

基于物理的虚拟手抓持力觉生成和反馈

杨文珍 高曙明 万华根 朱振华 骆 阳

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 提出了一种基于物理的虚拟手静力抓持虚拟物体力觉生成和反馈方法. 借鉴机械手抓持原理, 在建立基于物理的虚拟手静力抓持通用力学模型并对其进行可解性分析的基础上, 针对通用力学模型的多解性, 提出了虚拟手最小力螺旋模型以生成力觉, 并根据抓持物体的不同, 进行模型实例化, 实时求得各虚拟手指上的力和(或)力矩. 实验结果表明, 借助于本文的力觉生成和反馈方法, 利用 CyberGrasp 力觉反馈数据手套, 用户可在抓持虚拟物体时感受到真实的接触力.

关键词 力觉生成; 力觉反馈; 最小力螺旋; 虚拟手抓持; 虚拟环境

中图法分类号 TP391

Force Generation and Feedback for Physically-Based Virtual Hand Grasp

YANG Wen-Zhen GAO Shu-Ming WAN Hua-Gen ZHU Zhen-Hua LUO Yang

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract The force generation and feedback of virtual hand interaction is a challenging task for the researchers of virtual reality. When virtual hand grasps virtual objects, users' real hand could feel realistic contact force, which would not only improve VR's immersion and authenticity deeply, but also help users predict virtual objects' natural behavior and direct users interaction with virtual world. In this paper, a method for physically-based virtual hand grasp force generation and feedback in virtual environments is proposed. Based on the theory of robot's hand grasp, a physically-based general force model of virtual hand grasp is presented and analyses are performed for solving the model. To overcome the uncertainty in the solution of the general model and produce realistic force feedback for virtual hand grasp, optimized models with minimum force spiral are presented and solution schemes are discussed. Experimental results show that using our force generation and feedback method, the user can sense realistic contact forces via the CyberGrasp data glove during the process of virtual grasping.

Keywords force generation; force feedback; minimum force spiral; virtual hand grasp; virtual environment

1 引 言

虚拟现实系统中的实时力觉生成和反馈对增强

虚拟环境的沉浸感、预测虚拟物体的物理行为、指导用户操作虚拟物体及提高交互操作的真实感等起着重要作用. 要实现对虚拟物体的真实操作, 预测其真实行为, 前提条件之一是要让用户感受到与物理环

收稿日期: 2004-06-09; 修改稿收到日期: 2005-03-25. 本课题得到国家自然科学基金(60103003)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2002CB312106)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2002AA411310)、教育部跨世纪优秀人才培养计划资助. 杨文珍, 男, 1976 年生, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为虚拟现实技术及其在工程中的应用、CAD/CAE/CAM 等. E-mail: ywenz@cad.zju.edu.cn. 高曙明, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为虚拟设计与制造、协同设计与制造、产品建模等. 万华根, 男, 1968 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为虚拟现实技术及其在工程中的应用、计算机动画等. 朱振华, 男, 1980 年生, 硕士研究生, 研究方向为虚拟现实技术. 骆 阳, 男, 1972 年生, 硕士研究生, 研究方向为虚拟现实技术.

境中一致的真实力. 如果用户得到的反馈力不准确, 那么用户的感知和决策将不可避免地会发生错误, 从而难以实现对虚拟物体的真实操作.

目前有关虚拟力觉生成和反馈的研究多围绕 PHANTOM™ 这一单点力反馈设备展开, 并根据虚拟物体被刺穿的深度, 运用虎克定律实时计算反馈力^[1~5]. 显然, 借助于这一过于简化的力反馈模型, 难以保证力觉真实性. 因此, 近年来人们开始在反馈力计算模型中给虚拟物体引入了诸如惯性、重力、摩擦、阻尼等多个物理属性, 以提高力觉计算的真实性. 例如, Luciano 等人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, 然后取多个接触点所有力的算术平均表示虚拟物体受到的合力, 作为最终的反馈力反馈给用户^[6]. 这种方法虽然包含了一些物理属性, 但未能遵从力是矢量、力平衡和力矩平衡等基本力学规律求解反馈力, 因此, 力觉真实性仍不能得到保证. Makawa 等人利用 Master Arm 力觉反馈设备对两指抓取实时力觉反馈问题进行了较深入的研究^[7], 但该方法只适用于两指抓取问题, 难以扩展到三指或三指以上的虚拟手力觉生成和反馈.

