

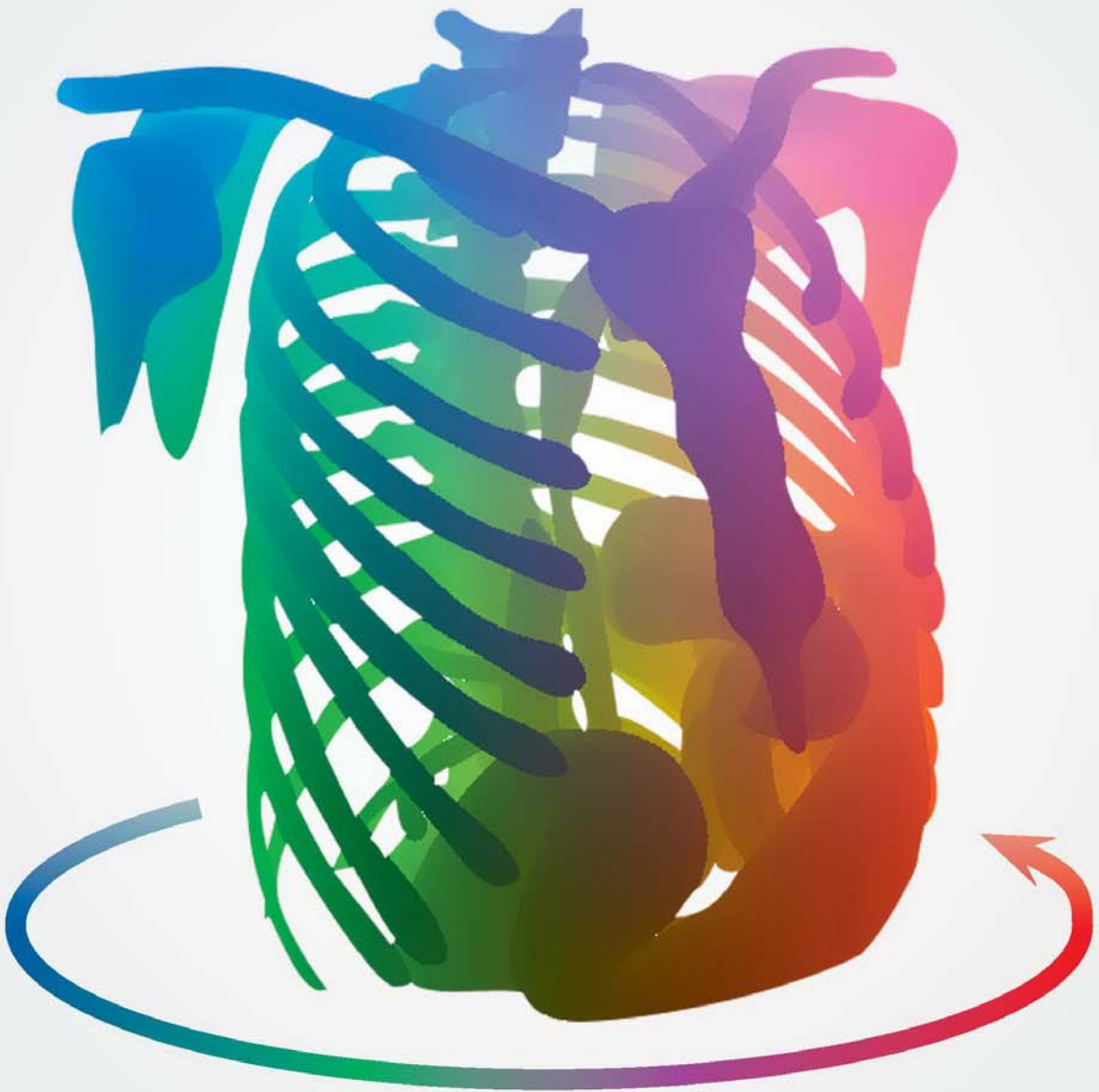


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

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: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)02-0280-08

论文引用格式: Yang W Z, Xu Y, Yan C W, Wu X L, Zhang H, Meng C. Validation the authenticity of virtual fingers grasping haptic algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(2): 0280-0287. [杨文珍, 许艳, 颜传武, 吴新丽, 张昊, 孟闯. 虚拟手抓持力觉生成算法真实性的评价[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(2): 0280-0287.] [DOI:10.11834/jig.20150215]

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

浙江理工大学虚拟现实实验室, 杭州 310018

摘要: 目的 虽然许多学者研发了多种虚拟手交互触力觉生成算法, 但是如何评价虚拟手交互触力觉生成算法的真实性是一个富有挑战性的新问题, 值得深入研究。方法 构建手指抓持力测量平台, 设计3种抓持姿态下指尖静力抓持球体实验内容, 测得各指尖作用力的实测值; 通过虚拟手静力抓持力觉生成算法, 求得这3种抓持姿态下各手指作用力的理论值; 对实测值进行统计和分析, 并与理论值进行对比和讨论; 结果 日常抓持经验和实测值是相符的, 实测值和理论值很接近且偏差均在可接受范围之内。单个手指作用力或多个手指合力的实测值与理论值的偏差均在1%~6%。结论 本文实现了一种基于物理的实验方法, 评价和分析了虚拟手静力抓持力觉生成算法的真实性, 证实此算法可以逼真地生成虚拟手抓持力, 可应用于具有力反馈的自然的虚拟手交互。

