针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术

（创意角色的绑定与三维打印技术）

摘 要 创造力支持的造型技术为普通用户提供了一个全新的在开放式造型方法。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的模型的方法。我们方法的造型结果是被绑定好并可三维打印的模型。起始于一组绑定好的封闭的三维模型，我们的系统迭代地产生一代代新模型，做为建议提示给用户以激发其灵感。用户选择感兴趣的模型用于动画编辑与三维打印分析。通过将造型、编辑动画与针对三维打印的模型分析集成至统一的框架，以帮助用户的创新性造型过程。我们方法的核心：1）一种新的同时融合部件表面与及其骨架的技术，同时该技术可以快速更新融合后部件的蒙皮权重；2）提出一个针对三维打印的骨架优化算法，选择出最佳的骨骼关节位置与半径。此外，还有一个可以确保打印模型在不同姿势下保持平衡的方法。

关键词 创造力支持的造型；蒙皮；三维打印；多姿态平衡分析；

中图法分类号 \*\*\*\*　　　DOI号 \*投稿时不提供DOI号\* 分类号

Fabricating and Rigging 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；Skinning；Fabrication；Multi-pose balancing；

# 引言

在图形学中，高效且富于创造性地造型三维模型一直是个非常困难的问题。基于草图的三维造型方法[[[1]](#endnote-1)][[[2]](#endnote-2)] 易学易用，但造型结果往往缺少几何细节。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[[[3]](#endnote-3)][[[4]](#endnote-4)][[[5]](#endnote-5)][[[6]](#endnote-6)][[[7]](#endnote-7)][[[8]](#endnote-8)][[[9]](#endnote-9)][[[10]](#endnote-10)]。

在计算机动画中，造型仅是第一步，后面要为模型蒙皮并编辑动画。传统上，造型与蒙皮两个步骤分开。这种做法使得迭代更新异常困难，因为动画师不得不频繁地在造型与蒙皮工具间来回切换。因此，这种做法浪费时间且影响效率。Borosan等人[[[11]](#endnote-11)]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[[[12]](#endnote-12)]又将运动重定向融合至Borosan等人的框架，提出一个非线性的建模/动画工具。将创造力支持的造型与动画设计结合至一个统一的框架非常重要。这样，动画师就可以增量式地编辑动画，并立即观察到动画效果。另外一方面，使用现有的已绑定的模型，也节省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，三维打印技术的普及使得用户可以自己制造个性化的三维模型。在创造力支持的造型系统中融合针对三维制造的分析，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，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考虑很多问题，例如，拓扑性质，平衡性，结构稳定性等。在我们的问题中，该问题更加困难和复杂。首先，为了实现逼真的动画效果，骨架往往有很多关节。但对三维制造来讲，太多的关节不仅没有必要，甚至是一种负担。例如，在图1（c）内，就三维打印来讲，尾巴部分完全不需要这么多关节。另外一个重要的问题，打印出来的模型需要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，打印带关节的角色模型[[[13]](#endnote-13)][[[14]](#endnote-14)]，使模型保持平衡[[[15]](#endnote-15)][[[16]](#endnote-16)]。然而，还没有人探索过使打印出来的模型在一系列姿势下保持平衡的问题。

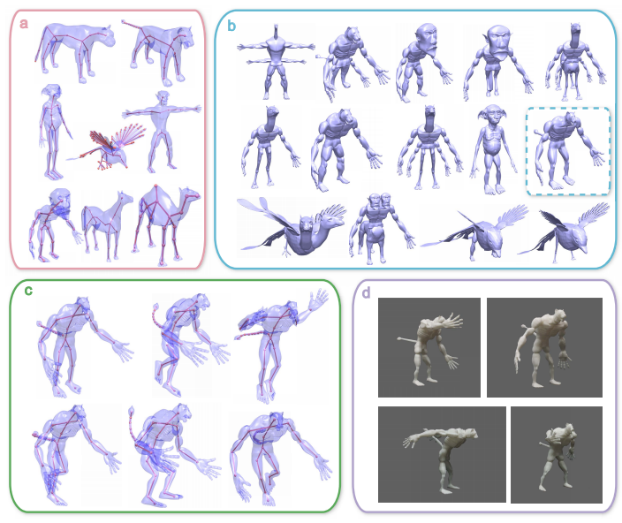


图1。创新性地造型的一个例子。 （a）输入模型。 （b）模型进化阶段提示给用户的模型。虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。（c）动画编辑阶段得到的几个动作。 （d）三维打印出的模型的三个不同姿势。

