

## 摘要

在三维影视特效及电子游戏中，三维角色模型是必不可少的部分。虽然现有大量的商业造型系统，可以满足各种造型需求，但这些系统非常复杂，难以掌握，更多地局限于专业人员使用。过去十几年里，图形学界在简单易用且功能强大的造型技术方面进行了大量研究，提出了草图式造型、组合式造型等方法，取得了重大进展。总体来看，现有的造型技术更多地将三维造型视为工艺过程，即在造型之前有明确的目标。然而，三维造型也是个开放式的艺术创作过程，其造型目标会经常发生不可预知的改变。显然，现有的造型技术不适用于开放式造型。因此，如何在开放式造型过程中提供创造力支持以辅助用户更好地创作在三维造型中具有重要的理论研究意义与实际应用价值。

其中一类创造力支持的造型技术向用户建议可添加到当前模型的部件。然而，这类技术都依赖预分割（或标记）的模型数据库。用户仅可使用预分割的部件组合模型。这极大地限制了造型空间与用户的创造力。另一类是模型建议技术。这类技术更适合处理具有相同结构的同类模型，产生的是与输入具有相同结构的同类模型。其最大缺点是不适合产生拓扑结构变异的模型。此外，在计算机动画中，造型仅是第一步，接下来还要编辑动画甚至三维打印制造实物。编辑动画之前需要蒙皮。三维打印之前需要经过很多处理，比如，平衡性分析，关节优化等。然而，现有的创造力支持的造型系统往往局限于造型。简单地将蒙皮与面向三维打印的模型处理做为造型的后续处理步骤无法达到实时交互。因为，“造型设计-蒙皮-面向三维打印的模型处理”是个迭代的步骤，简单组合现有技术会导致用户在不同工具间频繁变换，降低效率。

本文针对现有创造力支持的造型技术不适合产生拓扑结构变异，依赖预分割的模型数据库限制造型空间，缺少蒙皮及面向三维打印的模型处理三方面的问题，进行了深入研究与探索，提出了一系列新技术新方法，在实际应用与理论研究上取得重大突破。本文主要研究内容如下：

- 提出一种辅助用户快速造型大量虚拟生物的技术。这些虚拟生物具有合理的奇异的拓扑结构。用户从数据库内选择若干个不同类的常规模型，我们的技术迭代地产生一代代结构奇异的虚拟生物模型做为建议提示给用户，以激发灵感。我们方法的核心是生物语法（Creature grammar）。生物语法是针对造型虚拟生物特化的形状语法（Shape grammar）。生物语法改变部件的排列方式与数目，同时保持生物的语义约束。
- 提出一种基于草图的按需部件建议方法—Sketch2Cut系统。用户输入草图表达设计概念，我们的方法依此生成三维代理部件并从数据库内搜索出一系列候选部件，提示给用户。我们的方法首先将三维模型局部匹配问题转化为多视角下的二维轮廓局部匹配。然后基于三维模型的超面片图表示，快速地从三维模型上提取与用户意图匹配的三维部件，提取过程由粗到细，边界逐步优化。与以前的工作不同，我们的方法不依赖预分割的三维模型数据库，并可以建议定制的任意部件，极大地扩展了用户设计空间。
- 提出一个统一的框架，将造型设计、蒙皮与面向三维打印的模型处理无缝地融合到一起。输入一组蒙皮的三维模型，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。我们的方法首先融合部件表面及其骨架，然后快速更新融合模型的蒙皮权重，接着采用面向三维打印的骨架优化算法选择出最优关节位置与半径，最后优化模型内部质量分布，确保模型在不同姿势下保持平衡。通过将造型、蒙皮与面向三维打印的模型处理集成至统一的框架，我们的方法更好地辅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，生物语法，实时分割，基于草图的造型，三维制造，蒙皮，多姿态平衡分析

## Abstract

3D characters are indispensable parts in 3D computer games and visual effects for TV and film. Many commercial modeling systems have been developed to tackle various modeling tasks. However, these tools are extremely complex and require months to master, which limits their applications. In the last few decades, significant progress has been achieved in the research field of 3D modeling. Researchers have introduced various easy-to-use yet powerful modeling techniques: sketch-based 3D modeling techniques, assembly-based modeling techniques, etc. In these methods, 3D modeling is a craft-like process, that is, the user knows what he/she wants to make before he/she makes it. However, 3D modeling is also an open-ended creative art process, in which the direction or goal may change in an unpredictable way. Therefore, it is of theoretical and practical value to investigate how to provide creativity support to help users achieve best outcome in such an open-ended modeling process.

A significant stream of creativity support 3D modeling techniques focus on suggesting parts, which could be augmented to the current design. These techniques are characterized by requiring the pre-segmented (and/ or pre-labeled) 3D model database. The parts can be used are restricted to the predefined ones, which limits the design space. Another kind of creativity support 3D modeling methods is the shape suggestion method. This kind of techniques is more appropriate to deal with shapes sharing the same structure from the same category. The main limitation of shape suggestion methods is that they are less appropriate to generate shapes with various topological structures. In the 3D character animation pipeline, modeling is only the first stage. Once a model has been created, it will undergo skinning and fabrication-oriented analysis (e.g., balancing analysis, joint optimization, etc.). Directly adding skinning and fabrication-oriented analysis as a post-process does not allow for real-time interaction, because "designing-animating-fabrication-oriented 3D processing" is an iterative process. Simply combining the three

steps may lead to frequent switching between different tools, which heavily decreases the system efficiency.

In this work, we investigate the problems mentioned above. The main contributions of this work are as follows:

- We present a system to assist artists in the creative design of a large collection of various 3D monsters. Starting with a small set of shapes manually selected from different categories, our system iteratively generates sets of monster models serving as the artist's reference and inspiration. The key component of our system is a so-called creature grammar, which is a shape grammar tailored for the generation of 3D monsters. Creature grammar evolves the arrangement and number of shape parts, while preserving the semantics prescribed as prior knowledge.
- We present Sketch2Cut, a sketch-based on-demand part suggestion method for creating shapes using sketches. After a user draws a simple abstract sketch which depicts his/her intention, our method creates a 3D proxy based on the input sketch as a search key to retrieve a list of candidate parts, each of which is segmented on-the-fly from the 3D models in the input database using partial matching. Our method first converts the 3D partial matching problem into the multi-view 2D partial matching problem. 3D part corresponding to the user intent from the 3D shape is then progressively extracted by a coarse-to-fine strategy. In contrast to prior work, our proxy-to-design approach can customize arbitrary parts from input models and does not rely on predefined parts, which significantly broadens the design space.
- We present a unified framework by combining design, skinning and fabrication-oriented analysis. With a small set of preprocessed watertight skinned objects, our system iteratively evolves them into a new shape set. Once the user chooses model of interest, our system merges the surfaces and skeletons, and updates the skinning

weights to make it ready for animation. The model can also be converted into a fabricatable object after the fabrication-oriented analysis. Our method first merges the surface of the part and the skeleton of the part. The skinning of the merged part is then quickly updated. The joint position and radius is then optimized by the fabrication-oriented skeleton optimization algorithm. Finally we optimize the inner mass distribution, making sure the multi-view balancing. Our system provides a whole pipeline from modeling to animation and fabrication to avoid the frequent switching between different tools.

**Keywords:** Creativity support modeling, Monster modeling, Creature grammar, On-the-fly segmentation, Sketch-based modeling, Fabrication, Skinning, Multi-pose balancing



# 目录

摘要 .....	i
Abstract .....	iii
第1章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 创造力支持的造型技术 .....	3
1.2.1 浏览式造型 .....	4
1.2.2 基于样例的造型 .....	5
1.2.3 基于遗传算法的造型 .....	7
1.2.4 基于协同创作的造型 .....	8
1.3 本文内容和结构 .....	9
1.4 本章小节 .....	11
第2章 创造力支持的三维虚拟生物造型 .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 相关工作 .....	15
2.3 方法概述 .....	15
2.4 生物语法 .....	16
2.4.1 术语 .....	17
2.4.2 生产流程 .....	18
2.4.3 生产规则 .....	18
2.5 虚拟生物模型生成技术 .....	25
2.5.1 多样性控制 .....	26
2.6 实验结果 .....	27
2.6.1 生产规则 .....	30
2.6.2 专家评估 .....	30
2.6.3 用户测试 .....	32
2.7 本章小结 .....	33
第3章 针对浏览式草图造型的按需部件建议技术 .....	37
3.1 引言 .....	37
3.2 方法概述 .....	39

---

3.3 快速局部匹配结构 .....	41
3.4 候选模型搜索 .....	44
3.4.1 代理模型创建 .....	44
3.4.2 轮廓描述符 .....	45
3.4.3 模型搜索 .....	45
3.5 逐步式部件提取 .....	46
3.5.1 超面片图表示 .....	46
3.5.2 模糊部件识别 .....	49
3.5.3 由粗到细地边界优化 .....	49
3.5.4 粗层次部件提取 .....	50
3.5.5 细层次部件提取 .....	51
3.6 实验结果 .....	51
3.6.1 应用 .....	52
3.6.2 快速的轮廓感知的局部匹配 .....	55
3.6.3 对比 .....	57
3.7 本章小结 .....	64
<b>第4章 针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术 .....</b>	<b>65</b>
4.1 引言 .....	65
4.2 相关工作 .....	67
4.2.1 骨架绑定 .....	67
4.2.2 面向三维打印的模型分析 .....	67
4.3 方法概述 .....	68
4.4 模型融合 .....	69
4.4.1 表面融合 .....	70
4.4.2 骨架融合 .....	71
4.4.3 蒙皮权重更新 .....	73
4.5 面向三维打印的模型分析 .....	74
4.5.1 面对三维打印的骨骼优化算法 .....	74
4.5.2 多姿态模型平衡算法 .....	75
4.5.3 机械关节设计算法 .....	78
4.6 实验结果 .....	78

---

4.7 本章小结 .....	79
<b>第5章 总结与展望 .....</b>	<b>83</b>
5.1 本文总结 .....	83
5.2 工作展望 .....	85
5.2.1 结合用户意图的模型建议技术 .....	85
5.2.2 历史驱动的部件建议技术 .....	86
5.2.3 拆解友好型的支撑材料设计方法 .....	86
5.2.4 面向三维打印的部件建议技术 .....	87
<b>参考文献 .....</b>	<b>97</b>
<b>攻读博士学位期间主要研究成果 .....</b>	<b>99</b>

## 图目录

图1.1 非常规部件构成的模型 .....	3
图1.2 交互式设计展示板 .....	4
图1.3 建议部件的例子 .....	5
图1.4 Shuffer系统造型的例子 .....	6
图1.5 模型插值的例子 .....	6
图1.6 虚拟生物其及对应的编码 .....	7
图1.7 适应陆地环境的生物的进化结果 .....	7
图1.8 变异操作与交叉操作示意图 .....	9
图1.9 Exquisite Corpse游戏结果的例子 .....	10
图2.1 来自电子游戏或电影的虚拟生物角色 .....	13
图2.2 方法流程示意图 .....	15
图2.3 具有奇异结构的虚拟生物模型展示 .....	16
图2.4 增加规则示意图 .....	21
图2.5 插入规则示意图 .....	22
图2.6 交换规则示意图 .....	22
图2.7 组合规则示意图 .....	23
图2.8 几何规则示意图 .....	25
图2.9 虚拟生物造型例子 .....	27
图2.10 虚拟生物造型例子 .....	28
图2.11 不同多样性控制方法所得结果的多样性曲线图 .....	29
图2.12 不同方法所得结果的多样性曲线图 .....	29
图2.13 使用/不使用增加规则所得结果的多样性曲图 .....	30
图2.14 使用/不使用增加规则所得结果 .....	31
图2.15 调查问卷结果 .....	32
图2.16 专家评估过程中生成的模型 .....	32
图2.17 启发模型在各代模型内所占比例 .....	34
图2.18 平庸模型在各代模型内所占比例 .....	34
图2.19 各代模型得分平均值曲线 .....	35

---

图2.20 我们方法与F&D方法所得模型及其分数 .....	35
图3.1 造型流程示意图 .....	38
图3.2 交互界面截图 .....	39
图3.3 系统流程示意图 .....	40
图3.4 模型轮廓与查询轮廓匹配示意图 .....	42
图3.5 随机混合KNN图 .....	43
图3.6 三种基础代理模型 .....	44
图3.7 非常规分割的例子 .....	47
图3.8 三维模型超面片图建立过程示意图 .....	47
图3.9 超面片在分割部件上的分布示意图 .....	48
图3.10 复杂轮廓及其关系示意图 .....	49
图3.11 系统造型结果的例子 .....	52
图3.12 用我们系统设计的模型 .....	53
图3.13 模型变异的例子 .....	54
图3.14 部件建议的例子 .....	55
图3.15 多尺度部件建议的例子 .....	56
图3.16 一位测试者正在操作造型系统 .....	59
图3.17 Ours系统与PreSeg系统造型结果 .....	60
图3.18 具有代表性的建议部件及其得分 .....	61
图3.19 具有代表性的建议部件及其非规则度量值 .....	63
图3.20 调查问卷统计结果 .....	64
图4.1 创新性地造型的一个例子 .....	66
图4.2 方法流程图 .....	69
图4.3 结构变异工具示意图 .....	70
图4.4 表面融合示意图 .....	71
图4.5 BBT示意图 .....	72
图4.6 骨架融合示意图 .....	73
图4.7 脏顶点和脏骨骼示意图 .....	74
图4.8 面向三维打印的关节优化过程示意图 .....	76
图4.9 多姿势模型平衡算法流程示意图 .....	77

---

图4.10 两类关节示意图 .....	78
图4.11 “别针”示意图 .....	79
图4.12 创新性地造型的一个例子 .....	80
图4.13 创新性地造型的一个例子 .....	81

## 表目录

表3.1 四种不同方法的搜索效果对比 .....	57
表3.2 非典型部件与典型部件在模型内所占比例统计结果 .....	59
表3.3 建议部件得分统计结果 .....	61
表3.4 非规则度量值统计结果 .....	62
表3.5 各分值内非典型部件与典型部件所占比例统计结果 .....	62



# 第1章 绪论

## 1.1 引言

三维模型，做为一种基本元素，与图形学的各个研究领域都有密不可分的联系。在三维影视特效、计算机动画及电子游戏中，三维场景及三维角色模型是不可获缺的组成部分。三维造型是借助专门的软件生成物体的三维表面的数学表示，进而得到三维模型的过程。在计算机图形学中，开发易使用且功能强大的三维造型技术一直是关键的基础的研究问题。

现有大量的商业造型系统可以满足各种造型需求：基于底层几何元素表示的造型系统Maya<sup>®</sup>、3DS Max<sup>®</sup>、AutoDesk<sup>®</sup>等；UV编辑系统UVLayout<sup>®</sup>、Unfold3D<sup>®</sup>等；细节雕刻系统ZBrush<sup>®</sup>、Mudbox<sup>®</sup>等。这些系统功能强大，却非常复杂，需要经过漫长的培训与学习才能被掌握。因此，这些软件更多地局限于专业人员使用。

为了简化用户操作，降低造型难度，同时满足业余爱好者三维创作的需要，研究人员提出基于草图的造型技术<sup>[1]</sup>。这类技术要求用户绘制草图勾勒物体轮廓，系统以轮廓为约束恢复出三维模型。基于草图的造型技术极大地方便了用户造型，同时具有显而易见的缺点：首先，造型结果缺少丰富的几何细节；其次，手绘物体轮廓对没有绘画基础的业余用户是个很大的挑战。

针对草图式造型的缺点，Funkhouser等人于2004年提出基于组件重用思想的造型技术<sup>[2]</sup>。组件重用思想是用户提出造型概念，系统从模型数据库内提取可用部件供用户组合模型。基于该思想的组合式造型方法简便易用且功能强大，因而得到广泛关注<sup>[3,4]</sup>。这类造型方法的共性是将三维造型视为工艺过程，要求用户在造型之前有明确的造型目标<sup>[5]</sup>。然而，三维造型也是一种艺术。艺术创作是个开放式的（open-ended）过程，其最大特点是目标不确定<sup>[5]</sup>。在这个开放式的过过程中创作方向和目标经常会发生不可预知的改变。创作人员在该过程中会不断进行各种尝试和探索，比较不同策略与方法的效果。显然这类要求用户有明确造型目标的技术不适用于开放式造型。

在开放式造型过程中，创造性思维起着决定性的作用。在国外，创造力属于人类认知学的研究范畴。现代创造力认知理论认为创造力是标准认知过程的一个普遍特征<sup>[6,7]</sup>。创造力通常被定义为提出新颖且有价值的产品的过程<sup>[8]</sup>。“新颖”并不是指创新性产品的每个部分都是新的。现代创造力认知理论强调了组合组件构成创新性产品的中心地位<sup>[9]</sup>。创造力认知学的研究结论指出只要解决方案构成要素的组合形式是新的，哪怕直接组合现有解决方案构成要素也不一定会降低产品创新性<sup>[10]</sup>。即便是极具创新性的产品都会融合已有产品的某些元素<sup>[6]</sup>。如上研究结论为开发创造力支持的工具（Creativity support tool）奠定了理论基础。创造力支持的工具通过提示多样的合适的解决方案或解决方案构成要素，辅助用户提出创新性的解决方案。

在三维造型研究领域，研究人员提出创造力支持的造型技术。创造力支持的造型技术的目标是为用户造型提供灵感，辅助用户得到创新性的造型结果。其中一类创造力支持的造型技术专注于建议可用部件<sup>[11-15]</sup>。这类技术基于几何或语义兼容性，从预分割的三维模型数据库内提取部件提示给用户。模型预分割往往限于常规分割（例如，人分割成头、躯干、胳膊与腿四部分），得到常规部件。然而，一些极具创意的模型往往由非常规部件构成（图1.1）。模型预分割限制了用户造型空间，局限了系统对用户创造力的支持<sup>[16]</sup>。模型建议技术<sup>[17,18]</sup>是另一类创造力支持的造型技术。这类技术的输入一般是具有相同结构的同类模型，产生的是与输入具有相同结构的同类模型。其最大缺点是不太适合产生拓扑结构变异。

在计算机动画中，造型仅是第一步，编辑动画乃至三维打印制造物理实体才是最终目标。编辑动画之前需要骨骼蒙皮。三维打印之前需要做面向三维打印的模型分析，如，平衡性分析，关节优化等。然而，现有的创造力支持的造型系统仅限于造型。简单地将蒙皮和面向三维打印的模型分析做为造型的后续处理步骤无法解决问题。因为，“造型设计-蒙皮-面向三维打印的模型分析”三个步骤不断迭代，简单组合现有技术导致用户在不同模块间频繁变换，降低效率。现有的工

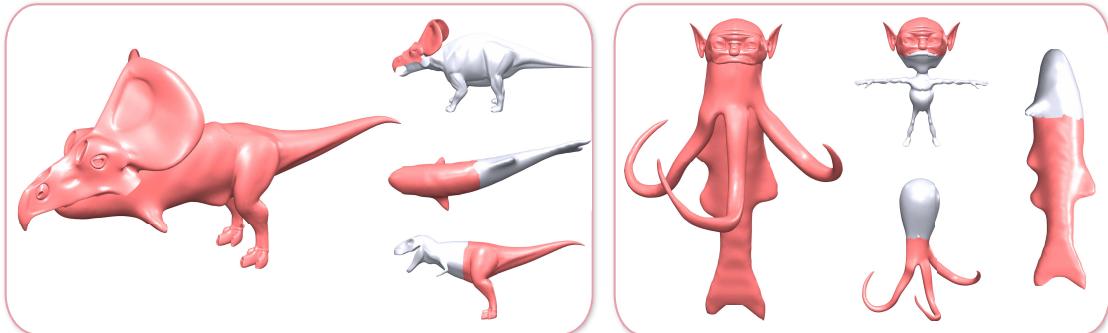


图 1.1 非常规部件构成的模型。在每个子图内，左侧是组合得到的模型，右侧是构成该模型的部件（红色）。

作已将草图式造型与动画编辑融合至同一框架<sup>[19,20]</sup>。但在创造力支持的造型背景中，尚无工作将面向三维打印的模型分析无缝集成到造型框架。

针对当前创造力支持的造型技术不适合产生拓扑结构变异，依赖预分割的模型数据库限制造型空间及创造力支持，缺少蒙皮与面向三维打印的模型分析这三方面的问题，本文进行了深入研究并提出了一系列新技术，取得重要突破。本文通过提出生物语法，实现了造型具有奇异拓扑结构的生物模型的功能；通过提出草图驱动的三维模型局部匹配技术与三维模型超面片图表示，实现了实时个性化部件快速搜索与分割。针对当前创造力支持的造型系统缺少蒙皮与针对三维打印的模型分析功能的问题，本文提出一个统一的框架，将造型、蒙皮与面向三维打印模型分析三者无缝结合到一起。接下来，本文首先回顾创造力支持的造型技术的研究背景和现状，然后指出本文研究目标和内容。

## 1.2 创造力支持的造型技术

创造力支持的造型技术的目标是为用户的造型过程提供灵感，辅助用户得到创新性的结果。这类技术的基本思路是向用户提示造型部件或造型结果；这些部件或结果中某些是用户意想不到的，从而激发用户灵感，得到创新性的结果。创造力支持的造型技术大致可以分为四类<sup>[21]</sup>：浏览式造型技术，基于样例的造型技术，基于遗传算法的造型技术，基于协同创作的造型技术。

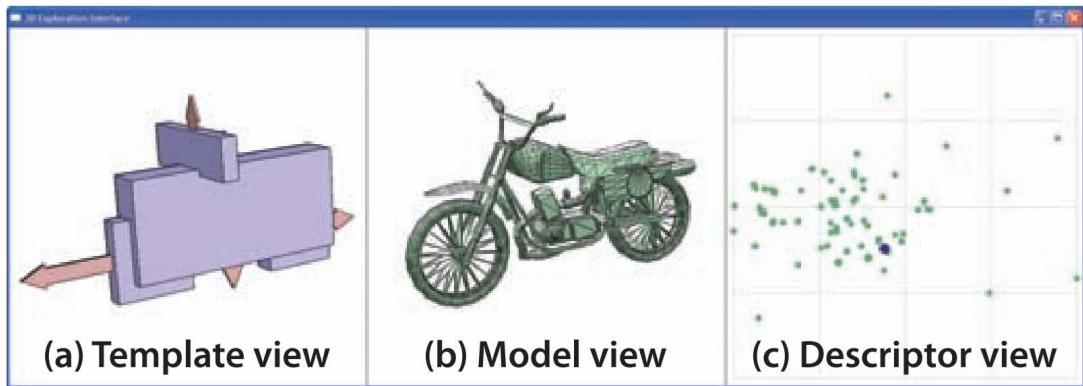


图 1.2 交互式设计展示板<sup>[27]</sup>。用户操作模型模板 (a)，系统在参数空间采样 (c) 生成模型并展示给用户 (b)。

### 1.2.1 浏览式造型

自动地随机生成设计结果，展示出来供用户浏览；某些设计结果是用户意想不到的，从而激发用户灵感，这便是浏览式造型技术的思想。设计结果的展示界面，设计展示板（Design Galleries），是浏览式造型技术的标志。在浏览式造型技术中，浏览过程也是造型过程。浏览式造型技术首先将设计结果参数化并投影至参数空间，然后在参数空间内随机采样生成结果，通过设计展示板展示出来以启发用户。最初的设计展示板技术用于辅助用户设置参数<sup>[22]</sup>，后来辅助用户设计家具<sup>[23]</sup>。后续的研究工作中，设计展示板更加智能，并不是简单地展示随机生成的结果，而是允许用户在一定程度上控制浏览过程或根据用户的选择生成个性化的结果，从而导引用户向其喜欢的方向探索<sup>[24–28]</sup>（如图1.2）。

浏览式造型技术不必给出完整的造型结果，有时仅建议构成三维模型的某些要素，比如，建议部件<sup>[2,3,14]</sup>。Chaudhuri等人提出基于数据驱动的部件建议技术，基于几何兼容性在三维模型数据库内搜索可添加到当前模型的部件并提示给用户<sup>[11]</sup>（如图1.3）。后来，Chaudhuri等人提出概率推理模型<sup>[12]</sup>，通过几何与语义兼容性提示可用部件。还有的工作<sup>[15]</sup>允许用户在语义层次上浏览可用部件。Xie等人<sup>[13]</sup>提出Sketch-to-Design技术，以当前模型为背景，基于用户草图搜索可用部件。



图 1.3 建议部件的例子<sup>[11]</sup>。给定当前模型（左侧黄绿色模型），系统基于几何兼容性从数据库内搜索出合适的部件，做为建议提示给用户（右侧红色部件）。

### 1.2.2 基于样例的造型

基于样例的造型技术要求用户给定一组样例模型（可以由用户设计或者从数据库内挑选），系统基于样例产生新的符合样例内在逻辑的模型。结果中某些是用户意想不到的，从而激发用户灵感，辅助用户提出创新性的设计。

基于样例的造型的关键点与难点是理解输入模型的内在逻辑，即提炼出样例的共性与个性。新的模型就基于这些内在逻辑得到。然而，理解输入模型是个非常困难的问题，现有的技术大多限于处理某一类或几类数据，还非常局限。Baxter等人<sup>[29]</sup>提出一个用于合成涂鸦笔画的隐性变量方法（latent variable method）。该方法要求用户输入若干涂鸦笔画，通过在对应涂鸦间插值得到新的涂鸦笔画。在Shuffler系统<sup>[4]</sup>中，首先对数据库模型做一致性分割，并计算出各部件间对应关系，通过交换对应组件得到与输入模型具有相同拓扑结构的变异

模型（图1.4）。Assa等人<sup>[30]</sup>于2012年提出More of the same技术，专门用于合成树叶。该技术将输入的树叶分解成若干层，然后通过一种新的颜色层/空间层诱导算法生成新的树叶。后续的工作中，<sup>[17]</sup>通过对概率推理模型采样合成新模型，<sup>[31]</sup>通过在功能相同的子结构间交换组件得到新模型，<sup>[32]</sup>通过在输入模型的空间结构图上进行拓扑变异操作得到插值模型（图1.5）。

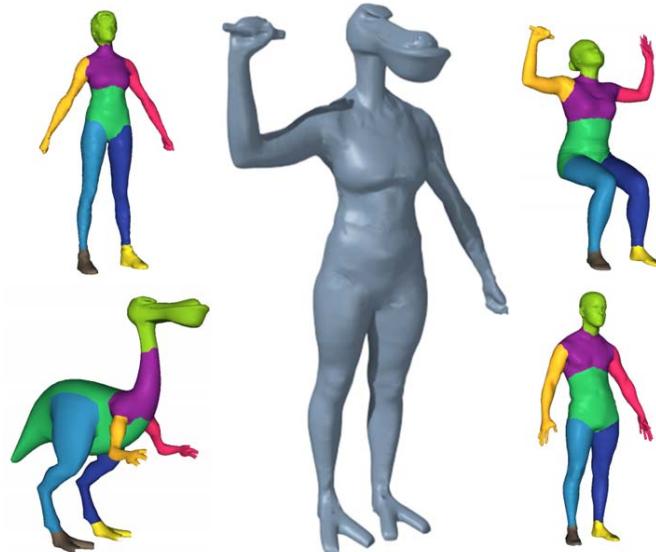


图 1.4 Shuffer系统<sup>[4]</sup>造型的例子。用户在四个模型间选择组件，得到中间的造型结果。



图 1.5 模型插值的例子<sup>[32]</sup>。给定两个椅子模型（最左侧与最右侧），通过拓扑变异操作生成一系列插值模型（中间的蓝色模型）。

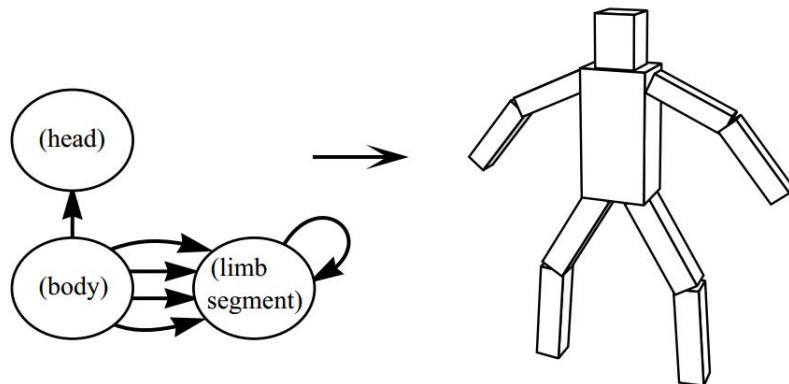


图 1.6 虚拟生物其及对应的编码<sup>[34]</sup>。左侧是虚拟生物对应的编码。右侧是虚拟生物，由一组分层组织的三维刚体部件构成。

### 1.2.3 基于遗传算法的造型

遗传算法是模拟生物进化过程的计算模型<sup>[33]</sup>。其理论基础是达尔文的生物进化理论，即以初代种群为起点，逐代进化出越来越优的种群。为了产生新一代，该算法首先基于交叉（crossover）与变异（mutation）两种遗传算子（genetic operators）得到新个体，然后基于适应度（fitness）选择出最优个体做为新一代。如上过程不断重复，整个种群像自然进化一样，得到比前代更适应环境的后代种群。进化过程中可能会产生用户意想不到的个体，从而激发用户灵感。

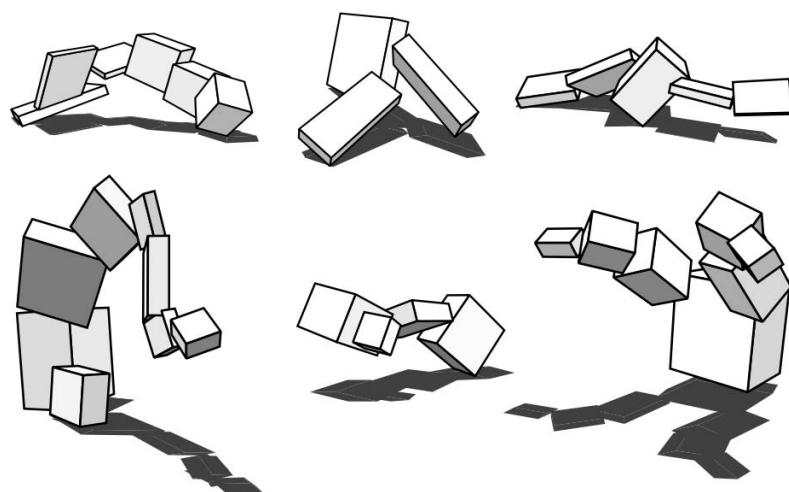


图 1.7 适应陆地环境的生物的进化结果<sup>[34]</sup>。

Karl Sims最早将遗传算法引入图形学界，其于1991年采用遗传算法设计纹

理<sup>[35]</sup>，后来进化虚拟生物<sup>[34]</sup>。在Karl Sims的工作中，虚拟生物由一组分层组织的三维刚体部件构成。这些虚拟生物被编码成有向图（如图1.6），遗传算子是图上的编辑操作，适应函数由进化目标决定。比如，当进化目标是选择适应陆地环境的生物时，适应函数设计成选择行走速度更快的生物（如图1.7）。后续有很多研究工作，比如Pilat等人<sup>[36]</sup>提出Creature Academy技术进化虚拟生物，Pollack等人<sup>[37]</sup>基于遗传算法设计机器人。

