用价值。

关键词 凸包, 向量量化器, 凹点挖掘, 主曲线

Algorithm Study for Closed Principle Curves Learning Which Starts with Convex Envelope Hull

NI Jin-Song¹ WANG Yi-Huai²(School of Mathematics Science, Soochow University, Suzhou 215006)¹(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006)²

Abstract We combine convex technique and SOM to design an algorithm for closed principle curves, which can learn gradually to draw out 'center line' for outside boundary cloud of bounded connected domain in plane as an 'approximate' boundary. It solves the problem of extracting closed connected curves, for which the known principle curve method cannot do effectively. Since beginning with the convex envelope hull of the data set, it has higher convergence speed than the known method. The key is giving out a mining algorithm for concave points and concave section. This method can get 'approximate' outside boundary of bounded connected domains in short time steps, if which is not too complicated. The complexity of the algorithm is not over $O(n^2)$, even if it is in the worst case. This algorithm has simpler structure and adaptabilities; it is also useful for extraction of outside boundary of connected domain and recognition of geometric objects.

Keywords Convex hull, Vector quantizer, Mining concave points, Principle curves

主曲线是寻找一种几何上直观、理论上完备、算法上可行的方法来描述数据集合内在几何结构的方法。作为线性主成分分析(PCA)的非线性推广, T. Hastie, W. Stuetzle 经过多年的研究后将自组织拓扑映射与样条光滑子相结合,于1989年率先给出主曲线概念(简称 HS-型主曲线)和算法^[1]。其后的10多年间,基于其广泛的应用前景,多位科学家分别给出了 BR 主曲线^[2]、T-主曲线^[3]、D-主曲线^[4]、K-主曲线^[5],以及利用自组织拓扑映射定义概率主曲线和概率主曲面^[6]和主定向点概念及基于主定向点概念的主曲线^[4]。作为一个新的研究方向,主曲线研究的重要性正在得到国内外的共识,其广泛的应用前景也愈来愈引起科研人员的兴趣^[7]。

本文拟在作者前期主曲线理论研究(文[8])的基础上,针对目前诸多主曲线算法中尚无有效解决封闭和较为复杂分布曲线的数据特征提取的缺陷,提出了凸包络线作为算法的起始迭代。同时,研究了一种凹点挖掘技术,解决了复杂分布曲线数据集的特征提取,进而获取此类数据点集的闭主曲线。经过实验检测,该算法运行效果良好,复杂度不高,同时具有较好的稳定性。

1 预备知识

在以后的讨论中,为了便于理解,我们将对用到的一些相

关概念和定义等预备知识给出简要的说明。

1.1 向量量化器

定义 1 一个 k 点向量量化器是一个映射 $q: R^d \rightarrow R^d$, 使得对每个输入样本 $x \in R^d$, 有

$$q(x) \in C = \{v_1, v_2, \dots, v_k\} \subseteq R^d$$

则称 C 为一个 k -字码书, 而 $v_j = q(x)$ ($j=1, 2, \dots, k$) 称为 x 所对应的码字。

这个 k 点量化器完全由 $V_j = q^{-1}(v_j)$ ($j=1, \dots, k$) 决定的空间分类所决定。考虑采用 v_j ($v_j = q(x)$ ($1 \leq j \leq k$)) 来取代样本 x , 其产生的失真度量定义为 $\Delta(x, v_j) = \|x - v_j\|^2$ 。一个具有最小编码失真的向量量化器被称作 Voronoi 单元或最优量化器。

一般采用 GL 算法计算获取局部最优码书, 详细算法可参看文[8]。

在 K-主曲线算法的研究中, 向量量化器将用于不断增加和调整主曲线(折线)的顶点。

1.2 主曲线

由于主曲线概念为 Hastie 与 Stuetzle 最先提出, 随后的研究中, 一些作者提出了不同主曲线的概念和算法, 本文将采用由 HS-主曲线定义弱化而产生的 K-主曲线。