在这篇文章中，我们提出针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术。该技术将创造力支持的造型，三维打印分析与骨架绑定融合在一个框架中，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[8]``进化''出新一代形状各异的模型。然后，用户从中选择出感兴趣的模型，用于进化下一代模型。进化过程如此迭代，直至代数达到阈值，或者用户满意。接着，用户可以从模型结果集合中选择一个，绑定骨架并三维打印。通过造型，蒙皮与三维打印的无缝融合，我们的系统提供给用户蒙皮的且可直接三维打印的模型，为用户的创意造型过程提供了极大的帮助。

本文的主要贡献有两个：

（1）蒙皮部件融合技术。该技术可以融合部件表面的同时融合骨架，并采用一种快速的局部更新方法更新融合后部件的蒙皮权重。

（2） 面向三维打印的蒙皮角色模型分析技术。该技术包括针对三维打印的骨架优化算法，可以计算出关节的最优数量及位置。而且，我们提出一种确保三维物体在不同姿势下保持平衡的方法。

# 相关工作

**骨架绑定技术** 在计算机动画中，角色骨架往往以分层的形式组织各骨骼与关节。骨架绑定[[[17]](#endnote-17)]之后的模型才可以编辑动画。研究人员提出各种各样的骨架绑定技术[[[18]](#endnote-18)]。最近，Borosan et al.[11]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 et al.[12]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建模，骨架绑定和三维打印无缝地融合到统一的框架中，极大地简化了用户的整个创新性设计过程。

**基于部件组合的建模技术** 由于高效且易用，基于部件组合的建模技术受到非常多的重视[[[19]](#endnote-19)][[[20]](#endnote-20)]。随着图形学领域逐步认识到在三维建模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建模空间的技术[3][4][5][6][7]。与现有的方法不同，我们将动画与三维打印融合到创造力支持的建模技术中。从而使用户从绑定的模型中得到更多的灵感，也极大地方便了三维打印过程。

**针对三维打印的模型设计技术** 随着三维打印机的普及，三维打印技术及其应用越来越具有吸引力。然而，在三维模型可以做三维打印之前需要做很多预处理工作。比如，检查三维模型是否符合某些拓扑标准[[[21]](#endnote-21)]，是否可以保持平衡[15]，结构是否足够坚固[[[22]](#endnote-22)]。所有这些都需要大量的针对三维制造的几何处理技术。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[13][14][15]。

# 方法概述

我们的方法总共分三个阶段（图2）：预处理阶段，模型进化阶段和应用阶段。在预处理阶段，我们对每一个输入模型归一化，对齐，蒙皮，按语义分割标记，检测对称部件。在模型进化阶段，用户从数据库内选择若干来自不同类的模型，做为第一代模型。在进化过程中，当前代模型通过模型结构变异技术进化出新一代模型。进化过程不断进行，直至用户满意或者达到最大代数。进化过程停止后，用户选择感兴趣的模型，进入应用阶段。在应用阶段，被用户选择的模型通过我们的蒙皮部件融合方法转换成流形，皮肤权重也做了更新；然后，经过面向三维打印的蒙皮角色模型的分析处理。最终，我们得到一个可以直接编辑动画与三维打印的模型。

