基于时空关系的在线多笔画手绘折线段曲线识别

王淑侠 王关峰 高满屯 余隋怀
(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘 要 基于在线笔画的时空关系对多笔画手绘折线段曲线进行识别,先基于时间间断对笔画序列进行多笔画预处理,然后详细讨论基于空间关系的多笔画手绘折线段的识别问题。将折线段的多笔画识别分为折线段与直线段的多笔画识别和折线段间的多笔画识别。在讨论折线段与折线段间的多笔画绘制时,给出点与折线段及两条折线段间相互位置关系的一系列概念。提出通过两条折线段之间的位置关系和点与折线段的位置关系等进行折线段的多笔画判定,并给出详细的聚类算法。最后通过自主开发的FSR系统对提出的算法加以验证。

关键词 在线,手绘图,多笔画识别,折线段,时空关系
中图法分类号 TP391.4 **文献标识码** A

Interpretation of Online Multistroke Sketching with Polylines Based on the Time-space Relationship

WANG Shu-xia WANG Guan-feng GAO Man-tun YU Sui-huai
(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract This paper presented a novel method for interpreting multistroke freehand sketching with polylines. The multistrokes were interpreted as sketch content and were used to generate 2D geometric primitives. The pretreatment approach proposed is able to interpret the dashed or continuous strokes. The polylines multistroke interpretation is classified as two parts. One is made of the polylines and straight lines and the other is made of polylines and polylines. Some new conceptions are defined for discussing the latter. The corresponding algorithms are given for interpretation of online multistroke sketching. This paper developed a human-computer interface prototype system FSR using the proposed theory, which makes system interface easy to use. The FRS system was tested with a number of multistroke sketches. And the test results show that the algorithm achieves a satisfactory interpretative efficiency.

Keywords Online, Freehand sketching, Multistroke interpretation, Polyline, Time-space relationship

1 引言

随着对数字化设计自动化要求的提高,人们不仅希望计算机能够从事CAD设计中详细设计阶段的工作,而且希望通过计算机将概念设计与详细设计阶段进行自动融合,从而将CAD技术延伸到设计全过程。为此,人们已经开始设计早期阶段——具有抽象、模糊和非精确特征的草图设计过程寻求计算机智能支持。随着设计思维、草图理解、草图行为等的交叉学科研究不断深入,其已成为设计领域的一个重要研究方向。草图信息的模糊性、用户输入的随意性使草图本身存在一定误差,导致草图与用户的设计意图产生一定偏差,这给计算机解释草图带来很大困难。在线草图解释的目标是在用户绘制约束最小的情况下,达到最佳的解释效率和效果[1]。该领域的研究是实现计算机辅助概念设计及真正意义上3D场景输入研究所必需渡过的难关。研究成果有重要的理论价值,可应用于计算机辅助设计、概念设计、人机交互及计算机视觉系统等,该领域的研究必将对数字化设计自动化水平的提高起到推动作用。

目前国内外学者对在线手绘图识别主要集中在单笔画领域,要求设计师通过一条笔画绘制需要表达的线条。但对草图进行多笔画重复绘制是概念设计阶段的一个特色,如果对设计师的设计过程进行约束,则会影响设计师的灵感。在实际过程中,设计师对线条的设计往往通过先绘制一条初始曲线,而后在已有线条基础上进行修改来得到一条需要的线元,对这类多笔画绘制草图的识别,当前的研究并没有很好的处理方式[2]。SMARTPAPER[3]将多笔画识别分为计算端点之间的距离和笔画的斜率,但手绘图仅限于直线段输入,且该系统假定用户输入的均为正确笔画,不能对其作出评价,这不符合概念设计的要求。3D SKETCH[4]支持多笔画绘制和带阴影的草图输入,草图被分为笔画和阴影,该系统虽然能识别多笔画,却没有讨论如何将笔画与阴影进行区分。有一些系统支持多笔画绘制,但不能将它们解释成草图的一部分,如文献

到稿日期:2011-11-13 返修日期:2012-02-20 本文受国家自然科学基金(51105310)资助。
王淑侠(1978-),女,博士,讲师,主要研究方向为计算机视觉、在线手绘图解释、虚拟服装设计,E-mail:2008wangshuxia@163.com;王关峰(1978-),男,工程师,主要研究方向为计算机辅助设计、信号处理;高满屯(1962-),男,教授,主要研究方向为计算机图形图像处理、计算机视觉;余隋怀(1962-),男,博士生导师,主要研究方向为计算机辅助概念设计、人机交互技术。

