

一种基于非线性弹簧模型的虚拟手交互新方法

刘欣 孙济洲 刘艳 孙立博

(天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072)

摘要 基于虚拟手的交互技术在人机交互和人机工程学测试等应用中发挥着重要的作用。为了实现直观自然、实时准确、接近真实世界中的虚拟手与虚拟物体的交互,并计算出反馈作用力,首先提出了用非线性弹簧模型计算抓取作用力,使虚拟手和虚拟环境之间实现了基于物理的交互;然后将计算结果以视觉渲染的形式反馈给用户,并对仿真的速率做了定量分析,以便使仿真速率可以达到屏幕刷新频率和力反馈刷新频率的要求。实验结果表明,虚拟手不仅可以直观自然地抓取3维虚拟物体,而且和3维物体之间能够进行实时交互,同时可计算出反馈作用力。

关键词 虚拟现实 虚拟手 碰撞检测 数据手套 虚拟抓取

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)03-0552-06

A New Method for Virtual Hand Interaction Based on Non-linear Spring Model

LIU Xin, SUN Ji-zhou, LIU Yan, SUN Li-bo

(College of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract Interaction techniques based on virtual hand play an important role in applications such as human-computer interaction and ergonomics test, etc. For the purpose of a naturally real-time interaction between virtual hand and virtual objects, also for the purpose of the feedback force calculation, a new non-linear spring model is proposed. A hand model with facility movement control and visually realistic appearance is established, the established hand model is the same as real man hand in fingers degree of freedoms. We also presented the virtual hand movement control method which is based on vector rotation. The simple spring model is improved and the grasping force is calculated with a non-linear spring model. The non-linear spring model is expressed in a three-pieceswise function. The results feedback to the users are in the form of visual rendering a quantitative analysis is done on simulation rate which is fast enough for screen refresh rate and force rendering rate. Experimental results show that virtual grasping can be executed naturally in real-time.

Keywords virtual, reality, virtual, hand, collision, detection, data, glove, virtual, grasping

1 引言

在传统的人机交互中,主要是使用键盘、鼠标等基本交互设备,其交互方式已由以文本为主的字符用户界面发展到基于图形的用户界面,再后来发展到兼顾听觉的多媒体形式的交互。随着虚拟现实技术的发展,人机交互产生了前所未有的革新,出现了

综合运用各种感观交互设备的虚拟现实系统^[1],这种交互方式能够使用户和虚拟环境之间发生更加逼近真实世界的交互。

在人与虚拟环境的交互中,手是最为灵活的器官,因为手可以完成各种各样复杂的交互活动。人手和虚拟环境之间的交互主要可以分为以下两类:一类是基于手势的交互^[2],这种交互方式是通过识别人的不同手势来生成不同的命令,进而完成不同的交互控

基金项目:天津市科技攻关培育项目(06YFGZGX06200)

收稿日期:2006-07-26;改回日期:2006-10-24

第一作者简介:刘欣(1982~),女。2004年获天津大学学士学位,现为天津大学硕士研究生。主要研究方向为运动捕获、虚拟现实等。E-mail: xliu330@126.com

制任务;另一类是虚拟抓取^[3-5],即通过虚拟手抓取虚拟场景中的 3 维物体。虽然基于手势的交互方式比传统的交互方式有进步,但仍不能实现真正自然直观的交互,而虚拟抓取则可以使手与虚拟场景中的 3 维物体之间发生真正自然的交互,因而更逼近真实世界中的人手和物体的交互。由于运动捕获技术能够跟踪真实人手的形态和运动,所以需要建立虚拟手模型作为真实人手在计算机中的化身表示,以便使虚拟手能产生跟随人手的真实运动,但在建立虚拟手模型时,要考虑运动控制方便和仿真实时性的要求。

在虚拟抓取交互中,抓取方法可以分为基于启发式的抓取方法^[3,6]和基于物理的抓取方法^[7]两类。前者是先根据被抓取物体的属性进行分类,然后根据分类制定相应的抓取策略,但这种方法具有特定的局限性,即抓取只能针对有限的物体;而基于物理的抓取则是根据物理定律对抓取过程进行仿真,其对抓取的物体没有特定的分类要求。本文通过建立物理仿真环境来使虚拟手与虚拟世界中其他物体之间的交互能够产生真实的物理交互效果。通过碰撞反应和弹簧模型计算交互作用力时,由于本文的数据手套不支持力反馈,所以应该用视觉反馈形式把结果反馈给用户。

