

# 基于笔画容差带的手绘草图间断多笔画判定与拟合方法

周 晶<sup>1</sup> 方贵盛<sup>2</sup>

(浙江大学机械工程学院 杭州 310027)<sup>1</sup> (浙江水利水电学院机械与汽车工程学院 杭州 310018)<sup>2</sup>

**摘 要** 在手绘草图的过程中经常会出现单一线元间断绘制的问题,为了将间断的笔画修整为单一线元以获得规范的设计图,提出了一种基于笔画容差带的手绘草图间断多笔画判定与拟合方法。该方法对输入的笔画进行折线化处理,得到笔画逼近折线段的折点序列,并判断笔画类型;根据笔画走势,绘制假想笔画以及扩展的笔画容差带,判定两笔画是否属于间断多笔画;聚类间断绘制多笔画,将笔画序列转换成子草图序列,并对子草图逐一进行拟合,从而得到规范的几何线元,这为实现由草图到规范设计图的识别提供了基础。

**关键词** 间断绘制多笔画,笔画容差带,假想笔画,笔画聚类,曲线拟合

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

## Judging and Fitting Method for Fractured Freehand Multi-stroke Based on Tolerance Zone

ZHOU Jing<sup>1</sup> FANG Gui-sheng<sup>2</sup>

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)<sup>1</sup>

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In freehand sketches, a single primitive would often be fractured. To obtain standard sketches and turn fractured strokes into standard primitives, this paper presented a judging and fitting method for fractured freehand multi-stroke based on tolerance zone. The preprocessing of the sketch is to transform all strokes into approximate polylines and to obtain all strokes categorized by type. And the turning points of approximate polylines are stored for further use. This method uses the trend of freehand strokes to construct imaginary strokes. And tolerance zone is established based on the stored turning points of freehand strokes and imaginary ones. The number of the sampling points of the strokes with smaller minimum bounding rectangle, which fall into the tolerance zone of the other stroke and the imaginary one, is counted, and it's used to judge whether two strokes are fractured multi-strokes or not. Multi-strokes are clustered together, and as a result, the sketch is divided into a set of stroke group. According to the stroke classification of each stroke group, stroke groups are fitted with geometric primitives. The examples shown in this paper validates the feasibility of this method. It lays the foundation for further sketch recognition.

**Keywords** Fractured multi-stroke, Tolerance zone, Imaginary stroke, Stroke clustering, Curve fitting

设计人员表达构思的最直接方法是利用手绘草图快速表达设计意图。由于手绘草图具有随意性、模糊性和不规范性,因此将设计人员的手绘草图转化为规范的设计概念图,为后续的详细设计提供基础,对提高创新设计的效率与质量有重要意义。

由于设计人员的领域背景、思维方式、手绘习惯以及个人偏好不同,草图识别系统常常采用一定的人机交互手段来准确识别手绘草图一定程度上限制了设计人员的草图绘制过程,影响了用户设计思维的自由表达。草图识别需要解决如何在给用户绘制最小约束的前提下获得最佳的识别效率和效果<sup>[1]</sup>。

笔画是手绘草图最基本的元素,设计人员通过不同笔画的组合表达其设计意图。当设计人员的思维产生停顿或者手绘过程不顺畅时,草图笔画会产生停顿和断裂,从而产生间断

的笔画。此类间断的笔画从属于一条几何线元,虽然直观上能够被设计人员识别,但是却给计算机的识别带来了一定的困难。针对草图识别问题,国内外学者开展了大量的研究。宋保华等<sup>[2]</sup>给出一整套从笔画、几何线元、草图规整到草图理解的草图识别方案,其中草图规整以及草图理解的实现要求草图上下文数据库、草图文法规则知识库以及相关领域知识库的支撑。谢强等<sup>[3]</sup>利用笔画的空间关系来完成笔画的自动分组,其更符合人们理解草图的过程,且对用户绘制过程的限制较小,保证用户自由连贯地表达设计意图。李路等<sup>[4]</sup>利用贝叶斯网络生成图形模板,并与笔画分割的结果进行比较和纠错。马嵩华等<sup>[5]</sup>利用修正的贝叶斯网络,根据草图绘制过程中笔触的速率和压力变化规律推理用户意图,提高草图识别的准确率。Peterson E J 等<sup>[6]</sup>基于笔画的尺寸、位置、形状、绘制速度、绘制时间、笔画之间的关系等 27 个特征参数对笔