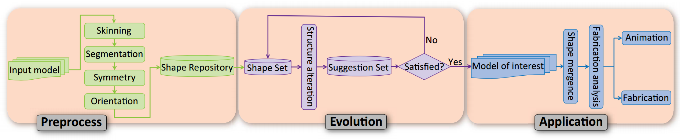


图2. 方法流程图

# 模型融合

部件融合是我们技术的核心步骤。在融合部件表面的同时还要融合其骨架并更新融合后部件的蒙皮权重。

## **4.1** 表面融合

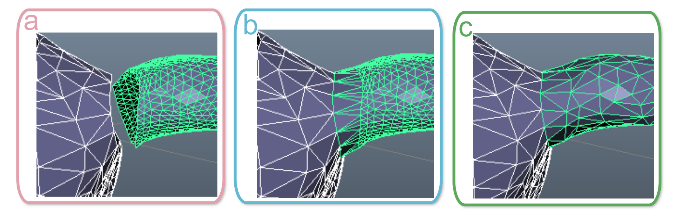


图3. 表面融合示意图。（a）两个要融合的部件。（b）间隙三角化。（c）边界光顺。

给两个部件，我们的目标是将两个无缝地融合到一起，得到一个流形。我们假设欲融合的两部件间有一个间隙（见图3（a））。这条间隙可以通过将其中一个部件向旁边偏移一点距离得到。这个间隙假设为造型过程提供了更多灵活性，使我们可以融合边界拓扑不同的两部件。我们首先将两部件间的间隙用三角形带填充（见图3（b）），接着在融合处做局部拉布拉斯光顺，从而得到光滑的过渡曲线且提升融合曲面的网络质量（见图3（c））。我们把间隙缝合问题形式化成最优边界过渡曲面三角形化（BBT）问题[[[23]](#endnote-23)]。给两个分段线性曲线（个顶点）和（个顶点），一个BBT就是一个通过迭代施加P-succeed与Q-succeed操作得到的三角形序列。P-succeed操作施加在边上，得到三角形（图4（a））。Q-succeed操作施加在边上，得到三角形（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[23]，该组合搜索问题可以转化为最短路径问题（图4（c）），进而用Dijkstra算法求解。接下来我们需要为图内边定义合适的权重。模型表面融合的关键考虑因素是确保融合边界尽可能地光滑，同时使过渡曲面上的三角形尽可能地规则。因此，我们定义三角形的边权重为如下值：



其中，用于衡量三角形的法向与其相邻三角形法向均值的一致性，衡量三角形的质量。在本章的所有实验中，。定义为：



其中，是三角形的法向，，和为与相邻的三个三角形的法向。定义如下：



其中，是外接圆的半径，是的最长边。

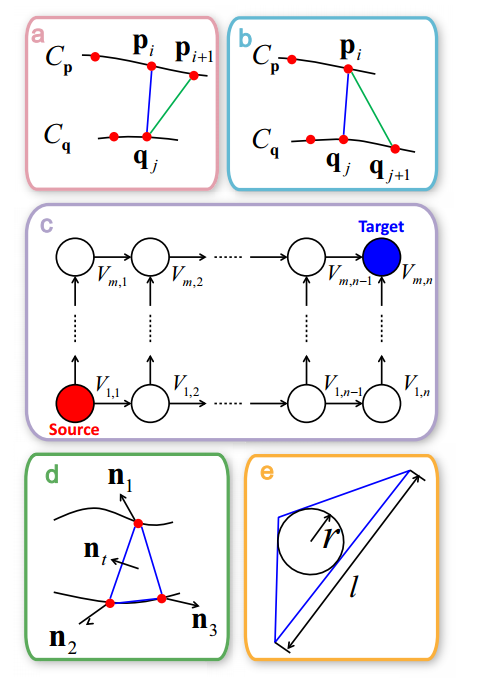


图4. BBT示意图。（a）P-succeed操作。（b）Q-succeed操作。（c）最短路径问题示意。（d）能量项示意。（e）能量项示意。

## **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未端关节点的最近点。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未端点连接（图5（a））。否则，我们首先在该最近点处插入一个关节，再把插入的关节与融合部件骨架未端点连接（图5（b））。

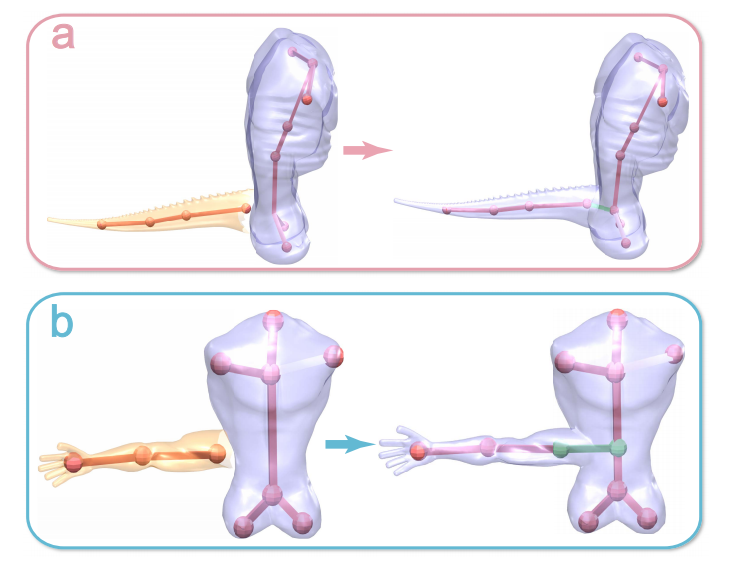


图5. 骨架融合示意图。融合部件为浅棕色。插入的关节及骨骼为绿色。融合部件骨架的未端关节直接与主部件骨架上的最近关节点相连（a）。先向主部件骨架插入关节点，再将融合部件骨架与插入的关节点相连（b）。

