

# 针对创意角色模型的蒙皮与三维制造技术

**摘 要** 创造力支持的造型技术辅助普通用户的开放式造型过程。然而，现有的大多数创造力支持的造型技术更适合于造型静止模型。与这些方法不同，我们提出一种新的造型动态模型的方法。我们方法的造型结果是已蒙皮并可直接三维打印的模型。起始于一组绑定的三维模型，我们的系统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。用户选择感兴趣的模型用于动画编辑与三维打印。通过将造型、动画编辑与面向三维打印的模型分析集成至统一的框架，我们为用户提供了一种高效且方便的技术，极大地帮助了用户的创新性造型过程。

**关键词** 创造力支持的造型；虚拟生物造型；表面融合；蒙皮；三维制造

中图法分类号 \*\*\*\*\*

DOI 号 \*投稿时不提供 DOI 号\* [分类号](#)

## Rigging and Fabricating Creative Characters

**Abstract** Creative modeling provides a new means for novice users to create 3D content in an open-end manner. However, most current creative modeling methods are mainly designed to model static objects only. In contrast to these methods, we present a new method for modeling dynamic creative models which are rigged and fabricatable. Starting from a small set of skinned watertight objects, our system iteratively synthesizes new creative characters for users to explore. A user can choose those of interest for animation or fabrication directly. By unifying modeling, animation and fabrication together, our method provides an efficient and convenient means for users to facilitate the creative design process.

**Key words** Creative Modeling; Monster modeling; Surface merging; Skinning; Fabrication

### 1 引言

在图形学中，高效且创造性地造型三维模型一直是个非常困难的问题。草图式造型方法<sup>[1-2]</sup>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。最近几年，研究人员提出各种各样的技术为三维造型提供创造力支持<sup>[3-9]</sup>。

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。传统上，造型与蒙皮两个步骤分开。动画师不得不频繁地在造型与蒙皮工具间来回切换。这导致迭代更新异常困难，浪费时间且影响效率。Borosan 等人<sup>[10]</sup>提出一个统一的框架无缝地融合了造型与蒙皮两个步骤。Jin 等人<sup>[11]</sup>又将运动重定向融合至 Borosan 等人的框架，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。这样的方法对计算机动画，计算游戏设计与其它数字娱乐形式有非常重要的意义。然而，据我们所知，在这方面几乎没有任何研究工作。

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，这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。在我们的问题中，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。这对三维制造来讲不仅没有必要，反而是一种负担。如图 1 (c) 所示模型，对三维打印来讲，尾巴部分完全不需要这么多关节。另外一个重要的问题是我们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

