

7-2-2020

Fast Generating Algorithm of Interest Roaming Path Based on Freehand Sketch

Dongjin Huang

Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Pengbin Tang

Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Youdong Ding

Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Fast Generating Algorithm of Interest Roaming Path Based on Freehand Sketch

Abstract

Abstract: Considering properties of touch interaction of intelligent terminals, a fast generating algorithm of interest roaming path based on freehand sketch was proposed and applied in the 3D mobile interactive system of virtual display. *The self-adapting reduce method was adopted to optimize the feature points of sketch curve for addressing too much feature points in local. The piecewise curve fitting method was used to quickly generate smooth obstacle avoidance path for handling the case of sketch line over the obstacle, and the final roaming path was adjusted to approximate the freehand sketch as much as possible by error control.* Experimental results show that the orientation, velocity and visual angle have changed naturally in whole process of virtual roaming along the generated interest roaming path with better performance in stability and real time.

Keywords

virtual roaming, freehand sketch, curve fitting, path planning, error control

Recommended Citation

Huang Dongjin, Tang Pengbin, Ding Youdong. Fast Generating Algorithm of Interest Roaming Path Based on Freehand Sketch[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 577-583.

基于手绘草图的感兴趣漫游路径快速生成算法

黄东晋, 唐鹏斌, 丁友东

(上海大学上海电影学院, 上海 200072)

摘要: 结合智能终端的触摸交互的特点, 提出了基于手绘草图的感兴趣漫游路径快速生成算法, 并应用于移动三维交互式虚拟展示系统。该算法通过特征点自适应精简方法对草图曲线特征点进行优化, 解决特征点局部过多的问题; 采用分段曲线拟合的办法处理草图路线经过障碍物的情况, 快速生成光滑的避障路线, 并通过误差控制使得最终的漫游路径尽可能地逼近手绘草图。实验结果表明, 该算法自动生成的用户感兴趣漫游路径使得整个虚拟漫游过程的方位、速度和视角变化过渡自然, 具有较好的稳定性和实时性。

关键词: 虚拟漫游; 手绘草图; 曲线拟合; 路径规划; 误差控制

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 03-0577-07

Fast Generating Algorithm of Interest Roaming Path Based on Freehand Sketch

Huang Dongjin, Tang Pengbin, Ding Youdong

(Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Considering properties of touch interaction of intelligent terminals, a fast generating algorithm of interest roaming path based on freehand sketch was proposed and applied in the 3D mobile interactive system of virtual display. *The self-adapting reduce method was adopted to optimize the feature points of sketch curve for addressing too much feature points in local. The piecewise curve fitting method was used to quickly generate smooth obstacle avoidance path for handling the case of sketch line over the obstacle, and the final roaming path was adjusted to approximate the freehand sketch as much as possible by error control.* Experimental results show that the orientation, velocity and visual angle have changed naturally in whole process of virtual roaming along the generated interest roaming path with better performance in stability and real time.

Keywords: virtual roaming; freehand sketch; curve fitting; path planning; error control

引言

三维场景中的虚拟漫游是虚拟现实研究中的一个关键技术, 通过实时改变虚拟摄像机的位置、速度与视角, 向用户展示虚拟环境中更多有用的信息。虚拟场景中漫游的方式主要有 2 种: (1)交互

式漫游, 由用户操控鼠标、键盘或其它交互设备, 按照自己的意图来控制虚拟摄像机的位置和视角。这种方式比较灵活, 但是缺乏全局观; (2)按既定路线漫游, 漫游路线大多数是通过用户指定起点和终点自动生成的, 虚拟摄像机就是按照这条规划好的路线进行虚拟漫游。这种方法实现较简单, 但自动生成的漫游路线往往是最短路径, 并不是用户感兴趣的路径。在三维虚拟展示系统中, 每个人感兴趣的东西是不一样的, 最短路径往往会忽略掉一些用户感兴趣的区域, 缺乏主观性。



