

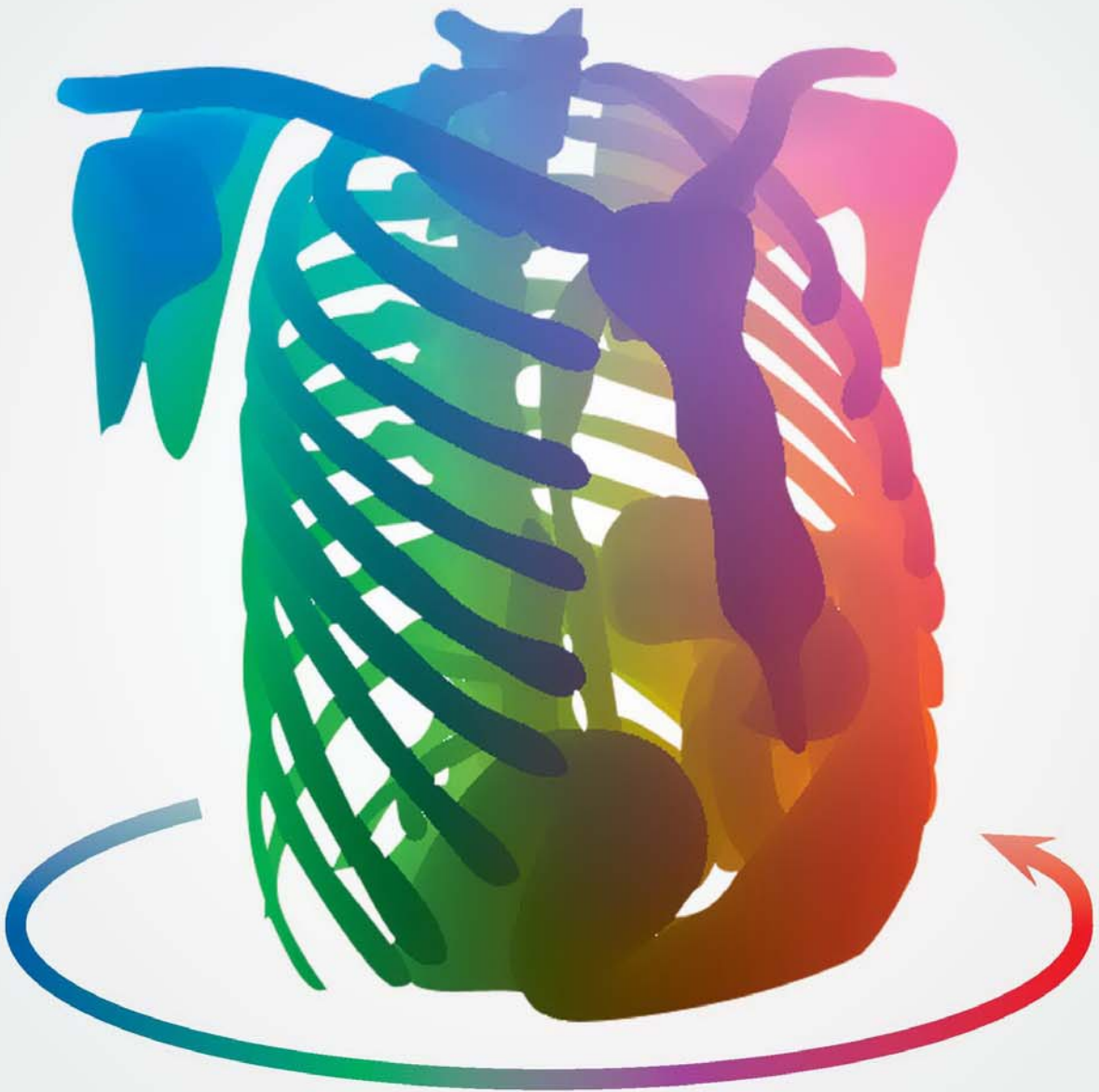


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
02
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



等值面光线跟踪 P193



第20卷第2期（总第226期）

2015年2月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



多尺度活动网格在云场景仿真中的应用(第0202页)



自然环境视频中基于显著鲁棒轨迹的行为识别(第0245页)



虚拟手抓持力觉生成算法真实性的评价(第0280页)

图像处理和编码

引入神经网络中间神经元的快速小波图像压缩

张海涛, 张永霖 0159

拟正态分布扩散的图像平滑

周先春, 汪美玲, 周林锋 0169

可选特征的快速分形图像编码

袁宗文, 鲁业频, 杨汉生 0177

图像分析和识别

融合多尺度码本的全局编码图像分类

董振宇, 赵杰煜, 祝军 0183

计算机图形学

结合K-D树和Shell的快速动态等值面光线跟踪法

罗月童, 石放放, 张伟, 朱会国 0193

多尺度活动网格在云场景仿真中的应用

范晓磊, 张立民, 张建廷, 徐涛 0202

第十届和谐人机环境联合会议专栏

低资源语言的无监督语音关键词检测技术综述

杨鹏, 谢磊, 张艳宁 0211

快速离散Curvelet变换域的图像融合

杨勇, 董松, 黄淑英 0219

高效视频编码中变换跳过模式的快速选择

王宁, 张永飞, 樊锐 0229

主动学习的多标签图像在线分类

徐美香, 孙福明, 李豪杰 0237

自然环境视频中基于显著鲁棒轨迹的行为识别

易云, 王瀚漓 0245

特征变换和数据集分块的行人比对

沈洋, 林巍晓, 殷惠清 0254

移动手持环境下触摸式目标选择技术对比

辛义忠, 李岩, 袁伟强, 郑谦 0264

虚拟环境的用户意图捕获

程成, 赵东坡, 卢保安 0271

虚拟手抓持力觉生成算法真实性的评价

杨文珍, 许艳, 颜传武, 吴新丽, 张昊, 孟闯 0280

交互式乐器演奏的六自由度力觉渲染方法

童号, 史有姣, 王党校, 张玉茹 0288

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-scale moving grids and its application in clouds scene simulation(P0202)



