

支持触觉力反馈的虚拟油泥造型系统

闫锋欣¹ 侯增选^{1,2} 张定华¹ 祁小苑¹ 宁志鹏¹

1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安,710072

2. 大连理工大学,大连,116023

摘要:使用六自由度三维鼠标 Spaceball 5000 和触觉力反馈设备 PHANTOM Desktop,设计了造型操作中的双手交互子任务分配模式,完成了触觉反馈力的计算,并基于 Open Inventor 和 Qt 应用程序框架,开发了设备的用户接口,实现了带触觉力反馈功能的虚拟油泥造型系统,再现了传统油泥建模过程中通过力触觉控制造型过程的方法。最后,在实际产品开发过程中进行了应用验证,效果良好。

关键词:触觉;力反馈;虚拟油泥造型系统;Open Inventor 图形库;Qt 应用程序框架

中图分类号:TP391

文章编号:1004—132X(2009)19—2372—06

Virtual Clay Modeling System with Force Feedback

Yan Fengxin¹ Hou Zengxuan^{1,2} Zhang Dinghua¹ Qi Xiaoyuan¹ Ning Zhipeng¹

1. The Key Laboratory of Modern Design and Integrated Manufacturing of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

2. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: In order to enhance the immersion feelings and the controlling functionality for cutting, pasting, and compensating of VCM system, a set of interaction tasks were assigned with the characteristics of Spaceball 5000 and PHANTOM Desktop. During the process of realizing 6 degrees of freedom haptic feedback modeling control, device interfaces were developed with Open Inventor and Qt framework. Finally, some examples were introduced to validate these results. At the same time, this is a beneficial attempt for computer aided industrial design method.

Key words: haptics; force feedback; virtual clay modeling(VCM) system; Open Inventor library; Qt framework

0 引言

一般情况下,产品设计伴随产品开发的整个过程。在传统的 product 外形设计过程中,设计人员利用概念草图、实物模型等进行产品的后续详细设计,然而这一过程却导致了产品的最终设计效果与生产设备之间的信息流断点^[1]。计算机辅助工业设计(computer aided industrial design, CAID)和计算机辅助造型(computer aided styling, CAS)软件系统在产品开发中的广泛应用有效缓解了这一状况,但其输入设备(如鼠标、键盘、菜单等)和输出设备(如显示器等)难以形象体现设计人员在现实工作中的设计动作和行为习惯,这极大地限制了设计人员造型能力和创造能力的发挥。因此,对诸如汽车等重要产品的外形设计,通常还是采用诸如传统油泥建模和 CAID 方法相结合的设计流程^[1-3]。

虚拟油泥造型(virtual clay modeling, VCM)方法^[1,3]的技术思想起源于汽车车身设计中的油泥建模过程。在计算机生成的虚拟油泥造型环境中,设计人员利用虚拟刮刀等造型工具通过刮削、填补和刮补操作,再现真实的产品油泥建模过程。这一过程与传统油泥建模过程一致,能够充分发挥设计人员的创造能力,克服传统建模过程和 CAID 方法的不足;所得的产品模型可直接进入后续研发过程,解决了传统产品模型开发过程中信息流断点的问题^[1,4-5]。

触觉(haptic)在虚拟环境中有其突出优势,是人类唯一既可接受周围环境输入又可以对周围环境输出的感知通道,可极大地增强可视化的表达效果^[5-6]。美国 SensAble 科技公司的 PHANTOM 系列触觉设备,在医学、艺术设计等领域得到了广泛应用;法国 HAPTION 公司以设计、制造各类力触觉设备为主,其 Virtouse 系列产品具有活动范围广、可承受的力和扭矩大等优点;瑞士 ForceDimension 公司的产品可在较大工作空间内实现作用力的大范围传递;美国 Immersion 公司的 CyberGrasp 可以为手和手指同时提供触觉

收稿日期:2008—12—08

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z111);国家自然科学基金资助项目(50475145, 50775185);国家发展和改革委员会专项基金资助项目(发改高技[2005]1898 号)

反馈^[7]。在国内,东南大学研制了六自由度(DOF)带力反馈的手控器和力反馈数据手套;北京航空航天大学机器人研究所研制了一维力触觉交互装置;此外,中国科学院自动化研究所和哈尔滨工业大学等单位也开展了与触觉相关的研究,但这些研究都还处于起步阶段^[8]。对触觉反馈力的计算,通常使用基于物理意义的弹簧一阵子模型^[9],如 GHOST 和 OpenHaptics 等软件开发包。