## **4.3 蒙皮权重**

我们已将两个部件的表面与骨架融合到一起得到一个新的模型。接下来，需要为该新模型更新蒙皮权重。我们采用类似[11]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，脏骨髓为需要更新权重的骨骼。为了使模型上的权重光滑分布，最外侧脏顶点的二环领域顶点（扩展顶点）也包括在需要更新权重的顶点内（如图6）。

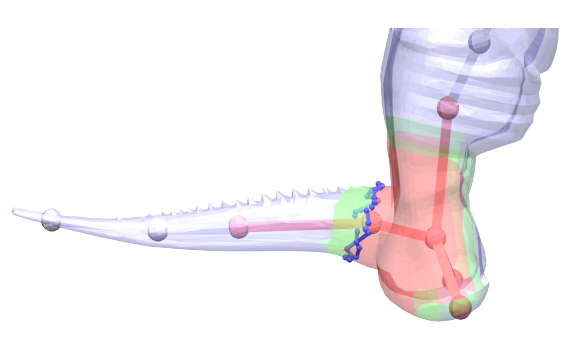


图6. 脏顶点和脏骨骼示意图。脏顶点和脏骨骼用红色标记。扩展顶点用绿色标记。融合边界用紫色标记。

# 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。该方法可得到用于三维打印的关节模型。

## **5.1 针对三维打印的骨架优化算法**

正如前面所提到的，骨骼动画与关节模型三维打印对模型骨架的要求完全不同。我们需要在三维打印之前优化动画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是否需要保留动画骨架的某关节：

（1）处于两语义部件连接处的关键关节（Critical Joint）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；

（4）用户指定的关节必须保留或删掉。

给某模型的一组动画序列，我们为该模型的关节定义变量，来评估该关节是否需要保留：



其中，是关节的第个变换矩阵，是单位矩阵，是Frobenius范数。衡量了关节在整个动画序列中的变化。

为了计算关节在三维打印时的最优位置，我们取得那些与该关节的蒙皮权重大于阈值（在我们的实验中）的所有顶点。然后，我们用球面拟合带权重的顶点集合（权重为顶点的蒙皮权重）。拟合球的中心是动画关节对应的打印关节的最优中心点。打印关节的半径是拟合球的半径。

最后，我们按如下标准判断非关键关节在三维打印时是否需要除掉（如图7）：（1）为了防止两打印关节重合，如果关节与它的邻居间距小于阈值（和分别为两关节与对应的三维打印关节半径），那么将除掉（对应的比的小）；（2）如果关节的低于某阈值，将该关节删除，因为这样的关节可以视为静态关节；（3）为了确保打印模型结构足够坚固，如果关节的横截面面积小于阈值，该关节被除掉；（4）型上的关节必须对称排列，除掉无对称关节的关节。

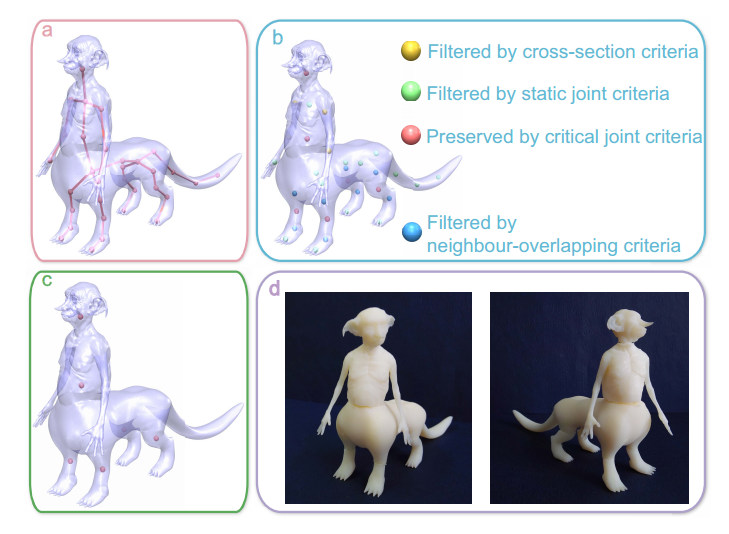


图7. 面向三维打印的关节优化过程示意图。给一个蒙皮模型（a），我们的骨架优化算法优化关节（b），得到一组适合三维打印的关节（c）。三维打印得到的模型如（d）所示。

