

针对创意角色模型的蒙皮与三维制造技术

郭雪昆¹⁾, 陈浩¹⁾, 邱天¹⁾, 林俊聪²⁾, 邓志刚³⁾, 肖阳溪¹⁾, 金小刚^{1)*}

¹⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾ (厦门大学软件学院 厦门 361005)

³⁾ (Department of Computer Science, University of Houston Houston TX USA 75851)
(jin@cad.zju.edu.cn)

摘要: 创造力支持的造型技术常用于辅助普通用户的开放式造型过程. 针对现有的大多数创造力支持的造型技术针对静止物体造型而设计, 无法造型动态模型的问题, 提出一种造型动态模型的技术, 其造型结果是已蒙皮并可直接三维打印的模型. 该技术分为模型进化与应用 2 个阶段. 在模型进化阶段, 用户从数据库内选择一组绑定的模型, 迭代地产生一代代新模型, 作为建议提示给用户, 以激发灵感; 在应用阶段, 用户选择感兴趣的模型用于动画编辑与三维打印. 实验结果表明, 文中技术将造型、动画编辑与面向三维打印的模型分析集成至统一的框架, 极大地帮助了用户的创意建模过程.

关键词: 创意造型; 虚拟生物建面融合; 蒙皮; 三维制造
中图法分类号: TP391

Rigging and Fabricating Creative Characters

Guo Xuekun¹⁾, Chen Hao¹⁾, Qiu Tian¹⁾, Lin Juncong²⁾, Deng Zhigang³⁾, Xiao Yangxi¹⁾, and Jin Xiaogang^{1)*}

¹⁾ (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾ (School of Software, Xiamen University, Xiamen 361005)

³⁾ (Department of Computer Science, University of Houston, Houston, TX USA 75851)

Abstract: Creative modeling techniques are commonly used to assist novice users in open-ended 3D content creation. Most existing creative modeling methods are mainly designed to model static objects only, not appropriate to model dynamic models. We present a method for modeling dynamic creative models which are rigged and fabricatable. There are two stages: models evolution and application. During the models evolution stage, the users select a small set of skinned watertight objects, our technique iteratively synthesizes new creative characters for users to explore. During the application stage, the users can choose those of interest for animation or fabrication directly. Experiments demonstrate that the proposed technique unifies modeling, animation and fabrication together, facilitating the creative design process.

Key words: creative modeling; surface merging; skinning; fabrication

在计算机图形学中, 高效且创造性地造型三维模型一直是个非常困难的问题. 草图式造型技

术^[1-2]易学易用, 但造型结果往往缺少丰富的几何细节. 当前越来越流行的一个研究趋势是在造型

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-11-23. 基金项目: 国家自然科学基金(61328204, 61472351, 61202142); 国家科技支撑计划课题(2015BAH16F00/F02). 郭雪昆(1987—), 男, 博士, 主要研究方向为几何处理、创意造型; 陈浩(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为几何处理、草图造型; 邱天(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为几何理、创意造型; 林俊聪(1981—), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 主要研究方向为几何处理、草图造型、模型融合; 邓志刚(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为几何处理、计算机动画; 肖阳溪(1993—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为计算机动画; 金小刚(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机动画、非真实感绘制、数字几何处理、隐式曲面造型等.

过程中为用户提供创造力支持. 因此, 几何造型不再被仅仅视为一项技术, 而更多地被视为一种创造过程. 近年来, 研究人员提出多种技术为三维造型提供创造力支持^[3-9].

在很多应用中造型仅是第一步, 后续还要绑定骨架并编辑动画. 传统方法是将造型与蒙皮 2 个步骤分开, 动画师不得不频繁地在造型与蒙皮工具间来回切换, 导致迭代更新异常困难, 浪费时间且影响效率. Borosan 等^[10]提出一个统一的框架, 无缝融合造型与蒙皮 2 个步骤. Jin 等^[11]将运动重定向融合至 Borosan 等的框架, 提出一个非线性“造型-动画”工具. 将创造力支持的造型与动画编辑融合至统一的框架极其重要, 这样, 动画师就可以增量式地编辑动画, 并立即观察到效果; 另外, 使用现有的已绑定的模型也避免了不必要的重复工作. 这些方法对计算机动画、计算游戏设计与其他数字娱乐形式有非常重要的意义, 然而尚未见到这方面研究的报道.

除此之外, 随着三维打印技术的普及, 普通用户也可以三维打印个性化的模型. 在创造力支持的造型系统中融合面向三维打印的分析, 不仅可以通过部件组合得到高质量的模型, 更可以探索模型在不同姿势下的物理特性, 对用户的创新性造型过程大有益处. 然而, 模型在三维打印之前需要很多预分析, 例如, 拓扑上是否可打印, 打印模型是否可保持平衡, 结构是否稳固等. 在本文面临的问题中, 该分析过程更加困难和复杂. 首先, 为了实现逼真的动画效果, 模型骨架往往会有很多关节, 这对三维制造而言不仅没有必要, 反而是一种负担; 另外一个重要的问题是要确保打印的模型在一系列姿势下保持平衡. 虽然三维打印方面已有很多研究工作, 如关节角色模型的三维打印技术^[12-13], 分析模型平衡性的技术^[14-15]. 然而据我们所知, 还没有工作探索过使模型在一系列姿势下保持平衡的问题.

本文提出针对创意角色模型的蒙皮与三维制

造技术, 将创造力支持的造型、针对三维打印的模型分析与骨架绑定无缝地融合在一个框架中, 极大地方便了用户的创新性造型过程.