综上所述,触觉力反馈设备及其实现算法为人类提供了一种新的人机交互方式。本文首先通过对虚拟油泥造型方法的分析,在现有虚拟油泥造型技术基础上,开发六自由度设备三维鼠标 Spaceball 5000 和力触觉设备 PHANTOM Desktop 的交互接口;然后,设计支持六自由度触觉力反馈的虚拟油泥造型系统;最后,在某型汽车车身外形造型中进行应用验证。

1 虚拟油泥造型方法

传统油泥模型建模大多采用手工制作方式^[3],主要制作步骤包括:首先,设计人员根据设计思路绘制草图,勾勒产品三维模型;然后,造型人员再利用油泥刮刀、测量仪器、模板、金属膜等工具器材制作油泥模型。这一过程一般较费时,劳动强度大且费用高,获得的三维模型信息只能通过扫描、测量等方法进入后续设计过程,造成产品开发过程中出现信息流断点^[1-3]。

为缩短产品开发周期,降低研制成本,防止产品设计开发过程中信息流断点,企业在产品的设计阶段大量引入了 CAS 软件,如 AutoCAD、UG、3DS Max 等。但这些 CAS 软件主要基于样条曲面和图形显示技术来完成产品的造型交互,即通过曲面和曲线的特征控制点来控制产品外形。这就要求设计人员需要具有很好的数学知识,并且随着交互操作的进行,模型的表示会越来越详细,计算机内部的数学表示也逐渐复杂化,而操作过程中所使用的菜单等交互手段限制了设计人员的造型能力和创造力的发挥。

虚拟油泥造型方法可分为几何变形法和材料切除法两种方法^[4-5,10-11],是解决上述 CAS 软件问题的有效途径之一。利用该技术,设计人员可以在计算机生成的虚拟空间使用各种虚拟油泥造型工具(如虚拟刮刀、虚拟刮板等),通过刮削、填补和刮补操作完成产品的虚拟油泥模型的造型,如图 1 所示。这些操作类似于材料的“切除”过程,因而不必使用传统的控制顶点拖拽的方法来改变

产品外形,可以充分支持设计人员创造力的发挥;同时,所得产品模型可直接进入后续的 CAD 生产和仿真计算过程,不存在信息流断点的问题^[3]。

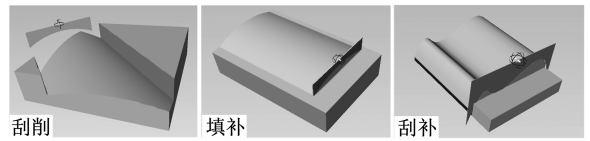


图 1 虚拟油泥造型方法中的刮削、填补和刮补造型

2 触觉力反馈技术

触觉力反馈(force feedback)是一种新的高级人机交互技术。在计算机生成的虚拟环境中,操作人员可以通过触觉设备对其中的物体进行虚拟接触和操作,根据人手感知到的触觉反馈力控制与形体的接触,并模拟物体的形变。通过该技术可方便地解决传统 CAD 系统中遇到的问题^[12-13]。触觉力反馈技术与视觉、听觉相结合,可显著改变传统的计算机辅助过程,已广泛应用于娱乐、医疗、军事等领域^[8]。

在现代产品创新设计中,触觉力反馈技术得到了广泛的应用^[4,6,8]。国外以 SensAble 科技等为代表的多家公司先后推出了带触觉力反馈功能的商业软件,如 FreeForm Modeling Plus System、ClayTools、VirTools 等^[14],在玩具制造、游戏角色设计等领域应用较多。国内的张玉茹等^[15]将触觉力反馈技术应用到 CAID 的变形造型及虚拟雕刻中,实现了图形刷新和触觉反馈同步的功能。

借鉴上述 CAID 系统的实现思路,本文将触觉力反馈技术引入到虚拟油泥造型中,以此模拟传统油泥建模过程中设计人员通过触觉力对造型过程的控制。

3 系统分析与设计

在 VCM 系统中,人机交互方式决定造型效率。Kabbash 等^[16]通过研究指出:合理分配双手任务能够有效提高工作效率,否则将可能增加认知负担,降低工作效率。Bowman 等^[17]也指出,虚拟环境主要包括选择/操作(移动或旋转)、漫游、系统控制 3 类通用交互任务,三者通常相互交替,配合完成任务。刮削、填补和刮补操作属于动作持续型操作行为,为避免产生通过键盘、鼠标模拟持续动作而造成的疲劳等问题,需合理、有效分配双手任务并考虑以下情况:①左右手交互任务的分配;②人机交互设备;③交互任务的技术实现难度。