在2012年，Xu等人<sup>[18]</sup>提出fit and diverse技术，基于遗传算法进化人造物体模型（如，台灯，桌子，椅子等）。Fit and diverse技术以一组同类模型为输入，通过随机施加变异操作（对模型部件做变形）与交叉操作（基于模糊对应在不同模型间交换部件）产生新个体（如图1.8）。该技术考虑到用户偏好与模型组多样性，通过维护一组符合用户喜好且多样化的模型激发用户造型灵感。

#### 1.2.4 基于协同创作的造型

协同创作是一种管理方式，也是一种经济策略，将各方（比如，公司，不同的团体等）组织到一起，通过合作达到共同的目标。如果通过协同创作产生意想不到的元素，进而激发了参与者的灵感，得到创新性的结果，那么协同创作就是协同创新。想要在提高该过程产生创新性成果的概率，需要协同创作的各方在一定程度上对彼此隐藏创作结果。协同创作各方只需要知道自己在整个创作项目中的位置及所扮演的角色，协同创作的经典例子是Exquisite Corpse。Exquisite Corpse是一种游戏。比如，由一个人绘制人形生物的上半身，另一个人绘制下半身，绘制下半身的人并不知道上半身的绘制结果，只知道上半身的接口。通过这种方式，可以得到很多富于想像力的结果（如图1.9）。协同创作的思想被很多领域采用，Picbreeder等人<sup>[38]</sup>提出协同的图像进化平台，通过不同用户共用进化一组图像，得到创新性的结果；Davis等人<sup>[39]</sup>采用协同创作的模式创作二维抽象艺术画。在三维造型领域，Talton等人<sup>[26]</sup>提出浏览式造型技术，允许用户在协同设计空间内浏览造型。

当协同创作的一方是计算机时，就成为人机协同创作。此时的计算机便成为创造力支持的协同创作工具<sup>[40]</sup>。

图 1.8 变异操作 (a) 与交叉操作 (b) 示意图<sup>[18]</sup>。

### 1.3 本文内容和结构

本文围绕创造力支持的造型技术展开研究，针对现有技术存在的不足提出一系列新方法。本文主要研究内容如下：

- 第2章，针对创造力支持的造型技术不适合产生拓扑结构变异，我们提出生物语法，实现了造型具有变异拓扑结构的生物模型的功能。该生物语法，模拟艺术家造型虚拟生物的过程，具有四种操作（增加、插入、合并、交换），将输入的具有常规结构的生物模型，逐步进化成具有奇异结构的生物

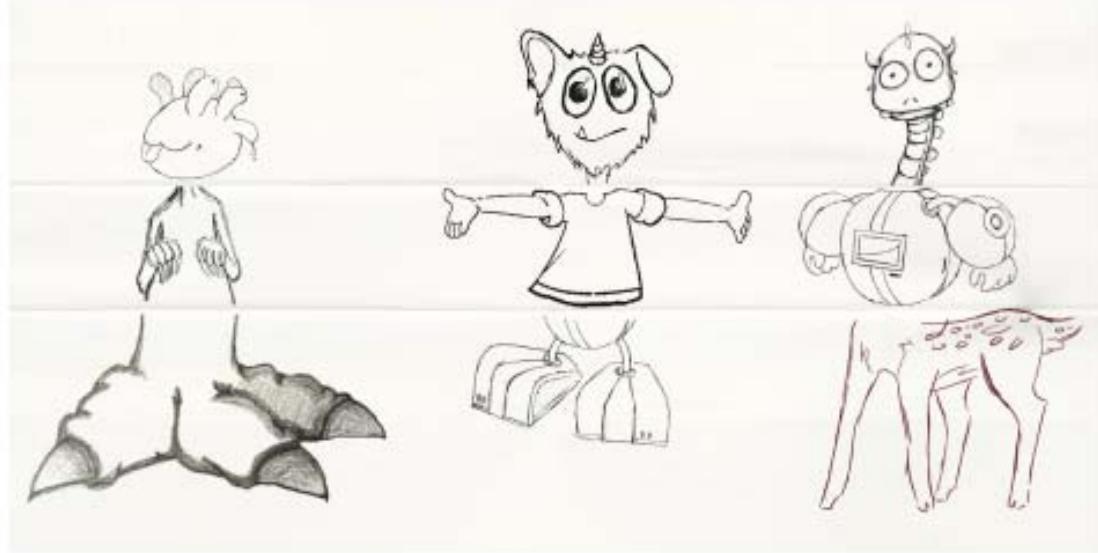


图 1.9 Exquisite Corpse 游戏结果的例子。

模型。我们的系统提示一代代多样的具有奇异结构的生物模型，激发了用户设计灵感，辅助用户快速地造型大量的各式各样的虚拟生物模型。

- 第3章，为了解决现有技术依赖预分割的模型数据库导致创造力支持受限的问题，本文提出基于草图的个性化部件建议技术。该技术包括两个组成部分，一种基于草图的三维模型局部匹配技术；一种基于超面片图表示的三维模型分割技术。三维模型局部匹配技术实现实时部件搜索。三维模型分割技术实现三维部件快速分割。该技术可实时地由数据库内搜索并切割与草图相匹配的部件。由于不受预分割的限制，系统提示的部件不是仅限于预分割得到的常规部件。
- 第4章，针对现有的创造力支持的创造系统不支持动画编辑与针对三维打印的模型分析的问题，本文提出一个统一的框架，融合了创造力支持的造型、动画编辑与针对三维打印的模型分析功能。该框架实现了三个步骤的无缝结合，利于用户的创造性设计过程。
- 第5章，总结本文研究工作并指出未来的研究方向。

## 1.4 本章小节

本章首先从图形学研究及工业应用的角度引出“开发易使用且功能强大的三维造型技术”这个问题；然后介绍工业界与研究界提出的解决方案及各方案的优缺点；接着指出本文要解决的问题；然后介绍了创造力支持的造型技术的研究背景及现状，最后概述本文的主要研究内容和文章组织结构。



## 第2章 创造力支持的三维虚拟生物造型

### 2.1 引言

虚拟生物经常出现在电影或者游戏中。它们的最大特点是具有奇异的拓扑结构与变异的外形，引起观众或玩家恐惧或者厌恶。某些怪物非常有名，为观众或玩家津津乐道。比如，来自电子游戏*Might & Magic: Heroes*的*Fate Spinner*（图 2.1(a)）与*Lamassu*（图 2.1 (b)）；来自哈里波特系列电影的*Centaur*（图 2.1 (c)）。设计与造型这样的怪物需要想像力与创造力，这对艺术家来讲非常具有挑战性。尤其是当我们需要很多各式各样的怪物时，设计与造型会更加困难。

在图形学研究领域，创造力支持的三维造型技术受到越来越多的关注。正如Shneiderman等人<sup>[41]</sup>指出，支持自由探索是创造力支持系统的关键特征。所以，三维造型领域的研究人员投入大量精力与时间研究支持用户自由探索造型空间且提供个性化造型结果的技术。其中一类技术是基于数据驱动的部件建议技术<sup>[11,12]</sup>。相对部件建议技术，模型建议技术<sup>[17,18]</sup>更进一步，不仅能够激发用户设计灵感，还能扩增三维模型数据库。这使得模型建议技术恰好适合造型具有意想不到的拓扑结构与外形的虚拟生物。然而，现有的模型建议技术更适用于造型属于同一类且具有相同拓扑结构的模型。比如，输入一组台灯模型（台灯被预分割为灯头，灯身，灯座三部分），产生的也是台灯模型（由灯头、灯身与灯座三部

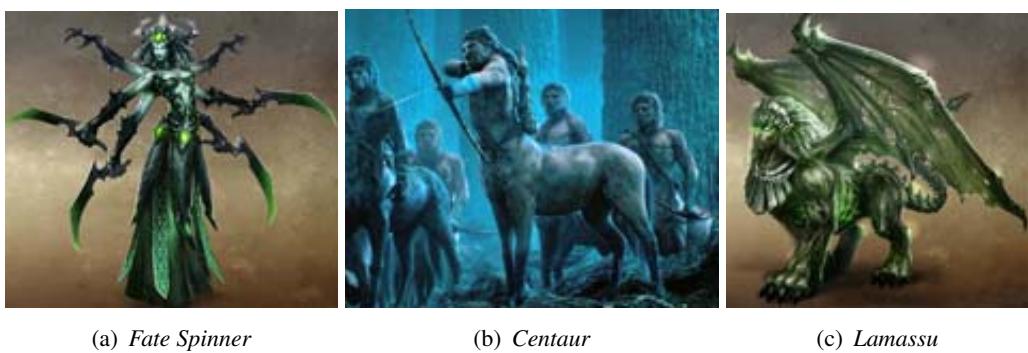


图 2.1 三个来自电子游戏或电影的具有奇异拓扑结构的虚拟生物角色

分构成)。然而,虚拟生物往往具有来自不同类生物(比如,人类,鸟类与四肢动物类)的特点。而且,它们的最大的特征是具有奇异的拓扑结构。

本章中,我们提出一种创造力支持的过程式造型方法,辅助用户从一组普通生物模型开始,快速地设计与造型大量的各种各样的虚拟生物模型。本系统的关键技术是生物语法。生物语法形式化地定义了将普通生物“进化”成具有奇异拓扑结构且保持语义约束的虚拟生物的方法。生物的语义约束包括各部件间的相邻关系,同类型部件的数量及部件间对称关系。输入若干来自不同类生物的模型(例如,人类,鸟类及四肢动物类),我们的系统采用生物语法,迭代地产生一组组各式各样的虚拟生物模型,做为建议展示给用户。随着迭代的进行,虚拟生物模型的结构越来越复杂,给用户更多的灵感。

我们观察到,艺术家在设计虚拟生物时,往往会展开规则生物模型开始,尝试以不同的方式改变其拓扑结构,得到非常规模型。艺术家常用的改变拓扑结构的方法有3种:(1)增加,将某部件复制一份或者两份(例如,将人型生物的胳膊复制3份;如图2.1(a));(2)合并,将两个躯干串联到一起(例如,将人型生物的上半身与四肢动物型生物的下半身合并构成半人马型生物;如图2.1(b));(3)插入,为当前模型增加新类型部件(例如,为四肢动物型插入翅膀;如图2.1(c))。基于如上观察,我们提出生物语法,一种针对生成虚拟生物而特化的形状语法(Shape Grammar)。生物语法在保持生物语义约束的前提下,“进化(Evolve)”选取的两个模型。我们的生物语法有3类规则:(1)选择规则,从一组模型(规则)中选择出合适的模型(规则);(2)结构规则,改变模型的拓扑结构;(3)几何规则,基于结构配置信息得到虚拟生物模型几何实体。基于生物语法,我们的方法可以自动地改变常规生物的结构,提供给用户看起来真实且结构奇异的虚拟生物模型。

本章接下来的内容安排如下:首先,介绍相关工作与研究背景,包括基于语法的过程式造型技术与基于草图的造型技术;然后,概述我们方法的流程;接着,介绍我们提出的生物语法;然后,介绍虚拟生物模型生成技术;接着,给出实验结果;最后,总结本章内容。

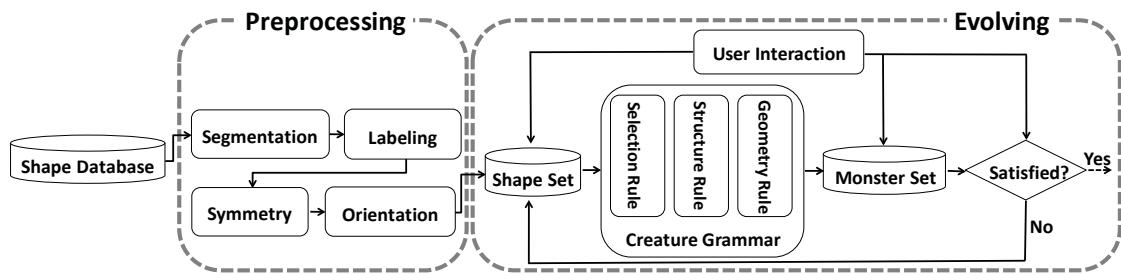


图 2.2 方法流程示意图。在预处理阶段，我们将数据库模型分类，对齐，按语义分割并标记。检测并存储部件间对称与相邻关系。在模型进化阶段，用户从数据库内选择出一组模型做为输入。我们的方法基于当前代模型生成新一代虚拟生物模型。该过程迭代进行，直至用户满足为止。

## 2.2 相关工作

**基于语法的过程式造型** 基于语法的过程式造型技术在图形学领域有广泛的应用。自从Lindenmayer提出L-system<sup>[42]</sup>，L-system就被广泛应用于植物造型<sup>[43]</sup>及城市造型<sup>[44-46]</sup>。后来，针对L-system只能处理线性物体的局限，shape grammar<sup>[47]</sup>被提出用于处理二维元素。Shape grammar又被进一步发展成split grammars，应用于城市造型<sup>[48]</sup>。Split grammars又被进一步应用于基于点云及图像做城市造型<sup>[49]</sup>。在<sup>[50]</sup>中，允许交互编辑语法规则并实时给出视觉效果。最后，研究人员尝试将基于物理的造型与基于过程式系统结合<sup>[51]</sup>。

**基于草图的造型** 基于草图的造型是个研究得非常多的话题<sup>[52]</sup>。大多数基于草图的建模系统都是通过用户输入的二维轮廓得到三维模型。<sup>[1,53-55]</sup>基于用户输入的草图膨胀得到三维模型。SmoothSketch系统<sup>[56]</sup>从复杂草图（包括T型接口，杯状等）得到三维模型。其它的系统<sup>[57,58]</sup>将用户输入的二维笔画做为控制把柄，控制三维模型变形。ILoveSketch系统<sup>[59]</sup>允许专业用户创造复杂的三维概念线框图。

## 2.3 方法概述

图 4.2示意我们方法的整个流程。在预处理阶段，我们将数据库内模型按结构分为三类，鸟类，人类和四肢动物类。每个模型按语义分割成部件并做标记。

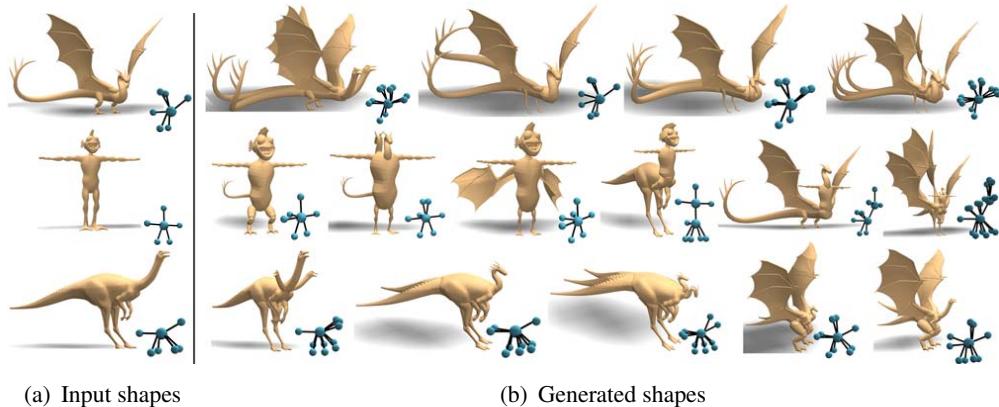


图 2.3 输入一组来自不同类的常规生物模型，我们的方法迭代地产生一组组具有奇异结构的虚拟生物模型。模型拓扑结构示意图见各模型的右下角。

模型内各部件间的对称关系与相邻关系被检测出来并存储。所有模型做归一化并对齐。在进化阶段，首先要求用户从三维模型数据库内选择出若干属于不同类的模型，然后我们的方法采用生语法，基于当前代模型生成下一代模型。系统一组组地产生新一代模型，并要求用户按自己的喜好标记（“喜欢”或“不喜欢”）标记每组模型。标记为“不喜欢”的模型被移至背景模型集合。系统不断地提示新模型，直至用户满意的模型数量达到预定的值。此时，系统从当代模型，用户满意的模型，背景模型内选择一个子集，做为下一代模型。下一代模型集合与当前背景模型集合中选择出一个子集做为下一代背景模型。输入模型与产生的部分虚拟生物模型如图 2.3。注意，为了保持生物体的对称约束，我们为处于同一对称组内的部件施加相同的规则。

## 2.4 生物语法

在本节内，我们介绍生物语法。首先，我们给出生物语法的相关术语；然后，简单介绍生物语法的生产流程，即由常规则生物模型得到具有奇异结构的虚拟生物模型的过程；最后，我们详述生物语法内的3类生产规则，包括选择规则，结构规则与几何规则。

## 2.4.1 术语

**模型 (Shape)** 模型并不是指那些构成最终模型的三维体素（比如，正方体，球体，圆柱体等）<sup>[44,60]</sup>，而是指虚拟生物的几何实体。

**抽象模型 (Abstract Shape)** 抽象模型是描述模型三维布局的结构化字符串。它是一组元部件（元部件定义见下）的配置信息。

**元部件 (Meta-part)** 元部件是一个部件的逻辑实体<sup>[18,61]</sup>，例如，腿，胳膊等。元部件以如下方式表示：

$$\mathbf{M}(m_0, m_1, m_2, m_3, m_4),$$

其中， $m_0$ 是元部件的类型， $m_1$ 是元部件在其抽象模型上的标识， $m_2$ 是元部件对应的几何实体的标识， $m_3$ 是元部件在模型上所处的位置， $m_4$ 是元部件相连接的躯干超部件。类型相同（ $m_0$ 取值相同）的元部件构成元部件族。

**超部件 (Super-part)** 超部件是一组同质同位置的元部的统称。以双头龙模型的头部为例，每只头是一个元部件（类型为头），两只头在一起称为超部件（类型为头）。超部件以如下方式表示：

$$\mathbf{S}(s_0, s_1, s_2),$$

其中， $s_0$ 是超部件的类型， $s_1$ 是属于超部件的元部件集合， $s_2$ 是超部件的排列方式。同质超部件构成超部件族。

**等位超部件 (Allelic Super-part)** 来自同一超部件族的超部件是等位超部件。等位超部件描述了超部件间的可交换性。来自鸟类、人类、四肢动物类的头超部件互为等位超部件。鸟类的翅膀与人类的胳膊都位于躯干的上部，翅膀与胳膊是等位超部件。鸟类的下肢、四肢动物的后肢与人类的腿部是等位超部件。

**模型结构 (Shape Structure)** 模型结构包括部件与部件间的关系<sup>[61]</sup>。一个部件

是一个语义层次的逻辑实体，定义了该部件的几何属性。部件间的关系即为这些部件间的相互位置，方向等。

**常规结构（Regular Structure）** 常规结构指常规生物（鸟类，人类，和四肢动物类）的模型结构。

**奇异结构（Abnormal Structure）** 奇异结构指对常规模型变异或组合后得到的模型的结构。

## 2.4.2 生产流程

与之前的用于造型的语法<sup>[44,60]</sup>不同，我们的生物语法以一组模型为输入。在进化过程中，生物语法通过组合或扩展一对模型的结构配置得到新模型。该过程如下：

1. 通过选择规则从模型集合中选择一个基础模型（Base Shape）和一个辅助模型（Assist Shape）；
2. 对抽象基础模型施加结构规则得到抽象结果模型；
3. 对抽象结果模型施加几何规则得到结果模型；

重复该过程，直至产生足够数量的虚拟生物模型。

## 2.4.3 生产规则

### 2.4.3.1 选择规则

选择规则用于从模型集合中选择一对模型，或者从结构规则集合中选择一条结构规则。我们提供三种不同的选择策略。

**分级选择（Rank Selection）策略** 分级选择指从模型（规则）集合中，依据某度量选择出模型（规则）。

**均匀选择（Uniform selection）策略** 均匀选择指从模型（规则）集合中，随机选择模型（规则）。

**轮盘法选择 (Roulette wheel selection) 策略** 轮盘法选择指基于带权重的轮盘选择出最合适的选择模型（规则）。模型（规则）的权重与模型（规则）的度量值成正比。

分级选择策略与轮盘法选择策略要求模型（规则）的度量。对于模型，我们用其结构复杂度做为度量标准，即模型的度量值为其结构图上边数与顶点度的加权和（见图 2.3 内各模型右下角的插图）：

$$C_s = 0.95n_e + \sum_i (v_i - \bar{v})^2,$$

其中， $n_e$  是边数， $v_i$  是顶点  $i$  的度， $\bar{v}$  是该模型的所有顶点的平均度。

对于规则，我们基于其对模型结构的改变程度设置度量值。具体地讲，增加规则（Increase Rules）的度量如下：

$$C_r = \begin{cases} w_1, & C_s^1 + C_s^2 \leq \delta, \\ w_2, & C_s^1 + C_s^2 > \delta, \end{cases}$$

其中， $w_1 = 0.5$ ， $w_2 = 0.1$ ， $\delta = 63.33$ 。 $C_s^1$  和  $C_s^2$  分别是基础模型与辅助模型的结构复杂度。对组合规则（combine rules）与插入规则（insert rules）来讲， $w_1 = 0.4$ ， $w_2 = 0.1$ ， $\delta = 72.3$ 。交换规则（replace rules）的度量  $C_r = 0.35$ 。

#### 2.4.3.2 结构规则

结构规则通过扩展或交换两个模型的结构配置产生新的结构配置。结构规则模拟三维艺术家设计虚拟生物的常用操作。

记法 结构规则具有如下形式：

$$\begin{aligned} & \text{PRIORITY number} \\ & id : predecessor : cond \\ & \quad \rightsquigarrow successor : prob, \\ & \quad \rightsquigarrow predecessor : (1 - prob), \end{aligned}$$

其中， $id$  是规则标识， $predecessor$  是一个或一组符号，表示被替换的超部件。规

则的第一个分支，称为功能分支，以 $prob$ 的概率，将 $predecessor$ 替换成 $successor$ 。规则的第二个分支，称为恒等分支，不做任何操作。 $cond$ 是一个布尔表达式。只有在该布尔表达式为真的情况下才能施加对应分支规则。 $number$ 是该规则的优先级。

**增加规则（Increase Rules）** 增加规则将超部件内的某个元部件复制一份并设置排列方式。增加规则都具有相类似的功能，区别只在于适用于不同类元部件。增加规则是上下文有关的规则。增加规则的一个例子如下：

$$\begin{aligned}
 0 : & \mathbf{S_H} (head_q, \{(head_q, 0, h_0, def, \mathbf{S_T})\}, def) : cond \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_H}' (head_q, \\
 & \{(head_q, 0, h_0, midl, \mathbf{S_T}); (head_q, 1, h_0, midr, \mathbf{S_T})\}, \\
 & midl\_midr) : p, \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_H} (head_q, \{(head_q, 0, h_0, def, \mathbf{S_T})\}, def) : 1 - p,
 \end{aligned}$$

$cond$ 定义如下：

$$\mathbf{shape.superpart.num} \leq N,$$

其中， $g$ 是代数。功能分支以概率 $p$ ，将头类超部件 $\mathbf{S_H}$ （具有一个头类元部件）替换头类超部件 $\mathbf{S_H}'$ （具有两个头类元部件）。新增加的第二个头类元部件与第一个头类元部件相同。 $\mathbf{S_H}'$ 的排列方式是“左右”（如图 2.4）。 $head_q$ 指头的类型为四肢动物。 $def$ 指部件位于默认位置（中间部位）。 $\mathbf{S_T}$ 是躯干类超部件。 $h_0$ 是头部件对应的几何模型的标识。 $cond$ 的意义是该抽象模型包含的超部件个数小于 $N$ 。在本章的所有实验中， $N = 6, \alpha = 0.4, \beta = -0.1$ 。

**插入规则（Insert Rules）** 插入规则为当前模型添加一个其不具备的超部件。插入规则仅可施加到躯干类超部件上且为上下文有关的规则。插入规则的一个例子

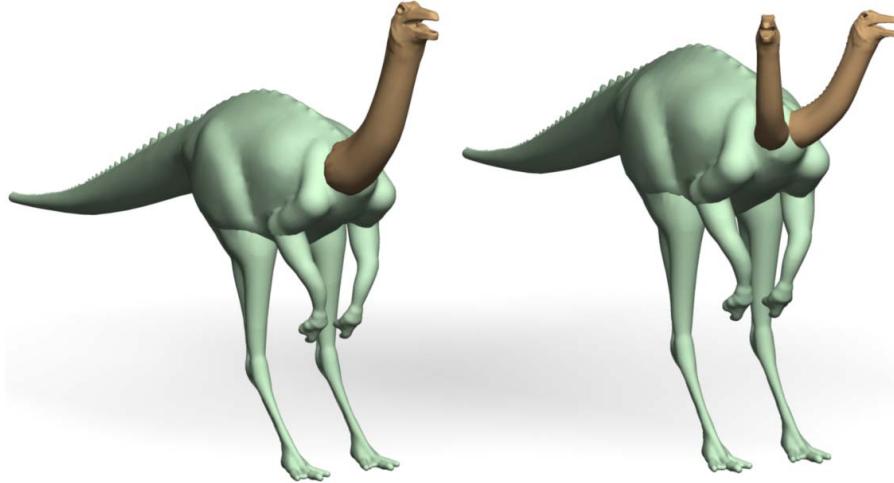


图 2.4 该增加规则的功能分支将头类元部件复制一份并将头类超部件的排列方式置为“左右”，得到一个具有两只头的四肢动物。

如下：

$$\begin{aligned}
 0 : & \mathbf{S_T} (torso_q, \dots) : cond \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_q, \dots) \mathbf{S_W} (wing, \dots) : p, \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_q, \dots) : 1 - p,
 \end{aligned}$$

*cond* 定义如下：

$$\begin{aligned}
 & no\ wing\ superpart\ attached\ to\ \mathbf{S_T} \\
 & \&\& \mathbf{Shape.superpart.num} > N,
 \end{aligned}$$

其中， $g$  是代数， $t = \mathbf{Shape.metapart.num} - N$ 。该规则的功能分支以概率  $p$ ，将  $\mathbf{S_W}$  添加到  $\mathbf{S_T}$ （见图 2.5）。 $torso_q$  指  $\mathbf{S_T}$  的类型为四肢动物。 $wing$  指  $\mathbf{S_W}$  的类型是鸟类。 $cond$  的意义是  $\mathbf{S_T}$  上没有翅膀类超部件且该抽象模型包含的超部件个数大于  $N$ 。 $def$  指部件位于默认位置。 $\mathbf{S_T}$  是躯干超部件。 $h_0$  是头部部件对应的几何模型。在本章内所有的实验中， $N = 7$ ,  $\beta = -0.05$ ,  $\theta = 0.5$ 。

**交换规则（Replace Rules）** 交换规则在等位超部件间交换元部件。交换规则都具有相类似的功能，区别只在于适用于不同类超部件。交换规则的一个例子如

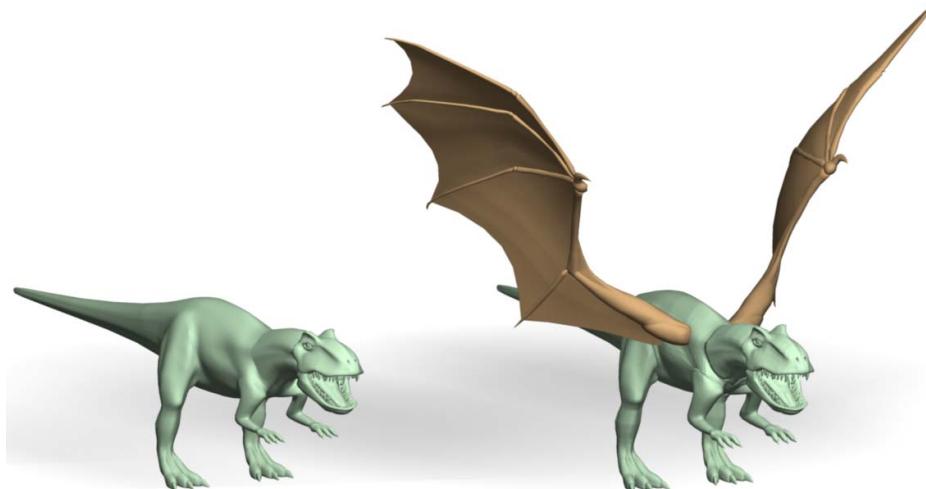


图 2.5 该插入规则的功能分支给四肢动物添加一对翅膀。



图 2.6 该交换规则的功能分支将人类的双腿换为鸟类生物的下肢。

下：

$$\begin{aligned}
 0 : & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_L} (leg, \dots) \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_T}' (torso_q, \dots) \mathbf{S_F} (foreleg, \dots) \\
 & \mathbf{S_D} (hindleg, \dots) \mathbf{S_I} (tail_q, \dots) : p, \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_L} (leg, \dots) : 1 - p,
 \end{aligned}$$

该规则的功能分支以概率  $p$ ，将  $\mathbf{S_L}$  替换为  $\mathbf{S_M}$ （如图 2.6）。 $leg$  表示  $\mathbf{S_L}$  的类型为人类。 $lowerlimb$  表示  $\mathbf{S_M}$  的类型为鸟类。在本章内所有的实验中， $p = 0.5$ 。