关键词: 虚拟手; 力觉算法; 真实性; 人机交互; 虚拟现实

Validation the authenticity of virtual fingers grasping haptic algorithm

Yang Wenzhen, Xu Yan, Yan Chuanwu, Wu Xinli, Zhang Hao, Meng Chuang

Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract: **Objective** This paper aims to measure the grasp force of human hand static-grasping objects and to evaluate the authenticity of the virtual fingers grasping haptic algorithm. **Method** A human hand grasp force measurement platform is built, and experimental contents are designed, which include three static-grasping postures to grasp a sphere object. Five testers are used in this experiment. The measured data are analyzed and compared with the calculated values of the virtual fingers grasping haptic algorithm, with the virtual hand grasp objects under the same static-grasping postures as the testers. The difference between the measured value and theoretical value of a single finger force or fingers result force lying in 1%~6%. **Result** Comparison results show that the measured data are close to the calculated values and coincide with human daily grasping experiences. **Conclusion** This paper obtains a physical evaluation method to validate the authenticity of the virtual fingers grasping haptic algorithm. This algorithm can generate realistic grasping force and can be applied in natural virtual hand interaction with force feedback.

Key words: virtual hand; haptic rendering; authenticity; HCI; virtual reality

收稿日期: 2014-07-24; 修回日期: 2014-09-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)计划项目(2013AA013703); 浙江省自然科学基金项目(LY14F020048); 国家自然科学基金重点项目(61332017)

第一作者简介: 杨文珍(1976—), 男, 副教授, 2007年于浙江大学获计算机科学与技术专业博士学位, 主要研究领域为多感知(力触觉和嗅觉)人机交互、远程主从操控灵巧手、虚拟手术模拟和虚拟现实。E-mail: ywz@zstu.edu.cn

Supported by: National High Technology Research and Development Program of China (2013AA013703); Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY14F020048); The State Key Program of National Natural Science Foundation of China (61332017)

0 引言

触力觉生成算法是触力觉人机交互的最重要环节,其计算结果应当尽可能接近人们与真实世界交互时感受到的作用力,即触力觉生成算法提供的触力觉感知信息要尽可能的真实。目前,国内外学者从多个方向和不同角度提出或改进了多种触力觉生成算法,应用最广的触力觉生成算法是利用 PHANTOM 设备,根据虚拟物体的刺穿深度,运用虎克定律来生成接触力^[1-2]。此算法计算量小,能满足系统实时性要求,但是力学模型过于简单,无法保证力觉真实性。

为使生成的力觉信息更真实,学者们将惯性、重力、摩擦和阻尼等物理属性赋值给虚拟物体,引入到触力觉生成算法中。Cristian 等学者首先分别计算出虚拟物体在多个接触点处的接触力、阻尼力与摩擦力,然后取接触点处所有力的算术平均表示虚拟物体受到的合力,作为最终的作用力反馈给用户^[3]。这种方法虽然包含了一些物理属性,但未能从力是矢量、力平衡和力矩平衡等基本力学规律求解接触力,因此,力觉真实性不能得到保证。Mackawa 等人^[4]利用 Master Arm 力觉反馈设备对 2 指抓取实时力觉反馈问题进行了较深入地研究,将用户操作分为自由、食指接触、拇指接触、抓取和操作 4 个状态,针对每个状态进行了力觉计算。该方法适用于 2 指操作的力觉生成,难以扩展到虚拟手的力觉生成。运用多个 PHANTOM 设备, Melder 等学者实现了多手指对虚拟物体的平移和旋转操作的力觉生成^[5]。该方法以基于点的接触力生成算法为基础,结合摩擦锥原理生成摩擦力,提高了力觉真实性。它不是利用虚拟手直接操作,使得虚拟操作的自然性和直观性受到了限制。运用 Cybergrasp 力反馈设备, Anderson 等学者研究了虚拟手操作柔性物体的力觉生成问题^[6]。他们用弹性力学原理模拟软性物体的变形,用虎克定律计算接触力,使用户感知虚拟物体的弹性。实验结果表明:若用户看不到物体的变形情况,就很难区别出不同虚拟物体的软硬程度。该方法未取得较佳结果的原因是其力觉生成算法过于简化,即生成的作用力与真实物体的弹性相距甚远,只能给用户有一个力的感觉。在一个两手指远程操作的任务中, Howe 等学者运用弹簧线性力学模型,求解大拇指和中指的作用力,并进行“轻微再分

