

一种手绘草图的快速参数化方法^{*})

王 卫 尹建峰 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 本文提出了一种快速手绘草图参数化方法,该方法利用 Bézier 曲线拟合手绘草图,并依靠误差控制来逼近曲线,最大限度地保留了手绘草图的原始信息;同时,建立了手绘草图的统一的参数化模型。实验表明,该方法对各种图形都具有较好的拟合效果,并具有很高的时间效率。

关键词 手绘草图,特征点,拟合,误差控制

A Fast Parametric Fitting Approach to Freehand Sketch

WANG Wei YIN Jian-Feng SUN Zheng-Xing

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

Abstract In this paper, a fast parametric fitting approach to freehand sketch is presented. This approach fits the freehand sketch with Bézier curves and approximates the curve by error control. It preserves the information of the original sketch as much as possible. Meanwhile we get the universal parametric model for freehand sketch. Experimental results show that this approach can yield good fitting effect for various shapes.

Keywords Freehand sketch, Feature point, Fitting, Error control

1 引言

笔式交互以其方便、快捷、符合传统纸笔交互习惯等特性深受广大计算机用户的喜欢,并引起了人机接口技术的一场革命。手绘草图作为笔式交互中最重要的应用之一越来越受到研究人员的重视。目前,对手绘草图的研究已经发展到了一个全新的时期,很多相关的研究工作都已经展开,并且已经成为当前研究领域的一个热点。针对草图笔划的研究工作有笔划的预处理与规整化、笔划的分类与识别、笔划的分割。孙^[1]等提出了一种利用引力模型识别输入笔划的方法,直接将输入的笔划分成多边形、折线和弧线(包括圆与椭圆)三种类型。Sezgin^[2]以及在他之后的 Calhoun^[3]都利用笔划的笔速和曲率信息对笔划进行分割,然后将分割后的笔划识别成基本图元,用基本图元的时序及空间关系来表示笔划。针对草图的研究工作主要是指草图识别工作。目前的草图识别方法按对笔划的处理方式可以分为两大类:第一类不进行笔划分割,直接识别草图;第二类先将笔划分割并识别成基本图元,把草图表示成基本图元的组合,再进行识别。第一类方法一般都采用机器学习方法,如 HMM^[4],SVM^[5]等,这些方法用对原始草图抽取出的局部和整体信息来表示草图,用来训练分类器。第二类基于笔划分割的草图识别方法对复杂图形更为有效,它们抽取草图的结构信息^[3,6](一般用基本图元之间的空间关系表示),计算输入草图与目标模板之间的相似度。在目前的这些对于草图的研究工作中,草图的表示有两种方式:一种是最原始的输入点序列表示,另一种是识别之后得到的具有规则形状的图形。对于第一种表示,它保存了关于整个草图的所有原始信息,包括局部信息、整体信息和用户

信息,但是这些信息没有经过处理,并不能被直接利用,甚至还有很大程度的信息冗余。第二种表示方式刚好相反,识别过后的草图与笔划都是规整化的矢量,但丢失了所有的绘制过程信息,并且识别只是程序对用户原有意图的一种猜测,其准确性还需要商酌。因此,在草图的表示方面,目前的研究工作做得很有限,远远不能满足笔式交互中对草图处理的需要。

本文提出了一种利用 Bézier 曲线分段拟合手绘草图的方法。这种方法先利用笔速和曲率信息寻找到草图笔划中的特征点,再根据最简单、最相似的原则利用特征点将笔划拟合成分段的 Bézier 曲线。我们的误差控制算法保证了拟合的精度,最大程度上保留了用户绘制草图的原始笔划信息。对于多笔划的复杂手绘草图,本方法可以对每一个笔划依次处理,最终形成对整个草图的 Bézier 曲线表示。据此,我们建立的手绘草图表示的统一参数化模型,对于更高层次的草图处理,如草图识别、草图理解和草图检索等,具有很重要的意义。实验表明,在保证足够的拟合精度的基础上,本方法具有相当高的效率,对各种图形都有较好的拟合效果,适合智能人机接口中在线草图的处理。

2 系统框架

本方法的原则是,最简单、最相似,先分段、后拟合。所谓“最简单、最相似”,就是在每个单段曲线拟合误差不超过给定阈值的前提下,手绘草图将由最少段数的 Bézier 曲线构成。为了达到这个目的,我们先将复杂笔划分段,分段后每一段笔划都将只是简单的图元,再用 Bézier 曲线拟合。