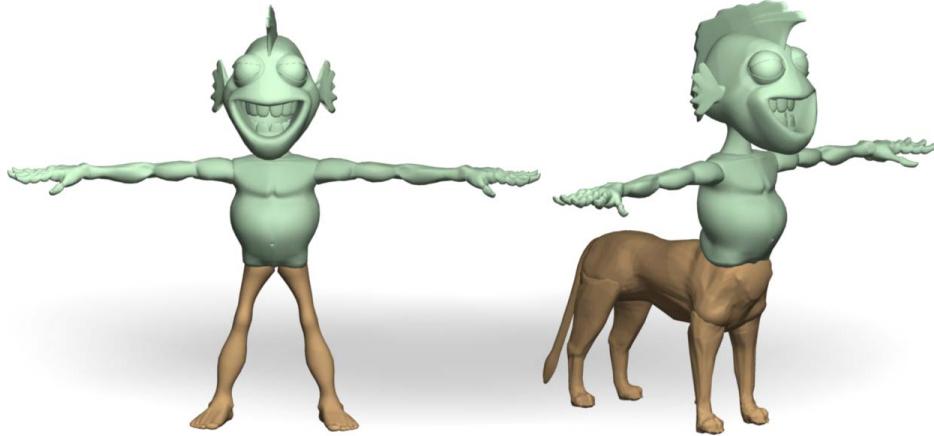


图 2.7 该组合规则的功能分支将人类的上半身与四肢动物的下半身串联，得到一个半人马型的生物。

**组合规则（Combine Rules）** 组合规则将当前模型的上（下）部分与另一模型的下（上）部分串联到一起，得到半人马型的模型。组合规则的一个例子如下：

$$\begin{aligned}
 0 : & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_L} (leg, \dots) \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_T}' (torso_q, \dots) \mathbf{S_F} (foreleg, \dots) \\
 & \mathbf{S_D} (hindleg, \dots) \mathbf{S_I} (tail_q, \dots) : p, \\
 \rightsquigarrow & \mathbf{S_T} (torso_h, \dots) \mathbf{S_L} (leg, \dots) : 1 - p,
 \end{aligned}$$

其中， $g$ 是代数。该规则的功能分支以概率 $p$ ，将当前模型的下半部分 $\mathbf{S_L}$ 替换为超部件序列 $\mathbf{S_T}'\mathbf{S_F}\mathbf{S_D}\mathbf{S_I}$ ，得到一个半人马型模型（如图 2.7）。 $torso_h$ 表示 $\mathbf{S_T}$ 的类型是人的躯干。 $hindleg$ 表示 $\mathbf{S_D}$ 的类型是四肢动物的后肢。 $foreleg$ 表示 $\mathbf{S_F}$ 是四肢动物的前肢。 $tail_q$ 表示 $S_I$ 是四肢动物的尾巴。在我们所有的实验中， $\alpha = 0.2$ ， $\beta = -0.01$ 。

#### 2.4.3.3 几何规则

几何规则调整部件的大小、方向，将部件置于合适的位置。类似<sup>[17]</sup>，我们用槽（Slot）表示该部件上与另一部件相连接的区域。我们在预处理步骤提取各部件的槽<sup>[17]</sup>。某些槽，比如，人类躯干元部件上的翅膀槽，无法自动提取。对

这种槽，我们手动标记。槽的边界指槽的顶点的凸包。槽的中心点是槽边界上各顶点的平均值。

**平移规则 (Translate Rule)**  $\mathbf{T}(\mathbf{S}_T)$ 通过重叠两部件的槽中心点，将当前元部件平移至 $\mathbf{S}_T$ 内包含的躯干类元部件。

**放缩规则 (Scale Rules)**  $\mathbf{S}(s)$ 将当前元部件放缩 $s$ 倍。 $\mathbf{S}(\mathbf{S}_T)$ 放缩当前部件，使其与 $\mathbf{S}_T$ 内的躯干元部件大小相匹配（两部件对应槽的长度相同）。

**旋转规则 (Rotate Rules)**  $\mathbf{R}(\mathbf{S}_T)$ 旋转当前元部件使其与 $\mathbf{S}_T$ 内包含的躯干部件方向相匹配。 $\mathbf{Rx}(angle, \mathbf{S}_T)$ ,  $\mathbf{Ry}(angle, \mathbf{S}_T)$ 和 $\mathbf{Rz}(angle, \mathbf{S}_T)$ 分别指在 $\mathbf{S}_T$ 的局部坐标系下沿 $x, y$ 与 $z$ 轴，将当前元部件旋转 $angle$ 度。

**实例规则 (Instance Rule)**  $\mathbf{I}(k_i)$ 将元部件替换为该元部件对应的几何实体。“[”与“]”分别指将几何规则压入栈顶与弹出栈顶。注意，在几何规则的生产流程过程中，我们不删除任何元部件；当一个元部件被替换成其对应的几何实体后，我们将其标记为结束 (terminated)。几何规则的生产流程从躯干元部件开始。其它的部件按顺序附着到躯干元部件上。为了简化变换过程，所有的元部件几何实体来自于数据库模型。下面给出一个几何规则生产流程的例子（如图 2.8）

```

 $A \rightsquigarrow$ 

 $\mathbf{I}(t_0) [\mathbf{T}(\mathbf{S}_T) \mathbf{S}(\mathbf{S}_T) \mathbf{I}(t_1)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_T) \mathbf{S}(0.6) \mathbf{S}(\mathbf{S}_T) \mathbf{R}(\mathbf{S}_T) \mathbf{I}(h_0)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_T) \mathbf{S}(0.6) \mathbf{S}(\mathbf{S}_T) \mathbf{Ry}(180, \mathbf{S}_T) \mathbf{R}(\mathbf{S}_T) \mathbf{I}(h_0)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_T) \mathbf{S}(\mathbf{S}_T) \mathbf{I}(a_0)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_T) \mathbf{S}(\mathbf{S}_T) \mathbf{R}(\mathbf{S}_T) \mathbf{I}(w_1)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{S}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{I}(f_1)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{S}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{I}(w_1)]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{S}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{I}(h_{l1})]$ 
 $[\mathbf{T}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{S}(\mathbf{S}_{T'}) \mathbf{I}(ta_1)],$ 

```

其中,  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $h_0$ ,  $a_0$ ,  $w_1$ ,  $f_1$ ,  $hl_1$ , 和  $ta_1$  分别为躯干类超部件, 头类超部件, 胳膊类超部件, 翅膀类超部件, 和尾巴类超部件对应的几何实体。

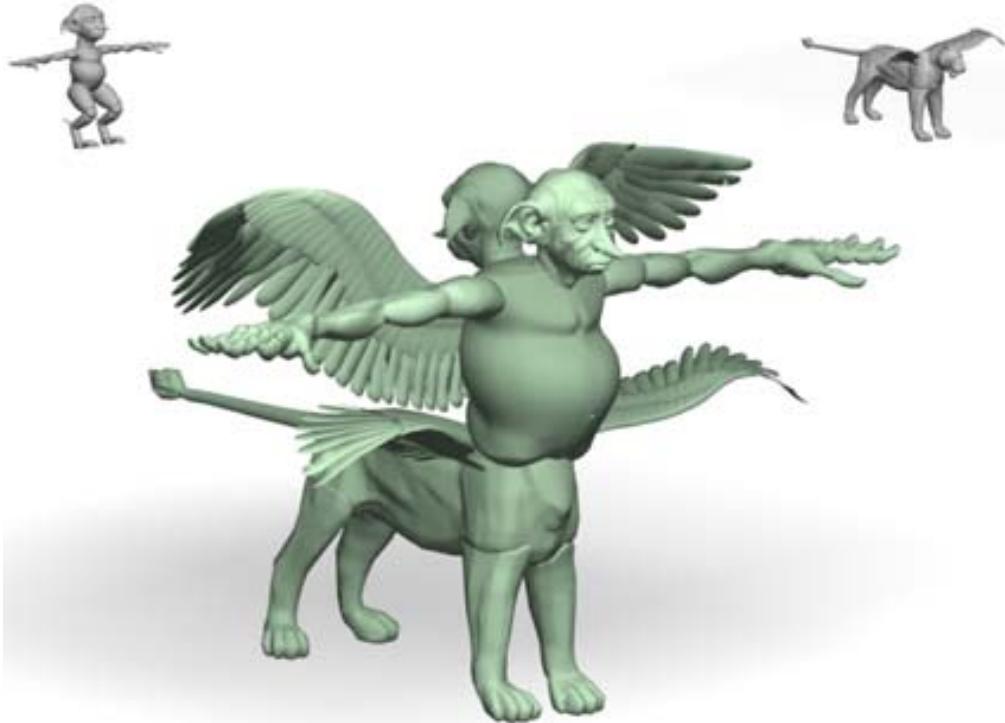


图 2.8 由几何规则得到的半人马型模型。中间是结果模型。左上角是基础模型。右上角是辅助模型。

## 2.5 虚拟生物模型生成技术

我们使用生物语法迭代地生成一代代虚拟生物模型。输入一组来自不同类的常规生物模型, 我们首先通过模型选择规则选择出两个模型; 然后数次施加结构规则变异基础模型的结构配置, 最后, 通过几何规则得到结果模型。这个“选择模型-结构变异-几何实体替换”的过程不断重复, 得到一个个虚拟生物模型。如上过程不断重复, 初始常规模型组被进化成一代代的虚拟生物模型(见算法 1)。考虑到生物体的功能性, 我们将模型可以站稳做为其合理的标准。为了判断模型是否可以站稳, 我们检查其重心是否位于模型支撑点构成的凸包内部<sup>[18]</sup>。

**Algorithm 1 Monster Generation with Creature Grammar**


---

**Input:** Regular shape set  $\mathcal{R}$ ; Monster set  $\mathcal{G}_0$ ; Background set  $\mathcal{B}$ ; Desired number of shapes in each set  $N_s$ ; Maximum number of shapes in each group  $N_g$ ; Base shape  $b$ ; Assist shape  $a$ ; Generated monster shape  $m$ ;

```

1:  $\mathcal{G}_0 \leftarrow \mathcal{R}; \mathcal{B} \leftarrow \mathcal{G}_0$ 
2:  $i = 0$ 
3: while the user is not satisfied do
4:    $\mathcal{G}_{i+1} = \emptyset$ 
5:   while  $|\mathcal{G}_{i+1}| < N_s$  do
6:     for  $i = 1$  to  $N_g$  do
7:        $b \rightsquigarrow ShapeSelection(\mathcal{G}_i)$ 
8:        $a \rightsquigarrow ShapeSelection(\mathcal{G}_i)$ 
9:        $m \rightsquigarrow StructureRules(b, a)$ 
10:       $m \rightsquigarrow GeometryRules(b, a)$ 
11:       $\mathcal{D} = \mathcal{D} \cup \{m\}$ 
12:    end for
13:     $\mathcal{D} \leftarrow SelectStandUpRight(\mathcal{D})$ 
14:    for  $i = 1$  to  $|\mathcal{D}|$  do
15:      if  $\mathcal{D}[i]$  is disliked by the user then
16:         $\mathcal{B} = \mathcal{B} \cup \{\mathcal{D}[i]\}$ 
17:        delete  $\mathcal{D}[i]$ 
18:      end if
19:    end for
20:     $\mathcal{G}_{i+1} = \mathcal{G}_{i+1} \cup \mathcal{D}$ 
21:  end while
22:   $\mathcal{G}_{i+1} \leftarrow DiversityControl(\mathcal{G}_{i+1}, \mathcal{G}_i, \mathcal{B})$ 
23:   $\mathcal{B} \leftarrow DiversityControl(\mathcal{B}, \mathcal{G}_{i+1})$ 
24:   $\mathcal{G}_i \leftarrow \mathcal{G}_{i+1}$ 
25:   $i = i + 1$ 
26: end while

```

---

### 2.5.1 多样性控制

对一个创造力支持的造型系统而言，确保用户探索各种不同的可能性非常重要。具体到虚拟生物造型，我们期望每次都能提供给用户一组多样化的造型结果。为此，我们提出一种针对结构的多样性控制方法。给一组模型，我们基于模型结构对该组模型做聚类，每一个聚类称为结构聚类。在每一个结构聚类内，我们使用<sup>[18]</sup>提出的多样性控制方法采样出部分模型。所有聚类内的采样模型构成新一组模型。

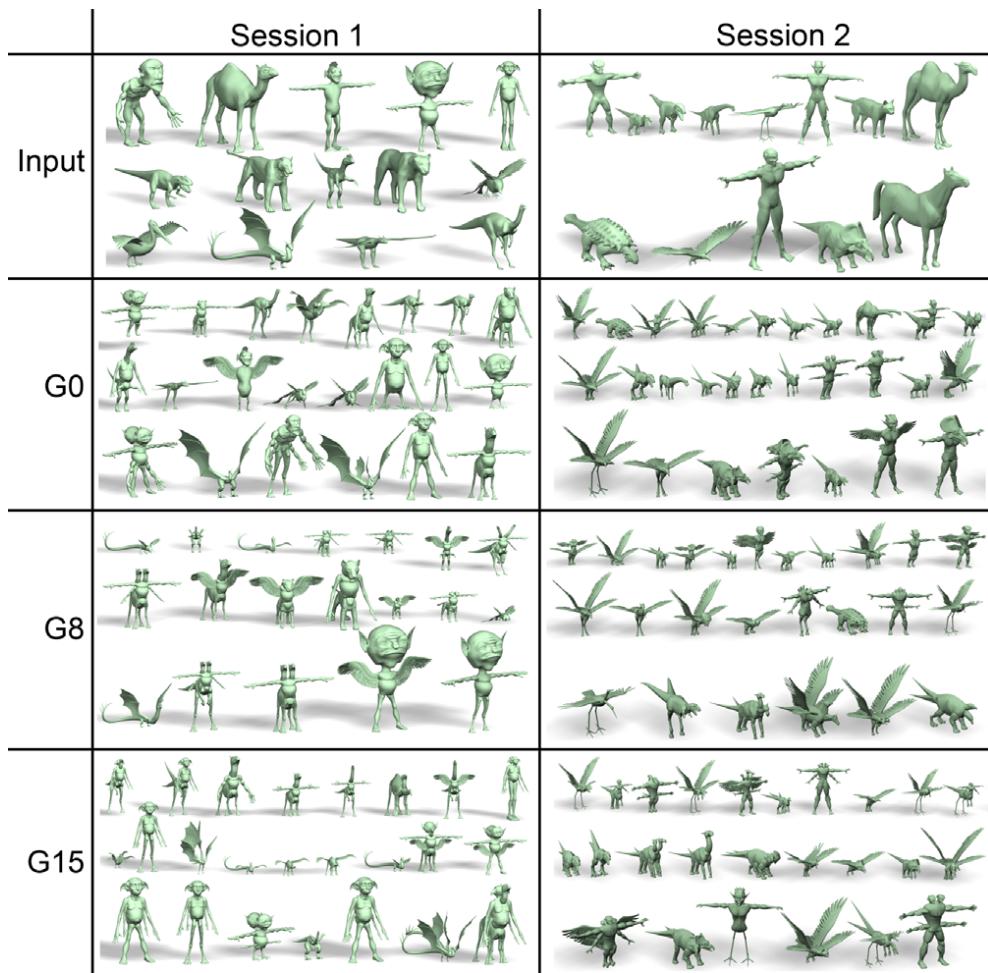


图 2.9 采用我们的系统造型虚拟生物的例子。对每一个造型例子，我们给出输入模型与随机选择的三代模型。

## 2.6 实验结果

我们采用C++编言在标准台式机（Intel® Core i7 clocked at 3.77GHz, 8GB of RAM and NVIDIA® Geforce GTX 660 GPU）上实现系统原型。图 2.9给出两个虚拟生物造型的例子。图 2.10给出造型结果和背景集合。数据库内每个模型的预处理包括分割，标记，归一化，对齐，和对称部件组检测，平均需要20分钟。产生一个虚拟生物模型包括利用选择规则选择出合适的规则，施加结构规则得到变异结构和得到模型几何实体；平均耗时0.5秒。我们采用openMT®技术并行产生虚拟生物模型。

	Design Result	Background Set
Input		
G0		
G8		
G15		

图 2.10 采用我们的系统造型虚拟生物的例子。我们给出输入模型（灰色），随机选择的三代模型（绿色）及其对应的背景模型（蓝色）。

正如前面提到的，对我们这样一个创造力支持的造型系统而言，虚拟生物组的多样性是个非常关键的度量标准。我们使用分层多样性度量（Hierarchical Diversity Metric, HDM）描述虚拟生物模型组的多样性。给一组模型  $S$ , HDM 定义如下：

$$HDM(S) = N + \sum_{i=0}^N D_i,$$

其中， $N$  为集合  $S$  内的结构聚类数目， $D_i$  是结构聚类  $i$  的模型多样性度量值。 $D_i$  定

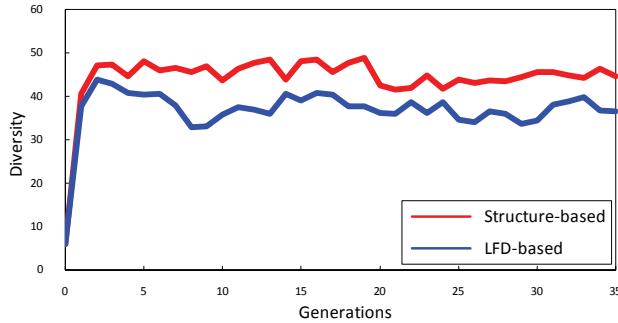


图 2.11 我们的针对结构的多样性控制方法得到的模型集合（红色）与F&D的多样性控制方法得到的模型集合（蓝色）的多样性曲线。

义如下：

$$D_i = \frac{SD_i}{\max \left\{ \sum_{i=0}^N SD_i \right\}},$$

其中， $SD_i$ 是结构聚类*i*的光量场（Light Field Descriptor）<sup>[62]</sup>值的标准差。进化过程中每代的多样性曲线如图 2.11 所示。其中一条曲线由我们提出的针对结构的多样性控制方法生成，另一条由 F&D<sup>[18]</sup>提出 的多样性控制方法生成。很明显地看出我们的多样性控制方法得到的模型集合更加多样。其原因是我们的控制方法更关注模型结构上的差异，而 F&D 的方法无法抓住模型集合结构上的不同。图 2.12 对比了我们方法与 F&D 方法得到的模型集合的多样性。可以很容易发现我们方法得到的模型集合的多样性是 F&D 方法的 8 倍。原因是 F&D 仅通过交换部件得到新模型，而我们的方法不仅在模型间交换部件，还会通过结构规则产生新的结构。

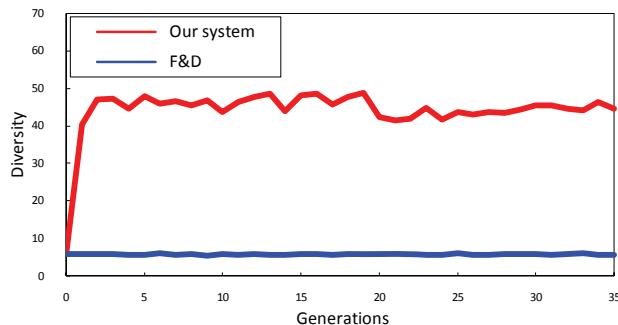


图 2.12 我们方法得到的模型集合（红色）与 F&D 方法得到的模型集合（蓝色）的多样性曲线。

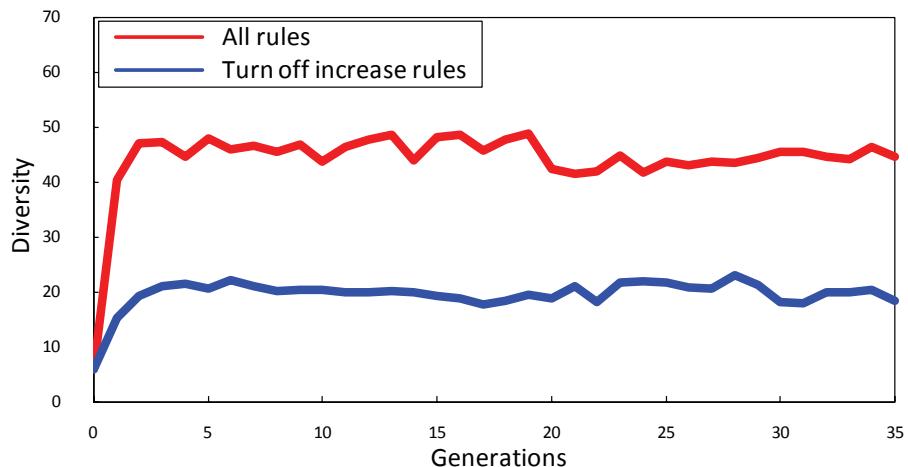


图 2.13 使用增加规则（红色）与不使用增加规则（蓝色）得到的模型集合的多样性曲线。

<sup>[17]</sup>提出的概率推理模型也可以用于合成生物模型。但是该技术更适合处理同类模型（比如，四肢动物，飞机等），通过重新组合部件生成新模型，合成的结果模型与输入模型具有相同的结构。若该概率推理模型添加虚拟生物的先验知识，输入一组常规生物模型，就可以得到与我们方法类似的结果。然而，我们提出的生物语法恰恰是虚拟生物模型先验知识的一种形式化的描述。

## 2.6.1 生产规则

增加规则对模型集合的多样性贡献最大。图 2.13对比了有无增加规则时模型集合的多样性。可以很明显地看出，没有增加规则会导致多样性下降一半。注意，这并不表明其它规则可有可无。例如，组合规则可以产生半人马型模型，插入规则可以为人类模型与四肢动物模型插入翅膀，交换规则可以在模型间交换部件。不施加增加规则的情况下，生成的模型的超部件内仅会有一个元部件（如图 2.14所示）。

## 2.6.2 专家评估

我们邀请4位三维造型艺术家评估我们虚拟生物造型系统。其中3位有4年三维造型经验。另1位有7年以上三维造型经验。首先，4位测试者看10分钟关于我们的系统的教程。接着，给他们15分钟的时间实际操作我们的系统，熟悉操作流

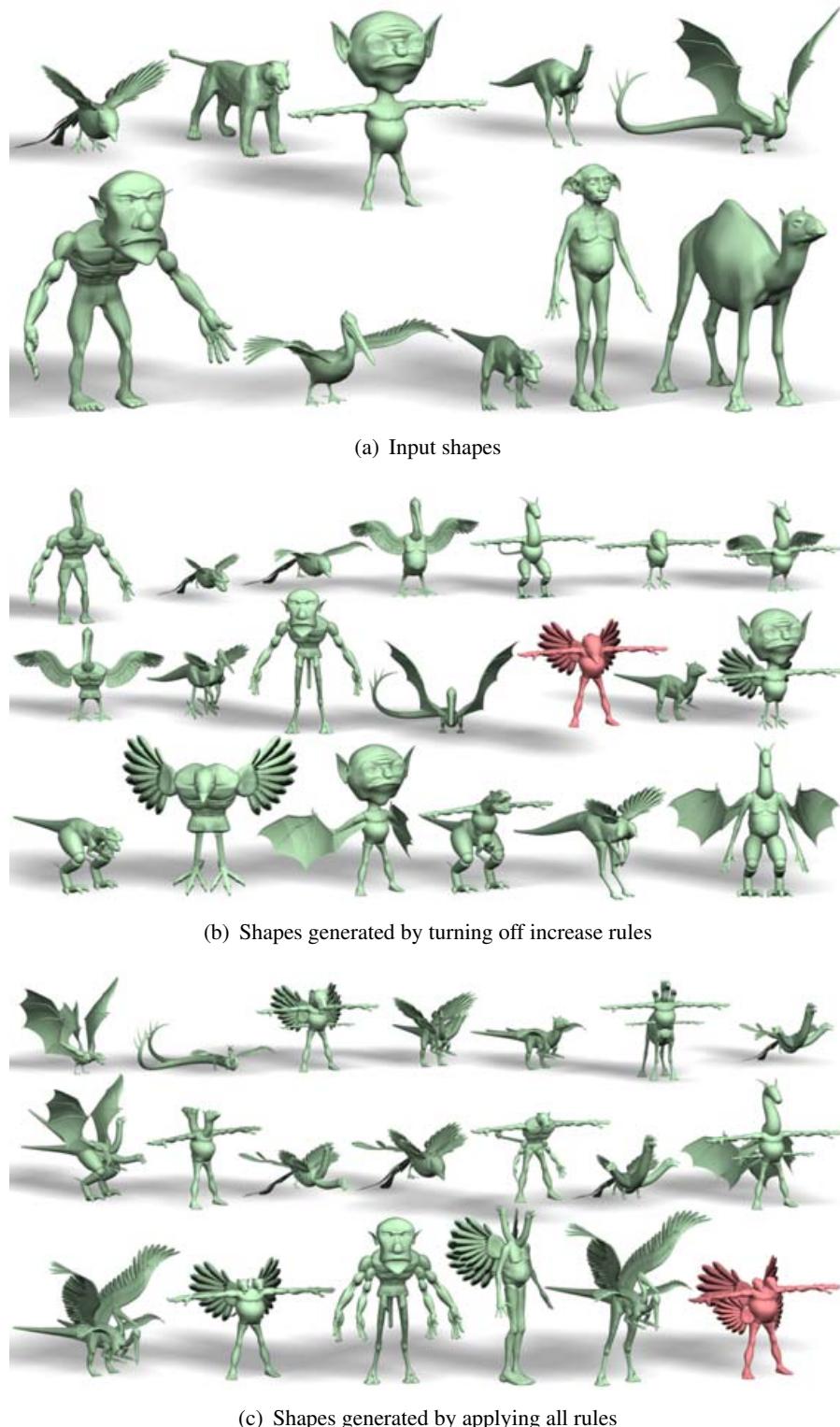


图 2.14 使用与不使用增加规则产生的模型。(a) 输入模型。(b) 不使用增加规则得到的模型。(c) 使用所有规则得到的模型。注意 (a) 内的粉色模型只有一个鸟类的头与一对翅膀; (c) 内粉色模型有两个鸟类的头两对翅膀, 其通过在头类超部件与翅膀类超部件上施加增加规则得到。

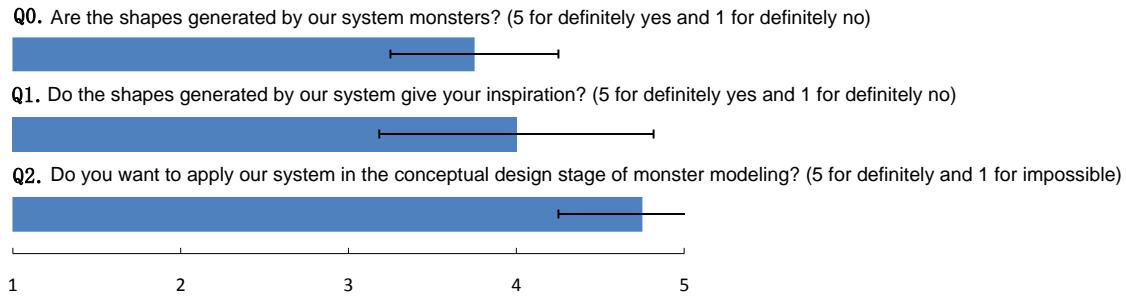


图 2.15 调查问卷结果。每个直方条上的黑色水平线是标准差。



图 2.16 专家评估过程中合成的模型。

程。然后，每个人用30分钟时间使用我们的系统不受限制地合成虚拟生物模型。最后，每一位测度者完成问卷调查（问卷调查结果见 2.15）。专家评估过程中合成的部分虚拟生物模型见图 2.16。4位测试者对我们的造型系统持积极态度。他们都觉得我们的系统建议的大多数模型是虚拟生物模型。其中，很多模型是他们意想不到的，尤其是这些模型的结构非常地奇异。他们都愿意在自己造型的概念设计阶段使用我们的系统。

### 2.6.3 用户测试

为了定量地评估我们的系统在用户造型虚拟生物方面的启发效果，我们与F&D系统做了对比。我们邀请了20位参与者，10名男生，10名女生，他们的年

龄都在18到26岁之间。其中4名参与者是数字媒体专业学生，其它参与者是图形学实验室在读研究生。20位参数者被分成A，B两组，每组内男女生人数相同，数字媒体专业的学生人数相同。这些参与者被分配给如下任务：

- 你是Valve®公司《Half-Life 3》项目组的一名三维造型师。在该游戏中，Gordon Freeman将会带领一个特别行动小组秘密潜入天狼星。这颗星球有完全不同于地球的物理规律，生长着完全不同的生物。请分别使用我们的系统与F&D造型生长在这颗星球上的生物，并标记造型过程中给你灵感的模型。

测试流程如下：首先，两组参与者依次使用两个系统。参与者需要系统产生的每代模型打分：1分表示“模型是平庸的”，5分表示“模型具有启发性”。A组参与者先用我们系统，再用F&D。B组参与者先用F&D，再用我们的系统。在操作每个系统之前，每个参与者需要看10分钟教程，再操作15分钟来熟悉系统操作。

得分为4或5的模型称为启发模型（Inspiring Shape）。得到为1或2的模型称为平庸的模型（Banal Shape）。在每一代中，所有参与者选择的启发模型所占比例平均值曲线如图 2.17 所示。由图可以很明显地看出，我们的系统产生的启发模型是F&D的3倍。在每一代中，所有参与者选择的平庸模型所占比例平均值曲线如图 2.18。由图可以发现，我们系统产生的平庸模型是F&D的1/3。图 2.19 给出所有参与者在每一代内打分的平均值曲线。可以看出，我们系统的得分约是F&D的2倍。图 2.20 给出某位测试者造型过程中的3代模型及其打分。综合整个用户测试结果可知，我们的系统比F&D系统产生更多的启发模型，且产生更少的平庸模型。这种结果的原因是：我们的系统通过生物语法产生了具有新结构的模型，而F&D仅仅在不同模型间交换组件或变形组件。

## 2.7 本章小结

在本章内，我们提出一种创造力支持的三维虚拟生物造型技术。给一组预分割和标记的来自不同类的常规生物模型，我们的系统迭代地生成一代代具有各式奇异结构的虚拟生物模型，做为建议提示给用户。该技术的核心是生物语法，一