[5]通过滤掉多笔画绘制中比规定尺寸小的笔画，生成一个简单的近似图形，而不是将小笔画作为草图的一部分进行解释。文献[6]根据图像处理技术进行多笔画符号的识别，但它依靠于符号库的设计，且没有单笔画识别功能。文献[7]中，多笔画绘制仅能被识别为操作命令。Sezgin 研究单笔画重复绘制的草图识别问题，该方法将笔画的有序点列变为无序点列，使其适用于单笔画重复绘制，理论上不属于多笔画重复绘制[8]。CALI 要求绘制的多笔画必须在时间上连续且前一笔的抬笔时间和后一笔的落笔时间必须在一个时间间断内[9]。叶葳玮[2]提出一种通过记录设计师绘制的所有草图数据，按图像处理的边缘提取算法得到目标草图，再通过分析原始草图数据计算得到目标草图的特征数据。该方法对于多笔画绘制能较好地得到设计师想要表达的线条，但该算法仅针对整体草图较为简单的图形，对于整体复杂、噪音大的草图需要进一步研究。孙正兴等人[1]提出按多笔画的绘制顺序将草图中每一笔的落点与下一笔的起点用线段连接，从而将整个草图连成一条连续线条。处理后的信息一部分是笔画（即用户所画的部分），另一部分是关系（即系统根据上述规则加上的部分）。这样把多笔画转换成单笔画，可采用单笔画特征抽取方法对其进行抽取，解决了笔画间相对位置关系问题。但该方法必然带来不必要的分割负担，使识别过程复杂化。Day 基于空间几何关系对多笔画识别进行了深入研究，由于其只考虑空间关系，未考虑时间上的连续性，导致计算时间偏长且该方法无法识别虚线和解决断点续连问题[10]。文献[11]提出了利用时空关系的同类型线元间二次曲线的多笔画识别，该方法可以很好地解决封闭及非封闭二次曲线的多笔画绘制问题，但未讨论其它线元的多笔画绘制问题。

文中首先给出一些基本概念及预处理方法，然后针对折线段曲线的多笔画识别方法加以讨论。文中采用作者提出的基于模糊理论的的单笔画识别方法[12]进行草图识别，并在作者所在团队自主开发的 FSR 原型系统上加以验证和实现。

2 预处理

为讨论在线多笔画手绘折线段曲线的识别，本节首先给出一些基本概念，然后介绍基于时间关系的多笔画预处理方法。

2.1 基本概念

为便于下面讨论，给出折线段的一些基本概念。依次将点序列 $Z=\{z_i;0\leqslant i\leqslant d\}$ 进行连接而成的曲线称为一条折线段，该序列称为折线段的折点序列，其中 z_0，z_d 分别为折线段的首点和尾点，z_i 称为折线段的折点，i 为该折点在折线段中的点号；以折点 z_i 为起点，z_{i+1} 为终点形成的直线段，称为折线段的一个子段，简称为子段，i 称为该子段在折线段中的段号；将所有子段长度的总和称为折线段长度。

笔画：将鼠标按键、移动、松键过程中由采样点序列形成的一条轨迹称为笔画，并将第一个和最后一个采样点分别称为笔画的起点和终点。

线元：表示为单纯线型的最基本的几何线条称为线元，文中折线段曲线包括直线段、折线段。

多笔画：由几条笔画构成一个线元，称为多笔画绘制，简称多笔画。

草图：多笔画绘制构成的图形称为一个草图，可用集合 $Sc=\{S_i;0\leqslant i\leqslant n\}$ 表示。

拟合折线段（PLine）：将笔画的采样点序列按照某种拟合方式进行折线段拟合得到的折线段。

多笔画拟合折线段（M_PLine）：将多笔画绘制中各笔画的采样点序列的集合按照某种拟合方式进行折线段拟合得到的折线段。

带虚实线型的折线段：已知折线段的起点 ps、终点 pe、折点序列 $*pm$ 和线型序列 $*lt$，则该折线段的表达式为式(1)。ps、pe 确定折线段的首位点位置，$*lt$ 确定折线段从起点所在子段开始的每个子段的线型。

$$Pz:Pseg(ps,*pm,pe,*lt) \tag{1}$$

2.2 多笔画预处理

基于时间关系的多笔画预处理的目的是将时间上连续的多笔画绘制尽可能地按一条笔画进行识别，从而解决断点续连、重复绘制和虚线等绘制问题。

连续绘制的两条笔画其前一笔终点和后一笔起点的绘制时间间隔，称为这两笔画的时间间断，简称时间间断。若单纯采用时间间断作为判断时间上连续的两条笔画是否应合并的准则，则需严格要求用户在绘制多笔画时两笔之间的时间间断必须小于某阈值，从而对用户输入的随意性造成限制。为了给用户更大的绘制自由，分析发现用户在绘制时间上连续的多笔画时，一般前笔终点与后一笔起点位置相距很近。故文中通过增加空间约束信息，来保证用户更大的绘制自由度。

连续绘制的两条笔画其前一笔终点和后一笔起点之间的距离，称为这两条笔画的距离间断，简称距离间断。通过时间间断和距离间断共同对时间上连续的笔画进行多笔画判断。为解决不同绘制速度下阈值固定导致的问题，使用自适应阈值 ζ_1、ζ_2（分别与前一条笔画中相邻折点的时间间隔和距离的平均值有关）来进行处理。若连续的 n 条笔画其时间间断均小于自适应阈值 ζ_1，且距离间断均小于自适应阈值 ζ_2，则将其判定为可以合并的多笔画绘制。