定义 2(自相合) 如果函数 $x = f(t)$, 在随机密度分布 h

^{*} 本课题获得国家自然科学基金(10571129)资助。倪劲松 博士, 研究方向: 代数拓扑同伦论、数据集几何特征提取; 王宜怀 教授, 研究方向: 嵌入式系统、数据挖掘、计算机图形处理。

下,有 $E(x | t_f(x)=t) = f(t)$,那么称曲线 f 是自相合的。

定义 3(HS 主曲线) 对给定的数据分布或数据集,满足自相合(self-consistent)的光滑曲线,称为主曲线。

由定义 3 知,所谓自相合是指:在曲线上任取一点,收集所有投影在该点的数据,求它们的期望均值,其期望恰好与该点的值一致(见图 1)。

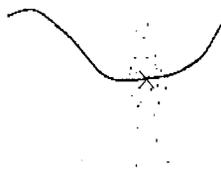


图 1 自相合的曲线

由 Hastie 给出的主曲线定义和自相合特性,我们可得出拓朴性质:如果两个点 x 和 y 是邻近的,那么这两个点在曲线上的投影通常也是邻近的,因此保证了数据分布的拓朴结构在主曲线上维持不变。然而,由于光滑性要求太强,其算法实现较难,收敛不够稳定,因此,Kege 的折线型主曲线即 K-主曲线^[3]放弃了曲线光滑性要求,而强调约束曲线的长度,以保证问题的良态性。其算法是使用有限的折线段来逼近连续曲线。

在分析了 Kege 的 K-主曲线理论和算法思想基础上,我们曾给出了一种更为简明的 K-主曲线算法,其详细论述参见文[8]。但是,对于实际几何图形为闭合曲线的数据集,该算法会形成一个小开口,难以闭合。原因是利用第一主成分直线段作为算法的起始步,在迭代过程中始终都是开的。要想解决这个问题,必须另辟途径。

1.3 凸包

经过分析研究发现,凸包技术为解决数据点分布曲线的闭合性提供了契机。为此,首先对凸包相关知识作些介绍,详细讨论可参见文[9,10]。

平面的一个子集 P 被称为是凸的,当且仅当对于 P 中的任何两点 $p, q \in P$,线段 pq 都完全属于 P (如图 2 所示)。

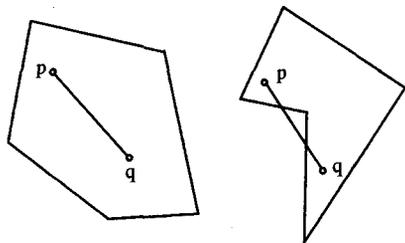


图 2 凸集示意图

对于有限点集 P 而言,从直观上看:凸包 $conv(P)$ 是一个凸多边形,而表示一个多边形的最简单方式为从任一顶点出发依照逆时针(或顺时针)方向依次列出它的所有顶点,因此所要讨论的凸包求解问题就转化为

给定平面有限点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,通过计算从 P 中选出若干点,它们沿逆时针方向依次对应于 $conv(P)$ 的各个顶点。

如图 3 所示,输入平面上一组点集 $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}$,输出的凸包

$$conv(P) = \{p_1, p_5, p_7, p_4, p_3\}$$

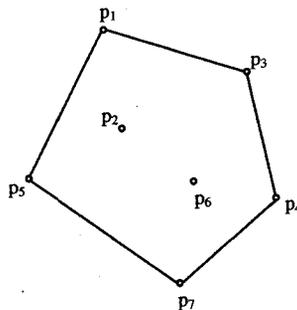


图 3 凸包的计算

由于 $conv(P)$ 是一个凸多边形,其顶点均来自于 P ,因此我们只要求出所有满足以下条件的顶点,即顶点 $p, q \in P$,且由 p, q 确定的直线 l_{pq} 使得点集 P 只在直线 l_{pq} 所划分的半平面内。如果适当选择直线的方向,可使得 P 总在直线 l_{pq} 的左侧。