1 相关工作

骨架绑定技术. 在计算机动画中, 角色骨架由骨骼与关节以分层形式组织在一起而构成. 编辑动画之前需要首先做骨架绑定^[16], 研究人员提出了各种各样的骨架绑定技术^[17]. Borosan 等^[10]提出一个融合了草图造型与骨架绑定的统一框架. 该技术被 Jin 等^[11]进一步扩展, 用于支持动画重定位. 与现有方法不同, 本文将创造力支持的造型、动画编辑与三维打印无缝地融合到统一的框架, 极大地简化了用户的整个创新性设计过程.

基于部件组合的造型技术. 基于部件组合的造型技术由于高效而且易用, 受到研究界的重视^[18-19]. 在计算机图形学领域, 随着人们逐步认识到在三维造型过程中提供创造力支持的重要性, 提出了各种各样的支持用户自由探索造型空间的技术^[3-6]. 与现有方法不同, 本文介绍的技术将动画编辑与三维打印融合到创造力支持的造型技术中, 使用户得以从动画及三维打印实物中汲取更多的造型灵感, 同时极大地方便了个性化模型的三维打印.

面向三维打印的模型分析技术. 随着三维打印技术的普及, 该技术及其应用越来越具有吸引力^[20-22]. 然而, 模型在三维打印之前需要做很多预处理工作, 例如, 检查模型拓扑条件^[23], 检查模型是否可保持平衡^[14-15], 检查模型结构是否稳固^[24]. 这些工作都需要大量的针对三维制造的分析技术. 本文解决了带关节的角色模型在不同姿势下的平衡问题, 该问题之前尚未被解决过^[12-15].

2 本文方法概述

如图 1 所示, 本文方法共分为 3 个阶段: 预处理

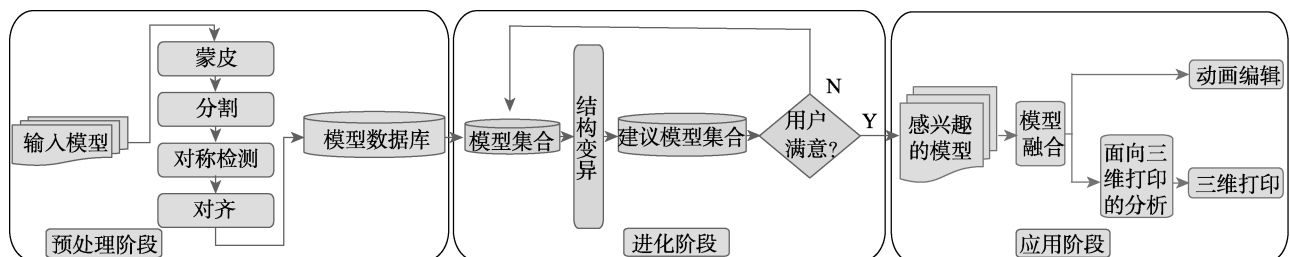


图 1 本文方法流程图

阶段、模型集合进化阶段和应用阶段. 在预处理阶段, 对数据库模型归一化、对齐、蒙皮, 按语义分割标记并检测对称部件. 在模型集合进化阶段, 用户从数据库内选择若干来自不同类的模型作为第一代模型; 通过模型结构变异, 当前代模型产生一组新模型; 用户从新模型集合中选择出满意的作为新一代模型. 该进化过程迭代进行, 直至用户满意或代数达到阈值. 在应用阶段, 用户选择出感兴趣的模型. 利用本文提出的蒙皮部件融合技术, 将模型转换成流形并计算得到蒙皮权重. 最后经过面向三维打印的模型分析, 得到可以用于动画编辑与三维打印的模型.

3 模型建议

类似文献[7], 在进化阶段, 本文方法列出形状与结构各异的模型作为给用户的提示, 以激发其设计灵感; 用户从提示的模型组内选择出满意的模型, 用于进化下一代; 该过程不断迭代, 直至用户满意或代数达到阈值. 在每一代中, 系统通过结构变异工具产生新模型. 受到启发于三维造型师常用造型方法的启发, 结构变异工具包括4种类型: (1) 图2a所示替换工具, 在不同模型间交换部件; (2) 图2b所示增加工具, 将一个部件复制1次或2次; (3) 图2c所示组合工具, 将类人型模型的上半部分与四肢动物或鸟类模型的下半部分结合, 得到半人马型模型; (4) 图2d所示插入工具, 在当前模型插入新类型部件.

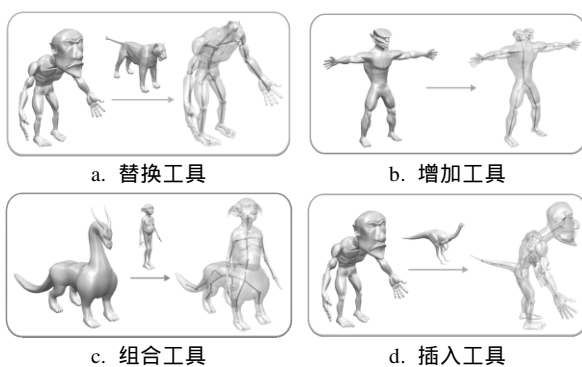


图2 结构变异工具示意图

4 模型融合

在模型融合过程中同时融合部件表面及其骨架, 并快速计算结果模型的蒙皮权重.