本文受浙江省自然科学基金项目(LY13F020032)资助。

周 晶(1994—),男,硕士生,主要研究方向为图像识别及智能图像处理,E-mail:21525169@zju.edu.cn;方贵盛(1973—),博士,教授,主要研究方向为笔式人机交互与智能识别技术。

画进行分组,将草图转化为各个图元的组合,为后续的草图符号识别提供了便利。Ku D C 等<sup>[7]</sup>的多笔画判定根据笔画线性判定将笔画划分为直线段和二次曲线并对笔画进行最小二乘拟合,最后根据拟合结果的位置关系对草图笔画进行聚类。王淑侠等<sup>[8-14]</sup>对草图识别技术做了较为深入的研究,针对笔画拟合问题采用最小中值二乘法替代最小二乘法进行二次曲线拟合,避免了因绘制过程中的抖动而造成数据点波动、拟合图形远离正确位置的风险;针对线元类型识别提出了结合线元的几何特征和速度特征,采用模糊推理方法进行识别,必要时通过人机交互判定识别结果,以提高草图识别的效果;提出了利用时间关系对笔画进行多笔画预处理判定,基于空间关系对手绘笔画进行多笔画识别,提出了利用曲线的旋转角、首尾点以及折线段之间的位置关系进行多笔画识别;针对笔画分割问题,提出利用笔画上连续 3 个折点组成的向量叉乘结果的符号变化来判断笔画的凹凸性变化,从而将凹笔画分割成若干凸笔画的组合,在凸笔画的拟合过程中通过设置误差阈值将凸笔画分割成若干简单笔画组成的序列,从而达到分割笔画、简化草图的目的;针对多笔画重复绘制问题,提出了利用笔画容差带进行多笔画重复绘制的快速判定和聚类,然后对聚类结果进行分类拟合得到标准的几何线元。

上述方法针对手绘草图中的单一笔画或者重复笔画的预处理、笔画分割、类型识别、拟合等过程进行了深入的研究,对提高草图识别的质量和效率有着重要的作用。但是由于手绘草图的目的是帮助设计人员自由地表达创意思维,因此必须减少对于手绘过程的约束,允许草图的随意性和不规范性。间断绘制多笔画作为草图中随意、不规范的表达形式,由于笔画重叠的程度较小、笔画间联系的不明显,利用现有技术来解决该问题时仍然存在误判或者遗漏的现象。为了将间断绘制的笔画转换成设计人员预期的几何线元,提出了一种基于笔画容差带的手绘草图间断多笔画判定与拟合方法。

## 1 间断绘制多笔画的去模糊性过程

多笔画是指用两条甚至多条笔画来表示单一的线元。将多笔画之间存在间隙或者重叠程度较低的情况定义为间断绘制多笔画,如图 1 所示。区别于文献<sup>[14]</sup>研究的多笔画重复绘制问题,本文研究的多笔画重叠程度较小,笔画间的联系不明显,文献<sup>[14]</sup>的方法将导致遗漏的现象,如图 1 中的直线、圆弧和圆将被误认为多段不相关的直线和圆弧,违背了草图所表达的意图。本文提出的方法更适合此类重叠程度较低的多笔画问题。



图 1 间断绘制多笔画示例

间断绘制多笔画是草图绘制过程中经常出现的现象,增加了草图的模糊性。为了去除这种模糊性,将间断绘制的笔画转换成预期的几何线元,本文采取的从笔画到二维线图的识别方法的流程如图 2 所示。设计人员输入笔画,系统对笔画进行预处理,判断单一笔画的类别。设计人员完成草图绘制后,系统遍历所有时序上相邻绘制的两笔画,绘制假想笔画,利用笔画容差带来判断它们是否属于间断绘制多笔画,并

对间断绘制多笔画进行聚类。手绘草图就转变成了单一笔画和间断绘制多笔画两类子草图的序列。然后根据各子图内笔画的类型判断子草图的类型,再进行相应的直线、折线、二次曲线的拟合,最终得到相应的几何线元。其中,如何判断两条或者多条笔画是否从属于单一线元并构成间断绘制多笔画是解决问题的关键。