若通过预处理将几条笔画判定为多笔画绘制，则按一条笔画对其进行识别，其识别结果的线型可能为实线也可能为虚线，若为虚线，则需通过创建虚线画刷进行显示输出。文中通过草图中笔画的条数 n、草图中笔画的总长度 Ls 和广义笔画长度 Lg 来简单地对识别结果的线型是否为虚线进行判定。思路如下，若草图中各条笔画的平均长度大于一个给定阈值或笔画数 n 小于给定阈值，则线型被判定为实线；若由 Lg 与 Ls 差值得到的草图中各相邻笔画间的间隔总长度大于草图笔画的平均长度，则为虚线，否则为实线。

3 折线段曲线的多笔画识别

它由至少两条笔画构成，且每条笔画的识别结果均为折线段曲线[11]，同时至少有一条为折线段，两者间至少构成一

组直线段的多笔画绘制，包括折线段与直线段、折线段与折线段的多笔画绘制，下面依次对其进行讨论。

3.1 折线段与直线段的多笔画识别

折线段与直线段的多笔画绘制是指两条笔画的单一线元识别结果为直线段与折线段，且直线段与折线段中的某一子段之间符合多笔画直线段的绘制要求，其识别算法如下：

Step1 判断直线段是否与折线段中某条子段构成直线段的多笔画绘制，若构成，则对其进行直线段的多笔画识别得到多笔画拟合直线段 LL，并记录该子段的段号 j；若不构成，则判定不是多笔画绘制，进入 Step4。

Step2 若拟合折线段的第 j 个子段不是折线段的首尾段，则通过 LL 所在直线与段号为 $j-1$ 和 $j+1$ 的子段所在直线求交，连接两个交点得到的直线段作为修正后的第 j 个子段，并对相邻的两条子段进行相应调整，从而保持折线段的连接性。

Step3 若拟合折线段的第 j 个子段是折线段的首段或尾段，则将 LL 所在直线与唯一相邻的一个子段所在的直线求交点，并将其作为该子段的一个端点。若该子段为拟合折线段的首段，则将 LL 的起点作为多笔画拟合折线段的起点；若该子段为拟合折线段的尾段，则将 LL 的尾点作为多笔画拟合折线段的尾点。

Step3 折线段与直线段对应的笔画构成多笔画拟合折线段的草图，同时将直线段对应的笔画从链表中去除。

Step4 结束。

3.2 折线段与折线段的多笔画识别

在讨论折线段与折线段间的多笔画绘制问题前，先给出点与折线段及两条折线段间的相互位置关系的一些相关概念。

点在折点处：点与折线段的某个折点的距离小于自适应阈值时，自适应阈值可以通过实验或经验来确定，本文取折线段中最短子段长度的一半作为阈值，否则称为点不在折点处。

点在子段上：若点不在折点处，但点到折线段中某一条子段的垂足在该子段上且垂直距离小于自适应阈值，自适应阈值可以通过实验或经验来确定，本文取折线段中最短子段长度的 1/4。

直线段与折线段相交：折线段至少存在一个子段与直线段相交，即某一子段所在直线与直线段所在直线相交且交点既在该子段上又在直线段上。

两条折线段相交：折线段 A 中至少存在一个子段与折线段 B 相交。

若折线段 A 上的段号连续的部分子段 $\{L_A(i),L_A(i+1),\cdots,L_A(m)\}$ 均与折线段 B 上段号连续的部分子段 $\{L_B(j),L_B(j+1),\cdots,L_B(n)\}$ 构成直线段的多笔画绘制，且用多笔画拟合直线段修正两条折线段后折线段的形态无变化，则将两条折线段称为顺延关系。若 $L_A(i)$、$L_A(m)$ 均为首尾段或 $L_B(j)$、$L_B(n)$ 均为首尾段，则称为内部顺延；若 $L_A(i)$、$L_A(m)$ 中有且仅有一个为首尾段，且 $L_B(j)$、$L_B(n)$ 中有且仅有一个为首尾段，则称为外部顺延。将内部顺延和外部顺延均称为完全顺延，否则称为部分顺延。

若折线段 A、B 为内部顺延关系，将 $L_B(j)$、$L_B(n)$ 均为首尾段的内部顺延称为 A 包含 B；将 $L_A(i)$、$L_A(m)$ 均为首尾段的内部顺延称为 B 包含 A。