图 1 是本文的系统结构图,主要由三部分组成:特征点检测、参数化以及误差控制和拟合调整。

^{*})本文得到国家自然科学基金项目(编号:69903006,60373065)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助。王 卫 硕士生,研究方向为智能用户接口;尹建峰 硕士生,研究方向为智能用户接口;孙正兴 博士、教授、博士生导师,研究方向为智能用户接口和多媒体信息处理。

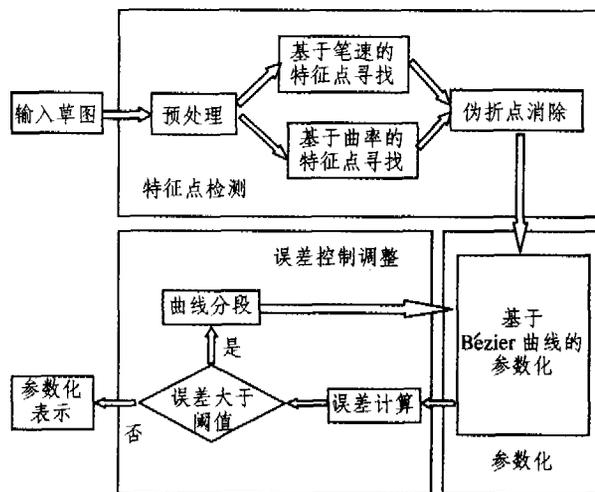


图1 手绘草图参数化处理流程框架

首先进行特征点检测。所谓特征点,是指那些不同图元所在笔划段的交接凸点。我们分别利用笔速和曲率的信息寻找特征点。最后在结果中消除伪折点,最终特征点将原始草图分成若干段,每一段的笔划都较简单,一般只表征一个图元。接着,我们利用基于4个控制点的 Bézier 曲线对每段曲线进行参数化,得到原始草图的统一的参数表示模型。最后,计算参数化之后的曲线与原始曲线之间的误差,通过误差控制递归分段,不断逼近原始曲线,完成对手绘草图快速、准确的表示。

3 特征点检测

草图参数化的目的是为了高效准确地表示草图,要求参数化后的草图与原始草图尽量逼近,最大程度地保留用户绘制草图的原始过程信息。同时,参数化过程及结果应尽量简单,否则将影响之后进行的草图处理的效率。现有的草图拟合算法大都集中于单笔划的单条曲线拟合,很难达到令人满意的效果。首先,对于复杂笔划的拟合的误差将会比较大,很难用单条曲线重现用户的笔划。第二,用单条曲线拟合笔划,拟合次数可能会非常高,这给笔划的后期处理带来了不便。第三,高次曲线拟合的计算量较大,这将影响草图处理的效率。因此,本文采取先分段后拟合、最简单最相似的原则进行拟合处理。

所谓分段,就是将原笔划分成多次拟合。分段的目的是为了降低拟合的复杂度,因此分割点的选取尤为重要。我们的目标是,相邻两个分割点之间的笔划尽量简单,没有明显的折点。实际上,分割点的分布基本上描述了笔划的轮廓特征,因此分割点实际上是笔划的特征点。我们的特征点检测方法正是从笔划分割中特征点检测方法改进而来。Sezgin^[2]利用笔速和曲率提出了一个特征点的检测算法,本文算法在其基础上进行了改进,首先对输入数据进行预处理,然后结合笔速和曲率检测特征点,最后在所得的特征点中消除伪折点。

3.1 预处理

我们所获得的输入资料是由鼠标或者手写笔得到的,由于用户输入的不确定性,造成我们获得的输入数据存在极大的不连续性,给特征点的寻找造成了困难。不同的用户绘制的图形,在大小上可能存在较大的差别,如果采样点疏密程度相同,对大图形来说可能不足以描述其分割的特征,丧失了细节;而对于小图形来说则可能显得冗余,增加了处理的时间。

为了减少用户输入的不确定性而带来的困难,我们有必要对获得的原始输入资料进行预处理。预处理的目的是使原始的采样点能够在处理之后在采样点过密的地方去除一部分采样点,而在采样点稀疏的地方进行插值,获得一些新的采样点,同时能够自适应地调整不同图形的采样点的疏密程度,使最终得到的采样点能够使下一步的特征点寻找更加精确。经过这一系列的处理,采样点序列将保持一个距离分布大致均匀的状态。