Action recognition from unconstrained videos via salient and robust trajectory (P0245)



Validation the Authenticity of Virtual fingers Grasping Haptic Algorithm(P0280)

Image Processing and Coding

- Fast wavelet image compression introducing neural network of relay neuron
Zhang Haitao, Zhang Yonglin 0159
- Image smoothing algorithm based on matching normal distribution diffusion
Zhou Xianchun, Wang Meiling, Zhou Linfeng 0169
- Optional features fast fractal image coding algorithm
Yuan Zongwen, Lu Yepin, Yang Hansheng 0177

Image Analysis and Recognition

- Image classification based on global coding combined with multi-scale codebook
Dong Zhenyu, Zhao Jieyu, Zhu Jun 0183

Computer Graphics

- Fast isosurface ray tracing method by combining K-D tree and Shell
Luo Yuetong, Shi Fangfang, Zhang Wei, Zhu Huiguo 0193
- Multi-scale moving grids and its application in clouds scene simulation
Fan Xiaolei, Zhang Limin, Zhang Jianting, Xu Tao 0202

Column of HHME'2014

- Survey on unsupervised spoken term detection for low-resource languages
Yang Peng, Xie Lei, Zhang Yanning 0211
- Image fusion based on fast discrete Curvelet transform
Yang Yong, Tong Song, Huang Shuying 0219
- Fast transform skip mode decision for high efficiency video coding
Wang Ning, Zhang Yongfei, Fan Rui 0229
- Online multi-label image classification with active learning
Xu Meixiang, Sun Fuming, Li haojie 0237
- Action recognition from unconstrained videos via salient and robust trajectory
Yi Yun, Wang Hanli 0245
- Pedestrian re-identification based on feature transformation and dataset classification
Shen Yang, Lin Weiyao, Yin Huiqing 0254
- Comparison of target selection techniques in mobile handheld environment
Xin Yizhong, Li Yan, Yuan Weiqiang, Zheng Qian 0264
- Intent understanding for virtual environments
Cheng Cheng, Zhao Dongpo, Lu Baoan 0271
- Validation the authenticity of virtual fingers grasping haptic algorithm
Yang Wenzhen, Xu Yan, Yan Chuanwu, Wu Xinli, Zhang Hao, Meng Chuang 0280
- Interactive simulation of music instrument playing by a six degree-of-freedom haptic rendering approach
Tong Hao, Shi Youjiao, Wang Dangxiao, Zhang Yuru 0288

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)02-0288-08

论文引用格式: Tong H, Shi Y J, Wang D X, Zhang Y R. Interactive simulation of music instrument playing by a six degree-of-freedom haptic rendering approach[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(2): 0288-0295. [童号, 史有姣, 王党校, 张玉茹. 交互式乐器演奏的六自由度力觉渲染方法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(2): 0288-0295.] [DOI:10.11834/jig.20150216]

交互式乐器演奏的六自由度力觉渲染方法

童号, 史有姣, 王党校, 张玉茹

北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191

摘要: 目的 在进行虚拟乐器交互演奏时,需要模拟触力觉-视觉-听觉多通道同步反馈,其中触力觉反馈的难点在于模拟人手操作乐器的六自由度(6-DoF)力觉交互过程。方法 提出一种基于混合模型和单边约束优化的六自由度力觉合成方法,实现了虚拟人手和琴弦的多点多区域接触力觉模拟。虚拟人手采用层次化球树模型表达,古琴采用混合模型表达,其中琴体和琴弦分别采用层次化球树模型和直线解析模型。提出了基于混合模型的离散碰撞检测算法,实时检测虚拟手和琴弦是否产生碰撞;基于发生碰撞的几何元素对建立单边不可穿透约束方程,通过 Active Set 方法求解约束优化后方程,获得 6 维位姿变量保证图形显示场景中的虚拟手不会和琴弦产生穿透。为模拟琴弦变形,提出变直径的圆柱体模型来模拟琴弦在不同振动幅度下的动力学响应;提出交互状态敏感的力计算模型以刻画人手在弹奏不同状态琴弦(静态、振动态)的力觉感受差异。结果 基于力觉交互设备 Phantom Premium 3.0 建立了实验平台,实验结果表明,本文算法可以模拟单点、多点等不同接触状态,并能模拟 6 维力和力矩,操作者可以感受到琴弦振动时的细腻力感觉,力觉交互过程稳定,算法计算效率在 1 kHz 以上。结论 算法可模拟针对琴弦一类的超薄形状物体的多点多接触力觉交互过程,算法计算效率高,包含碰撞检测、约束优化、琴弦变形仿真等计算回路的更新频率也能达到要求,该混合模型能为后续复杂形状物体的碰撞响应研究提供思路。

关键词: 力觉合成;约束优化;混合模型;乐器演奏

Interactive simulation of music instrument playing by a six degree-of-freedom haptic rendering approach