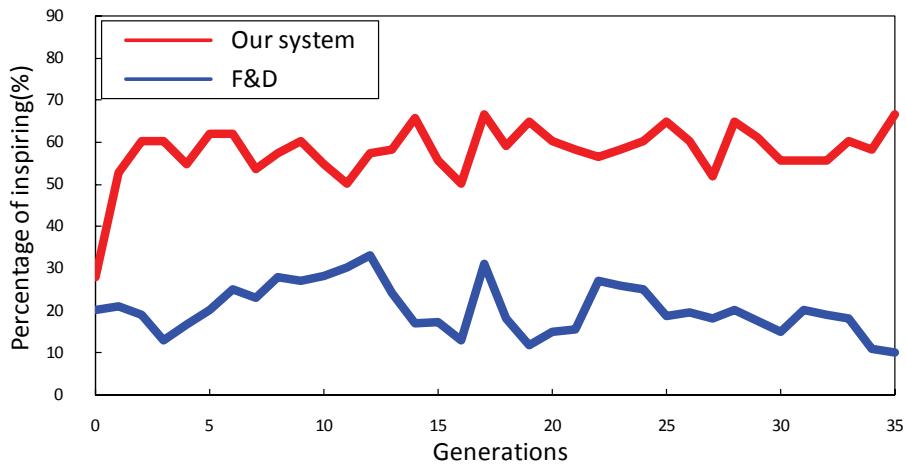


图 2.17 启发模型在各代模型内所占比例曲线图。

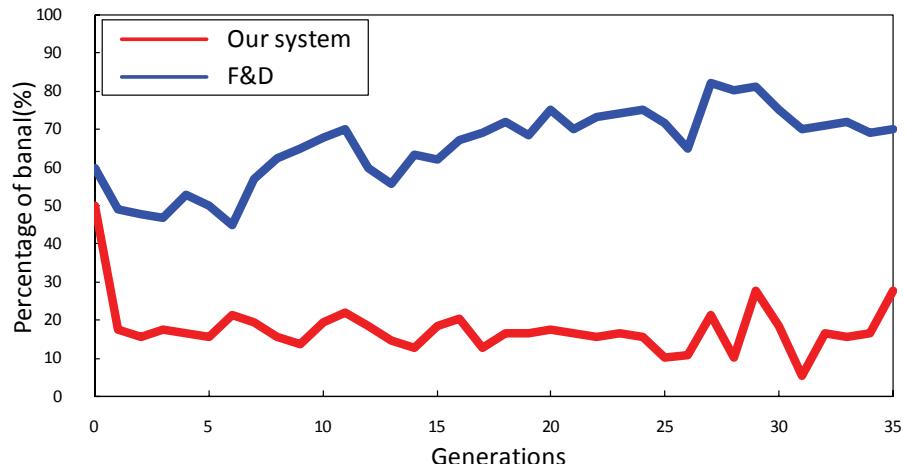


图 2.18 平庸模型在各代模型内所占比例曲线图。

种特化的形状语法。生物语法形式地描述了将常规生物模型进化成具有奇异结构的虚拟生物模型且保持生物语义约束的方法。生物语法模仿艺术家设计三维虚拟生物模型的过程，具有三种结构变异规则：增加规则，插入规则，交换规则，组合规则。基于生物语法，我们的造型系统可以自动地扩展常规生物模型的拓扑结构，产生具有合理的变异结构的虚拟生物模型，激发用户灵感，辅助用户快速地造型大量三维虚拟生物模型。

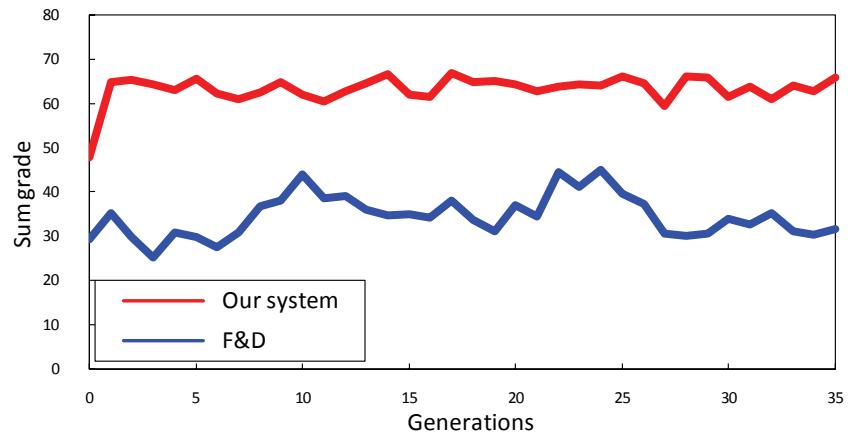


图 2.19 各代模型得分平均值曲线。

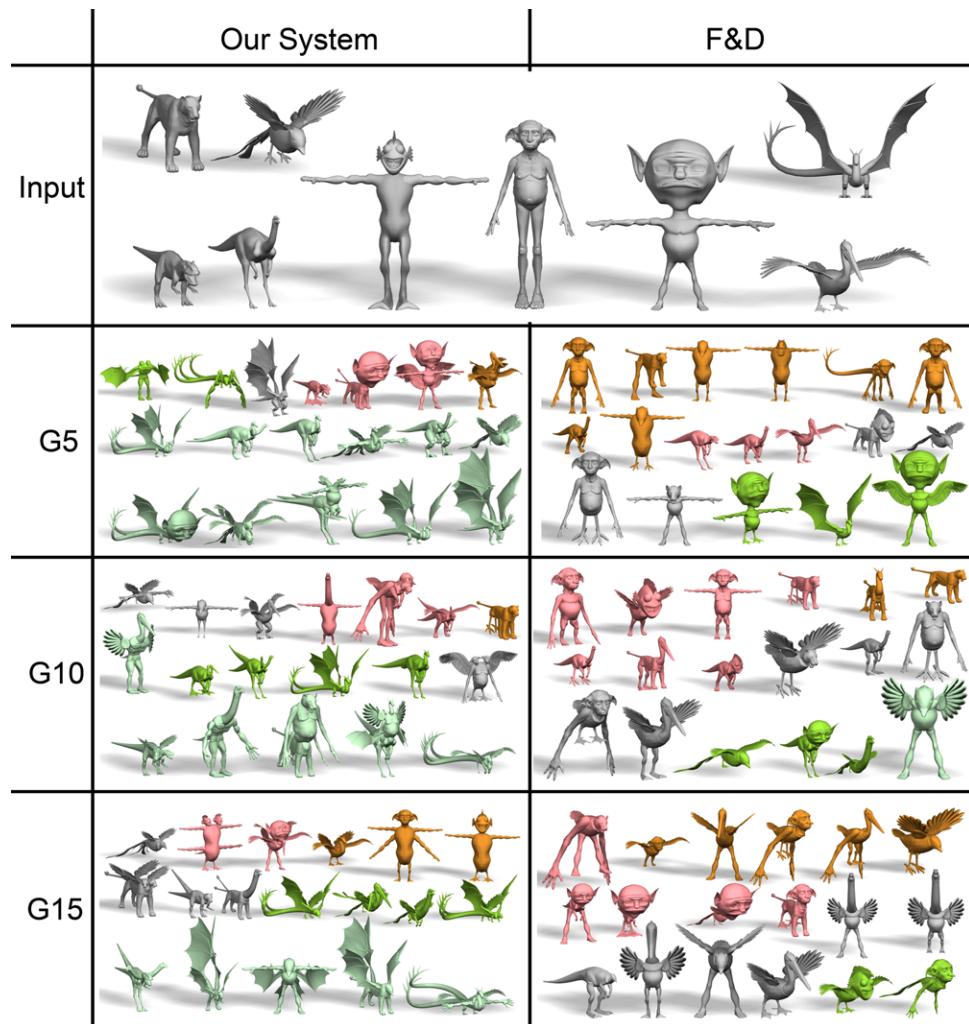


图 2.20 我们系统与F&amp;D得到的三代模型及其分数。绿色模型的得分为5。黄绿色模型的得分为4。白色模型的得分为3。粉红色模型的得分为2。黄色模型的得分为1。



## 第3章 针对浏览式草图造型的按需部件建议技术

### 3.1 引言

开发易用且功能强大的三维造型技术一直是计算机图形学的重要目标之一。专业工具，例如，Autodesk Maya<sup>®</sup>，具有强大的三维造型功能，但操作复杂，需要漫长的培训学习才能掌握。那些易用的工具，例如，Spore Creature Creator<sup>®</sup>将造型过程简化为拼接预定义好的部件。该方法同时提供了简单的部件变形方法，但总体上看，造型能力有限。弥合三维造型工具易用与功能强大之间的鸿沟是图形学界最具挑战性的问题之一。

针对该问题，一些研究人员尝试开发基于草图的造型技术<sup>[63]</sup>。这是一个极具前景的研究方向，因为大多数人都具备基本的绘画技术，都可以使用该类技术造型<sup>[1]</sup>。但问题是大多数用户的绘画技术不太好，所以完全按草图很难恢复出具有丰富几何细节的三维模型。最近几年，研究人员尝试通过草图从三维模型数据库内搜索模型<sup>[64]</sup>，或者通过重新组合现有模型的部件得到新模型<sup>[3]</sup>，实现了新手快速造型高质量模型的功能。然而，由于这类技术仅仅允许组合预定义部件或对部件做简单的变形，限制了造型结果的多样性。可见，它们是典型的易使用但表达能力低的技术。

在本章内，我们提出Sketch2Cut技术，一个基于数据驱动的草图式造型技术。该方法表现力极强，而且保持了易用性。我们的方法不再限定使用预定义的部件组合模型，而是采用实时分割技术，从三维模型数据库内搜索符合造型意图的部件。我们的技术不需要预分割或者标记数据库内的模型。

使用Sketch2Cut，用户可以简单地使用草图创建模型（如图3.1）。我们的系统简单易学易用，它除了要求用户具有类似Teddy系统的草图绘制技术外，不需要其它任何造型知识或技术。然而，使用我们的系统又可以创建出更加多样的几何细节丰富的模型。

设计我们的系统面临非常大的技术难点。因为不再有一个预分割（或标记）的模型数据库，我们必须实时地找到并切割下与草图相匹配的部件，这样的搜索

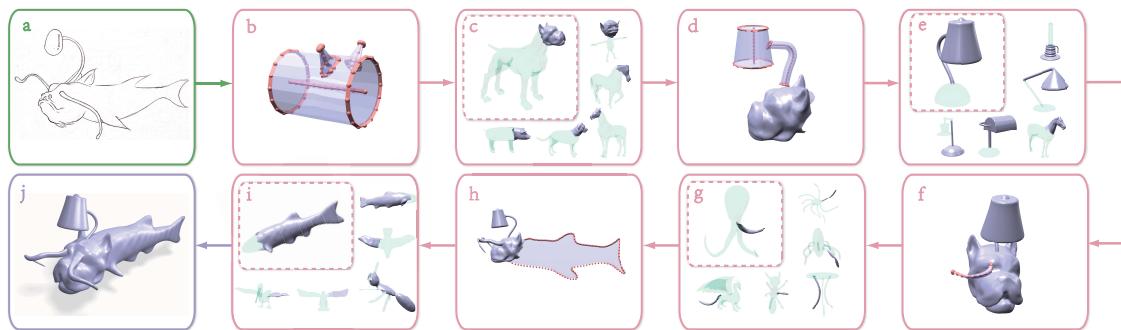


图 3.1 给一张概念设计图 (a) 做为参考，用户使用我们的方法非常容易地创建具有丰富几何细节的模型 (j)。系统基于草图生成三维代理模型 (b, d, f, h)。代理模型用于实时地从模型数据库内提取个性化的候选部件。我们的方法创建的模型可以由非典型部件（例如，(c) 内头部件与 (e) 内的台灯部件）与来自不同类模型的部件（例如，(c) 内的狗，(e) 内的台灯与 (g) 内的章鱼）构成。

空间几乎是无穷的。为了将搜索空间控制在可求解的范围内，我们设计了一种平衡策略。该策略使得所提示的部件在多样化与可用性间取得平衡。此外，我们的匹配方法必须足够快，可以实时地建议候选部件。我们发现如果三维模型的二维投影相似，那该三维模型相似。因此，我们将三维模型间的匹配问题转化为多视角下的二维轮廓匹配问题。

本文贡献有三点：

- 提出一个探索式草图造型方法。该方法从未预分割的三维模型数据库内，实时提取符合用户意图的个性化部件，造型高质量的模型。
- 提出一个快速的基于草图的三维模型局部匹配算法。该算法将三维模型局部匹配问题转化为多视角下的二维轮廓局部匹配。三维模型的二维投影由多个轮廓段（Boundary Contour Section）构成。这些轮廓段组织在一种新的随机混合kNN图（randomized compound kNN graph, RC-kNNG）内。
- 提出一个新的实时分割算法。该算法基于三维模型的超面片图表示，可以快速地从三维模型上提取与用户草图匹配的三维部件。部件提取采用由粗到细的策略，部件边界逐步优化。

本章接下来的内容安排如下：首先，介绍研究背景及相关工作，包括模型分

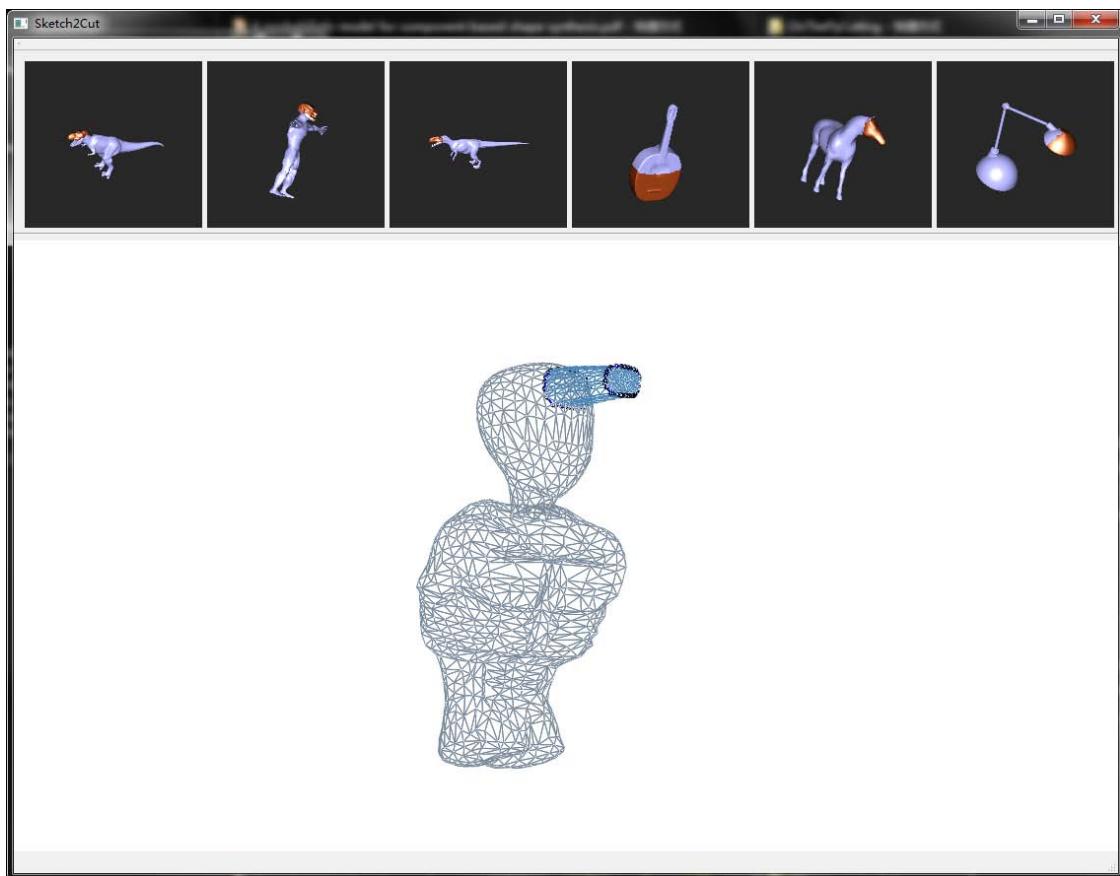


图 3.2 交互界面截图。界面内展示了当前模型，用户草图，代理模型，系统建议的非常规部件。

割问题的基础知识，现有模型语义分割方法与基于草图的模型搜索方法；然后，概述本章方法的流程；接着，介绍快速局部匹配加速结构RC-kNNG；然后，介绍候选模型搜索技术；接着，介绍逐步式部件分割技术；然后，介绍我们技术的应用案例及实验结果；最后，对本章做小结。

## 3.2 方法概述

**用户交互** 使用我们系统的用户可以先从数据库内选择一个基础模型（某部件或者某模型）。接着，用户通过草图造型代理模型来表示造型意图。系统实时地从数据库内提取一系列与草图相匹配的候选部件。与现有工作显著不同的是，我们提示的部件可以是非常规部件，而现有工作仅可提示预分割的部件（如图 3.2）。

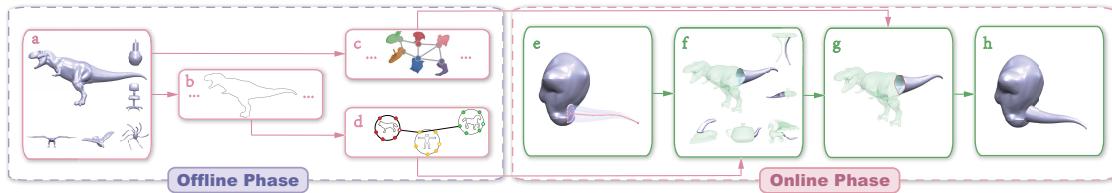


图 3.3 系统流程示意图。离线阶段，我们首先为数据库模型 (a) 提取边界轮廓 (b); 然后，建立三维模型超面片图 (c); 最后，将所有模型的所有轮廓线组织到RC-KNNG内 (d)。在线阶段，用户首先通过草图 (红色) 创建代理模型 (当前模型内浅蓝色部件) 表达造型意图 (e)。系统通过模型局部匹配技术实时地提取与草图相匹配的部件 (f)，并按顺序提示给用户 (浅蓝色)。用户选择满意的部件后，系统将它从三维模型上切割下来 (g) 并组合至当前模型 (h)。

用户从建议列表内选择满意的部件。该部件自动与当前模型组合到一起。如果没有满意的部件，用户可以改变代理部件重新搜索，得到更多建议部件。该过程不断重复，直至造型出满意的结果。

**系统流程** 系统流程见图 4.2。我们的方法由两个阶段构成：离线阶段与在线阶段。离线阶段，我们建立加速结构。该加速结构用于实时地提取用户所需部件。在线阶段，设计人员与系统交互创建模型。

**离线阶段** 首先，我们为数据库模型提取不同视角下的边界轮廓<sup>[65]</sup>。接着，在不同尺度下提取边界轮廓描述符。

然后，我们将所有模型的边界轮廓组织到RC-kNNG内，用于部件快速搜索（见第 3.3 节）。

最后，我们为数据库模型建立超面片图表示（见第 3.5.1 节）。超面片指模型表面上一组相邻面片。将模型分解成一系列超面片，是为了得到该模型的低复杂度表示方法。三维模型的超面片表示使得我们可以快速提取与匹配的三维部件。

**在线阶段** 通过比较代理轮廓与模型轮廓，我们将三维局部匹配问题转化为多视角的二维轮廓匹配问题，从而找到候选部件包含的超面片。用户选择候选部件，我们将该部件从其模型上切割下来并与当前模型组合到一起。我们使用由粗到细的模型分割策略：先在超面片层次计算粗糙边界，再在面片层次优化该边界。与

其它分割方法<sup>[66]</sup>不同，我们的分割方法将轮廓感知，模型表面凹凸性，模型表面光滑程度考虑进来（见第 3.5 节）。

### 3.3 快速局部匹配结构

在运行阶段，用户绘制代理模型轮廓，表达建模意图。系统快速从数据库内搜索出与代理模型相匹配的部件。我们的系统可以搜索出模型上任意部件，而不仅仅是预分割出的标准部件。因此，我们必须实时地处理数据库内每个模型，找到模型轮廓上与代理模型轮廓相匹配的部分。这要求一个极其快速的局部匹配方法。

如果两个三维模型相似，那么他们从所有角度上看起来相似<sup>[62]</sup>。我们发现该观察结论同样适用于代理模型与模型上的目标部件。因此，为了找到数据库模型上与代理模型相匹配的部分，我们可以比较代理模型与数据库模型间的二维轮廓。如果我们使用用户草图与数据库模型轮廓做局部匹配，一些与用户草图相似的部件将会被丢掉。如果我们直接将代理模型与数据库模型做局部匹配，这非常耗时，无法满足交互需求。因此，我们将代理模型轮廓与数据库模型在多个视角下的投影轮廓做局部匹配。在离线阶段，我们求得每一个数据库模型在很多视角下的边界轮廓。然后，问题转化为将代理模型轮廓与数据库模型轮廓做局部匹配的问题。

实时地将如此多的数据库模型轮廓与代理模型轮廓做局部匹配异常困难。现有的算法，比如，分割树<sup>[67]</sup>、哈希存储<sup>[68]</sup>、KNN 图 (*k*-nearest neighbors graph)<sup>[69]</sup>等，都针对全局匹配，而不是我们这里的局部匹配。

为了快速找到数据库模型轮廓线与代理模型轮廓线相匹配的部分，我们提出一种新的数据结构，随机混合KNN图 (RC-KNNG)。RC-KNNG的一个顶点代表数据库模型的一条边界轮廓线。然而，在我们的局部匹配问题中，单个轮廓可能在多个不同的段与查询轮廓相匹配（如图 3.4）。为了反映这一点，RC-kNNG允许一个顶点与多组*k*个最近顶点相连。与当前顶点相连的每一组顶点

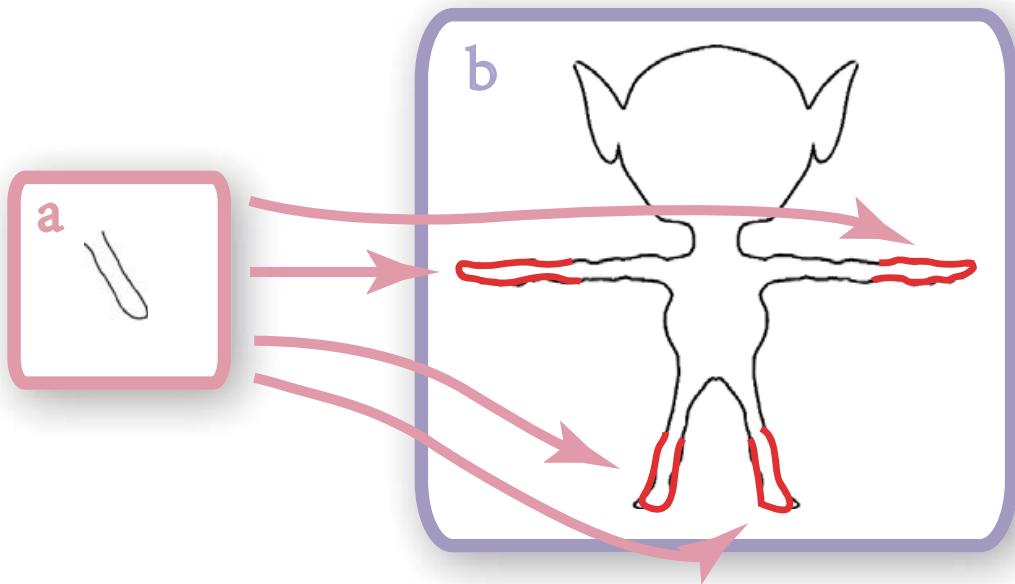


图 3.4 查询轮廓与模型轮廓的不同部分相匹配。查询轮廓（a）在四个不同的段上与模型轮廓（b）相匹配（标为红色）。

都与当前轮廓线上同一段相匹配。因此，通过与一条轮廓线的局部匹配结果，我们可以快速得到在其它轮廓线上的局部匹配结果。

**创建RC-kNNG** 通过暴力方法计算模型轮廓上所有相似的轮廓段建立RC-kNNG过于耗时，不可行。因此，我们采用双随机策略建立RC-kNNG：

1. 我们首先为每条模型轮廓线在每个尺度下提取 $n$ （在我们的实验中， $n = 6$ ）段（如图3.5（a））。一个尺度由一组在模型轮廓上均匀分布的采样点构成：大尺度的采样间距小，包括更多采样点。我们采用3个尺度，即每条模型轮廓线上的采样点数分别为50, 150, 250。

为了得到轮廓线上一段，我们随机选择一个不在其它轮廓段上的采样点。选择该采样点的概率是 $p$  ( $p \propto c \cdot d$ ,  $c$ 为该采样点的曲率,  $d$ 为该采样点与最近的在其它轮廓段上的采样点的距离)。以该采样点为中心，分别向两侧取10个采样点，构成轮廓段。

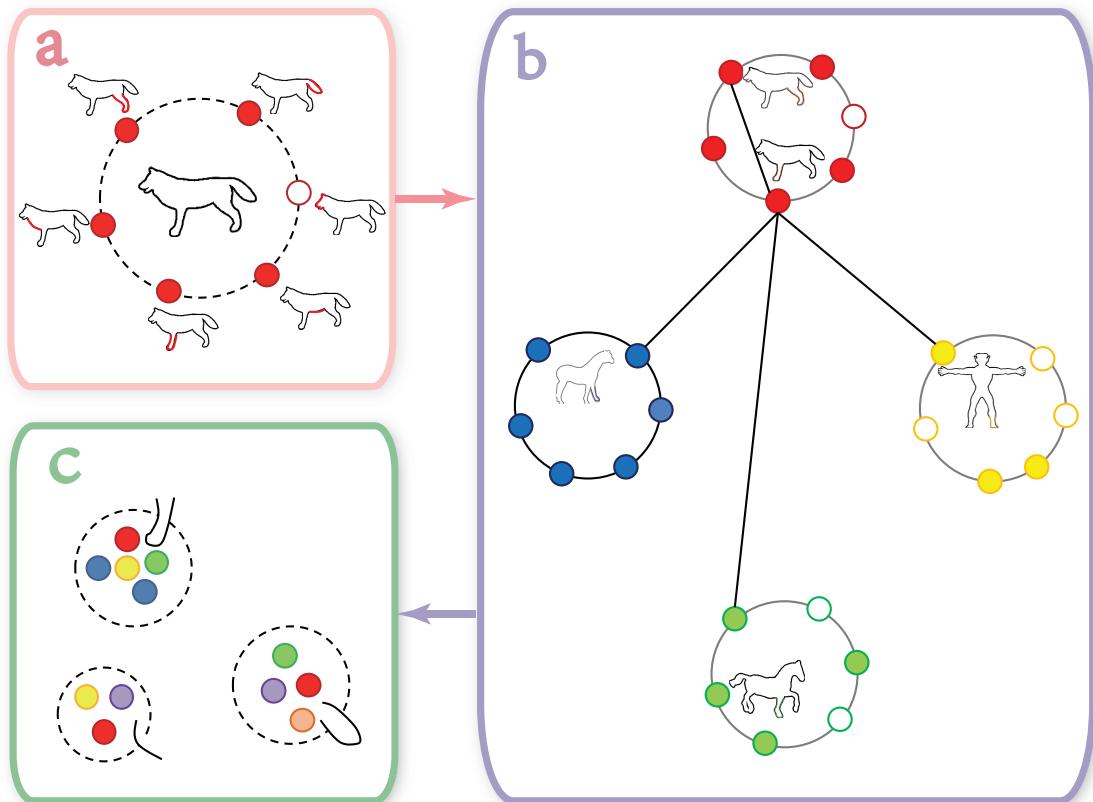


图 3.5 随机混合KNN图。实线圆表示有效轮廓段，虚线圆表示无效轮廓段。给一条模型轮廓（做为随机混合KNN图的一个顶点），我们首先取得若干轮廓段（a）。然后，为每一条轮廓段找到最近邻居并在各轮廓段所属的轮廓间添加边（b）。最后，找到有效轮廓段并做聚类（c）。

2. 我们采用多重随机分治策略<sup>[69]</sup>为所有的轮廓段建立KNN图（如图3.5 (b))。

我们将所有的有效轮廓段添加到全局有效轮廓段列表内。有效轮廓段指该轮廓段与它最近的 $k$ 个邻居间距（见3.4.2节）低于阈值 $\varepsilon = 0.85$ 。然后，我们对全局有效轮廓段列表内的轮廓段做聚类，聚类代表是聚类中心轮廓段。这些代表做为种子轮廓用于查询阶段（如图3.5 (c))。聚类个数为 $N/80$ （ $N$ 是全局有效轮廓段列表内轮廓段的个数）。

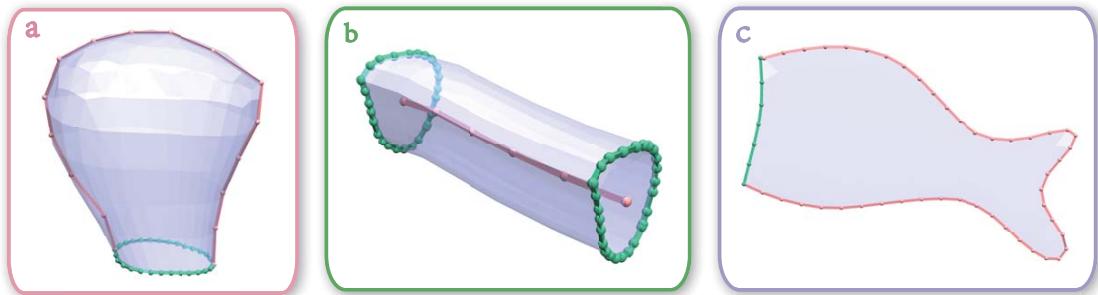


图 3.6 三种基础代理模型。(a) 广义球体。(b) 广义柱体。(c) 薄板模型。

## 3.4 候选模型搜索

本章中，我们介绍RC-*k*NNG如何从未做预分割的模型数据库内快速地精确地搜索出与代理模型相匹配候选部件。

### 3.4.1 代理模型创建

与<sup>[2]</sup>类似，我们使用三维代理模型从数据库内搜索部件并辅助部件组合。我们提供三种基本代理模型，从而使用户更容易表达造型意图。当然，用户输入的草图也可直接用于从数据库内搜索部件。

我们提供的三种基本代理模型是：广义球体，广义柱体，薄板模型（如图3.6）。广义球体通过Nealen等人<sup>[57]</sup>的方法生成。广义柱体通过两笔生成：在当前模型上画一个圆环表示柱体底座，然后用一条曲线指示中心线。中心线位于用户视线方向与圆球起点定义的空间平面上。广义柱体的一端可以放缩，得到圆锥或圆台。要得生成薄板型代理模型，用户需要首先在当前模型上画一条曲线，再绘制出其轮廓。该轮廓位于用户视线方向与曲线起点定义的空间平面上。我们的系统允许用户对代理模型施加各种操作，包括放缩，切割，托拽顶点等。通过如上方法生成的各种代理模型见图3.6及本文视频。