4.1 表面融合

给定2个部件, 目标是将两者融合得到一个流形. 假设如图3a所示欲融合的2个部件间存在一条间隙, 该假设为部件融合提供了更多灵活性, 使得可以处理边界拓扑不同的部件. 首先如图3b所示用三角形带填充2个部件的间隙; 接着如图3c所示在融合处做局部拉布拉斯光滑, 使过渡曲面光滑且提升网格质量. 将该间隙缝合问题形式化成边界过渡曲面三角形化(boundary bridge triangulation, BBT)问题^[25]. 给定2条分段线性曲线 C_p (m 个顶点)和 C_q (n 个顶点), 一个BBT是通过迭代施加P-succeed与Q-succeed操作得到的一个三角形序列 $M = (T_1, T_2, \dots, T_n)$. P-succeed操作施加在边 $p_i q_j$ 上, 得到图4a所示 $\triangle p_i p_{i+1} q_j$. Q-succeed操作施加在边 $p_i q_j$ 上, 得到图4b所示 $\triangle p_i q_j q_{j+1}$. 目标是要在所有BBT内找到使目标函数取得最优值的一个BBT. 根据文献[25], 该组合搜索问题可以转化为图4c所示最短路径问题, 通过Dijkstra算法求解. 下面需要为图内边定义合适的权重. 在模型表面融合问题中, 需要考虑的关键因素是确保融合边界尽可能地光滑, 同时使过渡曲面上的网格尽可能规则. 基于此, 定义 ΔT 的边权重为 $E_m = \omega E_s + E_r$; 其中, E_s 衡量 T 与其相邻三角形的法向的一致性, E_r 衡量 T 的规则程度. 在本文的所有实验中, $\omega = 0.2$. 定义 $E_s = 3 - n_t \cdot n_1 - n_t \cdot n_2 - n_t \cdot n_3$; 其中, n_t 是 T 的法向, n_1, n_2 和 n_3 为与 T 相邻的三角形的法向. 定义 $E_r = |2\sqrt{3} \times r/l - 1.0|$; 其中, r 是外接圆半径, l 是 T 的最长边.

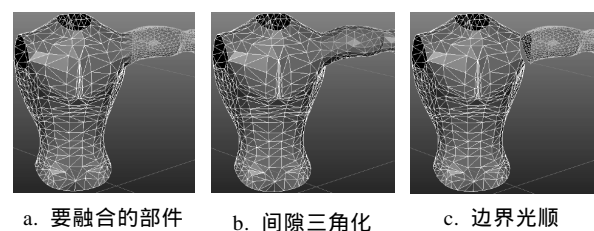


图3 表面融合示意图

4.2 骨架融合

进行融合的2个部件分别称为主部件与融合部件. 为了融合2个部件的骨架, 先计算主部件骨架上与融合部件骨架末端关节的最近点. 如果最近点恰好是主部件的关节点, 如图5a所示直接将该关节点与融合部件骨架末端点连接; 否则, 首先在最近点处插入一个关节, 如图5b所示再把插入

的关节与融合部件骨架末端点连接. 图 5 中, 融合部件为黑色. 插入的关节及骨骼为黑色.

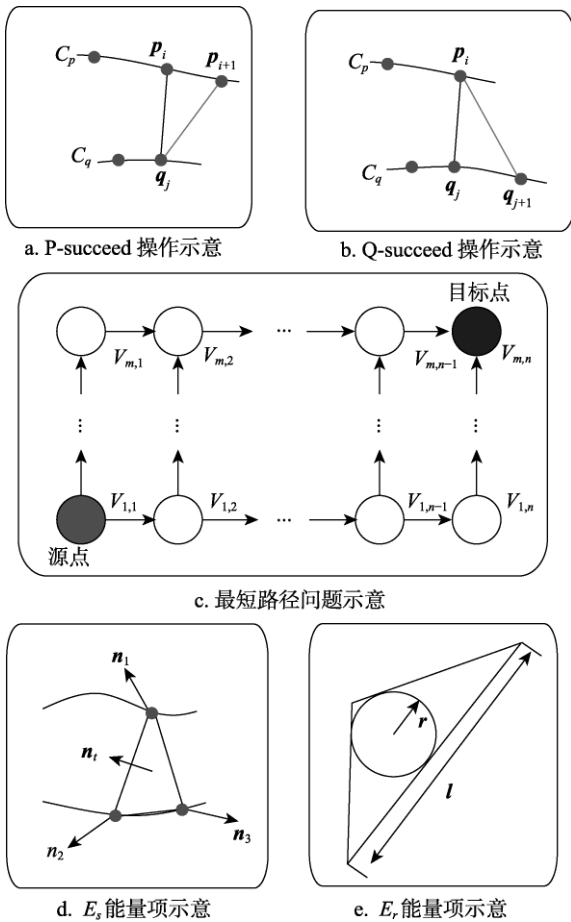


图 4 BBT 示意图

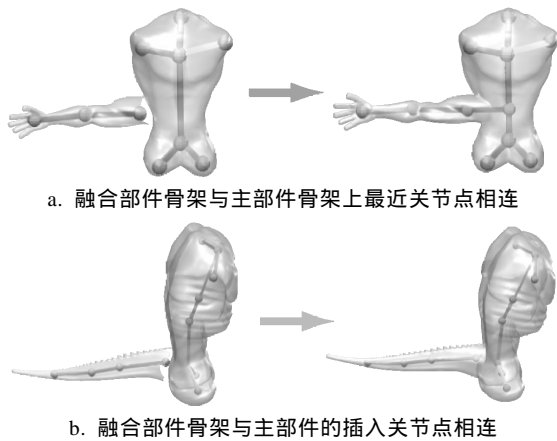


图 5 骨架融合示意图

4.3 蒙皮权重计算

得到新模型后, 接下来需要为该模型计算蒙皮权重. 本文采用类似文献[10]的方法对新模型的蒙皮权重做局部更新, 首先检测出需要更新权重的顶点与骨骼, 然后采用局部蒙皮权重计算方法

为这些顶点计算权重. 如果模型表面上某顶点的最近可视骨骼在该顶点的蒙皮权重没有达到权重平均值(由所有骨骼对该顶点的正值权重求得), 称该顶点为脏顶点, 脏顶点的最近可视骨骼为脏骨骼. 采用洪泛算法检测需要更新权重的顶点与骨骼, 从融合边界的顶点开始, 一直到脏顶点为止, 遍历到的顶点都是需要更新权重的顶点, 脏骨骼为需要更新权重的骨骼. 如图 6 所示, 为了使权重光滑分布, 最外侧脏顶点的二环领域顶点(扩展顶点)也需要更新权重. 图 6 中, 脏顶点用阴影表示和脏骨骼用黑标记. 融合边界用黑色标记.

