

8-14-2020

Algorithm of Simulation of Cutting Mouse's Ovary Based on Leap Motion

Li Hao

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

Yang Meng

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;2. The State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

Hu Jie

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

Jiao Hao

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

See next page for additional authors

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.

Algorithm of Simulation of Cutting Mouse's Ovary Based on Leap Motion

Abstract

Abstract: *A cutting algorithm was proposed for Mouse's ovary model based Leap Motion.* The realistic data of the main mouse organs were collected. These data were deeply analyzed. The models of mouse and organs were imported into Unity3D to create a virtual environment and an interface between Leap Motion and Unity3D. It realized the cutting on mouse's ovary model through a cutting algorithm which created a plane formed by the collision points and the camera, and it realized the deformation of the mouse's ovary model through a deformation algorithm based kinematic formula. The results show that the cutting algorithm can simulate the cutting experiment on mouse's ovary effectively and make the people have a realistic experience.

Keywords

biotic experiment, virtual interaction, leap motion, cutting algorithm, deformation algorithm

Authors

Li Hao, Yang Meng, Hu Jie, Jiao Hao, Zhai Ying, Qie Wei, and Yang Gang

Recommended Citation

Li Hao, Yang Meng, Hu Jie, Jiao Hao, Zhai Ying, Qie Wei, Yang Gang. Algorithm of Simulation of Cutting Mouse's Ovary Based on Leap Motion[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2207-2213.

基于 Leap Motion 小鼠卵巢切割模拟算法

李浩¹, 杨猛^{1,2}, 胡杰¹, 焦昊¹, 翟莹¹, 郅薇¹, 杨刚¹

(1.北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2.中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 提出一种基于 Leap Motion 的对小鼠卵巢进行切割的实验模拟方法。精确采集小鼠各主要器官的真实形态数据; 然后对这些数据特征进行深入分析, 并利用 3ds MAX 进行精细建模; 将三维模型导入 Unity3D 中, 搭建虚拟实验环境并创建 Leap Motion 接口; 通过基于碰撞点形成平面的切割算法来实现对小鼠卵巢的切割模拟, 并通过基于运动学的形变算法实现形变模拟。该切割算法通过虚拟器械与模型网格的碰撞, 以碰撞点和摄像机形成的平面对模型网格进行切割和网格重建。实验结果表明: 该算法能够真实、有效地对小鼠卵巢模型的切割进行模拟, 同时能够真实再现现实实验的操作体验。

关键词: 生物实验; 虚拟交互; Leap Motion; 切割算法; 形变算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-2207-07

Algorithm of Simulation of Cutting Mouse's Ovary Based on Leap Motion

Li Hao¹, Yang Meng^{1,2}, Hu Jie¹, Jiao Hao¹, Zhai Ying¹, Qie Wei¹, Yang Gang¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. The State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A cutting algorithm was proposed for Mouse's ovary model based Leap Motion. The realistic data of the main mouse organs were collected. These data were deeply analyzed. The models of mouse and organs were imported into Unity3D to create a virtual environment and an interface between Leap Motion and Unity3D. It realized the cutting on mouse's ovary model through a cutting algorithm which created a plane formed by the collision points and the camera, and it realized the deformation of the mouse's ovary model through a deformation algorithm based kinematic formula. The results show that the cutting algorithm can simulate the cutting experiment on mouse's ovary effectively and make the people have a realistic experience.

Keywords: biotic experiment; virtual interaction; leap motion; cutting algorithm; deformation algorithm

引言

虚拟现实是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真技术, 它利用计算机生成一种模拟环境, 使用户沉浸其中。虚拟现实技术涉及多学科内

容, 诸如计算机图形学、图形图像处理、计算机视觉、科学计算可视化、现代医学、生物力学、传感器技术等^[1]。目前虚拟现实技术主要的应用领域有课堂教学、虚拟手术、教育游戏、电影、电视、广告等, 其中在生物学领域中的应用起着重要作用。虚拟现实技术在生物学领域的应用是当前研究热点之一。

虚拟现实技术在生物学中应用广泛。数字人系统通过计算机技术, 将人体结构数字化, 经由三维



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-11;
基金项目: 北京林业大学国家级大学生科研创新项目
基金(S1310022031); 国家自然科学基金(61402038,
61100132);
作者简介: 李浩(1994-), 男, 安徽, 本科, 研究方向
为计算机图形学。