虚拟手在操作虚拟物体时, 用户的手应该能够感受到真实的作用力, 这是本文的立意之源. 考虑到虚拟手操作虚拟物体情况复杂和我们所采用的 CyberGrasp 力觉反馈数据手套的特点, 本文着重对虚拟手静力抓持虚拟物体的力觉生成和反馈进行研究. 以机械手抓持为原型, 建立基于物理的虚拟手静力抓持通用力学模型, 并在对其可解性进行分析的基础上, 针对通用力学模型的多解性, 构建虚拟手最小力螺旋模型以实时计算生成反馈力, 并将生成的力反馈给用户.

2 基于物理的虚拟手静力抓持通用力学模型

虚拟手静力抓持是指将手指与物体间的接触看作是接触位置固定的点接触, 从而可以不考虑手指在物体表面上的滚动或滑动, 同时也不考虑手指的运动学因素, 而仅考虑一组接触点与物体间的力传递关系的抓持.

2.1 通用力学模型建立

虚拟手静力抓持的实质是通过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它所有外力螺旋, 使虚拟物体保持平衡. 例如, 进行轴和

齿轮虚拟装配时, 手指不仅要平衡轴和齿轮的重力, 还要平衡装配过程中轴与齿轮碰撞或摩擦时产生的力. 设施加于虚拟物体上的多个虚拟手指的合力螺旋为 F_o , 其它所有外力螺旋为 F_e , 则要实现静力抓持必须满足:

$$F_o + F_e = 0 \quad (1)$$

借鉴基于物理的机械手抓持受力分析^[8], 可得

$$Gf_c = -F_e \quad (2)$$

其中, G 为手指力螺旋与其它外力螺旋之间的线性映射, f_c 为每个手指的接触力.

式(2)为虚拟手静力抓持通用力学模型. 理论上, 通过式(2)可以求解出 f_c 的值, 即可以求得每个手指的接触力.

2.2 通用力学模型求解分析

借鉴机械手接触模型^[8], 虚拟手接触模型可分为三种: 无摩擦点接触、有摩擦点接触和软指接触模型. 三种接触模型的力螺旋基维数 m 分别是 1, 3 和 4, 即一个手指接触点在式(2)中分别有 1, 3 和 4 个未知数. 若有 k 个手指接触, 则分别有 $k, 3k$ 和 $4k$ 个未知数. 而式(2)在广义力空间(维数 $p=6$)展开, 最多可得到 6 个平衡方程(三个力平衡方程和三个力矩平衡方程). 显然, 当 $km > p$ 时, 式(2)有无数个解; 只有当 $km \leq p$ 时, 式(2)才有可能存在唯一解, 即才有可能计算得到每个手指所受到的确定的接触力.

式(2)存在多解、唯一解或无解情况的物理含义分别是: (1) 无解. 即虚拟手在当前的位置和姿态下, 无论用多大的力也无法抓持住物体; (2) 唯一解. 即虚拟手在当前位置和姿态下, 各手指所施加的力, 刚好可以静力抓持住物体; (3) 多解. 即虚拟手各手指可施加多种力的组合抓住物体.

3 虚拟手最小力螺旋抓持

上述虚拟手静力抓持通用力学模型, 经实例化后可用于计算生成每个手指的接触力, 但前提条件是必须有效解决该模型解的不确定性, 尤其是多解问题. 由于最终反馈给用户的力只能是其中的一组解, 那么究竟以哪组解反馈给用户才合适?