2 虚拟手建模和运动控制

2.1 虚拟手外观建模

在以往很多研究中仅侧重手的运动学建模,由于忽略了外观建模,只使用圆柱、球等一些简单形体建立手指段和关节,因而视觉效果相对较差,且抓取交互仿真的准确性也会受影响。本文不仅建立了符合人手生理学特点的骨架运动学模型(见图 1(b),图中,Thumb,Index,Middle,Ring,Pinky 分别代表拇指、食指、中指、无名指和小指,TM 代表拇指根关节,NCP 代表拇指中关节,IP 代表拇指端关节,DIP 代表端关节,PIP 代表其余 4 指中关节),同时考虑了视觉真实感,而外观建模则采用 mesh 建模方法(如图 1(a)所示),这既能使手看起来更加具有视觉真实感,又可以满足抓取仿真实时性的要求,同时使用 mesh 手模型和场景中物体模型进行碰撞检测还能使抓取交互更加准确。

2.2 虚拟手运动学建模

虚拟手模型是作为真实人手的化身,它既要根据运动控制的需要,同时又要准确反映真实人手的自由度限制等生理特征,本文建立了具有 26 个自由度的右手虚拟手运动学模型(如图 1(b)所示),该模型是手的骨架模型,其中,手的形态占据 20 个自

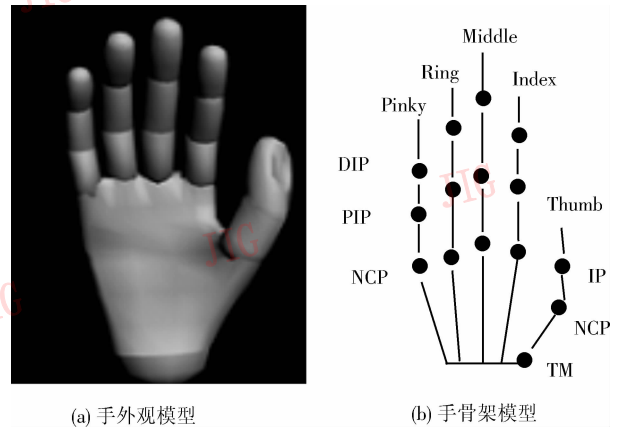


图 1 虚拟手模型
Fig. 1 Virtual hand models

由度,5 个手指每个占 4 个自由度,手本身的运动有 3 个平移和 3 个旋转自由度,各自由度的限制如表 1 所示(其中,各角度代表每个关节弯曲处的夹角)。每个手指的 4 个自由度对应人体的动作如图 2 所示,手指的 3 段指节,每段有 1 个弯曲自由度,即 J1F、J2F、J3F,其对应人手指 3 段的弯曲运动,靠近手掌的 1 段指节还有一个张合自由度 J1A,其对应手指的张合运动。其中,F 表示弯曲,A 表示伸展。

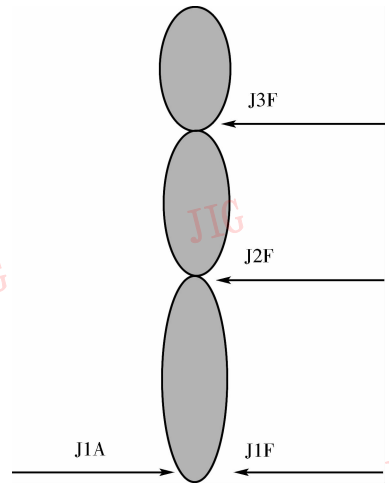


图 2 手指自由度
Fig. 2 DOF of one finger

2.3 虚拟手的运动控制

在交互仿真中,由于虚拟手的每一部分都是 Kinematics 类型的刚体,因此能够进行独立控制。定义 Kinematics 为一种具有无穷大质量的刚体,且其不受仿真环境的控制,虽然运动完全受真实人手控制,但可以和其他场景中的其他物体模型发生真实的碰撞检测。若将虚拟手模型定义为 Kinematics 类型的