3.1 左右手交互任务

刮削、填补和刮补操作是虚拟油泥造型方法中的主要交互任务,其动作任务的描述如表 1 所示。现实生活中,人的手部行为可分为 3 类:单手行为、双手对称行为和双手非对称行为^[18]。在人机交互学科中,人的双手非对称行为使用最多、感觉也最自然。Guiard 运动链模型^[18]指出:操作人员的左手先于右手动作,右手动作范围小于左手动作范围。在现有的 VCM 系统中,设计人员通过鼠标拖动虚拟造型工具(如平移/旋转)及使用键盘切换造型状态(如造型与否)来完成造型操作,是非对称双手交互行为,因而可采用不同的设备分工来有效提高工作效率。

表 1 虚拟油泥造型的基本动作

交互动作	动作任务描述	标志
刮削	削除油泥块上的多余材料	T
填补	在模型余缺处添加油泥材料	P
刮补	刮削的同时也填补虚拟油泥材料	M

选用六自由度三维鼠标和触觉力反馈设备,通过自然的人机交互动作转化成 T/P/M 行为,是一种较佳的解决方案:虚拟油泥模型的旋转/平移由三维鼠标负责,造型工具的动作行为则通过触觉力反馈设备的铁笔完成。

3.2 人机交互设备

3.2.1 3 维鼠标 SpaceBall 5000

3Dconnexion 公司的 SpaceBall 5000 如图 2a 所示,采用的六自由度光学传感器可灵敏感知外部的微小施加力,将此力分解成与力矢量和扭矩矢量相关的 6 个分量后,借助光学遮光传感技术可获取鼠标在 X、Y、Z 坐标轴上的实际平移和旋转运动量^[19]。

三维鼠标的平移分量比较容易得到处理:设 X、Y、Z 坐标轴上的子分量分别为 x 、 y 、 z ,则对应的平移矩阵 M_T 可表示为

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

在处理 X、Y、Z 坐标轴上的旋转分量时,需把各坐标轴子分量整合成向量,然后再假定对象绕该向量旋转。图 2b 给出了采用子分量单步处理和绕向量旋转处理时的不同结果:设旋转向量在各坐标轴上的分量分别为 x 、 y 、 z ,旋转角度为 θ ,则旋转矩阵 M_R 可表示为

$M_R =$

$$\begin{bmatrix} x^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & yx(1-\cos\theta)+z\sin\theta & zx(1-\cos\theta)+y\sin\theta & 0 \\ xy(1-\cos\theta)-z\sin\theta & y^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & zy(1-\cos\theta)-x\sin\theta & 0 \\ xz(1-\cos\theta)-y\sin\theta & yz(1-\cos\theta)+x\sin\theta & z^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

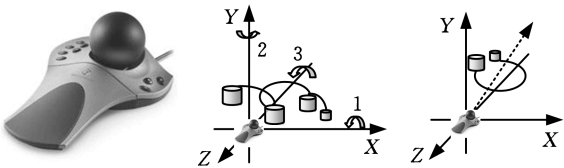


图 2 Spaceball 5000 的运动量分析

对于空间点 $P(x_p, y_p, z_p)$,通过三维鼠标对其进行平移或者旋转,设变换后的坐标为 $P^*(x_{p*}, y_{p*}, z_{p*})$,则 P^* 在世界坐标系中的坐标变换可表示为

$$\begin{bmatrix} x_{p*} & y_{p*} & z_{p*} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} M \tag{3}$$

式中, M 为分解三维鼠标各坐标轴分量后所得的平移矩阵 M_T 或者旋转矩阵 M_R 。

将式(1)、式(2)代入式(3),则模型或视图的六自由度控制坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{p*} & y_{p*} & z_{p*} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} M_T \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} x_{p*} & y_{p*} & z_{p*} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} M_R \tag{5}$$