通过计算该图形闭包的周长,我们可以确定应该选择的采样点的数目。然后在原始采样点上删除冗余采样点和插入新的采样点的操作,使最后所得的采样点序列能够随着图形的大小自适应地调整疏密程度。

经过上述处理,原始输入不一致,采样不规则的采样点转换为分布大致均匀的点序列,为下一步的特征点寻找提供了方便。

3.2 通过笔速寻找特征点

用户在特征点处为了使绘制能够连贯,很自然地笔速将有明显的下降。因此,考虑通过笔速的性质来寻找特征点是可行的,只要在对应的速率最小处取采样点,就能够找到效果比较好的特征点。

对于输入点序列和时间序列,我们可以采取扫描一遍的算法,对于笔划上的任一个点 P ,定义其采样的前驱点为 P^- ,后继点为 P^+ ,定义 P 点的速度和整个笔划的平均速度分别为 V_P 和 \bar{V} 。

具体算法如下:

- 1) 计算整个笔划的平均速度 \bar{V} ;
- 2) 对于笔划上的每个点 P ,计算 P 点的速度 V_P ;
- 3) 如果 $V_P < k \times \bar{V}$, P 为可疑特征点,其中 k 为阈值系数。返回第2步;
- 4) 这一系列连续的点中,速度最小的点 V ,就被选为这一区域的特征点;
- 5) 重复上述过程,直到所有的点都被扫描一遍。

上述算法中, P 点的速度和整个笔划的平均速度分别为:

$$V_P = |PP^+| / T_{PP^+} \quad \bar{V} = \sum |PP^+| / \sum T_{PP^+}$$

阈值的选取对识别的效果有重要的影响;如果阈值过大,可能找到的特征点过密,影响后期基本像素的识别;如果阈值取得过小,则可能丢失一些实际存在的特征点。阈值的选取还存在一个用户适用性的问题:不同的用户绘制的速度可能有较大的出入,因此固定地设置某一个常数作为阈值也是不合适的。本文的做法是阈值取平均笔速的一定比例。这样,既能够找到合适的特征点,又考虑了用户适应性的问题。通过对若干次实验结果的分析 and 调整,我们发现,当阈值取到平均笔速的30%的时候,识别出来的特征点基本上体现了用户的绘制意图,得到令人满意的效果。

3.3 通过曲率寻找特征点

基于笔速的特征点寻找算法简单有效。事实上,在草图中我们还存在曲率这一个重要特征,因此我们引入了基于曲率的特征点寻找算法。和笔速的性质类似,在特征点处,曲率将会有明显的上升,因此我们可以采取与笔速类似的处理来确定特征点。

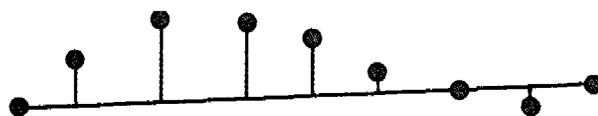


图2 一种曲率的近似计算方法

由于我们的输入资料是一系列离散的点序列和时间序列,而传统的曲率计算方法则要求是一段平滑的曲线,所以首先引入一种近似的曲率计算方法。具体做法是选择一个合适的窗口,对在窗口里面的点序列,将首尾两点相连,然后计算其它各点到相连接成的这条直线的距离之和。当某个点处于这条直线上方时,距离定义为正,反之定义为负(当然也可以自定义)。定义所得的距离和就是该点的绝对曲率。寻找特征点时,曲率曲线的局部极大值对应的就是特征点。计算过程如图2所示。对于窗口为9的一段曲线,连接首尾两点 P_1 和 P_9 ,其它各点 P_i 到这条直线的距离 d_i (直线上方为正,下方为负,具体情况可以自己设定)。定义 P_i 的绝对曲率为:

$$C_i = \sum_{j=1}^9 d_j$$

按照上述过程扫描一遍所有的采样点,就得到了曲线上每一点对应的曲率。然后采用和通过笔速寻找特征点类似的处理方法,通过寻找局部极大值,很容易就得到了通过计算曲率而检测到的特征点。

上述过程中窗口的选取和阈值 S 的选取也是需要实验中不断调整 and 完善的。窗口如果过大,平滑效果就太明显,有可能找不到特征点;如果窗口太小,则可能出现过特征点。实验中选择的分别是15和150。经过实验,发现已经达到令人满意的效果,可以根据大量实验继续调整这两个参数的精确度。