刚体,则能保证手的运动不受其他力的影响,而且仅完全受运动捕获设备的驱动控制,即可以产生跟随

真实人手运动的虚拟手,同时虚拟手又能和场景中的物体发生抓取交互。

表 1 各手指自由度角度限制

Tab. 1 DOF limitation of all the fingers

	J1F	J2F	J3F	J1A			
拇指	$-10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_2 \leq 60^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_3 \leq 90^\circ$	$-45^\circ \leq \alpha_4 \leq 45^\circ$			
食指	$-30^\circ \leq \alpha_5 \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_6 \leq 110^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_7 \leq 90^\circ$	$-20^\circ \leq \alpha_8 \leq 10^\circ$			
中指	$-30^\circ \leq \alpha_9 \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{10} \leq 110^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{11} \leq 90^\circ$	$-15^\circ \leq \alpha_{12} \leq 15^\circ$			
无名指	$-30^\circ \leq \alpha_{13} \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{14} \leq 110^\circ$ </tr <tr> <td>小指</td> <td>$-30^\circ \leq \alpha_{17} \leq 90^\circ$</td> <td>$0^\circ \leq \alpha_{18} \leq 110^\circ$</td> <td>$0^\circ \leq \alpha_{19} \leq 90^\circ$</td> <td>$-10^\circ \leq \alpha_{20} \leq 40^\circ$</td> </tr>	小指	$-30^\circ \leq \alpha_{17} \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{18} \leq 110^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{19} \leq 90^\circ$	$-10^\circ \leq \alpha_{20} \leq 40^\circ$
小指	$-30^\circ \leq \alpha_{17} \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{18} \leq 110^\circ$	$0^\circ \leq \alpha_{19} \leq 90^\circ$	$-10^\circ \leq \alpha_{20} \leq 40^\circ$			

手的位置可由数据依捕获的数据驱动,而手的形态的确定则要根据数据手套捕获的数据经过向量旋转方式实现,且每个手指的计算相同,图 3 是一个手指的计算过程。假设右手的初始位置是位于 XY 平面内,手心垂直 Z 轴朝向 Z 轴正向,则五指并拢时,指尖指向的方向就是 Y 轴正向。图 3 中的直线表示一个手指的 3 段指节,中间通过关节连接。手指的运动过程是先做手指弯曲运动,然后做张合运动,图 3(a) 是手指弯曲的变化过程,图 3(b) 是在图 3(a) 计算手指弯曲动作后进行手指张合变化过程。

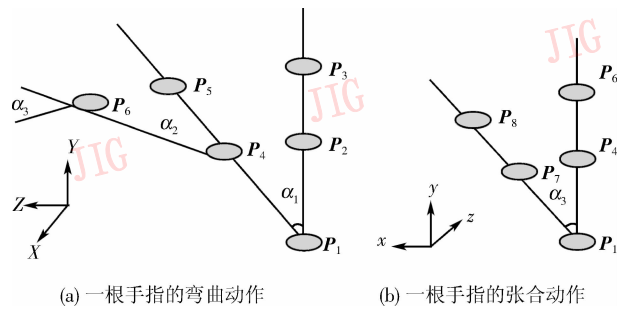


图 3 向量旋转方法计算一个手指的形态

Fig. 3 Vector rotation calculation method of a finger

手指在弯曲运动后,中间关节在手指弯曲后的位置 P_4 由式(1)计算得到,靠近手指尖端的关节位置 P_6 由式(2)计算得到。 $P_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 分别代表点的坐标向量, M_1, M_2, M_3 是旋转矩阵, M_1 表示绕 X 轴旋转 α_1 角度的矩阵, M_2 表示绕 X 轴旋转 α_2 角度, M_3 表示绕 Z 轴旋转 $-\alpha_3$ 角度的矩阵, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是由数据手套捕获的角度。

$$P_4 = M_1 \times (P_2 - P_1) + P_1 \quad (1)$$

$$P_6 = M_1 \times [M_1 \times (P_3 - P_1) + P_1 - P_4] + P_4 \quad (2)$$

弯曲后再做张合运动,最终的中间关节位置 P_7

由式(3)计算得到,靠近手指尖端关节的最终位置 P_8 由式(4)计算得到,即

$$P_7 = M_3 \times (P_4 - P_1) + P_1 \quad (3)$$

$$P_8 = M_3 \times (P_6 - P_1) + P_1 \quad (4)$$

3 抓取作用力的计算

本文在基于浸入深度计算受力的简单弹簧模型的基础上进行扩展,建立了非线性弹簧模型,用于计算抓取作用力。为了计算作用力,同时保证抓取的视觉真实感,以避免手插入到模型内部,建立了以下两个手模型:实体手模型和线框手模型(如图 4 所示)。其中线框手模型和物体之间不检测碰撞,只实时反映人手的真实运动,因在实体手模型和场景中的物体没发生碰撞前,线框手模型和实体手模型是重合的;当发生碰撞后,实体手模型不再接受捕获数据的控制,并停止在被抓取物体的表面,而线框手模型则继续运动,还接受从数据手套捕获的数据,这样不仅能产生真实的视觉效果,而且不会发生浸入现象。线框手和实体手之间的差异为非线性弹簧模型计算交互作用力提供了可能。