配”,来模拟被抓持物体在手中滑动的感知^[7]。该方法对虚拟手动态抓取物体的力觉生成进行了有益尝试,但力觉真实性难以保证。用 10 个自由度的反馈数据手套, Hashimoto 等学者开发了一个有力反馈的动力学模拟器^[8],通过平衡手指主动作用力和虚拟物体接触力,模拟器可以模拟人机交互过程中虚拟物体的动力学、接触、碰撞等特性,但交互不够便捷且力觉不真实。Iwata 等学者运用一个有 6 个自由度的触觉设备,进行了虚拟手操作的力觉生成研究。他们依据被抓取虚拟物体的硬度生成手指的作用力,将外力(如虚拟物体的重力)分配到用户的手掌上^[9]。在 Iwata 的系统中,手指接触到刚性物体时,系统输出最大的转矩且反馈到手指上,反馈到手掌的力和力矩与手掌与物体的接触形状相关。虽然该方法考虑了虚拟手操作过程中的力矩作用,但未提出有效的方法来验证力觉的真实性。Christoph 等学者提出了一种虚拟手抓取和操作物体的方法,该方法将主动手运动匹配到一只模拟控制的多关节虚拟手上,保证虚拟手操作物体的视觉真实性,通过一个线性的弹性阻尼系统进行力觉渲染^[10]。该方法可以方便地抓取和操作虚拟物体,给人逼真的视觉反馈,但力觉的真实性未得以证实。Sagardia 等学者研究得出有力觉反馈的虚拟装配系统可使得装配更精确^[11],该系统力觉反馈是基于几何结构的力觉算法,不含虚拟物体的物理属性。Cornella 等学者对于人手抓取多边形柔性物体提出了独立区域力封闭算法^[12],该算法虽然对每根手指施加柔性体的力/力矩进行了精确计算,但没有考虑手指间控制区域的相互影响。Ortega 等学者对具有 6 个自由度的触力觉生成算法进行研究^[13],采用一种新型的基于物理意义的约束准静态方法来计算刚体运动。Lin 等学者提出了一种具有高分辨率的柔性体触力觉生成算法^[14-15],该算法针对柔性体变形采用两级分层再现模型,使用低分辨率代理加速碰撞检测和力/触觉再现,而高分辨率的四面体网格被用来获得精细逼真的变形。

国内从事这方面研究的单位主要有东南大学仪器科学与工程学院、北航机器人研究所、浙大 CAD&CG 国家重点实验室、浙江理工大学虚拟现实实验室等。赵迪等学者设计了一种带力反馈的主从式遥操作系统,提出以虚拟手指空间位姿代替实际力作用线方向位移计算和基于实际材料虚拟力外推的方法,生成力觉信息^[16]。刘欣等学者为实现虚拟

手和虚拟环境之间基于物理的交互,提出了用非线性弹簧模型计算抓取作用力,然后将计算结果以视觉渲染的形式反馈给用户^[17]。吴涓和宋爱国等学者提出了一种基于物理意义的快速力反馈形变模型及实时力觉响应算法,为虚拟手操作柔性物体的力觉生成问题提供了良好的解决途径^[18,19]。杨文珍和高曙明等学者^[20-22]从人手的生理结构和感知特性出发,结合虚拟现实系统的特点,提出了一种基于物理的虚拟手静力抓持力觉生成算法,从仿真结果上该算法可以生成逼真的力觉。

触力觉生成算法的核心是生成的触力觉信息要尽可能的真实,而不仅仅是给用户一个力的感觉。上述大部分触力觉反馈算法模型都是简化的模型,无法保证触力觉的真实性。有些触力觉反馈算法考虑了人手指的力学特性,并基于物理意义进行了深入的研究,生成的力觉也相对真实,但是并未开展触力觉算法真实性的评价工作。因此,如何评价触力觉生成算法的真实性,还值得深入研究。

本文通过构建人手指作用力测量平台,实验测量人手指静力抓持物体的手指作用力,分析和评价基于物理的虚拟手静力抓持力觉生成算法是否可以生成逼真的力觉。虚拟手静力抓持力觉生成算法是依据软手指接触模型和机械手抓持原理推导和提炼而来,可以求出多手指静力抓持物体时的各手指作用力的理论值。但是,还需更进一步开展实验测量,研究此算法求得的理论值是否与人手实际抓持物体时测量得到的实测值相一致,以证实此算法的有效性、真实性和正确性,可以生成逼真的力觉信息。

1 虚拟手静力抓持力觉生成算法

借鉴机械手软手指接触模型,虚拟手抓持力觉生成算法实质是虚拟手指在接触点处施加适当的手指力螺旋来平衡作用在虚拟物体上其他所有外力螺旋。算法基于2点假设:其一,用户用虚拟手抓取物体是基于日常抓持经验的,总能选择合适的(能抓取的)位置和姿势抓取物体;其二,从人的行为习惯出发,人们在绝大多数情况下都是用较小的力抓持物体,如能用6 N的力可以抓住茶杯喝水时,大家一般都不会用12 N或只用3 N的力去抓取茶杯。因此,借鉴机械手软手指接触模型和机械手抓持原理,构建 k 个手指以软手指接触静力抓持虚拟物体的最