3.1 最小力螺旋抓持通用模型

为解决这一问题, 我们进行两点假设: (1) 用户用虚拟手抓取物体是基于其日常生活经验的, 因此总能选择合适的(能抓取的)位置和姿势进行抓取; (2) 从人的行为习惯出发, 人总是以最小的力抓持物

体,比如能用 6N(牛顿)的力就可以抓住茶杯喝水时,一般不会用 12N 力或只用 3N 的力去抓取茶杯。

基于上述两点假设,借助软手指接触模型,我们建立当 k 个手指以软手指接触静力抓持虚拟物体时的最小力螺旋抓持通用模型,如下所示:

优化目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^3 (f_{ci}^j)^2 + \left(\frac{f_{ci}^4}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (3)$$

约束条件:

$$Gf_c = -F_e;$$

$$f_{ci}^3 \geq 0;$$

$$\sqrt{(f_{ci}^1)^2 + (f_{ci}^2)^2} \leq \mu f_{ci}^3;$$

$$|f_{ci}^4| \leq \gamma f_{ci}^3 (i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, 3);$$

其中, $f_{ci}^j (i=1, 2, \dots, k)$ 是第 i 个手指在 $x, y, z (j=1, 2, 3)$ 方向的分力, f_{ci}^4 是第 i 个手指在 z 方向的力矩, μ 是摩擦系数, γ 是力矩摩擦因数。在最小力螺旋抓持通用模型中,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。它使 k 个手指施加给物体的接触力之合力最小;

(2) 约束条件 $Gf_c = -F_e$ 。它使 k 个手指的合力螺旋与虚拟物体上的其它外力螺旋平衡;

(3) 约束条件 $f_{ci}^3 \geq 0$ 。 k 个手指接触力在 z 方向上的每个分力不能小于 0, 以保证每个手指是压向物体而不是离开物体;

(4) 约束条件 $\sqrt{(f_{ci}^1)^2 + (f_{ci}^2)^2} \leq \mu f_{ci}^3$ 。 k 个手

指接触力在 x, y 方向上的分力应在各自的摩擦锥内,禁止手指滚动或滑动;

(5) 约束条件 $|f_{ci}^4| \leq \gamma f_{ci}^3$ 。每个手指所施加的力矩应满足软手指接触条件。

上述最小力螺旋抓持通用模型是对 k 个手指以软手指接触静力抓持虚拟物体的一个总体描述,难以直接求解各手指接触力,为此,可以根据虚拟手抓持的不同对象对模型进行实例化,以完成求解过程。然而,现实世界中的物体多种多样,且形状、属性各异,要一一对其进行模型实例化难度很大。我们认为,可依据具体物体的形状特点,对其进行合理的抽象。例如,为求解抓持球形(或类球形)、圆柱形物体(或类圆柱形)的各手指受力,可将该物体抽象为球体或圆柱体,再进行模型实例化。下面我们分别针对刚性的球体和圆柱体进行具体分析,并建立相应的软手指最小力螺旋模型。

3.2 k 个软手指静力抓持球体的最小力螺旋模型

设球体的半径为 R ,摩擦系数为 μ ,力矩摩擦因数为 γ ,物体坐标原点在球心上,受到外力为 $F_e = [f_e^x f_e^y f_e^z m_e^x m_e^y m_e^z]^T$, k 个抓持手指相对于物体坐标位置为 $(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, k)$ 。针对球形物体,我们建立 k 个软手指抓持球体的最小力螺旋模型如下:

优化目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^3 (f_{ci}^j)^2 + \left(\frac{f_{ci}^4}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

约束条件:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k (f_{ci}^1 \cos\theta_{i1} \cos\theta_{i2} - f_{ci}^2 \sin\theta_{i1} + f_{ci}^3 \cos\theta_{i1} \sin\theta_{i2}) \\ \sum_{i=1}^k (f_{ci}^1 \sin\theta_{i1} \cos\theta_{i2} + f_{ci}^2 \cos\theta_{i1} + f_{ci}^3 \sin\theta_{i1} \sin\theta_{i2}) \\ \sum_{i=1}^k (-f_{ci}^1 \sin\theta_{i2} + f_{ci}^3 \cos\theta_{i2}) \\ \sum_{i=1}^k [-f_{ci}^1 (y_i \sin\theta_{i2} + z_i \sin\theta_{i1} \cos\theta_{i2}) - f_{ci}^2 z_i \cos\theta_{i1} + f_{ci}^4 \cos\theta_{i1} \sin\theta_{i2}] \\ \sum_{i=1}^k [f_{ci}^1 (x_i \sin\theta_{i2} + z_i \cos\theta_{i1} \cos\theta_{i2}) - f_{ci}^2 z_i \sin\theta_{i1} + f_{ci}^4 \sin\theta_{i1} \sin\theta_{i2}] \\ \sum_{i=1}^k [f_{ci}^1 (x_i \sin\theta_{i1} \cos\theta_{i2} - y_i \cos\theta_{i1} \cos\theta_{i2}) + f_{ci}^2 (x_i \cos\theta_{i1} + y_i \sin\theta_{i1}) + f_{ci}^4 \cos\theta_{i2}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_e^x \\ -f_e^y \\ -f_e^z \\ -m_e^x \\ -m_e^y \\ -m_e^z \end{bmatrix},$$