此外,还通过对 SpaceBall 5000 的 12 个可编程按键进行功能定义,为虚拟油泥造型提供了相关状态的变换功能。

3.2.2 触觉力反馈设备 PHANTOM Desktop

SensAble 科技公司的触觉力反馈设备 PHANTOM Desktop 如图 3a 所示。该设备可以产生 3 个平移自由度分量和 3 个旋转自由度分量,同时还可以产生 3 个自由度的触觉反馈力。图 3b 给出了触觉力反馈设备的铁笔在设备坐标系和图形空间坐标系中的示意图,其方位同样可以用一个 4×4 的齐次坐标变换矩阵 A 来表示:

$$A = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{02} & A_{03} \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{20} & A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{30} & A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$

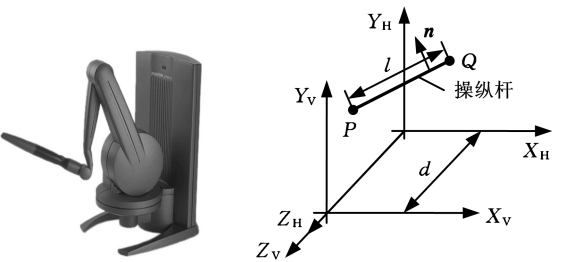


图 3 力触觉设备 PHANTOM Desktop 的运动量

在图 3b 中,PQ 表示设备上的铁笔(stylus), n 是铁笔的法矢, l 是铁笔长度。 $X_H Y_H Z_H$ 是设备坐

标系, $X_VY_VZ_V$ 是用户坐标系。假定坐标系 $X_HY_HZ_H$ 和 $X_VY_VZ_V$ 的 Z 轴对齐, 则两者仅相距一定的纵向距离 d 。设铁笔头 P 和铁笔尾 Q 在设备坐标系中的坐标分别为 (X_{HP}, Y_{HP}, Z_{HP}) 和 (X_{HQ}, Y_{HQ}, Z_{HQ}) , 世界坐标为 (X_P, Y_P, Z_P) 和 (X_Q, Y_Q, Z_Q) , 观察变换矩阵为 A_{view} , 其关系^[20]如下:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{HP} \\ Y_{HP} \\ Z_{HP} \\ 1 \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{03} \\ A_{13} \\ A_{23} \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{HQ} \\ Y_{HQ} \\ Z_{HQ} \\ 1 \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lA_{02} + A_{03} \\ lA_{12} + A_{13} \\ lA_{22} + A_{23} \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} &= A_{view}^{-1} \begin{bmatrix} X_{HP} \\ Y_{HP} \\ Z_{HP} - d \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_Q \\ Y_Q \\ Z_Q \\ 1 \end{bmatrix} &= A_{view}^{-1} \begin{bmatrix} X_{HQ} \\ Y_{HQ} \\ Z_{HQ} - d \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同理, 对于铁笔 PQ 的法矢 n , 设其在设备坐标系中的坐标是 (X_{HN}, Y_{HN}, Z_{HN}) 和 (X_N, Y_N, Z_N) , 则有

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{HN} \\ Y_{HN} \\ Z_{HN} \\ 0 \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{01} \\ A_{11} \\ A_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \\ 0 \end{bmatrix} &= A_{view}^T \begin{bmatrix} X_{HN} \\ Y_{HN} \\ Z_{HN} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(6)、式(7)代入式(3), 可以实现随着铁笔的运动, 虚拟物体向前、后、左、右、上、下平移的效果; 将式(8)代入式(3), 则可以实现虚拟物体的旋转变换。

3.2.3 设备组合

根据上述分析可知, 三维鼠标和触觉力反馈设备均可以实现场景的六自由度控制。但三维鼠标的六自由度交互操作是通过控制球的移动和旋转来实现的, 因而工作空间受限于控制球的可控范围; 触觉力反馈设备的六自由度交互操作可通过铁笔的移动和旋转实现, 因而其工作空间相对宽泛。同时, 考虑到用户在 VCM 系统中操作的自然舒适性, 结合这两台设备的特点, 交互子任务的分配结果如表 2 所示。

表 2 交互任务的细分(右手手用户)

旋转	平移	左手	右手
Spaceball	Desktop	Spaceball	Desktop

4 系统实现

4.1 虚拟油泥造型系统

虚拟油泥造型系统开发环境为 VC++ 2005, 图形核心库为 Open Inventor, 图形用户界面及数据管理使用 Qt, 触觉反馈力的计算使用 OpenHaptics 库, 系统层次结构如图 4 所示。

