

基于自适应 HMM 的在线草图识别方法^{*}

蒋 维 张 斌 孙正兴

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京210093)

摘 要 用户适应性是在线手绘草图识别的一个关键问题。本文以实现草图识别的自适应性为目标,对草图识别中的用户适应性问题进行了深入的研究和实验,提出了一种自适应草图识别解决方法,并针对在线草图识别的特点,提出了一种基于笔划曲率,速率以及整体几何特性的组合特征。本文重点研究并实现了基于自适应 HMM 的草图识别,在已有 HMM 的基础上,针对在线草图识别的特点,提出了状态数可变自适应 HMM 的学习方法。实验表明本文所提出的方法具有很好的效果。

关键词 草图识别,用户适应性,隐马尔科夫模型(HMM)

On-Line Sketchy Graphic Recognition Based on Adaptive HMM

JIANG Wei ZHANG Bin SUN Zheng-Xing

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract User adaptation is a crux for on-line sketchy graphic recognition. The purpose of this paper is to make a comprehensive discuss about some critical issues of user adaptation in on-line sketch recognition supporting normal graphics design, we also hope to make some achievements in adaptive online sketch recognition. A method of on-line sketchy graphics recognition for user adaptation is proposed in this paper. We make a preparatory research on selection mechanism of feature descriptor and propose a combined feature based on curvature, velocity and geometrical character of stroke. We make some improvement in traditional HMM and propose an adaptive HMM based on variable state number for the purpose of description of multi-stroke sketch. Experiments prove the proposed method both effective and efficient.

Keywords Sketching recognition, User adaptation, Hidden markov model

1 引言

手绘草图(Freehand Sketching)是人类一种自然而直接的思路外化和交流方式^[1]。手绘草图识别是根据人机交互过程中不断增长的草图信息,挖掘草图形状约束,领会用户输入意图,最终将自由的、不规则的草图识别成为规则几何形状。然而,用户输入草图具有多样性和随意性,同一领域中的多个用户和同一用户在不同领域中的绘制方式不同,甚至同一用户在同一领域中随时间的不同绘制方式也不同,由于系统无法直接窥视用户的意图,只能通过用户绘制的图形来揣测。为了让系统能比较准确地识别出用户绘制的草图,捕捉用户的意图,草图识别系统必须具有用户适应性。

已有的解决在线草图用户适用性的方法大体可以分为两大类:第一大类方法引入基本图元,考察基本图元之间的关系、用户输入笔序等特征,这类方法属于基于草图构成元素及相互关系的模板匹配的草图识别方法,如我们项目组前期提出的边表方法^[2]。然而草图的笔划基本上是随意的,草图构成与笔划数目和笔划顺序无关;同时,将笔划进行分割,这样必然会丢失部分重要的用户信息,而且笔划分割一旦出错,其后的识别结果也必然会受到很大的影响。第二大类方法是机器学习的方法,这种方法引入人工智能领域内的一些技术,通过学习让系统逐渐适应用户,这种机制更符合人的思维模式,因

此已成为在线识别领域解决用户适应性的主要方法。我们项目组以前提出了基于 SVM 的在线草图识别方法,SVM 方法在训练样本和训练时间上具有特殊的优势,但 SVM 往往只适合于单笔划的识别,对于多笔划的情况,关系如何参数化的问题缺乏有效的解决方案,因此将其扩展到多笔划的过程比较生硬。隐马尔科夫模型(HMM)也是一种机器学习的方法,特别适合解决与时间序列相关的问题,在音频识别领域获得了空前的成功,在手写体识别方面也取得了一定的突破^[3-5]。而在线手绘草图也是一个与时间紧密相关的过程,特别是多笔划序列的复杂草图输入过程,不同用户的输入习惯直接表现在同一笔划在不同输入序列中出现时间的不同,HMM 可以较好地刻画用户的习惯,在一定程度上解决用户适应性问题。