当然,通过上面的分析我们知道,找到的这些特征点并不都是真正的特征点,其中可能包括了某些距离过近的伪折点。对于这些伪折点,我们要去除掉。

3.4 伪折点消除

经过上面的处理过程,知道在特征点处,笔速将会出现局部极小值,而曲率将会出现局部极大值。在分别通过笔速和曲率获得的特征点中存在重合的现象。这里所谓的重合,并不是指通过这两种方法找到的特征点就是同一个点,而是指通过这两种方法获得的特征点对应的是同一个特征点。但是,由于不精确性等客观原因的存在,不能和那个实际的特征点完全重合,实际使用中只需要选择一个更接近实际特征点的那个点,而在系统中将另外一个点消除。

经过上面的一系列处理,我们已经达到了在用户原始的手绘草图中确定特征点的目的。图3给出了手绘草图特征点识别效果实例。

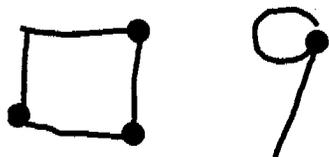


图3 两个手绘草图特征点检测的效果

4 基于 Bézier 曲线的笔划参数化

手绘草图经过上述特征点检测之后,我们就要利用这些特征点用 Bézier 曲线分段拟合,同时利用误差控制调整拟合区段,逼近原始曲线,最大限度地保留草图的原始信息,达到快速同时精确地参数化手绘草图的目的。

4.1 拟合曲线选择

本文的目的在于高效准确地拟合用户手绘的草图,而拟合曲线的选择是影响拟合效果的一个重要因素。拟合曲线要求拟合过程简单快速,拟合误差小,尽量接近原始草图。草图

拟合结果的曲线表示要简单,易于编辑。Shpitalni^[7]提出了用二次曲线拟合算法进行分段点和角点检测的思路。Fitzgibbon^[8]更全面、综合地比较了几种二次曲线拟合算法。目前常用的表示曲线的参数模型主要有三次插值样条、B样条以及 Bézier 曲线等。三次插值样条需要曲线经过每个控制点,这并不是我们需要的。因为我们的目标只是逼近曲线,所以不应该被插值所束缚。B样条则是由若干个混合函数来表示一段曲线,这必然会带来表示形式的复杂和计算量的极大提高,因此也不适合本文的具体要求。

Bézier 曲线具有表示形式单一、可以精确逼近原始曲线的特点,很容易达到我们快速参数化的目的。Bézier 曲线可以选用任何数目的控制点进行拟合,且它们的数目决定了 Bézier 多项式的次数。另外,Bézier 曲线的拟合采用逼近的方法,避免了插值带来的拘泥于样本点而忽视笔划整体特性的问题。同时,拟合又通过首尾两个特征点,从而充分利用了前面寻找到的特征点。因此,我们选择 Bézier 曲线作为我们的参数模型。

4.2 基于 Bézier 曲线的笔划拟合

上述特征点检测算法较为准确地识别出了笔划中的特征点,并且相邻两个特征点之间的笔划相对简单,这为我们下一步参数化表示手绘草图奠定了基础。

如果对 $n+1$ 个样本点的曲线进行拟合,Bézier 曲线拟合的结果是一个 n 次多项式。假设 $n+1$ 个控制点位置分别为: $p_k = (x_k, y_k) \ 0 \leq k \leq n$,那么曲线就可以用下面的公式来表示:

$$P(u) = \sum_{k=0}^n p_k \text{BEZ}_{k,n}(u) \quad 0 \leq u \leq 1$$

其中 $\text{BEZ}_{k,n}(u)$ 是 Bernstein 多项式: $\text{BEZ}_{k,n} = C(n, k) u^k (1-u)^{n-k}$ 。 $u=0$ 和 1 分别对应曲线的首尾两点。

多项式的次数越高,拟合的结果也就越准确,但同时也带来运算量的急剧上升。本文对每段曲线选取4个控制点拟合成一个3次多项式。在特征点检测之后,手绘草图将由特征点分割成若干段。为了充分利用特征点来帮助参数化,我们在每两个特征点之间的那段曲线上用 Bézier 曲线参数化,将两个特征点作为参数化的首尾控制点,其他两个控制点将依赖首尾两个控制点和原始曲线段获得。