交叉：两条折线段相交，但不顺延。互立：两条折线段不相交，且不顺延。图 1 为折线段间位置关系的示意图。

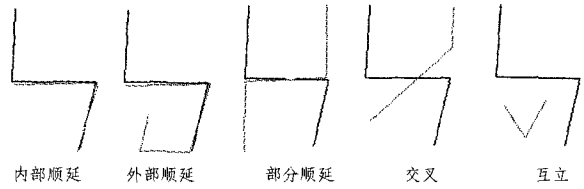


图 1 折线段间位置关系的示意图

两条折线段之间的位置关系包括：顺延、交叉和互立。顺延分为：完全顺延和部分顺延，其中前者分为外部顺延和内部顺延。图 2 为两条折线段的位置关系分类。按照定义可知，只有顺延需要讨论折线段的多笔画识别问题。

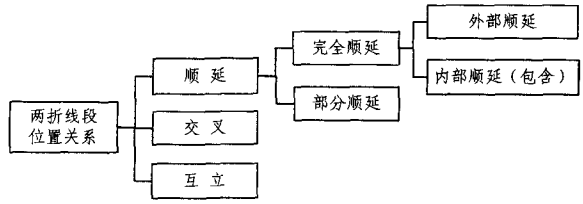


图 2 两条折线段的位置关系分类

若点在折点处或子段上则称点在折线段上，否则称为点不在折线段上。因此，点与折线段的位置关系包括点在折点处、点在子段上和点不在折线段上，分别标记为 -1、1 和 0。若点在折线段上，则称该点可以和折线段聚合，简称可聚合，并将该点称为聚合点；否则称为不可聚合。

设两条笔画的拟合折线段为 F_1、F_2，其对应的折点数为 T_1、T_2，其第 i 个子段分别用 $L_1(i)$、$L_2(i)$ 表示。设 F_1 的首尾点与 F_2 的关系为 b_{s1}、b_{e1}，对应 F_2 的点号或段号为 n_{s1}、n_{e1}；F_2 的首尾点与 F_1 的关系为 b_{s2}、b_{e2}，对应 F_1 的点号或段号 n_{s2}、n_{e2}。

通过讨论折线段首尾点与另一条折线段的位置关系，来确定两条折线段间的相互位置关系。若两条折线段为完全顺延，则 $|b_{s1}|+|b_{e1}|\geqslant 1$ 且 $|b_{s2}|+|b_{e2}|\geqslant 1$；若两条折线段为内部顺延，则 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=2$（F_2 包含 F_1）或 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=2$（F_1 包含 F_2）；若两条折线段为外部顺延，则 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=1$ 且 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=1$；若折线段 F_1 包含 F_2，则可知 $T_1\geqslant T_2$，且 F_2 的所有折点均与 F_1 可聚合；若折线段 F_2 包含 F_1，则可知 $T_1\leqslant T_2$，且 F_1 的所有折点均与 F_2 可聚合。由上述条件可知，若 $|b_{s1}|+|b_{e1}|+|b_{s2}|+|b_{e2}|\geqslant 2$，则初步判定两条折线段可能为完全顺延；若 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=2$ 或 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=2$，则可能为内部顺延；若 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=1$ 且 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=1$，则可能为外部顺延。

3.2.1 内部顺延识别

若 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=2$ 或 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=2$，则需讨论折线段 F_1、F_2 是否为内部顺延。假定 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=2$（$|b_{s2}|+|b_{e2}|=2$ 同理），即 F_2 可能包含 F_1，内部顺延识别算法如下：

Step1　若 $T_1>T_2$，则判定 F_2 不包含 F_1，进入 Step5；

Step2　若 F_1 存在折点与 F_2 不可聚合，则判定 F_2 不包含 F_1，进入 Step5；

Step3　若 F_1 所有折点与 F_2 均可聚合，则需要判断 F_1 对于 F_2 的所有可聚合点的点号是否连续且 F_2 对于 F_1 的所有可聚合点的点号是否连续，若均连续，则判定 F_2 包含 F_1；否则判定 F_2 不包含 F_1，进入 Step5；

Step4　若 F_2 包含 F_1，则依次对 F_1 的子段与 F_2 的对应子段分别进行直线段的多笔画拟合，通过多笔画拟合直线段对 F_2 进行修正，最终得到多笔画拟合折线段；

Step5　若 F_2 不包含 F_1，则 F_1、F_2 不是内部顺延；否则为内部顺延，结束。

若 F_1、F_2 为内部顺延关系，则判定为多笔画绘制，通过上述处理可得到多笔画拟合折线段。用多笔画拟合折线段代替 F_2，并将 F_1 对应的笔画加入到 F_2 对应的草图中去。

3.2.2　外部顺延识别

若 $|b_{s1}|+|b_{e1}|=1$ 且 $|b_{s2}|+|b_{e2}|=1$，则需要讨论两条折线段是否为外部顺延，其可能的位置关系如图 3 所示。