Tong Hao, Shi Youjiao, Wang Dangxiao, Zhang Yuru

State Key Lab of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: **Objective** Synchronous haptic-visual-audio multi-sensory feedback should be rendered to realize an interactive simulation of music instrument playing. **Method** For the haptic feedback, a 6-DoF haptic rendering of multi-region contacts between a rigid hand and the surface of the instrument is a fundamental requirement. In this study, we proposed a hybrid model to simulate the various parts of the instrument through collision response, i. e., analytic model for the thin-sized components (i. e., a line segment) and a sphere-tree for the other parts. We proposed a discrete collision detection method to detect the collision pairs between the sphere-tree of the virtual hand and the analytic model of the strings. A model based on constraint optimization is solved by using an active set method to obtain the non-penetrated configuration of the held

收稿日期:2014-08-15;修回日期:2014-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61170187,61190120,61190125)

第一作者简介:童号,(1990—),男,北京航空航天大学机械工程及自动化学院机械工程专业硕士研究生,主要研究领域为机器人技术、计算机触觉、人机交互。E-mail: tonghao625@163.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61170187, 61190120, 61190125)

hand. To simulate string deformation, a cylindrical volume with variable diameters is defined with the response to the real-time interaction force applied by the hand. Different force feelings can be rendered to reflect hand collision with a static or vibrating string. **Result** Experimental results based on Phantom Premium 3.0 illustrated that the proposed method could simulate single-and multi-region contacts between the virtual hand and the strings. Six-dimensional force and torque can be stably simulated. Users can sense the subtle feeling of coming in contact with a vibrating string. **Conclusion** This study performs several multi-region contact instances with the use of a discrete collision detection method. No penetration occurs in these instances, and the stacked frequency is above 1 kHz in the loop circuit of collision detection, constraint optimization, and deformation simulation. The penalty-method may cause a distinct torque jump because of the transformation of contact position and normal, thus causing a discrepancy between force feeling and visual feeling. The proposed constraint optimization-based method can improve computational precision.

Key words: haptic rendering; constraints-optimization; hybrid model; music instrument playing

0 引言

虚拟乐器的实时交互演奏模拟是多通道人机交互的一个典型实例,为实现逼真有趣的演奏效果,要求实现触力觉-视觉-听觉多通道感觉的同步反馈,前人研究中针对视听觉渲染较多^[1-2],但对于如何实现高保真度触力觉渲染,研究工作仍处于起步阶段。

前人针对力觉反馈在虚拟乐器演奏领域开展了一些初步研究工作。Berdahl 建立了一个可拨动的具有力反馈的打击鼓模型^[3],采用弹簧质子网格来模拟与鼓交互时的力觉感受,该系统的特点在于能模拟不同鼓点韵律的细腻振动感受,但其局限是仅能模拟人手的1维运动,且仅提供1维反馈力。Linden 等人研制了一个穿戴式系统 Music-Jacket^[4],来指导小提琴学习者掌握握持小提琴的姿势和琴弓的运动轨迹。在演奏者的手臂和躯干上安装振动电机,当姿态和轨迹和预期的正确动作不一致时,电机振动给出提示。实验结果表明,该系统能够帮助学习者提高学习效果。Ren 等人研制了一个系统允许多个用户在多点触摸屏上^[5-6]进行交互式乐器演奏,系统可以根据用户敲击的位置、速度、乐器类型等生成不同的演奏声音效果。该系统的特色在于建立了外力作用下声音在乐器表面的传播模型,为用户提供了多模态的音乐互动体验。

区别于上述工作,本文的目标是建立一个具有多感觉反馈的交互场景,用户可以借助于力觉交互设备,控制一个虚拟手对屏幕上的乐器进行演奏。

为实现上述目标,需要模拟手和乐器之间的力觉交互过程,尤其是模拟多点接触状态下的六自由度(6-DoF)力觉交互过程。

六自由度(6-DoF)力觉交互是增强力觉模拟真实感的关键,代表性方法有基于惩罚的方法^[7-9]、基于约束的方法^[10-11]。基于惩罚的方法由于接触点位置或法线的跳变会带来力矩的跳变,因此出现力觉和视觉感受的不一致性,包括图形工具与物体相互穿透、或存在间隙时却出现反馈力、不真实的摩擦和粘滞效果等,影响了力觉模拟的真实感^[12-13]。基于约束的方法是精确的和全局的方法,但计算效率低,即使采用 GPU 并行加速,刷新率仍然很难达到 100 Hz 以上,难以满足逼真力觉模拟^[8]要求。

在前期工作中^[3-4,14],提出了一种新的基于约束的方法,通过层次化球树模型,建立交互物体之间单边约束,通过快速优化求解获得6维交互力和力矩。该方法可以有效地模拟具有凹凸等不同特征的复杂形状物体之间的多点交互状态。但该方法用于乐器演奏,存在下述技术挑战:

1)需要模拟多点接触约束状态,人手和虚拟乐器(琴体、琴弦)会产生多点多区域接触,保证各种接触状态下手都不会穿透乐器表面,由于乐器被接触部件的尺寸非常小(例如琴弦的尺寸为很细的线),球模型表达不适合描述琴弦这类特殊形状物体;

2)需要模拟丰富的力觉感受,包括手指按压琴弦的力、扭转琴弦的力矩、琴弦在力的作用下发生形变、琴弦高频振动时对人手的振动力觉感受等;