$$f_{ci}^3 \geq 0; \sqrt{(f_{ci}^1)^2 + (f_{ci}^2)^2} \leq \mu f_{ci}^3; |f_{ci}^4| \leq \gamma f_{ci}^3 (i=1, 2, \dots, k).$$

设第 C_i 个软手指接触点处物体表面的内法线为 $n_i(x_i, y_i, z_i)$, 矢量 $C_i p, C_i q$, 分别表示内法线 n_i 在 xyC_i 平面和 z 轴上的投影, θ_{i1} 为矢量 $C_i p$ 与接触

坐标系 x 轴的夹角, θ_{i2} 为矢量 n_i 与接触坐标系 z 轴的夹角,如图 1 所示。

于是,当虚拟手抓取球形或类球形物体时,我们

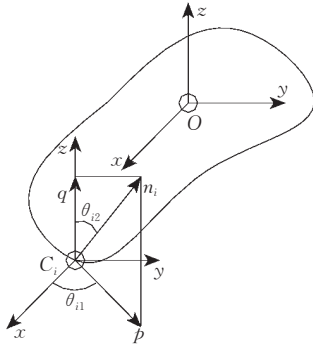


图 1 θ_{i1}, θ_{i2} 角位置示意图

可以通过求解式(4)计算出每个手指在 x, y, z 方向上的每个分力以及在 z 方向上的力矩,从而实现基

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k (-f_{ci}^2 \sin\theta_{i1} + f_{ci}^3 \cos\theta_{i1}) \\ \sum_{i=1}^k (f_{ci}^2 \cos\theta_{i1} + f_{ci}^3 \sin\theta_{i1}) \\ \sum_{i=1}^k (-f_{ci}^1) \\ \sum_{i=1}^k [-f_{ci}^1 y_i - f_{ci}^2 z_i \cos\theta_{i1} - f_{ci}^3 z_i \sin\theta_{i1} + f_{ci}^4 \cos\theta_{i1}] \\ \sum_{i=1}^k [f_{ci}^1 x_i - f_{ci}^2 z_i \sin\theta_{i1} + f_{ci}^3 z_i \cos\theta_{i1} + f_{ci}^4 \sin\theta_{i1}] \\ \sum_{i=1}^k [f_{ci}^2 (x_i \cos\theta_{i1} + y_i \sin\theta_{i1})] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_e^x \\ -f_e^y \\ -f_e^z \\ -m_e^x \\ -m_e^y \\ -m_e^z \end{bmatrix},$$

$$f_{ci}^3 \geq 0; \sqrt{(f_{ci}^1)^2 + (f_{ci}^2)^2} \leq \mu f_{ci}^3; |f_{ci}^4| \leq \gamma f_{ci}^3 (i=1, 2, \dots, k).$$

θ_{i1}, θ_{i2} 的含义同图 1 所示. 于是,当虚拟手抓取圆柱体或类圆柱形物体时,我们可以通过求解式(5)计算出每个手指在 x, y, z 方向上的每个分力以及在 z 方向上的力矩,从而实现了基于物理的虚拟手抓持力觉生成.

4 虚拟手抓持力觉反馈实现

我们在 PC 平台(双 XEON, 1.7GHz CPU, 1GB 内存, 3Dlab, Wildcat5110 显卡)上基于 CyberGrasp 力觉反馈数据手套和 Ascension FOB 6 自由度跟踪器, MIVAS(Multi-modal Virtual Assembly System) 虚拟装配系统, 用 LINDO API 2.0^[9] 求解最小力螺旋模型进行了实时求解验证. CyberGrasp 力觉反馈数据手套如图 2 所示.