用户创建代理模型过程中，系统记录每次操作的视角及操作前后代理模型的体积变化。代理模型建成后，我们提取代理模型在体积变化最大的视角下的二维

轮廓，用于描述用户的建模意图（期望的部件）。这里的体积变化指画草图前后代理模型的体积之差。

### 3.4.2 轮廓描述符

查询轮廓（代理模型轮廓）整体做为一个轮廓段。模型轮廓在每个尺度下都由若干轮廓段构成（见3.3节）。模型轮廓的轮廓段与查询轮廓相匹配，从而得到查询轮廓与模型轮廓的局部匹配。

为了比较两个轮廓段，我们为它们计算轮廓描述符。我们采用Riemenschneider等人<sup>[70]</sup>提出的角度矩阵做为轮廓描述符。该描述符描述了轮廓段上采样点间的空间分布。

一个轮廓段内有 $m = 21$ 个采样点。给一对采样点( $b_i, b_j$ )，我们计算角度值 $\alpha_{ij}$ :

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \langle \overrightarrow{b_i b_j}, \overrightarrow{b_i b_{i+\Delta}} \rangle & \text{if } i < j, \\ \langle \overrightarrow{b_i b_j}, \overrightarrow{b_i b_{i-\Delta}} \rangle & \text{if } i > j, \\ 0 & \text{if } \|i - j\| \leq \Delta \end{cases}$$

其中， $\delta = 2$ 是偏移量， $\langle l_1, l_2 \rangle$ 代表直线 $l_1$ 与 $l_2$ 间的夹角。轮廓描述符即为该角度值构成的矩阵 $A$  ( $A_{ij} = \alpha_{ij}$ )。两个轮廓段 $S$ 与 $T$ 间的距离是两轮廓段的角度矩阵 $A^S$ 与 $A^T$ 的欧式距离:

$$D(S, T) = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (A_{ij}^S - A_{ij}^T)^2$$

### 3.4.3 模型搜索

我们需要先找到 $c = 9$ 个与代理模型匹配上的数据库模型（称为候选模型），然后再从候选模型中提取出候选部件建议给用户。为此，我们在RC- $k$ NNG内找到很多（ $21c$ ）匹配轮廓段，得到对应的匹配模型并为它们计算排序分数。得分最高的 $c$ 个模型会显示给用户。

为得到这些匹配的轮廓段，我们首先将查询轮廓段与RC- $k$ NNG的所有种子轮廓段比较。比较结果存储至优先队列中，与查询轮廓段间距最小的轮廓段排在

队首。然后，以最好优先方式（Best-first Search）遍历整个RC- $k$ NNG。遍历过程中，首先优先队列队首出队并加入匹配轮廓段集合，该队首的所有邻居与查询轮廓段做匹配并入队。该过程一直进行，直至匹配轮廓段集合内元素数目为 $21c$ 。

对数据库模型，我们按如下方法计算其做为候选模型的分数：

$$s = \frac{\alpha}{t} \sum_{i=1}^t D_i + \frac{\beta}{t},$$

其中， $t$ 是属于该模型的匹配轮廓段数目， $D_i$ 是第*i*个匹配轮廓段与查询轮廓段间距， $\alpha = 0.95$ ， $\beta = 0.05$ 。

### 3.5 逐步式部件提取

用户选择了候选模型，我们必须实时地精确地找到并切割下匹配的候选部件。要实现该目标，我们需要解决如下技术难点：

- 一个轮廓段可能包括多个语义部件。语义部件指类似头部件，椅子背部件等部件。
- 轮廓边界可能是非常规则的或并不与语义部件直接相关。因此，这样的部件仅能以用户草图为参考分割。
- 分割速度要足够快，满足交互需求。

前两种情况如图3.7所示。

我们通过为数据库模型建立超面片图（Superface Graph, SFG）表示解决如上问题。超面片图是三维模型的离散细粒度表示形式。图上顶点代表超面片。超面片通过对模型做基于边界特征的过分割得到。图上边描述超面片间的相邻关系。边的权重表示相连的超面片组成同一部件的概率（如图3.8所示）。

超面片图包含了相邻超面片合并为更大超面片的先验概率。我们在离线阶段得到每个数据库模型的超面片图表示。

#### 3.5.1 超面片图表示

为了给数据库模型建立超面片图表示，我们将模型表面分割成50小块<sup>[71]</sup>。

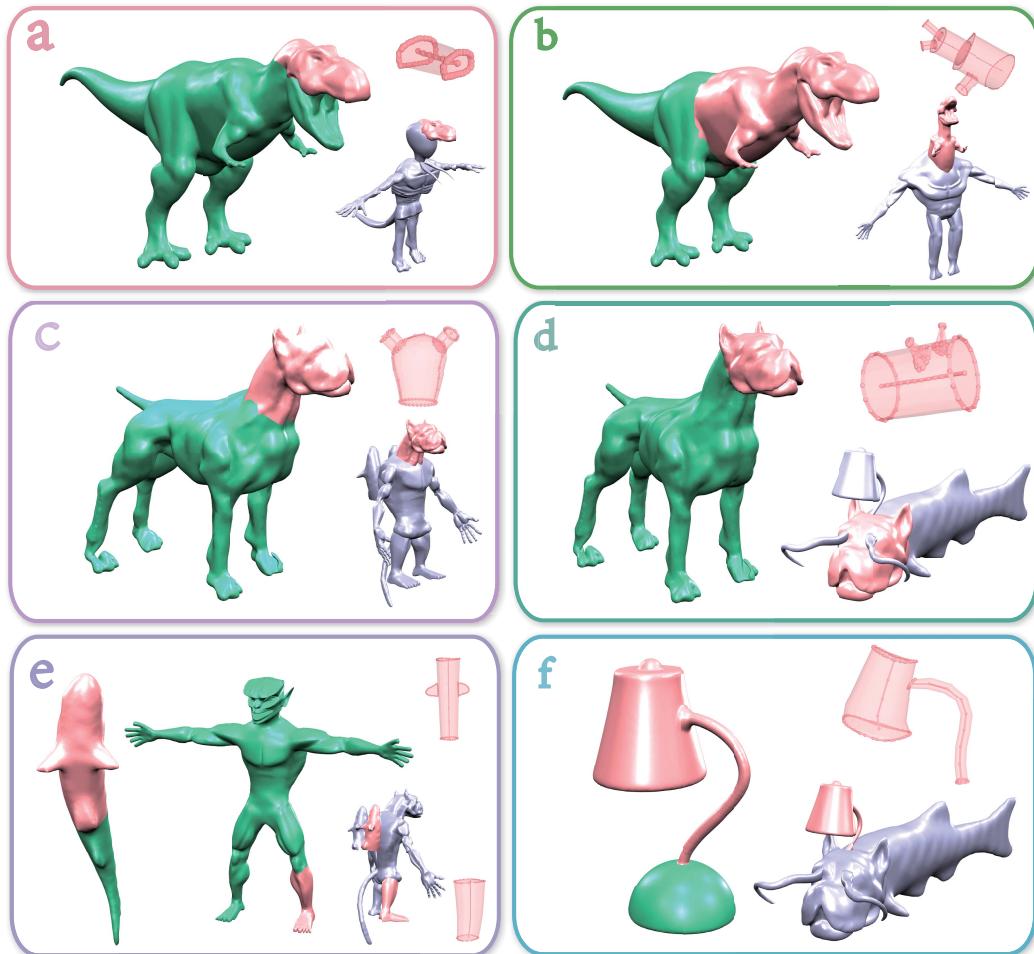


图 3.7 非常规分割方式示意图。在每个子图内，左侧是数据库模型的分割结果，右下角给出结果模型。

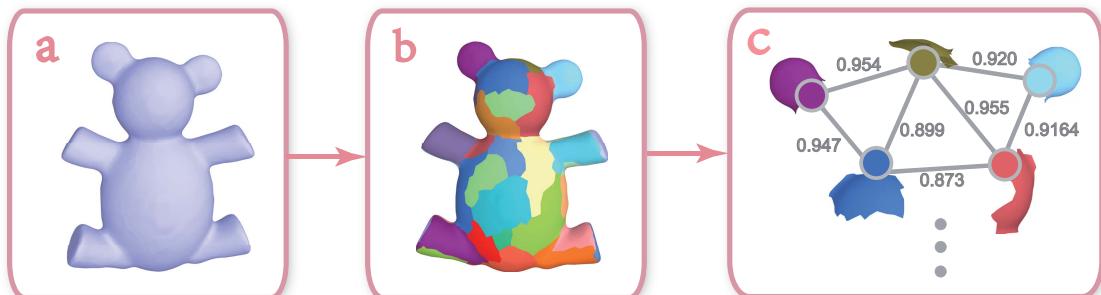
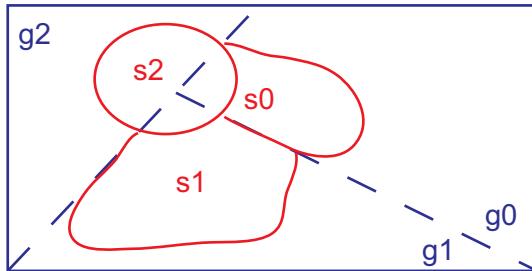


图 3.8 三维模型超面片图建立过程。给一个Teddy模型 (a)，我们将它分割成50个超面片 (b)。一个超面片是超面片图的一个顶点。相邻超面片由带权重的边连接 (c)。



	g0	g1	g2
Histogram(s0) =	1.0	0.0	0.0
Histogram(s1) =	0.0	1.0	0.0
Histogram(s2) =	0.2	0.15	0.65

图 3.9 超面片在分割部件上的分布示意图。 $s_0$ ,  $s_1$ 和 $s_2$ 是超面片。 $g_0$ ,  $g_1$ 与 $g_2$ 是在模型上通过Randomized Segmentation得到的分割部件。

一小块视为一个超面片（对应超面片图内一个顶点）。每一对相邻超面片通过超面片图上一条边相连。

为了计算边的权重，我们对三维模型做900次Randomized Segmentation<sup>[72]</sup>。分割的目标部件数目由2变化到10。给一个分割结果，我们为每一个超面片建立一个直方图，描述该超面片属于各分割部件的概率。直方图的一个直方条针对一个分割部件，其值是该超面片位于该分割部件内的面积比例（如图3.9）。数学上讲，超面片 $s$ 针对分割部件 $g$ 的直方条 $h_s^g$ 定义如下：

$$h_s^g = \frac{\sum_{f \in Faces(g) \cap Faces(s)} Area(f)}{\sum_{f \in Faces(s)} Area(f)},$$

其中， $Face(x)$ 是属于 $x$ 的面片集合， $Aera(f)$ 指面片 $f$ 的面积。

这些直方图做为计算超面片位于同一部件内概率的特征向量。我们定义 $P(s, s')$ 为相邻超面片 $s$ 与 $s'$ 位于同一部件上的概率（称为超面片间一致性）。 $P(s, s')$ 为两超面片对应的直方图 $H$ 与 $H'$ 的 $\chi^2$ 距离：

$$P(s, s') = 1 - \chi^2(H, H') = 1 - \frac{1}{2} \sum_{g_i \in G} \frac{(h_s^{g_i} - h_{s'}^{g_i})^2}{(h_s^{g_i} + h_{s'}^{g_i})^2},$$

其中， $G = \{g_i | 1 \leq i \leq N\}$ 是一次Randomized Segmentation得到的部件的集合， $g_i$ 是第*i*个分割部件， $N$ 是分割部件个数。

为了得到超面片图上边的权重，我们首先将两超面片在不同Randomized Segmentation结果上的一致性累加，然后通过分割次数归一化。

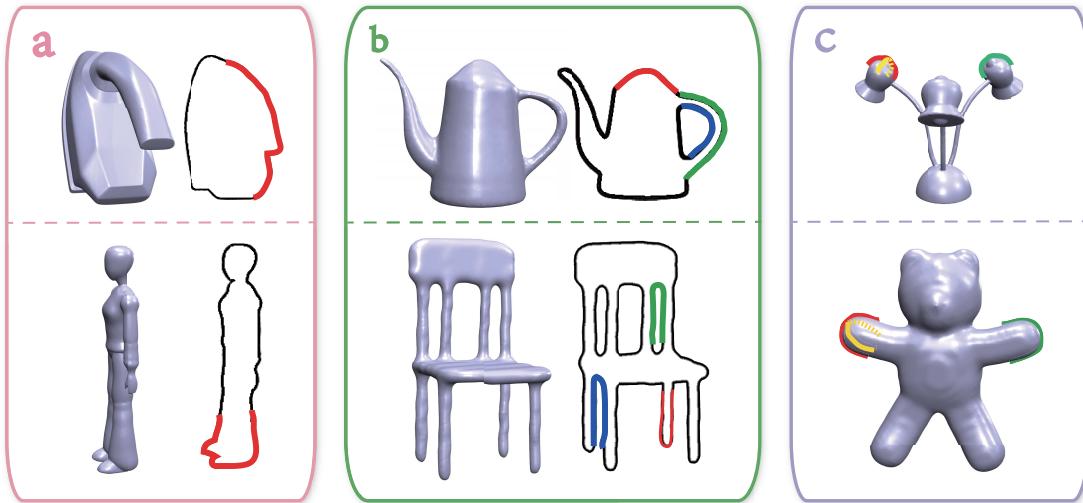


图 3.10 复杂轮廓及其关系示意图。(a) 示意深度不连续轮廓段。(b) 示意空轮廓段。(c) 示意图匹配至同一三维部件在不同视角下的轮廓段。

### 3.5.2 模糊部件识别

第一步，我们在模型的超面片图上提取一个与轮廓段大致匹配的三维部件。我们将轮廓段两端点相连得到封闭轮廓段。这形成了用户期望部件的二维投影边界。然后，我们从与投影区域中间最近的超面片图开始，采用泛洪算法，将所有处于该投影区域内的超面片收集起来。

在这个步骤中，我们必须处理如下问题：(1) 轮廓段可能深度不连续，跨越几个不相连的部件 (3.10 (a))。(2) 匹配上的轮廓段可能不包围任何部件 (图3.10 (b) 内蓝色与绿色轮廓段包围的部分)。(3) 查询轮廓可能与同一三维部件在不同视角下的轮廓段匹配上 (如图3.10 (c))。为了解决该问题，我们过滤掉无效部件并去掉重复部件。

### 3.5.3 由粗到细地边界优化

粗糙部件被识别出来后，我们就把它从模型上分割下来并优化其边界使与代理模型更加匹配。在该过程中，我们考虑如下因素：

- **轮廓闭包** 正如前面所指出的，连接轮廓段两端点的直线与轮廓段构成目

标三维部件的自然边界。因此，目标三维部件的投影应该与该边界尽量一致。

- **超面片同现** 如果两个超面片总是出现在随机分割得到的同一部件上，那么它们倾向于同时属于或同时不属于目标三维部件。这一点是超面片的先验概率。
- **凹陷** 模型凹陷信息对于得到高质量的分割结果至关重要，因为凹折痕通常被人类视为自然的分割边界<sup>[73]</sup>。
- **光滑** 分割部件的边界最好不要是剧烈的锯齿形。

### 3.5.4 粗层次部件提取

我们将粗层次部件提取问题形式化为二值标记问题，该问题可通过最小化Gibbs能量求解：

$$E_c = \sum_{i \in V} E_1(l_i) + \sum_{(i,j) \in E} E_2(l_i, l_j),$$

其中， $V$ 与 $E$ 分别代表超面片图 $\mathcal{G}$ 的顶点集合与边集合。 $E_1(l_i)$ 是将顶点*i*标记为 $l_i$ 时的能量耗费。 $E_2(l_i, l_j)$ 是当分别将顶点*i*与*j*标记 $l_i$ 与 $l_j$ 时的能量耗费。 $E_l$ 定义如下：

$$E_1(l_i) = \begin{cases} -\ln \mathcal{P}(i), & l_i = 1, \\ -\ln(1 - \mathcal{P}(i)), & l_i = 0, \end{cases}$$

其中， $\mathcal{P}(i)$ 是将标记1置给顶点*i*的概率。根据轮廓闭包约束， $\mathcal{P}(i)$ 定义为第*i*个超面片的投影位于该轮廓内的面积百分比：

$$\mathcal{P}(i) = \frac{\text{Area}_{proj}^{in}(i)}{\text{Area}_{proj}(i)},$$

其中， $\text{Area}_{proj}^{in}(i)$ 是第*i*个超面片的投影与轮廓线闭包相交部分的面积。 $\text{Area}_{proj}(i)$ 是第*i*个超面片的投影的面积。 $E_2$ 基于超面片同现约束定义为：

$$E_2(l_i, l_j) = \begin{cases} 0, & l_i = l_j, \\ e_{ij}, & l_i \neq l_j, \end{cases}$$

其中， $e_{ij}$ 是超面片图的边权重。该二值标记问题通过二值图割方法求解<sup>[74]</sup>。

### 3.5.5 细层次部件提取

在超面片层次上得到目标三维部件（一组相邻的超面片）后，我们将边界超面片投影至原模型上与该超面片中心最近的顶点上。对于超面片图上的边 $e$ ，令 $v_1$ 与 $v_2$ 分别为 $e$ 相连的两超面片在原模型上对应的投影顶点。我们沿着直线 $v_1v_2$ ，将 $v_1$ 传播至 $v_2$ 。

然后，我们通过迭代地最小化如下能量函数实现边界优化：

$$E_f = E_v + E_s,$$

其中， $E_v$ 是凹陷能量项， $E_s$ 是光滑能量项。 $E_v$ 定义为所有边界边的凹陷能量之和<sup>[75]</sup>：

$$E_v = \sum_{e \in \partial Q} \eta(1 + \cos \alpha_e) |e|,$$

其中， $e$ 是候选三维部件 $Q$ 边界上的一条边， $|e|$ 表示 $e$ 的长度， $\alpha_e$ 是 $e$ 的二面角。 $e$ 是凹陷边时， $\eta = 0.1$ ；否则 $\eta = 1.0$ 。 $E_s$ 定义如下：

$$E_s = \sum_{v \in \partial Q} |\sin \langle e_l, e_r \rangle|,$$

其中， $v$ 是边界 $Q$ 上的顶点。 $e_l$ 是 $Q$ 上指向 $v$ 的一条边， $e_r$ 是 $Q$ 上起于 $v$ 的一条边。我们通过在边界顶点上施加snake operations<sup>[76]</sup>最小化能量函数 $E_f$ 。

用户点击鼠标即可执行部件边界优化。该步骤是可选的，它并不会对最终造型结果有太大影响。

## 3.6 实验结果

我们用C++语言实现系统原型，并在标准台式机（3.5 GHz Intel Core I7-3770K processor, 8GB memory, and an Nvidia GeForce GTX 660 GPU video card）上做实验。图3.1给出一个例子的造型流程。给一个概念设计，用户通过草图表达其造型意图。系统基于草图生成三维代理模型并实时地从数据库内提取建议部件。这些建议部件有非典型部件（(c) 内的头部件），由一组常规部件构成的部

件 ((e) 内的台灯部件) 及来自不同类模型的部件 (例如, (c) 内来自狗模型的部件, (g) 内来自章鱼模型的部件)。图3.11给出更多的造型结果。可见, 用户可以使用我们的技术生成很多极具创意的结果。



图 3.11 系统造型结果的例子。在每张子图内, 我们给出用户绘制的草图 (紫色), 生成的代理模型 (浅蓝色), 对应的数据库模型及提取出的部件 (数据库模型上的蓝色部件)。注意结果模型都是由非常规部件或来自不同类的部件构成。

### 3.6.1 应用

我们提出的实时的基于草图的分割方法是一种通用性很强的技术, 有很多潜

在应用。这里我们给出一些应用的例子。用我们方法造型出的模型可以制造成艺术品，例如个性化的设计3.12。

**a****b****c**

图 3.12 用我们系统设计的模型：半人马怪物玩具（a），三维打印台灯（b），三维打印乌龟怪兽（c）。

**模型变异** 本章提出的方法可用于变异模型，如图3.13所示。给一个分割后的模型，将各部件做为查询模型去数据库内搜索相似部件，从搜索结果中选择一个替换原部件即可得到变异模型。为了得到查询部件对应的轮廓，我们首先对查询部件做主成分分析，然后，将查询部件沿第三主成分方向投影得到对应轮廓。

**部件建议** 我们的实时部件提取技术可用于提示可用部件<sup>[11,12]</sup>。与以前的方法不

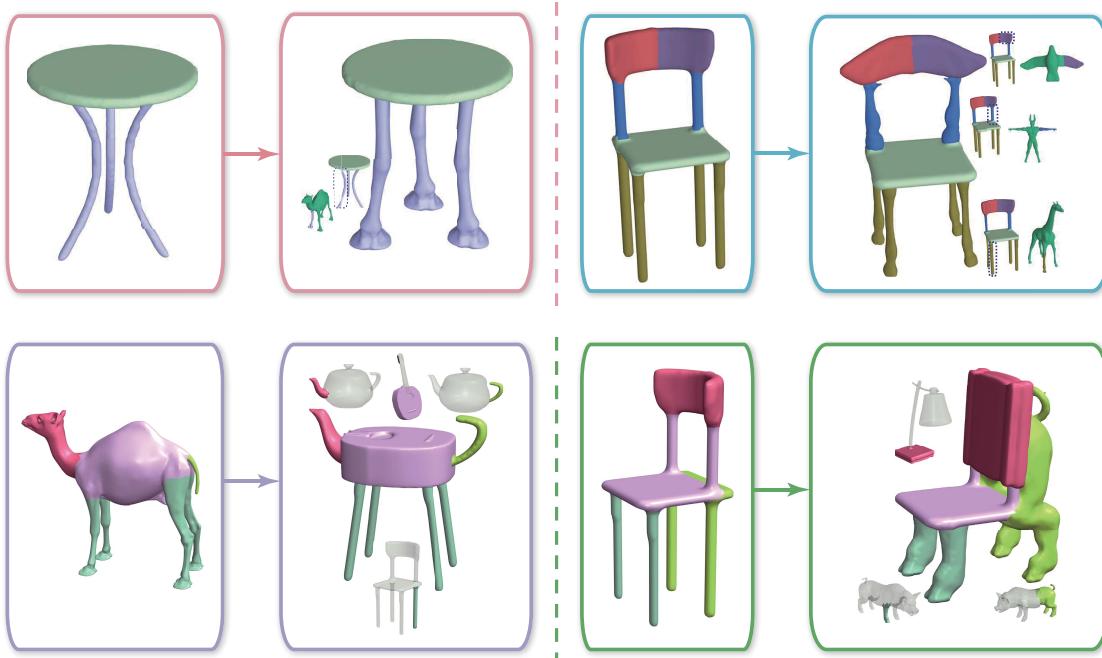


图 3.13 模型变异的例子。输入一个分割后的模型（左侧），以其部件为输入去数据库内搜索相似部件，得到与输入模型结构类似但外形明显不同的模型。

同，我们不需要预分割的三维模型数据库。给一个查询模型，其轮廓做为我们技术的输入，在数据库模型上得到匹配的部分，然后将数据库模型上与匹配部分互补的部分提示给用户。提示的部件可以是非常规则部件或来自不同类的部件（如图3.14）。

**多尺度部件建议** 我们的系统可建议不同尺度的部件。这里的“尺度”指所建议部件的大小。给一个按如上方法提示的部件，我们在该部件对应的超面片图上做Normalized Cuts<sup>[72]</sup>，得到 $T_n$ 个分割片段，每一个分割片段都由一组相邻超面片组成。 $T_n$ 定义如下：

$$T_n = \frac{w(Vol(P_M) - Vol(p_p))}{Vol(p_p)},$$

其中， $Vol(\cdot)$ 是模型的体积， $P_M$ 是搜索得到的模型， $p_p$ 是数据库模型上与查询部件相匹配的部件， $w = 2, 1 \leq T_n \leq 7$ 。我们将分割片段按与匹配部件的距离由近及远排序。用户选择一个尺度 $S$ ，我们将小于等于该尺度的分割片段做为建议部件提示给用户（如图3.15）。

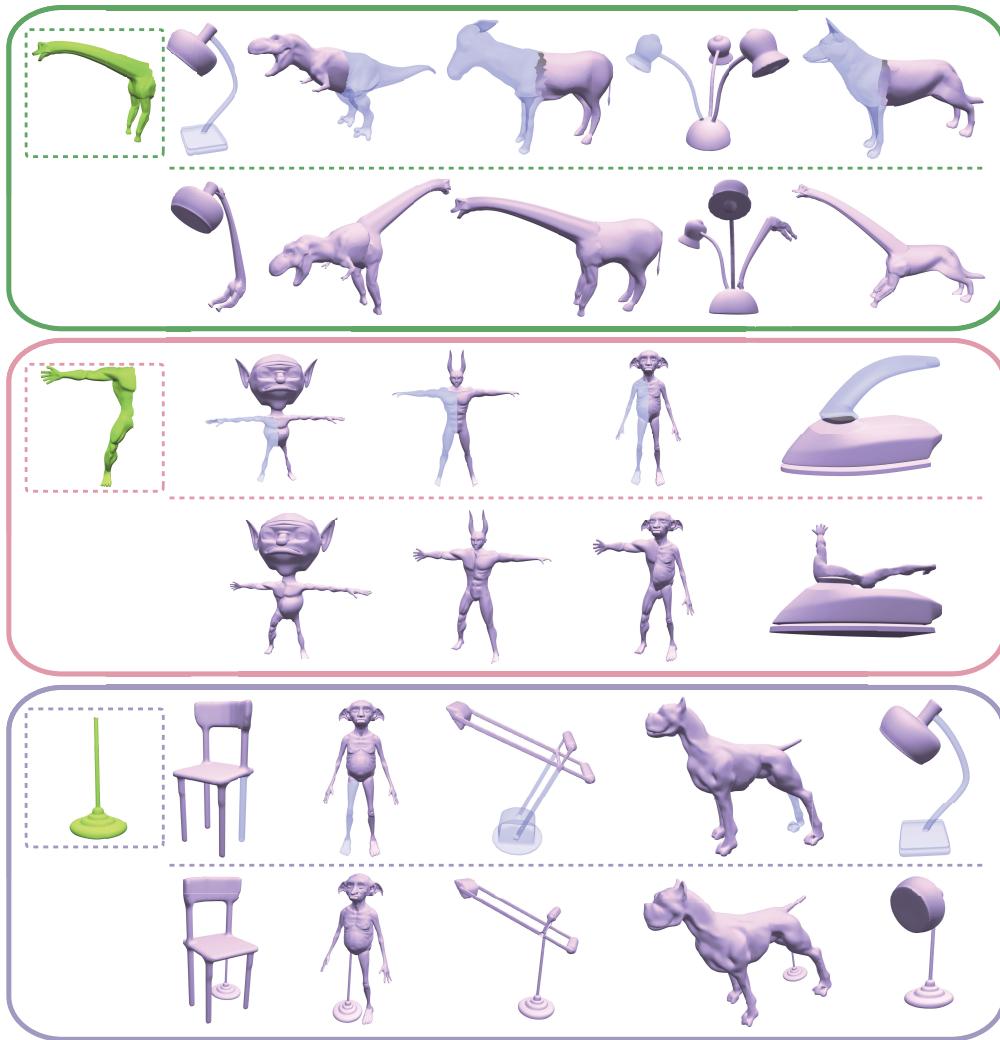


图 3.14 部件建议的例子。输入一个查询模型（绿色），我们的系统给出一系列建议部件（紫色）。组合后的模型在建议部件的下方。

### 3.6.2 快速的轮廓感知的局部匹配

我们的数据库内共有513个三维模型。这些模型共提取出10,773个轮廓。将这些轮廓组织成RC-*k*NN约用3.5小时。建立一个模型的超面片图表示平均用时20秒。基于超面片图表示，可实时提取三维目标部件。粗层次部件提取与细层次部件提取分别平均用时0.15与10.3毫秒。基于两个加速结构（RC-*k*NN与SFG）与由粗到细的部件提取策略，我们的系统可以实时响应用户操作。用户输入草图后，平均用0.56秒（通过GPU与多核加速策略）提示可用部件。

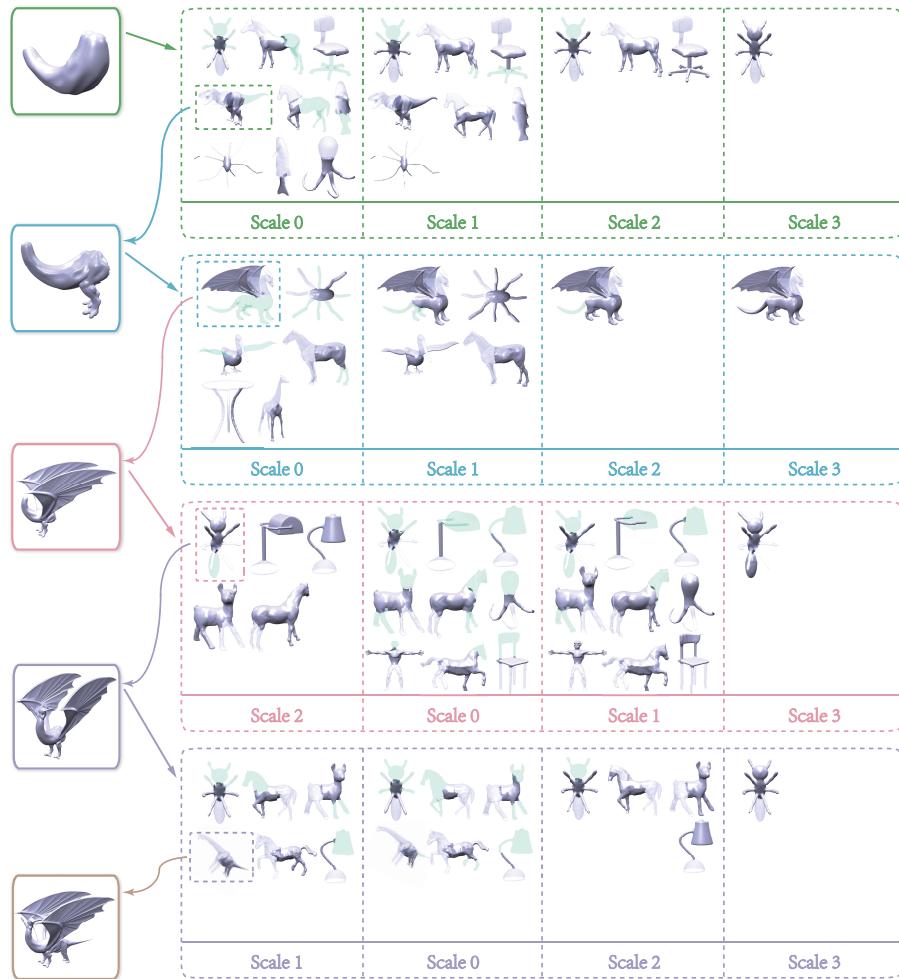


图 3.15 多尺度部件建议的例子。初始模型及每个步骤得到的结果模型，做为查询部件，列在左侧。在右侧，我们给出每步查询得到的不同尺度下的建议部件（红色）。数据库模型上与查询部件相对应的部分标为浅蓝色。其它部件标为浅绿色。