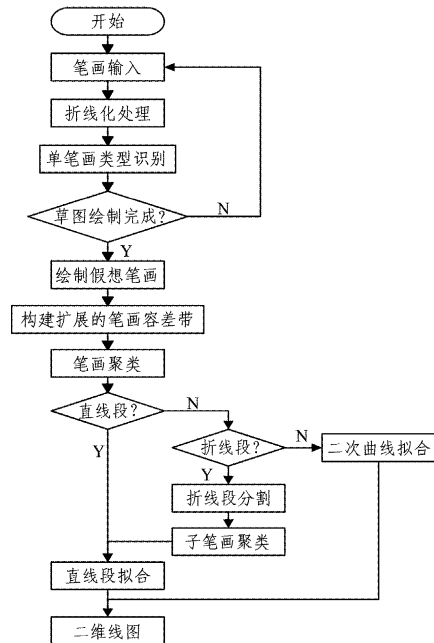


图 2 间断绘制多笔画的去模糊性流程

## 2 间断绘制多笔画的判定

针对间断绘制多笔画,利用假想笔画将问题转化为多笔画重复绘制的问题,然后构建扩展的笔画容差带进行判定。

### 2.1 间断绘制多笔画的判定方法

间断绘制多笔画虽然是用两条或者多条笔画来表示单一笔画,但间断绘制多笔画仍然存在时间、空间上的联系。在时间上,间断绘制笔画之间一般只相隔一次抬笔的时间。在空间上,间断绘制多笔画或存在部分重叠,或存在较小间距,而且多笔画走势基本一致。根据该特点,考虑相邻时间绘制的笔画之间的位置关系,并判断其是否构成间断绘制多笔画。区别于文献<sup>[14]</sup>直接判断相同类型笔画的重复程度,绘制假想笔画的目的是衡量两条或者多条笔画的联系程度,并判断其是否构成间断绘制多笔画。前者着眼于两笔画的相似或重合程度;假想笔画则侧重于笔画之间的联系程度,将断续的笔画连接成单一线元。

### 2.2 绘制假想笔画

假想笔画根据间断绘制的一条笔画的轨迹推测得到另一条笔画的可能走势。通过假想笔画可以将多笔画间断绘制问题转化为重复绘制问题。对于不同类型的笔画,假想笔画的绘制方法也不一样。

1) 直线段笔画的假想笔画相对较容易得到,因为直线的斜率基本保持不变。根据间断绘制的一条笔画基本可以确定预期笔画的斜率,只需在该笔画的一端进行延长即可,延长的长度与另一条笔画的长度相等,如图 3 所示,其中  $L_1$  和  $L_2$  是待判定的直线段笔画,  $L_i$  是根据  $L_1$  的斜率和  $L_2$  的长度延长得到的假想笔画。



图3 直线段笔画的假想笔画

2)折线段笔画由于在折点处的斜率产生突变,无法被准确预测,但是其间断绘制部分可以看作是直线段的间断绘制,因此可以根据笔画逼近折线段的折点将折线段分割成若干直线段的组合,然后对折线段首尾的直线段绘制假想笔画,从而得到折线段的假想笔画。

3)曲线段笔画在折线化处理阶段已经根据其凹凸性变化分割成多段凸曲线笔画,因此将草图中的曲线笔画均视为简单的二次曲线笔画,从而降低了问题的复杂程度。二次曲线笔画的走势较为复杂,仅依靠其中一条笔画往往不能正确反映预期曲线的正确走势,因此考虑结合另一条待判定笔画的部分信息来构建假想笔画,如图4所示,其中  $S_1$  和  $S_2$  是待判定的曲线笔画,  $q_{m+1}$  和  $q_{m+2}$  分别是曲线  $S_2$  的中点和末端点,将  $S_{11}$  和  $S_{12}$  共同组成的折线段作为二次曲线的假想笔画。