本文考虑了目前图形编辑软件中常见的几种简单笔划,以此作为输入草图的基本元素,提出了在线草图识别中的自适应 HMM 方法,通过学习用户的历史数据,建立起用户的绘图习惯模型,这种方式可以实时地识别用户输入的图形。

2 自适应在线草图识别

目前手绘草图领域内的研究主要集中在识别上,而对用户适应性问题考虑甚少,提出的原型系统都有一定的局限性。本文提出的自适应草图识别系统利用了交互过程中的用户信

^{*}本文得到国家自然科学基金项目(编号:69903006、60373065)资助。蒋 维 硕士生,研究方向为智能用户接口;张 斌 硕士生,研究方向为智能用户接口;孙正兴 教授,博士,研究方向为智能用户接口、多媒体挖掘和图形图像技术。

息对草图提供辅助识别。由于笔划空间关系以及笔划时序信息与用户的输入习惯密切相关,而相对于隐蔽的用户习惯更易提取,因此,我们的自适应草图识别框架中根据这些信息对用户建立模型,并利用这些模型为识别提供指导。方案框架如图1所示,用户通过交互界面输入的草图经过预处理后进行特征抽取,并进行初步的用户建模,在经过分类器的学习后对用户模型进行充实。在实际应用中,分类器可以利用已有的用户知识识别图形,用户可以通过交互反馈来指导分类器的学习,进而对用户的模型进行更新管理,该框架中的核心模块包括特征抽取,分类器以及用户模型。特征抽取是对用户信息的抽取,分类器是对用户信息的学习和利用,而用户模型则是对信息的管理和更新,这三者的有机协调才能保证系统很好地适应用户。

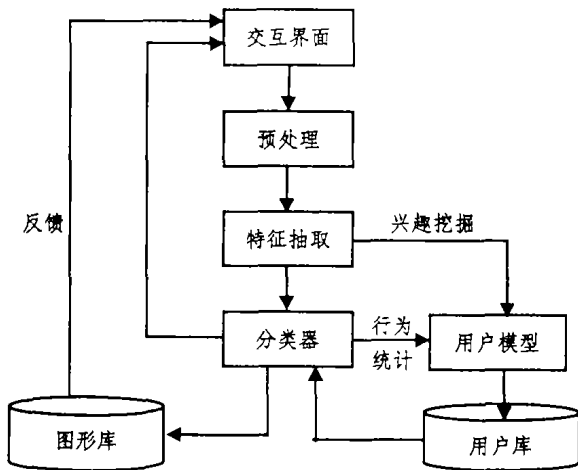


图1 自适应草图识别系统框架图

本文中特征抽取所选择的特征是我们提出的组合特征,分类器则采用了自适应HMM。

3 组合特征

针对在线草图识别领域内的用户适应性问题,本文认为自适应草图识别系统所抽取的特征应该满足以下条件:①要结合草图的几何(空间)特征和动态(时间)特征;②不能过多刻画草图的细节信息;③要能体现草图笔划间(非笔划内)的空间关系。本文针对这三个条件提出了组合特征。

在草图领域的特征选择方面,Calhoun等^[6]曾提出了基于输入速率和草图曲率的特征,也有人根据手绘工程草图的特点提出了基于草图重径距的特征^[7]。这两种特征前者主要描述草图的动态特征,后者则主要描述草图的几何特征,两者皆为全局特征,较好地刻画了各自领域内的草图特性,取得了较好的识别效果。

速率曲率特征以及重径特征较好地刻画了草图的全局特性,对草图的输入亦无限制,对噪声点的依赖也小,在一定程度上符合在线草图识别领域内用户适应性的解决,因此我们考虑使用它们两者来刻画草图的特性,将这两者作为我们所要提出的组合特征的主体。为了能更好地描述草图的整体属性,我们对重径,曲率,速率等采用了均值以及标准差的特征形式。另外,对于多笔划草图,笔划之间的空间关系也是一个重要的特征,因此,在组合特征中,我们增加了一维向量,用于描述笔划间的笔势走向以及闭包图形比例等。这样,组合特征共计7维,具体描述见表1。首先定义以下概念:

笔划:用户一次起笔和落笔之间绘制的连续点序列所形

成的轨迹;重径:构成草图的点序列中各点与草图重心之间的距离称为重径距,简称重径;过点速率:点序列中各点与前一点之间的距离与所用时间的比值;过点曲率:点序列中各点与前一点以及后一点构成的拐角的余弦;笔势走向:连接前一笔划的起笔点和当前笔划落笔点构成的虚拟线段的斜率。

表1 组合特征构成

| 特征 | 特征描述 | 特征属性 | |
|-------|----------------|------|------|
| f_1 | 重径的均值 | 全局特征 | 几何特征 |
| f_2 | 重径的标准差 | 全局特征 | 几何特征 |
| f_3 | 各点过点速率的均值 | 全局特征 | 动态特征 |
| f_4 | 各点过点速率的标准差 | 全局特征 | 动态特征 |
| f_5 | 各点过点曲率的均值 | 全局特征 | 几何特征 |
| f_6 | 各点过点曲率的标准差 | 全局特征 | 几何特征 |
| f_7 | 笔势走向(与闭包图形的比值) | 全局特征 | 几何特征 |

我们对草图中每一个笔划抽取组合特征,其中第七维向量是可变向量,对于多笔划草图中的非最终笔划来说,它是当前笔划与下一笔划的笔式走向,对于最终笔划来说则是草图与外接闭包矩形的长度比值。图2解释了组合特征的构成情况。2(a)是用户输入的草图,用户分三笔输入,具体如2(b)中数字所示。虚线表示两次笔划相连时的笔势走向,假设其与水平线的夹角分别为 α, β ,该草图与外接矩形的长度比为 ϵ ,则最终该草图的组合特征表示如2(c)所示。其中 f_{11}, \dots, f_{36} 是每一个笔划的曲率,速率以及重径特征。

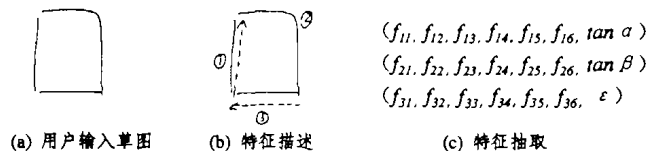


图2 组合特征

4 自适应HMM

在线手写体识别领域常用的HMM结构有链状和网状两种。链状HMM结构简单,易于实现,主要针对一些结构简单的符号,如gesture^[8];网状HMM采用自底向上的层次化链状HMM结构,识别精度高,常见于各种字符的识别^[3,5]。本文的工作是对HMM在手绘草图识别领域内应用的初步探索,因此采用了链状结构。

4.1 状态数的确定

在训练HMM模型时,需要预先设置好状态结点的个数,然后才能确定参数,构造HMM分类器的关键之一是确定状态数目。

在目前在线手写体识别领域内的HMM应用中,状态数的确定主要有两类方法:①状态数固定:即对不同的样本类别都采用相同的HMM结构进行描述,通常由人为规定状态数。②状态数可变:通常根据各类字符的构成特性选出一些经常使用的子部分(子笔划),在对字符识别时,通过一定的标准(通常是笔划)将字符分割成子部分的组合,对每个子部分用一个HMM状态进行描述。

上述两种状态数确定方法对于在线草图识别领域却并不适用,主要原因是相比手写体,草图有自身的特点:

①相比手写体,草图中笔划间的空间关系更为复杂,对识别的影响也更明显。如果采用固定数目状态,势必要对草图进

行强行分割,这会破坏草图内部的空间关系,降低识别效果。另外,用户的输入习惯也部分隐含在空间关系中,固定状态数无法有效描述用户信息,不利于用户适应性的解决。

②手写字符都有标准的字符库,并且字符的构成相对固定,因此可以对所有的字符进行分析后确定常用子块的数目。而目前在线草图缺乏统一的图形库,草图构成方式千差万别,因用户而异,无法也不可能对所有草图进行准确分析确定其构成子单元的种类,因此根据子单元确定状态数目也不可行。

如上所述,在线草图识别领域内的 HMM 应用需要有新的状态确定方法以适应手绘草图的特性以及用户适应性的解决。

用户输入草图的方式虽千差万别,但都会以相连笔划的形式完成。同一幅草图,可能会有不同的笔划数,即使笔划数相同,每一笔划的构成也会有差别。这些笔划或者是用户认为在草图中彼此关联性较大的部分,或者是用户认为输入比较舒服方便的组合,总之,都是对用户输入习惯的反映。如果能较好地刻画草图中的笔划信息,会在一定程度上促进用户适应性的解决。因此,本文根据手绘草图的特点,提出了基于笔划确定状态数目的方法。

该方法的主要思想是对草图中的每一笔划用一个 HMM 状态进行描述,在样本采集时,系统会自动记录样本中的笔划数及具体点信息,在对 HMM 进行训练前,我们预先对用户的样本进行统计,将样本中出现次数最多的笔划数作为该用户对当前草图的习惯输入(之所以选最多是采样时由于设备或者其它的原因会出现多种方式输入,而出现频率最高的正是用户最习惯的),记为 T_{Number} ,我们将 T_{Number} 作为描述该样本的 HMM 的状态数。在利用笔划特征向量对 HMM 进行训练时,对样本序列中可能存在的笔划数与 T_{Number} 不同的样本,我们采取了一些措施进行处理,具体见方法 4.1(记样本的笔划数为 S_{Number})。

方法 4.1 HMM 状态的训练

如果 $T_{Number} > S_{Number}$: 将最后一个笔划(原始数据)平均分割成 $T_{Number} - S_{Number} + 1$ 段,并对每一段抽取特征向量,连同前面的 $T_{Number} - S_{Number}$ 个笔划的特征向量分别训练各 HMM 状态。

如果 $T_{Number} < S_{Number}$: 将样本中后 $S_{Number} - T_{Number} + 1$ 个笔划的数据连成一个虚拟笔划并抽取特征向量,连同前面的 $S_{Number} - T_{Number}$ 个笔划的数据分别训练各 HMM 状态。

这种基于笔划的状态确定方法使得 HMM 的内部结构随用户而变,能更贴切地描述用户习惯,另外它只需人工作很少的干涉,对图形也很少需要作额外的分割(仅在样本笔划数与 HMM 状态数不等时,这种情况随着用户对输入环境以及图形逐渐熟悉后将越来越少),相比常见的状态确定方法更适合在线草图交互领域。在 5.1 节中我们验证了这种方法的适应效果明显优于固定状态数目 HMM。

4.2 基于自适应状态数 HMM 的用户适应性

在我们以前的研究中曾采用基于 SVM 的方法来解决用户适应性问题,虽然 SVM 在对单笔划简单图形的识别上对用户有较好的适应性,但 SVM 要求特征向量必须基于样本进行抽取,即每一个样本的特征向量总维数必须相同。对于多笔划构成的复杂图形来说,笔划之间的空间关系以及组合因用户习惯而异,而目前大部分的特征抽取方法是基于笔划的,这样很难保证复杂图形样本维数的一致性, SVM 的适应性效果仍受到较大影响。而本文提出的自适应 HMM 却能较好地弥补这个缺陷。