首先, 获取三维鼠标的平移和旋转运动分量, 利用式(4)和式(5)计算变换结果, 借助 Open Inventor API, 修改变换节点阈值, 实现模型或场景的平移和旋转变换效果; 其次, 获取触觉力反馈设备铁笔的运动状态, 利用式(8)和式(3), 实现造型工具的刮削、填补和刮补造型操作; 最后, 程序实现上, 分别用图形线程和力觉线程来负责图形场景刷新和力觉渲染, 获得了较为稳定的触觉反馈力交互过程^[20], 并使系统具有较好的硬件兼容性和跨平台运行能力。

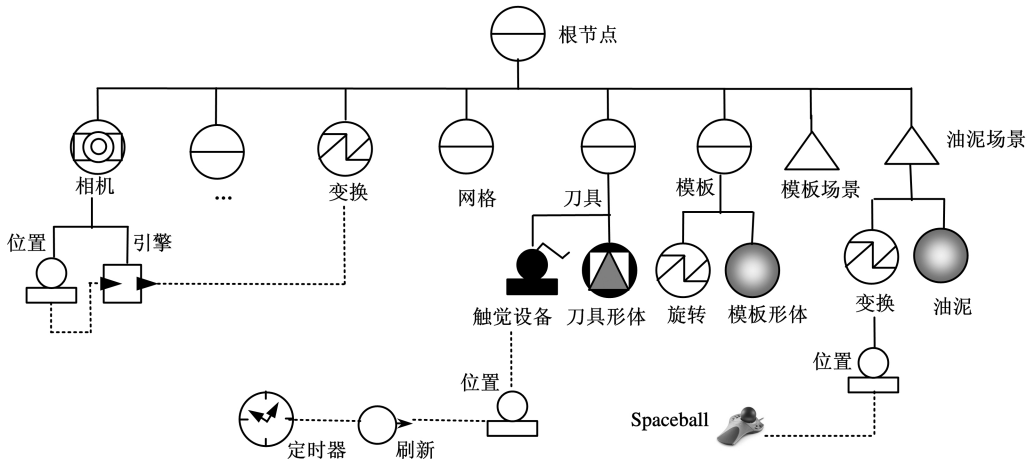


图 4 虚拟油泥造型系统的场景图

4.2 触觉反馈力的计算

在虚拟油泥造型过程中,用户可通过实时感知的触觉反馈力大小来控制造型过程中材料的刮削量。虚拟造型工具在造型过程中产生的触觉反馈力与刮削、填补的材料体积大小有关,而与造型工具移动的距离没有特定关系,因而基于简化的弹性理论模型无法满足虚拟油泥造型方法反馈力计算的要求。本文采用基于材料切除率的虚拟反馈力仿真模型^[21]来计算触觉反馈力,实现通过计算造型过程中实时材料刮削量来计算虚拟刮削力。其材料切除率与触觉反馈力关系为

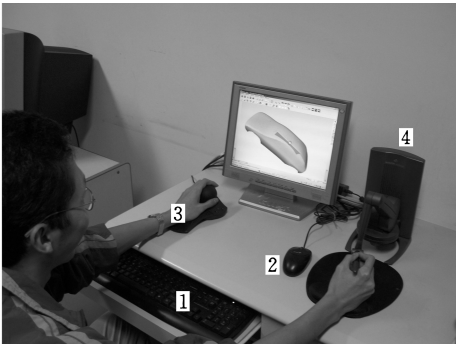
$$F_{\text{feedback}} = h\lambda V_{\text{cut}}/t \tag{9}$$

式中, F_{feedback} 为计算所得的触觉反馈力; h 为选用材料的硬度系数, $h \in [0, 1]$; λ 为触觉反馈力系统因子; V_{cut} 为材料刮削体积; t 为刮削时经历的时间。

在虚拟油泥造型系统中,材料的刮削量可通过造型工具的空间扫掠体与虚拟油泥模型之间的布尔运算求得^[3],从而大大简化了触觉反馈力的计算。

5 应用验证

图 5 给出了支持触觉力反馈的虚拟油泥造型系统的工作环境。操作人员(右利手)利用左手操纵三维鼠标的控制球,控制场景中油泥模型的旋转和场景视点的变换;右手抓持力触觉设备的铁笔进行造型,再现了传统油泥造型的过程。