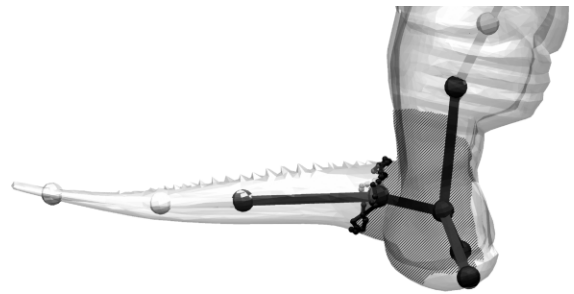


图 6 脏顶点和脏骨骼示意图

5 面向三维打印的模型分析

本节介绍面向三维打印的模型分析方法. 使用该方法能得到可直接三维打印的关节角色模型.

5.1 面向三维打印的骨架优化

由于动画编辑与三维打印对模型骨架的要求完全不同, 因此需要在三维打印之前优化骨架的关节数目与位置. 决定三维打印时某关节是否需要保留的原则如下:

- (1) 处于 2 个语义部件连接处的关键关节必须保留, 因为这样的关节处于部件边界的中心点处;
- (2) 如果某关节在大多数动画序列中几乎没有变化, 该关节将被删掉;
- (3) 保留下来的 2 个关节间距须大于某阈值.

给定模型的一组动画序列, 为模型关节 J_i 计算其在整个动画序列中的变化(用 ρ_i 表示), 并依此判断该关节是否需要保留. ρ_i 定义为

$$\rho_i = \sum_k \|M_k^i - I\|_F^2;$$

其中, M_k^i 是关节 J_i 的第 k 个变换矩阵, I 是单位矩阵, $\|\cdot\|_F^2$ 是 Frobenius 范数.

为了计算关节 J_i 对应的机械关节的最优位置

及大小, 取得与 J_i 的蒙皮权重大于 $\alpha = 0.8$ 的所有顶点 V_m . 然后用球面拟合带权重的顶点集合 V_m (权重为顶点的蒙皮权重). J_i 对应的机械关节的中心点是拟合球中心, 半径是拟合球半径. 最后如图 7 所示, 按如下标准判断非关键关节 J_i 在三维打印时是否需要除掉: (1) 为了防止两机械关节重合, 如果关节 J_i 与其邻居 J_j 间距 d_{ij} 小于阈值 $1.2(r_i + r_j)$ (r_i 和 r_j 分别为 J_i 与 J_j 对应的机械关节半径), 那么将 J_j 除掉 ($\rho_j < \rho_i$); (2) 如果关节的 ρ 值低于某阈值, 将该关节除掉, 因为这样的关节可以视为静态关节; (3) 为了确保打印模型的结构足够稳固, 如果关节的横截面面积小于阈值 $A_{\min} = 0.179$ 该关节被除掉; (4) 从审美角度考虑, 关节需要对称排列, 除掉非对称关节.

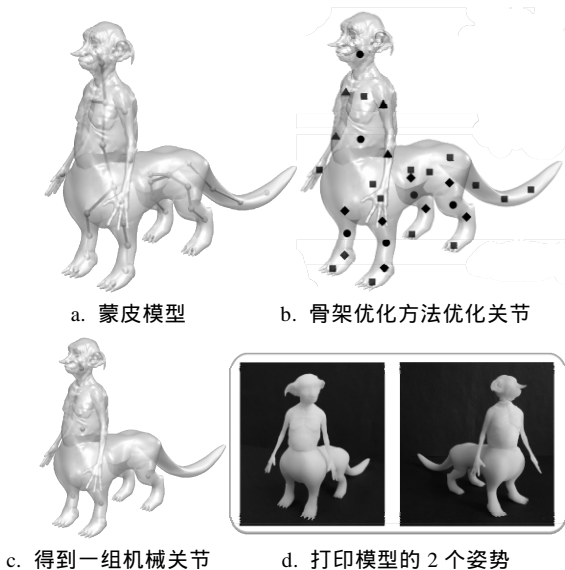


图 7 面向三维打印的关节优化过程示意图

5.2 多姿势模型平衡分析

本文扩展了文献[14]的方法, 使其可以处理多姿势模型平衡问题. 本文方法与文献[14]方法有 2 个区别: (1) 在所有姿势对应的模型内部做一致性挖空, 可以确保打印模型在所有姿势下保持平衡; (2) 为各姿势对应的模型建立一致的六面体网格表示体积, 而不是简单地使用体素网格.

给定模型 M , 令 S_0, S_1, \dots, S_k 依次为模型 M 在 k 个不同姿势下的表面, 目标是通过在所有姿势的模型内一致性挖空, 最小化目标函数

$$\arg \min \sum_k \| (c(S_k, I_k) - c_k^*)^{\perp g} \|^2;$$

其中, I_k 是 S_k 的内表面, $c(S_k, I_k)$ 计算外表面 S_k 与

内表面 I_k 围成的体积的质心, c_k^* 是第 k 个姿势对应的模型的目标质心, g 是引力方向, $^{\perp g}$ 表示沿着引力方向向支撑平面做垂直投影.

首先将模型在所有姿势下的表面投影至多重立方体域, 然后为这些多重立方体域建立一致的六面体网格^[26]. 图 8 所示为用启发式的方法逼近最优挖空结果. 对于模型 M 的第 k 个姿势的表面, 令当前的质心是 c_k^0 , 可以计算出一个垂直于 $(c_k^0 - c_k^*)^{\perp g}$ 过 $(c_k^*)^{\perp g}$ 的切割平面. 挖掉与 c_k^0 在同一半空间内的体素(被挖掉的体素集合记为 V_k)将使 c_k^0 向 c_k^* 移动, 从而降低目标函数值. 取得所有体素 $\cap V_k$, 并按分数降序排列. 分数计算方法为

$$d_i = \sum_k (v_i - c_k^*) \cdot (c_k^0 - c_k^*)^{\perp g};$$

其中, v_i 是体素 i 的中心.