首先在逻辑结构上,我们采用了自左向右(left-to-right)无状态跳跃的一阶 HMM 结构,即当前状态只与前面一个状

态相关,如图 3 所示。这种结构比较符合草图的输入特性:用户总是按照一定的规律绘制草图,笔划之间有较强的顺序性,而且每一笔只与它的前一笔以及后一笔之间有较强的联系(即当前笔划的位置及构成是由上一笔决定的,而后一笔的位置和结构则是由当前笔划决定的)。而与更早的或者出现更晚的笔划之间的关联很小,可以忽略。另外,在手写体领域已经通过实验证明该结构可以很好地解决手写字符的识别问题^[3]。因此,在结构上 HMM 符合用户的输入习惯,具有一定的适应性。

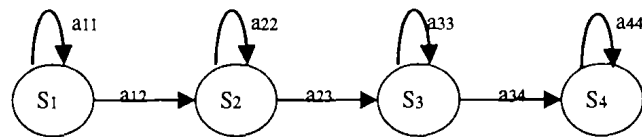


图 3 自适应 HMM 逻辑结构

在训练阶段,我们以用户输入的笔划为单位抽取其特征向量,并用上节提到的方法确定 HMM 的状态数以及训练参数。如果特征描述得当的话,这样获得的 HMM 中每个状态是对用户笔划的详细描述,状态之间的转移概率量化了笔划间的关联性。而整个 HMM 链则较好地刻画了对用户输入某个草图的习惯。

在识别阶段,本文采用的 Viterbi 算法是动态规划方法,不仅可以确定最佳识别路径,还可以给出相应的概率。这种带有“模糊性”的识别符合用户输入草图的模糊特性,可以按概率高低将识别结果反馈给用户,最终根据用户的选择对 HMM 参数进行调整。这种方法可以让 HMM 更好地适应用户(目前我们只将最佳路径作为识别结果,并未给出概率)。

综上所述,自适应 HMM 从结构到使用都具有较好的用户适应性。为了验证这种适应的效果,我们利用组合特征对自适应 HMM 进行了实验,具体实验见 5.2 节。

5 实验结果及分析

考虑到运算复杂度,目前我们的实验仅考虑简单图形。参考常用图形设计软件以及在实际使用中出现的频率,我们定义了九类基本图形,其中包括常用的多边形和折线类型,具体图形类别见图 4。

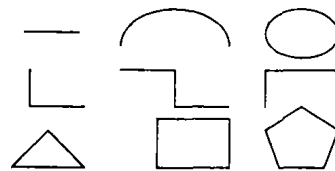


图 4 样本图形类

针对这些简单图形,我们采集了两个用户的数据。鉴于目前大多数的在线草图输入系统中,都要求用户一笔输入简单图形^[9,10],我们要求用户 1 在输入时也是一笔完成,而对于用户 2,不作任何限定,让他根据自己的习惯随意输入。用户 1,2 的数据具体构成如表 2。

目前已有的草图识别系统中,都要求用户在输入简单图形时必须单笔输入,而成功的在线识别系统应无需约束用户的输入习惯,因此,在我们的实验中分别采集了两个用户的样本,其中用户 1 的样本均为单笔输入,用户 2 的样本则是无约束的任意输入。两用户的样本构成如表 2。

表2 用户1、2的数据构成

| | 直线 | 弧线 | 折线1 | 折线2 | 折线3 | 三角形 | 四边形 | 五边形 | 椭圆 | 总计 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 用户1 | 801 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 801 | 7203 |
| 用户2 | 811 | 820 | 798 | 851 | 802 | 848 | 846 | 817 | 815 | 7408 |

利用上面的数据,本文进行了如下实验,实验是在 Intel P4 PC (1.7G Hz CPU、256MB memory), Microsoft Windows2000 环境下进行的。