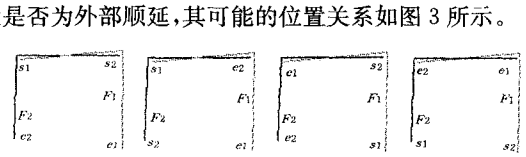


图 3　外部顺延关系的可能位置示意图

首先创建两个用于存储折点的链表 f_1 和 f_2。设 ff 为一条折线段，折点个数记为 T_f，其第 i 个子段标记为 $L_f(i)$，F_{12} 用于存储多笔画拟合折线段折点的链表。两条拟合折线段 F_1、F_2 是否为外部顺延的判定算法如下：

Step1　若 F_1、F_2 的聚合点均为起点，则 $|b_{s1}|=1$、$|b_{e1}|=0$、$|b_{s2}|=1$、$|b_{e2}|=0$，否则转入 Step6；

Step2　若 $b_{s1}=-1$，则将 F_2 的第 $[0,n_{s1}]$ 折点依次存入 f_2，否则 $b_{s1}=1$，将 F_2 的第 $[0,n_{s1}+1]$ 折点依次存入 f_2；

Step3　若 $b_{s2}=-1$，则将 F_1 的第 $[0,n_{s2}]$ 折点依次存入 f_1，否则 $b_{s2}=1$，将 F_2 的第 $[0,n_{s2}+1]$ 折点依次存入 f_1；

Step4　若 f_1 和 f_2 是内部顺延关系，则判定 F_1、F_2 为外部顺延关系，将 f_1 和 f_2 进行内部顺延处理得到的多笔画拟合折线段用 ff 表示，将 ff 首尾点中距离 f_2 链表中 T_f-1 折点较近的点定义为起点；否则 F_1、F_2 不是顺延关系，转入 Step13；

Step5　若 F_1、F_2 为顺延关系，则需将 F_1、F_2 和 ff 进行合并，将 F_2 中折点 $[T_f,T_2-1]$ 倒序存入 F_{12}；将 $L_2(T_f-1)$ 与 $L_f(0)$ 所在直线的交点作为修正后的折点存入 F_{12}；将 ff 中折点 $[1,T_f-1]$ 依次顺序加入 F_{12}；然后将 $L_1(T_f-1)$ 与 $L_f(T_f-2)$ 所在直线的交点作为修正后的折点存入 F_{12}；将 F_1 中折点 $[T_f,T_1-1]$ 顺序存入 F_{12}，转入 Step13；

Step6　若 F_1 的聚合点为起点，F_2 的聚合点为终点，即 $|b_{s1}|=1$、$|b_{e1}|=0$、$|b_{s2}|=0$、$|b_{e2}|=1$，则转入 Step7，否则转入 Step11；

Step7　若 $b_{s1}=-1$，则将 F_2 的第 $[n_{s1},T_2-1]$ 折点依次存入 f_2；否则 $b_{s1}=1$，将 F_2 的第 $[n_{s1}-1,T_2-1]$ 折点依次存入 f_2；

Step8　若 $b_{s2}=-1$，则将 F_1 的第 $[0,n_{e2}]$ 折点依次存入 f_1，否则 $b_{s2}=1$，将 F_2 的第 $[0,n_{s2}+1]$ 折点依次存入 f_1；

Step9　若 f_1 和 f_2 是内部顺延关系，则判定 F_1、F_2 为外部顺延关系；将 f_1 和 f_2 进行内部顺延处理得到的多笔画拟合折线段用 ff 表示，将 ff 首尾点中距离 f_2 链表中 T_2-T_f 折点较近的点定义为起点；否则 F_1、F_2 不是顺延关系，转入 Step13；

Step10　若 F_1、F_2 为顺延关系，需要将 F_1、F_2 和 ff 进行合并，将 F_2 中折点 $[0,T_2-T_f-1]$ 顺序存入 F_{12}；将 $L_2(T_2-T_f-1)$ 与 $L_f(0)$ 所在直线的交点作为修正后的折点存入 F_{12}；将 ff 中折点 $[1,T_f-1]$ 依次顺序加入 F_{12}；将 $L_1(T_f-1)$ 与 $L_f(T_f-2)$ 所在直线的交点作为修正后的折点存入 F_{12}；将 F_1 中折点 $[T_f,T_1-1]$ 顺序存入 F_{12}，转入 Step13；

Step11　若 F_1 的聚合点在终点，F_2 的聚合点在起点，即 $|b_{s1}|=0$、$|b_{e1}|=1$、$|b_{s2}|=1$、$|b_{e2}|=0$，处理方法与 F_1 的聚合点为起点，F_2 的聚合点为终点雷同，不再赘述；

Step12　若 F_1、F_2 的聚合点均在终点，即 $|b_{s1}|=0$、$|b_{e1}|=1$、$|b_{s2}|=0$、$|b_{e2}|=1$，处理方法与 F_1、F_2 的聚合点均为起点雷同，不再赘述；

Step13　结束。

若 F_1、F_2 被判定为外部顺延，则判定其为多笔画绘制，通过上述处理可得到多笔画拟合折线段。用 F_{12} 取代折线段 F_1，并将 F_2 对应的原始笔画加入到 F_1 对应的草图中去。