小力螺旋抓持非线性优化模型。

优化目标函数为

$$\text{Min} \sum_{i=1}^k \left[(f_{ci}^x)^2 + (f_{ci}^y)^2 + (f_{ci}^z)^2 + \left(\frac{m_{ci}^z}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum \mathbf{F}_{ci} - \mathbf{F}_e = 0 \quad (\text{或 } \mathbf{G}\mathbf{f}_{ci} = -\mathbf{F}_e)$$

$$f_{ci}^z \geq 0; \sqrt{(f_{ci}^x)^2 + (f_{ci}^y)^2} \leq \mu f_{ci}^z; |m_{ci}^z| \leq \gamma f_{ci}^z$$

式中, $f_{ci}^x, f_{ci}^y, f_{ci}^z$ 是第 i 个手指 x, y, z 方向的分力, m_{ci}^z 是第 i 个手指 z 方向的力矩, μ 和 γ 分别是手指与抓持物体之间的摩擦系数和力矩摩擦系数, $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^{6 \times 9}$ 为抓持矩阵, $\mathbf{F}_{ci}$ 是指第 i 个手指的手指作用力, $\mathbf{F}_e$ 是指作用在虚拟物体上除 $\mathbf{F}_{ci}$ 以外的所有外力, $i = 1, 2, 3, \dots, k, k \in \mathbf{N}$ 。

最小力螺旋抓持非线性优化模型中优化目标函数及各约束条件的物理含义如下:1)优化目标函数是使 k 个手指施加给物体的力螺旋平方和最小;2)约束条件 $\sum \mathbf{F}_{ci} - \mathbf{F}_e = 0$ (或 $\mathbf{G}\mathbf{f}_{ci} = -\mathbf{F}_e$)是使 k 个手指的合力螺旋与虚拟物体上的其他外合力螺旋平衡;3)约束条件 $f_{ci}^z \geq 0$ 是指每个手指作用力在 z 方向上的分力不能小于0,以保证每个手指是挤压物体;4)约束条件 $\sqrt{(f_{ci}^x)^2 + (f_{ci}^y)^2} \leq \mu f_{ci}^z$ 是每个手指作用力在 x, y 方向上的分力应在摩擦锥内,禁止手指滚动或滑动,保证静力抓持;5)约束条件 $|m_{ci}^z| \leq \gamma f_{ci}^z$ 是每个手指所施加的力矩应满足软手指接触的条件。

基于机械手抓持原理,最小力螺旋抓持非线性优化模型能够求得手指在任意抓持姿态下静力抓持虚拟物体的最小力螺旋。手指最小力螺旋包括力的大小和方向,本文着重对手指作用力的大小开展讨论和分析,验证虚拟手静力抓持力觉生成算法的真实性。

2 手指作用力测量的实验设计

2.1 实验平台的构建

本文采用美国 Tekscan 公司研发的 Grip 握力压力分布测量系统,构建实验平台,设计实验内容,实际测量人手指静力抓持物体的手指作用力,开展虚拟手抓持力觉生成算法的真实性评价研究。

该系统的硬件为基于计算机的 A/D 转换电路和高灵敏度的压阻式感测片,软件为基于 Windows 的压力显示和分析软件 Grip Research。把感测片粘

附到人手后,经 A/D 转换电路连接到计算机,实现与分析软件的通信,构建手指作用力测量实验平台,如图 1 所示。



图 1 手指作用力测量实验平台
Fig. 1 Finger force measurement device

在实际测量时,此平台可以实时测得人手在任意抓持姿态下的力数据,具有较高的测量精度和响应速度,而且能保存和导出手指作用力实验数据。

2.2 实验测试者和实验内容

2.2.1 实验的测试者

很显然,当人手去抓取物体时,手指到底要施加多大力很大程度上受控于人的主观意识或抓取习惯。这给我们实验测量带来了很大的挑战。从第 1

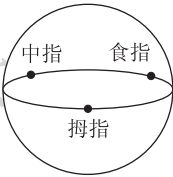
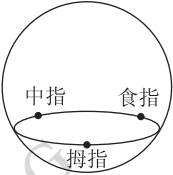
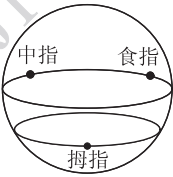
节可知,虚拟手抓持力觉生成算法是求出每个手指的最小作用力。因此,在实验测量过程中,我们希望并要求测试者能够控制他们的手指,用尽可能小的力去抓持物体,并保持静力平衡。测试者是实验关键要素,选取 5 位手指健全、无畸形且惯用右手的测试者(3 男 2 女,22 ~ 27 岁)参与实验测量。每个测试者没有受过手指抓持的专业训练,不具有超常的手指作用力,属于一般人群范畴,测试者的右手没有损伤或疾病,都能自主控制各手指的运动和施力。

2.2.2 实验内容

实验内容设计主要有以下 3 点考虑:1)在人手抓持物体实验测量时,要尽可能消除测试者主观因素去施加手指作用力,尽可能排除测试者手指施力的任意性和个体差异性;2)所选取的抓持对象和抓持方式要方便人手抓取;3)虚拟手和人手在相同抓持位姿下得到手指作用力的理论值和测量值,要便于对比、分析和讨论虚拟手抓持力觉生成算法是否能生成逼真的力觉这一主题。为此,特意设计了接触点以对称或不对称布置的 3 种抓持位姿,开展手指作用力的实验测量,实验内容如表 1 所示。