3)该方法效率需达到 1 kHz,并保证交互设备

稳定性。基于上述挑战,提出一种新的基于混合模型的约束优化方法,实现 6-DoF 力觉交互过程模拟。

1 六自由度触力觉渲染方法

1.1 建模

虚拟交互所用的虚拟手和古琴是用 3DMax 建模得来。进一步将 3DMax 模型转换成为力觉交互和碰撞检测所需的模型。虚拟手采用层次化 Sphere-tree 模型来表达^[15]。古琴由琴身和琴弦两部分组成,琴身形状比较规整,采用层次化 Sphere-tree 模型。琴弦部分若也采用 Sphere-tree 模型的方式,则分层数比较大,所用的球数目众多,计算比较耗时,在计算机的性能达不到要求的情况下连续弹奏时会导致失真。而且用虚拟手演奏碰撞时易导致嵌入甚至因为薄壁效应穿过琴弦。此处琴弦采用 Cylinder 模型代替球树模型的方式建模。图 1 中显示虚拟手模型,虚拟手当层叠至第 3 层时,只用了 512 个球就已经比较接近人手形状, Sphere-tree 模型^[14]展示出了高效的计算解析能力。

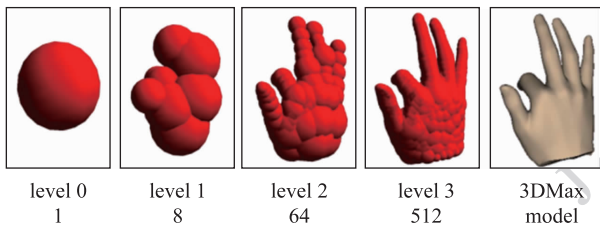


图 1 层次化 Sphere-tree 模型与原始模型

Fig. 1 Leveled Sphere-tree model & original model

1.2 碰撞检测算法原理

在交互过程中,虚拟手和琴身接触^[14]时,采用笔者以前提出的两个 Sphere-tree 之间的碰撞检测方法。当虚拟手和琴身接触时,提出如下的 Cylinder 模型与 Sphere-tree 模型的碰撞检测算法流程:

算法 1 圆柱体模型与球树模型之间的碰撞检测
输入:任一对象的球树模型的根节点球 s_1 和琴弦模型的圆柱体 c_1

Queue $Q \leftarrow \Phi$

if (s_1 intersects c_1)

push s_1 to Q

While (Q is not empty & ! Q . front is leaf-nodes)

pop s_1 from Q

$S_1 \leftarrow$ children of s_1

for each $s'_1, s'_1 \in S_1$

if (s'_1 intersects c_1)

push s'_1 to Q

输出: Q

算法中描述的 s_1 代表人手模型根节点, c_1 代表琴弦的 Cylinder 模型。首先,检测人手模型根节点与琴弦是否相交。如果相交,则检测根节点的子节点与琴弦的相交关系,直到没有节点与圆柱体相交或者算法达到了 Sphere-tree 的叶节点。算法的输出是与圆柱体相交的叶节点,如果没有节点与圆柱体相交,那么输出为空。

检测节点(球)与圆柱体相交的算法是通过判断球心与圆柱体轴线的距离是否大于二者半径之和,大于则不相交。此外,琴弦在静止状态时可以近似为一个细长的 Cylinder 模型。但是琴弦在被虚拟手拨动后将会发生振动,如图 2 所示,此时琴弦是一个动态的曲线。所以在振动状态下进行碰撞检测时,把琴弦近似为半径随时间衰减的 Cylinder 模型:

$$r_t = K_r |\mathbf{F}_{\max}| e^{-k_f t} + r_0 \quad (1)$$

式中, K_r 和 k_f 分别是一个常数。 K_r 表示作用于琴弦的力对琴弦变形程度大小的影响因子, K_r 越大,则施加同样大小的力时琴弦越容易变形。 k_f 表示琴弦振动幅值衰减的快慢, k_f 越大则振动衰减越快,琴弦能越快地恢复到静止状态。 $\mathbf{F}_{\max}$ 是上一次碰撞时琴弦受力最大值。

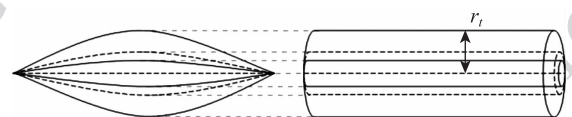


图 2 琴弦 Cylinder 模型

Fig. 2 Chord Cylinder model

1.3 碰撞响应约束分析

根据碰撞检测结果,建立优化模型来求解虚拟人手在接触约束的 6 维位姿。虚拟交互中从人手模型处获取的位姿信息,即物理工具为

$$\mathbf{q}'_h = (x'_h, y'_h, z'_h, a'_h, \beta'_h, \gamma'_h)^T \quad (2)$$

将所要求的图形位姿的优化变量表示为

$$\mathbf{q}_g^t = (x_g^t, y_g^t, z_g^t, a_g^t, \beta_g^t, \gamma_g^t)^T \quad (3)$$

优化的目标根据最小二乘模型定义为

$$\text{Minimize: } \frac{1}{2}(\mathbf{q}_g^t - \mathbf{q}_h^t)^T G(\mathbf{q}_g^t - \mathbf{q}_h^t) \quad (4)$$