1. 键盘 2. 鼠标 3. Spaceball 5000 4. PHANTOM Desktop

图 5 虚拟油泥造型环境

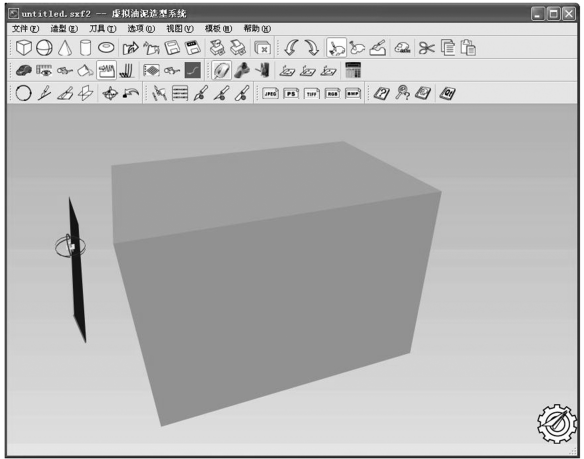
为验证图 5 虚拟油泥造型环境交互设备组合的有效性,选择 1 名教师和 4 名学生(其中,右利手 3 人、左利手 2 人)作为操作人员,在掌握三维鼠标、力触觉设备基本操作的基础上,分别使用两类设备组合:键盘和鼠标(设备组合 I);键盘、鼠标、三维鼠标及力触觉设备(设备组合 II)。分别记录其操作时间。首先,操作人员移动、旋转、拖动造型环境中的球体(直径 20mm);然后,对 80mm×80mm×80mm 的虚拟油泥模型上表面进行刮削、填补和刮补造型,造型体大小为 10mm×20mm×80mm。表 3 记录了实验的用时结果。

表 3 5 人在相同操作条件、不同设备组合下的平均用时

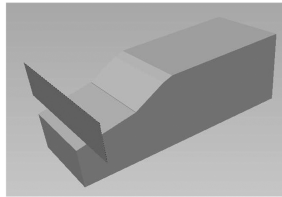
设备组合	平移	旋转	拖动	刮削	填补	刮补
I	3.86	4.39	6.27	4.22	4.30	5.46
II	1.41	1.78	2.36	1.32	1.41	2.32

通过表 3 可以看出:由于第 I 类设备组合与系统的交互操作需要通过图形模拟设备接口,如借助 Open Inventor 的拖拽器(dragger)和操纵器(manipulator)节点,是选中、拖动等动作的复合,增加了交互操作的难度,使其总体耗时量较大,大约为第 II 类设备组合的 2.5 倍。

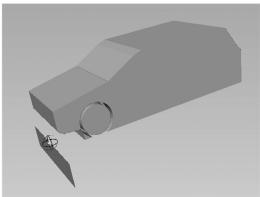
图 6 给出了使用第 II 类设备组合进行某型汽车车身外形虚拟油泥造型的过程,用户根据造型过程中反馈力的大小,调整刀具造型操作中的刮削深度和填补的油泥量等。图 6b、图 6c 和图 6d 所示为在初始油泥块(图 6a)的基础上,通过三维鼠标控制虚拟油泥模型、触觉力反馈设备控制虚拟油泥刮刀进行造型的过程。该车车身外形的虚拟油泥模型最终效果如图 6e 所示。



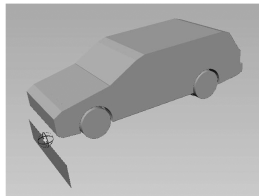
(a)



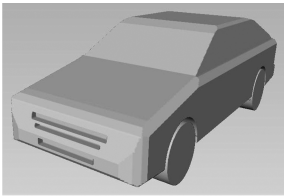
(b)



(c)



(d)



(e)

图 6 带触觉力反馈的虚拟油泥造型

6 结束语

现有的 CAID 和 CAS 软件系统大多基于样条曲面建模,产品形状的修改需要不断地调整控制顶点,这一过程不仅繁琐,而且极大地限制了操作人员创意设计能力的发挥。现有的虚拟油泥造型方法较好地解决了上述问题,但却并未引入触觉反馈的造型控制方法,加大了造型过程的控制难度。本文通过研究双手交互过程中的任务分配原则,在虚拟油泥造型系统中引入了三自由度设备 Spaceball 5000 和触觉力反馈设备 PHANTOM Desktop,给出了与设备组合相匹配的左右手交互任务,实现了触觉反馈力的计算和力触觉造型控制方法,构建了新的虚拟油泥造型环境,再现了传统油泥建模过程中通过力触觉控制造型的过程。