为了评估我们的RC-*k*NNG结构，我们与如下方法做了对比：

- 通过暴力方法建立的传统*k*NNNG（单层）（简称*k*NNNG）
- 通过Wang<sup>[69]</sup>提出的随机近似*k*NNNG方法建立的传统*k*NNNG（简称Wang's *k*NNNG）
- 通过暴力方法建立的RC-*k*NNNG
- 通过Wang提出的随机近似*k*NNNG方法建立的RC-*k*NNNG

表 3.1 四种不同方法的搜索效果对比。R-time表示搜索时间（以秒为单位）。C-time表示创建对应数据结构所用时间（以小时为单位）。

Algorithm \ Performance	R-time	C-time
Brute force $k$ NN	4.54	51.7
Wang's $k$ NN approximation method	5.68	1.15
RC- $k$ NN with the brute force method	0.053	33.89
RC- $k$ NN with Wang's method	0.058	3.52

对两个 $k$ NN方法（1与2），图的顶点表示一整条模型轮廓线。边及其权重通过轮廓线全局匹配得到。在与代理轮廓线做局部匹配时，我们必须显示地从模型轮廓上提取轮廓段，这极大地降低了方法1与2的速度。

在我们的实验中， $k = 20$ ，每个模型轮廓线上提取6条轮廓段。

四种方法的搜索结果见表3.1。可以很明显地看出，本文提出的方法效果最好。我们的方法仅比Wang's  $k$ NN多花2倍时间用于建立加速结构。但从搜索时间上来看，我们的方法是Wang's  $k$ NN的97倍。 $k$ NN方法（方法1与2），需要实时做局部匹配，所以要慢得多。

### 3.6.3 对比

为了定性与定量地评估我们方法的效果，我们对比了如方法：

- **Ours.** 本文提出的方法
- **PreSeg.** 基于本文方法实现的基于预分割的模型数据库的方法。该方法实现细节如下：1) 每个数据库模型都预分割成常规部件（典型语义部件）。比如，人模型分成4部分：头部分，躯干，胳膊，腿。2) 为每一个部件提取各视角下的边界轮廓线。3) 将所有部件的轮廓线组织在 $k$ NN图内。图内顶点是部件轮廓。通过部件轮廓全局匹配为顶点建立边。3) 在运行阶段，输入三维代理部件，系统采用类似Ours的方法通过全局匹配返回一组候选部件。

我们邀请4位三维造型艺术家与16位学生参与用户测试。4位艺术家中2位具有6年以上三维造型经验，另外2位有4年经验。所有的参与者位于22到31岁之间。我们将参与者分成A, B两组。每一组都由2位艺术家与8位学生构成。在每一组内男女人数相同。我们设计了两个开放式造型任务：

- **生物造型** 假设你是Valve®公司的一名三维造型师。项目组计划为电子游戏Dota 2®加入一个新英雄。请使用我们的造型系统设计该角色的原型。
- **日常用品造型** 假设你是创意生活公司的一名设计师。要求你为客户设计一个个性化的日常用品（例如，个性化的台灯，创意服饰等）。请使用我们的系统设计该日常用品的原型。

**用户测试第一阶段** 第一阶段的目标是验证非典型部件（非常规部件，由一组常规部件构成的部件）对用户造型是否有用。我们让所有的测试者完成两个造型任务。A组用户首先使用Ours系统，然后是PreSeg系统。B组用户首先使用PreSeg系统，然后是Ours系统。在用户使用系统之前，我们先用20分钟时间向其介绍系统操作方法。之后，用户花30分钟操作系统，包括三维代理部件造型，浏览建议部件与组合部件。图3.16展示了一位测试者正在做用户测试。该阶段的一部分造型结果见图3.17。我们统计了非典型部件与典型部件在各模型内的比例（表3.2）。很明显，Ours系统的造型结果可以由非典型部件构成。然而，PreSeg系统的造型结果仅由典型部件构成。Ours系统提供的非典型部件有利于用户的造型。

**用户测试第二阶段** 在第二阶段，我们的目标是验证Ours系统建议的部件是否比PreSeg系统建议的更能激发造型灵感。A组测试者先使用PreSeg系统，然后是Ours系统。B组用户相反。我们要求所有测试者为系统提供的所有建议打分。分数成为5等：5分表示非常具有启发性，1分表示非常平庸。

表3.3给出了Ours系统与PreSeg系统建议的部件的得分情况。由表我们可以很明显地发现Ours系统建议部件的得分高于PreSeg系统的。在图3.18内，我们给出一组代表性的建议部件及其得分。

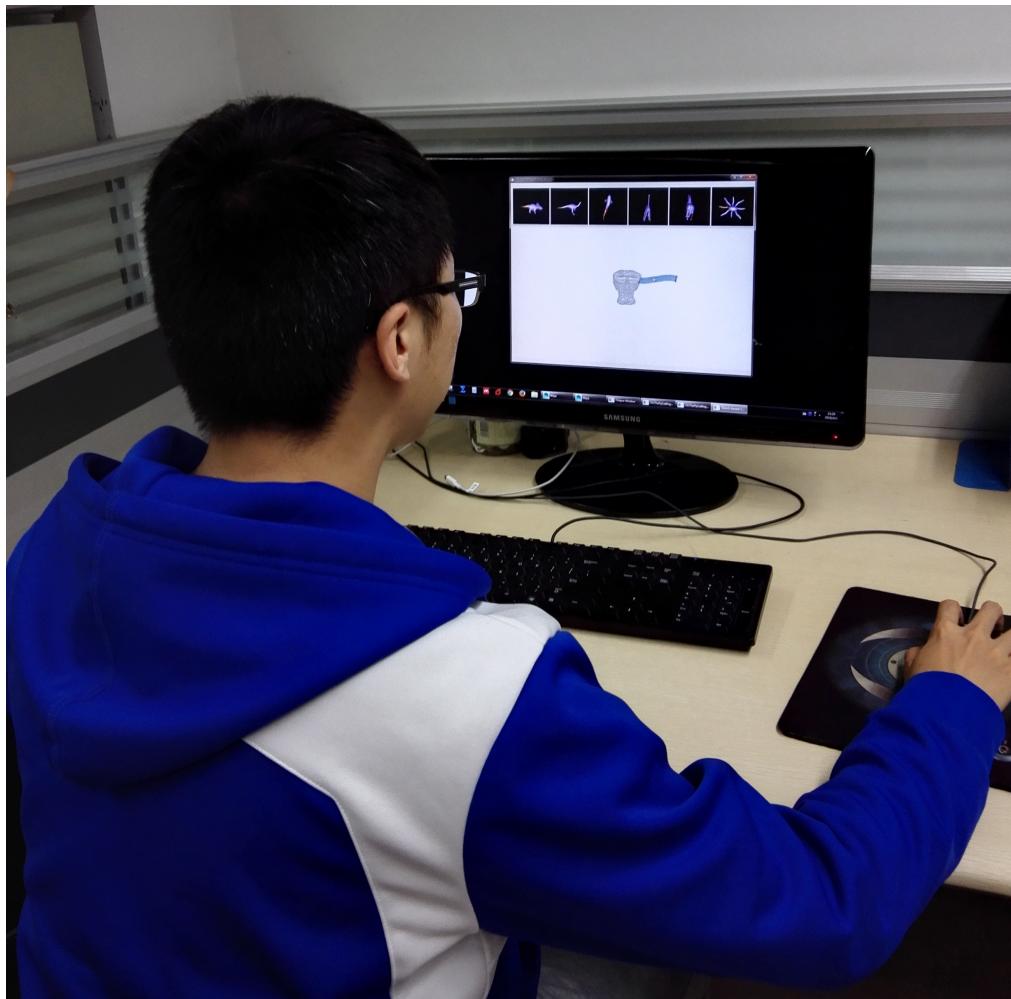


图 3.16 一位测试者正在操作造型系统完成造型任务。

表 3.2 非典型部件与典型部件在模型内所占比例统计结果。  
“Ours::Atypical”与“Ours::Regular”表示Ours系统造型结果内非典型部件与典型部件的比例。“PreSeg::Atypical”与“PreSeg::Regular”分别表示PreSeg系统造型结果内非典型部件与典型部件的比例。

Type \ STAT.	Ave.	SD.	Max.	Med.	Min.
Ours::Atypical	0.26	0.24	0.67	0.25	0.0
Ours::Regular	0.74	0.24	1.0	0.75	0.33
PreSeg::Atypical	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PreSeg::Regular	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0

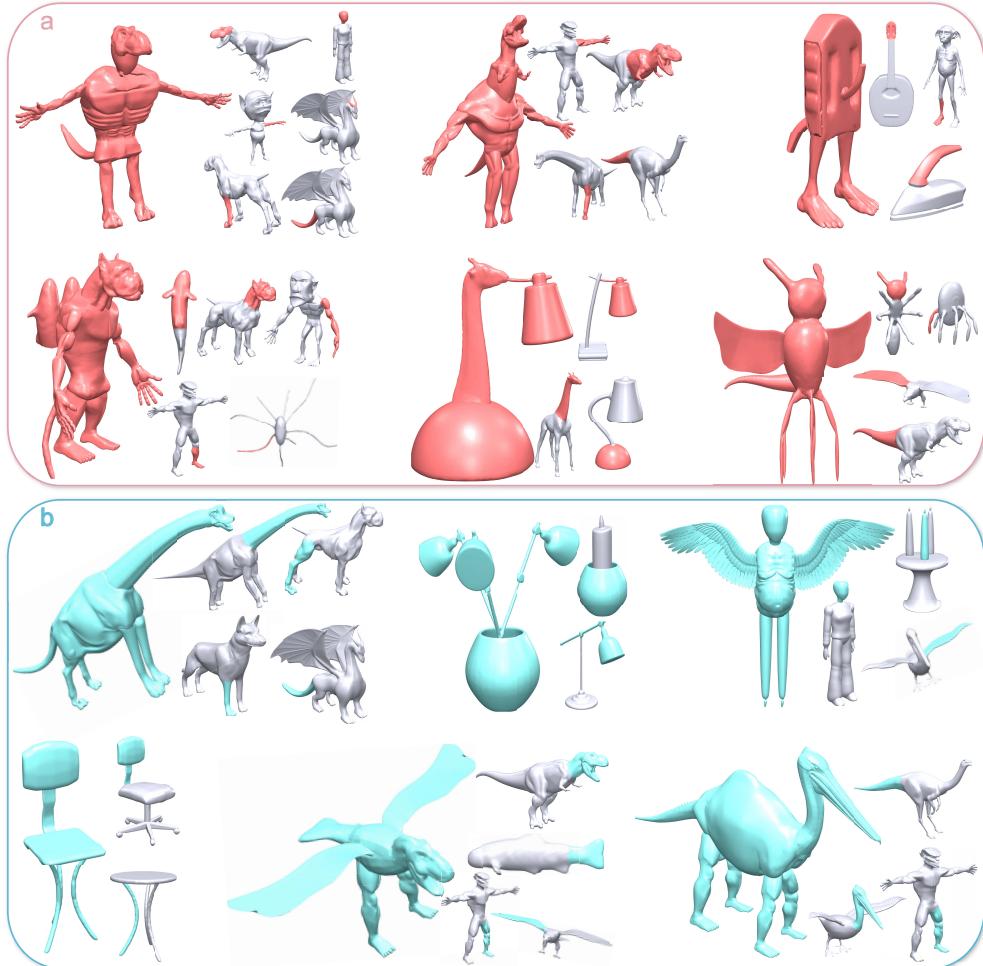


图 3.17 Ours 系统 (a) 与 PreSeg 系统 (b) 造型结果。每个造型结果，其构成部件在右侧。

为了定量地评估两个系统建议部件的非规则性，我们设计了非规则度量标准。直观地讲，不规则度量描述了当前部件与同一模型上相关典型部件间的差异程度。给一个部件 $p$  ( $p$ 来自三维模型 $M$ )，其非规则程度值 $IRR(p)$ 定义如下：

$$IRR(p) = \max \{ d(p, q_i) | \{q_i\} = r(p) \},$$

其中， $r(p)$ 是 $M$ 上与 $p$ 相交的典型部件的集合。 $d(p, q_i)$ 是 $p$ 与 $q_i$ 的Light Field Descriptor<sup>[62]</sup>之差的归一化值。

表3.4给出了两个造型系统建议部件的非规则度量值。由表可以很明显地看

表 3.3 建议部件得分统计结果。“Ours::Total”与“PreSeg::Total”分别表示Ours系统与PreSeg系统建议部件的得分。“Ours::Atypical”与“Ours::Regular”分别表示Ours系统建议的非典型部件与典型部件的得分。“PreSeg::Atypical”与“PreSeg::Regular”分别表示PreSeg系统建议的非典型部件与典型部件的得分。

Type \ STAT.	Ave.	SD.	Max.	Med.	Min.
Ours::Total	3.59	1.03	5	3	1
PreSeg::Total	3.06	0.74	5	3	1
Ours::Atypical	4.47	0.72	5	5	2
Ours::Regular	3.02	0.78	5	3	1
PreSeg::Atypical	-	-	-	-	-
PreSeg::Regular	3.06	0.74	5	3	1

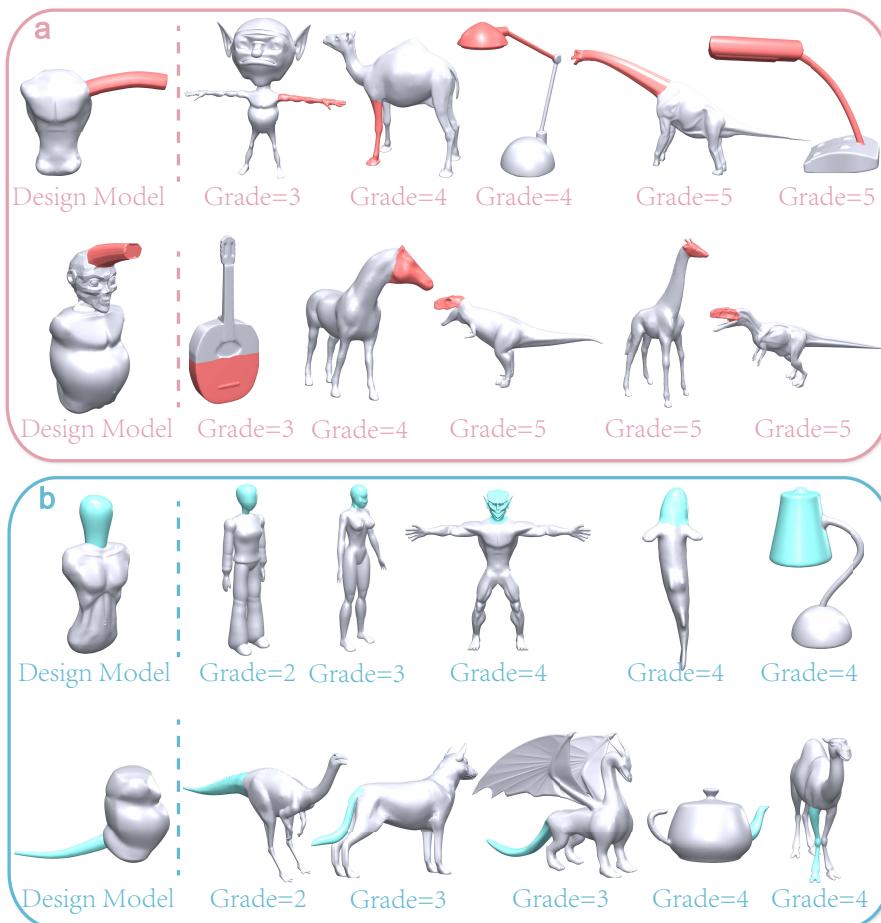


图 3.18 具有代表性的建议部件及其得分。(a) 图给出Ours系统建议的部件(红色)。(b) 图给出PreSeg系统建议的部件(蓝色)。

表 3.4 非规则度量值统计结果。“Ours::Total”与“PreSeg::Total”分别代表Ours系统与PreSeg系统建议部件的非规则度量值。“Ours::Atypical”与“Ours:Regular”分别代表由Ours系统建议的非典型部件与典型部件的非规则度量值。“PreSeg::Atypical”与“PreSeg::Regular”分别代表PreSeg系统建议的非典型部件与典型部件的非规则度量值。

STAT. Type	Ave.	SD.	Max.	Med.	Min.
Ours::Total	0.024	0.033	0.098	0	0
PreSeg::Total	0	0	0	0	0
Ours::Atypical	0.062	0.022	0.098	0.053	0.025
Ours:Regular	0	0	0	0	0
PreSeg::Atypical	-	-	-	-	-
PreSeg::Regular	0	0	0	0	0

出，Ours系统建议的部件相对PreSeg系统的更加不规则。非典型部件导致了非规则性。图3.19给出了一组代表性的建议部件及其非规则度量值。

我们统计了Ours系统与PreSeg系统提供的非典型部件与典型部件的得分(表3.3)。可以很明显地发现，非典型部件的平均得分高于典型部件的。表3.5给出了每一个分值内非典型部件与典型部件所占比例。很显然，非典型部件得分高于典型部件。由此，可以得出结论Ours系统建议的部件相对PreSeg系统的更具启发性；相对典型部件，非典型部件对用户的启发更多。

表 3.5 各分值内非典型部件与典型部件所占比例统计结果。“Ours::Atypical”与“Ours::Regular”分别表示Ours系统的造型结果内非典型部件与典型部件在各分值内所占比例。“PreSeg::Atypical”与“PreSeg::Regular”分别表示PreSeg系统的造型结果内非典型部件与典型部件在各分值内所占比例。

Grade Type	1	2	3	4	5
Ours::Atypical	0.0	0.08	0.03	0.6	0.91
Ours::Regular	1.0	0.92	0.97	0.4	0.09
PreSeg::Atypical	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PreSeg::Regular	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

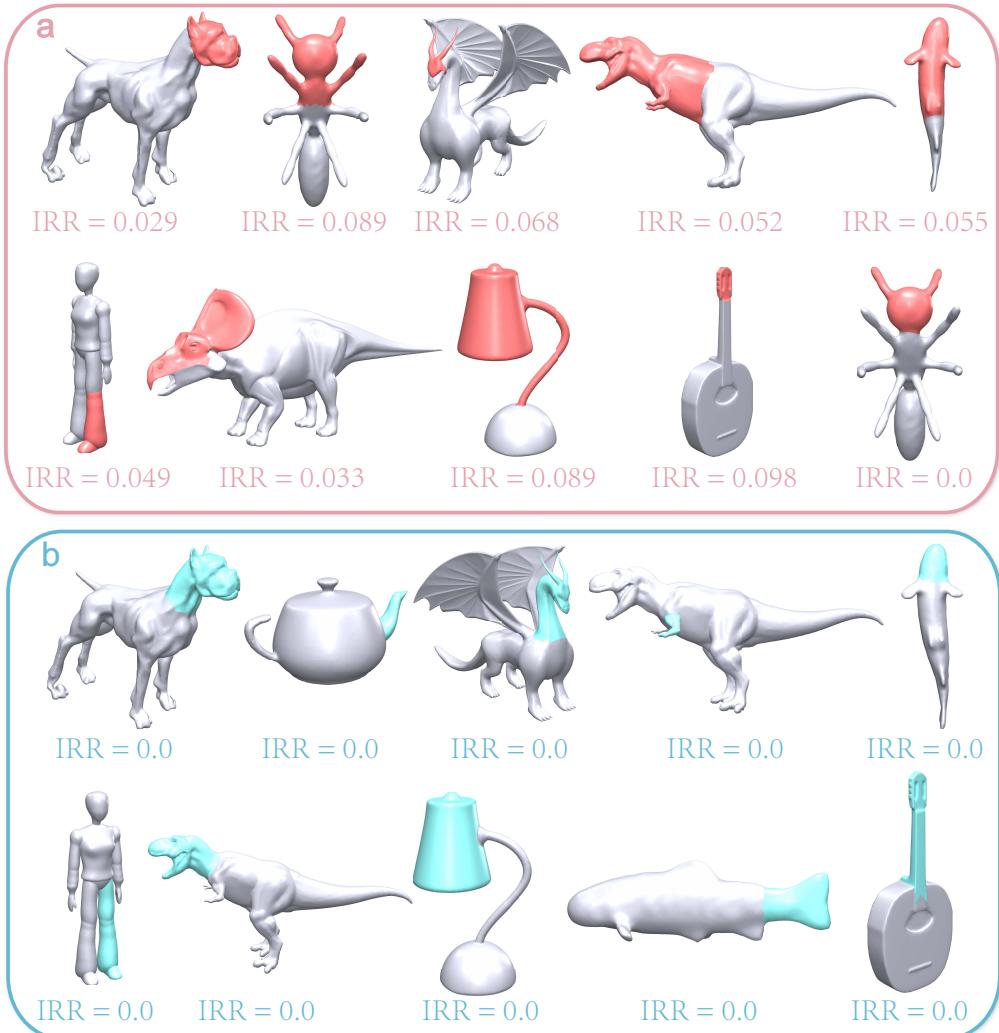


图 3.19 具有代表性的建议部件及其非规则度量值。(a) 图给出Ours系统建议的部件（红色）。(b) 图给出PreSeg系统建议的部件（蓝色）。

**用户测试第三阶段** 在第三阶段，测试者被要求完成一份调查问卷。该调查问卷包括10个陈述句，测试者需要在标准5分李克特量表上为每个陈述打分。图3.20给出调查问题统计结果。总体来看，测试者对Ours系统给予较高评价。他们觉得Ours系统建议的部件更具启发性，尤其是那些非典型部件。他们认为我们的系统对造型过程的概念设计阶段具有很大助益。

与现有的要求预分割及标记的部件建议技术<sup>[13,14]</sup>相对，我们的技术不仅可以提供非典型部件，还能提供来自不同类模型的部件。如果允许从不同类模型内搜

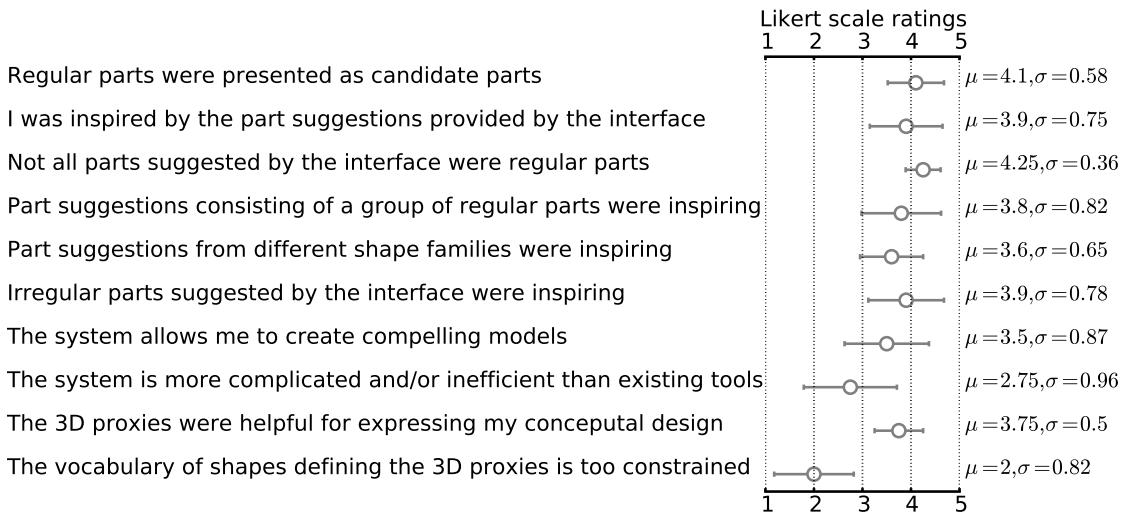


图 3.20 调查问卷统计结果。“1”表示“强烈同意”。“2”表示“同意”。“3”表示“中立”。“4”表示“不同意”。“5”表示“强烈不同意”。

索部件，这类技术也可以提供来自不同类模型的部件。然而，他们仍然不太适合提供非典型部件。

建议由一组预分割部件构成的部件看起来容易，实际非常困难。这本质是个组合搜索问题。该问题的复杂度随预分割部件的增长而急剧增长。从某种程度上讲，我们的RC-kNNG技术就是针对组合搜索问题的。如果现有的部件建议技术<sup>[11,13,14]</sup>采用我们的RC-kNNG技术，他们也可以达到类似我们技术的效果。

### 3.7 本章小结

在本章中，我们提出针对浏览式草图造型的按需部件建议技术。在用户输入草图表示其造型意图后，我们的系统基于草图得到三维代理部件，并以之为查询模型到三维模型数据库内搜索候选部件。这些候选部件是实时地从数据库模型上匹配并分割下来的。与以前的方法不同，我们的方法不需要预分割的数据库，而且是实时地提取出与用户草图相匹配的部件，因此极大地扩展了建模空间。我们的系统为艺术家提供了完成开放式造型任务的新方法。同时，我们的方法也推动了草图式造型技术的发展。

## 第4章 针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术

### 4.1 引言

高效地且富于创造性地设计与造型三维模型在图形学研究领域一直是个非常困难的问题。基于草图的三维造型方法<sup>[1,57]</sup>易学易用，但仅限于造型光滑缺少几何细节的模型。当前的研究趋势越来越看重造型过程中的创造性支持，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。研究人员提出各种各样的技术以为三维造型提供创造力支持<sup>[11,12,17,18,26,77]</sup>。

在很多应用中，造型仅是第一步，后面要为造型结果蒙皮并编辑动画。传统上，造型与蒙皮两个步骤分开。这种做法使得迭代更新变得异常困难，因为动画师不得不频繁地在造型与蒙皮工具间来回切换。这种做法浪费时间且影响效率。Borosan等人<sup>[19]</sup>提出一个统一的框架无缝地整合了造型与蒙皮两个步骤。Jin等人<sup>[20]</sup>又将运动重定向融合至如上框架，提供了一个非线性的建模/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的方式编辑动画，并立即观察到动画效果。另外一方面，通过使用现有的已蒙皮的模型，也节省了不必要的重复性工作。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制造的分析，不仅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，这对用户的创造性造型过程大有益处。然而，要三维打印一个模型需要考虑很多问题，例如，拓扑，平衡性，结构稳定性等。我们的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4.1 (c) 内，就三维打印来讲，尾巴部分完全不需要这么多关节。另外一种重要问题，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<sup>[78,79]</sup>，使

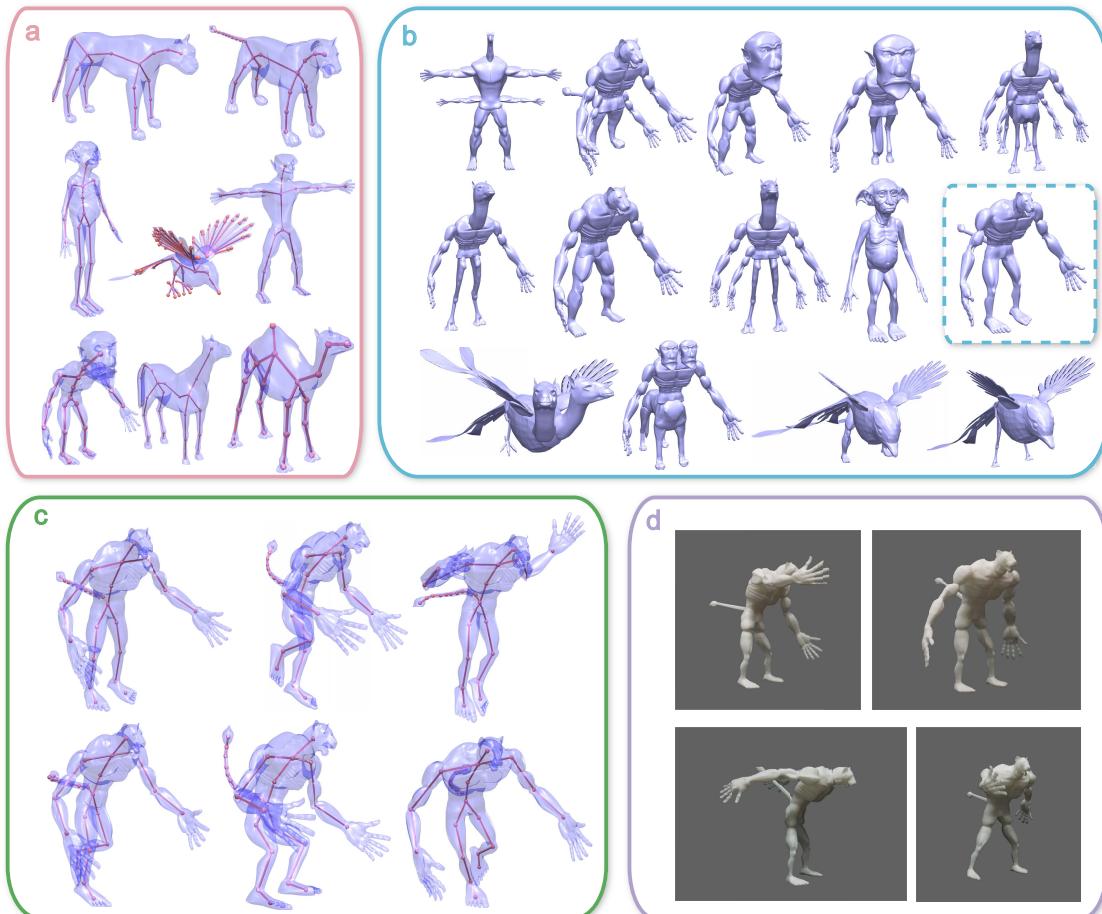


图 4.1 创新性地造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的模型。虚线矩形框圈住的模型是用户选择感兴趣的模型。(c) 动画编辑阶段得到的几个动作。(d) 三维打印出的模型的三个不同姿势。