收稿日期: 2014-10-20 修回日期: 2014-12-16;
基金项目: 国家自然科学基金(61402278, 61303093);
上海市自然科学基金(14ZR1415800); 上海市科技攻关项目(14511108400); 上海市教委科研创新项目(14YZ023); 2015 年度上海大学电影学高峰学科;
作者简介: 黄东晋(1982-), 男, 浙江温州, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟现实、计算机图形学、物理仿真等。

<http://www.china-simulation.com>

• 577 •

1 相关研究工作

随着计算机技术、网络技术的高速发展,智能移动终端的性能大幅度提高,使得基于移动平台的虚拟漫游展示技术日益成熟,三维场景渲染的实时性也得到满足。基于移动平台的虚拟漫游交互系统,不仅能够利用移动终端的便携性和操作性优势,通过触控互动与虚拟环境中的虚拟物体进行交互,同样也可以通过虚拟漫游全方位多角度的参观浏览整个虚拟场景。结合智能终端的触摸交互的特点,在移动平台上根据用户手绘的路线草图实时地生成用户感兴趣的漫游路径并沿着此路径进行虚拟漫游是本文讨论的问题。

手绘草图是人类一种自然而直接的思路外化和交流方式^[1]。但是由于手绘过程的无约束性、无确定性,使得手绘路线草图往往存在着不平滑、抖动、断裂、与场景障碍物相交等情况,直接根据手绘草图进行虚拟摄像机控制,往往会造成画面抖动、视角变化不均匀、摄像机进入模型内部等不足,影响了虚拟漫游的效果。本文将手绘草图识别技术应用到虚拟漫游的感兴趣路径规划中,提出一种新的基于手绘草图的感兴趣路径快速生成算法。在特征点提取阶段,通过自适应精简方法对提取的草图曲线特征点进行优化,解决特征点局部过多的问题,提高曲线拟合的实时性;在避障处理阶段,基于分段曲线拟合的办法处理草图路线经过障碍物的情况,快速生成光滑的避障路线;在曲线参数化阶段,采用高效的 3 次 B 样条曲线快速拟合手绘草图的特征点,并通过误差控制使得最终的漫游路径尽可能地逼近手绘草图,最大程度的保留用户感兴趣的原始信息。这样,用户只要在智能手机、PAD 等移动终端上通过简单、自然、直观的手绘漫游路线草图,即可在三维虚拟空间中自动实时地生成用户感兴趣的漫游路径、漫游速度及漫游视角,并且能够智能地规划绕障路线,整个漫游过程遵循摄影艺术的基本美学原则。

路径规划技术:三维虚拟场景中的路径规划问题的主要任务是在已知的虚拟环境中,规划出一条

从起始点到目标点的无碰撞的最优路径。路径规划是虚拟现实技术的关键问题之一,国内外研究人员在这个方面已经做了大量的研究。

虚拟场景中的自动漫游,就是自动控制摄像机运动,一般都是基于某种路径规划的算法。路径规划算法很多,根据对环境信息掌握的程度大致可以分为 2 大类:第 1 类是基于环境先验完全信息的全局路径规划算法,又称为静态规划,如 IDA* 算法^[2]、可视图法^[3]、栅格法^[4]等。该类算法根据先验环境信息找出从起始点到目标点的可行或最优路径。通常,全局路径规划可以找到最优解,但需要预先知道准确的全局环境信息,计算量大,实时性较差,不能适应动态的环境。第 2 类是基于局部环境信息的局部路径规划算法,又称动态路径规划,如人工势场法^[5]、粒子群算法^[6]、遗传算法^[7]等。因为环境是未知的或部分未知,局部路径规划仅仅依靠传感系统实时感知障碍物的信息。所以该类算法具有实时性,对动态环境具有较强的适应能力,但仅仅依靠局部信息,有时会产生局部最小值或振荡,无法保证能获得一条从起始点到目标点的路径。这 2 类算法都有各自的优缺点,但是这条自动生成的最优(或次优)的漫游路线往往不是用户感兴趣的路径,所以很难向用户呈现他们感兴趣的信息。基于此,本文所提出的路径规划算法就是基于用户感兴趣的路线实时生成漫游路径。