参考文献:

- [1] Spur G, Krause F L. 虚拟产品开发技术[M]. 宁汝新,等,译. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 周力辉. 立体设计表达:汽车油泥模型设计制作[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [3] 张淑焕,侯增选,孙根正,等. 虚拟油泥造型方法[J]. 计算机应用研究,2007,24(2):181-182,185.
- [4] Sener B, Wormald P, Campbell I. Towards ‘Virtual Clay’ Modelling – challenges and Recommendations: a Brief Summary of the Literature[C]//Proceedings of the DESIGN 2002 7th International Design Conference. Dubrovnik, Croatia, 2002:545-551.
- [5] Krause F L, Goebel M, Wesche G, et al. A Three-stage Conceptual Design Process using Virtual Environments[C]//WSCG’ 2004 Poster Proceedings. Plzen, Czech Republic, 2004:85-88.
- [6] Mark E, David W, David C, et al. An Evaluation of Haptic Feedback Modeling during Industrial Design Practice[J]. Design Studies, 2005,26(5):487-508.
- [7] SouVR Inc: 力反馈设备[EB/OL]. [2009-03-03]. <http://www.souvr.com/Shop/p7/Index.html>.
- [8] 陆熊,宋爱国. 力/触觉再现设备的研究现状与应用[J]. 测控技术,2008,27(8):6-10.
- [9] Provot X. Deformation Constraints in a Mass-spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior[C]//Proceedings of the Graphics Interface Conference’95. Vancouver: Canadian Human-computer Communications Society, 1995:147-154.
- [10] Zhu Weihang, Lee Y S. Product Prototyping and Manufacturing Planning with 5-DOF Haptic Sculpting and Dixel Volume Updating[C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS’ 04). Chicago, USA, 2004:98-105.
- [11] McDonnell K T, Qin H, Wlodarczyk R A. Virtual Clay: a Real-time Sculpting System with Haptic Toolkits[C]//Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. North Carolina, 2001:179-190.
- [12] Zhang J, Payandeh S, Dill J. Haptic Aided Design: a Case Study[C]//Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator System (HAPTICS’ 03). Los Angeles, 2003:254-261.
- [13] Kyung K, Son S, Kwon D, et al. Design of an Integrated Tactile Display System[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, 2004:776-781.
- [14] SouVR Inc: 3D 建模软件[EB/OL]. [2009-03-03]. <http://www.souvr.com/shop/p10/Modeling/Index.html>.
- [15] 王玉慧,张玉茹. CAID 中变形造型及虚拟雕刻技术探讨[J]. 机械设计,2003,20(7):19-20.
- [16] Kabbash P, Buxton W, Sellen A. Two Handed Input in a Compound Task [C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Boston, Massachusetts, 1994:417-423.
- [17] Bowman D, Kruijff E, LaViola J, et al. An Introduction to 3D User Interface Design[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2001,10(1):96-108.
- [18] Yves G. Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: the Kinematic Chain as a Model[J]. Journal of Motor Behavior, 1987,19(4):486-517.
- [19] 3Dconnexion: 3DxWare Software Developer’s Kit Overview(4.1)[EB/OL]. [2009-03-03]. <http://www.3dconnexion.com/docs/WindowsSDKGuide.pdf>.
- [20] 贾世宇,潘振宽. 虚拟手术中具备触觉功能的软组织交互技术[J]. 系统仿真学报,2008,20(8):2076-2080.
- [21] 侯增选,闫锋欣,孙蓓,等. 触觉力反馈仿真模型建模方法:中国, CN 101271485A[P]. 2008-09-24.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 闫锋欣,男,1978年生。西北工业大学机电学院博士研究生。主要研究方向为计算机辅助技术、虚拟产品开发。发表论文15篇。侯增选,男,1964年生。西北工业大学机电学院教授,大连理工大学机械工程学院教授。张定华,男,1958年生。西北工业大学机电学院院长、教授、博士研究生导师。祁小苑,男,1984年生。西北工业大学机电学院硕士研究生。宁志鹏,男,1983年生。西北工业大学机电学院硕士研究生。