

# 虚拟手术系统开发软件平台研究

沙聪雪, 沈建新, 梁 春

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**虚拟手术系统用于手术教学训练、手术方案制定、远程手术等方面,它正日益受到人们的关注。虚拟手术融合多种先进技术,其系统研发难度大。现如今涌现出大量开发虚拟手术系统可使用的软件平台,它们封装了建立系统所需的一些关键算法,可以促进国内外开发人员对新算法的研究,并提高新的虚拟手术系统的研发效率,减少重复劳动。文中分类分析了这些软件平台的功能和优缺点,并研究了虚拟手术系统开发软件平台的关键技术。

**关键词:**虚拟手术;软件平台;算法;应用

中图分类号:TP302

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)03-0011-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.03.003

## Research on Software Platforms for Virtual Surgery Systems

SHA Cong-xue, SHEN Jian-xin, LIANG Chun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Nowadays, virtual surgery system has been paid more and more attention which is mainly used in surgery training, surgical planning and telesurgery. Virtual surgery is a frontier science with overlapping of multifold advanced technology, so the development of surgery simulation system is difficult. There are a lot of software platforms that can be applied to surgery simulation systems now. They encapsulate the key algorithms of the systems, and can help the developers shorten the time researching new algorithms and new systems, reducing repetition work. Analyze the function and advantage and disadvantage of software platforms in classification, and research the key technologies of developing software platform.

**Key words:** virtual surgery; software platforms; algorithm; application

## 0 引言

随着外科手术新技术的发展,虚拟手术仿真技术应运而生。它属于计算机技术、传感器技术、生物力学等多学科交叉领域,旨在给操作者真实的虚拟手术环境<sup>[1]</sup>。

医学界真正意义上的虚拟手术发生在1995年,以虚拟手术系统中加入力反馈设备为标志。目前国内外典型的虚拟手术系统有:德国 Karlsruhe 大学开发的微创外科手术仿真训练系统<sup>[2]</sup>,法国 INRIA 机构肝脏切割仿真手术系统<sup>[3]</sup>,香港中文大学基于达芬奇机器人开发的手术仿真系统<sup>[4]</sup>等。美国的 Satava 博士将医学仿真系统划分为三代<sup>[5]</sup>,现今研制的虚拟手术仿真系统基本实现了第二代仿真,能够表现器官组织的物理特征、生物力学特性。

几何物理建模、碰撞检测、并行计算等关键算法的研究是虚拟手术技术发展的源动力。为了更高效地利用现有算法,近年来国内外的研究机构通过将算法封装建立类库,设计开发出许多应用于虚拟手术系统的软件平台。相关研究者和应用者通过直接运用软件平台进行系统开发,可以极大地缩短研发时间。

国内外学者对研发用于虚拟手术系统的高质量软件平台非常重视。Medical Image Computing & Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2003 会议<sup>[6]</sup>就关于医学影像领域的软件平台设计问题做了探讨,Medicine Meets Virtual Reality Conference (MMVR) 2007 会议也对用于医疗仿真的开放源软件框架做了讨论研究。目前针对虚拟手术系统的软件平台的设计与实现已经成为一个热门的研究领域。

收稿日期:2013-05-22

修回日期:2013-08-28

网络出版时间:2014-01-07

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2012380);江苏省产学研项目(BY2012009)

作者简介:沙聪雪(1990-),女,硕士生,研究方向为计算机辅助建模及分析;沈建新,教授,博士生导师,研究方向为数字化设计制造、数字化医疗装备技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140107.1721.043.html>

### 1 虚拟手术系统

虚拟手术系统整体结构如图 1<sup>[7]</sup>, 根据医学图像建立的器官几何模型, 通过光照、纹理等渲染效果可以进行视觉呈现。建立在器官几何模型和物理模型基础之上的变形计算, 与碰撞检测交互作用, 计算出碰撞后的接触力和变形位移反馈给操作者。因此, 建立一套虚拟手术系统的关键在于模型构建、碰撞检测、变形计算、图形绘制和力反馈这五大模块的构建。

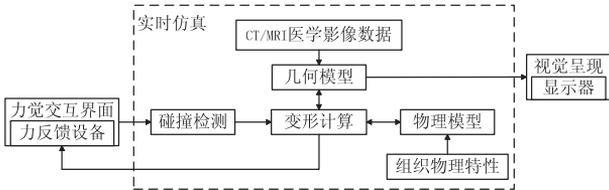


图 1 虚拟手术系统结构

### 2 虚拟手术系统软件平台

目前虚拟手术系统中应用的软件平台主要归为两种: 医学图像建模软件平台和虚拟手术变形仿真软件平台。利用前者虚拟系统开发者可以完成几何建模模块; 后者则将物理建模、变形计算、碰撞检测、力反馈部分的相关类封装建立成基础类库, 主要有虚拟手术框架和力反馈开发包两类。