草图识别技术:手绘草图是一种用粗略几何形状对用户意图模糊逼近的一种图形交互输入方式。由于其信息输入的自然、随意、直观等特性,在计算机辅助设计、虚拟现实、计算机动画、可视化对象建模等诸多领域都有广泛的应用,深受广大用户的喜爱。近年来,基于手绘草图的人机交互技术已成为国内外研究人员关注的焦点。手绘草图的研究工作主要是针对草图识别技术。由于草图可以是任意的形状、任意的绘图顺序,因此给草图识别带来了巨大的挑战。

笔划是用户手绘草图输入的基本信息单元。目前草图识别方法中,基于笔划的草图识别算法主要

可以分为 2 种: 第 1 种基于统计模型的识别方法, 例如支持向量机 SVM^[8]、隐马尔可夫模型 HMM^[9]、神经网络^[10]和贝叶斯网络^[11]等。这类算法采用的是机器学习的方法, 通过提取特征空间中的一组特征信息对草图进行描述, 用来训练分类器。基于统计的方法需要维护一个具有一定规模的样本库, 通常算法复杂度高, 运算量大, 不太适合实时性要求高的系统。第 2 种基于笔划的草图识别算法是采用参数化方法, 例如采用多边形^[12]、Bezier 曲线^[13]和 B 样条曲线^[14-15]等对用户输入的笔划进行拟合。这类算法对形状描述只需要很少的参数, 计算效率较高, 适合于实时性和精度要求较高的应用。还有一些算法使用了细分和变量隐式曲线方法, 根据输入笔划时的速度以及基于基本图元等方法对草图进行拟合。

2 手绘草图的特征点提取与优化

目前大多数曲线轮廓特征点的提取方法都是利用相邻的一组轮廓点来计算轮廓线上各点的曲率或两近似直线的夹角来判断轮廓特征点的。这些算法往往计算量大, 效率低, 不利于移动平台的实时处理。所以, 我们采用一种高效简化的方式来提取手绘草图的特征点。通过对手绘曲线轮廓点序列在 x 和 y 两个方向进行分解, 整个过程只用到加法运算, 计算效率高。

首先, 将手绘曲线 P_i 在 x 和 y 方向分解为两条一维离散曲线 $x(i)$ 和 $y(i)$ 。然后, 计算 $x(i)$ 上切线斜率变化。 $x(i)$ 与点 $x(i-h)$, $x(i+h)$ 形成两条直线的斜率分别为 k_1 , k_2 。其斜率变化 Δk 为:

$$\Delta k = k_2 - k_1 = \frac{x(i+h) - x(i)}{h} - \frac{x(i) - x(i-h)}{h} = \frac{1}{h} [x(i+h) - 2x(i) + x(i-h)] \quad (1)$$

其中, h 为步长。公式(1)与曲率定义很相似, 两边乘于 $1/h$, 就近似等于曲率 σ 了。这样, 令 $K = h^2 \cdot \sigma$, 则有:

$$K = x(i+h) - 2x(i) + x(i-h) \quad (2)$$

若步长 h 内, 所有点的 K 值都大于设定阈值

$H_{curvature}$, 则选择步长内 K 值最大的点作为 $x(i)$ 的特征点。同理, 求取 $y(i)$ 的特征点集。最后, 综合 $x(i)$, $y(i)$ 的特征点集, 获得手绘曲线 P_i 的特征点集。

由于手绘输入的不确定性, 手绘路线草图通常存在着不平滑、抖动等现象, 即使通过曲线平滑处理, 在草图曲线的局部区域还是会产生过多的特征点, 这样势必会降低后面曲线拟合的计算效率, 所以必须对这些特征点做进一步优化。