## **5.2 多姿势模型平衡算法**

我们扩展了[15]提出的方法，使其可以处理多姿态模型的平衡问题。我们的方法与[15]有两个区别：（1）我们在所有姿态对应的模型内部做一致性挖空，这可以确保打印出来的模型在所有姿态下保持平衡；（2）我们为各姿态下的模型建立一致的六面体网格来表示模型的体积，而不是简单地使用体素网格。

给模型，令依次为模型在个不同姿态下的表面，我们的目标是通过在所有姿态的模型内一致性挖空，最小化如下目标函数：



其中，是的内表面，计算外表面与内表面围成的体积的质心，是第个姿态对应的模型的目标质心，是引力方向，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态下的表面投影至多重立方体域（polycube domain），然后为这些多重立方体域建立一致的六面体网格[[[24]](#endnote-24)]。接着，我们用启发式的方法去逼近最优挖空结果（如图8）。对模型的第个姿态，令当前的质心是，我们可以计算出一个垂直于过的切割平面。挖掉与在同一半空间内的体素（被挖掉的体素集合记为）将使向移动，从而降低目标函数值。我们取得所有体素，并按分数降序排列。分数计算方法如下：



其中，是体素的中心。

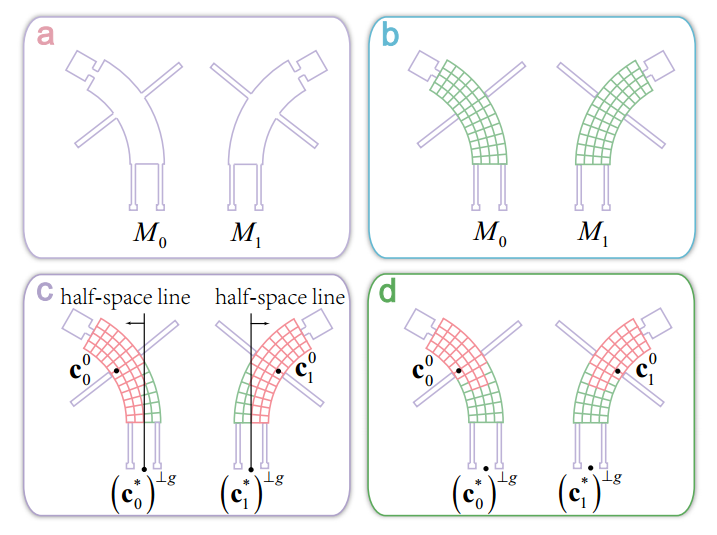


图8. 多姿势模型平衡算法流程示意图。我们用二维形状表示三维模型（如（a）内紫色形状）。给模型的两个不同姿势对应的模型与（a），我们首先为两模型的躯干部件建立一致的六面体网格（用二维网格表示）（b）。与的支撑点分别为与（c）。与当前的质心分别为与（c）。空间半平面用空间半直线表示（c）。每个模型内可以挖掉的体素用红色标识。最后，我们取得可以挖掉的体素的交集（如（d）内红色标记网格），并为交集内的体素排序。