优化的约束条件为虚拟手与物体间不发生嵌入,根据碰撞检测获得的信息,即为球模型和圆柱体解析模型不发生嵌入,也即球心到圆柱轴线距离大于半径之和,圆柱体的球心和半径都是定值,将其固定在虚拟环境中,可用如下只包含变量的函数表达碰撞检测关系,即

$$C(x_T, y_T, z_T) \geq 0 \quad (5)$$

而虚拟手球的球心与其质心存在唯一的映射关系,也就是说 x_T, y_T, z_T 都是 $\mathbf{q}_g^t$ 的函数,所以式(5)进一步改写成为

$$C(t) = C(x_T(\mathbf{q}_g^t), y_T(\mathbf{q}_g^t), z_T(\mathbf{q}_g^t)) \geq 0 \quad (6)$$

由于这种映射是非线性的,故上面的约束方程是一个非线性的约束方程,为简化优化的寻优过程,利用一阶泰勒展开式,一般情况下都是用一个 4×4 的矩阵来唯一表示 3 维物体的位置和姿态,中间位姿转换矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

再利用泰勒展开可得线性约束方程为

$$C(t) = C(t-1) + \sum_{i=1}^6 \nabla_i \Delta_i \quad (8)$$

式中, ∇_i 是约束方程展开式的微分算子, Δ_i 为增量算子,用泰勒转换坐标 $[x_{T_{ori}} \ y_{T_{ori}} \ z_{T_{ori}}]^T$ 求解,即

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_{T_{ori}} \\ y_{T_{ori}} \\ z_{T_{ori}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)中可求得: $[x_T \ y_T \ z_T]^T$, 将其代入式(8),即可得图形工具的位姿 $\mathbf{q}_g^t$ 。

1.4 琴弦振动与力/力矩模型

1.4.1 琴弦振动变形模型

当检测到虚拟手与琴弦发生碰撞后,虚拟手与琴弦的接触引起琴弦变形,当变形幅度达到最大,虚拟手离开琴弦时,琴弦将发出振动,在无外界阻力的

情况下,该振动会等效于简谐振动,但由于琴弦端部拉紧力的作用,对振动幅值会产生阻尼干扰,可近似地看做是在简谐振动的基础上加有一指数衰减的增益系数,该指数衰减的增益系数即可看作为琴弦的幅值衰减变化情况。而琴弦的振动变形则是该简谐振动的指数衰减值。

琴弦振动变形时的幅值 δ_t 随时间的近似数学模型为

$$\delta_t = \delta_0 e^{k_f t} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (10)$$

式中, δ_0 表示琴弦变形最大时的初始幅值, k_f 表示琴弦振动变形时幅值衰减的快慢程度因子, θ_0 表示振动初始相位。

琴弦振动变形的振幅可用图3表现,在虚拟手弹奏琴弦时,琴弦的弦径在视觉效果上会因振动而变大,如图4所示,弦变粗。

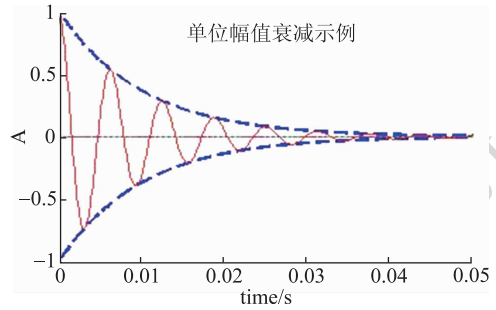


图3 振幅衰减波形图

Fig. 3 Amplitude decay curve



图4 琴弦碰撞振动图形

Fig. 4 Chords collision vibration

1.4.2 琴弦碰撞响应力/力矩模型

虚拟手在碰撞到琴弦时,有作用力/力矩产生,可用弹簧模型来计算模拟力与力矩,在位姿优化处理后,得到了图形工具的位姿 $\mathbf{q}_g^t$,而物理工具的位姿是在每次仿真循环开始前从设备上读取的,记为 $\mathbf{q}_h^t$,接触力与力矩 $\mathbf{F}$ 计算模型^[15]为

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}(\mathbf{q}_g^t - \mathbf{q}_h^t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{G}$ 是一个 6×6 的刚度矩阵,是一个对角矩阵,对角线上的元素对应的是设备 3 维平动和 3 维转动的刚度系数。在琴弦上弹奏时,其中前 3 维对角线

元素对应刚度系数,随拨弦位置到琴弦端部的距离不同而呈线性变化。得出的 6×1 的向量 $\mathbf{F}$ 的前 3 维表示第 N 次弹奏此琴弦时 3×1 的反馈力 $\mathbf{F}_t^N$, 虚拟演奏中设置反馈力的大小还需考虑到前一次弹奏琴弦的振动,如果此刻正要弹奏时,前一次弹奏的琴弦还没停止振动,则触碰时,反馈力需要叠加上琴弦的振动力 $\mathbf{F}_t^V$,该额外的振动力可看成是正比于前一次最大振幅时的力与此刻偏离位移乘积的某个值,用数学模型表示为

$$\mathbf{F}_t^V = A_v \delta_t \mathbf{F}_{\max} \quad (12)$$

式中, A_v 表示琴弦振动时的变形程度因子, δ_t 为琴弦振动时随时间变化的幅值,求得的优化反馈力 $\mathbf{F}_t$ 用数学模型表示为

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_t^N + \mathbf{F}_t^V \quad (13)$$

对应的模拟力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 在上面的位姿优化弹簧模型中已经求得,也就是 $\mathbf{F}$ 的后 3 维表示的 3×1 的向量。