Bézier 曲线在起点和终点处分别与控制多边形的第一条边和最后一条边,所以我们在原始曲线段的首尾两点的切线上寻找其他两个控制点,如图4所示。同时,对相邻的两段曲线,前者的最后一个控制点和后者的第一个控制点重合,即前一段曲线的后两个控制点和后一段曲线的前两个控制点落在同一条直线上。这样,我们就解决了相邻两段曲线之间平滑过渡的问题,满足了曲线拟合二阶连续性。

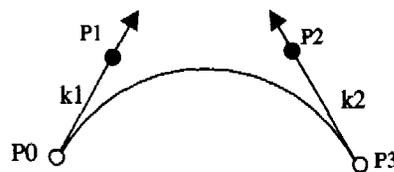


图4 控制点寻找示意图

假设 P_0 和 P_3 是首尾两个控制点, L 是曲线段的长度, k_1 和 k_2 分别是起点和终点的单位切向量,中间两个控制点 P_1 和 P_2 可以由下面的公式计算:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{1}{3}L * k_1 + P_0 \\ P_2 = \frac{1}{3}L * k_2 + P \end{cases}$$

我们选用四个控制点进行三次 Bézier 曲线的拟合。除去首尾两点为曲线分段特征点外,其它两点要求能将曲线均匀地分段,这就是上述公式中系数选择 $\frac{1}{3}$ 的原因。有了这四个控制点之后,我们将其代入 Bézier 曲线的拟合公式,就很容易得到原来曲线段的参数化表示形式。

参数化具体算法是:

- 1) 选取原始曲线的首尾两点 P_0 和 P_3 作为拟合曲线的两个控制点;
- 2) 在以 P_0 为切点的曲线的切线外侧 $L/3$ 处的点 P_1 为控制点;
- 3) 在以 P_3 为切点的曲线的切线外侧 $L/3$ 处的点 P_2 为控制点;
- 4) 利用这 4 个控制点用 Bézier 曲线参数化原始曲线。

针对每段曲线,拟合的结果就是分别关于横坐标和纵坐标的两个如下的三次多项式:

$$\begin{cases} x(u) = \sum_{k=0}^3 x_k C(3, k) u^k (1-u)^{3-k} \\ y(u) = \sum_{k=0}^3 y_k C(3, k) u^k (1-u)^{3-k} \end{cases}$$

化简这两个三次多项式,得到如下的表示形式:

$$\begin{cases} x(u) = (-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)u^3 + (3x_0 - 6x_1 + 3x_2)u^2 + (-3x_0 + 3x_1)u + x_0 \\ y(u) = (-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)u^3 + (3y_0 - 6y_1 + 3y_2)u^2 + (-3y_0 + 3y_1)u + y_0 \end{cases}$$

对于多笔划图形,由于各个笔划之间自然地分隔开,我们只需要在每个笔划上独立地使用上述方法来参数化就可以了。这样,我们就得到了用户手绘草图的参数化表示,为手绘草图的表示建立了一个统一的表示模型: Bézier 曲线。无论对简单的单笔划的几何图元等,还是复杂的多笔划图形都适用。这对高层次的草图识别、草图理解以及草图检索等将有重要的积极意义。

5 误差控制和拟合调整

经过上面的拟合过程,已经得到了曲线的参数化表示。但是为了达到快速参数化的目的,只是选取了 4 个点作为拟合曲线的控制点,这就必须要面对由此带来的拟合曲线与原始曲线的误差问题。

计算原始曲线和拟合曲线之间的误差,最直接的方法就是计算两条曲线之上所有对应点之间的距离之和。这种方法比较精确,但是计算量太大,同时误差的表示采用绝对量,难以体现图形的整体特征。所以,根据本文采用的拟合算法的具体特点,即选择 4 个控制点来拟合曲线,我们提出了一种近似的误差计算方法,同时以“最简单最相似”为原则进行控制调整。

5.1 误差的计算方法

Bézier 曲线拟合的一个特点就是原始曲线和拟合曲线在首尾两个点处是重合的,同时本文选取了 4 个控制点进行拟合,因此基于这两点考虑,我们选择中间两个点作为关键点来近似计算误差。定义原始曲线上中间两点分别为 P_1 和 P_2 ,由于这两个点是在原始曲线上均匀选取的,所以我们选择在

拟合曲线上也均匀选取两个点 P'_1 和 P'_2 ,分别计算 $P_1P'_1$ 和 $P_2P'_2$ 的长度 d_1 和 d_2 之和,作为原始曲线和拟合曲线之间的误差,如图 5 所示。图中实线是原始曲线,虚线是拟合之后的曲线。