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

• 2207 •

重建, 得到可视的、可调控的虚拟仿真人体模型; 虚拟手术系统利用计算机技术来模拟、指导医学手术所涉及的各种过程; 虚拟实验室为许多医学教育中的实验提供了一个虚拟的实验环境。此外, 由于不同人员对于实验操作有着不同的熟悉程度, 且对于实验场景的不同接受能力, 可能会造成对实验材料的浪费以及由操作失误所带来的危险, 而虚拟现实技术的研究将为学生提供可重复操作的虚拟实验环境, 有效地避免了以上情况。

虚拟现实技术在生物学领域的应用同样是当前研究的难点之一。目前虚拟现实技术在生物学的应用中, 大多是对虚拟手术或者虚拟生物实验的模拟, 而切割过程又是此类模拟中较为重要的部分, 因此算法对于操作的实时性和准确性有较高的要求。由于在切割模拟的过程中, 涉及到碰撞检测、切割路径的定义、切割后模型网格的改变和重构等问题, 因此怎样解决这些问题并实现良好的实时性和准确性就成了诸多研究的重点内容之一。

正因为上述原因, 且不失一般性, 本文以基于 Leap Motion 小鼠卵巢切割可视化模拟算法为例, 重点研究小鼠卵巢的切割实验的模拟算法, 以展现真实小鼠卵巢切割实验过程的虚拟仿真效果。

1 相关工作

1.1 交互设备开发

目前虚拟现实研究工作中较为流行的交互设备有力反馈手套、Kinect、Leap Motion 等。其中, 力反馈手套是一款最接近人手的机械手^[2]。该产品具有 24 种动作, 可直接把人体动作绘制到机器设备。Kinect 是微软在 2010 年发布的一种 3D 体感摄影机^[3], 它导入了即时动态捕捉、影像辨识、麦克风输入、语音辨识、社群互动等功能。Leap Motion 是面向 PC 以及 Mac 的体感控制器制造公司 Leap 于 2013-02-27 发布的体感控制器^[4]。

目前有关交互设备在虚拟交互技术方面的研究较多。李小龙^[5]提出了基于 Kinect 手势识别的虚拟人体解剖教学系统的设计与实现, 开发了一个虚

拟人体解剖教学系统以实现多人观摩、学习和研究; 李萌^[6]提出了基于体感交互的沉浸式森林景观展示研究, 利用 Kinect 丰富了森林景观展示的视觉传达形式, 扩展了林业可视化的应用领域; 顾汉杰^[7]提出了 Leap Motion 概念视角下的体感控制型教育游戏设计, 对基于手势操控、适用于桌面近距离、面向教育目的新型电子游戏进行了阐述; 陈童^[8]等提出了基于 Leap Motion 的中国古琴声画结合交互设计研究; 徐崇斌^[9]等提出了一种基于 Leap Motion 的直观体交互技术, 结合 Leap Motion 传感器的特点, 提出一种结合手掌法向和指尖向量的空间姿态算法。

目前较为常用的体感交互设备 Kinect 具有识别范围广、精度较高等特点, 适用于人脸捕捉和对人体动作的识别。Leap Motion 则定位更偏向于“桌面”操作, 主要功能是识别高精度、低延迟的手指运动, 并且具有体积小、价格低、识别精度高等优点, 对于具有较高使用率和普遍性的虚拟实验及教学演示更为适宜。因此在本文研究算法中使用了更适合手部动作捕捉的 Leap Motion 交互设备作为外部数据的输入。

1.2 三维模型建模

要使虚拟实验场景能够仿真现实实验场景, 就需要具有真实感的模型来搭建场景, 因此建模在开发过程中是一项重要的工作。

目前常用的建模方法有 3 种: 第一种是利用三维建模软件 Maya, Zbrush, 3ds Max, Mudbox, LightWave 3D, Rhino 和 AutoCAD 等构建模型, 潘丹^[10]利用 Maya 的进行了虚拟手术场景的搭建, 余国庆^[11]在基于虚拟现实技术的心脏建模方法研究中应用 3ds Max 软件对人体心脏进行三维建模; 第二种是采用 OpenGL 和 Java3D 等计算机编程语言实现建模, 王菁^[12]应用 OpenGL 和计算机图形学技术, 探讨虚拟花卉的形态建模方法和可视化技术, 叶秀芬等^[13]利用 OpenGL 进行了对人体软组织形变系统的绘制, 杨金海^[14]利用 Java3D 面向