如果在模型所有的姿态下无解，我们提醒用户从现有姿态内采样出一组姿态并重新优化该目标函数。

## **5.3 机械关节设计算法**

**关节类型计算** 我们使用两种机械关节（见图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（见图10）。一旦用户为关节确定了旋转约束，算法会自动计算关节类型。

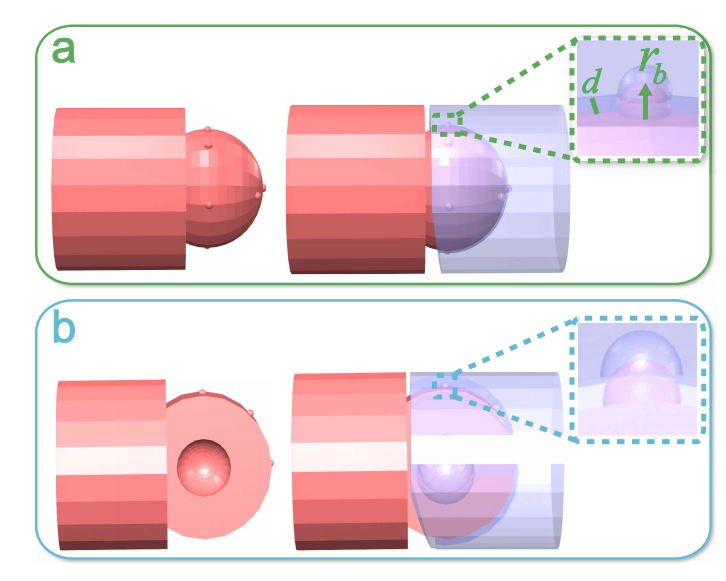


图9.两类关节示意图。（a）球窝式关节。（b）铰链式关节。

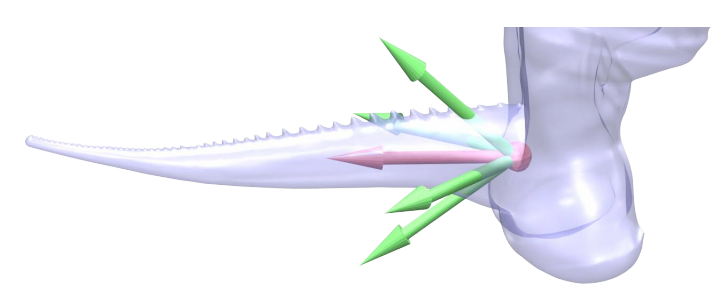


图10. ``别针''示意图。红色别针表示骨骼的方向。红色的球是机械关节的位置（旋转中心）。绿色别针指示出该机械关节的最大旋转幅度。用户操作绿色别针设置关节的旋转约束。

**可摆姿势的关节打印** 与打印静止模型不同，打印关节模型的最关键挑战是要确保打印出的模型可以保持一定的姿势。这就要求打印出的关节能承受一定的重力。为了确保关节具有承重摩擦力，类似[14]，我们为关节面（Positive Joint Part）增加半径为的球状突起，为关节囊（Negative Joint Part）增加半径为的球状凹陷（如图9）。

# 模型建议

类似[8]，在进化阶段，我们提示一代代的新模型供用户选择。在每一次迭代过程中，我们通过结构变异规则将当前模型进化成新一代模型。结构变异规则受启发于三维建模师常用的建模方法，包括：（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）），对当前模型插入一个新类型的部件。

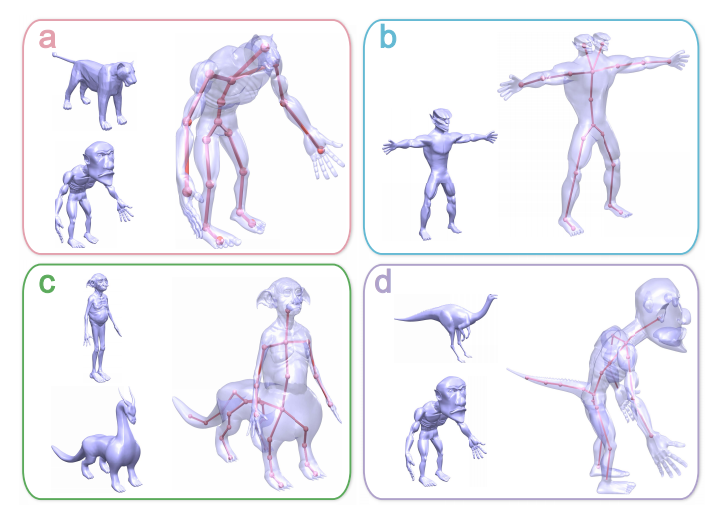


图11. 结构变异工具示意图。在每个子图内，原始模型在左边，变异结果模型及其骨架在右边。（a）交换工具。（b）增加工具。（c）组合工具。（d）插入工具。

# 实验结果

我们在标准台式机（Intel Core i7 (3.77GHz), 8 GB RAM and NVIDIA Geforce GTX 660 GPU）上实现了系统原型并做实验。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[[25]](#endnote-25)自动为模型绑定骨架，采用[[[26]](#endnote-26)]方法自动化地分割并标记模型。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12（d）及图13（d））。

我们邀请了8位学生来评估我们的方法。首先，我们花30分钟时间为所有参与者介绍我们的系统；然后，每位参与者花30分钟时间试用我们的系统以熟悉操作流程；最后，测试者不受限制地使用我们的系统造型。其中一个参与者做出的结果如图12。

我们邀请了3位具有4年以上造型与动画设计经验的艺术家来参与用户测试。一个测试者做出的结果如图13。几位测试者对我们系统持非常正面的态度。他们认为我们将造型，动画与三维打印集成到一个统一的框架中，极大的简化了用户操作，并为整个创意造型过程提供了更多的创造力支持。