5.1 自适应 HMM 和固定状态 HMM 对比

我们曾对固定状态 HMM 和自适应 HMM 在在线草图中应用的优劣性作了简单分析,在本节的实验中将进一步证明。由于多输入习惯的情况多见于笔划数目较多的图形,在基本图形中,主要是多边形。因此本实验对用户1,2的多边形样本抽取三种特征,并分别进行实验。在采用固定状态数的 HMM 时,分别设置不同的状态,对多边形图形进行结果分析,确定各自识别效果最优时的状态数。而对自适应 HMM 则采用4.1节中的方法设定状态数并进行实验,最后分析两种 HMM 的整体识别效果。我们让用户1和2分别按照各自的习惯输入三角形,四边形和五边形,并将他们的输入习惯以笔序的形式记录,如图5和6。

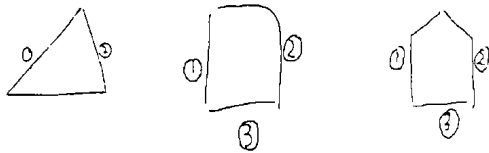


图5 用户1多边形输入习惯

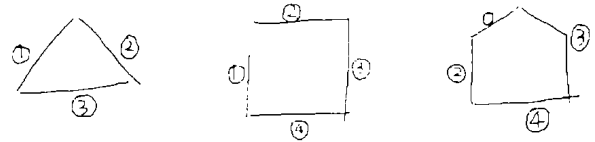
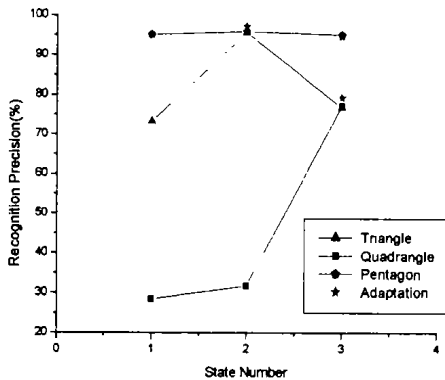


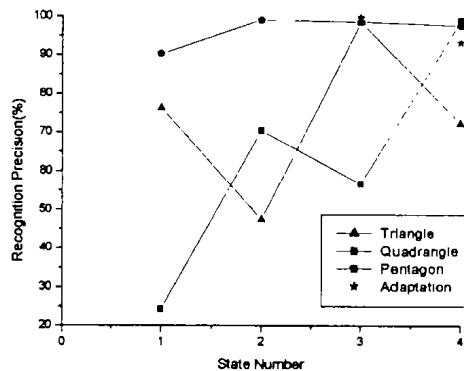
图6 用户2多边形的输入习惯

在固定状态的实验中,我们对用户1的数据分别采用了状态数为1,2,3的 HMM 进行识别,而对用户2的数据分别采用了状态数分别为1,2,3,4的 HMM 进行识别。而在自适应的实验中,用户1三类样本所对应的 HMM 状态数分别为2,3,3,用户2三类样本所对应 HMM 状态数分别为3,4,4。最终的适应效果如图7所示。图中 x 轴是 HMM 的状态数,y 轴是识别的精度。红,绿,蓝三种颜色的五星分别对应自适应 hmm 中三角形,四边形,五边形的识别结果,黑点则代表固定状态 HMM 下不同状态数的识别效果。

从图中可以看出,固定状态的 HMM,对不同图形的识别效果是与状态数相关的,但取某一个特定的状态数时,不可能对所有的图形达到最佳的识别效果。总体趋势是最佳识别状态数是由用户的输入习惯决定的,如对于用户1来说,三角形分两笔输入,四边形,五边形分三笔输入,在不同的特征下,大部分最佳的识别状态分别是2,3。用户2也存在相同的情况。



用户1组合特征两种 HMM 效果比较图



用户2组合特征两种 HMM 效果比较图

图7 两种 HMM 组合特征效果图

而自适应的 HMM 在一次识别中各类图形所需的状态数和固定数目 HMM 中效果最优的状态数等同,而识别率则接近。这表明:自适应的 HMM 可以较好地适应用户的输入习惯,并且无需用户显式地制定状态数,更适合在线草图识别的要求。