对象的设计方法将建立的玉米各器官模型实例化并进行组合,从而得到玉米个体模型;第三种是基于图像的三维建模技术,是利用照相机采集的离散图像或摄像机采集的连续视频作为基础数据,经过图像处理生成真实的全景图像,然后通过合适的空间模型把全景图像组织为虚拟实景空间,实现全方位观察三维立体的效果,隆兴银^[15]提出了基于人体实体切片的图像处理及三维重建技术研究,陈夏艳^[16]基于 TIP 方法重建物体和场景的三维模型,得到虚拟漫游的视频,同时为了满足虚拟漫游对真实感的要求,对虚拟漫游视频进行后续的处理,包括漫游视频的矫正和无缝拼接的融合,全建国^[17]以如何从图像中获取三维空间信息,重构出具有高度真实感的三维模型为重点,提出了基于图像模型重构方法及其在虚拟博物馆中的应用。

其中第一种方法具有操作简单、功能强大、兼容性好等特点,被广泛应用于广告、影视、工业设计、建筑设计、游戏、辅助教学以及工程可视化等领域。且鉴于 3ds Max 具有良好的兼容性、易于使用、插件种群多等特点,本文选用 3ds Max 软件进行模型的建立。

1.3 模型切割算法

切割动作在许多的实验过程中是必不可少,虚拟实验要想能够达到训练或演示等目的,就必须对切割动作进行仿真。因而,切割算法在虚拟手术仿真中是一项重要的实施环节。而由于切割涉及到对大量模型网格点、线、面等的处理,因此难以快速准确地实现,因此本文将切割算法的研究作为本文研究内容的重点之一。

目前已有的主要切割算法大致分为三类:单元剔除、面片分离和元素细分。单元剔除的主要思想是通过检测切割路径选择路径上的单元并进行剔除来实现切割,很大程度上由模型本身的精细度决定切割的细腻程度,具有易于实现的优点,缺点是会丢失材质^[18-20];面片分离的主要思想是找到分离的路径并进行曲面的拓扑改变,但是在实体中很难

保证切割效果的真实性^[21];元素细分算法是三类算法中较为成熟且真实的一种算法,思想是通过将切割路径上的元素细分来实现切割,具有较高的切割准确性^[22-23],在该方法中,Ganovelli^[24]又提出了多分辨率的切割算法,可以通过选择分辨率水平控制切割元素的数量和效果。

由于传统的切割算法需要对切口与表面进行切割,计算复杂且难以精确实施,因而较难达到实时显示的目标。为了解决这些问题,本文研究了基于碰撞点形成平面的切割算法来完成小鼠卵巢切割实验的仿真模拟,能够针对本文所模拟的实验进行快速、准确、良好的模拟。

由于 Leap Motion 能够识别高精度、低延迟的手指运动,且本文所模拟的实验主要依靠手部进行操作,因此本文在此基础上,根据实验的实际情况,通过 3ds Max 建模并结合一种基于碰撞点形成平面的切割算法来完成小鼠卵巢切割实验的仿真模拟。

2 小鼠卵巢切割模拟算法

本文搭建的虚拟实验系统如图 1 所示。该系统将虚拟小鼠卵巢切割手术仿真分为系统实验模型的建立、Leap Motion 手势定义及其与 Unity3D 接口链接、碰撞检测及切割算法 3 个部分。该系统将首先创建一个虚拟实验环境,用以展示实验所需材料和器材;然后通过 Leap Motion 识别用户手部动作,进而模拟诸如切割、夹取、剪切等小鼠卵巢切割实验操作。

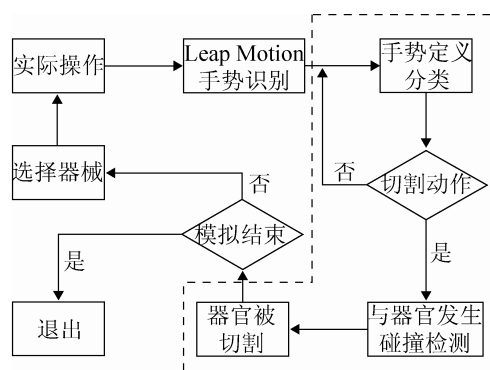
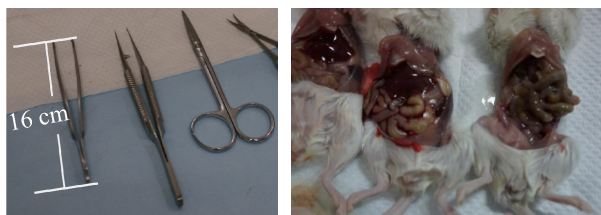