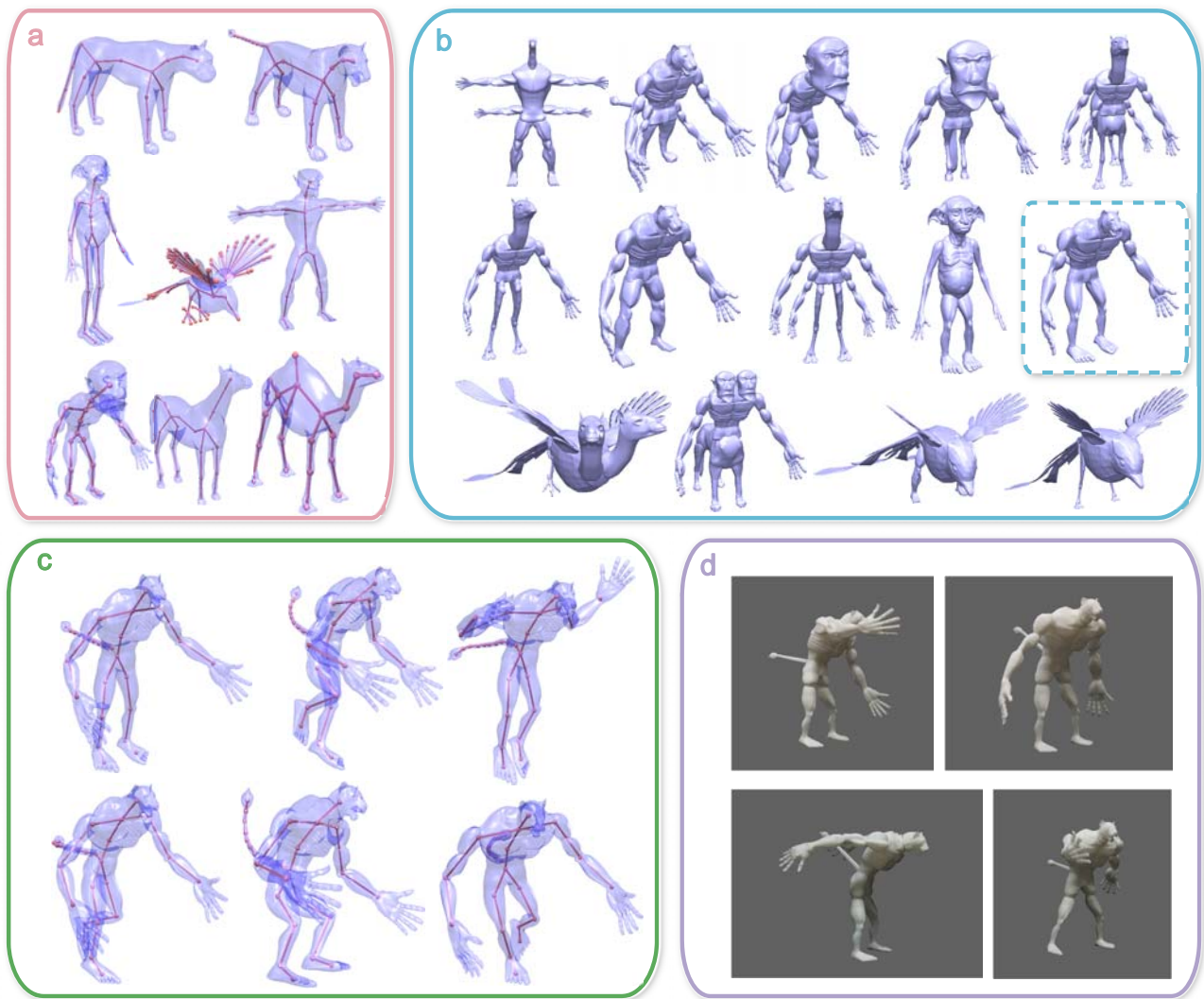


图 1 创新性造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的部分模型。虚线矩形框标识的模型是用户选择的感兴趣的模型。(c) 在动画编辑阶段, 用户编辑的 6 个不同的姿势。(d) 打印模型的 4 个不同姿势。

的三维打印技术<sup>[12-13]</sup>, 分析模型平衡性的技术<sup>[14-15]</sup>。然而, 据我们所知, 还没有人探索过使模型在一系列姿势下保持平衡的问题。

在这篇文章中, 我们提出针对创意角色模型的蒙皮与三维制造技术。该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。如图 1 所示, 输入一组蒙皮的模型, 我们的系统通过结构变异工具<sup>[7]</sup>“进化”出一代代形状与结构各异的模型。用户从中选择出满意的模型并进化下一代模型。进化过程如此迭代, 直至代数达到阈值, 或者用户满意。接着, 用户从模型结果集合中选择感兴趣的模型, 我们的系统自动地为该模型蒙皮并进行面向三维打印的模型分析。通过造型, 动画编辑与三维打印的无缝融合, 我们的系统提供给

用户可编辑动画的且可直接三维打印的模型, 极大地方便了用户的创新性造型过程。

本文的主要贡献有两个:

(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。我们提出一种新的面向三维打印的骨架优化算法, 优化关节的数量及位置。除此之外, 我们提出一种新的多姿势模型平衡分析技术。

## 2 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构成。编辑动画

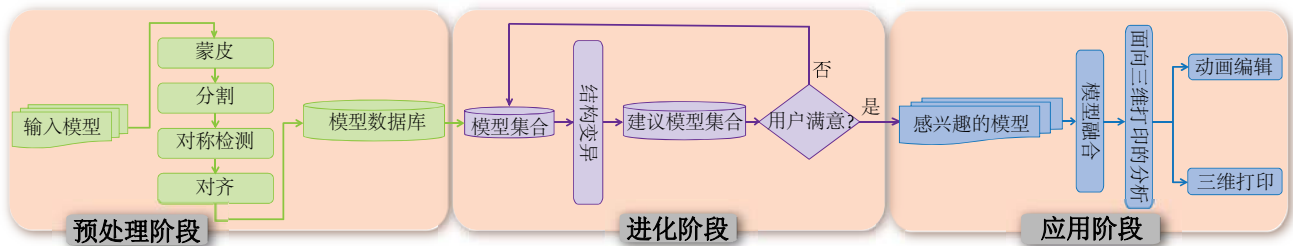


图2 方法流程图。

之前需要首先做骨架绑定<sup>[16]</sup>。研究人员提出各种各样的骨架绑定技术<sup>[17]</sup>。最近, Borosan 等人<sup>[10]</sup>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 等人<sup>[11]</sup>进一步扩展, 用于支持动画重定位。与现有的方法不同, 我们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** 由于高效而且易用, 基于部件组合的造型技术受到研究界的重视<sup>[18-19]</sup>。随着图形学领域逐步认识到在三维造型过程中提供创造力支持的重要性, 研究人员提出各种各样的支持用户自由探索造型空间的技术<sup>[3-6]</sup>。与现有的方法不同, 我们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, 三维打印技术及其应用越来越具有吸引力。然而, 模型在三维打印之前需要做很多预处理工作。比如, 检查模型拓扑条件<sup>[20]</sup>, 检查模型是否可保持平衡<sup>[14-15]</sup>, 检查模型结构是否稳固<sup>[21]</sup>。所有这些都需要大量的针对三维制造的分析技术。在本文内, 我们解决了带关节的角色模型在不同姿势下的平衡问题。该问题尚未被以前的工作解决过<sup>[12-15]</sup>。

### 3 方法概述

我们的方法共分为三个阶段(如图2): 预处理阶段、模型集合进化阶段和应用阶段。在预处理阶段, 我们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。通过模型结构变异技术, 当代模型产生一組組新模型。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, 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, 我们得到可以编辑动画与三维打印的模型。

## 4 模型融合

在模型融合过程中, 我们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

给定两个部件, 我们的目标是将两者融合得到一个流形。我们假设欲融合的两部件间存在一条间隙(如图3(a))。该假设为部件融合提供了更多灵活性, 使我们可以处理边界拓扑不同的部件。我们首先用三角形带填充两部件的间隙(如图3(b)), 接着在融合处做局部拉布拉斯光顺, 使过渡曲面光滑且提升网格质量(如图3(c))。