本文采用的凸包算法为递增式凸包算法,其算法思想沿用几何的习惯,首先对数据集 P 中点集排序,产生一个有序点列 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。然后逐一引入 P 中的点,并且在凸包每增加 P 中一个点,都对当前凸包做相应的调整和更新。当处理凸包采用按照数据 x 坐标由小到大,即从左到右的方式(如 x 坐标相同,在按 y 坐标从小到大排序)添加时,获得的凸包称为下凸包 L_{low} ,其凸包中点的序为从最左端的点 p_1 出发,从数据集 P 的下方按逆时针行进到 p_n 点;同理,当处理凸包采用与上述相反的方向添加时,获得的凸包称为上凸包 L_{up} 。将下凸包与上凸包进行适当拼接后,形成按逆时针方向组成的数据集 P 的闭合包络点集 $conv(P)$ 。此算法思想最初由 Graham^[11] 提出,通常称作 Graham 扫描(Scan)。这里给出算法的主要步骤。

递增式凸包算法:

- step1: 对 P 中点根据 x 坐标从小到大字典排序,得到序列 p_1, p_2, \dots, p_n ;
- step2: 在空的 L_{low} 中一次加入 p_1 与 p_2 ,开始计算下凸包 L_{low} ;
- step3: 循环点集 for $i=3$ to n
 在 L_{low} 中加入 p_i ;
 如果(L_{low} 中至少还有三个点,而且最末尾的三个点所构成的不是一个左拐)then 将倒数第二个顶点从 L_{low} 中删除;否则直接循环下一个数据点。
 $i=i+1$ 循环下一个数据点。
- step4: 在空的 L_{up} 中依次加入 p_n 与 p_{n-1} ,开始计算上凸包 L_{up} ;
 循环点集 for $i=n-2$ down to 1
 在 L_{up} 中加入 p_i ;
 如果(L_{up} 中至少还有三个点,而且最末尾的三个点所构成的不是一个左拐)then 将倒数第二个顶点从 L_{up} 中删除;否则直接循环下一个数据点。
 $i=i-1$ 循环下一个数据点。
- step5: 拼接上凸包 L_{up} 与下凸包 L_{low} ,获得数据集 P 的凸包 $conv(P)$ 。

三个数据点是否构成左拐的问题可通过定义一个判别函数来解决。设 p_i 的坐标为 (x_i, y_i) , $i \neq j$ 时, $\vec{p_i p_j} = (x_j - x_i, y_j - y_i)$, 则

定义判别函数

$$z = f(p_i, p_j, p_k) = (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i)$$

命题 1:

- (1) p_k 落在直线 $l_{p_i p_j}$ 的左侧半平面内, $\Leftrightarrow f(p_i, p_j, p_k) > 0$
- (2) p_k 落在直线 $l_{p_i p_j}$ 上, $\Leftrightarrow f(p_i, p_j, p_k) = 0$
- (3) p_k 落在直线 $l_{p_i p_j}$ 的右侧半平面内, $\Leftrightarrow f(p_i, p_j, p_k) < 0$

上述平面上有限点集的凸包络构造算法复杂度不超过 $O(n \log(n))$ 。

2 算法设计

K-主曲线始于 1999 年 B. Kegl 等人的提出^[5]。本文提出的闭主曲线算法主要解决了闭合形态分布以及整体形状较为复杂的曲线数据拟合。

2.1 主要算法思想

本算法以凸包络线作为其起始迭代,同时通过分析研究数据集的整体和局部性态,开发了一种我们称之为凹点挖掘的技术。在此我们给出算法的主要设计思想。

首先我们假定数据集为平面 R^2 中的点集 $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, 且数据集的分布为简单闭合曲线, LC 为所获得的逼近数据集的多边形主曲线顶点集, 则始于凸包的闭 K-主曲线算法思想可以归纳为以下几步。