图 1 虚拟实验系统流程图

2.1 实验模型建立

本文系统中所用的模型主要由手术器械模型和小鼠器官模型两类。前期通过对小鼠卵巢切割实验的调查与分析(如图 2、表 1 所示), 通过利用米尺对实验器械的测量, 我们获得了实验器械的相关数据, 而小鼠器官的相关数据则有中科院动物研究所提供。



(a) 手术器械 (b) 小鼠器官

图 2 实验器械及小鼠真实图

表 1 主要器官及实验器械模型数据

序号	实验模型	真实尺寸/cm	#顶点数	#面片数
图 3(a)	镊子	16	7 617	7 473
图 3(b)	手术刀	15	424	848
图 4(a)	卵巢+子宫角	5	10 870	21 736

根据采集所得图片和数据, 在 3ds Max 中进行了建模。建模前期, 充分考虑器械各个组件部分的活性以及在后期仿真过程中的动作, 对建模顺序和成组关系进行了一定的设计, 如手术剪分别有左右两部分组成(如图 3 所示)。关于小鼠的器官也严格根据各器官之间的大小比例以及位置进行了设计。最后建成的模型以 fbx 的格式导入到 Unity3D 中, 通过导入真实小鼠解剖图作为参照, 根据各真实器官之间的排列, 将器官模型进行放置, 以搭建具有真实感的虚拟实验场景(如图 4 所示)。

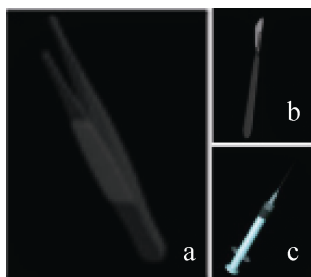
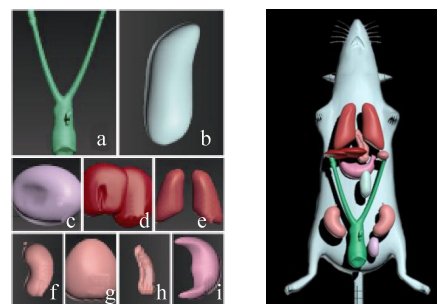


图 3 手术器械模型



(a) 各类器官模型 (b) 小鼠实验模型

图 4 小鼠器官模型

2.2 Leap Motion 与 Unity3D 接口

本系统的硬件组成主要分为计算机和交互设备两大部分。其中交互设备即 Leap Motion 会利用传感器测量用户手部在现实中的运动和位置信息并识别用户手部关节的动作, 并将结果实时地显示在计算机上, 是连接用户和虚拟实验环境的纽带。因此创建 Leap Motion 与 Unity 的接口十分重要。在本系统中搭建接口选用了 Leap Motion 官方 SDK。

其中最主要的一个核心资源是 HandController (以下简称“HC”), 这个是允许和 LeapMotion 设备交互的主要预制体, 它作为锚点将双手渲染到场景中。

HC 预制体有一个 HC 脚本附加在上面, 这样就允许了和设备的交互。检视面板里面有两个关于手的属性合作来在场景中渲染出真正的手部模型, 并且那里有两个物理模型用于物理碰撞。HC 物体是手的感应区和作用区, 物体必须在 HC 中, 并且保证摄像机能够监视到。

算法 1: 接口算法

- 1) 在工程中添加 Leap Motion;
- 2) 在 Unity 中选择 Assets→Import Package→Custom Package 选择并添加 Leap Motion 的包;
- 3) 将手部模型加入场景;
- 4) 在 Assets/LeapMotionPrefabs 中找到预设的 HandController;
- 5) 将预设的 HandController 拖入场景中;
- 6) 设置变换到所需的位置;

- 7) HandController 必须在 camera 的视野中;
- 8) 设置变换比例使得手部模型处于正确的大小(通常情况下过于小);
- 9) 从 HandModelsHuman 或者 HandModelsNonHuman 预设文件夹中设置左右手的图形模型;
- 10) 具体手部数据的获取;
- 11) 引用 Leap 命名空间, 其中 controller 作为主接口, 用以取得 Leap 的跟踪数据, 调用 frame 方法可实时获取最新帧。frame 表示每一帧中探测到的手以及手指的一系列数据, 包含了 Hands, Fingers, Pointables 以及 Tools 等属性。