我们把该间隙缝合问题形式化成边界过渡曲面三角形化(BBT)问题<sup>[22]</sup>。给两个分段线性曲线  $C_p$  ( $m$  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, 得到三角形  $p_i p_{i+1} q_i$  (如图4(a))。

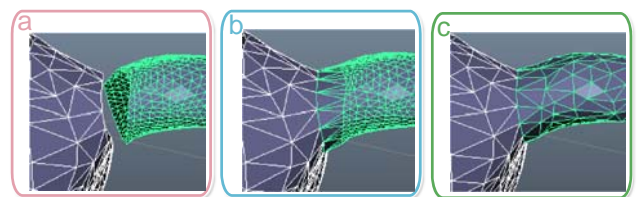


图3 表面融合示意图。(a) 两个要融合的部件。(b) 间隙三角形化。(c) 边界光顺。



Q-succeed 操作施加在边  $p_i q_j$  上, 得到三角形

$p_i q_j q_{j+1}$  (如图 4(b))。我们的目标是要在所有 BBT

内找到使我们的目标函数取得最优值的一个 BBT。根据<sup>[22]</sup>, 该组合搜索问题可以转化为最短路径问题 (如图 4 (c)), 通过 Dijkstra 算法求解。接下来我们需要为图内边定义合适的权重。在模型表面融合问题中, 我们需要考虑的关键因素是确保融合边界尽可能地光滑, 同时使过渡表面上的网格尽可能规则。基于此, 我们定义三角形  $T$  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,

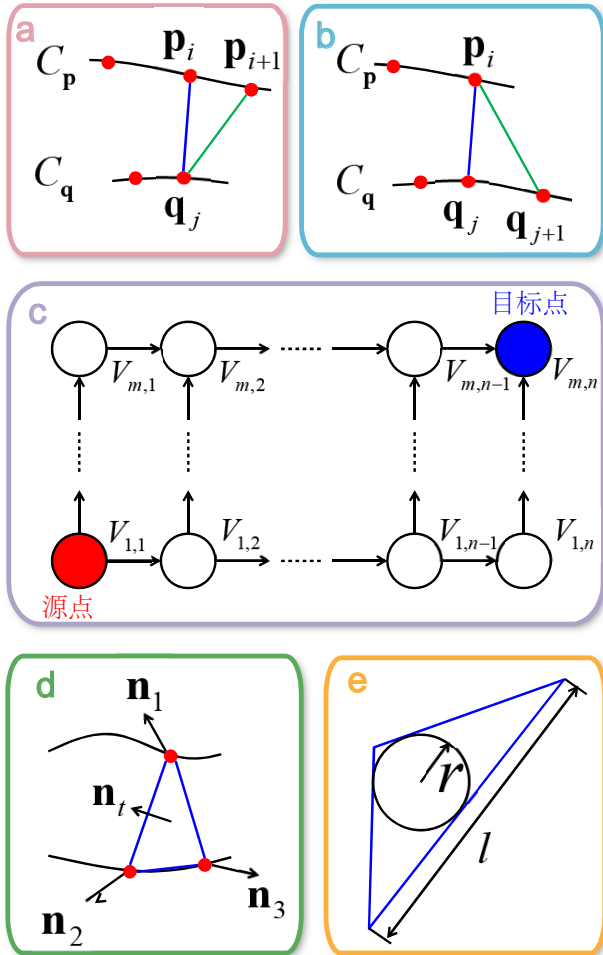


图 4 BBT 示意图。(a) P-succeed 操作示意。(b) Q-succeed 操作示意。(c) 最短路径问题示意。(d)  $E_s$  能量项示意。

(e)  $E_r$  能量项示意。

$E_r$  衡量  $T$  的规则程度。在本章的所有实验中,

$\omega = 0.2$ 。  $E_s$  定义为:

$$E_s = 3 - \mathbf{n}_t \cdot \mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_t \cdot \mathbf{n}_2 - \mathbf{n}_t \cdot \mathbf{n}_3,$$

其中,  $\mathbf{n}_t$  是  $T$  的法向,  $\mathbf{n}_1$ ,  $\mathbf{n}_2$  和  $\mathbf{n}_3$  为与  $T$  相邻的三

角形的法向。  $E_r$  定义为:

$$E_r = |2\sqrt{3} \times r / l - 1.0|,$$

其中,  $r$  是外接圆半径,  $l$  是  $T$  的最长边。

#### 4.2 骨架融合

做融合的两部件分别称为主部件与融合部件。为了融合两部件的骨架, 我们首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, 我们直接将该关节点与融合部件骨架末端点连接 (如图 5 (a))。否则, 我们首先在最近点处插入一个关节, 再把插入的关节与融合部件骨架末端点连接 (如图 5 (b))。