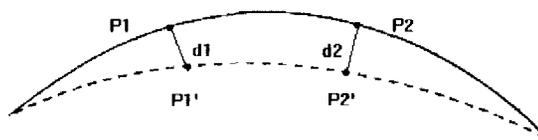


图 5 原始曲线和拟合曲线误差示意图

拟合曲线上的中间两个点是拟合方程中 $u=0.33$ 和 $u=0.66$ 时取的样本点。 d_1 和 d_2 之和就可以近似被认为是这两条曲线之间的误差。但是这种完全依靠绝对长度来衡量误差存在很大的局限性,对两个大小不同的图形都用绝对长度来衡量误差的话,显然是不合适的。因此,有必要引入一个参数来平衡绝对长度带来的问题。本文引入原始曲线的长度的倒数 $1/L$ 作为误差系数,最终得到了以下形式表示的误差:

$$E = (d_1 + d_2) / L$$

5.2 误差控制算法

我们采用了“最简单最相似”为原则对误差进行控制调整。所谓“最简单最相似”,就是在每个单段曲线拟合误差不超过给定阈值的前提下,手绘草图将由最少段数的 Bézier 曲线构成。

若误差超过给定阈值,则表明 4 个控制点不足以充分地表征该段曲线的特征,因此有必要引入更多的控制点。但是引入更多的控制点意味着参数模型的次数要提高,计算复杂度也将会极大的增加,同时曲线的参数表示形式也将不再统一。为此,我们考虑将曲线分成若干段,在每段上再选取 4 个控制点,重新用 Bézier 曲线参数化。由于这若干段曲线都由 4 个控制点来表征其特征,原始曲线的特征将会由更多的控制点来表征。在不增加参数模型的次数的前提下,达到了最大限度逼近原始曲线,更加准确地体现用户意图的目的。

控制调整中曲线的分段是一个递归的过程,即如果分段之后参数化的曲线的误差仍然过大,分段的过程仍将继续下去,直到误差在给定的阈值范围之内。这个过程中涉及到分段的段数和调整的次数问题,段数越多,则调整次数越少,反之亦然。为了达到两者平衡,本文选择每次将曲线分成 3 段,在我们的系统中取得了较好的效果,调整的次数一般不超过两次。如图 6 所示,圆经过 Bézier 曲线参数化后,初次拟合的曲线与原始曲线之间存在较大的误差,因此需要进行误差控制。按照本文的策略,曲线将被分成 3 段,在每段上重新用 Bézier 曲线进行拟合,拟合之后继续计算每段的误差,此时所有的误差都在给定的阈值范围之内,控制调整过程结束。整个过程控制调整次数为 1,分段段数为 3。图中的点用来分隔各段曲线,经过控制调整后原始曲线被分成 3 段。



图 6 原始曲线、初次拟合后的曲线以及误差控制后的曲线

6 实验设计及结果分析

本文的参数化方法不仅适合于简单的单笔划草图的拟合,也适合于复杂笔划或是多笔划草图的拟合。在保证拟合

精度的前提下,还具有很高的效率。图 7 是本实验所选取的几个输入草图,其中既有简单的单笔划草图,也有包括多个基

本图元以及多种基本图元空间关系的复杂笔划,还有复杂多笔划草图。

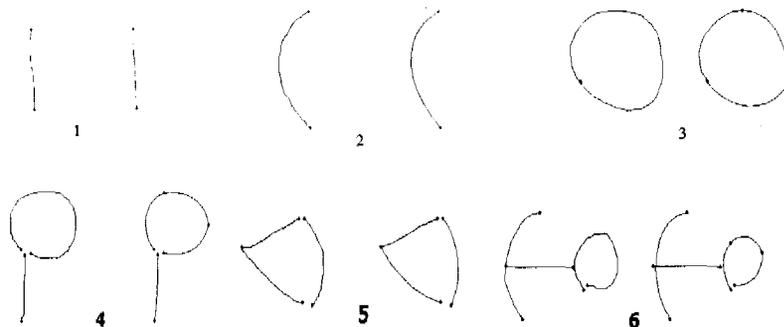


图 7 草图参数化拟合示例(左侧为原始草图,右侧为拟合效果)