表 1 手指作用力测量的实验内容

Table 1 Experiment contents of finger force measurement

实验项目	接触点布置	抓持对象	抓持方式	抓持位姿	主观因素	抓取难易	对比分析
大径抓持	对称	球体	托举		较弱	中等	较易
小径抓持	对称	球体	托举		较弱	较易	较易
非对称抓持	非对称	球体	托举		中等	中等	中等

2.3 实验测量过程

在测量之前,测试者要避免手指过度用力和高强度运动,指尖表面始终保持干燥。在 18℃ 左右室内环境和 Grip 握力压力分布测量系统校准后,每位测试者按照实验要求依次开展 3 个实验项目的手指

作用力测量。只有测试者手指在稳定抓持状态时,才开始采集数据。每次实验采集时间为 5 s,采集数据的频率为 50 Hz。每个实验项目测试者要进行 6 ~ 10 次左右的重复测量,以获取大样本实验数据。测试者前后 2 次测量的时间间隔不小于 2 min,防止

手指疲劳,使得每次实验测量相对独立,不受先前实验经验的主观因素影响,保证数据的客观性和可靠性。

3 手指作用力的测量值和理论值

选择直径 90 mm,重 1 kg 的橡胶实心球为抓持对象,在 3 种抓持位姿下开展手指作用力的实验测量,如表 1 和图 2 所示:1)大径抓持,3 个手指均匀布置在球体的赤道面上(截面直径等于球体直径),以球心为坐标原点,在坐标系 $xyzo$ 下,拇指、食指和中指的接触点坐标为 $(45, 0, 0)$,

$(-22.5, 39, 0)$, $(-22.5, -39, 0)$, 如图 2(a) 所示;2)小径抓持,3 个手指均匀布置在球体赤道面下方二分之一直径的截圆上,在坐标系 $xyzo$ 下,拇指、食指和中指的接触点坐标为 $(39, 0, -22.5)$, $(-19.5, 33.8, -22.5)$, $(-19.5, -33.8, -22.5)$, 如图 2(b) 所示;3)非对称抓持,食指和中指均布在赤道面上,且关于 x 轴对称,拇指位于距离球体赤道面下方的二分之一直径的截圆上,在坐标系 $xyzo$ 下,拇指、食指和中指的接触点坐标为 $(39, 0, -22.5)$, $(-22.5, 39, 0)$, $(-22.5, -39, 0)$, 如图 2(c) 所示。图 2(d) 标出了 3 种抓持位姿的接触点坐标。

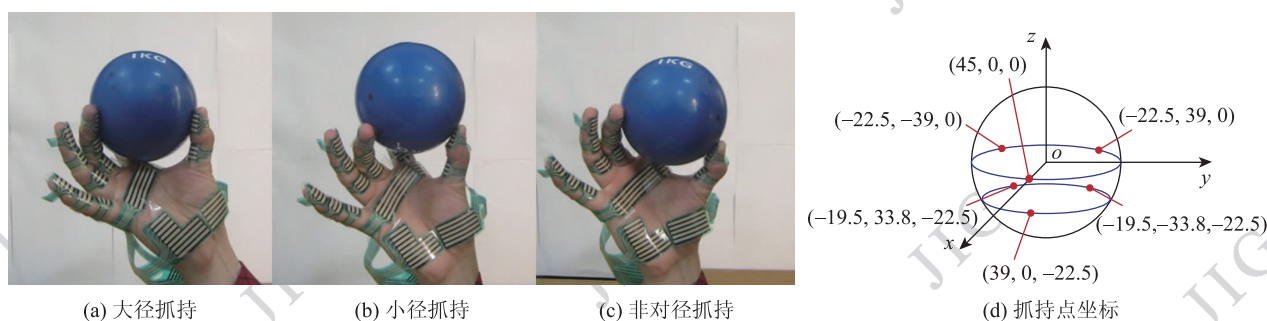


图 2 3 指静力抓持球体的位姿

Fig. 2 Positions and poses of three fingers static grasping a sphere

3.1 3 指静力抓持球体的手指作用力理论值

借鉴机械手抓持原理,人手指尖以软手指接触模型抓持物体,可以看成 2 个软性的橡胶表面发生摩擦,因此确定手指与橡胶实心球的摩擦系数为 $\mu = 0.9$,力矩摩擦因数为 $\gamma = 60 \text{ cm}$ 。

将球体重量、摩擦系数、力矩摩擦因数及接触点坐标等代入最小力螺旋抓持非线性优化模型,求解得到 3 指静力抓持球体各手指作用力的理论值。

大径抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力理论值为 $|F_{c1}| = |F_{c2}| = |F_{c3}| = 4.7464 \text{ N}$;小径抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力的理论值为 $|F_{c1}| = |F_{c2}| = |F_{c3}| = 3.4071 \text{ N}$;非对称抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力的理论值为 $|F_{c1}| = 5.3498 \text{ N}$, $|F_{c2}| = |F_{c3}| = 3.5036 \text{ N}$; F_{c1} 、 F_{c2} 、 F_{c3} 分别表示拇指、食指、中指的手指作用力理论值。