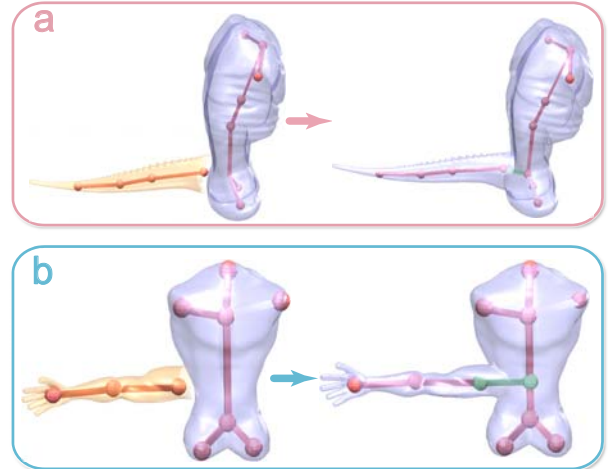


图 5 骨架融合示意图。融合部件为浅棕色。插入的关节及骨骼为绿色。融合部件骨架的末端关节直接与主部件骨架上的最近关节点相连 (a)。先向主部件骨架插入关节点, 再将融合部件骨架与插入的关节点相连 (b)。

#### 4.3 蒙皮权重计算

我们已融合了部件的表面与骨架得到新模型。接下来, 需要为该模型计算蒙皮权重。我们采用类似文献<sup>[10]</sup>提出的方法对新模型的蒙皮权重做局部更新。首先, 我们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），我们称该顶点为脏顶点。脏顶点的最近可视骨骼为脏骨骼。我们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。为了使权重光滑分布，最外侧脏顶点的二环邻域顶点（扩展顶点）也需要更新权重（如图6）。



图6 脏顶点和脏骨骼示意图。脏顶点和脏骨骼用红色标记。扩展顶点用绿色标记。融合边界用紫色标记。

## 5 面向三维打印的模型分析

在本章中，我们介绍面向三维打印的模型分析方法。该方法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

正如前面所提到的，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。我们采用如下原则决定三维打印时某关节是否需要保留：

（1）处于两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，该关节被删掉；

（3）保留下来的两关节间距必须大于某阈值。

给定模型的一组动画序列，我们为模型关节  $J_i$

计算其在整个动画序列中的变化（用  $\rho_i$  表示），并

依此判断该关节是否需要保留。  $\rho_i$  定义如下：

$$\rho_i = \sum_k \|\mathbf{M}_k^i - \mathbf{I}\|_F^2,$$

其中，  $\mathbf{M}_k^i$  是关节  $J_i$  的第  $k$  个变换矩阵，  $\mathbf{I}$  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，我们取得那些与  $J_i$  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，我们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（如图7）：（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  $\rho$  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。给一个蒙皮模型（a），我们的骨架优化算法优化关节（b），得到一组机械关节（c）。打印模型的两个姿势（d）。

### 5.2 多姿势模型平衡分析

我们扩展了文献[14]提出的方法，使其可以处

理多姿势模型平衡问题。我们的方法与文献[14]的方法有两个区别：（1）我们在所有姿势对应的模型内部做一致性挖空，这可以确保打印模型在所有姿势下保持平衡；（2）我们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，我们的目标是通过在所有姿势的模型内一致性挖空，最小化如下目标函数：

$$\arg \min \sum_k \left\| \left( \mathbf{c}(S_k, I_k) - \mathbf{c}_k^* \right)^{\perp \mathbf{g}} \right\|^2,$$

其中， $I_k$  是  $S_k$  的内表面， $\mathbf{c}(S_k, I_k)$  计算外表面  $S_k$  与内表面  $I_k$  围成的体积的质心， $\mathbf{c}_k^*$  是第  $k$  个姿势对应的模型的目标质心， $\mathbf{g}$  是引力方向， $^{\perp \mathbf{g}}$  表示沿着引力方向向支撑平面做垂直投影。

我们首先将模型在所有姿势下的表面投影至

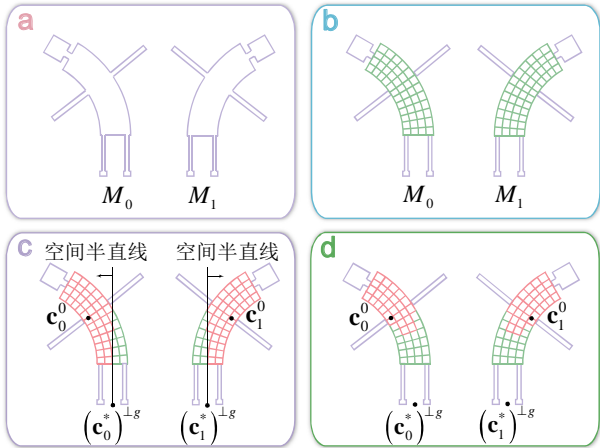


图 8 多姿势模型平衡算法流程示意图。我们用二维形状表示三维模型（如（a）内紫色形状）。给模型的两个不同姿势对应的模型  $M_0$  与  $M_1$ （a），我们首先为两模型的躯干部件建立一致的六面体网格（用二维网格表示）（b）。 $M_0$  与  $M_1$  的支撑点分别为  $(\mathbf{c}_0^*)^{\perp \mathbf{g}}$  与  $(\mathbf{c}_1^*)^{\perp \mathbf{g}}$ （c）。 $M_0$  与  $M_1$  当前的质心分别为  $\mathbf{c}_0^0$  与  $\mathbf{c}_1^0$ （c）。空间半平面用空间半直线表示（c）。每个模型内可挖掉的体素用红色标识。最后，我们取得可挖掉体素的交集（（d）内红色标记网格）。