模型保持平衡<sup>[80,81]</sup>。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。

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造性造型过程。如图 4.1 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>[77]</sup>“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，用户可以从得到的模型中选择一个，蒙皮并三维打印。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，极大地帮助了用户的创意造型。我们的工作有两个创新：

- **蒙皮部件融合** 我们提出一种新的技术，可以融合部件表面的同时融合骨架，并以局部方法快速更新融合部件的皮肤权重。
- **面向三维打印的蒙皮角色模型的分析** 我们提出一种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。

本章接下来的内容安排如下：首先，介绍本章提出方法的流程；接着，介绍本文的第一个贡献，蒙皮部件融合方法；然后，介绍本文的第二个贡献，面向三维打印的蒙皮角色模型的分析方法；接着，给出实验结果。最后，对本章内容做总结。

## 4.2 相关工作

本章工作涉及到骨架绑定与面向三维打印的模型分析技术。在这一节内，我们简要回顾这两方面的相关工作及研究现状。

### 4.2.1 骨架绑定

在计算机动画中，往往以分层方式组织角色模型骨架的骨骼与关节。编辑动画之前必须先绑定骨架<sup>[82]</sup>计算蒙皮权重。研究人员提出各种各样的骨架绑定<sup>[83]</sup>技术。最近，Borosan等人<sup>[19]</sup>提出一个统一的框架，无缝融合了基于草图的建模与骨架绑定。这项工作被Jin等人<sup>[20]</sup>进一步发展，用于支持动画重定位。

### 4.2.2 面向三维打印的模型分析

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。在模型做三维打印之前需要做很多预处理工作。在本节内我们主要介绍与本章内容相关的技术，涉及模型结构稳定性分析的技术与关节模型分析技术。

**模型结构稳定性分析** 计算机中的三维模型与现实世界的物理实体有本质性的不同。后者涉及到制造环节，物体结构稳定性是不得不考虑的因素。所以研究人员提出很多技术致力于增强模型结构稳定性，使模型可打印。Whiting等人<sup>[51,84]</sup>最早专注于砖石建筑物的结构稳定性研究。提出融合了物理约束的过程式造型方法，基于稳定性选择规则参数，以此满足结构约束。Panozzo等人<sup>[85]</sup>提出一个针对普通用户的砖石建筑生成方法，通过优化结构布局，得到与输入曲面尽可能相似且具有自支撑结构的砖石结构模型。后来，该方法被扩展用于找到自支撑结构的最佳建造顺序，以节省材料与工作量<sup>[86]</sup>。

承压性是稳定结构的重要属性。Stava等人<sup>[87]</sup>提出一种针对模型承压性的自动检测与修复技术。在自动检测步骤，三种手段用于修复承压性，包括添加支撑物，挖空模型内部与加厚模型。检测与修复两个步骤迭代进行，直至得到具有足够承压性的模型。Zhou等人<sup>[88]</sup>提出一种自动检测模型压力分布的方法。

平衡性是稳定结构的另一重要属性。Prévost等人<sup>[80]</sup>最早研究模型平衡性。他们通过挖空内部及调整外形，使模型在不同姿势下保持平衡。Bächer等人<sup>[89]</sup>提出动态平衡技术，通过调整模型外形与采用不同打印材料来优化旋转稳定性。Zhao等人<sup>[81]</sup>更进一步，通过遗传算法优化力矩，为普通用户提供一种三维打印个性化不倒翁的方法。

**关节模型分析** 关节是实现运动的关键因素。Bächer等人<sup>[79]</sup>提出一种交互式的方法，基于模型蒙皮权重估计一组最优关节，并使模型可以摆姿势。同时期，Cali等人<sup>[78]</sup>提出一种关节计算方法，添加简单的用户交互，由绑定的模型得到的一个可三维打印的带关节的可摆姿势的模型。<sup>[90,91]</sup>通过计算一组自动装置实现机械运动。

### 4.3 方法概述

我们的方法总共分三个阶段（图 4.2）：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

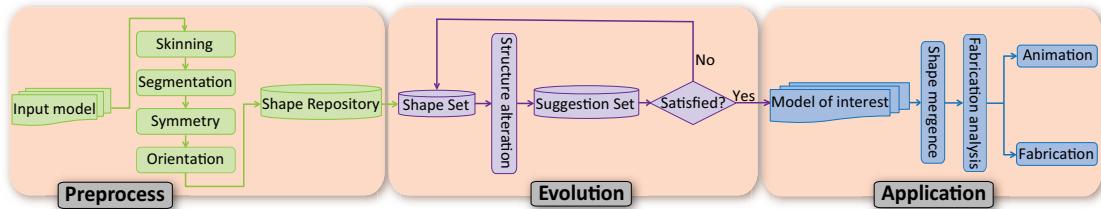


图 4.2 方法流程图。

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。

在进化阶段，我们采用模型结构变异技术<sup>[77]</sup>提示一代代新模型供用户选择。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造型师常用的造型方法，包括：

- 替换工具（如图 4.3 (a)），在不同模型间交换部件；
- 增加工具（如图4.3 (b)），将一个部件复制一次或两次；
- 组合工具（如图4.3 (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；
- 插入工具（如图4.3 (d)），对当前模型插入一个新类型的部件。

## 4.4 模型融合

部件融合是核心步骤。除了要融合模型表面，还要融合骨架并更新蒙皮权重。

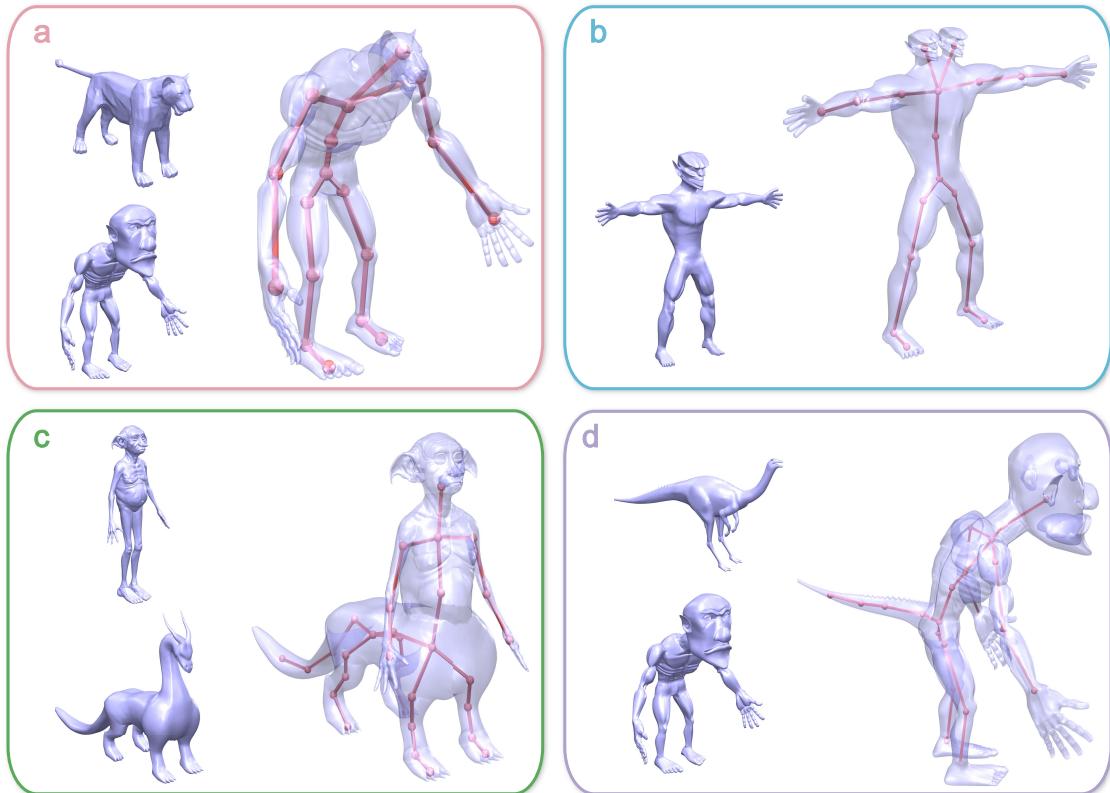


图 4.3 结构变异工具示意图。在每个子图内，原始模型在左边，变异结果模型及其骨架在右边。(a) 交换工具。(b) 增加工具。(c) 组合工具。(d) 插入工具。

#### 4.4.1 表面融合

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 4.4 (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 4.4 (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 4.4 (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<sup>[92]</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  $M = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ 。P-succeed操作施加在边  $p_iq_j$  上，得到三角形  $p_ip_{i+1}q_j$  (图 4.5 (a))。Q-succeed操作施加在边  $p_iq_j$  上，得到三角形  $p_iq_jq_{j+1}$  (图 4.5 (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

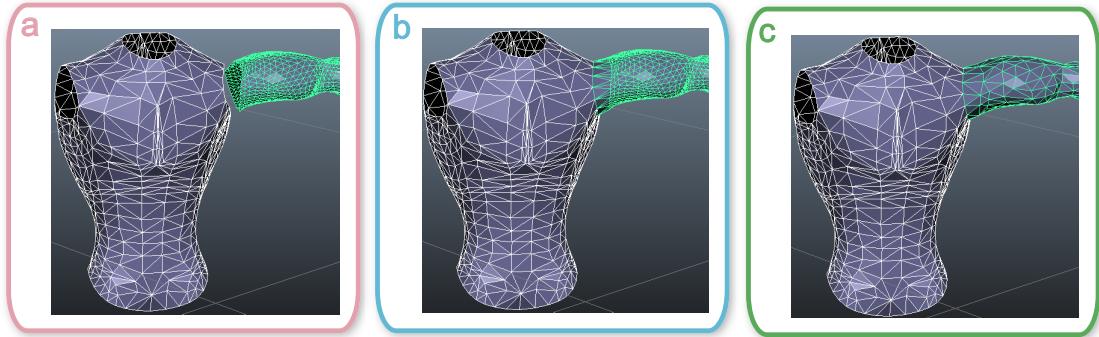


图 4.4 表面融合示意图。(a) 两个要融合的部件。(b) 间隙三角化。(c) 边界光顺。

的一个BBT。根据<sup>[92]</sup>, 该组合搜索问题可以转化为最短路径问题(图4.5(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T的边权重为如下值:

$$E_m = \omega E_s + E_r,$$

其中,  $E_s$ 用于衡量三角形T的法向与其相邻三角形法向均值的一致性,  $E_r$ 衡量三角形T的质量。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,  $\mathbf{n}_t$ 是三角形T的法向,  $\mathbf{n}_1$ ,  $\mathbf{n}_2$ 和 $\mathbf{n}_3$ 为与T相邻的三个三角形的法向。 $E_r$ 定义如下:

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

其中,  $r$ 是外接圆的半径,  $l$ 是T的最长边。

#### 4.4.2 骨架融合

欲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末端点连接(图4.6)

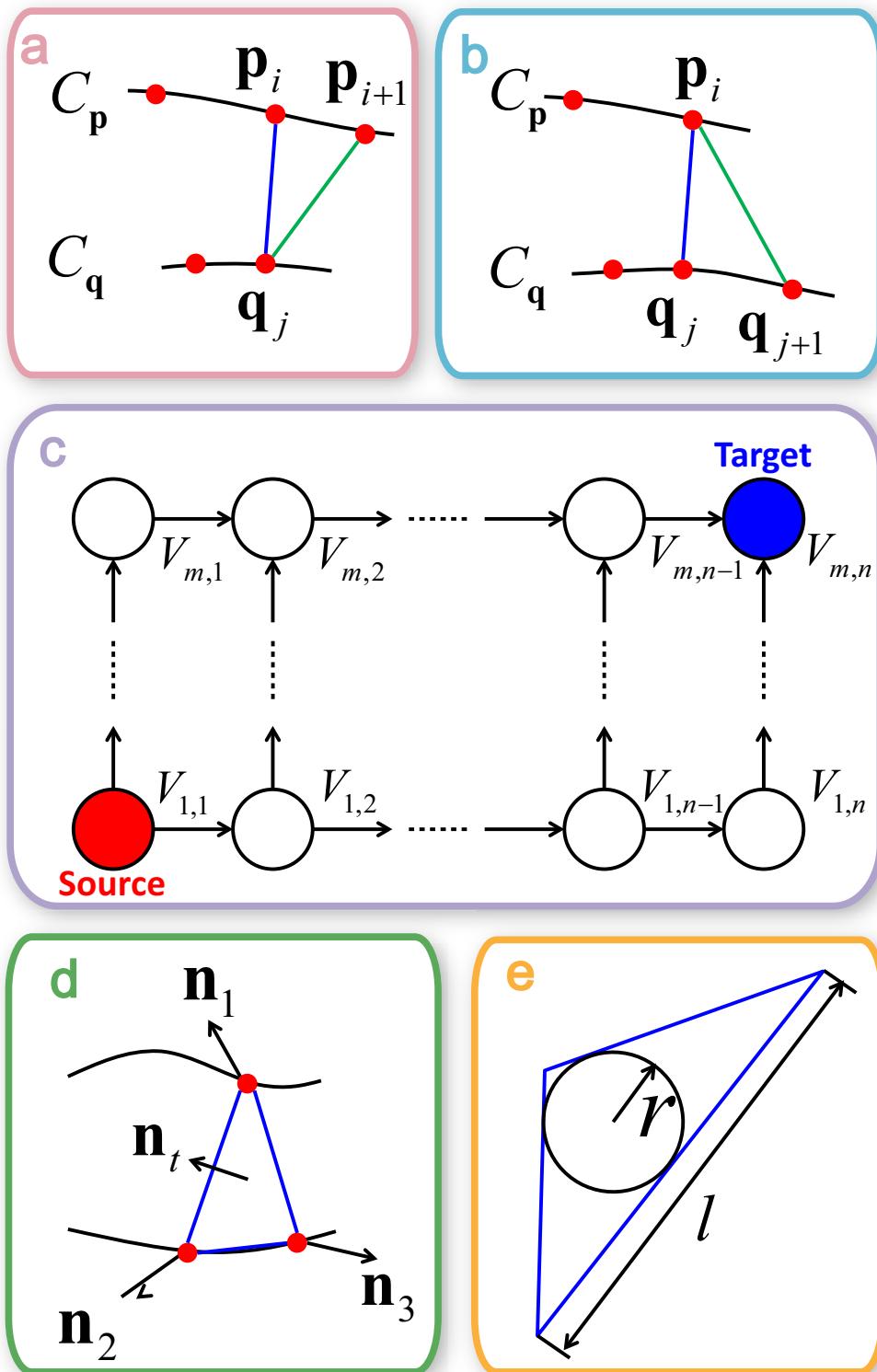


图 4.5 BBT示意图。(a) P-succeed操作。(b) Q-succeed操作。(c) 最短路径问题示意。(d)  $E_s$ 能量项示意。(e)  $E_r$ 能量项示意。

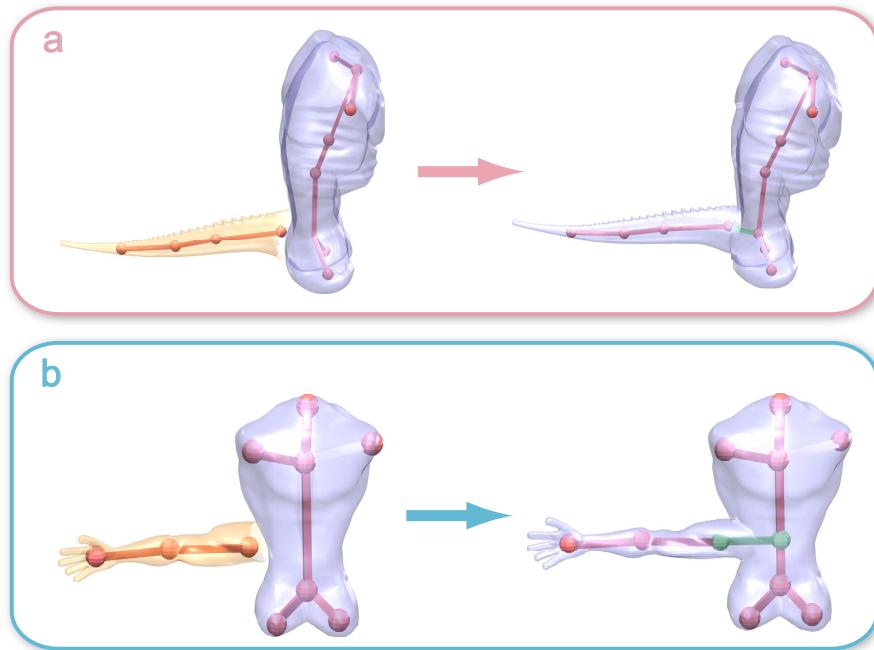


图 4.6 骨架融合示意图。融合部件为浅棕色。插入的关节及骨胳为绿色。融合部件骨架的末端关节直接与主部件骨架上的最近关节点相连 (a)。先向主部件骨架插入关节点,再将融合部件骨架与插入的关节点相连 (b)。

(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末端点连接 (图 4.6 (b))。

#### 4.4.3 蒙皮权重更新

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<sup>[19]</sup>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 4.7)。

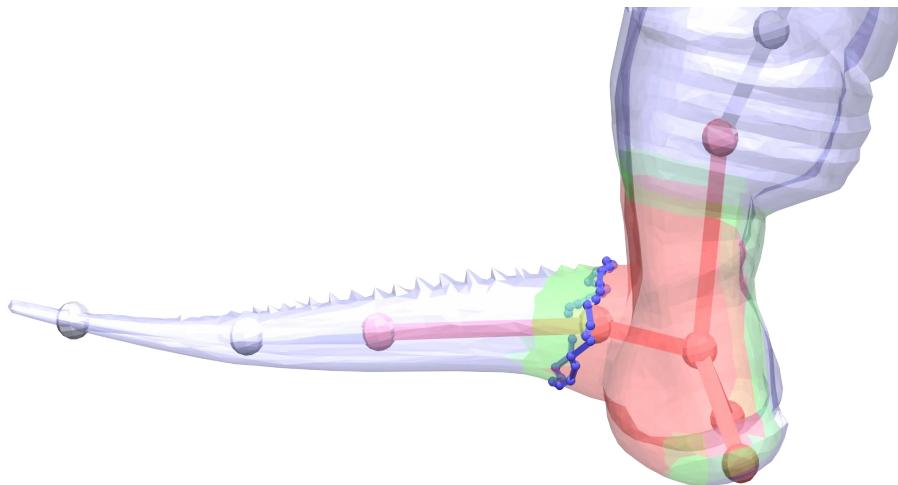


图 4.7 脊顶点和脊骨骼示意图。脊顶点和脊骨骼用红色标记。扩展顶点用绿色标记。融合边界用紫色标记。

## 4.5 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。该方法可得到用于三维打印的关节模型。

### 4.5.1 面对三维打印的骨骼优化算法

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  $J_i$  定义变量  $\rho_i$ ，来评估该关

节是否需要保留：

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

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。 $\rho_i$ 衡量了关节 $J_i$ 在整个动画序列中的变化。

为了计算关节 $J_i$ 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 $\omega$ （在我们的实验中 $\omega = 0.8$ ）的所有顶点 $V_m$ 。然后，我们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）。拟合球的中心是动画关节 $J_i$ 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 $J_i$ 在三维打印时是否需要除掉（如图4.8）：

- 为了防止两打印关节重合，如果关节 $J_i$ 与它的邻居 $J_j$ 间距 $d_{ij}$ 小于阈值 $1.2(r_i + r_j)$ （ $r_i$ 和 $r_j$ 分别为两关节 $J_i$ 与 $J_j$ 对应的三维打印关节半径），那么将 $J_j$ 除掉（ $J_j$ 对应的 $\rho_j$ 比 $J_i$ 的小）；
- 如果关节的 $\rho$ 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；
- 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 $A_{min} = 0.179$ ，该关节被除掉；
- 模型上的关节必须对称排列，除掉无对称关节的关节。

### 4.5.2 多姿态模型平衡算法

我们扩展了<sup>[80]</sup>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<sup>[80]</sup>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。

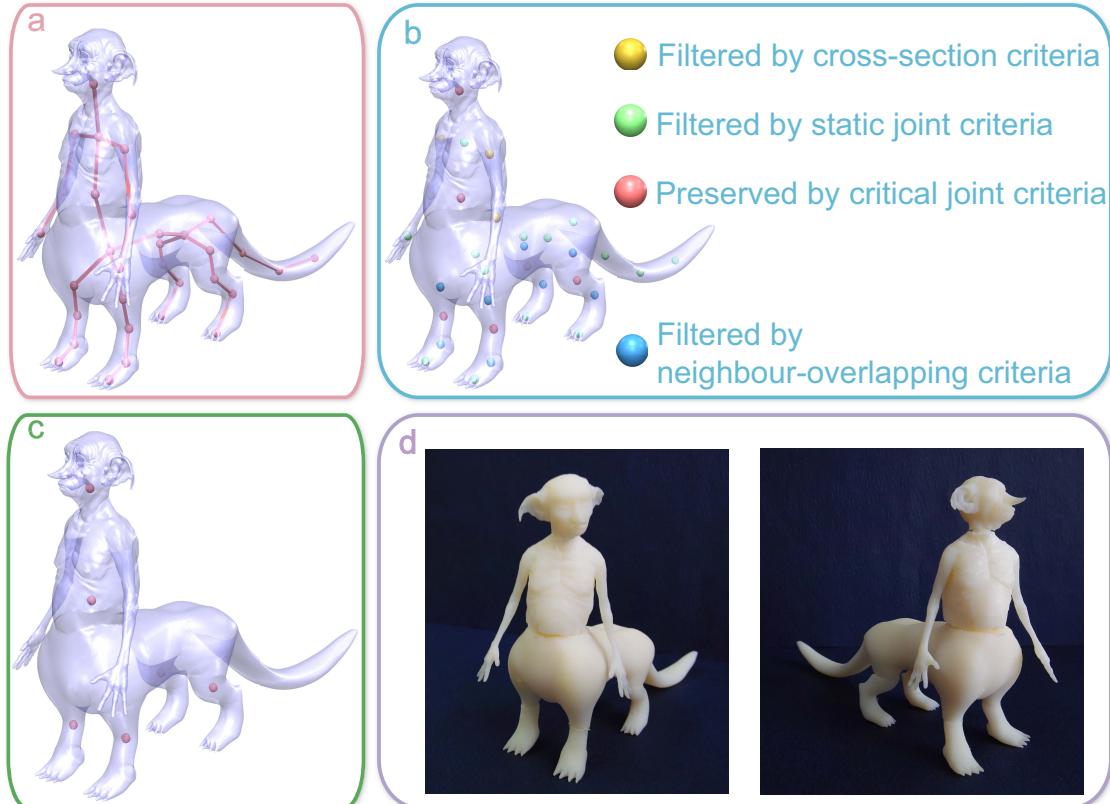


图 4.8 面向三维打印的关节优化过程示意图。给一个蒙皮模型 (a)，我们的骨架优化算法优化关节 (b)，得到一组适合三维打印的关节 (c)。三维打印得到的模型如 (d) 所示。

给模型  $M$ ，令  $S_0, S_1, \dots, S_k$  依次为模型  $M$  在  $k$  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：

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

其中， $I_k$  是  $S_k$  的内表面， $\mathbf{c}(S, I)$  计算外表面  $S$  与内表面  $I$  围成的体积的质心， $\mathbf{c}_k^*$  是第  $k$  个姿态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。

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<sup>[93]</sup>。接着，我们用启发式的方法去逼近最优挖空结果 (如图 4.9)。对模型  $M$  的第  $k$  个姿态，令当前的质心是  $\mathbf{c}_k^0$ ，我们可以计算出一个垂直于  $(\mathbf{c}_k^0 - \mathbf{c}_k^*)^{\perp g}$  过  $(\mathbf{c}_k^*)^{\perp g}$  的切割平面。挖掉

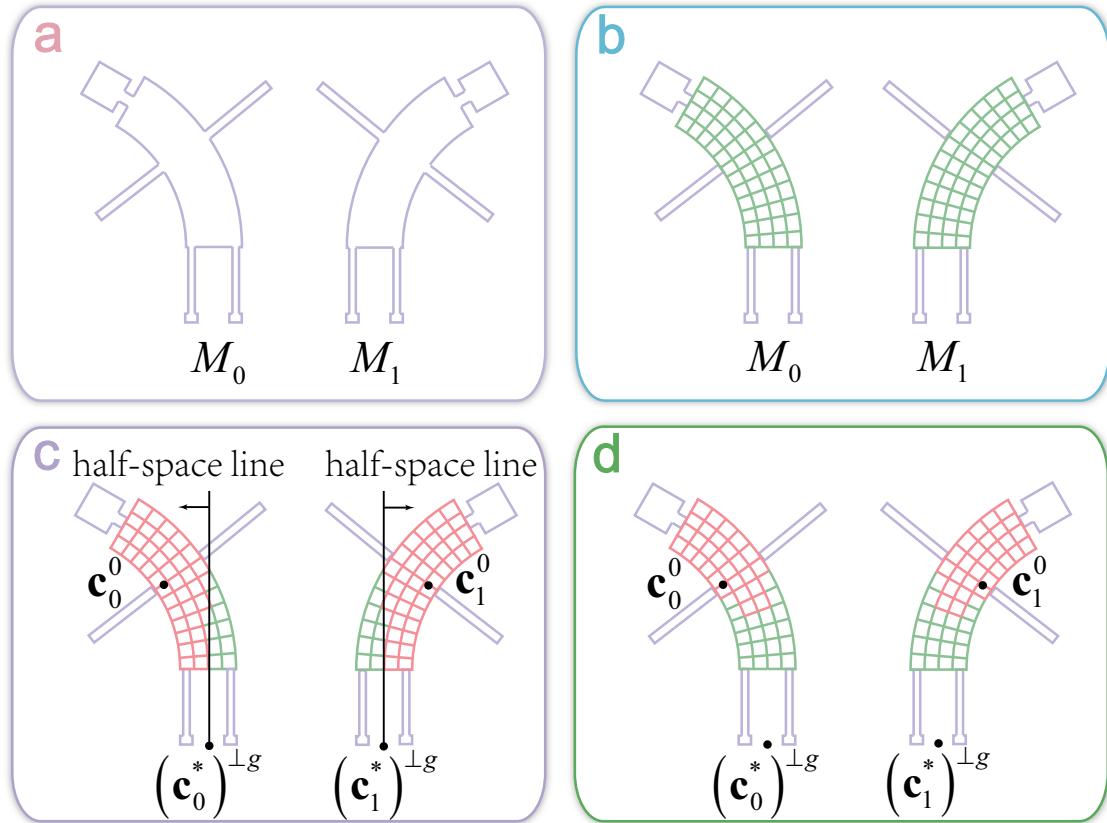


图 4.9 多姿势模型平衡算法流程示意图。我们用二维形状表示三维模型（如（a）内紫色形状）。给模型的两个不同姿势对应的模型 $M_0$ 与 $M_1$ （a），我们首先为两模型的躯干部件建立一致的六面体网格（用二维网格表示）（b）。 $M_0$ 与 $M_1$ 的支撑点分别为 $(\mathbf{c}_0^*)^{\perp g}$ 与 $(\mathbf{c}_1^*)^{\perp g}$ （c）。 $M_0$ 与 $M_1$ 当前的质心分别为 $\mathbf{c}_0^0$ 与 $\mathbf{c}_1^0$ （c）。空间半平面用空间半直线表示（c）。每个模型内可以挖掉的体素用红色标识。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。

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 $\bigcap_k V_k$ ，并按分数降序排列。分数计算方法如下：

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

其中， $\mathbf{v}_i$ 是体素*i*的中心。

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。

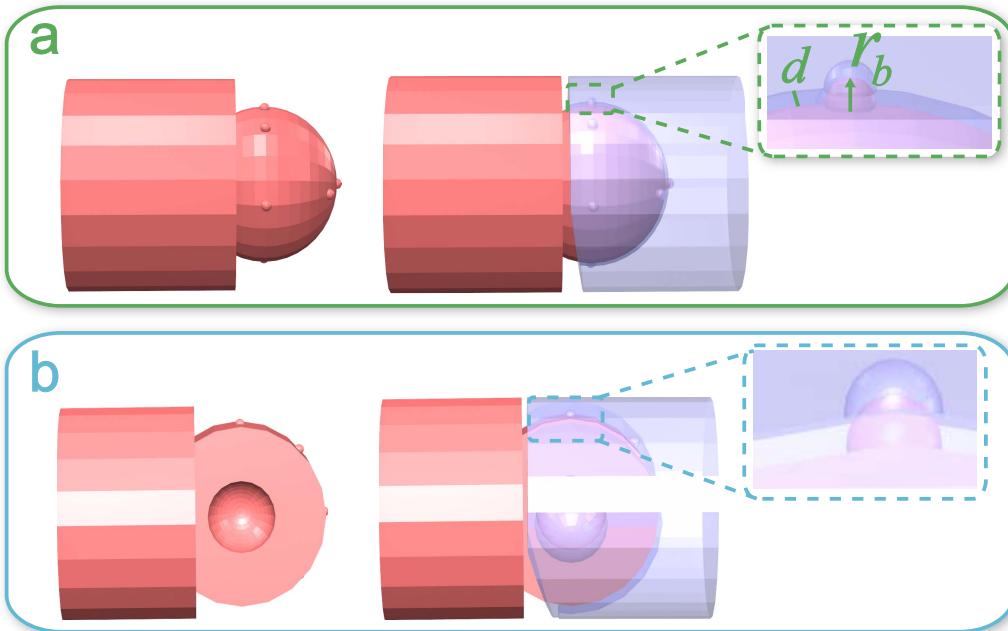


图 4.10 两类关节示意图。(a) 球窝式关节。(b) 铰链式关节。

### 4.5.3 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 4.10）：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 4.11）。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。

**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<sup>[79]</sup>，我们为关节面（Positive Joint Part）增加半径为 $r_b = 0.06$ 的球状突起，为关节囊（Negative Joint Part）增加半径为 $r_b + 0.05$ 的球状凹陷（如图 4.10）。