2.3 碰撞检测及切割算法

本文在小鼠网格模型上构建碰撞器的。对于复杂网状模型上的碰撞检测, 需要更为精确的网格碰撞体。因为标记为凸起的(Convex)的网格碰撞器才能够和其他网格碰撞器发生碰撞, 所以首先要在 Rigidbody 组件中选定 Convex 属性。

算法 2: 切割算法

- 1) 对物体切割生成平面 M
 - 2) if M 与物体相交, 平面与物体相交的位置生成新的面片顶点
 - 3) if 交点与原有顶点例如: A 距离 $d < flag$, 则将 A 定为交点
 - 4) 根据新生成点, 对应成组生成新的三角网格
- 想要对模型进行切割必须要确定切割平面(如图 5 所示), AB 为切割时在摄像机平面上的起点和终点, 在线段 AB 上获取等长度的分割点如 S_1, S_2, S_3, S_4 等, 取得的分割点越多敏感度越高性能反而差, 所以一般情况下取 10 等分点即可, 通过这些点向世界坐标分别做射线, 得到相机到切割点的向量, 用 AB 向量和射线的向量求叉乘得到切割平面的法线向量 n ,

$$S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_n) / n \quad (1)$$

$$n = AB \times S \quad (2)$$

因为切割直线在切割平面上, 所以 AB 和 n 确定切割平面, 并将平面的信息传递到 Shattertool 函数中。

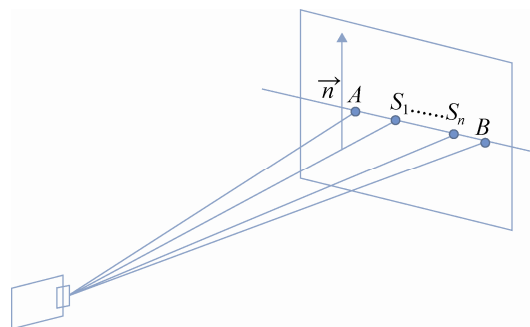


图 5 切割原理示意图

Shattertool 函数获取 plane 的数据后, 根据 Gustav Olsson 提出的 Shatter Toolkit 获取平面信息后在 Shattertool 函数中判断, 符合条件的话将信息传递给 TargetUvMapper 中, 将世界坐标转换为贴图的 UV 坐标。映射的目标区域的等点坐标的长宽比锁定为 1, 当用到目标区域时最终的纹理保持原有的比例。切割平面的生成结果, 根据上一步中求得的平面 M, M 与被切割物体的网格产生交点, 根据相交的部分生成新的模型平面如图平面 N。切割模型的同时, 对纹理进行相应的切割, 方法是根据切割平面的位置生成被切割后的物体, 并将原物体从场景中移除, 达到切割物体的作用。

具体效果如图 6(a)所示为进行切割前的图形, 图中已标记他的网格在平面 BCDG 上沿一条线进行切割, 切割后的下半部分为如图 6(b)所示, 切割位置生成新平面 FGDE, NDKELFMG 为根据切割平面和模型的交点新形成的点位, 组成新的三角网格达到封闭图形的目的。

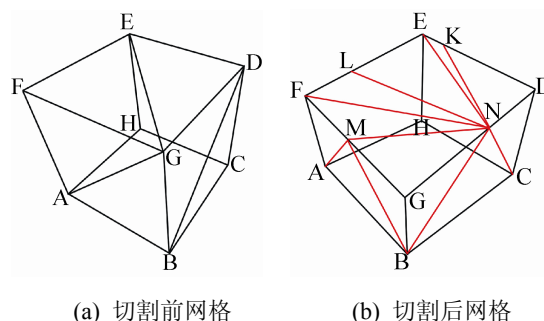


图 6 网格切割前后对比

关于切割后物体的受力情况, 是通过一个初始速度来模拟力的作用, 在新建一个 GameObject 时,

让生成的两个新 object 向着之前切割平面的法线 n 方向和 n 的反方向飞出, 并受到重力的作用。并且能够实现分割后的物体模型拥有和父体一样的物理属性, 如重力, 弹性以及材质等。