3.2.3　部分顺延识别

通过折线段的完全顺延处理后，需要对折线段进行部分顺延识别。设两条笔画的单一线元识别结果分别为折线段 F_1 和折线段 F_2，其对应的子段序列分别为 $\{L_1(i);0\leqslant i<u_1\}$ 和 $\{L_2(j);0\leqslant j<u_2\}$，部分顺延算法如下：

Step1　依次将 F_1 对应的子段 $L_1(i)$ 与折线段 F_2 对应的子段 $L_2(j)$ 进行直线段的多笔画判定。

Step2　若 F_1、F_2 中对应的第 i、j 子段构成多笔画直线段，则采用直线段的多笔画拟合，并用前面介绍的方法对 i、j 段进行修正。以第 i、j 子段分别将折线段 F_1、F_2 分为 3 部分，如 F_1 被分为由点号为 $[0,i-1]$ 折点构成的折线段、修正后的第 i 段和由点号为 $[i,u_1]$ 折点构成的折线段。

Step3　结束。

通过上述处理既可以有效地保证折线段的连接信息不被破坏，又可以最大限度地释放用户的绘制自由度。对上述方法进行适当修改便可以处理折线段内部的部分顺延问题。若笔画的单一线元识别结果为折线段，且该折线段不是一笔重复绘制的折线段，则需要判断其是否为折线段自身的部分顺延，其算法同折线段与折线段的部分顺延识别方法。

4　算例

理论上折线段的多笔画绘制的线型存在相同和不同线型的多笔画绘制，但一般用户在绘制存在这两种线型组成的线段时，习惯上会将其绘制为一条虚直线段和一条实直线段的组合，而不会将其绘制为两条折线段的某一子段的组合。因

此文中只讨论相同线型进行多笔画绘制，如出现不同线型的折线段的多笔画绘制问题，则将折线段长度较长的线型作为多笔画拟合折线段的线型。在 FSR 系统中，为方便定义折线段，将 lt 取为整数，当 lt 为负时，线型为实线，否则为虚线。

图 4 为由 10 条笔画构成的时间上连续的多笔画绘制的虚折线段。其中图 4(a)为手绘输入的 10 条笔画的草图，其识别结果为虚折线段；图 4(b)给出了识别结果与原草图的比较；图 4(c)为最终识别得到的虚折线段。识别过程的各参数如表 1 所列。

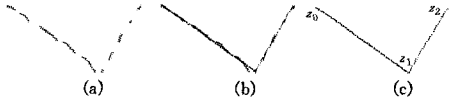


图 4　多笔画绘制虚折线段的识别

表 1　多笔画绘制虚折线段的多笔画绘制及识别过程参数表

笔序	采样点数	笔画首尾点(X,Y,t)
1	11	s_1(537,166,266.42),e_1(558,178,266.59)
2	15	s_2(572,185,266.77),e_2(593,207,266.95)
3	17	s_3(624,223,267.13),e_3(670,259,267.34)
4	14	s_4(686 264,267.49),e_4(718,293,267.66)
5	13	s_5(739,316,267.83),e_5(772,346,268.00)
6	6	s_6(790,350,268.36),e_6(792,342,268.52)
7	11	s_7(812,313,268.72),e_7(819,293,268.84)
8	11	s_8(835,263,269.00),e_8(842,245,269.14)
9	8	s_9(864,212,269.33),e_9(866,207,269.50)
10	10	s_{10}(887,174,269.69),e_{10}(894,166,269.88)
M_PLine(X,Y)		z_0(539,162),z_1(790,346),z_2(891,164)

图 5 为由 3 条笔画构成的折线段与直线段的多笔画绘制。其中图 5(a)为第 1 条输入笔画(笔画 1)，其识别结果为折线段，如图 5(b)所示；图 5(c)为在笔画 1 的基础上绘制的第 2 条笔画(笔画 2)，其识别结果为直线段，如图 5(d)所示；图 5(e)为在笔画 1、2 的基础上绘制的第 3 条笔画(笔画 3)，其识别结果为直线段，如图 5(f)所示；笔画 1、2、3 的多笔画识别结果为折线段，如图 5(g)所示；图 5(h)为多笔画拟合折线段与 3 条笔画的比较。识别过程的各参数详如表 2 所列。

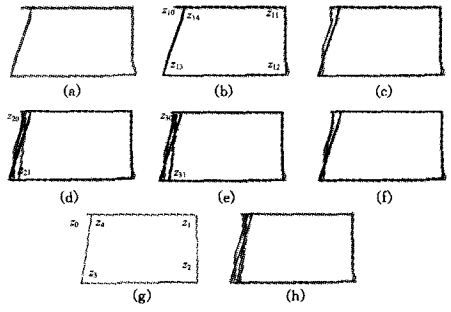


图 5　折线段与直线段的多笔画绘制过程

表 2　折线段与直线段的多笔画绘制过程参数表

笔序	类型	线型	拟合折线段曲线的折点序列坐标
笔画 1	F	实	z_{10}(493.00,334.00),z_{11}(715.23,334.00),z_{12}(718.41,472.95),z_{13}(469.22,475.53),z_{14}(513.05,337.65)
笔画 2	L	实	z_{20}(498.84,339.53),z_{21}(475.04,468.27)
笔画 3	L	实	z_{30}(503.65,338.26),z_{31}(490.47,471.05)
M_PLine	F	实	z_0(493.00,334.00),z_1(715.23,334.00),z_2(718.41,472.95),z_3(484.69,475.37),z_4(504.16,335.63)