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<sup>[23]</sup>。接着，我们用启发式的方法逼近最优挖空结果（如图 8）。对模型  $M$  的第  $k$  个姿势的表面，令当前的质心是  $\mathbf{c}_k^0$ ，我们可以计算出一个垂直于  $(\mathbf{c}_k^0 - \mathbf{c}_k^*)^{\perp \mathbf{g}}$  过  $(\mathbf{c}_k^*)^{\perp \mathbf{g}}$  的切割平面。挖掉与  $\mathbf{c}_k^0$  在同一半空间内的体素（被挖掉的体素集合记为  $V_k$ ）将使  $\mathbf{c}_k^0$  向  $\mathbf{c}_k^*$  移动，从而降低目标函数值。我们取得所有体素  $\cap V_k$ ，并按分数降序排列。分数计算方法如下：

$$d_i = \sum_k (\mathbf{v}_i - \mathbf{c}_k^*) \cdot (\mathbf{c}_k^0 - \mathbf{c}_k^*)^{\perp \mathbf{g}},$$

其中， $\mathbf{v}_i$  是体素  $i$  的中心。

如果目标函数在所有姿势下无解，我们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。

### 5.3 机械关节设计算法

**机械关节类型计算** 我们使用两种机械关节（如图 9）：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）。用户为关节确定旋转约束后，算法会自动计算关节类型。

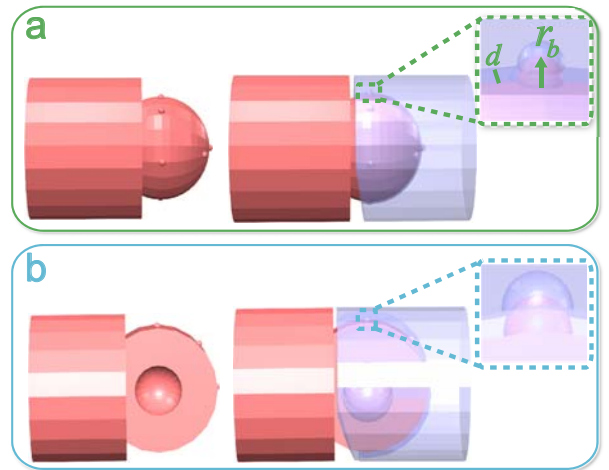


图 9 机械关节示意图。（a）球窝式关节。（b）铰链式关节。

**可摆姿势的机械关节打印** 与打印静止模型不同，我们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], 我们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)。

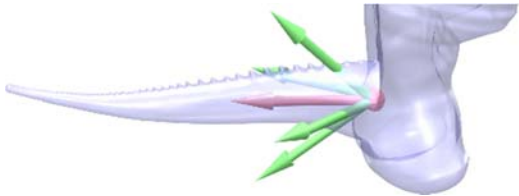


图 10 “别针”示意图。红色别针表示骨骼的方向。红色球指示机械关节的位置 (旋转中心)。绿色别针指示该机械关节的最大旋转幅度。用户操作绿色别针设置关节的旋转约束。

## 6 模型建议

类似文献[8], 在进化阶段, 我们为用户提示形状与结构各异的模型, 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。结构变异工具受启发于三维造型师常用的造型方法, 包括四类结构变异工具: (1) 替换工具 (如图 11 (a)), 在不同模型间交换部件; (b) 增加工具 (如图 11 (b)), 将一个部件复制一次或两次; (c) 组合工具 (如图 11 (c)), 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; (d) 插入工具 (如图 11 (d)), 在当前模型插入新类型部件。

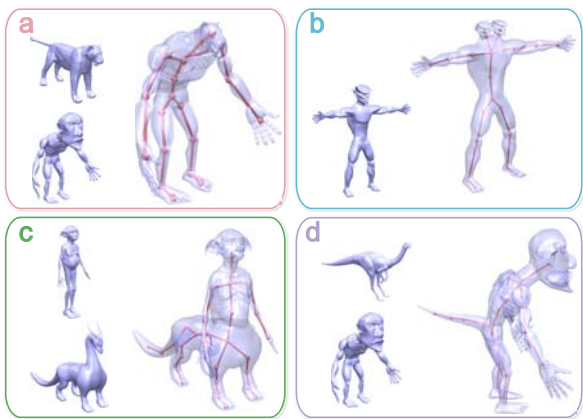


图 11 结构变异工具示意图。在每个子图中, 左侧是原始模型, 右侧是结果模型。(a) 交换工具。(b) 增加工具。(c) 组合工具。(d) 插入工具。

## 7 实验结果

我们在标准台式机 (Intel Core i7 3.77GHz, 8 GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 660 GPU) 上实现系统原型。我们的系统需要一个由绑定好的三维模型构成的数据库。当前, 我们采用文献[24]提出的方法自动绑定骨架。采用文献[25]提出的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 分钟。我们的方法可以确保模型在不同姿势下保持平衡 (见图 1 (d), 图 13 (d) 及图 14 (d))。

我们邀请了 8 位学生与 4 位具有 5 年以上造型与动画设计经验的艺术家评估我们的系统。首先, 测试者用 15 分钟时间了解我们的系统; 然后, 每位测试者花 30 分钟时间试用我们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我们的系统造型。图 13 与 14 给出测试者的设计结果。