切割时的碰撞检测, 利用的是系统自带的碰撞检测系统, 碰撞体是制作模型是生成的 mesh 碰撞体, 碰撞处理分为碰撞器和触发器两大类, 添加网格碰撞体后, 想要模拟刀子或剪子切割模型进入的感觉, 需要利用 Trigger 来处理, 相对的物体之间需要利用 Collider 来处理。

2.4 小鼠器官形变算法

目前对于三维模型的形变通常有质点弹簧、有限元法等, 针对本文实验要求的实时性, 本文提出了基于运动学公式对小鼠的卵巢器官的形变模拟算法。通过实际经验我们得知, 受力点通常较其他部位有更大的形变, 而距离受力点较远的部位受影响较小甚至不受影响, 如何快速地模拟出这一效果就是本文算法所要做的。

因此我们将受力大形变大这一概念转化为顶点位移较大的概念, 将随距离受力点远近影响的衰减转化为位移的衰减, 由此得出每个点根据距离受力点远近而产生不同位移的运动学公式。

如图 7 所示为模型网格位移前后对比图, A 、 B 为网格上的顶点, A 为受力点, AB 之间连线的长度即为两点之间的距离 d , 红色部分为发生位移后的模型网格, A' 、 B' 为发生位移后的顶点, 虚线代表顶点的位移距离, 即 $a*dt*dt$, a 为矢量加速度, dt 为时间间隔。

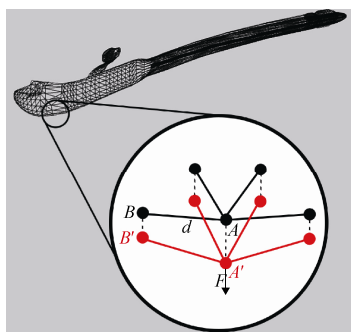


图 7 网格位移前后对比

算法 3: 形变算法主要步骤

- 1) 读取网格数据 mesh, 获得 $A(x_0, y_0, z_0)$, $B(x, y, z)$;
- 2) 计算其他点 $B(x_0, y_0, z_0)$ 到受力点 $A(x, y, z)$ 的距离 d , 即 $d = ((x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2)^{1/2}$;
- 3) A 受力 $F = ma$;
- 4) 速度 $v = a * t$;
- 5) $A' = A + a * dt * dt$, $B' = B + a * dt * dt / \log(d + 2.8)$;
- 6) 循环。

3 实验结果

本文系统运行于在配置条件为 AMD A8-5550 M APU, 4G 内存的笔记本电脑上。图 8 展示了用户操作手部对器官的拾起动作, 用户能够通过观察屏幕中的动作反馈在现实中对器官进行模拟地抓取; 图 9 展示了用户操作手部对器官的托举动作, 搭建的 Leap Motion 接口能够较好地实现手部与物体的碰撞检测, 从而增强用户的体验感; 图 10 展示了用户手持手术剪的动作, 手部模型与实验器械完成碰撞检测后可以模拟出手持器械的情景, 用户可根据实际情况进行操作; 图 11 展示了用户对小鼠器官切割的结果, 由图可见, 切割较为准确, 切面平滑无锯齿, 能够较好地模拟切割效果。整个操作过程较为流畅, 对动作的捕捉十分精确, 能够良好地模拟实验过程。



图 8 拾起器官

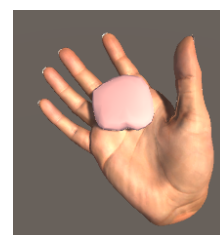


图 9 托举器官



图 10 用户手持手术剪的动作

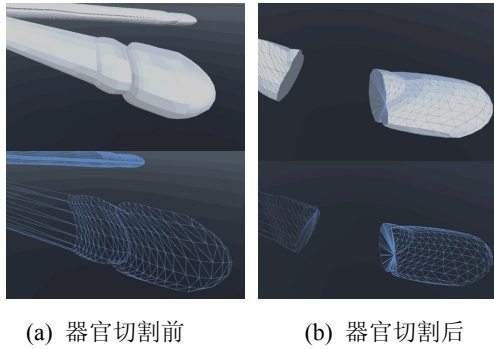


图 11 小鼠器官切割结果

4 结论

本文提出一种基于 Leap Motion 的小鼠卵巢切割实验算法。该算法为用户提供了实时捕捉手部动作的接口和逼真的虚拟实验场景, 使用户能够通过亲身手部操作来完成小鼠卵巢的切割实验。实验结果表明, 文中算法可以较为真实地还原整个小鼠卵巢切割的实验过程, 对学生学习实验有关操作和知识有很大帮助。本文算法有一定的局限性, 还未能很好模拟小鼠器官的形变, 未来将进一步加强形变研究工作, 使整个虚拟场景更为真实。