针对草图局部区域特征点过多的问题, 我们提出了特征点自适应精简方法, 在草图曲线特征保留的情况下对特征点进行自适应删减, 尽可能地减少不重要的特征点。其基本思想是: 在草图曲线弯曲曲率大的地方尽量保留特征点数目来提高曲线拟合的精确性, 在草图曲线比较平直的地方尽量减少特征点数目来提高曲线拟合的实时性。其实现步骤如下所示:

1) 若当前点 P_i 与前一点 P_{i-1} 的距离 l_{i-1} , 以及与后一点 P_{i+1} 的距离 l_i 均小于阈值 Len 时, 则删除当前点 P_i , 并直接连接前后点 $P_{i-1}P_{i+1}$ 。其删除结果如图 1(a)所示。

2) 若 $l_{i-1} \geq Len$ 或 $l_i \geq Len$ 时, 则通过计算 $\overline{P_{i-2}P_{i-1}}$ 与 $\overline{P_{i+2}P_{i+1}}$ 之间的夹角 θ 来判断是否删除当前点 P_i 。如图 1(b)所示, 当 $\theta \geq \Theta$ 时, 则删除当前点 P_i ; 反之, 则保留当前点 P_i 。其中, Θ 为阈值, P_{i-2} , P_{i-1} , P_i , P_{i+1} 和 P_{i+2} 是草图的特征点序列。

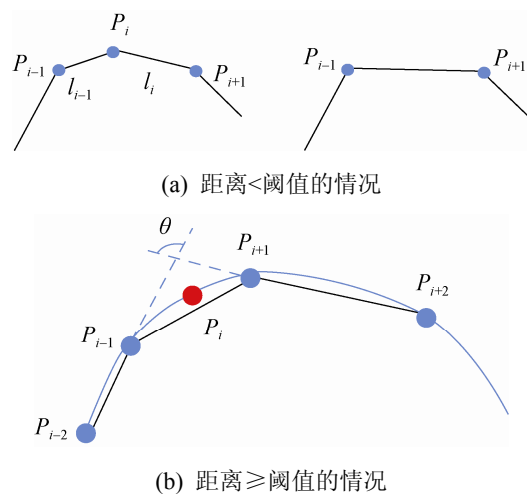
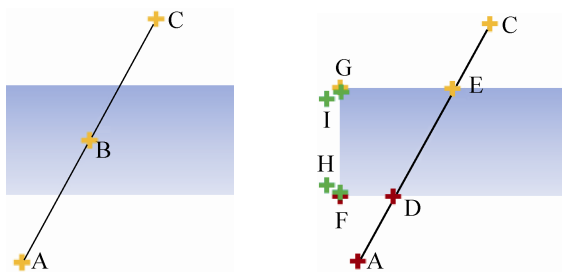


图 1 特征点自适应精简方法示意图

3 避障路径生成

3.1 算法描述

如图 2(a)所示, 特征点 A, B 和 C 是从手绘草图曲线中提取出来的相邻特征点, 长方形为障碍物的包围盒。对于复杂的障碍物, 我们不需要对障碍物进行精确的相交测试, 而是采用扩展包围盒的方法来简化计算: 将三维模型的包围盒的尺寸由 $[x_0, y_0, z_0]$ 扩展为 $[x_0 + 2L, y_0 + 2L, z_0 + 2L]$ 。这样可以保证虚拟摄像机与障碍物的距离大于等于 L , 使得在虚拟漫游过程中摄像机位置不会太靠近障碍物, 符合摄影艺术的基本美学标准。



(a) 经过障碍物的特征点 (b) 避障路径的新增特征点

图 2 处理障碍物区域的特征点示意图

通过判断, 特征点 B 落在障碍区域内, 其邻近的特征点 A 和 C 落在可漫游区域内。也就是说该用户的感兴趣路径是通过障碍物的, 若按照该路线进行漫游会影响漫游真实感。针对这个问题, 我们采用分段曲线拟合的方法生成平滑的绕障路线, 解决手绘路线经过障碍物的情况。其基本算法如下:

- 1) 将在障碍物区域内的特征点 B 直接从草图轮廓线特征点序列中删除掉, 并把草图轮廓特征点序列分割成两部分。
- 2) 计算由点 B 邻近特征点 A 和 C 构成的直线段与障碍物包围盒的相交点: D 点和 E 点, 并将这两个新的特征点分别插入到对应特征点序列中队头和队尾的位置。
- 3) 计算得到与 D 点和 E 点同侧最近的障碍物包围盒顶点: F 点和 G 点, 并将这 2 个新的特征点

分别插入到对应特征点序列中队头和队尾的位置。

4) 对于中间部分的曲线 FG, 在点 F 和点 G 的切线方向上添加 2 个新的控制点 H 和点 I, 使得 $|FH| = |GI| = L$, 构建出新的三次 B 样条曲线拟合的控制多边形。这样可以保证摄像机的漫游路径尽量光滑, 以及其视角在 F 点和 G 点时的平滑过渡, 不会产生突变。

此时, 当前经过场景中障碍物的手绘路线被分割成 3 部分, 如图 2(b)所示, 包括由特征点 C, E 和 G 组成的上面部分, 由特征点 A, D 和 F 组成的下面部分, 以及由特征点 F, H, I 和 G 组成的中间部分。然后, 采用基于增量方法的三次 B 样条曲线快速生成方法^[15]对每部分的特征点进行拟合, 生成平滑的避障路线。图 3 所示的是避障路径生成结果, 灰色的曲线为手绘草图, 黑色的曲线为新生成的避障路线, 很好的解决了漫游路线穿越障碍物的问题。

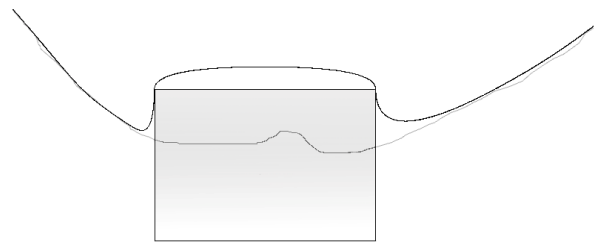


图 3 避障路径生成结果

3.2 误差控制

基于增量方法的三次 B 样条曲线快速生成方法得到的拟合曲线较贴近控制多边形, 但与手绘草图还存在着误差。为了能够更精确的逼近手绘草图路线, 最大程度地保留了用户感兴趣路径的原始信息, 有必要对拟合曲线进行误差统计和拟合调整。

计算拟合曲线与原始曲线之间的误差, 最直接有效的方法就是求 2 条曲线上所有对应点之间的距离的平均值。但是这样做计算量很大。我们通过对控制点 P_i 和 P_{i+1} 之间按等间隔取 n 个误差统计采样点, 计算这些采样点到拟合曲线上的平均距离 $Dist_i$, 如图 4 所示。

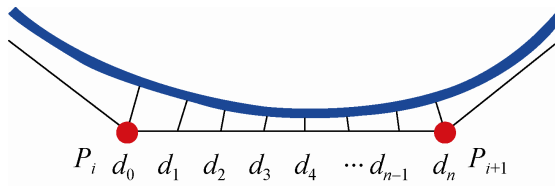


图 4 误差统计示意图

误差统计的计算公式为:

$$\text{Dist}_i = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} d_t \quad (3)$$

其中, d_t 为线段 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 上第 $(t+1)$ 等分处的采样点到拟合曲线的垂直距离。

设误差阈值 H_{error} , 若控制点 P_i 和 P_{i+1} 间的平均误差 $\text{Dist}_i \geq H_{\text{error}}$ 时, 则需要对拟合曲线进行适当调整。我们的曲线拟合算法是基于 B 样条曲线的, 其具有局部修改的突出优点, 修改某一控制点只引起与该控制点相邻近的曲线形状发生变化。所以, 我们提出自适应添加新控制点的方法对曲线进行局部拟合调整, 使其能最大程度地逼近手绘草图。其算法步骤如下:

Step 1: 根据公式(3)对控制点 P_i 和 P_{i+1} 间的拟合曲线进行误差统计, 得到平均误差 Dist_i 。若 $\text{Dist}_i \geq H_{\text{error}}$, 则 Step 2, 否则 Step 6。

Step 2: 比较 P_i 点到拟合曲线的距离 d_0 与 P_{i+1} 点到拟合曲线的距离 d_{n-1} 。若 $d_0 \geq d_{n-1}$, 则 Step 3, 否则 Step 4。

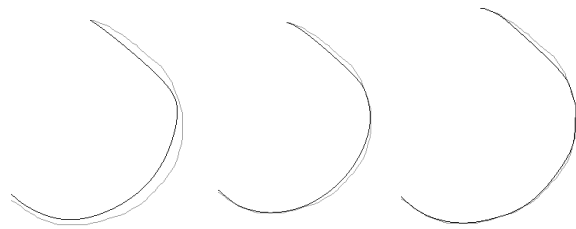
Step 3: 从 d_0 到 $d_{\frac{n}{2}}$ 中获取与 Dist_i 最接近的采样点 j , 在手绘草图的原始点序列中 $P_i P_{i+1}$ 部分找到对应位置的点 P_j , 并将 P_j 插入到对应的特征点序列中。

Step 4: 从 $d_{\frac{n}{2}+1}$ 到 d_{n-1} 中获取与 Dist_i 最接近的采样点 r , 在手绘草图的原始点序列中 $P_i P_{i+1}$ 部分找到对应位置的点 P_r , 并将 P_r 插入到对应的特征点序列中。

Step 5: 对新控制点前后两段曲线重新拟合, 跳到 Step 1。

Step 6: 继续对下一组控制点 P_{i+1} 和 P_{i+2} 间拟合曲线进行误差统计。循环操作, 直到最后一组控制点为止。

一般情况下, 通过 1~2 次的拟合调整就能很好的达到逼近原始曲线的效果。如图 5(a)所示, 原始拟合路径与手绘路线具有较大的误差, 其中灰色的曲线为手绘草图, 黑色的曲线为调整后的拟合曲线。通过 1 次拟合调整 ($H_{\text{error}} = 2.0$) 的结果如图 5(b)所示, 通过 2 次拟合调整 ($H_{\text{error}} = 1.0$) 的结果如图 5(c)所示。从图 5 可知, 新调整的拟合曲线较精确地逼近原始手绘曲线。



(a) 原始拟合曲线 (b) 1 次拟合调整 (c) 2 次拟合调整

图 5 拟合调整结果

4 实验结果

为了最大程度的保留用户感兴趣的信息, 本文提出了基于手绘草图的感兴趣漫游路径快速生成算法。该算法能够快速地将手绘草图转化为光滑的感兴趣漫游路径 (包括避障路线), 在保证实时性要求的前提下, 新生成的漫游路径具有较高的拟合精度。这样, 虚拟摄像机就能很好地沿着用户感兴趣的路径进行场景漫游。整个算法的处理流程如图 6 所示, 主要包括场景预处理、特征点提取及优化、避障处理、曲线参数化、误差统计及拟合调整、漫游速度及视角规划等模块。