用户测试结束之后, 我们邀请所有的参与者完成一份调查问卷。问卷由 6 个关于我们系统的陈述句构成。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 12 所示。测试者对我们的系统持非常正面的态度。他们认为我们将造型、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。

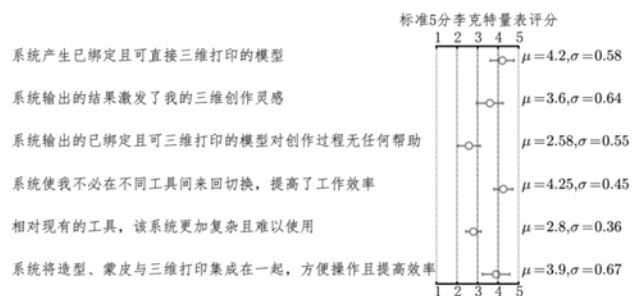


图 12 问卷调查统计结果。误差线表示标准差。

## 8 结论

在这篇文章中, 我们提出针对创意角色模型的蒙皮与三维制造技术。我们的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融合到统一的框架中, 辅助用户的整个创新性造型过程。我们方法得到已绑定的且可直接三维打印的模型。输入若干绑定的模型, 我们的方法通过结构变异工具进化出新一代模型。进化过程迭代进行, 直至用



户满意或达到最大代数。接着，用户挑选出感兴趣的模型。我们的系统实时地自动融合模型表面及其骨架并更新蒙皮权重，得到可编辑动画的模型。然后，我们采用面向三维打印的模型分析算法优化模型骨架及模型内部质量分布，得到可直接三维打印的模型。我们的系统提供了从造型到动画，再到三维打印的全部流程，避免了用户在不同工具间来回切换，简化用户操作，提高工作效率。

### 8.1 局限

在面向三维打印的模型分析中，骨架关节优化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。

### 8.2 未来的工作

我们打算在如下几个方面改进我们的技术：1) 扩展蒙皮部件融合技术，以融合运动部件。此时，我们需要解决很多新问题，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。比如，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。

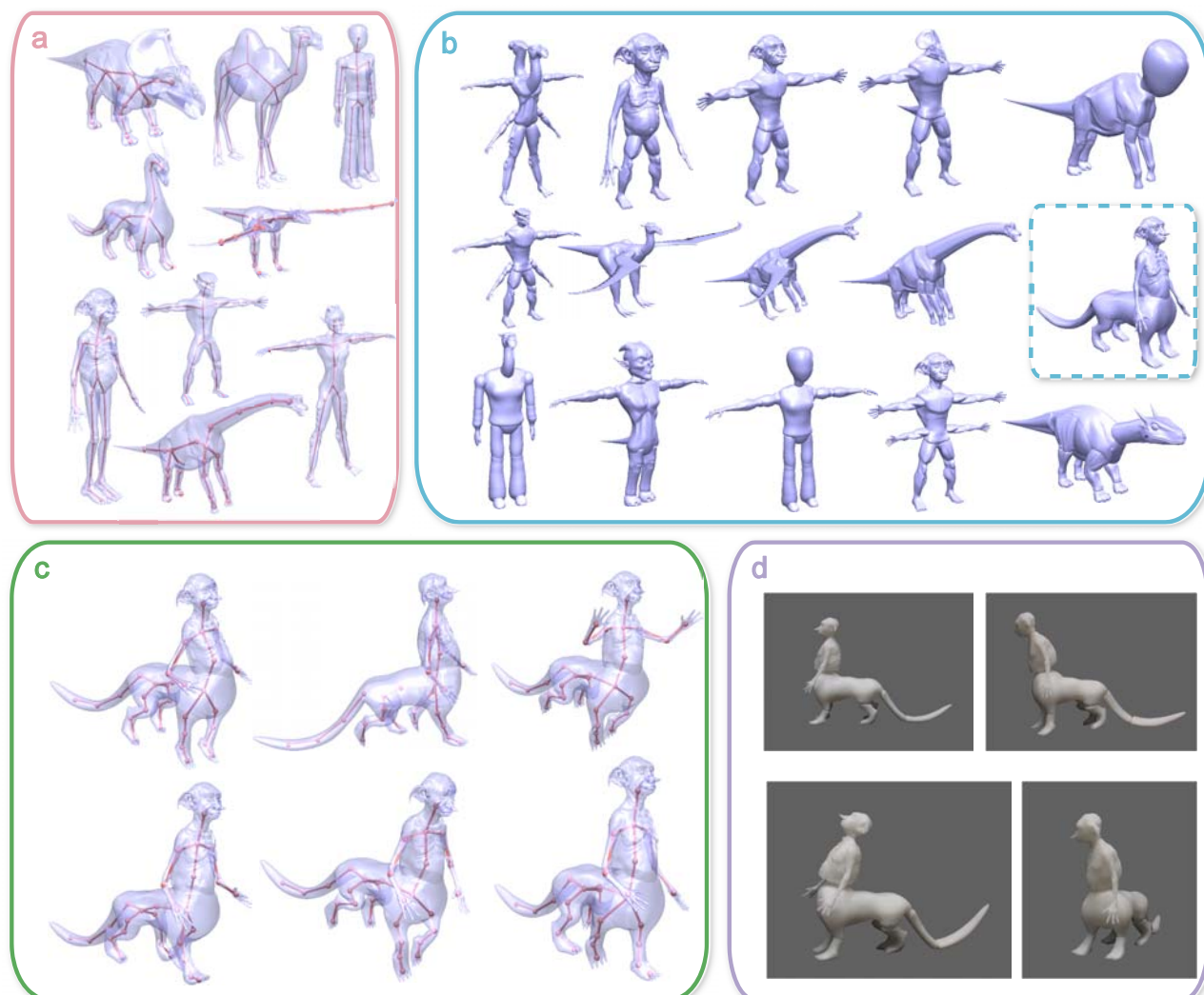


图 13 创新性造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的部分模型。虚线矩形框指示的模型是用户选择的感兴趣的模型。(c) 在动画编辑阶段，用户编辑的不同姿势。(d) 打印模型的 4 个姿势。