如果目标函数在所有姿势下无解, 提醒用户从现有姿势内采样出一组姿势并重新优化目标函数.

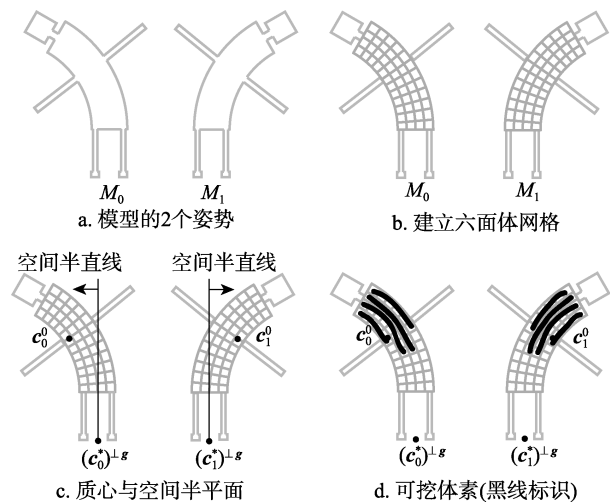


图 8 多姿势模型平衡方法流程图示意图

5.3 机械关节设计方法

机械关节类型计算. 本文使用图 9 所示的 2 种机械关节: 球窝式关节与铰链式关节. 用户需要操作“别针”为关节指定最大旋转幅度(如图 10 所示). 黑色别针表示骨骼的方向. 黑色球指示机械关节的位置(旋转中心). 灰色别针指示该机械关节的最大旋转幅度. 用户操作灰色别针设置关节的旋转约束. 用户为关节确定旋转约束后, 本文方法会自动计算关节类型.

可摆姿势的机械关节打印. 与打印静止模型不同, 本文需要确保打印出的模型可以保持一定

的姿势,这就要求机械关节具有承重摩擦力.类似文献[13],本文为关节面增加半径为 $r_b = 0.06$ 的球状突起,为关节囊增加半径为 $r_b + 0.05$ 的球状凹陷(如图 9 所示).

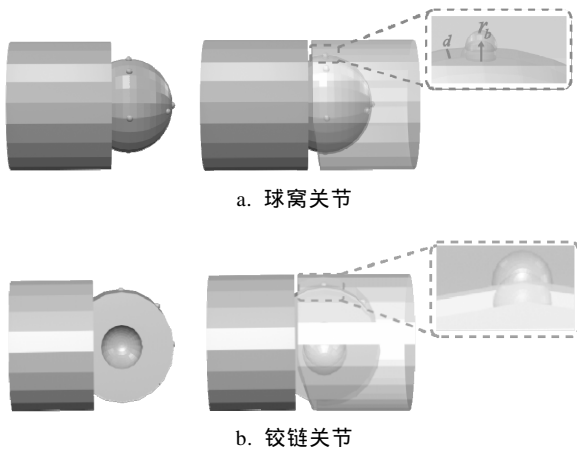


图 9 机械关节示意图

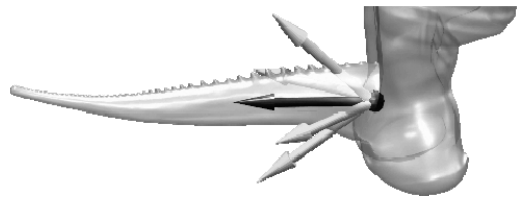


图 10 别针示意图

6 实验结果及分析

我们在 Intel Core i7 3.77 GHz, 8 GB RAM, NVIDIA Geforce GTX 660 GPU 的台式机上实现了系统原型.本文系统需要一个由绑定好的三维模型构成的数据库.当前,本文采用文献[27]方法自动绑定骨架,采用文献[28]方法自动分割模型并标记.每个模型的预处理步骤平均需要 25 min.本文方法可以确保模型在不同姿势下保持平衡(如图 11d, 12d, 13d 所示).