5.2 自适应 HMM 用户适应效果

在本实验中,用户1样本的60%被用作训练数据,用户2样本的75%被用于训练,剩下的作为各自的测试数据。我们将训练数据各分为30个训练集。其中前5个训练集中的数据分别占各自训练样本总量的1%,1%,2%,3%,3%,后面25个训练集中的数据各占总量3.6%的样本。实验结果如图8所示。

从图中可以看出,自适应 HMM 对多笔划图形(用户2数据)有很好的适应效果。在第二次训练后就接近了95%的识别精度(此时的训练样本为100多个),而在后面的训练中,识别

精度一直保持在95%左右,对于单笔划图形(用户1数据),经过7次训练后,识别精度也达到了95%左右并在以后的训练中趋于稳定。在训练时间上,由于 HMM 能在很短的训练频率达到较好的适应性(低于十次),因此,对于在线草图,特别是复杂多笔草图,具有较高的实用性。

总结与展望 本文对在线手绘草图识别中的用户适应性问题进行了分析,引入了一种能有效反映用户手绘图形的几何与动态特性的组合特征,并提出了状态数可变的自适应 HMM 方法,对用户的绘图习惯进行建模。实验表明:自适应 HMM 方法可以在少量样本的基础上较好地适应用户,从而能保证草图识别的效率和性能,克服因用户随意输入带来的识别困难,强有力地支持草图理解过程。本文的研究只是 HMM 在这一领域的初步尝试,今后我们将围绕更合适的特征抽取方法以及 HMM 网与 HMM 链的组合等几个方面进

行更加深入的研究。

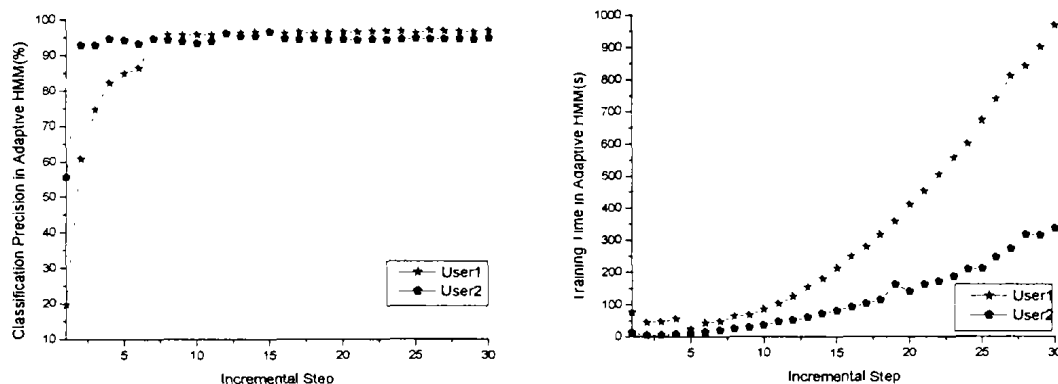


图8 自适应HMM用户适应效果

参考文献

- 1 Fish J, Scrivener S. Amplifying the mind's eye: Sketching and visual cognition [J]. Leonardo, 1990, 23(1): 117~126
- 2 孙正兴, 徐晓刚, 孙建勇, 金翔宇. 支持方案设计的图形输入工具. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(9): 1145~1152, 1159
- 3 Hu Jianying, Brown M K, Turin William. HMM Based On-Line Handwriting Recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(10)
- 4 Lee J J, Kim J W, Jin H. Kim Data-driven Design of HMM Topology for On-line Handwriting Recognition. In: Proc. of 7th Intl. Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, Amsterdam, Sep. 2000
- 5 Nakai M, Akira N, Shimodaira H, Sagayama S. Substroke Approach to HMM-based On-line Kanji Handwriting Recognition. In: Sixth Intl. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2001), 2001. 491~495
- 6 Calhoun C, Stahovich T F, Kurtoglu, et al. Recognizing Multi-Stroke Symbols. In: AAAI Spring Symposium, Sketch Understanding, 2002
- 7 刘伟, 查建中, 徐晓慧, 鄂明成. 用 RCR 特征和 NN 识别实时手绘工程草图. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(6): 692~696
- 8 Yang Jie, Xu Yangsheng. Hidden Markov Model for Gesture Recognition: [Technical Report of Robotics Institute]. Carnegie Mellon University, 1994
- 9 Rubine D. Specifying gestures by example. Computer Graphics, 1991, 25: 329~337
- 10 孙建勇, 金翔宇, 彭彬彬, 孙正兴. 一种快速在线图形识别与规整化方法. 计算机科学, 2003, 25(12): 172~176