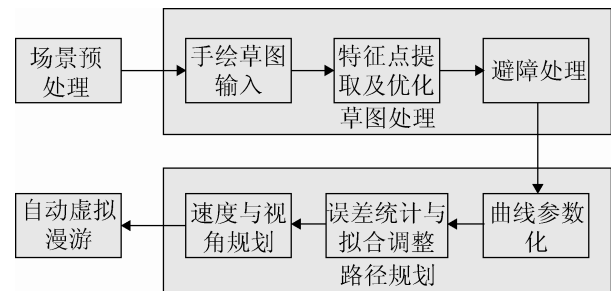


图 6 感兴趣漫游路径快速拟合的流程图

在草图处理的过程中,通过特征点提取及优化获取手绘草图的关键特征点,解决草图曲线的局部特征点过多以及草图通过障碍物区域等情况。在路径规划的过程中,通过 3 次 B 样条曲线快速拟合出漫游路径,并通过误差控制对偏离原始草图的拟合曲线部分进行逼近调整。同时,我们基于美学原则规划了摄像机的漫游速度和视角,通过加减速智能控制摄像机的速度,以及通过摄像机的瞄准点始终对着下个 h 时刻摄像机的位置来设置摄像机的视角。如图 7 所示,摄像机在漫游路线拐弯时,其速度减慢;摄像机的朝向始终与漫游路径的大致方向是相同。这样在漫游过程中,摄像机的视角改变自然,不会出现剧烈变化,符合摄影美学原则。

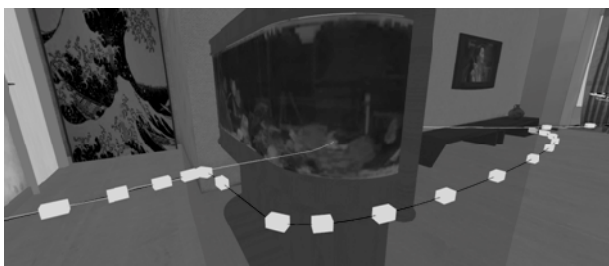


图 7 视角、速度规划示意图

我们将该算法应用到基于移动平台的三维虚拟家居交互展示系统中,并发布到移动终端 Apple iPad 4 平板电脑上。用户在 iPad 上用手指简单的绘制感兴趣的漫游路线草图,即可自动实时地获得用户感兴趣的漫游路径。在漫游过程中,镜头视角过渡平稳,实时性较好,帧率达到 30 fps 以上,很好地满足展示系统的实时性需求。

图 8~11 是本文算法在客厅和卧室 2 个虚拟样板房中的实验结果。其中,白色的曲线是用户手绘的感兴趣路线草图,黑色的曲线是本文算法快速生成的感兴趣漫游路径。在客厅虚拟样板房中(如图 8 和图 9),场景三角面片数约为 284.7 k,拟合曲线的总控制点数为 40 个,整个感兴趣路径的拟合时间为 0.083 s;在卧室虚拟样板房中(如图 10 和