3.2 3 指静力抓持球体的手指作用力实测值

每位测试者按照实验要求依次开展 3 指静力抓

持球体的手指作用力测量,记录和保存实验数据。

图 3(a) 所示为大径抓持时各手指作用力的一次实测数据。图 3(b) 所示为小径抓持时各手指作用力的一次实测数据。图 3(c) 所示为非对称抓持时各手指作用力的一次实测数据。图 3 中的水平线为对应手指作用力的理论值。

分析、处理和统计实验测量数据,得到:1)大径抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力实测值为 $|F'_{c1}| = 4.9176 \text{ N}$, $|F'_{c2}| = 4.7853 \text{ N}$, $|F'_{c3}| = 4.7199 \text{ N}$;2)小径抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力实测值为 $|F'_{c1}| = 3.6110 \text{ N}$, $|F'_{c2}| = 3.5783 \text{ N}$, $|F'_{c3}| = 3.5058 \text{ N}$;3)非对称抓持时,拇指、食指和中指的手指作用力实测值为 $|F'_{c1}| = 5.4238 \text{ N}$, $|F'_{c2}| = 3.5774 \text{ N}$, $|F'_{c3}| = 3.6158 \text{ N}$ 。 F'_{c1} 、 F'_{c2} 、 F'_{c3} 分别表示拇指、食指、中指的手指作用力实测值。

4 测量值和理论值的对比

表 2 中列出了 3 个手指静力抓持球体时,单个

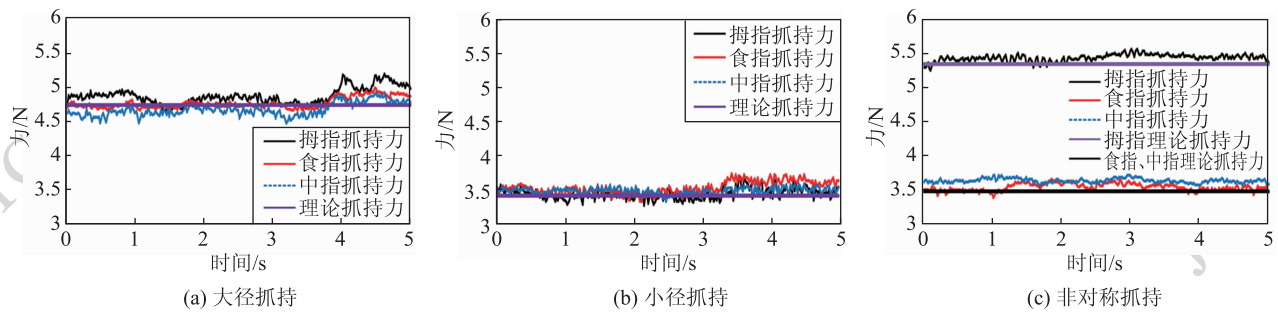


图3 3指静力抓持球体的手指作用力测量值

Fig.3 Measured force of the three fingers static grasping

手指作用力的测量值和理论值,3个手指合力的测量值和理论值,以及它们的偏差。单个手指作用力的测量值和理论值的偏差为

$$\bar{\sigma}_i = \left(\frac{F'_{ci} - F_{ci}}{F'_{ci}} \right) 100\%, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

由单个手指作用力的理论值求得3个手指合力为

$$F = \sqrt{\sum F_{ci}^2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

由单个手指作用力的测量值求得3个手指合力为

$$F' = \sqrt{\sum F_{ci}'^2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

3个手指合力的偏差为

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{F' - F}{F'} \right) \times 100\% \quad (5)$$

表2 测量值和理论值对比

Table 2 Comparison between measured values and calculated values

抓持位姿 (实验项目)	单个手指作用力			3个手指合力		
	理论值 F_{ci}/N	实测值 F'_{ci}/N	偏差 $\bar{\sigma}_i/\%$	理论值 F/N	实测值 F'/N	偏差 $\bar{\sigma}/\%$
3指大径对称 抓持球体(大 径抓持)	$ F_{c1} = 4.7464$	$ F'_{c1} = 4.9176$	$\bar{\sigma}_1 = 3.48$	14.2392	14.4228	1.27
	$ F_{c2} = 4.7464$	$ F'_{c2} = 4.7853$	$\bar{\sigma}_2 = 0.81$			
	$ F_{c3} = 4.7464$	$ F'_{c3} = 4.7199$	$\bar{\sigma}_3 = 0.56$			
3指小径对称 抓持球体(小 径抓持)	$ F_{c1} = 3.4071$	$ F'_{c1} = 3.6110$	$\bar{\sigma}_1 = 5.65$	10.2213	10.6951	4.43
	$ F_{c2} = 3.4071$	$ F'_{c2} = 3.5783$	$\bar{\sigma}_2 = 4.78$			
	$ F_{c3} = 3.4071$	$ F'_{c3} = 3.5058$	$\bar{\sigma}_3 = 2.82$			
3指非对称抓 持球体(非对 称抓持)	$ F_{c1} = 5.3498$	$ F'_{c1} = 5.4238$	$\bar{\sigma}_1 = 1.36$	12.3570	12.6170	2.06
	$ F_{c2} = 3.5036$	$ F'_{c2} = 3.5774$	$\bar{\sigma}_2 = 2.06$			
	$ F_{c3} = 3.5036$	$ F'_{c3} = 3.6158$	$\bar{\sigma}_3 = 3.10$			