4.1 力觉反馈流程

如图 3 所示, 在 MIVAS 虚拟装配系统中, 首先, 用户戴上 CyberGrasp 数据手套进行抓取虚拟物体操作, 位置跟踪传感器和手指运动传感器将手

于物理的虚拟手抓持力觉生成.

3.3 k 个软手指静力抓持圆柱体最小力螺旋模型

设圆柱体的半径为 R , 高为 H , 摩擦系数为 μ , 力矩摩擦因数为 γ , 物体坐标原点在质心上, 受到外力为 $F_e = [f_e^x f_e^y f_e^z m_e^x m_e^y m_e^z]^T$, k 个手指抓持相对于圆柱体坐标位置为 $(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, k)$. 针对圆柱形物体, 我们建立 k 个软手指抓持圆柱体的最小力螺旋模型:

优化目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^3 (f_{ci}^j)^2 + \left(\frac{f_{ci}^4}{\gamma} \right)^2 \right] \quad (5)$$

约束条件:



图 2 CyberGrasp 力觉反馈数据手套

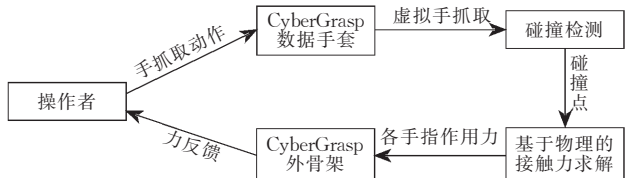


图 3 力觉反馈工作流程

的实际位置和手指运动传给虚拟手, 实现用户手和虚拟手的同步运动; 其次, 当虚拟手抓取虚拟物体时, 利用实时碰撞检测算法, 确定出碰撞点(即虚拟

手与虚拟物体的接触点位置),并用虚拟手抓持最小力螺旋实例化模型,进行各手指接触力的求解;最后,力觉总控制单元将求解得到的接触力,通过 CyberGrasp 的外骨架机构反馈给操作者。

4.2 具体实例

图 4 所示是我们在 MIVAS 系统中建立的用于测试虚拟手持力反馈功能的虚拟装配场景。

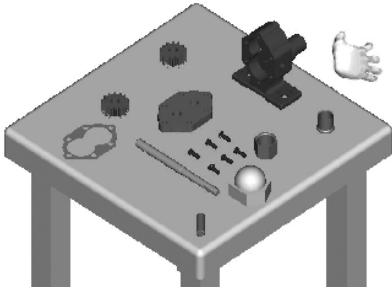


图 4 虚拟手持机械零件装配

4.2.1 三个手指(软指)静力抓持球形螺母

虚拟手用三个手指静力抓持半径为 2cm 重为 30N 的球形螺母,手指与球形螺母的摩擦系数 $\mu=0.6$,力矩摩擦因数 $\gamma=60\text{cm}$,球心为坐标原点,三指相对于球形螺母的接触点分别为 $(1.732, 0, -1)$, $(-0.866, 1.5, -1)$, $(-0.5, -0.866, -1)$,三指对称抓持球形螺母,如图 5 所示。经计算求得

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_0 &= [f_{c1}^1, f_{c1}^2, f_{c1}^3, f_{c1}^4, f_{c2}^1, f_{c2}^2, f_{c2}^3, f_{c2}^4, f_{c3}^1, f_{c3}^2, f_{c3}^3, f_{c3}^4]^T \\ &= [-5.88\text{N}, 0\text{N}, 9.81\text{N}, 0\text{Nm}, -5.88\text{N}, 0\text{N}, \\ &\quad 9.81\text{N}, 0\text{Nm}, -5.88\text{N}, 0\text{N}, 9.81\text{N}, 0\text{Nm}]^T. \end{aligned}$$



图 5 三指对称抓持球形螺母

反馈到操作者三个手指上的力为 $\mathbf{F}_{c1} \approx \mathbf{F}_{c2} \approx \mathbf{F}_{c3} \approx 11.43\text{N}$,计算时间为 0.063s。当三指相对于球形螺母的接触点分别为 $(1.732, 0, -1)$, $(-0.866, 1.5, -1)$, $(-0.5, -0.866, -1.732)$,此时为三指不对称抓持球形螺母情况,如图 6 所示。经计算求得