图 6 为由两条笔画构成的折线段与折线段外部顺延的多笔画绘制。其中图 6(a)为第 1 条输入笔画(笔画 1)，其识别结果为折线段，如图 6(b)所示；图 6(c)为在笔画 1 的基础上绘制第 2 条笔画(笔画 2)，其识别结果为折线段，如图 6(d)所示；笔画 1、2 的多笔画识别结果为折线段，如图 6(e)所示。识别过程的各参数如表 3 所列。

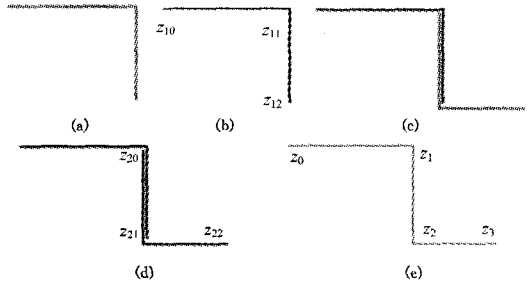


图 6　折线段与折线段外部顺延的多笔画绘制过程

表 3　折线段与折线段外部顺延的多笔画识别参数表

笔序	类型	线型	拟合折线段曲线的折点序列坐标
笔画 1	F	实	z_{10}(439.00,380.00),z_{11}(650.00,380.00),z_{12}(650.00,536.00)
笔画 2	F	实	z_{20}(644.00,387.00),z_{21}(644.00,545.00),z_{22}(784.00,545.00)
M_PLine	F	实	z_0(439.00,380.00),z_1(647.00,380.00),z_2(647.00,545.00),z_3(784.00,545.00)

图 7 为由两条笔画构成的折线段与折线段内部顺延的多笔画绘制。其中图 7(a)为第 1 条输入笔画(笔画 1)，其识别结果为折线段，如图 7(b)所示；图 7(c)为在笔画 1 的基础上绘制第 2 条笔画(笔画 2)，其识别结果为折线段，如图 7(d)所示；笔画 1、2 的多笔画识别结果为折线段，如图 7(e)所示。识别过程的各参数如表 4 所列。

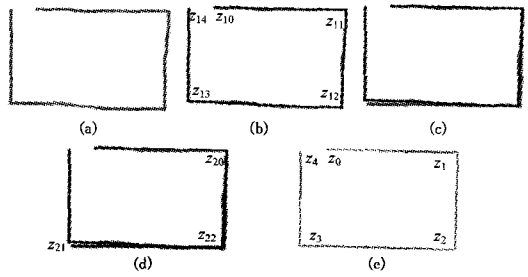
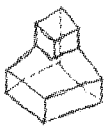


图 7　折线段与折线段内部顺延的多笔画绘制过程

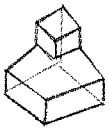
图 8 给出由 39 条笔画构成的在线多笔画手绘 3D 草图的解释手绘平面立体投影图。

表 4　折线段与折线段内部顺延的多笔画识别参数表

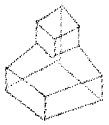
笔序	类型	线型	拟合折线段曲线的折点序列坐标
笔画 1	F	实	z_{10}(548.00,275.98),z_{11}(774.03,280.37),z_{12}(766.21,452.01),z_{13}(502.99,441.14),z_{14}(504.71,279.01)
笔画 2	F	实	z_{20}(773.01,289.02),z_{21}(769.91,451.53),z_{22}(508.01,448.48)
M_PLine	F	实	z_0(548.00,275.98),z_1(773.43,280.36),z_2(768.81,451.82),z_3(502.95,444.78),z_4(504.71,279.01)



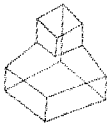
(a) 手绘平面立体图



(b) 手绘图中各条笔画的单一线元识别结果



(c) 多笔画识别及按顺序对线段进行标号的结果



(d) 端点融合结果

图 8　在线多笔画手绘 3D 草图的解释

结束语　文中基于时空关系对在线多笔画手绘折线段曲线进行识别，先基于时间关系对在线多笔画绘制折线段进行多笔画预处理，然后基于空间关系对手绘折线段曲线进行多笔画识别将其分为折线段与直线段的多笔画识别、折线段与折线段的多笔画识别。在讨论折线段间的多笔画绘制时，给出点与折线段及两条折线段间的相互位置关系的一系列概念。提出通过两条折线段之间的位置关系和点与折线段的位置关系等进行折线段的多笔画判定，并提出详细算法。通过算例对文中提出的在线多笔画手绘折线段曲线的识别算法加以验证，由实验结果可知，文中的在线多笔画手绘折线段的识别算法可以很好地解决多笔画绘制问题，为后期的三维重建工作奠定了基础。但文中仅研究了折线段曲线的多笔画识别问题，而没有研究不同线元间的多笔画识别，因此仍需对该领域进行研究。