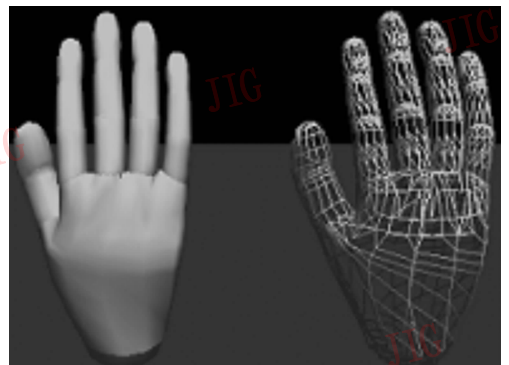


图 4 实体手模型与线框手模型

Fig. 4 Solid hand model and line hand model

3.1 非线性弹簧模型

在反馈作用力的计算中使用比较多的是文献[8]中提到的计算受力的线性弹簧模型如图5所示,一般虚拟手可用图5中的小球来表达,而虚拟场景中与虚拟手交互的物体则可以用一个虚拟墙来代表。式(5)是该模型作用力的计算公式,其中, \mathbf{x}_w 是虚拟墙的位置, \mathbf{x} 是小球的位置。根据该弹簧模型的计算公式,可以得出作用力的计算结果随小球深入墙的距离是线性增加的,但在真实世界中,当手抓取一个物体时,作用力的增加会随着皮肤和肌肉的形变逐渐达到一个饱和,即抓取力不会无限制增加,会逐渐趋于一个常数,而且力的增加并不完全是线性的,当超过一定的阈值后,会呈现逐渐缓慢的趋势,因此本文对简单线性弹簧模型进行了扩展,提出使用非线性分段函数建立弹簧模型来计算交互作用力。

对于交互作用力比较小的差异,可使用线性函数计算,而对于交互作用力比较大的差异,则使用常数饱和力,中间状态用曲线函数计算,使力的增加呈现逐渐缓慢的趋势,计算过程见式(6)、式(7),式(6)是非线性弹簧模型中的扭力计算,式(7)是非线性弹簧模型中的拉伸力计算。前面讨论过手的形态占据20个自由度,而且这20个自由度每个自由度都可以由非线性弹簧模型中的扭力部分来建模计算(如式(6)所示),而5个手指每个手指则分别由非线性弹簧模型中的拉伸力部分建模(如式(7)所示),这样相当于所建立的非线性弹簧模型中总共包括20个扭力弹簧模型和5个拉伸力弹簧模型(如图5所示),先利用这些弹簧模型计算出人手每个部分的作用力,然后再对每个手指的多个作用力进行合成处理。

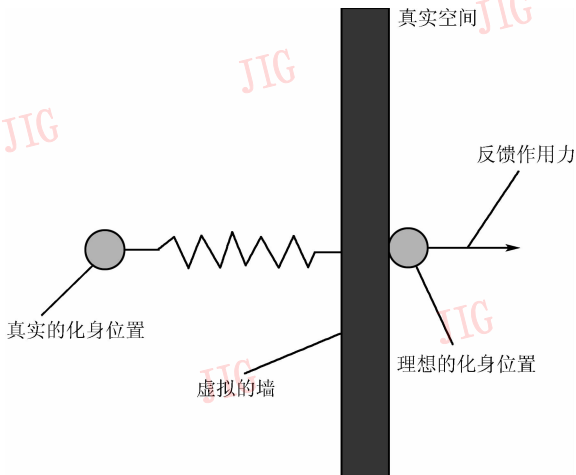


图5 简单线性弹簧模型示意图

Fig.5 Simple linear spring model

$$F = \begin{cases} 0 & \mathbf{x} > \mathbf{x}_w \\ K(\mathbf{x}_w - \mathbf{x}) & \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_w \end{cases} \quad (5)$$