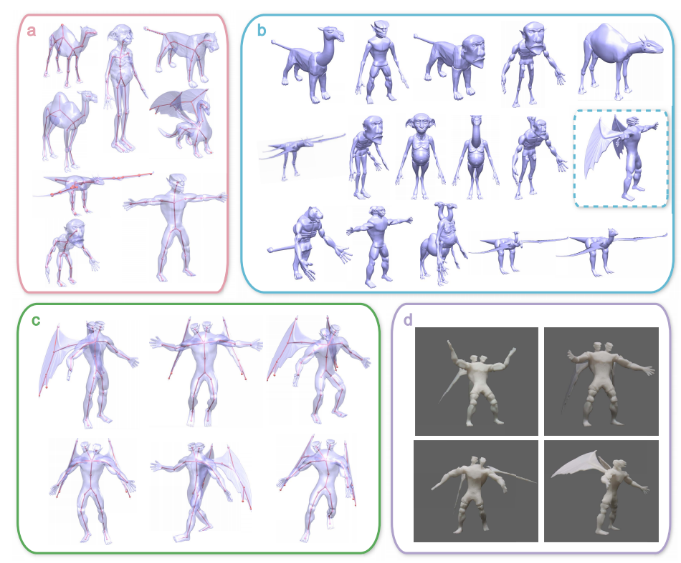


图12. 创新性地造型的一个例子。（a）输入模型。（b）模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。（c）动画编辑阶段得到的几个动作。（d）三维打印出的模型摆出的三个姿势。

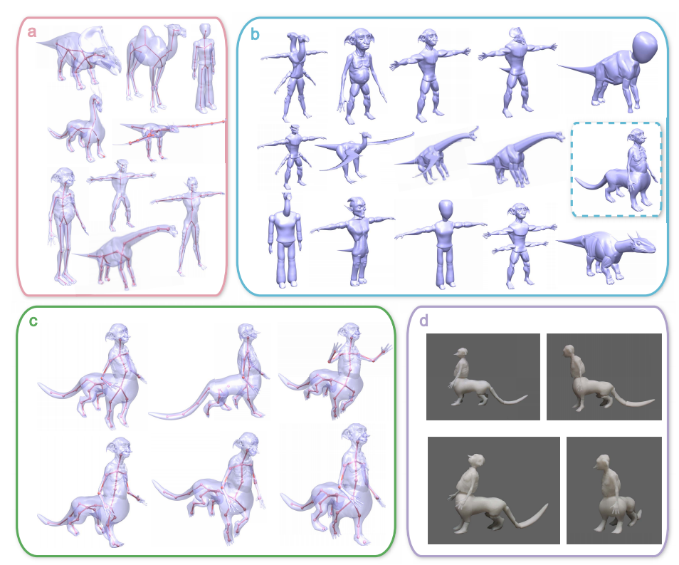


图13. 创新性地造型的一个例子。（a）输入模型。（b）模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。（c）动画编辑阶段得到的几个动作。（d）三维打印出的模型摆出的三个姿势。

# 本章小结

在这篇文章中，我们提出一个创造力支持的造型可打印的蒙皮角色模型的技术。我们的系统将创造力支持的造型，蒙皮动画与三维打印分析无缝融合到统一的框架中，辅助用户的整个创意造型过程，得到可直接编辑动画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，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处理该模型，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，避免了在几个工具间来回切换，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态模型平衡分析都基于这样的假设：组合的角色模型有一系列不同的姿态。如果该假设不成立，关节过滤的第二条标准被抛弃掉，或者手动选择。对多姿态平衡分析来讲，用户可以手工选择一些姿态或者指定每个关节的变化幅度。

## **8.2 未来的工作**

在将来，我们打算在如下几个方面改进我们的工作：1）我们将会把蒙皮部件融合技术扩展至直接融合动画中的部件。此时，我们需要解决好多新问题，包括做融合的部件的运动风格兼容性分析，最佳融合帧计算；2）我们将会增强针对复杂关节模型的面向三维打印的分析。比如，当融合边界很长并且很窄时，需要在此处加入多个关节以得到更好的结构强度。