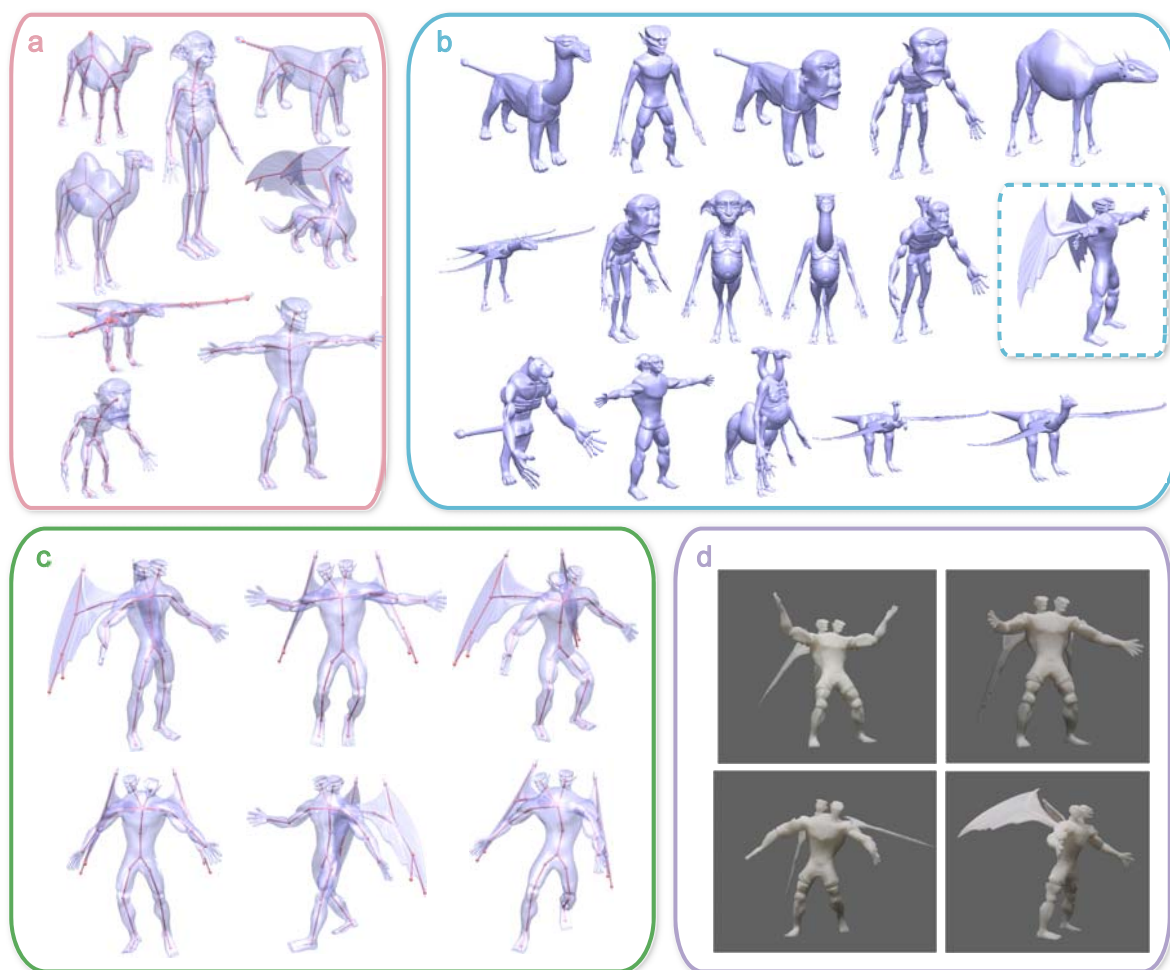


图 14 创新性地造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的部分模型。虚线矩形框指示的模型是用户选择的感兴趣的模型。(c) 在动画编辑阶段，用户编辑的不同姿势。(d) 打印模型的 4 个姿势。