- step1: 计算点集 P 的凸包 L , 并设 $LC = L$ 。
- step2: 采用文^[12]中提出的凹点挖掘技术, 增加主曲线顶点, 主要为如下两步:
 - step 2.1 提取凸包点集 L 的一条边并计算其边长, 如果该边长大于设定的阈值, 则转下一步; 否则提取下一条边。
 - step 2.2 在该边与数据集所围成的空间中(参见图 4 中含三角形的区域)寻找点集 P 中适当的点 p_{j_0} , 并将其加入到该边两个顶点之间, 同时更新主曲线顶点集 LC ; 转 step2.1。
- step3: 如果需要的话, 利用向量量化器或自组织拓扑映射技术调整主曲线 LC 的顶点位置;
- step4: 输出主曲线顶点集 LC 。

在该算法中,最主要也是最困难的是 step2.2。在主曲线顶点所构成的边与原始数据集围成的空间中(见图 4 中含三角形的区域)寻找适当的凹点 p_{j_0} 时必须统筹考虑数据集的局部和整体性态,详细过程可参见文^[12]。就图 4 所给出的数据集而言,由于原始数据集的整体分布形状比较复杂,不但多处出现凹凸现象,而且凹进去的点相对比较靠近,这使得单纯采用向量量化器或自组织拓扑映射时生成的主曲线产生畸形偏离(参见 3.1.1 中的图 5(b))。例如在图 4 中给出的含三角形的区域中, p_{j_0} 的选择可通过在凸包边上的某条垂直线段在其所形成的某个邻域中(见图 4 中的虚线围成的条形区域)扫描原始数据集的方法生成。由于在任何瞬间垂直线段的条带邻域必定都能扫描到原始数据点,故可在扫描出的原始数据点集中求出最靠近该条边线段的点作为添加点 p_{j_0} 。当然还要考虑 p_{j_0} 是否与该边的两个顶点构成左拐。如果构成左拐,才将 p_{j_0} 作为添加的主曲线顶点加入到主曲线顶点集 LC 中,使原先的一条折线段改变为图中的两条虚线段(见图 4 中的三角形虚线部分)。

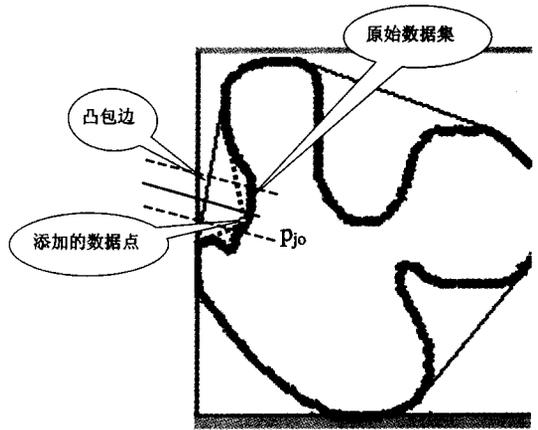


图 4 基于凸底的凹点挖掘技术图示

2.2 算法的复杂性分析

该算法包含了 1.3 节中的递增式凸包算法(step1)以及文^[8]中给出的用来调整顶点的向量量化器算法和自组织拓扑算法(稍有修改)(step3)。对 step3 而言,常见的数据集分布,如果其分布的形状不是过于复杂的话(详见下一节的算法演示和分析),可以省去 step3,这样可使得算法的复杂度有所减少。在 step3 不可缺省的情况下,算法的复杂度可以由 step1 ($n \log(n)$)和 step2、step3 的复杂性构成。由于码本的计算量一般不超过 $O(\log(n))$,同时当利用向量量化器调整顶点时,我们在这里去除了原先算法^[8]中的增加主曲线顶点部分,故本文算法中 step3 的复杂性比原先有一定的减低。一般情形下,step3 的复杂度通常为 $O(n \log^2(n))$ (在不使用自组织拓扑映射调整顶点的情形下 $O(nk \log(n))$,其中 k 为主曲线的顶点数),即使在最坏情形下 step3 的复杂性也不超过 $O(n^2)$;对于 step2,主要运算量在主曲线顶点的循环和对数据集某个条状邻域的扫描上,故 step2 的复杂度应为 $O(k \log(n))$ (k 为主曲线的顶点数)。综上所述,本算法的最终复杂度将不超过 $O(n^2)$ 。