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] 叶炜威，余隋怀，苟秉宸，等. 一种获取重复绘制草图单元识别特征数据的方法[J]. 计算机应用研究，2005，22(12)：157-159

[3] Qin S F. Investigation of Sketch Interpretation Techniques Into 2D and 3D Conceptual Design Geometry [D]. University of Wales Institute，Cardiff，2000

[4] Mitani J，Suzuki H，Kimura F. 3D sketch：sketch-based model reconstruction and rendering [C]// Editor by Umberto Cugini and Michael wozny. From geometric mode-ling to shape modeling. Kluwer Academic Publishers，2002：85-98

[5] Gross M D，Do E Y. Drawing on the Back of an Envelope：a framework for interacting with application programs by free-hand drawing [J]. Computers & Graphics，2000，24：835-849

[6] Kara L B，Stahovich T F. An image-based trainable symbol recognizer for handdrawn sketches [J]. Computers & Graphics，2005，29：501-507

[7] Fiore F D，Reeth F V. A Multi-Level Sketching Tool for Pencil-and-Paper Animation [C]// AAAI 2002 Spring Symposium：Sketch Understanding. AAAI Press，2002

[8] Sezgin T M，Davis R. Handling Overtraced Strokes in Hand-Drawn Sketches [C]//Proceedings of the AAAI Spring Symposium Series：Making Pen-Based Interaction Intelligent and Natural. Washington：AAAI press，2004：21-24

[9] Fonseca M J，Pimentel C，Jorge J A. CALI：An Online Scribble Recognizer for Calligraphic Interfaces [C]// Proceedings of the 2002 AAAI Spring Symposium-Sketch Understanding. USA：AAAI press，2002：51-58

[10] Ku D C，Qin Sheng-feng，Wright D K. Interpretation of Overtracing Freehand Sketching for Geometric Shapes [C]// The 14th International Conference in Central Europe on Computer Graphics. Visualization and Computer Vision，Plzen：UNION Agency-Science Press，2006：263-270

[11] 王淑侠，王关峰，高满屯，等. 基于时空关系的在线多笔画手绘二次曲线识别 [J]. 模式识别与人工智能，2011，24(1)：82-89

[12] 王淑侠，高满屯，齐乐华. 基于模糊理论的在线手绘图识别 [J]. 模式识别与人工智能，2008，21(3)：317-325

[13] 王淑侠，高满屯，齐乐华. 在线手绘投影线图的端点融合 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2009，21(1)：81-87

(上接第 268 页)

参 考 文 献

[1] Kao Chun-hao，Lo Rong-ching. Camera Self-Calibration with Planar Pattern Using Genetic Algorithm [J]. Applied Mechanics and Materials，2011，130-134：1833-1838

[2] Wang Qi，Fu Li，Liu Zhen-zhong. Review on camera calibration [C]// Control and Decision Conference (CCDC). 2010：3354-3358

[3] Maybank S，Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision，1992，8(2)：123-151

[4] Luong Q T，Faugeras O. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices[J]. International Journal of Computer Vision，1997，22(3)：261-289

[5] Ma Y，Vidal B，Kosecka J，et al. Kruppa Equation Revisited：Its Renormalization and Degeneracy[C]// Lecture Notes in Computer Science. 2000，1843：561-577

[6] Lourakis M I，Deriche R. Camera self-calibration using the singular value decomposition of the fundamental matrix：From point correspondences to 3D measurements[R]. INRIA，Sophia-Antipolis：Research Report 3748，1999

[7] 王志良，张琼，迟健男，等. 基于直线射影特征的摄像机参数标定方法[J]. 计算机科学，2011，38(8)：272-274

[8] Tell D，Carlsson S. Wide Baseline Point Matching Using Affine Invariants Computed From Intensity Profiles [C] // Lecture Notes in Computer Science. 2000，1842：814-828

[9] 雷成，吴福朝，胡占义. Kruppa 方程与摄像机自标定[J]. 自动化学报，2001，27(5)：621-630

[10] 雷成，胡占义，吴福朝. 一种新的基于 Kruppa 方程的摄像机自标定方法[J]. 计算机学报，2003，26(5)：587-597

[11] Kalman D. A Singularly Valuable Decomposition：The SVD of a Matrix[J]. The College Mathmatics Journal，1998，27(1)：2-23

[12] John C L. The Cholesky Approach：A Cautionary Note[J]. Behavior Genetics，1996，26(1)：65-69