## 参考文献

- [1] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design. Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA. 1999: 409-416.
- [2] Andrew Nealen, Takeo Igarashi, Olga Sorkine, et al. FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article No. 41.
- [3] Siddhartha Chaudhuri and Vladlen Koltun. Data-driven suggestions for creativity support in 3D modeling. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): Article No. 183.
- [4] Siddhartha Chaudhuri and Evangelos Kalogerakis and Leonidas Guibas and Vladlen Koltun. Probabilistic reasoning for assembly-based 3D modeling. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): Article No. 35.
- [5] Kai Xu and Hao Zhang and Daniel Cohen-Or and Chen Baoquan. Fit and diverse: set evolution for inspiring 3D shape galleries. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No. 57.
- [6] Evangelos Kalogerakis and Siddhartha Chaudhuri and Daphne Koller and Vladlen Koltun. A probabilistic model for component-based shape synthesis. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No. 55.
- [7] Xuekun Guo and Juncong Lin and Kai Xu and Xiaogang Jin. Creature grammar for creative modeling of 3D monsters. Graphical Models, 2014, 76(5): 376-389.
- [8] Xie, Xiaohua and Xu, Kai and Mitra, Niloy J. and Cohen-Or, Daniel and Gong, Wenyong and Su, Qi and Chen, Baoquan. Sketch-to-Design: context-based part assembly. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8): 233-245.
- [9] Fan, Lubin and Wang, Ruimin and Xu, Linlin and Deng, Jiansong and Liu, Ligang. Modeling by drawing with shadow guidance. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7): 157-166.
- [10] Peter Borosan and Ming Jin and Doug DeCarlo and Yotam Gingold and Andrew Nealen. RigMesh: automatic rigging for part-based shape modeling and deformation. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): Article No. 198.
- [11] Jin, Ming and Gopstein, Dan and Gingold, Yotam and Nealen, Andrew. AniMesh: interleaved animation, modeling, and editing. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 207.

- [12] Jacques Calì and Dan A. Calian and Cristina Amati and Rebecca Kleinberger and Anthony Steed and Jan Kautz and Tim Weyrich. 3D-printing of non-assembly, articulated models. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): Article No. 130.
- [13] Moritz Bacher and Bernd Bickel and Doug L. James and Hanspeter Pfister. Fabricating articulated characters from skinned meshes. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): Article No. 47.
- [14] Prevost, Romain and Whiting, Emily and Lefebvre, Sylvain and Sorkine-Hornung, Olga. Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 81:1-81:10.
- [15] Haiming Zhao and Chengkuan Hong and Juncong Lin and Xiaogang Jin and Weiwei Xu. Make it swing: fabricating personalized roly-poly toys. *Computer Aided Geometric Design*, 2016.
- [16] Ladislav Kavan and Peter-Pike Sloan and Carol O'Sullivan. Fast and efficient skinning of animated meshes. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 327-336.
- [17] Jacobson, Alec and Deng, Zhigang and Kavan, Ladislav and Lewis, J. P.. Skinning: real-time shape deformation. *ACM SIGGRAPH 2014 Courses*. Vancouver, Canada, 2014: 24:1-24:1.
- [18] Thomas Funkhouser and Michael Kazhdan and Philip Shilane and Patrick Min and William Kiefer and Ayellet Tal and Szymon Rusinkiewicz and Dobkin, David. Modeling by example. *ACM Transactions on Graphics* 2004, 23(3): 652-663.
- [19] Yizhou Yu and Kun Zhou and Dong Xu and Xiaohan Shi and Hujun Bao and Baining Guo and Shum, Heung-Yeung. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation. *ACM Transactions on Graphics* 2004, 23(3): 644-651.
- [20] Kazhdan, Michael. Reconstruction of solid models from oriented point sets. *Proceedings of the Third Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP '05)*. Vienna, Austria, 2005: 73.
- [21] Qingnan Zhou and Julian Panetta and Denis Zorin. Worst-case structural analysis. *ACM Transactions on Graphics* 2013, 32(4): Article No. 137.
- [22] Wang, Charlie C and Tang, Kai. Optimal boundary triangulations of an interpolating ruled surface. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2005, 5(4): 291-301.
- [23] Han, Shuchu and Xia, Jiazhi and He, Ying. Hexahedral shell mesh construction via volumetric polycube map: *Proceedings of ACM Symposium on Solid and Physical Modeling (SPM '10)*. Haifa, Israel, 2010: 127-136.
- [24] Ilya Baran and Jovan Popovic. Automatic rigging and animation of 3D characters. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): Article No. 72.
- [25] Kalogerakis, Evangelos and Hertzmann, Aaron and Singh, Karan. Learning 3D mesh segmentation and labeling. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 102:1-102:12.

## Background

[本文研究的属于哪一个领域的什么问题。]

Our work lies in the category of creative modeling. We investigate the unified framework incorporating animation and fabrication into creative modeling to better facilitates the whole creative design process.

[该类问题目前国际上解决到什么程度。]

Few, if any, research efforts on this problem have been reported to date, to the best of our knowledge.

[本文将问题解决到什么程度。]

We provide a whole pipeline from modeling to animation and fabrication. As a result, our system provides animation-ready and fabrication-ready objects based on the users' design, and thus facilitates the whole creation process.

[本研究群体以往在这个方向上的研究成果。]

Our work closely relates to the category of creative modeling, more specifically, shape suggestion methods. Xu et al.<sup>[5]</sup> propose the fit-and-diverse method to maintain a diverse set of shapes serving as the user's inspiration. In parallel work, Kalogerakis et al.<sup>[6]</sup> describe generative probabilistic priors for shape synthesis. Guo et al.<sup>[7]</sup> introduce a system to assist artists in the creative design of a large collection of 3D monsters with various structures.

Borosan et al.<sup>[10]</sup> present RigMesh, an unified approach by integrating modeling and rigging together. Jin et al.<sup>[11]</sup> incorporate motion retargeting into RigMesh to provide a non-linear modeling/animation tool.