#### 2.1 医学图像建模软件平台

可用于医学图像建模的软件平台有算法平台 (Algorithm Toolkit) 和具有友好用户界面的应用平台 (Application System) 两类<sup>[8]</sup>。其中, 可视化算法平台 (Visualization ToolKit) 和分割配准平台 ITK (Insight segmentation and registration ToolKit) 是目前使用最广泛的两个开源算法平台。

VTK 是由美国 Kitware 公司开发的通用图像处理软件, 最初的设计目的是用于医疗的可视化方面<sup>[9]</sup>。VTK 内部封装了众多常用的图形操作、图像处理、数据可视化算法, 且能够支持和处理多种表示格式的图像数据。它采用 Pipeline 机制, 用户可以方便地选择所需的类, 并用数据通道连接建立可视化流程。

ITK 起源于美国可视化人体项目, 是医学影像领域研究人员的一个分割和配准算法的仓库和基础<sup>[10]</sup>, 但是它缺乏三维重建算法。VTK 的三维图形功能强大, 同时支持体绘制和面绘制, 却不提供图像分割算法。所以一般将两者联合起来使用才能构成一个比较完整的医学图像处理系统。虽然两者框架设计都是由 Kitware 公司完成, 但是由于吸收了不同的编程语言特性, 编程风格截然不同, 同时学习两套规模庞大的开发平台, 对开发者有一定难度。

针对这些缺憾, 一些研究机构和公司基于 VTK 和 ITK 开发新的医用图像处理平台, 在统一的框架上实

现了医学影像的分割、配准、三维可视化等算法, 典型的有中国科学院自动化研究所自主研发的 MITK 和 3DMed。MITK 专门面向医学领域, 规模较小, 并对一些医学图像处理的关键算法进行了优化。它风格统一, 方便移植<sup>[11]</sup>。3DMed 在 MITK 的基础上包含了用户界面开发包。MITK 和 3DMed 都是开放源的, 易于获取, 属于科研软件性质。结合 VTK 和 ITK 两者开发的相关软件平台还有: 开源的 3D Slicer、大型商业软件 Analyze、通用可视化图像处理系统 AVS (Advance Visualization Systems)、基于 OpenInventor 的图像处理系统 Amira、医学影像交互平台 (Medical Imaging Interaction Toolkit) 等等。

除了上述系统之外, 还有一些公司完全自主独立开发的图像处理软件平台, 其中较著名的有: 美国 RSI 公司开发的 IDL (Interactive Data Language)、德国 VG 公司开发的 VGStudio Max 系统、美国 Able Software 公司开发的 3D Doctor 医用三维建模系统等。

#### 2.2 虚拟手术软件框架

虚拟手术软件框架为构造虚拟手术系统提供了基本的构造块, 类库中大部分为抽象类, 开发者通过继承抽象类和组合实例来生成特定的应用。

由 Case Western Reserve 大学和 California 大学等联合开发的 GiPSi 是一款拥有强大计算功能的通用软件框架, 它的物理模型采用有限元模型, 强调模块化, 系统结构如图 2 所示<sup>[12]</sup>, 主要有仿真核心、可视化引擎、力反馈引擎、碰撞检测几大部分。仿真核心主要负责变形仿真中的计算, 内部封装了一系列基本线性代数函数程序包, 可以支持复杂的向量、矩阵计算。对视觉和触觉绘制 GiPSi 提供了标准化的 I/O 接口, 视觉绘制部分采用 OpenGL 渲染对象, 且能够展示动态的纹理, 同时 GiPSi 还支持远程可视化和远程操纵。Case Western Reserve 大学利用 GiPSi 开发了一个脑部内窥镜仿真试验平台。