2 实验验证

2.1 实验配置

整个交互系统是在 VS2005 编程环境下的 MFC 模块中进行,触力觉交互设备采用 Phantom Premium 3.0 设备,该设备可以实现 6 维力和力矩模拟。虚拟手和古琴模型的位姿优化的视觉效果基于 OpenGL 实现。弹奏古琴时发出的 7 种不同音律源自于 Dsound 的 SDK 中备有的古琴的原声七弦音频文件。在 MFC 中配置好 OpenGL 的 head 与 dll 文件以及触力觉设备 Phantom Premium3.0 的通信传输协议。将碰撞检测算法和碰撞响应处理等植入到程序中,实验的交互配置即完成,如图 5 所示。



图 5 交互演奏装置

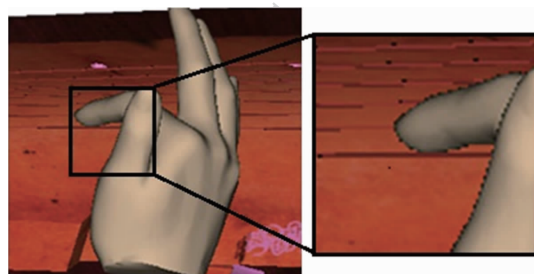
Fig. 5 Interactive performance device

2.2 实验内容与数据

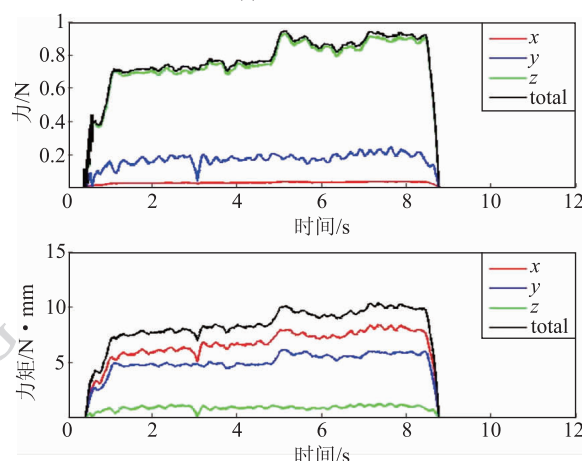
为了验证碰撞检测算法的高效性、稳定性和无嵌入特性,本实验展开了针对弹奏古琴时不同形式的操作实例验证。从单点接触到多点接触,从静态到动态全方位地验证算法的优异性,证实算法针对细长丝状一类物体的碰撞力觉渲染有很好的适应性,最后附上一段录制好的演奏视频,进一步证实算法高效可靠。

2.2.1 实验力/力矩输出

1) 当虚拟手分别接触单根琴弦靠近琴头和琴弦中部位置时,从图 6 和图 7 中可以看出,若想在靠近琴端与琴中部处得到相近的琴弦变形量,明显在靠近琴端部时,算法模拟分析出来的反馈力要大于琴中部时模拟的反馈力,在靠近琴端部,琴弦张力较大,需要较大力地弹奏才能有明显的变形,而在琴中部则演奏比较容易。



(a) 按压琴弦头部

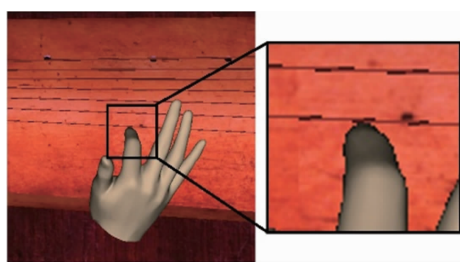


(b) 琴头处力/力矩曲线

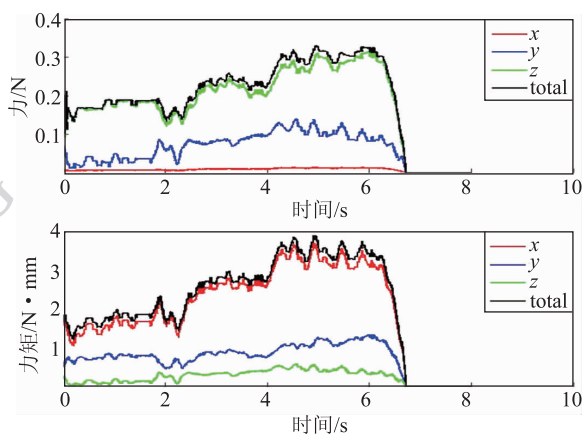
图 6 琴头处力/力矩曲线

Fig. 6 Force/torque curve by chord's head

此外,从图 6、图 7 中碰撞接触的局部放大图可以看出,虚拟手按压在弦端和弦中都没有发生嵌入现象。按在弦端和弦中时,力变化比较顺畅,没有阶跃式的跳变,操作时几乎没有振动,验证了算法的稳



(a) 按压琴弦中部



(b) 琴弦中部力/力矩曲线

图7 琴弦中部力/力矩曲线

Fig. 7 Force/torque curve on chord's center

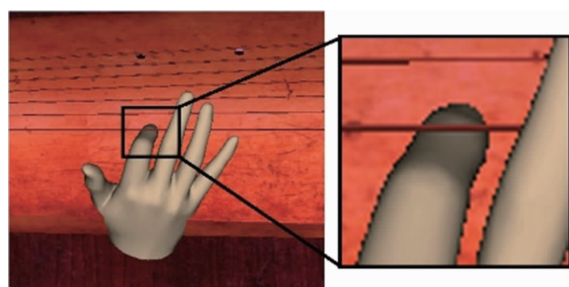
定性。

2) 虚拟手沿着单根琴弦滑动时, 在连续的接触操作中, 力/力矩输出大小显示比较稳定的连续变化, 比较真实地反映出操作时手上的细微动作, 十分平稳, 滑动过程中几乎感觉不到有振动。虚拟手从琴弦下部滑动, 图8可以清晰地看出虚拟手和琴弦一直处于刚好接触的状态。