简单的基本图元,例如直线、弧等,用 Bézier 曲线参数化仅仅需要一段就能达到很好的效果,精确地再现用户的绘制过程,达到了完整保存原始信息的目的。对于不能用一段 Bézier 曲线参数化的较为复杂的曲线,由于我们采取了误差控制策略,选择 0.2 作为误差阈值,原始曲线将会分成若干

段,在每段基础上单独进行参数化(如圆将会由 3 段 Bézier 曲线参数化)。这样,不管是基本的几何图元,还是较为复杂的多笔划组合图形,在误差控制调整下,都将快速地逼近原始曲线,精确地表示用户的手绘信息。

表 1 手绘草图误差控制分析表

图形编号	笔画数	分段拟合的曲线段数	调整次数	需控制调整的曲线段数	参数化时间(ms)	控制调整前的误差	控制调整后各段的误差
1	1	1	0	0	0.016	0.0802	0.0802
2	1	1	0	0	0.047	0.0510	0.0510
3	1	1	1	1	0.078	0.4158	0.0438, 0.0329, 0.0472
4	2	2	1	1	0.109	0.0768 0.4392	0.0768 0.0367, 0.0429, 0.0392
5	2	3	0	0	0.096	0.0754 0.0796 0.0634	0.0754 0.0796 0.0634
6	3	3	1	1	0.171	0.0718 0.0803 0.4379	0.0718 0.0803 0.0438, 0.0397, 0.0517

图 7 中各个图形在误差控制调整前后的误差的比较,如表 1 所示。对于参数化后误差在阈值之上的那些曲线段,我们递归地将其分成 3 段来分别进行参数化,直到误差在给定阈值范围之内。表中列出了误差控制前后误差的对比,通过误差控制和调整,不管是简单的单笔画图形直线,弧等,还是较为复杂的多笔画图形,我们都成功地将误差限制在阈值之内,最大限度地逼近了原始图形。同时,整个控制调整的过程非常快速。在上面的实验中,调整次数最多只需要 1 次,即使对较为复杂的多笔划图形,参数化所花的时间也在 1ms 之内,因此非常适合在线的草图表示。以上的实验结果表明,通过对手绘草图进行 Bézier 曲线拟合,并利用误差控制策略递归地减小误差,不断逼近原始曲线,成功地达到了对手绘草图快速参数化的目标。

总结 本文提出了一种基于 Bézier 曲线的手绘草图参数化方法,实现了一种统一的草图参数化表示方法。该方法依据最简单相似的原则,提出了先分段再拟合的思想。在笔划分段部分采利用速率和曲率寻找到笔划的特征点,由特征点将复杂笔划分成简单的多段,每一段由一条或几条 Bézier 曲线来拟合。本文的误差控制方法,保证了拟合的结果最大限度地接近用户的原始笔划,充分保留了用户绘图的原始过程信息。实验证明,本文的方法对于复杂笔划和多笔划复杂

草图都有很好的拟合效果,并且时间开销小,具有很高的效率。

参考文献

- 1 孙建勇,金翔宇,彭彬彬,等.一种快速在线图形识别与规整化方法.计算机科学,2003,30(2):172~176
- 2 Sezgin T M, Stahovich T, Davis R. Sketch Based Interfaces: Early Processing for Sketch Understanding. In: PUI 2001 (Orlando FL, 2001), ACM Press
- 3 Calhoun C, Stahovich T F, Kurtoglu T, et al. Recognizing Multi-Stroke Symbols. In: 2002 AAAI Spring Symposium-Sketch Understanding(Palo Alto CA, 2002), AAAI Press. 15~23
- 4 Lee J J, Kim J, Kim J H. Data driven design of hmm topology for online handwriting recognition. In: Proc. of the 7th International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, Amsterdam, 2000. 239~248
- 5 Peng B B, Sun Z X, Xu X G. SVM-based Incremental Active Learning for User Adaptation For Online Graphics Recognition system. In: The First Intl. Conf. on Machine Learning and Cybernetics 2002, 2002. 1379~1386
- 6 Pavlidis T. Structural Pattern Recognition. Berlin; Springer-Verlag Press, 1977
- 7 Shpitalni M, Lipson H. Classification of Sketch Strokes and Corner Detection using Conic Sections and Adaptive Clustering. Trans of ASME J of Mechanical Design, 1997, 119(2): 131~135
- 8 Fitzgibbon A W, Fisher R B. A buyer's guide to conic fitting. In: Proc. of British Machine Vision Conf. Birmingham, 1995