为了评估本文系统,邀请了 8 位学生与 4 位

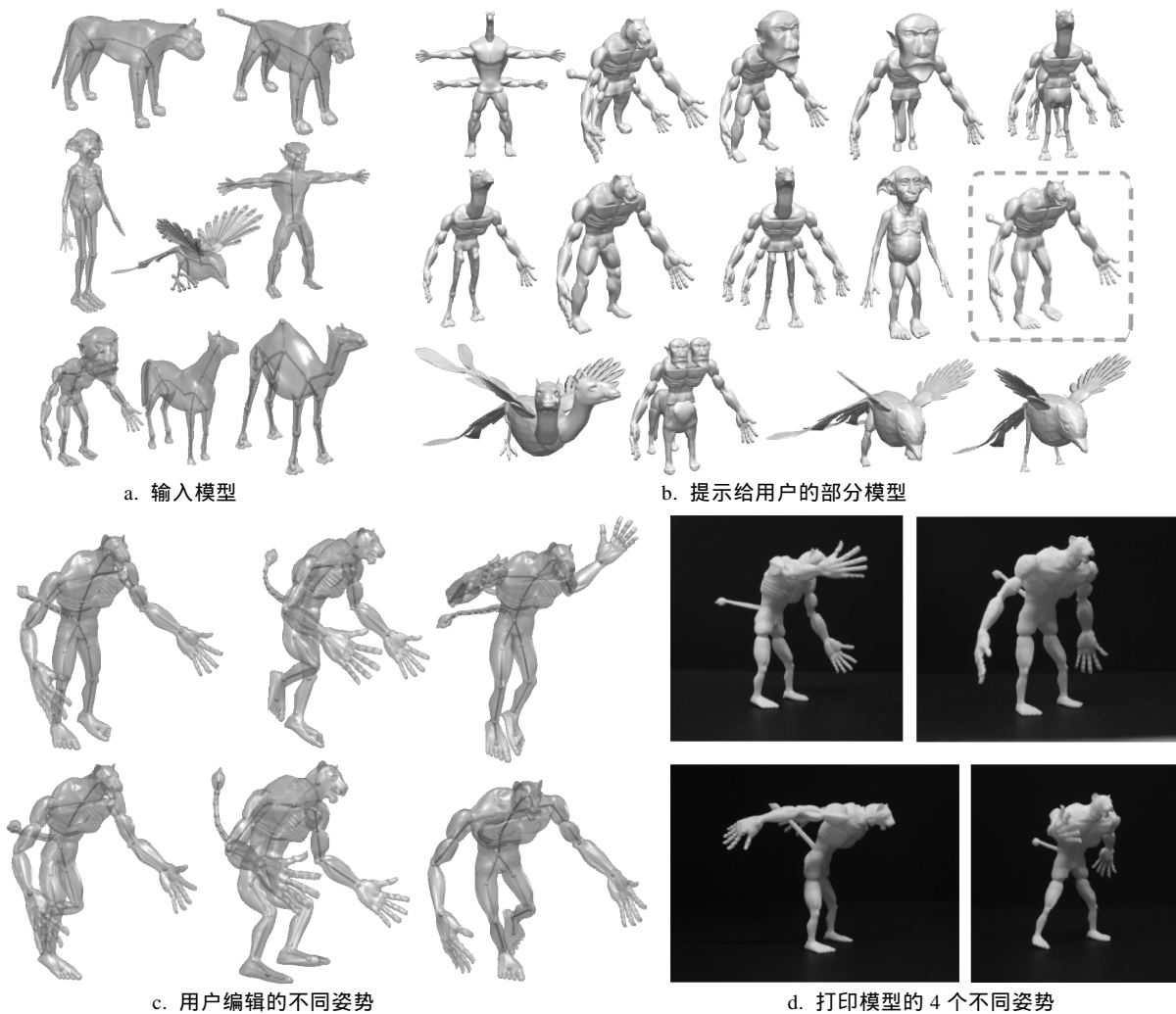


图 11 创新性造型例 1

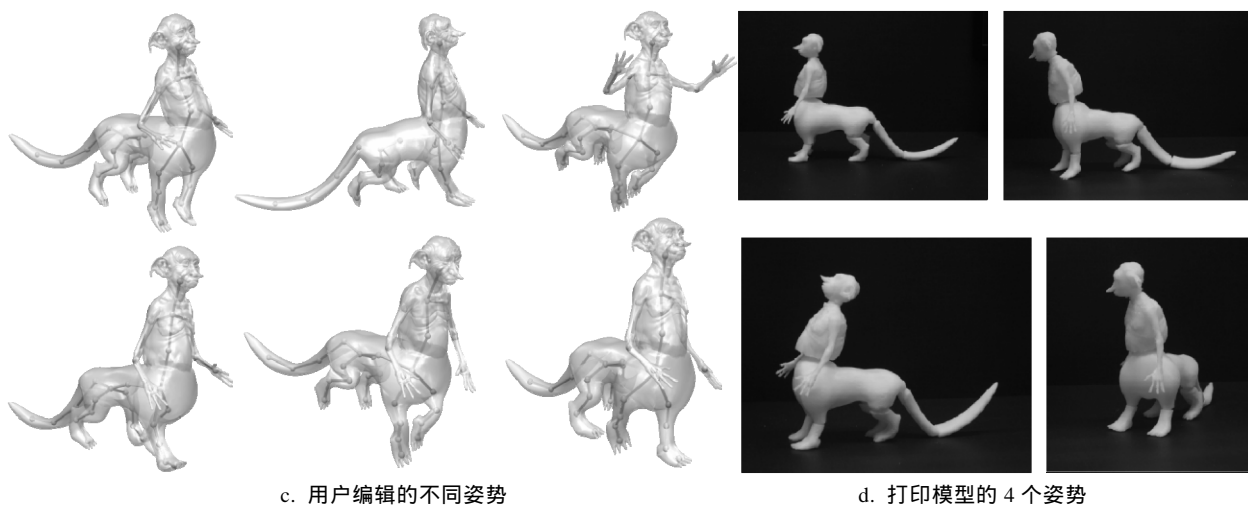
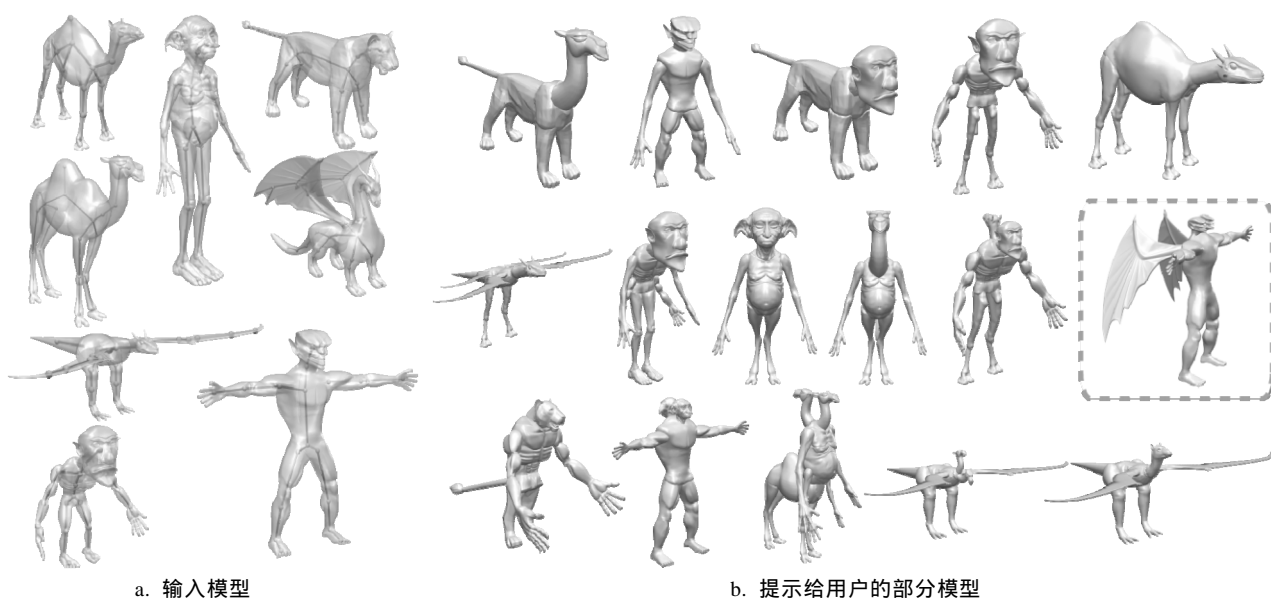