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_0 &= [f_{c1}^1, f_{c1}^2, f_{c1}^3, f_{c1}^4, f_{c2}^1, f_{c2}^2, f_{c2}^3, f_{c2}^4, f_{c3}^1, f_{c3}^2, f_{c3}^3, f_{c3}^4]^T \\ &= [-5.13\text{N}, -1.17\text{N}, 8.76\text{N}, 0.034\text{Nm}, -5.13\text{N}, \\ &\quad 1.17\text{N}, 8.76\text{N}, -0.034\text{Nm}, -3.57\text{N}, 0\text{N}, \\ &\quad 12.2\text{N}, 0\text{Nm}]^T. \end{aligned}$$

反馈到操作者三个手指上的力分别为 $\mathbf{F}_{c1} \approx \mathbf{F}_{c2} \approx 10.22\text{N}$, $\mathbf{F}_{c3} \approx 12.71\text{N}$ 。计算时间为 0.063s。由于受到硬件功能限制, Cybergrasp 数据手套不能反馈力矩,操作者手指感受不到力矩的信息。



图 6 三指不对称抓持球形螺母

分析上面两种抓持球形螺母的受力计算结果可知:(1)三指对称抓持时,各手指受力均匀;(2)三指不对称抓持时,因第三个手指位置低于其他两手指,所以抓持力较大;(3)三手指受力之合力与球体的重力相当(略大于重力)。从而验证了模型结果与实际情况是吻合的,方法是可行的。

4.2.2 三个手指(软指)静力抓持轴零件

虚拟手用三个手指静力抓持半径为 2cm,高为 4cm 的轴零件,手指与轴的摩擦系数 $\mu=0.6$,力矩摩擦因数 $\gamma=60\text{cm}$ 。轴的质心为坐标原点,受到外力 $\mathbf{F}_e = [0\text{N}, 0\text{N}, -15\text{N}, 0\text{N}, 0\text{N}, -5\text{Ncm}]^T$,三指相对于轴的接触点分别为 $(2, 0, -1)$, $(-1, 1.732, -1)$, $(-1, -1.732, -1)$,如图 7 所示。

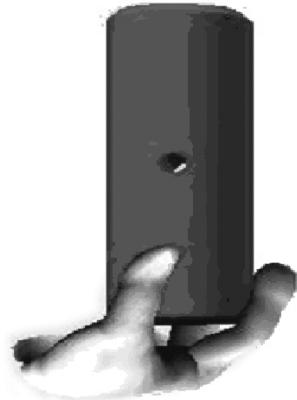


图 7 三指对称抓持轴

经计算求得

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_0 &= [f_{c1}^1, f_{c1}^2, f_{c1}^3, f_{c1}^4, f_{c2}^1, f_{c2}^2, f_{c2}^3, f_{c2}^4, f_{c3}^1, f_{c3}^2, f_{c3}^3, f_{c3}^4]^T \\ &= [-5\text{N}, -0.83\text{N}, 8.45\text{N}, 0\text{Nm}, -5\text{N}, -0.83\text{N}, \\ &\quad 8.45\text{N}, 0\text{Nm}, -5\text{N}, -0.83\text{N}, 8.45\text{N}, 0\text{Nm}]^T. \end{aligned}$$

反馈到操作者三个手指上的力为 $\mathbf{F}_{c1} \approx \mathbf{F}_{c2} \approx \mathbf{F}_{c3} \approx 9.85\text{N}$,计算时间为 0.062s。这个结果也验证了模型与实际情况是吻合的,虚拟手用最小力螺旋抓取轴零件并使其保持平衡。

5 总结和将来工作

力觉生成和反馈是虚拟环境领域的研究热点之一。本文提出了一种基于物理的虚拟手静力抓持力

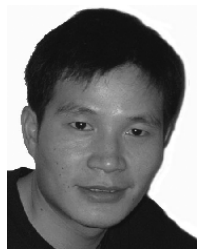
觉生成和反馈方法. 该方法将机械手抓持原理引入到虚拟手抓持中, 建立了虚拟手静力抓持通用力学模型和虚拟手最小力螺旋抓持通用模型; 给出了模型的两种实例化方法用以计算各虚拟手指上的力和(或)力矩, 并基于 CyberGrasp 力觉反馈数据手套实现了力觉反馈. 该方法的特点在于使用户在抓持虚拟环境中的物体时可以感受到与物理世界相一致的接触力.