图 11),场景三角面片数约为 145.4k,拟合曲线的总控制点数 20 个,整个感兴趣路径的拟合时间为 0.028 s。

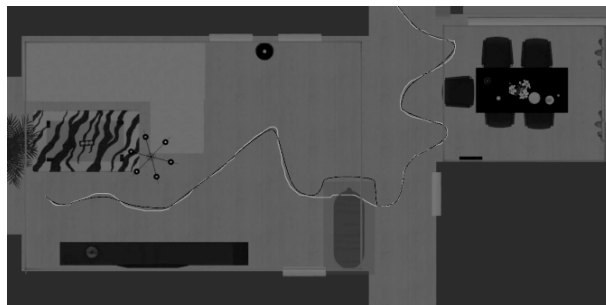


图 8 客厅: 手绘草图的拟合结果

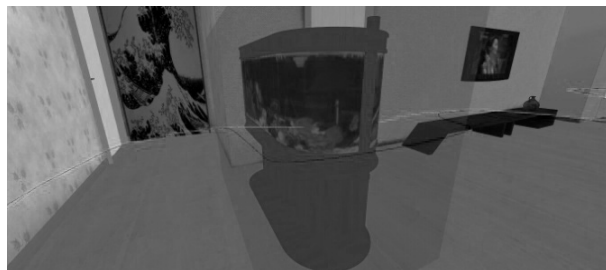


图 9 客厅: 三维空间中的感兴趣漫游路径

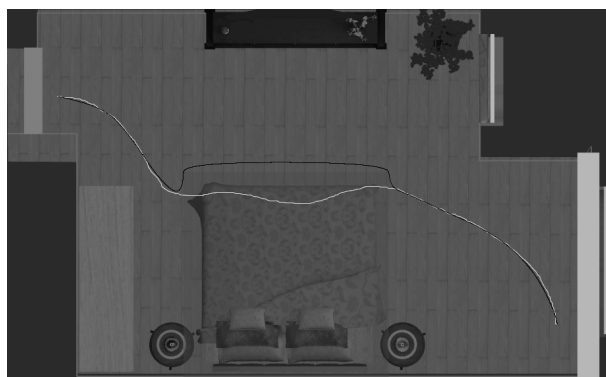


图 10 卧室: 手绘草图的拟合结果



图 11 卧室: 三维空间中的感兴趣漫游路径

5 结论

本文将手绘草图识别技术应用到虚拟漫游的路径规划中, 提出了基于手绘草图的感兴趣漫游路径快速生成算法。该算法通过场景预处理、特征点提取及优化、曲线拟合、误差统计及拟合调整等算法快速生成用户感兴趣的漫游路径。实验证明, 该算法生成的漫游路径能够精确地逼近手绘草图, 最大程度地体现用户感兴趣的意图, 整个漫游过程的方位、速度和视角变化过渡自然, 具有较好的稳定性和实时性, 能够很好地应用于移动三维交互式虚拟家居展示系统。

参考文献:

- [1] J Fish, S Scrivener. Amplifying the mind's eye: Sketching and visual cognition [J]. *Leonardo* (S0024-094X), 1990, 23(1): 117-126.
- [2] R E Korf. Depth-first iterative deepening: an optimal admissible tree search [J]. *Artificial Intelligence* (S0004-3702), 1985, 27(1): 97-109.
- [3] S Basu Roy, G Das, S K Das. Algorithms for computing best coverage path in the presence of obstacles in a sensor field [J]. *Journal of Discrete Algorithms* (S1570-8667), 2012, 13(5): 86-97.
- [4] 张彪, 曹其新, 王文珊. 使用三维栅格地图的机器人路径规划 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(10): 57-61.
- [5] A A Masoud. Motion planning with gamma-harmonic potential fields [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (S0018-9251), 2012, 48(4): 2786-2801.
- [6] H T Hsieh, C H Chu. Improving optimization of tool path planning in 5-axis flank milling using advanced PSO algorithms [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (S0736-5845), 2012, 29(6): 3-11.
- [7] R Kala. Multi-robot path planning using co-evolutionary genetic programming [J]. *Expert Systems with Applications* (S0957-4174), 2012, 39(3): 3817-3831.
- [8] 姜映映, 田丰, 王绪刚, 等. 基于模板匹配和 SVM 的草图符合自适应识别方法 [J]. *计算机学报*, 2009, 32(2): 252-260.
- [9] X Z Sun, W Jiang, J Y Sun. Adaptive online multi-stroke sketch recognition based on hidden markov model [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, China. USA: Springer (Daniel S. Yeung, et al), 2005: 948-957.
- [10] 刘伟, 查建中, 徐晓慧, 等. 用 RCR 特征和 NN 识别实时手绘工程草图 [J]. *计算机辅助设计与计算机图形学学报*, 2003, 15(6): 692-696.
- [11] 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.
- [12] M A Esther. An efficient computable metric for comparing polygonal shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (S0162-8828), 1999, 13(3): 209-216.
- [13] 王卫, 尹建峰, 孙正兴. 一种手绘草图的快速参数化方法 [J]. *计算机科学*, 2006, 33(1): 264-268.
- [14] L Kara, K Shimada. Construction and modification of 3d geometry using a sketch-based interface [C]// *Proceedings of Eurographics workshop on sketch-based interfaces and modeling*. Vienna, Austria: Eurographics Association (T Stahovich, et al), 2006: 59-66.
- [15] 褚标, 朱功勤. 基于增量方法的均匀 B 样条曲线快速生成算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(14): 9-10.