可用式(6)计算出每个关节自由度的扭力和用式(7)计算出每个手指部分的拉伸力。 K_1 、 K_2 、 \tilde{K}_1 、 \tilde{K}_2 分别是弹性系数, b_3 、 b_4 、 \tilde{b}_3 、 \tilde{b}_4 是阻尼系数, A_w 是线框手每帧的角度, A_s 是实体手停留在物体表面时的角度, ω_w 和 ω_s 分别是线框手和实体手的角速度, $\Delta\theta$ 是实体手和场景中物体发生碰撞检测后,线框手和实体手之间产生的手指角度差异, Ω_1 是非线性弹簧模型中扭力由线性变换阶段到指数缓慢变换阶段过渡的阈值, Ω_2 是由指数缓慢变换阶段到常数阶段的过渡阈值。 Δd 与 $\Delta\theta$ 类似,是实体手和线框手之间手指的位置差异, d_1 是非线性弹簧模型中拉伸力由线性阶段到指数缓慢变换阶段过渡的阈值, d_2 是由指数缓慢变换阶段到常数阶段过渡的阈值。

$$\tau = \begin{cases} K_1(A_w - A_s) + b_3(\omega_w - \omega_s) & \Delta\theta < \Omega_1 \\ K_2(A_w - A_s)^a + b_4(\omega_w - \omega_s)^a & \Omega_1 < \Delta\theta < \Omega_2 \\ B & \Delta\theta > \Omega_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$f = \begin{cases} \tilde{K}_1(\mathbf{P}_w - \mathbf{P}_s) + \tilde{b}_3(V_w - V_s) & \Delta d < d_1 \\ \tilde{K}_2(\mathbf{P}_w - \mathbf{P}_s)^a + \tilde{b}_4(V_w - V_s)^a & d_1 < \Delta d < d_2 \\ B & \Delta d > d_2 \end{cases} \quad (7)$$

ω_s 为0, ω_w 的计算见式(8)。 A 和 A_{pre} 分别是连续两帧关节的角度, Δt 是一帧的时间间隔。 \mathbf{P}_w 是线框手每帧的位置, \mathbf{P}_s 是实体手停留在物体表面时的位置, \mathbf{V}_w 和 \mathbf{V}_s 分别是线框手和实体手的速度。当发生碰撞后, \mathbf{V}_s 为0, \mathbf{V}_w 的计算见式(9)。 \mathbf{P} 和 \mathbf{P}_{pre} 分别是连续两帧线框手对应点的位置。此外, \mathbf{P}_w 和 \mathbf{P}_s 可通过正向运动学方法计算得到。

$$\omega_w = (A - A_{pre})/\Delta t \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_w = (\mathbf{P} - \mathbf{P}_{pre})/\Delta t \quad (9)$$

3.2 抓取力的视觉反馈

为了尽量避免使用代价昂贵的力反馈设备,本文提出以视觉反馈的形式给出抓取力的结果。由于每个手指对应4个自由度,即分别对应4个扭力弹簧模型,每个手指还有1个线性弹簧模型,所以对这5个力进行合成,即可求出每个手指的合力,并可给出渲染结果。渲染结果的形式是简洁直观的,其中用箭头来表示力,在每个手指上画出一个箭头表示

合成力的结果,这个力的大小可由式(10)计算得到。如果碰撞检测可以返回发生碰撞的三角面片的法向量,那么将这些法向量的平均值作为最终合力的方向是比较合理的表示。 F 是每个手指最终的合力, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 是合成系数, $\tau_{j_1}, \tau_{j_2}, \tau_{j_3}, \tau_{j_4}$ 分别是每个手指对应于 4 个扭力弹簧模型求出的扭力, f 是对应于线性弹簧模型求出的手指拉伸力, N 是求出的平均法向量, $f \cdot N$ 相当于把求出的拉伸力在最终的渲染方向上进行分解, $\tau \cdot N$ 是把求出的扭力在渲染方向上进行分解。

$$F = k_1 \times \tau_{j_1} \cdot N + k_2 \times \tau_{j_2} \cdot N + k_3 \times \tau_{j_3} \cdot N + k_4 \times \tau_{j_4} \cdot N + k_5 \times f \cdot N \quad (10)$$