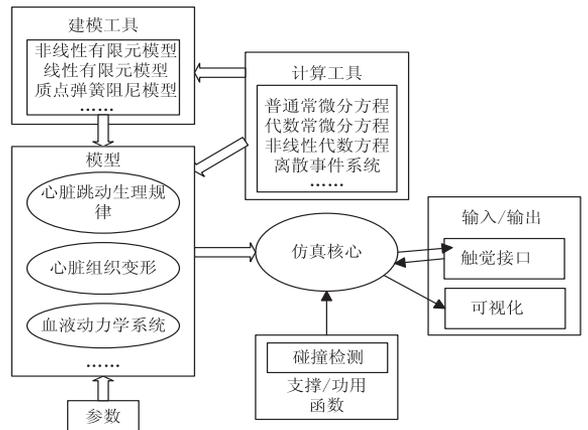


图 2 GiPSi 系统结构

物理模型采用有限元模型的还有日本大阪大学开

发的 VRASS 软件框架。有限元计算复杂度高,目前更多软件系统采用质点弹簧模型作物理模型,如 SOFA、SPRING 等。

Stephane Cotin 等人开发的 SOFA 有很强的灵活性,系统计算时模型用线弹性代替非线性,且支持并行计算,利用 GPU 加速,以满足虚拟手术实时性要求。SOFA 绘图机制采用多模型呈现方式,如图 3。其中,碰撞模型用于实现不同模型之间的碰撞检测,行为模型负责力场、约束、拓扑改变等方面的计算,模型之间通过映射连接在一起以便更新时达到一致<sup>[13]</sup>。SOFA 中还引入了图形学中场景图的概念,在场景图中的每一个组件都是它的一个节点,各个节点只存储它们父亲和孩子组件的指针,通过系统内部维持各组件的一致性,简化了场景图的遍历。S. Cotin 等为软组织撕裂建立了基于纤维的断裂模型,并基于 SOFA 开发了白内障手术的仿真器<sup>[14]</sup>。

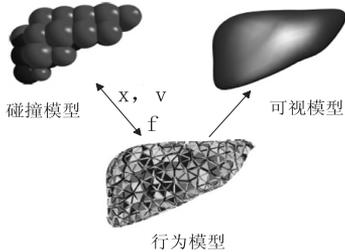


图3 SOFA 模型之间的映射

相比于 SOFA 和 GiPSi, SPRING 的特点是它较强大的网络化功能,可以通过网络连接主要涉及的设备与系统,并实现操作过程可视化<sup>[15]</sup>。SPRING 支持多设备,多用户,多仪器,支持并行化处理。

以上介绍的系统均为开放源的,虚拟手术框架大部分都具有开源性,这一特性加速了系统本身的发展,也可为更多的需要提供服务。

### 2.3 力反馈开发包

力反馈开发包是力反馈公司根据相应的力反馈器开发的,一般还包括力反馈设备的控制程序。

现今的力反馈设备中使用最广泛的是美国 Sensable 公司的 PHANTOM,此外比较出名的还有 3DImmersion 公司的 CyberForce, Dimmension 公司的 Force Dimmension 系列产品 OMEGA、DELTA 等,法国 Haption 公司的 HAPTION Virtuouse, Novint 公司的 Novint Falcon, 等等。

其中,美国 Sensable 公司研制的 PHANTOM 力反馈配套的力反馈编程平台 GHOST SDK 和 OpenHaptics 软件包,与 Dimmension 公司的力反馈开发包 CHA3D 属于开放的编程平台,应用最为广泛。

GHOST SDK 视觉刷新频率一般在 30 Hz 左右,触觉刷新频率 1 kHz。如图 4 所示,标准 GHOST SDK 包

含两个进程:应用程序进程和触觉仿真进程<sup>[16]</sup>。应用程序执行视觉循环,实现系统的核心应用如模拟计算、图形绘制等;触觉仿真进程负责底层力反馈计算。在每个视觉循环中,两个进程进行交互,获取 PHANTOM 笔尖的位置、转角信息,相关程序开发人员不需关注底层的力学设备问题。

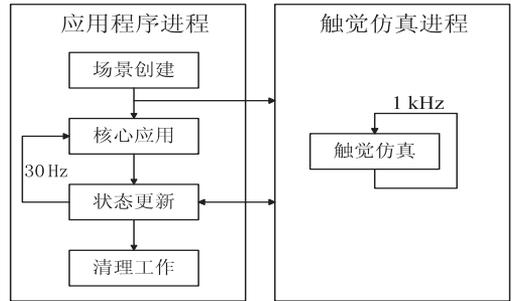


图4 标准的 GHOST SDK 应用程序

相比于 GHOST SDK, OpenHaptics 有较多优势。它包含了三个不同层次的程序库: HDAPI、HLAPI 和 QuickHaptics micro API,可以满足不同层次程序员的需求,而且它属于过程式类库,编程方式与 OpenGL 相近,对于程序员来说更易掌握。对于 Sensable 公司最新的力反馈设备, GHOST SDK 已经不再支持<sup>[17]</sup>。虽然目前基于 OpenHaptics 的研究较少,但是随着 Sensable 公司设备的发展, OpenHaptics 终将取代 GHOST 成为主流的力反馈编程平台。