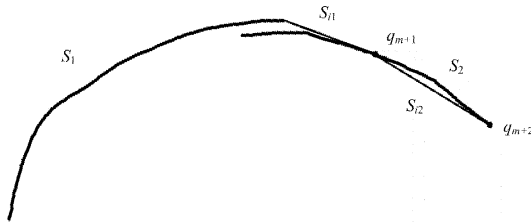


图4 二次曲线笔画的假想笔画

### 2.3 构建扩展的笔画容差带

笔画容差带是以笔画为中心、围绕笔画四周,并与笔画形状大致相同的封闭区域,如图5所示。当最小外接矩形面积较小的笔画的大部分采样点落在另一笔画的容差带内时,判定两笔画为重复绘制。但是此方法并不适用于间断绘制多笔画的判定,因为间断绘制多笔画的重叠程度较低,甚至不存在重叠现象。因此,本文通过假想笔画构建扩展的笔画容差带来判定间断绘制多笔画。

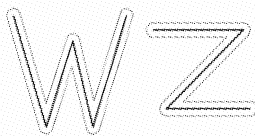


图5 笔画容差带示例

比较两条笔画的最小外接矩形的面积,在最小外接矩形面积较大的笔画的基础上绘制其假想笔画,将假想笔画的折点添加到笔画的折点序列中,依据此折点序列构造笔画容差带,因为结合了假想笔画的走势,所以称其为扩展的笔画容差带。以曲线笔画为例,构建其扩展的笔画容差带的算法步骤如下:

设笔画的所有采样点为  $\{p_i; 0 \leq i \leq v\}$ , 其中  $p_i$  的坐标为  $(x_i, y_i)$ 。笔画的所有折点为  $\{q_j; 0 \leq j \leq w, w \leq v, q_j \in \{p_i\}\}$ 。

Step1 在笔画折点序列中增加两个折点  $q_{w+1}$  和  $q_{w+2}$ ,  $q_{w+1}$  和  $q_{w+2}$  分别是另一条曲线笔画的中点和末端点。笔画的折点序列扩充为  $\{q_j; 0 \leq j \leq w+2\}$ 。

Step2 遍历笔画的折点序列  $\{q_j; 0 \leq j \leq w+2\}$ , 在两相

邻折点之间构建容差带矩形,如图6所示。其中,  $q_j$  和  $q_{j+1}$  分别是  $AD$  和  $BC$  的中点,容差带矩形的宽度为  $d$ 。所有容差带矩形的集合为  $\{S_j; 0 \leq j \leq w+1\}$ 。

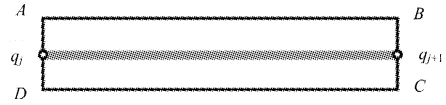


图6 笔画容差带矩形

Step3 以折点为圆心,以容差带矩形宽度  $d$  为直径,构建容差圆,用来过渡笔画容差带在折点处的曲率。所有容差圆的集合为  $\{R_j; 0 \leq j \leq w+2\}$ 。

Step4 求所有容差带矩形和容差带圆的并集,即  $\{S_j; 0 \leq j \leq w+1\} \cup \{R_j; 0 \leq j \leq w+2\}$ , 得到该笔画扩展的笔画容差带。

Step5 算法结束。

上述算法的效果相当于将较长的笔画进行延长,把延长的笔画作为假想的绘制笔画,将间断绘制笔画的连接关系问题转变为笔画与假想笔画之间的多笔画重复绘制问题,从而避免了间断绘制笔画之间是否存在重叠现象的问题,达到了简化问题的目的。

笔画容差带宽度  $d$  的取值对后续判定工作的进行至关重要。将  $d$  定义为笔画弦长(笔画采样点序列中最远点对间的欧氏距离)  $A$  及笔画宽度  $B$  的函数<sup>[14]</sup>:

$$d = \frac{3}{4} \sqrt{A + 2B}^{[14]} \tag{1}$$

由式(1)可知,若笔画最大弦长越大且笔画越宽,则笔画容差带的宽度越大。

### 2.4 间断绘制多笔画的判定

通过统计最小外接矩形面积较小的笔画的采样点落在另一笔画的扩展笔画容差带内部的比例来判断两笔画是否构成间断绘制多笔画。若该比例高于设定的阈值  $\delta$ , 则判定两笔画为间断绘制多笔画; 否则判定两笔画为普通的单一笔画, 不存在间断绘制的现象。

在构建扩展的笔画容差带之前已经比较了两笔画的最小外接矩形的面积大小,即统计第二条笔画  $s_2$  的采样点落在第一条笔画  $s_1$  的扩展笔画容差带内的比例,算法如下:

Step1 笔画的采样点为  $\{p_i; 0 \leq i \leq u\}$ , 令笔画  $s_2$  中落在扩展的笔画容差带内的采样点数目为  $x$ , 初始化  $x=0$ 。

Step2 依次遍历笔画  $s_2$  中的所有采样点。若  $p_i \in \{\{S_j; 0 \leq j \leq w+1\} \cup \{R_j; 0 \leq j \leq w+2\}\}$ , 则  $x=x+1, i=i+1$ , 循环 Step2; 否则  $i=i+1$ , 循环 Step2。直到  $i=u$ , 结束循环。

Step3 计算  $\frac{x}{u+1}$  的值, 比较计算结果和设定阈值  $\delta$  的大小, 若落点比例大于阈值则判定两笔画为间断绘制笔画。其中, 阈值  $\delta$  的大小直接影响判定的结果, 若阈值  $\delta$  越大, 则要求  $s_2$  与假想笔画的一致性越高。

Step4 结束算法。

## 3 间断绘制多笔画的聚类与拟合

### 3.1 间断绘制多笔画的聚类

对间断绘制多笔画判定的结果进行聚类, 目的是将草图

笔画序列转变为子草图的有序组合,为后续线元的拟合奠定基础,其中子草图是指单一线元或者间断绘制多笔画组成的线元。

设草图的所有笔画序列  $D = \{d_i, 0 \leq i \leq n\}$ ,  $n$  是草图的笔画数目;笔画聚类得到的子草图序列  $G = \{g_j, 0 \leq j \leq m\}$ ,  $m$  为子草图数,其中  $g_i = \{d_k, 0 \leq k \leq t_j\}$  表示子草图,  $t_j \leq n$  表示子草图  $g_i$  的笔画数。设  $t_j$  的初始值为 0,  $s$  和  $e$  的初始值均为 1。草图的笔画聚类算法如下:

Step1 新建一个空的子草图序列  $G$ 。

Step2 新建笔画序列  $g_j$ 。

Step3 将草图笔画序列  $D$  中的第一条笔画  $d_0$  移除并添加到  $g_j$  中,  $t_j = t_j + 1, u = u - 1$ 。若  $u = 0$ , 转 Step6。

Step4 采用上述间断绘制多笔画算法依次判定序列  $D$  中的笔画  $d_i$  ( $0 \leq i < n$ ) 与子草图  $g_j$  中的笔画  $d_{i-1}$  是否构成间断绘制多笔画,若判定结果为是,则将序列  $D$  中的笔画  $d_i$  从  $D$  中移除并添加到  $g_j$  中,  $t_j = t_j + 1, u = u - 1$ , 否则  $i = i + 1$ 。

Step5 若  $e = t_j$  或  $u = 0$ , 则执行下一步;否则转 Step4。

Step6 将  $g_j$  添加到  $G$  中;若  $u > 0$ , 则  $j = j + 1$ , 转 Step2。

Step7 算法结束。

### 3.2 笔画拟合

笔画拟合是将手绘草图笔画转换成与设计人员期望的标准几何线元。草图在笔画聚类之后转变成子草图的集合。子草图或只包含单一笔画,或由多笔画构成。对于单一笔画的子草图,根据笔画的类型进行直线段、折线段、二次曲线的拟合。对于间断绘制多笔画构成的子草图,需要根据子草图中笔画的类型对多笔画进行拟合。

1) 直线段拟合。在笔画逼近折线段得到的折点中,距离最远的两个折点决定了直线段子草图的拟合结果。选取子草图中距离最远的两折点,分别将其作为起点和终点,将两点连线即可得到直线段子草图的拟合结果。

2) 折线段拟合。对于包含折线段笔画的子草图,需要进行折线段拟合。折线段由多段直线组成,在拟合过程中将折线段的拟合转化成直线段拟合。根据笔画折点序列将子草图笔画分割成若干直线段的集合,忽略了折线段自身的连接信息。然后对折线段子草图分割得到的笔画序列进行笔画聚类,对聚类的结果进行直线段拟合,拟合的结果即为首尾相连的直线段组成的折线。