5 力觉真实性评价和讨论

按照实验要求和实验内容,分别得到了3种抓持位姿下各手指作用力的测量值和理论值,结合人们的日常抓持经验,通过实测值与理论值的整体对比和局部对比,来分析、讨论和评价虚拟手静力抓持力觉生成算法的力觉真实性。

5.1 实测值与理论值的整体对比

在这3种抓持位姿下,观察图3、表1和表2,可以得出:1)人们日常抓持经验认为手指应该施加比物体重量大的力才能抓得住物体,3个手指合力的实测值与理论值都大于被抓持物体的重量,与日常抓持经验一致,表明人手和虚拟手都能静力平衡抓持物体,证明了实测值和理论值是可信的;2)从日常抓持经验可得,大拇指会比食指和中指施加较大

的力,实验测量得出大拇指作用力的实测值都要大于食指和中指作用力的实测值,与日常经验相一致,表明本文的实验数据也是可信的;3)3指对称抓持物体时,人们直观认为每个手指应该施加相同大小的作用力,实验测量得出每个手指作用力的实测值均近似相等,理论值则完全相等,实测值、理论值和直观感受是一致的,表明实测值和理论值是正确的;4)各手指作用力的偏差都为正偏差,表明各手指作用力的实测值都要大于理论值,可以验证虚拟手抓持力觉生成算法是以最小力螺旋抓持为优化目标,可以逼近求得静力抓持时的最小手指抓持力;5)单个手指作用力或3个手指合力的偏差都小于6%,表明实测值与理论值比较接近,在实验数据证明是可信和正确的基础上,可以得出虚拟手抓持力觉生成算法的合理性和正确性,即虚拟手抓持力觉生成算法可以生成真实的力觉。

要求测试者尽可能以最小的力去抓取球体,并在实验测量之前都经过训练,因此,得到了较好的实验结果,表2中的偏差在1%~6%。由于人手抓取施力的任意性较大,依据实验经验,偏差在20%之内都是可以接受的。

5.2 实测值与理论值的局部对比

在3指对称抓持球体(大径抓持和小径抓持)时,首先,从日常抓持经验可得,大径抓持要比小径抓持更费力,实验测量得到的大径抓持的手指力测量值也大于小径抓持的手指力测量值,与日常抓持经验相一致,证明了实测值是可信的;其次,各手指作用力的实测值都近似相等 $|F'_{c1}| \approx |F'_{c2}| \approx |F'_{c3}|$,且都略大于理论值,不仅印证了3个手指沿球径对称均布的抓持位姿,而且说明实测值和理论值是正确的;同样,大径抓持手指合力的实测值大于小径抓持手指合力的实测值,且均大于球体的重量,验证了人手能静力平衡抓持球体,与日常抓持经验相一致。

在3指非对称抓持球体时,首先,无论拇指手指作用力的实测值还是理论值,都大于食指和中指的实测值和理论值,印证了在坐标系 $xyzo$ 下,拇指的抓持位姿要低于食指和中指的抓持位姿,相当与日常抓持经验中大拇指作用了较大的力去托举球体,实测值、理论值和日常抓持经验是一致的,表明实测值和理论值是可信的。其次,食指和中指的实测值近似相等 $|F'_{c2} - F'_{c3}| = 0.04 \text{ N}$,且偏差小于4%,不仅印证了在坐标系 $xyzo$ 下食指和中指是对称均布,

而且表明实测值和理论值是正确的。

6 结 论

结合人手日常抓持经验,开展了人手指抓持物体作用力的实验测量研究,分析和评价了虚拟手抓持力觉生成算法的真实性。人手日常抓持经验是指人们通过平常抓持操作,日积月累的直觉感受。实测值是各测试者尽可能用最小作用力静力平衡抓持物体的前提下测量得到实验数据。理论值是在各手指以最小作用力静力平衡抓持物体的假设前提下虚拟手抓持力觉生成算法求得的数值。

虽然在实验内容设计时,尽可能消除测试者手指施力的任意性和个体差异性,但是,在实测过程中各测试者不可避免受到主观因素影响,如抓持习惯、手指作用力控制能力等,实测值存在一定程度的波动。对于手心向上抓持球体,3指处于托举状态,测试者不太需要主动施加作用力,可以较好地控制每个手指的作用力,实测值比较客观,更接近理论值。另外,大拇指接触面积要大于食指中指接触面积,大拇指的实测值要比食指和中指的实测值大,这一现象也与人手日常抓持经验相符。

