

虚拟心脏介入手术系统的血流模拟*

任 巨¹ 熊岳山¹, 谭 珂² 郭光友²

(1. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军总医院 技术教育中心, 北京 100853)

摘 要 :虚拟心脏介入手术系统的血流效果模拟是系统中模型模拟的关键。实时而准确的血液流动效果增强了虚拟手术系统的真实感。在分析心血管内的血液流动物理模型的基础上,结合弹性腔模型,采用了改进的粒子系统方法,建立和实现了新的虚拟心脏介入手术系统的血流模型,满足了心脏介入系统的实时性和真实感要求。

关键词 :虚拟系统 ;心脏介入 ;弹性腔模型 ;血液流动 ;粒子系统

中图分类号 :TP391.9 **文献标识码** :A

Simulation of Blood Flow in Virtual System of Cardiac Intervention

REN Ju¹, XIONG Yue-shan¹, TAN Ke², GUO Guang-you²

(1. College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Center for Technique Education, PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

Abstract Simulation of blood flow is a very important component in the virtual system of cardiac intervention system. Real-time and accurate simulation of blood flow can make the virtual surgery more realistic. This paper addresses the problem of the simulation of blood flow in virtual cardio-vascular objects. With an analysis of the physical model of cardiac-vascular blood flow in the artery based on the Windkessel model and by drawing the blood with improved particle system, this research successfully simulated the blood flow inside the vascular, thus satisfying the need of being real-time and realistic for the Cardiac intervention system.

Key words :virtual system ; cardiac intervention ; windkessel model ; blood flow ; particle system

心血管疾病是人类健康的一大威胁,心脏介入手术是治疗心血管疾病,特别是冠状动脉狭窄的有效手段。心脏介入手术训练是通过长时间的临床训练完成的,较短时间内在训练的数量上存在着缺陷,难以达到对医生的培训效果。因此,计算机设计开发的虚拟心脏介入手术系统应运而生。心血管中血液流动的绘制为手术的模拟提供了具有真实感的手术场景,使医生有身临其境的感觉,以达到模拟训练的目的。

在计算机对医学虚拟的辅助设计方面,解放军总医院应用虚拟现实技术研究开发了鼻腔镜手术仿真训练系统^[1],国防科技大学的熊岳山等人应用扩散方程模拟了手术中的表面流血^[2];Deschamps 和 Saloner 等人使用了嵌入式边界法对血管和血流进行了模拟^[3]。在使用粒子系统方面,Foster 等人使用粒子系统对液体进行了模拟^[4]。

1 血流的物理模型

目前对液体的模拟,一种是基于 Navier-Stokes 方程^[4]建立液体模型,这种方法能精确模拟出液体的流动情况,但是计算开销很大,实时性不高。在本系统中,心血管模型采用了弹性腔模型^[5],也称风腔模型。弹性腔模型将主动脉与大动脉比拟为弹性腔。在该模型下,建立两个血液流动的基本方程:

$$q_{in} = q_{out} + \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

* 收稿日期 2005 - 10 - 14

基金项目 国家自然科学基金资助项目(60371036)

作者简介:任巨(1980—)男,硕士生。

$$0 = q_{\text{out}} + \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

方程(1)(2)分别描述了心室收缩期和舒张期在单位时间内,从心室流入动脉弹性腔的血液体积 q_{in} ,从动脉弹性腔进入静脉弹性腔的血液体积 q_{out} 与动脉弹性腔体积增量 dV/dt 的关系。 R 为血液流动的外周阻力,流量为 q 的血液流过外周阻力为 R 的血管压力降为 Δp ; $\Delta p/q = R$ 。 C 为动脉血管的顺应性,表示动脉管体积随压力的变化率, $C = dV/dp$ 。将 R 和 C 引入方程(1)和(2)得:

$$C \frac{dp}{dt} + \frac{p}{R} = q_{\text{in}} \quad (3)$$

$$C \frac{dp}{dt} + \frac{p}{R} = 0 \quad (4)$$

在收缩期内 q_{in} 为常数的条件下对方程(3)和(4)求解得到:

$$\begin{cases} p = p_s^* e^{-\frac{t-T}{RC}} \\ p = \left[q_0 - \left(q_0 - \frac{p_d}{R} \right) e^{-\frac{t}{RC}} \right] R \end{cases} \quad (5)$$

方程组(5)即为血压随时间的变化,根据此方程组建立血流的物理模型。

2 血流模型与粒子系统的改进

本文设计的虚拟系统结合血流的物理模型,采用粒子系统的方法构建了一个新的血流模型,完成了对血液流动的真实感绘制。将血液流体分解为大量粒子的简单体素集合,每个粒子有一组属性。粒子的集合构成血液的总体表现。粒子系统绘制血流通常采取下面方法:

方法一 根据每个粒子当前时刻的位置坐标,用一张平面二维纹理图像映射到三维空间的一个粒子点。当相邻粒子点的 z 值相差较大,就会在纹理边界处产生不连续性。

方法二,以该时刻粒子的坐标为中心,绘制小球或者多面体。由于对血流的模拟需要的粒子数量巨大,同一时刻需要对大量的多面体进行绘制,导致系统的运行速度较慢。

采用改进的方法来弥补以上不足。具体实现主要分为以下三个步骤:

(1)确定粒子源,产生新的粒子。

(2)更新现有粒子的属性。粒子的速度 v 由前文的弹性腔模型中血压参数控制,如方程(6)所示。式中 k 为从压强到速度的转换系数,单位为 $\text{mmHg}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

$$v = p/k \quad (6)$$

位置信息 (x, y, z) 更新 给出了粒子位置沿 x 轴的坐标变化(其他轴向类似):

$$x = x + v_x \cdot \Delta t \quad (7)$$

(3)绘制粒子。粒子的绘制采取改进方法:将粒子源产生的同一血液层面的粒子的位置信息 (x, y, z) 计算出来,以这些点作为顶点构建三角形网格。构建规则如下:

对每个粒子进行二维标记 (x, z) 。对同属一个血管横截面上的粒子,标记 x 沿血管直径向递增1。沿中轴线上,不同横截面的粒子,标记 z 递增1。根据标记,以各粒子为顶点形成三角形面片,由三角形面片组成网格。奇数三角形面片的顶点为 $((x, z), (x+1, z), (x, z+1))$,偶数三角形面片的顶点为 $((x+1, z), (x, z+1), (x+1, z+1))$ 。此网格随着粒子的运动而动态生成,形成了血流液面曲面,然后对该曲面进行纹理映射。

3 模拟结果分析

使用绘制多面体的方式对血流进行模拟的平均帧频率 FPS(frames per second)曲线图如图1所示,虚拟场景帧频数据如表1所示。使用改进的粒子系统模型对血流进行模拟,平均帧频率 FPS曲线图如图2所示,虚拟场景帧频数据如表2所示。

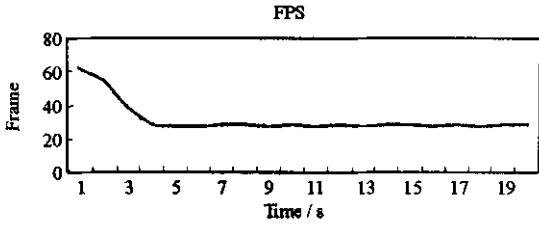


图1 绘制多面体方式平均帧频率 FPS 曲线图

Fig.1 FPS curve of drawing polyhedron

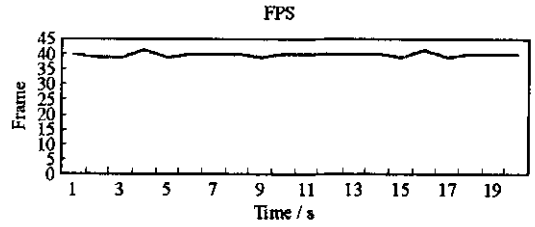


图2 改进的粒子系统模型平均帧频率 FPS 曲线图

Fig.2 FPS curve of improved particle system

表1 使用绘制多面体方式的帧率测试数据表

Tab.1 Frame test of drawing polyhedron

Frames	Time (ms)	min	max	Avg
644	20 722	25	65	31.078

表2 使用改进的粒子系统模型帧率测试数据表

Tab.2 Frame test of improved particle system

Frames	Time (ms)	min	max	Avg
803	20 187	38	41	39.778

由图1和图2对比可得,使用绘制多面体方法模拟血流,当粒子数量增加,FPS显著下降;使用改进的粒子系统绘制血流场景的FPS稳定。由表1,采用绘制多面体方法模拟,平均帧率为31.1帧/s。由表2,采用改进的粒子系统绘制,平均帧率为39.8帧/s,改进的粒子系统帧率更高,实时性更好。

图3是在本文所实现的虚拟血流系统中每1s进行一次截图的实时截图序列。图中,白色小球是为了明显地观看和测试血液流动情况而在血液中添加的随着血液流动的漂浮物。

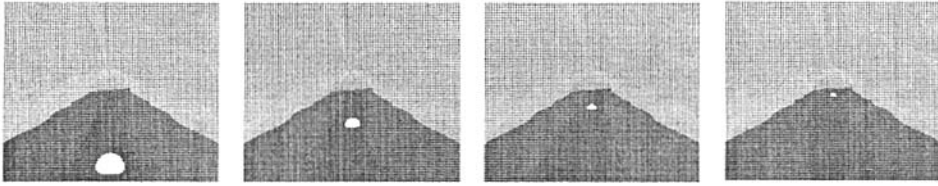


图3 血液流动实时截图

Fig.3 Realtime images of blood flow

参考文献:

- [1] 谭珂,郭光友.虚拟现实技术在鼻腔镜手术仿真训练系统中的应用研究[J].系统仿真学报,2001,S2.
- [2] 徐凯,熊岳山,谭珂,等.一种小量流血形成的弯曲血槽模型[J].国防科技大学学报,2004,26(5):70-73.
- [3] Deschamps T, et al. Vessel Segmentation and Blood Flow Simulation Using Level-sets and Embedded Boundary Method[A]. International Congress Series 1268[C], 2004:75-80.
- [4] Foster N, et al. Practical Animation of Liquid[A]. In Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], ACM Press, 2001:23-30.
- [5] 柳兆荣.心血管流体力学[M].上海:复旦大学出版社,1986.