3) 二次曲线拟合。由于笔画逼近折线段所得的折点均匀分布在笔画采样点中,而且折点数目相对采样点的数目较少,因此采用最小二乘法对二次曲线子草图的折点序列进行曲线拟合即可得到较为准确的拟合结果,同时也能减小拟合过程的计算量。拟合曲线的形式为:  $q = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$ 。

## 4 实例与分析

本文方法采用 C++ 语言实现,并在 VS2013 环境上执行(Intel CORE i7 CPU 4710MQ 2.50GHz CPU, 4GB Memory, Windows 7),对间断绘制多笔画判定与拟合方法进行了实例验证,拟合实例如表 1 所列。表 1 中,第 2 列为输入的不间断绘制多笔画,虽然重叠程度较低,但基本走势一致,满足间断绘制多笔画的特征。最后两列是多笔画拟合结果,从第 3 列

多笔画与拟合结果的对比可以发现,拟合结果能够反映多笔画的走势,准确表达设计人员的设计意图,且拟合误差在合理范围内,保证了拟合结果的可信度;第 4 列为最终得到的单一线元。

表 1 间断绘制多笔画拟合实例

类型	间断绘制笔画	拟合结果
直线		
折线		
曲线		
圆		

利用电气原理图对本文方法进行验证。手绘的电气原理图如图 7 所示,最终得到的二维线图如图 8 所示。从图中可见图 7 中所存在的间断绘制多笔画被转化成了规范的几何线元,基本达到了预定的目标。利用文献[14]的算法对手绘电气图进行处理,所得结果如图 9 所示。

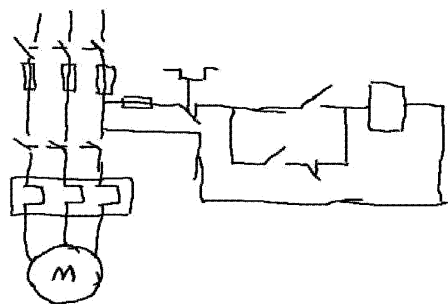


图 7 手绘电气原理图

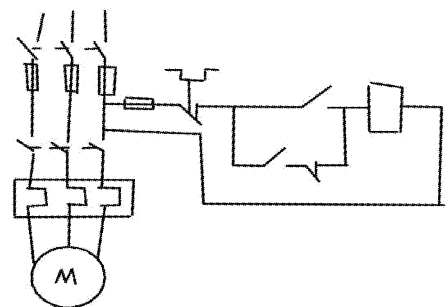


图 8 手绘草图的处理结果

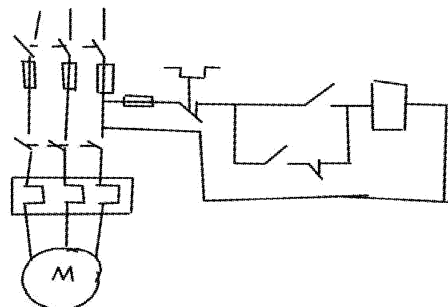


图 9 文献[14]中的算法的处理结果

对比可知,两种方法都能较好地处理多数间断绘制多笔

画,但是对于重叠程度较小的多笔画,本文算法能够更好地识别笔画的连接性,完成笔画的聚类、拟合;文献[14]则将其识别为多条笔画,如图9中的长直线以及两段圆弧。本文算法更注重多笔画之间的联系,判断其从属于单一几何图元的可能性,然后完成其聚类、拟合。

**结束语** 针对手绘草图中的间断绘制多笔画问题,提出了一种基于笔画容差带的手绘草图间断多笔画判定与拟合方法,在解决问题的同时提供了一种解决问题的思路,即将多笔画间断绘制问题转化成了重复绘制问题,扩展了已有的技术手段的应用范围。同时,利用已有笔画的走势推测线元的预期走势,并构建假想笔画,用于间断绘制多笔画的判定;将间断绘制笔画的位置关系作为判定的标准,并对判定的结果进行拟合,得到标准的几何线元,为后续的草图识别工作奠定了基础。该方法具有以下特点:

1)利用笔画容差带将间断绘制多笔画问题转化为重复绘制问题,扩大了笔画容差带的应用范围,简化了间断绘制多笔画的判定过程。

2)由于间断绘制多笔画间的重叠程度较低,现有的空间关系不足以判定多笔画之间的联系,提出了利用假想笔画构建间断绘制多笔画之间联系的方法,增强了多笔画间原有的联系,并且符合设计人员观察手绘草图时对间断绘制多笔画的判断过程。

3)针对二次曲线的假想笔画构建问题,综合利用多笔画的信息,避免了因单一笔画信息不足造成的多解以及求解过程复杂的问题;同时假想笔画能够较好地反映预期笔画的走势,满足多笔画判定的要求。

该方法将间断绘制多笔画问题转化为重复绘制问题,取得了一定的效果。但是该方法应用于重复绘制多笔画问题时,实际上并不需要绘制假想笔画。如何根据多笔画的重叠程度区分间断绘制多笔画和重复绘制多笔画,并根据判断的结果选择相应的笔画判定拟合方法,是今后研究的方向。

### 参 考 文 献

- [1] 孙正兴,冯桂焕,周若鸿. 基于草图的人机交互技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1889-1899.
- [2] 宋保华,叶军,于明玖,等. 笔输入草图的分层识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(6): 753-758.
- [3] 谢强,冯桂焕,孙正兴. 基于上下文的在线草图识别[J]. 计算机科学, 2007, 34(3): 216-219.
- [4] 李路,周良,丁秋林. 基于贝叶斯网络的草图符号识别研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(6): 262-265.
- [5] 马嵩华,田凌. 捕捉设计意图的二维草图识别技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(10): 1337-1345.
- [6] PETERSON E J, STAHOVICH T F, DOI E, et al. Grouping Strokes into Shapes in Hand-Drawn Diagrams[C]//Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-10). Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2010: 974-979.
- [7] KU D C, QIN S F, WRIGHT D K. Interpretation of Overtracing Freehand Sketching for Geometric Shapes[C]//Proceedings of the 14th International Conference in Central Europe on Computer Graphics. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2006: 263-270.
- [8] 王淑侠,高满屯,齐乐华. 基于二次曲线的在线手绘图识别[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(1): 37-41.
- [9] WANG S X, GAO M T, QI L H. Online Freehand Sketching Recognition Using Fuzzy Theory[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(3): 317-325.
- [10] 王淑侠,王关峰,高满屯,等. 基于时空关系的在线多笔画手绘折线段曲线识别[J]. 计算机科学, 2012, 39(9): 269-274.
- [11] WANG S X, WANG G F, GAO M T, et al. Recognition of online multi-stroke freehand conic sections based on time-space relationship[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2011, 24(1): 82-89.
- [12] WANG S X, QIN S F, GAO M T. New grouping and fitting methods for interactive overtraced sketches[J]. The Visual Computer, 2014, 30(3): 285-297.
- [13] 王淑侠,王守霞,王关峰,等. 基于几何特征的在线手绘草图分割[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(9): 1686-1693.
- [14] 王淑侠,王守霞,王关峰,等. 在线多笔画重复绘制草图的判定与聚类[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(10): 1980-1987.
- [12] YANG M C, CHU C T, WANG Y C F. Learning Sparse Image Representation With Support Vector Regression For Single Image Super Resolution[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE Computer Press, 2010: 1973-1976.
- [13] GLASNER D, BAGON S, IRANI M. Super-Resolution From a Single Image[C]//Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. Kyoto: IEEE Computer Press, 2009: 349-356.
- [14] ZONTAK M, IRANI M. Internal Statistics of a Single Natural Image[C]//Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. America: Colorado Springs, 2011: 977-984.
- [15] MAIRAL J, BACH F, PONCE J. Online Learning for Matrix Factorization and Sparse Coding[J]. Journal of Machine Learning Theory, 2010, 11(1): 19-60.
- [16] TAPPEN M F, RUSSELL B C, FREEMAN W T. Exploiting the Sparse Derivative Prior for Super-Resolution and Image Demosaicing[C]//proceedings of IEEE workshop on Statistical and Computational Theories of Vision. Fort Collins: IEEE Computer Press, 2003: 1-24.
- [17] EFRON B, HASTIE T, JOHNSTONE I. Least Angle Regression[J]. The Annals of Statistics, 2004, 32(2): 407-499.

(上接第 174 页)