3 算法分析及其讨论

本文所给出的算法主要针对闭曲线型分布数据的主曲线拟合,在某种程度上是对 kegl 给出的 k-主曲线和文^[8]给出的 k-主曲线的进一步研究。本节将通过给出算法的运行结果对算法展开进一步的分析和讨论。

3.1 一般数据分布的算法误差分析

为了展示算法的有效性,我们首先对一般数据分布的数据拟合展开分析和讨论。针对如此分布的数据集,文^[8]所提供的 K-主曲线算法一方面无法使生成的主曲线闭合(见图 5(a)),同时当数据分布较为复杂时,主曲线的拟合结果更是差强人意。主要问题是自组织映射与向量量化器在局部调整上虽有优势,但当调整范围较大时会产生比较大误差。图 5(b)的运行结果表明,当图形凹得比较厉害而且整体呈现多处下凹时,原有算法会导致主曲线顶点的走向发生畸形。采用了凸包和凹点挖掘技术,不但解决了主曲线的闭合情况(见图 6(a)),而且经过凹点挖掘算法处理后,使多边形 LC (主曲线)与原始数据点较为接近,因而对相对复杂的数据分布亦可以给出较好的拟合效果(见图 6(b)、(c)、(d))。

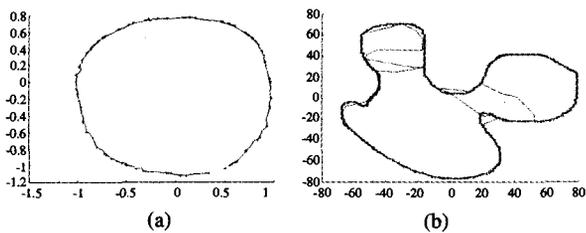


图 5 原有算法给出的 K-主曲线

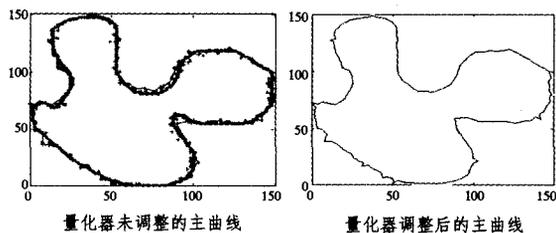


图 7 量化器调整前后的主曲线比较

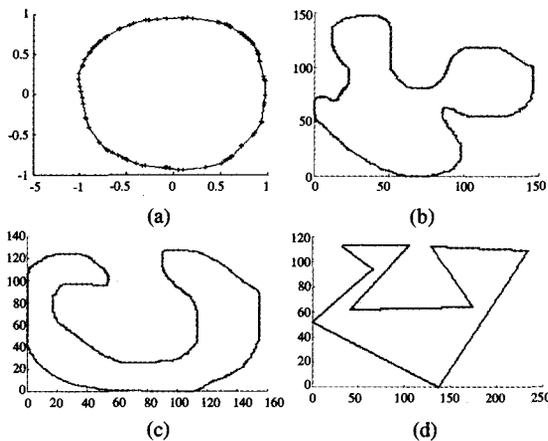


图 6 本文算法给出的主曲线

我们仿照文[8,12]定义主曲线 $f(t)$ 与原始数据集 $\{p_i\} (i=1,2,\dots,n)$ 的平均误差为

$$\Delta_n(f(t)) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta(p_i, f(t))$$