4 实验结果

为验证本文方法的效果,利用抓取小球和环两个实例进行了虚拟手抓取交互仿真实验。实验时,整个虚拟手的抓取交互仿真是在一台 PC 工作站上实现的,该 PC 工作站的配置为 Intel Pentium 4 CPU 3.00GHz, 1.00GB 内存。5DT 数据手套用于捕获手的形态,Ascension 的 Flock Of Birds 用于捕获人手的空间运动,包括整个手的平移和旋转,V8 立体头盔用于进行立体显示,tracker 头部跟踪器用于对头部的运动进行跟踪,具体硬件实验环境见图 6。

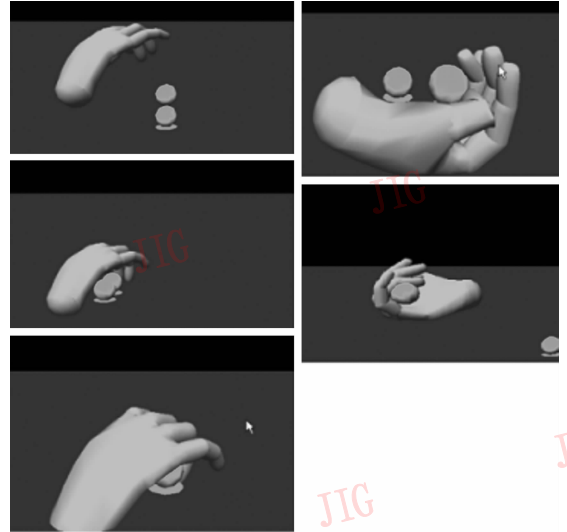


图 6 抓取仿真的桌面硬件环境

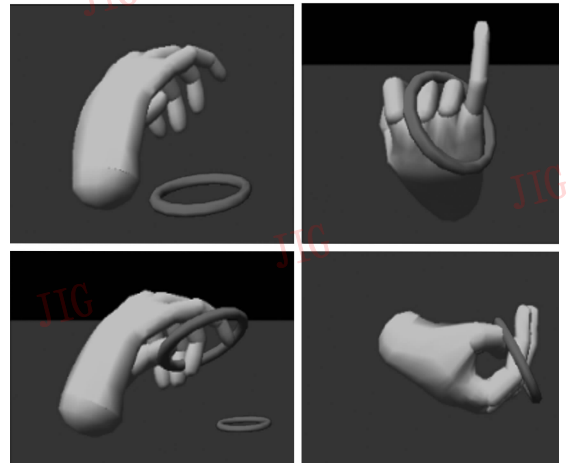
Fig. 6 Desktop hardware of grasping simulation

图 7(a) 是虚拟手抓取小球的整个实验过程,即根据上文提到的方法,虚拟手和小球之间发生直观的抓取过程,该小球的尺寸符合抓取条件,且和手的尺寸相当。整个抓取仿真过程包括虚拟手靠近小球,以及发生碰撞后将小球抓起,然后手心朝上,随意移动小球,并使小球在手心内自由滚动。图 7

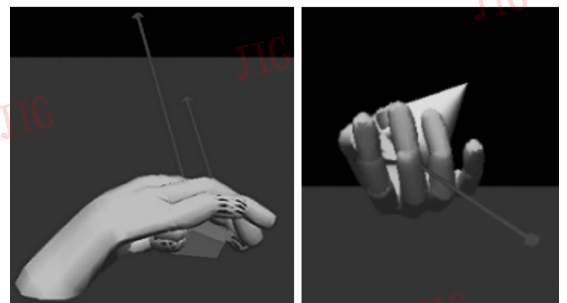
(b) 是虚拟手和圆环的交互过程,即虚拟手首先逐渐靠近圆环,当位置合适时,即可以用手指勾起圆环,并可用一根手指自由旋转圆环,交互效果比较自然。图 7(c) 是虚拟手抓取物体时,根据扩展的非线性弹簧模型计算出抓取力并进行视觉渲染的结果,该过程可以给出一个直观的感觉,同时能避免使用昂贵的力反馈设备。