致 谢 感谢xxx

参 考 文 献

1. [] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design[C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH. 1999: 409每416. [↑](#endnote-ref-1)
2. [] Andrew Nealen, Takeo Igarashi, Olga Sorkine, et al. FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):Article No. 41. [↑](#endnote-ref-2)
3. [] Talton, J.O., Gibson, D., Yang, L., Hanrahan, P., Koltun, V..Exploratory modeling with collaborative design spaces. ACM Transacitons on Graphics 2009;28(5):Article No. 167. [↑](#endnote-ref-3)
4. [] Chaudhuri, S., Koltun, V.. Data-driven suggestions for creativity support in 3d modeling. ACM Transacitons on Graphics 2010;29(6):Article No. 183. [↑](#endnote-ref-4)
5. [] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Guibas L, et al. Probabilistic reasoning for assemblybased 3D modeling[J]. ACM Transacitons on Graphics, 2011, 30(4):Article No. 35. [↑](#endnote-ref-5)
6. [] 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. [↑](#endnote-ref-6)
7. [] Kalogerakis, E., Chaudhuri, S., Koller, D., Koltun, V.. A probabilistic model for component-based shape synthesis. ACM Transactions on Graphics 2012;31(4):Article No. 55. [↑](#endnote-ref-7)
8. [] Guo X, Lin J, Xu K, et al. Creature Grammar for Creative Modeling of 3D Monsters[J]. Graphical Models, 2014, 76(5):376每389. [↑](#endnote-ref-8)
9. [] Xie X, Xu K, Mitra N J, et al. Sketch-to-Design: Context-Based Part Assembly[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8):233每245. [↑](#endnote-ref-9)
10. [] Fan L, Wang R, Xu L, et al. Modeling by Drawing with Shadow Guidance[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7):157每166. [↑](#endnote-ref-10)
11. [] Borosan P, Jin M, DeCarlo D, et al. RigMesh: automatic rigging for part-based shape modeling and deformation[J]. ACM Transacitons on Graphics, 2012, 31(6):Article No. 198. [↑](#endnote-ref-11)
12. [] Jin M, Gopstein D, Gingold Y, et al. AniMesh: interleaved animation, modeling, and editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6):207. [↑](#endnote-ref-12)
13. [] Cali J, Calian D A, Amati C, et al. 3D-Printing of Non-Assembly, Articulated Models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6):Article No. 130. [↑](#endnote-ref-13)
14. [] 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. [↑](#endnote-ref-14)
15. [] Prevost R, Whiting E, Lefebvre S, et al. Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4):81:1每81:10. [↑](#endnote-ref-15)
16. [] Zhao H, Hong C, Lin J, et al. Make it swing: Fabricating personalized roly-poly toys[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 每. [↑](#endnote-ref-16)
17. [] Kavan L, Sloan P P, O＊Sullivan C. Fast and Efficient Skinning of Animated Meshes[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2):327每336. [↑](#endnote-ref-17)
18. [] Jacobson A, Deng Z, Kavan L, et al. Skinning: Real-time Shape Deformation[C]. ACM SIGGRAPH 2014 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2014: 24:1每24:1. [↑](#endnote-ref-18)
19. [] Funkhouser, T., Kazhdan, M., Shilane, P., Min, P., Kiefer, W., Tal, A., et al. Modeling by example. ACM Transactions on Graphics 2004;23(3):652每663. [↑](#endnote-ref-19)
20. [] Yu, Y., Zhou, K., Xu, D., Shi, X., Bao, H., Guo, B., et al. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation. ACM Transactions on Graphics 2004;23(3):644每651. [↑](#endnote-ref-20)
21. [] Kazhdan, M.M.. Reconstruction of solid models from oriented point sets. In: Third Eurographics Symposium on Geometry Processing, Vienna, Austria, July 4-6, 2005. 2005, p. 73每82. [↑](#endnote-ref-21)
22. [] Zhou, Q., Panetta, J., Zorin, D.. Worst-case structural analysis. ACM Transactions on Graphics 2013;32(4):Article No. 137. [↑](#endnote-ref-22)
23. [] 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每301. [↑](#endnote-ref-23)
24. [] Han S, Xia J, He Y. Hexahedral shell mesh construction via volumetric polycube map[C]. Proceedings of ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. 2010: 127每136. [↑](#endnote-ref-24)
25. [] Baran I, Popovic J. Automatic Rigging and Animation of 3D Characters[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):Article No. 72. [↑](#endnote-ref-25)
26. [] Kalogerakis E, Hertzmann A, Singh K. Learning 3D Mesh Segmentation and Labeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4):102:1每102:12. [↑](#endnote-ref-26)