则本文算法应用于图 6 给出的数据集所产生的平均误差见表 1。

表 1 主曲线与数据集的平均误差

| 数据集 | (a) | (b) | (c) | (d) |
|------|----------|--------|--------|--------|
| 迭代次数 | 1 | 8 | 8 | 18 |
| 平均误差 | 0.000932 | 0.1528 | 0.1429 | 0.1299 |

综上所述可知,对一般的封闭数据分布,本算法的有效性可以获得一定的保证。

3.2 小扰动下数据分布的算法误差分析

在这里,我们将原先图 6(b)中的原始数据集进行随机小扰动后重新生成数据集。由于扰动产生的数据点距离正常数据点很接近,不能像孤立点那样易于处理,因此本算法采用 step3 的主曲线顶点调整方案来完成数据的模拟(见图 7)。就本数据集而言,经过两次 Step2 迭代操作和一次 Step3 向量量化器的调整操作,由如上平均误差计算可得:该数据集与本算法产生的闭主曲线的平均误差 $\Delta_n(f(t))$ 由调整前的 1.158 降低至调整后的 0.7662,误差减少了近 66%。由此可见,提高数据拟合效果既可通过增加迭代次数,也可使用 step3 两种途径达到,但使用 step3 调整顶点使得算法的整体运行速度会有所下降;如要求主曲线光滑,就可在 step2 结束后使用样条光滑子;这些因素都对算法的使用范围产生了直接影响。

3.3 数据分布对算法运行效率的影响

前面的讨论展示了本文算法对不同数据分布拟合的有效性。在这里,我们将讨论不同的数据分布形态对算法运行效率所产生的不同影响。

如图 8 所示的一组不同数据分布曲线,采用本文算法进行拟合。当数据分布图形的变化比较平缓时,挖掘技术的效率非常高,迭代次数不超过 8 次(见表 2),就可以与原始数据集有非常好的拟合效果(几乎重合)(如图 8(a)、(b));而当数据分布图形呈现出尖角,或凹的形状比较复杂时(如图 8(c)~(f)),挖掘算法(Step2)的效率受到一些影响,要使其达到图 8(a)、(b)的效果(如图 8(d)、(f)),迭代的次数必将快速增加(见表 2)。

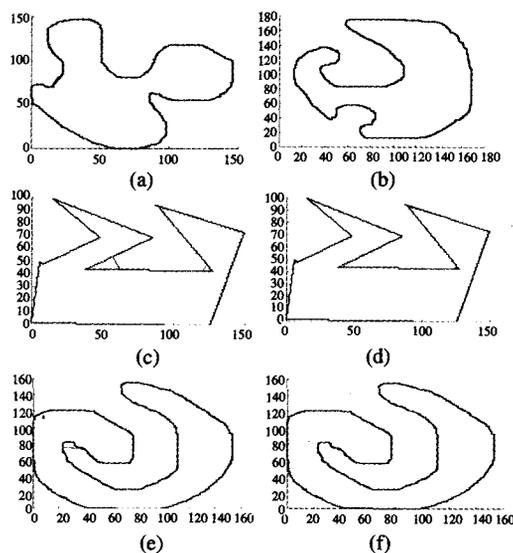


图 8 各种分布对算法的影响

表 2 各种数据分布对算法的影响

| 数据集 | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 迭代次数 | 8 | 6 | 7 | 23 | 10 | 13 |

这主要因为挖掘技术在遇到尖角或深凹的图形时,经过多次迭代主曲线(折线)的边长比较短,因而在边的中间增加点的速度自然放缓,导致算法的迭代次数不断增加。但可通过编程技巧使拟合较好的边上不再挖掘。随着迭代次数的增加,每一步的计算量会有所降低,从而使得计算速度加快。当然,如果对数据拟合精度要求不高的话,可以很快结束算法的运行。所幸的是,无论数据分布的图形如何,只要增加迭代次数(log(n)量级),本算法都能较好地拟合原始数据集。另外,此算法还可作为连通图形外边界的提取方法。如图 9 所示,经过 8 次迭代就非常很好地拟合了外边界。