参考文献:

- [1] 蒋玉娟. 面向虚拟手术的软体几何建模和变形算法的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009: 8-16.
- [2] 百度百科. 力反馈手套 [EB/OL]. (2016-07-19) [2016-08-31]. http://baike.baidu.com/link?url=4a8Y7aFSA_CeS566TFYG_R17gRcEX6J-CavOdCBocKEg_4qPJJDQWHjcukPfOMdfKwIK6298SpvnTXOhhNioHVK.
- [3] 百度百科. Kinect [EB/OL]. (2016-08-25) [2016-08-31]. http://baike.baidu.com/link?url=Ciq0vuUQUc-PRxdKXgwaP0Kls2JN-koZniWb8FxDjexBCE2LIYfH9-greP_7qBizH7ht5cI51oLdCOnvu7newK.
- [4] 百度百科. Leap Motion [EN/OL]. (2015-08-10) [2016-08-31]. http://baike.baidu.com/link?url=gDdtceKX1yy8Yl2UzHr2BBeeknzJQktY5s6WGc1X1RYZAMUjSAm_sQBvo_sBnm_HeRc8VfQphqQAJOBAsqbqng.
- [5] 李小龙. 基于 Kinect 手势识别的虚拟人体解剖教学系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 48-66.
- [6] 李萌. 基于体感交互的沉浸式森林景观展示研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 23-34.
- [7] 顾汉杰. The Leap 概念视角下的体感控制型教育游戏设计 [J]. 现代教育技术, 2014 (2): 108-114.
- [8] 陈童, 王妍, 赵琦. 基于 Leap Motion 的中国古琴声画结合交互设计研究 [J]. 文艺评论, 2014 (9): 77-81.
- [9] 徐崇斌, 周明全, 沈俊辰, 等. 一种基于 Leap Motion 的直观体交互技术 [J]. 电子与信息学报, 2015 (2): 353-359.
- [10] 潘丹. 基于 unity3D 的手术训练游戏的设计与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2014: 44-48.
- [11] 余国庆. 基于虚拟现实技术的心脏建模方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 21-27.
- [12] 王菁. 虚拟花卉形态建模方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 23-33.
- [13] 叶秀芬, 乔冰, 郭书祥, 等. 虚拟手术仿真中人体软组织形变技术的研究 [J]. 计算机应用, 2009 (2): 568-573.
- [14] 杨金海. 玉米生长器官建模及计算机模拟研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2010: 21-29.
- [15] 隆兴银. 基于人体实体切片的图像处理及三维重建技术研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005: 27-45.
- [16] 陈夏艳. 基于图像建模的虚拟漫游技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 29-41.
- [17] 全建国. 基于图像的模型重构方法及其在虚拟博物馆中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 43-59.
- [18] S Cotin, H Delingette, N Ayache. A hybrid elastic model allowing real-time cutting, deformations and force-feedback for surgery training and simulation [J]. The Visual Computer (S1087-4844), 2000, 10(21): 437-452.
- [19] F Sarah, Frisken-Gibson. Using Linked Volumes to Model Object Collisions, Deformation, Cutting, Carving, and Joining [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 1999, 20(15): 169-177.
- [20] T Igarashi, S Matsuoka, S Kawachiya, et al. Pegasus: A drawing system for rapid geometric Design [J]. Extended Abstracts of ACM Cm Conference on Human Factors in Computing Systems, 1998, 27(14): 24-25.
- [21] D Bielser, M H Gross. Interactive simulation of surgical cuts [J]. Proceedings of Pacific Graphics, 2000, 23(17): 116-125.
- [22] 胡序一. 虚拟手术中基于质点弹簧建模及其切割技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 50-61.
- [23] Yi-Je Lim, Suvarnu De. On the Use of Mesh-free Methods and a Geometry Based Surgical Cutting Algorithm in Multimodal Medical Simulations [J]. The International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System, 2004, 21(11): 295-301.
- [24] F Ganovelli, P Cignoni, C Montani, et al. A Multi-resolution Model for Soft Objects Supporting Interactive Cuts and Lacerations [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2000, 33(19): 271-281.