(a) 虚拟手抓取小球并移动小球



(b) 虚拟手勾起圆环并套在手指上旋转



(c) 抓取力的视觉渲染

图 7 抓取交互效果图

Fig. 7 Grasping results of simulation

虚拟现实交互的实时性是交互过程中要考虑的一个重要问题,而且为了提供最佳的交互效果,必须有实时性的保证。画面的刷新速率要能够达到20~30fps,才能提供一个连续无闪烁的动画画面效果,此外,如果在整个交互过程中引入力反馈设备,那么力反馈的刷新频率的要求则更高,一般都在1000Hz左右。碰撞检测和碰撞反应从很大程度上来说,一般是一个系统的瓶颈所在,本文没有过多的关注碰撞检测和碰撞反应的细节,只是利用已有的仿真工具 Novodex 所提供的碰撞检测和碰撞反应,就已获得了令人满意的结果。仿真中所用到的实体手模型由1735个顶点和3000个三角面片组成,当场景的复杂度在几千上万或几十万的三角面片时,都能得到实时的仿真结果。图8是对抓取交互仿真的时间的记录,从图中可以看出,仿真的循环时间大概在1~2ms左右,平均仿真速率能达到1000fps,完全可以达到实时的交互仿真。

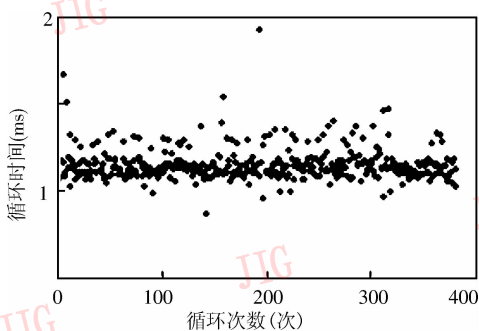


图8 仿真过程的循环时间

Fig. 8 Cycle time the simulation

5 结论

基于虚拟手的交互在虚拟现实交互系统中不但能够完成直观自然的交互功能,还能提供给用户卓越的交互效果,正受到越来越多的关注。此外,基于虚拟手的虚拟现实技术在工业上也有广泛而重要的应用。基于此,本文对有关虚拟手的交互技术进行了相关研究,并首先使用基于物理的交互抓取方法来避免使用启发式方法的特定局限性,然后在虚拟手运动学建模的基础上,提出了运动控制方法,并通过非线性弹簧模型计算抓取作用力。实验结果表明,基于上述技术,虚拟手不仅可以和场景中的虚

拟物体发生自然的基于物理的交互,而且仿真交互完全能够达到实时性的要求。

由于受虚拟手建模和手套精度的限制,手的形态并非完全准确,因此对抓取仿真会有一定的影响,以后将进一步改进虚拟手模型,尽可能产生形态完全逼真的虚拟手姿势。此外,本文的抓取仿真中的3维物体都是刚性物体,以后将进一步对可变形物体的抓取交互仿真做相关研究。还将在现在的基础上尝试用虚拟手做人机工程学测试方面的研究。

致谢 本研究受到天津市科技攻关培育项目“基于虚拟现实和虚拟人技术的3维网络游戏通用引擎的研发”的资助。

参考文献 (References)

- 1 Bowman Doug A, Kruijff Ernst, LaViola Joseph J, *et al.* An introduction to 3-D user interface design [J]. Massachusetts Institute of Technology, 2001, **10**(1): 96~108.
- 2 Tomozoe Y, Machida T, Kiyokawa K, *et al.* Unified gesture-based interaction techniques for object manipulation and navigation in a large-scale virtual environment [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality [C], Chicago, IL, USA, 2004: 259~260.
- 3 Huang Zhi-yong, Boulic Ronan, Thalmann Nadia Magnenat, *et al.* A multi-sensor approach for grasping and 3D interaction [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Graphics: Developments in Virtual Environments [C], London, UK: Academic Press Ltd., 1995: 235~253.
- 4 Sanso Ramon Mas, Thalmann Daniel. A hand control and automatic grasping system for synthetic actors [J]. Eurographics Association, 1994, **13**(3): 167~177.
- 5 Wan Hua-gen, Gao Shu-ming, Peng Qunsheng. Virtual grasping for virtual assembly tasks [A]. In: Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics [C], Hong Kong, China, 2004: 448~451.
- 6 Rijkema Hans, Girard Michael. Computer animation of knowledge-based human grasping [J]. Computer Graphics, 1991, **25**(4): 339~348.
- 7 Pollard Nancy S, Zordan Victor B. Physically based grasping control from example [A]. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Los Angeles, California, USA, 2005: 311~318.
- 8 Salisbury Kenneth, Conti Francois, Barbagli Federico. Haptic rendering: Introductory concepts [J]. IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, 2004, **24**(2): 24~32.