毋庸讳言, 作为对虚拟手与虚拟物体之间作用力模拟的有益尝试, 本文尚有不少有待提高之处. 例如: 目前在求解各手指接触力时没有考虑到不同手指的生理属性(如大拇指和小拇指的接触力在任何抓取情况下, 都视为作用相同, 这不太符合人手的构造机能); 当虚拟手以最小力螺旋抓持住虚拟物体后, 目前尚未考虑虚拟手的进一步抓持交互(如操作者想用 12N 的力去抓取能用 6N 力就可以抓住的茶杯, 用本文建立的模型, 反馈到操作者手指上的力将一直是 6N, 而不会是其它大小的力); 目前尚未涉及到虚拟物体之间的交互对虚拟手接触力的影响(如在虚拟装配过程中, 零件间发生碰撞时, 各手指接触力改变的情况)等. 这些均有待于在今后的工作中深入研究 and 解决.

参 考 文 献

1 Popescu V., Burdea G., Bouzit M., Girone M., Hentz V.. A

- virtual-reality-based telerehabilitation system with force feedback. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2000, 4(1): 45~51
- 2 McNeely W., Puterbaugh K., Troy J.. Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, Los Angeles, California, 1999, 401~408
- 3 Matthias Renz, Carsten Preusche, Marco Potke *et al.*. Stable haptic interaction with virtual environments using an adapted voxmap-pointshell algorithm. In: *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, Birmingham, UK, 2001, 149~154
- 4 Popescu V., Burdea G., Bouzit M.. Virtual reality simulation modeling for a haptic glove. In: *Proceedings of Computer Animation'99 Conference*, Switzerland, 1999, 195~200
- 5 Lin Ming C., Baxter William, Foskey Mark *et al.*. Haptic interaction for creative processes with simulated media. In: *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, 2002, 598~604
- 6 Luciano Cristian, Banerjee Pat, Mehrotra Sanjay *et al.*. A framework for efficient and more realistic haptic application. In: *Proceedings of the 23rd ASME International 2003 CIE*, Chicago, Illinois, UUA, 2003, 1~6
- 7 Maekawa H., Hollerbach J.M.. Haptic display for object grasping and manipulating in virtual environment. In: *Proceedings of IEEE International Conference Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, 1998, 2566~2573
- 8 Murray, Li, Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994
- 9 LINDDO System Inc. *LINDO API User's Manual*. Chicago, Illinois, 2002



YANG Wen-Zhen, born in 1976, Ph. D. candidate, lecturer. His major research interests include virtual reality & its applications in engineering, CAD/CAE/CAM.

GAO Shu-Ming, born in 1964, professor. His major research interests include product modeling, feature technology, virtual reality in design and manufacturing, Internet

based collaborative design.

WAN Hua-Gen, born in 1968, associate professor. His major research interests include computer graphics, computer animation, scientific visualization, and virtual reality & its applications.

ZHU Zhen-Hua, born in 1980, M. S. candidate. His major research interests include virtual reality & its applications.

LUO Yang, born in 1972, M. S. candidate. His major research interests include virtual reality & its applications.

Background

This work is a part of the project "The Research on Key Techniques of Virtual Prototyping and Their Applications" which is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) under the grant No. 2002AA411310. The main contents of the project include: Intuitive and natural interaction manipulations compatible to the behaviors of designers and engineers; Real-time feedback force generation and rendering for

virtual prototyping; Real-time collision detection for virtual prototyping; Assemblability evaluation of complex products in virtual environment; Kinematics analysis of complex products in virtual environment; Collaborative virtual assembly; Development of a virtual prototyping system based on CAVE environment. The project has been completed. This work is related to the "Real-Time Feedback Force Generation and Rendering for Virtual Prototyping" part of the project.