图 12 创新性造型例 2



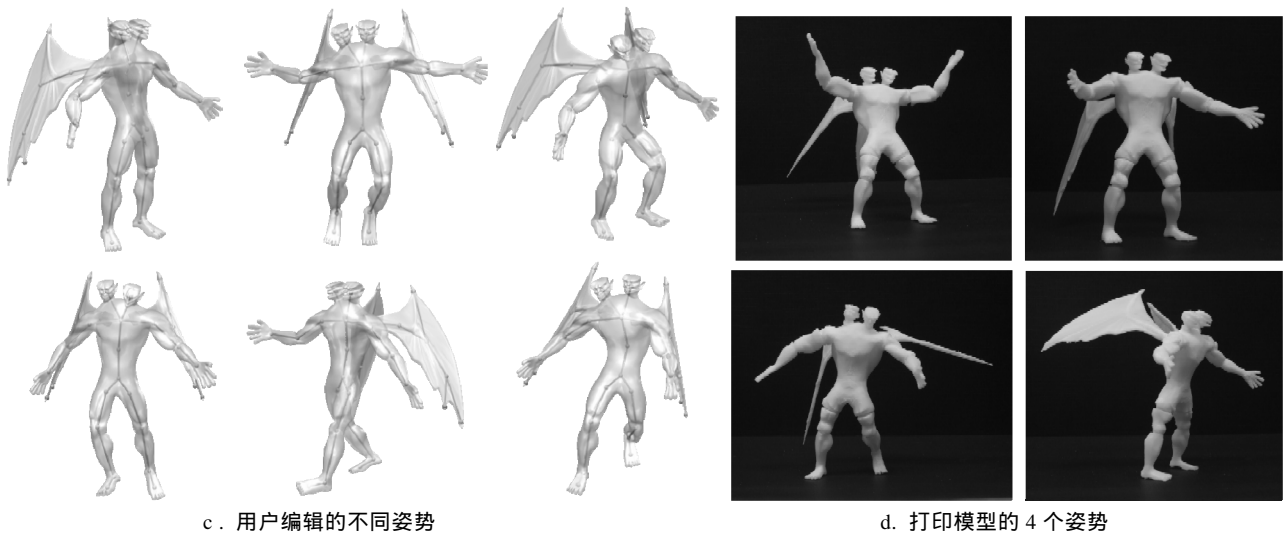


图 13 创新性地造型例 3

具有 5 年以上造型与动画设计经验的艺术家。首先, 测试者用 15 min 时间了解本文介绍的系统; 然后, 每位测试者花 30 min 时间试用本文介绍的系统以熟悉操作流程; 最后, 所有测试者不受任何限制地使用本文系统进行造型。图 12~13 所示为测试者的设计结果。

用户测试结束之后, 所有的参与者被要求完成一份由 6 个关于本文系统的陈述句构成的调查

问卷。用户在标准 5 分李克特量表上给各陈述句打分: 1 分表示强烈反对; 3 分表示不反对也不同意; 5 分表示强烈同意。调查结果如图 14 所示, 其中误差线表示标准差。可以看出, 测试者对本文系统持相当正面的态度, 认为该系统将造型、动画编辑与面向三维打印的模型分析集成至统一的框架中, 极大地简化了操作流程, 并为整个创新性造型过程提供了更多的创造力支持。

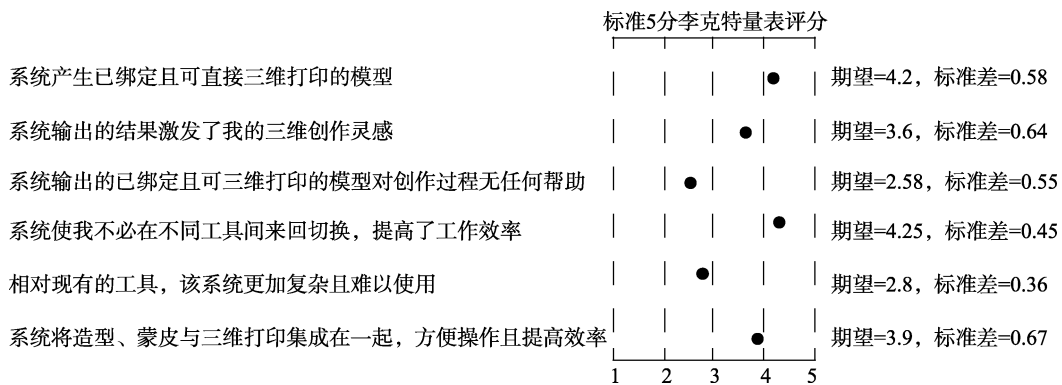


图 14 问卷调查统计结果

7 结 论

本文提出了针对创意角色模型的蒙皮与三维制造技术, 将创造力支持的造型、蒙皮与面向三维打印的模型分析无缝地融合到统一的框架中, 辅助用户的整个创新性造型过程。本文的贡献有 2 个: (1) 蒙皮部件融合技术。该技术在融合部件表面的同时融合其骨架, 并采用一种局部更新方法快速计算结果部件的蒙皮权重。(2) 面向三维打印的蒙皮模型分析技术。提出一种新的面向三维打印的