结束语 综上所述,本文提出的算法由于采用了凸包和凹点挖掘技术,并组合了向量量化器和自组织拓扑映射,较好地解决了数据分布较为复杂的数据拟合,同时为图形的拓扑不变量的计算提供了可能。但对较高复杂度的数据分布进行

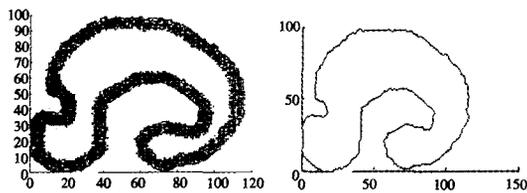


图9 边界提取

主曲线拟合时,如果增加尖点和较大曲率点的搜索,算法的运行效率将可获得进一步的细化和改进。更进一步,如能将算法推广至连通区域的内外边界的提取,辅以适当拓扑工具,便可对一般平面内有界的封闭图形的分类与识别有所帮助。另外把该算法推广到三维空间主曲面的情形,将为拓扑方法在模式识别中的应用开辟一个广阔的天地,这也是我们亟待解决的难题。

参考文献

- 1 Hastie T, Stuetzle W. Principal curves [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1989, 84(406): 502~516
- 2 Banfield J D, Raftery A E. Ice floe identification in satellite images using mathematical morphology and clustering about principal curves [J]. *Journal of the American Statistical Association*,

- 1992, 87:7~16
- 3 Tibshirani R. Principal curves revisited [J]. *Statistics and Computation*, 1992, 2:183~190.
- 4 Delicado P. Principal curves and principal oriented points [Z]: [Technical Report]. 309. Depart d'Economia I Empresa, Universitat Pompeu Fabra, 1998
- 5 Kegl B, Krzyzak A, et al. A polygonal line algorithm for constructing Principal curves. In: *Proceedings of Neural Information Processing Systems* [J], Dever Colorado, USA, 1999. 501~507
- 6 Chang K, Ghosh J. Principal curves for nonlinear feature extraction and classification. In: *Applications of Artificial Neural Networks in Image Processing III*, 1998, 3307: 120~129
- 7 张军平,王珏. 主曲线研究综述[J]. *计算机学报*, 2003, 26(2)
- 8 倪劲松,李玉珍,王宜怀. 自组织拓扑映射与主曲线学习[J]. *计算机科学*, 2006(3)
- 9 de Berg M, van Kreveld M, Overmars M, et al. *计算几何——算法与应用*. 第二版. 北京:清华大学出版社,2005
- 10 虞言林,杨松林. *解析几何*[M]. 北京:科学出版社,2005
- 11 Graham R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set [J]. *Inform Process Lett*, 1972, 1:132~133
- 12 倪劲松,李玉珍. 曲线状分布数据集凹点挖掘算法分析. 将发表

(上接第 157 页)

终目标将是建立具有情感的决策系统。MAS 的智能性、自治性和协作性决定其必然成为构建具有情感的决策系统的基础,所以本文分别提出具有情感属性的个体 Agent 模型和由个体 Agent 构建的具有情感控制功能的 MAS 决策系统模型,情感因素既是个体 Agent 的内部特性,又是决策过程中 Agent 之间的控制机制。将情感作用嵌入到基于 Agent 的决策系统的单元内部属性和外部功能模块将使决策求解过程更加合理、有效。