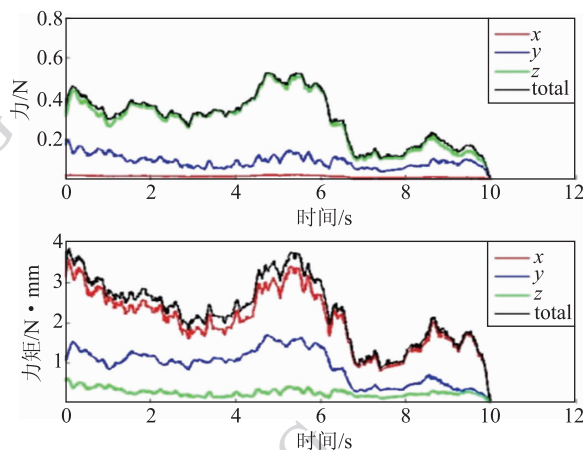
3) 当虚拟手在两根琴弦上滑动时, 琴弦有轻微的振动产生, 力与力矩的大小也产生锯齿状波动, 与人手操作时对应的力感觉特征比较吻合。在操作过程中, 中间有些时间段只触碰到了一根弦, 虚拟手又在极短的时间内再次接触上琴弦, 且保持着稳定的触碰。从图9可以看出, 虚拟手无嵌入发生。

4) 虚拟手的手指卡在两根琴弦之间扭动时能得到稳定的反馈力矩, 在进行虚拟弹奏时, 几乎感觉不到振动发生, 从局部放大图图10可以看出, 虚拟手的手指扭动时没有发生嵌入现象。

实验结果表明, 无论是单点接触还是多点接触, 虚拟手与琴弦都没有发生嵌入, 交互系统能模拟针对细长丝状琴弦的触碰。在由静态接触转为动态触碰时, 计算更新的频率虽然有大幅波动, 但一直稳定



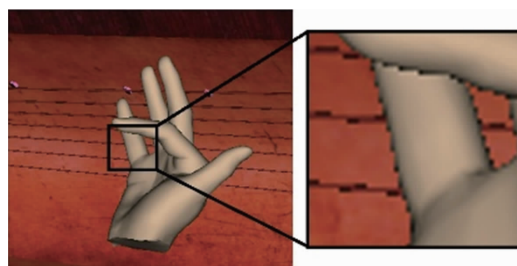
(a) 沿单根弦滑动



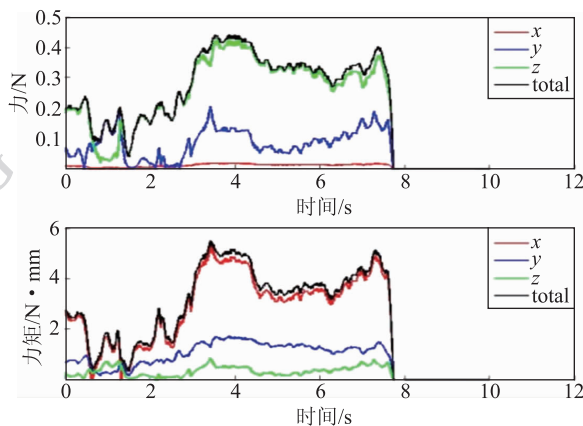
(b) 单根弦滑动力/力矩曲线

图8 单弦滑动力/力矩曲线

Fig. 8 Force/torque curve sliding on single chord



(a) 沿两弦间滑动

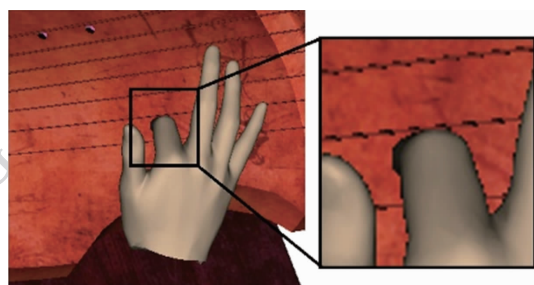


(b) 两弦间滑动力/力矩曲线

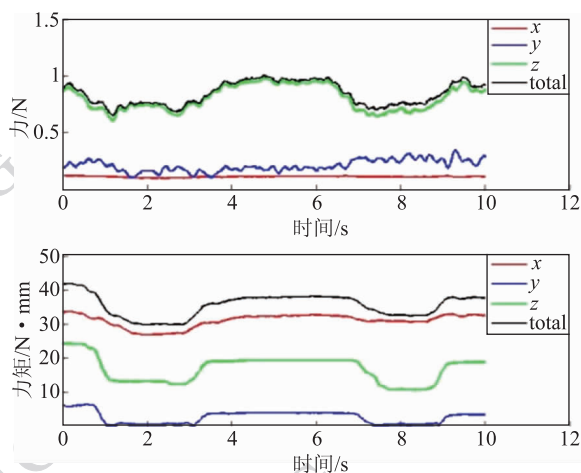
图9 两弦间滑动力/力矩曲线

Fig. 9 Force/torque curve sliding across chords

地在 1.5 kHz 以上, 尤其是在后面的音频演奏时, 计



(a) 两弦间扭动



(b) 两弦间扭动力/力矩曲线

图 10 弦间扭动力/力矩曲线

Fig. 10 Force/torque curve twisting between chords

算更新频率始终高于 1 kHz。本文算法对比于 Zachmann 等人的基于惩罚的方法, 尽管两者的计算更新频率都能保持高于 1 kHz, 但采用基于约束的方法, 优化后的图形工具位姿显示会更加精确, 碰撞时力矩无阶跃式跳变, 且无渗透嵌入现象发生, 相比较而言更优。