(上接第180页)

(TSSB)。

表1给出了我们对OR-Library中所有FT和LA问题的计算结果。LA1-LA40来自Lawrence, 其中LA2、LA19、LA21、LA24、LA25、LA27、LA29、LA36、LA37、LA38、LA39以及LA40被认为是这40个LA问题中最难的问题^[7]。FT6、FT10以及FT20来自Fisher和Thompson。其中带*的表示算法找到了最优解。对于3个LA问题, HLS都找到了最优解, 其中包括著名的难例FT10, 对于40个LA问题, HLS找到了其中36个问题的最优解, TSSB找到了其中33个问题的最优解, 对于HLS未找到最优解的其余4个问题, HLS的计算结果都好于TSSB。

从表1我们看出, 在这43个不同规模大小和难度的问题上, HLS在可接受的时间内取得了很好的求解效果。

TSSB^[8]是在Pentium 133 MHz的PC机上做的实验, 对每个LA算例TSSB的计算时间为同规模大小的同组算例的平均计算时间。

结论 本文提出的混合邻域结构的本质就是不同的邻域结构的组合不但能使局部搜索具有更高的效率, 而且在计算陷入局部极小值陷阱时, 有助于使计算跳出陷阱, 走向前景更好的区域中去。在混合邻域结构的基础上, 本文提出的跳坑策略的实施也是本文算法取得令人满意的求解效果的直接原因。

对43个不同规模和难度的标准算例的实算结果以及与当

前一种先进算法的比较验证了本文算法的寻优性能。

参考文献

- 1 Garey M, Johnson D, Sethy R. The complexity of flow shop and job shop scheduling. Mathematics of Operations Research, 1976, 1(1): 117~129
- 2 Aarts E H L, van Laarhoven P J M, Lenstra J K, Ulder N L J. A computational study of local search algorithms for job shop scheduling. ORSA J. Computing, 1994, 6: 108~117
- 3 Adams J, Balas E, Zawack D. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. Management Sci., 1988, 34: 391~401
- 4 Nowicki E, Smutnicki C. A fast taboo search algorithm for the job shop scheduling problem. Management Sci., 1996, 42(6): 797~813
- 5 van Laarhoven P J M, Aarts E H L, Lenstra J K. Job shop scheduling by simulated annealing. Oper. Res., 1992, 40: 113~125
- 6 Dorndorf U, Pesch E. Evolution based learning in a job shop scheduling environment. Comput. Oper. Res., 1995, 22: 25~40
- 7 Balas E, Vazacopoulos A. Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling. Management Sci., 1998, 44: 262~275
- 8 Pezzella F, Merelli E. A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem. European Journal of Operation Research, 2000, 120(2): 297~310
- 9 Carlier J. The one-machine sequencing problem. European J. Oper. Res., 1982, 11: 42~47
- 10 Aarts E, Lenstra J K. Local search and combinatorial optimization. New York: Wiley, 1997
- 11 王书锋, 邹益仁. 车间作业调度(JSSP)技术问题简明综述. 系统工程理论与实践, 2003, 1