参考文献

- 1 Martinez-Miranda J, Aldea A. Emotions in human and artificial intelligence. *Computers in Human Behavior*, 2005, 21: 323~341
- 2 Damasio A. *Descartes' error: Emotion, reason and the human brain*. Picador, 1994
- 3 Goleman D. *Emotional intelligence*. New York: Bantam Books, 1995
- 4 El-Nasr M S, Ioerger T, Yen J, et al. Emotionally expressive Agents. In: *Proceedings of Computer Animation*, 1999. 48~57
- 5 El-Nasr M S, Yen J, Ioerger T R. FLAME—Fuzzy logic adaptive model of emotions. *Autonomous Agents and multi-Agent systems*, 2000, 3:219~257
- 6 Canamero D. Designing emotions for activity selection in autonomous Agents. In: *Trapp R, Petta P, Payr S, eds. Emotions in humans and artifacts*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2003
- 7 Picard R W. *Affective computing*. Cambridge, MA: MIT Press, 1997
- 8 Canamero D. A Hormonal model of emotions for behaviour control. In: *Fourth European Conference on Artificial Life, ECAL'97*. 1~10
- 9 Wooldridge M, Jennings N R. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. *The Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115~152
- 10 宋亦旭,贾培发. 人工情感及其应用. *控制理论与应用*, 2004, 21(2): 315~320
- 11 谷学静,石志国,王志良. 基于 BDI Agent 技术情感机器人语音识别技术研究. *计算机应用研究*, 2003. 24~26
- 12 许远理,郭德俊. 浅谈情绪智力与人工智能中的感情计算. *心理科学进展*, 2004, 12(2): 209~214

- 13 Barsade S G, Gibson D E. Group emotion: A view from top and bottom. In: *Gruenfeld D, Mannix E, Neale M, eds. Research on managing groups and teams*. Stamford, CT: JAI Press, 1998. 81~102
- 14 Kelly J R, Barsade S G. Mood and Emotions in Small Groups and Work Teams. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2001, 86(1): 99~130
- 15 Forgas J P, George J M. Affective Influences on Judgments and Behavior in Organizations: An Information Processing Perspective. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2001, 86(1): 3~34
- 16 Forgas J P. Affect in social judgments and decisions: A multi-process model. In: *Zanna M, ed. Advances in experimental social psychology*, 1992, 25: 227~275
- 17 George J M, Brief A P. Motivational agendas in the workplace: The effects of feelings on focus of attention and work motivation. In: *Staw B M, Cummings L L, eds. Research in organizational behavior*, 1998, 18: 75~109
- 18 LeDoux J E. *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*. New York: Simon & Schuster, 1996
- 19 Adolphs R, Damasio A R. *The interaction of affect and cognition: A neurobiological perspective*. In: *Forgas J P, ed. The handbook of affect and social cognition*, 2001. 27~49
- 20 Bower G H. Mood congruity of social judgments. In: *Forgas J P, ed. Emotion and social judgments*. New York: Pergamon Press, 1991. 31~53
- 21 Dal Forno A, Merlone U. Incentive policy and optimal effort: Equilibrium in heterogeneous Agents populations. *Quaderni del Dipartimento di Statistica e Matematica Applicata*, 2001. 10
- 22 Goleman D. *Working with emotional intelligence*. New York, 1999
- 23 Picard R W. *Affective computing*. [Technical Report]. No. 321. M. I. T. Media Laboratory Perceptual Computing Section, 1995
- 24 刘明,许力. 人工情感在 Agent 行为选择策略中的应用. *江南大学学报(自然科学版)*, 2003, 2(6): 564~568
- 25 王宏. 基于人工心理理论的情感模型建立及其数值仿真. *计算机应用*, 2004, 24: 369~371
- 26 王志良,解仑,董平. 情感计算数学模型的研究初探. *计算机工程*, 2003, 30(21): 33~35
- 27 宋亦旭,贾培发. 基于人工情感的拟人机器人控制体系结构. *Robot*, 2004, 126(6): 491~495
- 28 涂晓媛. *计算机动画的人工生命方法*. 北京:清华大学出版社, 2001