对比和分析各手指作用力的实测值、理论值和人手日常抓持经验,可以得出:1)日常抓持经验和实测值是完全相符的,表明本文的实验测量是有效的、可信的和正确的。2)无论是单个手指作用力的实测值和理论值,还是3个手指合力的实测值和理论值,都很接近的且偏差均在可接受范围之内,证明虚拟手静力抓持力觉生成算法具有物理真实的特性,可以逼真地生成力觉。

参考文献 (References)

- [1] Massie T, Salisbury J. The PHANTOM haptic interface: a device for probing virtual objects [J]. ASME Dynamic Systems and Control Division, 1994, 55(1):295-301.
- [2] Popescu V, Burdea G, Bouzit M, et al. A virtual-reality-based tele-rehabilitation system with force feedback [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2000, 4(1): 45-51.
- [3] Cristian L, Banerjee P, Mehrotra S, et al. A framework for efficient and more realistic haptic application [C] // Proceedings of ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Com-

- puters and Information in Engineering Conference. Illinois, USA; ASME, 2003:1-6.
- [4] Mackawa H, Hollerbach M. Haptic display for object grasping and manipulating in virtual environment[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 2566-2573.
- [5] Melder N, Harwin W, Sharkey P. Translation and rotation of multi-point contacted virtual objects[C]//Proceedings of Eurohaptics Conference. Berlin: Springer, 2003: 218-227.
- [6] Anderson M, Olivier B, Ronan B, et al. Multi-finger haptic rendering of deformable objects[C] //The 10th Eurographics Symposium on Virtual Environments. Berlin: Springer, 2004: 105-111.
- [7] Howe D. A force-reflecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation. Nice, France: IEEE, 1992: 32-36.
- [8] Hashimoto H, Yasuhiro K, Martin B, et al. Dynamic force simulator for force feedback human-machine interaction[C] // IEEE Virtual Reality Annual Int. Symp. . Washington: IEEE 1993: 76-82.
- [9] Iwata H. Artificial reality with force-feedback: development of desktop virtual space with compact master manipulator [J]. Computer Graphics, 2009, 24(4): 165-170.
- [10] Christoph W, Arun P. Realistic virtual grasping [C] //Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference. Bonn, Germany: IEEE, 2005:89-95.
- [11] Sagardia M, Weber B, Hulin T. Evaluation of visual and force feedback in virtual assembly verifications [C] //Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference. Orange County, USA: IEEE, 2012: 23-26.
- [12] Cornella J, Suarez R. Fast and flexible determination of force-closure independent regions to grasp polygonal objects[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 766-771.
- [13] Ortega M, Redon S, 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): 458-468.
- [14] Galoppo N, Tekin S, Lin C. Interactive haptic rendering of high-resolution deformable objects[C] //Proceedings of Virtual Reality Second International Conference. Berlin, Germany: Springer, 2007: 215-223.
- [15] Lee H P, Lin M C, Foskey M. Physically-based validation of deformable medical image registration[M]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2008. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 830-838.
- [16] Zhao D, Fu Y, Li S Q, et al. Research and implementation of force feedback in teleoperation system[J]. Automation & Instrumentation, 2008, 9:1-4. [赵迪, 付艳, 李世其, 等. 遥操作系统中力反馈研究与实现[J]. 自动化与仪表, 2008, 9:1-4.]
- [17] Liu X, Sun J Z, Liu Y, et al. A new method for virtual hand interaction based on non-linear spring model[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3):552-557. [刘欣, 孙济洲, 刘艳, 等. 一种基于非线性弹簧模型的虚拟手交互新方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3):552-557.] [DOI:10.11834/jig.20080330]
- [18] Cui T, Song A G, Wu J. Efficient model for haptic display of flexible object deformation using mass-spring systems [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(5):849-852. [崔桐, 宋爱国, 吴涓. 一种用于力觉再现的柔性体变形仿真弹簧-质点模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(5):849-852.]
- [19] Wu J, Song A G, Li J Q. A quick physics-based deformation model and real-time force reflection algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(1): 90-94. [吴涓, 宋爱国, 李建清. 一种基于物理意义的快速力反馈形变模型及实时力觉响应算法[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 90-94.]
- [20] Yang W Z, Gao S M, Wang H G, et al. Force generation and feedback for physically-based virtual hand grasp [J]. Chinese Journal of Computer, 2005, 28(6):959-964. [杨文珍, 高曙明, 万华根, 等. 基于物理的虚拟手抓持力觉生成和反馈[J]. 计算机学报, 2005, 28(6):959-964.]
- [21] Yang W Z, Gao S M, Wang H G, et al. Contact force rendering of virtual hand interaction based on human fingers' force characteristics [J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(12): 2145-2150. [杨文珍, 高曙明, 万华根, 等. 基于人手指力学特性的虚拟手接触力生成. 浙江大学学报, 2008, 42(12): 2145-2150.]
- [22] Yang W Z, Pan Z G, Chen W H. Physically-based haptic rendering for virtual hand interaction[J]. Transactions on Computational Science, 2012, 7380:163-178.