## 4.6 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<sup>[94]</sup>自动为模型绑定骨架，采用<sup>[95]</sup>方法自

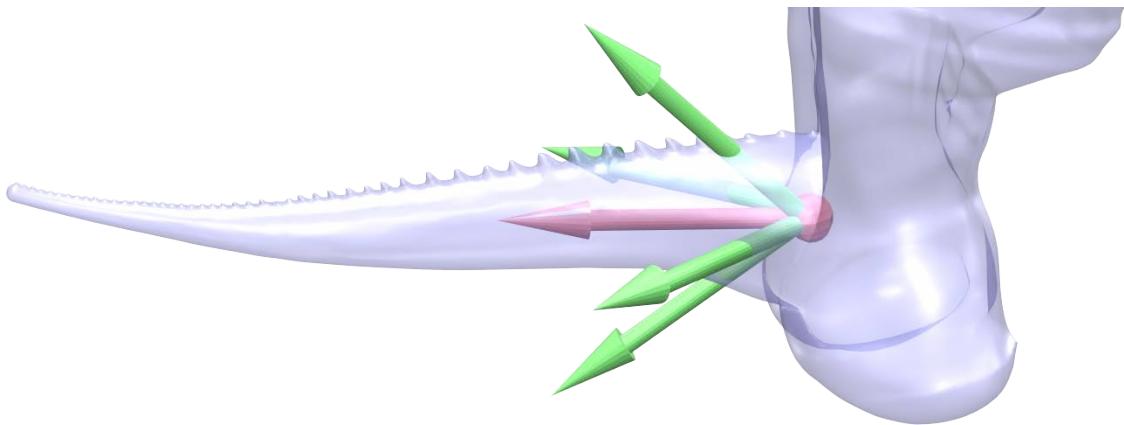


图 4.11 “别针”示意图。红色别针表示骨骼的方向。红色的球是机械关节的位置（旋转中心）。绿色别针指示出该机械关节的最大旋转幅度。用户操作绿色别针设置关节的旋转约束。

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4.1（d），图4.12（d）及图 4.13（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4.12。

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4.13。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。

## 4.7 本章小结

在这篇文章中，我们提出一个针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术。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

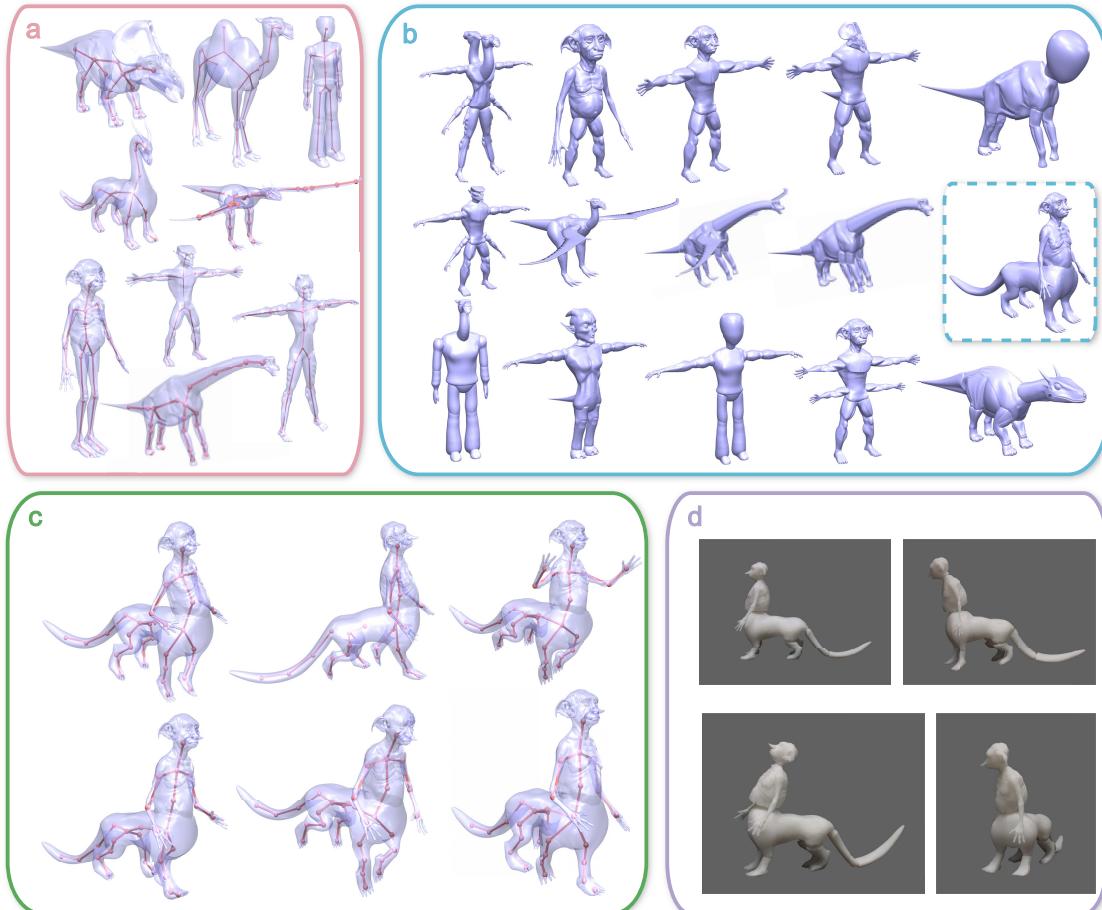


图 4.12 创新性地造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择感兴趣的模型。(c) 动画编辑阶段得到的几个动作。(d) 三维打印出的模型摆出的三个姿势。

模型。我们的系统实时地自动地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。

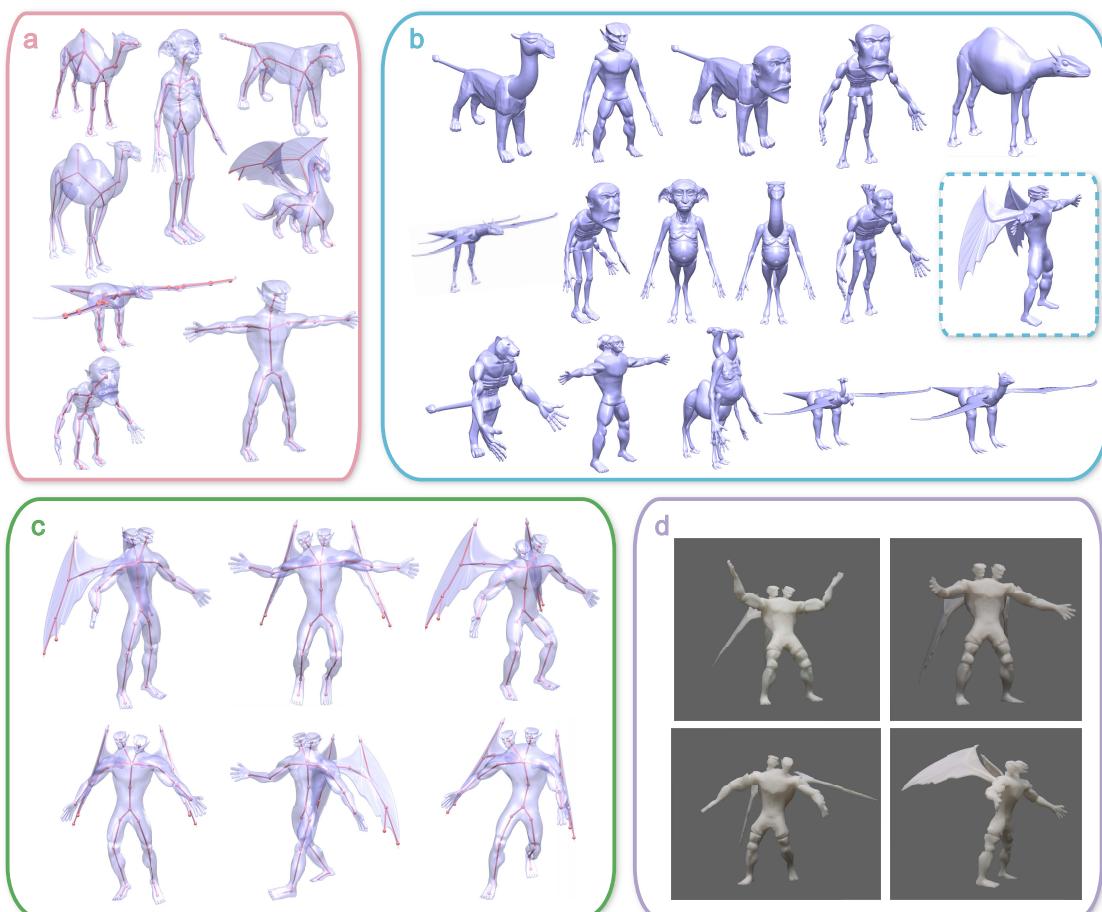


图 4.13 创新性地造型的一个例子。(a) 输入模型。(b) 模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择感兴趣的模型。(c) 动画编辑阶段得到的几个动作。(d) 三维打印出的模型摆出的三个姿势。



## 第5章 总结与展望

创造力支持的造型技术在影视特效与电子游戏设计中有广泛的应用前景。该研究方向近年来越来越受研究者的重视。当前的创造力支持的造型技术存在如下缺点与不足：不太适用于产生拓扑结构变异，依赖预分割的三维模型数据库局限了造型空间与对用户的创造力支持，缺少对动画编辑及三维打印分析的支持。针对这些问题，我们提出生物语法，以辅助用户快速地大量地造型具有奇异拓扑结构的虚拟生物模型；提出针对浏览式草图造型的按需部件建议技术，实时地从三维模型数据内搜索并切割合适的部件，实现个性化部件提示；提出针对蒙皮的创意角色模型的三维打印分析技术，将造型、蒙皮与面向三维打印的模型分析融合到统一的框架，给用户的整个造型过程提供更多的创意支持。接下来，我们总结全文并展望未来的研究工作。

### 5.1 本文总结

本文首先简要介绍了创造力支持的造型系统的背景知识和研究现状，将现有的创造力支持的造型技术分为四类，浏览式造型技术，基于样例的造型技术，基于遗传算法的造型技术，基于协同创作的造型技术。虽然当前研究界创造力支持的造型技术上取得可喜的成果与进展。然而，仍然有很多问题未得到解决，而且有更多的问题等待我们去发现。为此，我们对相关理论与技术进行了深入研究与探索，提出了一系列新的创造力支持的造型技术，在理论研究与实际应用上取得了重大突破。

- 虚拟生物，往往具有奇异的拓扑结构，经常出现在电子游戏及电影中。造型虚拟生物需要创造力与想像力。在需要大量的各式各样的外形与风格的虚拟生物的场景中，设计与造型的过程尤其困难。针对现有创造力支持的造型技术在产生拓扑结构变异方面的不足，我们提出一个辅助用户快速造型大量的各式各样的拓扑结构奇异的虚拟生物的系统。用户从数据库内选择若干来不同类的常规模型，我们的系统迭代地产生一代代结构奇异的虚拟

生物模型提示给用户，以激发灵感。我们系统的核心是生物语法，一种针对造型虚拟生物而特化的形状语法。生物语法控制着由常规生物模型向虚拟生物模型进化的过程，生成的虚拟生物的拓扑结构越来越复杂。生物语法进化部件的排列方式与部件的数目，同时保持了生物的语义约束。实验表明即便从若干来自不同类的常规模型（如，人型，鸟型与四肢动物型）开始，我们的系统也能产生出大量的令人意想不到的拓扑结构奇异的虚拟生物模型，激发用户灵感。

- 创造力支持的造型技术最具挑战性的问题之一是实时地从三维模型数据库内提取建议部件。我们提出Sketch2Cut系统，一种基于草图的按需部件建议技术。用户输入草图表达设计概念，我们的方法基于草图生成三维代理部件，并基于该代理部件去数据库内搜索得到一系列候选部件，建议给用户。这些候选部件实时地从三维模型数据库中通过三维局部匹配方法提取。与以前的工作不同，我们的Proxy-to-Design方法不依赖预分割的三维模型数据库，并可以建议定制的任意部件，这极大地扩展了用户设计空间。我们的方法由两部分构成：1) 一种快速的基于草图的三维模型局部匹配算法。该算法将三维模型局部匹配问题转化为多视角下的二维轮廓局部匹配。三维模型的二维投影由多个轮廓段（Boundary Contour Section）构成。这些轮廓段组织在一种新的随机混合kNN图（randomized compound kNN graph）内。  
2) 提出一种新的实时分割算法。该算法基于三维模型的超面片图表示，可以快速地从三维模型上提取与用户草图匹配的三维部件。部件提取采用由粗到细的策略，部件边界逐步优化。实验表明我们的方法提供了一种直观的简单的造型方法，允许普通用户简便快捷地创新性地造型。
- 创造力支持的造型技术为普通用户以开放式方式造型模型提供支持。然而，现有的大多数创造力支持的造型技术仅限于造型静止模型。与这些方法不同，我们提出一个新的方法，该方法可以造型动态模型，即造型结果已做好骨架绑定并可直接三维打印。起始于一小组绑定好的封闭的模型，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。通过将造型设计、动画编辑与面向三维打印的模型处理融合至统一框架，我们提供一个高效的方法，辅助用户的创新性造型过程。我们方法的核心由两部分构成：1) 一种新的融合绑定部件的技术，该技术在融合部件表面的同时融合骨架，并快速更新融合后部件的蒙皮权重；2) 一个针对三维打印的骨架优化算法，选择出最佳的关节位置与半径。此外，还有一个可以确保模型在不同姿势下保持平衡的方法。

## 5.2 工作展望

有关创造力支持的造型技术的研究方兴未艾。虽然研究人员在该领域已取得重大进展与成果，但还有很多问题尚未解决，而且还有更多问题等待我们去发现。下面本文给出一些可行的研究方向。

### 5.2.1 结合用户意图的模型建议技术

在影视特效及游戏设计中，三维艺术家要根据剧本完成造型任务。剧本往往不会明确给出角色外形，通常是描述角色的特征。如，该角色是飞行物，背部长着两对宽大的翅膀；该角色是水生生物，具有很多类似章鱼的触手等。如上角色特征描述，不仅限定必须有的部件，还隐式限定了不能有的部件；不仅限定了部件的特征，还限定了整个角色的特征。以“该角色是飞行物，背部长着两对宽大的翅膀”为例。该描述限定了“翅膀”是必须有的部件。其隐式限定了不能有非飞行物的特征，比如，不能有水生生物的腮，鱼鳍等。对部件特征的限定是“翅膀必须是宽大的”。对整个角色模型的限定是“飞行生物”。

虽然现有的模型建议技术可以在一定程度上反映用户的造型意图（选择“喜欢”与“不喜欢”的模型<sup>[18,77]</sup>），也有研究工作探索了在语义层次上提供部件建议<sup>[15]</sup>，但总体上看还是太弱。为了提供更加符合用户意图的建议，我们必须进一步弥合自然语言与模型几何特征间的鸿沟，并且探索更加智能化的建议技术。我们可以采用众包形式让用户为我们的数据库模型帖标签。标签的范围不能仅限于某部件的外形特征，还要涉及到部件的功能属性。另外，还要提出功能更强

大的技术，不仅可以确保建议的模型具有某类部件，还能确保不具备某类部件。因子图（Factor Graph）或马尔可夫随机场（Markov Random Fields）是很好的选择。

### 5.2.2 历史驱动的部件建议技术

三维艺术创作是个动态的过程。创作过程沿着时间线向前伸展，用户不断尝试各种可能性，不断修改当前设计，甚至回退至以前的版本重新开始。此外，艺术家往往有自己的创作风格，比如，操作的先后顺序，添加部件的先后顺序等。过去的每一个操作，每一个状态都影响着当前的创作结果与艺术家下一步的操作。然而，现有的部件建议技术<sup>[2,3,11-15]</sup>简单地将三维创作视为马尔可夫过程，即基于创作结果的当前状态建议下一步可添加到当前模型的部件。这种研究思路丢弃了艺术家创作过程的历史信息，无法深层次地辅助用户的创新性造型过程。若能记录并分析用户的整个创作历史，并基于艺术家的历史操作与模型的历史状态提供建议，造型系统将会提供给艺术家更多创意。

然而，在图形学界，历史驱动的部件建议技术的研究尚属空白。要实现历史驱动的部件建议，需要开发动态模型编码艺术家的整个艺术创作过程。该动态模型不仅需要编码艺术家在各时间点的操作及创作结果，还需要编码艺术家施加各操作的先后顺序及各部件出现的先后顺序。现有的三维网格版本控制技术涉及到记录三维网格历史的问题。这可为我们开发记录模型历史的技术提供参考。关于记录艺术家操作的技术，我们可以借鉴Guo等人提出的生物语法<sup>[77]</sup>。

### 5.2.3 拆解友好型的支撑材料设计方法

支撑材料在三维打印中是不可缺少的部分。现有的支撑材料生成方法更多地考虑到可支撑性。通过三维打印实践，我们发现拆解支撑材料非常困难，很多情况下还会拆坏模型。当模型具有细小分枝结构（如，树木枝权，脉管，手指等）时，这种情况更是常见。那么，如何设计既能支撑打印目标，又易拆解的支撑材料就成为一个亟需解决的问题。

### 5.2.4 面向三维打印的部件建议技术

随着三维打印技术的普及，普通用户也可三维打印个性化的模型。但是，模型在三维打印之前往往需要很多分析与处理，比如，平衡性分析<sup>[80,81]</sup>，结构稳定性分析<sup>[44,84]</sup>等。处理过程通常需要调整模型姿势或变形部件。面向三维打印的模型处理之后，还需要重新调整造型。简单地将面向三维打印的模型处理做为造型的后处理步骤无法解决如上问题。因为“造型设计-面向三维打印的模型处理”是个迭代的过程，在两个步骤间来回切换非常繁琐而且费时。一种更优雅的解决方案是在造型过程中就考虑到模型的可打印性。

现在很多创造力支持的造型技术可以向用户建议部件<sup>[2,3,11-15]</sup> 这些技术在建议部件过程中，仅仅考虑到语义兼容性或与用户意图的一致性。为了在建议部件时将三维打印考虑进来，我们可以将模型的物理属性视为部件兼容性的一个因素。



## 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: 409–416.
- [2] Funkhouser T, Kazhdan M, Shilane P, et al. Modeling by example[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3):652–663.
- [3] Lee J, Funkhouser T. Sketch-based Search and Composition of 3D Models[C]. Proceedings of the Fifth Eurographics Conference on Sketch-Based Interfaces and Modeling. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2008: 97–104.
- [4] Kreavoy V, Julius D, Sheffer A. Model Composition from Interchangeable Components[C]. Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007: 129–138.
- [5] Collingwood R G. The principles of art[M]. Oxford University Press, 1938.
- [6] Boden M A. The creative mind: Myths and mechanisms[M]. Psychology Press, 2004.
- [7] Weisberg R W. Creativity: Understanding innovation in problem solving, science, invention, and the arts[M]. John Wiley & Sons, 2006.
- [8] Sternberg R J. Handbook of creativity[M]. Cambridge University Press, 1999.
- [9] Finke R A, Ward T B, Smith S M. Creative cognition: Theory, research, and applications[M]. MIT press Cambridge, MA, 1992.
- [10] Marsh R L, Landau J D, Hicks J L. How examples may (and may not) constrain creativity[J]. Memory & Cognition, 24(5):669–680.
- [11] Chaudhuri S, Koltun V. Data-driven suggestions for creativity support in 3D modeling[J]. ACM Transacitons on Graphics, 2010, 29(6):Article No. 183.

- [12] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Guibas L, et al. Probabilistic reasoning for assembly-based 3D modeling[J]. ACM Transacitons on Graphics, 2011, 30(4):Article No. 35.
- [13] 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.
- [14] Fan L, Wang R, Xu L, et al. Modeling by Drawing with Shadow Guidance[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7):157–166.
- [15] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Giguere S, et al. Attribit: content creation with semantic attributes[C]. Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology. New York, NY, USA: ACM, 2013: 193–202.
- [16] Resnick M, Myers B, Nakakoji K, et al. Design principles for tools to support creative thinking[J]. 2005.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Jin M, Gopstein D, Gingold Y, et al. AniMesh: interleaved animation, modeling, and editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6):207.
- [21] Cohen-Or D, Zhang H. From inspired modeling to creative modeling[J]. The Visual Computer, 2016, 32(1):7–14.
- [22] Marks J, Andelman B, Beardsley P A, et al. Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation[C]. Proceedings of

- the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 389–400.
- [23] Umentani N, Igarashi T, Mitra N J. Guided Exploration of Physically Valid Shapes for Furniture Design[J]. Communications of the ACM, 2015, 58(9):116–124.
- [24] Averkiou M, Kim V G, Zheng Y, et al. ShapeSynth: Parameterizing Model Collections for Coupled Shape Exploration and Synthesis[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(2).
- [25] Gao L, Cao Y P, Lai Y K, et al. Active exploration of large 3d model repositories[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2015, 21(12):1390–1402.
- [26] Talton J O, Gibson D, Yang L, et al. Exploratory modeling with collaborative design spaces[J]. ACM Transacitons on Graphics, 2009, 28(5):Article No. 167.
- [27] Ovsjanikov M, Li W, Guibas L, et al. Exploration of continuous variability in collections of 3D shapes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4):33.
- [28] Lee B, Srivastava S, Kumar R, et al. Designing with Interactive Example Galleries[C]. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM, 2010: 2257–2266.
- [29] Baxter W, Anjyo K i. Latent Doodle Space[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(3):477–485.
- [30] Assa J, Cohen-Or D. More of the same: Synthesizing a variety by structural layering[J]. Computers & Graphics, 2012, 36(4):250 – 256.
- [31] Zheng Y, Cohen-Or D, Mitra N J. Smart Variations: Functional Substructures for Part Compatibility[J]. Computer Graphics Forum (Eurographics), 2013, 32(2pt2):195–204.
- [32] Alhashim I, Li H, Xu K, et al. Topology-varying 3D Shape Creation via Structural Blending[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4):158:1–158:10.

- [33] Back T, Fogel D B, Michalewicz Z. *Handbook of evolutionary computation*[M]. IOP Publishing Ltd., 1997.
- [34] Sims K. Evolving virtual creatures[C]. Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM. 1994: 15–22.
- [35] Sims K. Artificial Evolution for Computer Graphics[C]. Proceedings of the 18th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 1991: 319–328.
- [36] Pilat M L, Jacob C. Creature Academy: A system for virtual creature evolution[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). 2008: 3289–3297.
- [37] Funes P, Pollack J. Evolutionary Body Building: Adaptive Physical Designs for Robots[J]. *Artificial Life*, 1998, 4(4):337–357.
- [38] Secretan J, Beato N, D Ambrosio D B, et al. Picbreeder: Evolving Pictures Collaboratively Online[C]. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM, 2008: 1759–1768.
- [39] Davis N, Hsiao C P, Popova Y, et al. *Creativity in the Digital Age*[M]. London: Springer London, 2015: 109–133.
- [40] Shneiderman B. Creativity Support Tools: Accelerating Discovery and Innovation[J]. *Communications of the ACM*, 2007, 50(12):20–32.
- [41] Shneiderman B, et.al. Creativity Support Tools: Report From a U.S. National Science Foundation Sponsored Workshop[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2006, 20(6):61–77.
- [42] Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18(3):280 – 299.

- [43] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.
- [44] Müller P, Wonka P, Haegler S, et al. Procedural modeling of buildings[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3):614–623.
- [45] Parish Y I H, Müller P. Procedural modeling of cities[C]. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, NY, USA: ACM, 2001: 301–308.
- [46] Talton J O, Lou Y, Lesser S, et al. Metropolis Procedural Modeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(2):11:1–11:14.
- [47] Stiny G, Gips J, Stiny G, et al. Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture[C]. Segmentation of Buildings for 3DGeneralisation. In: Proceedings of the Workshop on generalisation and multiple representation , Leicester. 1971.
- [48] Wonka P, Wimmer M, Sillion F, et al. Instant architecture[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3):669–677.
- [49] Hohmann B, Krispel U, Havemann S, et al. CityFit: High-quality urban reconstructions by fitting shape grammars to images and derived textured point clouds[C]. Proceedings of the 3rd ISPRS Workshop. Citeseer. 2009.
- [50] Lipp M, Wonka P, Wimmer M. Interactive visual editing of grammars for procedural architecture[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3):102:1–102:10.
- [51] Whiting E, Ochsendorf J, Durand F. Procedural modeling of structurally-sound masonry buildings[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5):112:1–112:9.
- [52] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. Sketch-based modeling: A survey[J]. Computers & Graphics, 2009, 33(1):85 – 103.

- [53] Liu Y J, Ma C X, Zhang D L. EasyToy: Plush Toy Design Using Editable Sketching Curves[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 31(2):49–57.
- [54] Eggli L, yao Hsu C, Bruderlin B D, et al. Inferring 3D models from freehand sketches and constraints[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(2):101 – 112.
- [55] Schmidt R, Wyvill B, Sousa M C, et al. ShapeShop: Sketch-based Solid Modeling with BlobTrees[C]. ACM SIGGRAPH 2006 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2006.
- [56] Karpenko O A, Hughes J F. SmoothSketch: 3D Free-form Shapes from Complex Sketches[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3):589–598.
- [57] 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.
- [58] Nealen A, Sorkine O, Alexa M, et al. A Sketch-based Interface for Detail-preserving Mesh Editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3):1142–1147.
- [59] Bae S H, Balakrishnan R, Singh K. ILoveSketch: As-natural-as-possible Sketching System for Creating 3D Curve Models[C]. Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, NY, USA: ACM, 2008: 151–160.
- [60] Karnick P, Jeschke S, Cline D, et al. A Shape Grammar for Developing Glyph-based Visualizations[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(8):2176–2188.
- [61] Mitra N, Wand M, Zhang H R, et al. Structure-aware Shape Processing[C]. SIGGRAPH Asia 2013 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2013: 1:1–1:20.
- [62] Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, et al. On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3):223–232.

- [63] LaViola J J, Igarashi T, Alvarado C, et al. Sketch-based interfaces: techniques and applications[C]. SIGGRAPH Course Notes. 2007.
- [64] Eitz M, Richter R, Boubekeur T, et al. Sketch-Based Shape Retrieval[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4).
- [65] DeCarlo D, Finkelstein A, Rusinkiewicz S, et al. Suggestive Contours for Conveying Shape[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3):848–855.
- [66] Shamir A. A Survey on Mesh Segmentation Techniques[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(6):1539–1556.
- [67] Muja M, Lowe D. Scalable Nearest Neighbor Algorithms for High Dimensional Data[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36(11).
- [68] Andoni A, Indyk P. Near-optimal Hashing Algorithms for Approximate Nearest Neighbor in High Dimensions[J]. Communications of the ACM, 2008, 51(1).
- [69] Wang J, Wang J, Zeng G, et al. Scalable k-nn graph construction for visual descriptors[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE. 2012: 1106–1113.
- [70] Riemenschneider H, Donoser M, Bischof H. Computer Vision – ECCV 2010: 11th European Conference on Computer Vision, Heraklion, Crete, Greece, September 5–11, 2010, Proceedings, Part V[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 29–42.
- [71] Huang Q, Koltun V, Guibas L. Joint Shape Segmentation with Linear Programming[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6):125:1–125:12.
- [72] Golovinskiy A, Funkhouser T. Randomized Cuts for 3D Mesh Analysis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5).

- [73] Au O C, Zheng Y, Chen M, et al. Mesh Segmentation with Concavity-Aware Fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(7):1125–1134.
- [74] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(9):1124–1137.
- [75] Katz S, Tal A. Hierarchical Mesh Decomposition Using Fuzzy Clustering and Cuts[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3).
- [76] Ji Z, Liu L, Chen Z, et al. Easy Mesh Cutting[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(3).
- [77] Guo X, Lin J, Xu K, et al. Creature Grammar for Creative Modeling of 3D Monsters[J]. Graphical Models, 2014, 76(5):376–389.
- [78] 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.
- [79] Bächer 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.
- [80] Prévost R, Whiting E, Lefebvre S, et al. Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4):81:1–81:10.
- [81] Zhao H, Hong C, Lin J, et al. Make it swing: Fabricating personalized roly-poly toys[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, –.
- [82] Kavan L, Sloan P P, O’Sullivan C. Fast and Efficient Skinning of Animated Meshes[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2):327–336.
- [83] Jacobson A, Deng Z, Kavan L, et al. Skinning: Real-time Shape Deformation[C]. ACM SIGGRAPH 2014 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2014: 24:1–24:1.
- [84] Whiting E, Shin H, Wang R, et al. Structural Optimization of 3D Masonry Buildings[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6):159:1–159:11.

- [85] Panozzo D, Block P, Sorkine-Hornung O. Designing Unreinforced Masonry Models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4):91:1–91:12.
- [86] Deuss M, Panozzo D, Whiting E, et al. Assembling Self-supporting Structures[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(6):214:1–214:10.
- [87] Stava O, Vanek J, Benes B, et al. Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4):Article No. 48.
- [88] Zhou Q, Panetta J, Zorin D. Worst-case Structural Analysis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4):Article No. 137.
- [89] Bächer M, Whiting E, Bickel B, et al. Spin-it: Optimizing Moment of Inertia for Spinnable Objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4):96:1–96:10.
- [90] Ceylan D, Li W, Mitra N J, et al. Designing and Fabricating Mechanical Automata from Mocap Sequences[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6):186:1–186:11.
- [91] Coros S, Thomaszewski B, Noris G, et al. Computational Design of Mechanical Characters[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4):83:1–83:12.
- [92] 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.
- [93] 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: 127–136.
- [94] Baran I, Popovic J. Automatic Rigging and Animation of 3D Characters[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):Article No. 72.
- [95] Kalogerakis E, Hertzmann A, Singh K. Learning 3D Mesh Segmentation and Labeling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4):102:1–102:12.



## 攻读博士学位期间主要研究成果

- [1] 第一作者. Creature grammar for creative modeling of 3D monsters. *Graphical Models*, 2014, 76(5):376–389. (SCI刊源)
- [2] 第一作者. Fabricating and Rigging Creative Characters. (已提交至Shape Modeling International 2016) (SCI刊源)
- [3] 第一作者. Sketch2Cut: Exploratory Sketch-Based Modeling with On-Demand Part Customization. (已提交至Symposium on Geometry Processing 2016) (SCI刊源)
- [4] 第二作者. Efficient polygonization of tree trunks modeled by convolution surfaces[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(3):1 – 12. (SCI刊源)