OpenHaptics 和 GHOST SDK 都只能用于 Sensable 公司开发的产品。CHA3D 则能支持多种商业化的三自由度和六自由度的触觉反馈装置,如 Omega、Phantom、Novint、Falcon 和 delta 等系列,对多种触觉装置的支持也使应用程序更容易在具有不同硬件环境的远程站点上使用<sup>[18]</sup>, CHA3D 中封装了 OpenGL 的 API,可以提供三维对象创建、渲染和操纵等功能,还封装了与虚拟环境中对象相关的各种模块,例如材质、显示、数学计算、碰撞检测和文件存储等。它结构小巧,特别适用于教学及科研,只要在轻量级的开发平台上就可以对其进行开发扩展。图 5 是采用 CHA3D 开发包搭建的角膜虚拟手术仿真实验,力反馈设备采用 Force Dimension 公司的 Falcon。角膜的几何模型根据角膜地

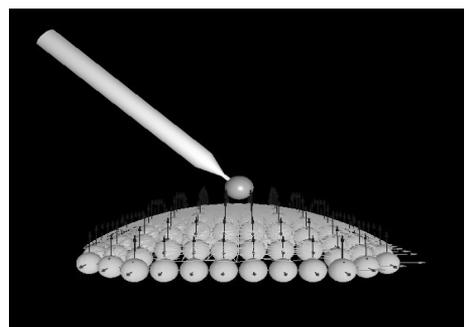


图5 角膜虚拟手术实验

形图仪得出角膜表面三维点云数据的建立,角膜变形的物理模型采用支撑球弹簧模型<sup>[19]</sup>,仿真具有较好的实时性和真实性。

除了 CHAI3D 以外,支持多种商业触觉设备的还有 SenseGraphics 公司开发的 H3D API 等,这些力反馈开发包高度模块化而且易于扩展,让开发者实现触觉和视觉应用的完美结合。

### 3 虚拟手术软件平台关键技术

虚拟手术技术是虚拟现实技术在医学上的重要应用,所以交互性(Interactivity)、想象性(Imagination)和沉浸性(Immersion)<sup>[20]</sup>也是它应具备的三大特性。虚拟手术技术的发展目标就是能够更好地实现仿真的“实时性”和“真实性”。现对虚拟手术软件平台中的关键技术进行阐述。

(1) 医学图像三维重建技术。基于医学图像的三维建模可以为手术仿真提供一个更加准确、全面的人体器官模型。它从信息丰富的影像数据中快速、准确地提取出感兴趣的轮廓信息,然后用体绘制法或面绘制法重构三维模型。VTK 包含的基于空间域的光线投射法(Ray Casting)就属于体绘制算法,它还包含面绘制里最常用的移动立方体法(Marching Cube)。体绘制能保留三维图像各种细节,面绘制则忽略了器官内部结构,所以计算速度较快。

(2) 具有真实感的物理建模技术。几何模型融合生物组织非线性、黏弹性等物理特性才能实现较为真实的手术模拟。物理建模方法有有限元法、质点弹簧法、边界元法和长单元法等。其中有限元仿真精确性最高,但是时间耗费大,质点弹簧模型计算量最小、拓扑灵活但是仿真不够精确。目前大部分力反馈开发包和虚拟框架,如上面介绍的 CHAI3D、SOFA、SPRING 等,采用质点弹簧模型或是质点弹簧改进模型(如支撑球弹簧模型、传递链模型等)。具有强大计算功能的 GIPSI 采用有限元模型。

(3) 提高仿真速度的并行计算技术。基于并行机和 NVIDIA GPU 硬件的并行计算技术能使算法加速。在浮点运算、并行计算等方面,GPU 可以提供数十倍乃至上百倍于 CPU 的性能。并行算法还可以通过采用高效聚合通信算法、挖掘算法、通信和计算重叠等进一步得到优化。采用并行计算技术是虚拟手术软件平台解决仿真精度和速度矛盾的重要策略。SOFA、SPRING 等在变形仿真计算时均采用了并行计算技术进行提速。