骨架优化方法, 对关节的数量及位置进行优化。除此之外, 提出了一种新的多姿势模型平衡分析技术。

本文技术有如下局限: 骨架优化算法与多姿势模型平衡分析都基于这样的假设: 处理的角色模型具有一系列不同的姿势。如果该假设不成立, 在关节过滤时不考虑静态关节准则。在多姿势平衡分析时, 用户可以手工选择一些姿势或者指定每个关节的变化幅度。

今后, 本文技术可在如下方面进行改进: (1) 扩展蒙皮部件融合技术, 以融合运动部件。很多

新问题需要解决, 包括部件运动风格兼容性分析, 最佳融合帧计算. (2) 加强面向三维打印的模型分析技术, 使其可以处理更加复杂的关节. 例如, 当融合边界很长且很窄时, 需要加入多个关节以得到更好的结构强度. (3) 保证生成模型的骨架的正确性与确保骨架与表面模型对应关系准确性, 这些问题非常重要同时非常有意思.

参考文献(References):

- [1] Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1999: Article No.21
- [2] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, *et al.* FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article No.41
- [3] Chaudhuri S, Koltun V. Data-driven suggestions for creativity support in 3D modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): Article No.183
- [4] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Guibas L, *et al.* Probabilistic reasoning for assembly-based 3D modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): Article No.35
- [5] Xu K, Zhang H, Cohen-Or D, *et al.* Fit and diverse: set evolution for inspiring 3D shape galleries[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No.57
- [6] Kalogerakis E, Chaudhuri S, Koller D, *et al.* A probabilistic model for component-based shape synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No.55
- [7] Guo X, Lin J, Xu K, *et al.* Creature grammar for creative modeling of 3D monsters[J]. Graphical Models, 2014, 76(5): 376-389
- [8] Xie X, Xu K, Mitra N J, *et al.* Sketch-to-Design: context-based part assembly[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8): 233-245
- [9] Fan L B, Wang R M, Xu L L, *et al.* Modeling by drawing with shadow guidance[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7): 157-166
- [10] Borosan P, Jin M, Delarho D, *et al.* RigMesh: automatic rigging for part-based shape modeling and deformation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): Article No.198
- [11] Jin M, Gopstein D, Gingold Y, *et al.* AniMesh: interleaved animation, modeling, and editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): Article No.207
- [12] Cali J, Calian DA, Amati C, *et al.* 3D-printing of non-assembly, articulated models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): Article No.130
- [13] Bacher M, Bickel B, James D L, *et al.* Fabricating articulated characters from skinned meshes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No.47
- [14] Prevost R, Whiting E, Lefebvre S, *et al.* Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): Article No.81
- [15] Zhao H M, Hong C R, Lin J C, *et al.* Make it swing: fabricating personalized roly-poly toys[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 43(c): 226-236
- [16] Kavan L, Sloan P P, O'Sullivan C. Fast and efficient skinning of animated meshes[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 327-336
- [17] Jacobson A, Deng Z G, Kavan L, *et al.* Skinning: real-time shape deformation[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2014: Article No.24
- [18] Funkhouser T, Kazhdan M, Shilane P, *et al.* Modeling by example[J]. ACM Transactions on Graphics 2004, 23(3): 652-663
- [19] Yu Y Z, Zhou K, Xu D, *et al.* Mesh editing with Poisson-based gradient field manipulation[J]. ACM Transactions on Graphics 2004, 23(3): 644-651
- [20] Zeng Long, Liu Yongjin, Zhang Dongliang. Feature-preserved contour editing for 3D printing[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(6): 974-983(in Chinese) (曾 龙, 刘永进, 张东亮. 面向三维打印的特征驱动轮廓线编辑方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(6): 974-983)
- [21] Hu Ruizhen, Huang Hui. Recent progress in 3D printing inspired fabrication optimization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(6): 961-967(in Chinese) (胡瑞珍, 黄 惠. 3D 打印启发下的模型实例化优化研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(6): 961-967)
- [22] Tong Jing, Zhang Luosheng, Hou Songlin, *et al.* Low-cost personalized chocolate 3D printing platform[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(6): 984-991(in Chinese) (童 晶, 张洛声, 侯松林, 等. 低成本个性化巧克力三维打印平台[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(6): 984-991)
- [23] Kazhdan M. Reconstruction of solid models from oriented point sets[C] //Proceedings of the 3rd Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aive-la-ville: Eurographics Association Press, 2005: Article No.73
- [24] Zhou Q N, Panetta J, Zorin D. Worst-case structural analysis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): Article No.137
- [25] Wang C C, Tang K. Optimal boundary triangulations of an interpolating ruled surface[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2005, 5(4): 291-301
- [26] Han S C, Xia J Z, He Y. Hexahedral shell mesh construction via volumetric polycube map[C] //Proceedings of the 14th ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York: ACM Press, 2010: 127-136
- [27] Baran I, Popovic J. Automatic rigging and animation of 3D characters[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article No.72
- [28] Kalogerakis E, Hertzmann A, Singh K. Learning 3D mesh segmentation and labeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): Article No.102