2.2.2 演奏音乐录制视频

实验将触力觉—视觉—听觉多通道反馈结合, 以触力觉渲染为主, 将虚拟弹奏、视觉渲染、美妙音律综合起来, 弥补了单通道触力觉真实体验的缺乏。登陆网站 (<http://haptic.buaa.edu.cn/>) 虚拟古琴演奏可欣赏录制的音乐演奏片段。

2.3 讨论

在进行古琴演奏时, 受硬件条件的限制, 目前还没有现成的触力觉交互的物理手套可用, 交互演奏时只能简化地采用设备手柄作触碰弹奏, 不能直接实现手指部位触力觉交互, 因此在弹奏时还不能反馈给手指最直观的触碰感觉。前期实验也未组织专业的古琴演奏人员对交互演奏做逼真度的评估, 只在同实验室的相关实验人员做了

初步的评测, 在现有的硬件条件下能证明本文算法的优越性。

在古琴的弹奏的手法上, 目前只做了一般性的单点接触和多区域接触的演奏实验, 因将虚拟手和琴弦简化为刚体处理, 演奏时还不能做揉琴这样的特殊手法的操作。后期的研究, 将在硬件上做改进, 实验室将考虑自主研发这种基于触力觉技术的物理交互手套, 满足演奏者手指尖最直接的触力觉信息感知, 再请专业的乐器演奏师对虚拟乐器演奏作逼真度评估。

3 结论

论文以古琴演奏的 6DoF 力觉合成方法为研究对象, 提出了采用层次式球树和解析模型的混合模型的碰撞检测方法、约束优化方法和 6 维力觉计算模型, 该方法可模拟针对琴弦一类的超薄形状物体的多点接触力觉交互过程。

实验结果表明, 算法可以模拟与琴弦的各类接触状态 (单点接触、多点接触), 任何部位触碰到琴弦, 都能够被可靠地约束, 避免了穿透现象的出现。在与琴弦做各种不同形式的接触和碰撞实验时, 都能获得稳定的力觉感受, 其中虚拟手拨动琴弦, 可以体验到琴弦的变形和低频振动。当手指卡在两弦间扭转时, 可以体验到稳定的力矩反馈。算法计算效率高, 包含碰撞检测、约束优化、琴弦变形仿真等计算回路的更新频率在 1 kHz 以上。

将人手简化为刚体来处理, 导致弹奏时无法像真实的人手那么柔软, 能够达到缓冲吸振的效果。后期目标将对进一步做模型优化, 拟将刚性骨架模型和柔软弹性模型混合, 加上对内力因素的考虑, 进一步提高人手虚拟乐器演奏的真实感。

参考文献 (References)

- [1] Kaltenbranner M, Sergi J, Gunter G, et al. A collaborative musical instrument [J]. TOH Transactions on Haptics, 2006, 12(3): 406-411.
- [2] Raghuvanshi N, Snyder J, Mehre R, et al. Precomputed wave simulation for real-time sound propagation of dynamic sources in complex scenes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 68-73.

- [3] Berdahl E. A simulation of the haptic drum[J]. Euro Haptics, TEI on Spain ACM, 2013, 11(1): 121-128.
- [4] Linden J, Schoonderwaldt E. MusicJacket—combining motion capture and vibrotactile feedback to teach violin bowing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 104-113.
- [5] Ren Z, Ming L, Jason C, et al. Designing virtual instruments with touch-enabled interface[J]. CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2012, 5(3): 433-436.
- [6] Ren Z, Ravish M, Jason C, et al. Tabletop ensemble: touch-enabled virtual percussion instruments[J]. The ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2012, 19(1): 7-14.
- [7] Barbic J, James D. Six-DoF haptic rendering of contact between geometrically complex reduced deformable models[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2008, 1(1): 39-52.
- [8] Duriez C, Dubois F. Realistic haptic rendering of interacting deformable objects in virtual environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(1): 36-47.
- [9] McNeely W, Puterbaugh K, Troy J. Voxel-based 6-DoF haptic rendering improvements[J]. Haptics-e, 2006, 3(7): 55-61.
- [10] Redon S, Ortega M, Coquillart S. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3): 458-469.
- [11] Courtecuisse H, Jung H, Duriez D, et al. GPU-based real-time soft tissue deformation with cutting and haptic feedback[J]. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2010, 10(3): 159-168.
- [12] Miguel O, Ming L. A modular haptic rendering algorithm for stable and transparent 6-DoF manipulation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(4): 751-762.
- [13] Ming L, Miguel O. Haptic Rendering: Foundations, Algorithms, And Applications[M]. North Carolina: America. Peters, Ltd. 2008.
- [14] Wang D, Zhang X, Zhang Y, et al. Configuration-based optimization for six degree-of-freedom haptic rendering for fine manipulation[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2013, 6(2): 167-180.
- [15] Wang D, Shi Y, Liu S, et al. Haptic simulation of organ deformation and hybrid contacts in dental[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(1): 48-60.