(4) 远程手术仿真协同技术。在远程协同的虚拟场景下,多个操作者可以在不同地域对真实或虚拟的病人进行手术,或远程遥控手术机器人,还可以通过计

算机为手术提供指导。这种仿真环境可以让不同地域的多个专家合作进行手术规划和实际手术实施。

### 4 结束语

随着计算机技术特别是虚拟现实技术的发展,虚拟手术仿真技术走进了人们的视野,其应用前景广阔,对于医学发展具有重大意义。最近的十几年里,涌现了许多针对虚拟手术领域开发的算法工具和软件平台,加速了优秀虚拟手术仿真系统的研发,为全人类的健康事业做出了贡献。

目前国外的虚拟手术技术较为先进,国内起步相对较晚。国内对虚拟手术仿真系统和仿真器的研究主要集中在三维物体重建、碰撞检测算法和变形仿真等方面,并取得了突出的成绩,但是针对力反馈交互设备部分的研究稍弱,在临床手术中应用较少。希望越来越多的研究者加入到虚拟手术软件平台的研发中,以促进中国虚拟手术技术的发展。

#### 参考文献:

- [1] 赵蔚,段红. 虚拟现实软件研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(2):229-233.
- [2] 李君红. 腹腔介入式手术机器人仿真技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [3] Sorhus V. A new platform for laparoscopic training and education[J]. Medicine meets virtual reality,2005(13):502-507.
- [4] Sun L W, Meer F V, Bailly Y. Design and development of a da Vinci surgical system simulator [C]//Proc of international conference on mechatronics and automation. Harbin, China; [s. n.],2007:1050-1053.
- [5] Satava R M, Jones S B. An integrated medical virtual reality program [J]. IEEE engineering in medicine and biology, 1996,15(2):94-97.
- [6] Ellis R E, Peters T M. Medical image computing and computer-assisted intervention [C]//Proc of MICCAI. Montreal: Springer,2004.
- [7] 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,2009,29(2):568-573.
- [8] 李恩中. 医学图像处理与分析软件平台综述[J]. 计算机科学与探索,2008,2(5):467-477.
- [9] 赵奇峰,郭宝龙,张磊. 基于 VTK 的医学图像可视化三维重建[J]. 计算机技术与发展,2009,19(6):39-42.
- [10] 郭圣文. 利用 VTK 与 ITK 的集成实现医学图像可视化[J]. 计算机工程与应用,2006,42(30):183-184.
- [11] 赵明昌,田捷,薛健,等. 医学影像处理与分析开发包 MITK 的设计与实现[J]. 软件学报,2005,16(4):485-495.
- [12] Cavusoglu M C, Goktekin T G, Tendick F. GiPsi: A framework for open source/open architecture software development for or-

实基于 GMM 的运动目标检测具有较好效果,能满足视频监控的基本要求,同时文中也实现了运动目标检测与跟踪模块,如图 4 所示。事件检测是在目标跟踪的基础上对突发事件的检测,如对交通事故、非法聚集等的检测,智能处理则是根据检测到突发事件或异常情况与事先设置的报警规则进行对比,根据不同的规则对事件采取相应的处理策略,比如接入警务系统。这两部分亦是智能视频监控的重要组成部分。

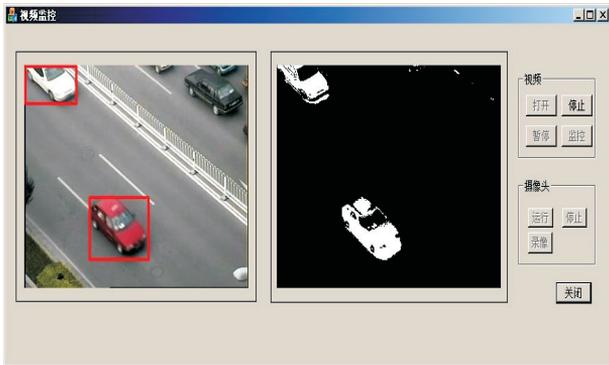


图 4 运动目标检测与跟踪模块实现

#### 4 结束语

文中利用 OpenCV 技术实现了 GMM,实验结果表明高斯混合模型对道路监控视频运动目标检测具有较好的效果。然后将基于 GMM 的运动目标检测技术进行应用,在此基础上设计了一种智能视频监控系统。据预计<sup>[15]</sup>,我国 2015 年安防产业总产值将达到 5 000 亿元,而智能视频监控是公共安防的核心和主体部分,其市场规模占整个安防产业的 50% 以上。由此可知,作为智能视频监控系统的关键技术之一,高效、稳定、实用的运动目标检测技术具有重要的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 王亮,胡卫明,谭铁牛.人运动的视觉分析综述[J].计算机学报,2002,25(3):225-237.

[13] Allard J, Cotin S, Faure F, et al. SOFA—An open source framework for medical simulation[J]. Studies in health technology and informatics, 2007, 125: 13-20.

[14] Allard J, Marchal M, Cotin S. Fiber-based fracture model for simulating soft tissue tearing[J]. Studies in health technology and informatics, 2009, 142: 13-18.

[15] Montgomery K, Bruyns C, Brown J, et al. Spring: A general framework for collaborative, real-time surgical simulation[J]. Studies in health technology and informatics, 2002, 85: 296-303.

[2] 梁华.多摄像机视频监控中运动目标检测与跟踪[D].长沙:国防科学技术大学,2009.

[3] Lipton A, Fujiyoshi H, Patil R. Moving target classification and tracking from real-time video[C]//Proc of IEEE workshop on applications of computer vision. Princeton, NJ: [s. n.], 1998: 8-14.

[4] Meyer D, Denzler J, Niemann H. Model based extraction of articulated objects in image sequences for gait analysis[C]//Proc of IEEE international conference on image processing. Santa Barbara, California: [s. n.], 1997: 78-81.

[5] 代科学,李国辉,涂丹,等.监控视频运动目标检测减背景技术的研究现状和展望[J].中国图象图形学报,2006,11(7):919-927.

[6] 杨文涛,郑国柱,郑立新,等.基于高斯混合模型的光照自适应背景减法[J].湖北大学学报(自然科学版),2012,34(3):355-359.

[7] 白向峰,李艾华,李喜来,等.新型背景混合高斯模型[J].中国图象图形学报,2011,16(6):983-988.

[8] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. 图像处理、分析与机器视觉[M].第3版.艾海舟,苏延超,译.北京:清华大学出版社,2011:372-377.

[9] OpenCV 中文网[EB/OL]. [2013-04-27]. <http://www.opencv.org.cn/index.php>.

[10] KaewTraKulPong P, Bowden R. An improved adaptive background mixture model for real-time tracking with shadow detection[C]//Proc of 2nd European workshop on advanced video based surveillance systems. [s. l.]: [s. n.], 2001.

[11] 张娟,毛晓波,陈铁军.运动目标跟踪算法研究综述[J].计算机应用研究,2009,26(12):4407-4410.

[12] 陈晓博.视频监控系统中的运动目标识别匹配及跟踪算法研究[D].北京:北京邮电大学,2011.

[13] 朱秀昌.视频编码新标准—H.264[J].电信科学,2012(12):26-29.

[14] 贾代平,范辉.流媒体技术规范及其应用技术研究综述[J].计算机工程,2005,31(2):5-6.

[15] 中国安全防范产品行业协会.中国安防行业“十二五”(2011~2015年)发展规划[J].中国安防,2011(3):2-9.

[16] 徐凯.基于力反馈的虚拟膝关节手术系统的研究与实现[D].长沙:国防科学技术大学,2005.

[17] 唐贤根,熊岳山,谭珂,等.一种基于 OpenHaptic 的软组织有限元形变模型[J].系统仿真学报,2012,24(7):1434-1437.

[18] 黄莹莹.面向腹腔镜虚拟手术的软组织切割变形仿真技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[19] Conti F, Khatib O, Baur C. Interactive rendering of deformable objects based on a filling sphere modeling approach[C]//Proceedings of the 2003 IEEE international conference on robotics & automation. [s. l.]: [s. n.], 2003: 3716-3721.

[20] 涂超.虚拟现实真实感树木的实时绘制[J].计算机技术与发展,2009,19(6):206-209.

(上接第 14 页)

gan-level surgical simulation[J]. IEEE transactions on information technology in biomedicine, 2006, 10(2): 312-322.

# 虚拟手术系统开发软件平台研究

作者: [沙聪雪](#), [沈建新](#), [梁春](#), [SHA Cong-xue](#), [SHEN Jian-xin](#), [LIANG Chun](#)  
作者单位: [南京航空航天大学 机电学院](#), 江苏 南京, 210016  
刊名: [计算机技术与发展](#)

---

ISTIC

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

---

年, 卷(期): 2014(3)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201403003.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201403003.aspx)