

山东大学

毕业论文(设计)

论文（设计）题目：基于布料仿真的创成式建模

姓 名 星宇

学 号 201805130152

学 院 计算机科学与技术学院

专 业 计算机科学与技术

年 级 2018

指导教师 吕琳

2022 年 05 月 19 日

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 选题背景和研究意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.2.1 三维模型的建模方式.....	2
1.2.2 三维模型的评价问题.....	4
1.3 论文组织结构.....	6
第 2 章 基于布料仿真的创成式建模整体流程.....	7
2.1 概述.....	7
2.2 初始条件设置及分析.....	7
2.2.1 布料模型的设置.....	7
2.2.2 边缘模型的设置.....	9
2.2.3 物理模型的设置.....	10
2.3 布料仿真.....	11
2.3.1 基本运动方程.....	11
2.3.2 仿真求解器.....	11
2.3.3 碰撞.....	12
2.4 实现细节.....	14
第 3 章 模型的评价.....	15
3.1 模型客观评价.....	15
3.1.1 体积的计算.....	15
3.1.2 曲率的计算.....	17
3.1.3 模型的评价函数.....	19
3.2 模型的主观评价.....	21
第 4 章 模型优化.....	22
4.1 模型的平滑.....	22

4.2 模型的稳定性	22
4.2.1 模型稳定性的检测.....	22
4.2.2 不稳定模型的处理.....	24
4.3 面向制造的优化	24
第5章 结束语.....	26
5.1 实验结果	26
5.1.1 运行环境及参数.....	26
5.1.2 实验结果与分析.....	26
5.2 本文总结	31
5.3 工作展望	32
5.3.1 探索多种基础建模方式.....	32
5.3.2 模型评价指标.....	32
5.3.3 模型的自稳定稳定性.....	32
致 谢.....	33
参考文献.....	34
攻读学位期间参与科研项目及发表学术论文情况.....	38
附录1 代码及相关附件	39
附录2 文献英文原文	43
附录3 文献中文译文	48

基于布料仿真的创成式建模

摘 要

CAD 建模工具通常是使用基本的几何模型元素进行各种各样的形状变换以及逻辑运算。这就要求设计师对于目标模型和基本形状模型之间有深刻的理解，需要清楚的知道哪些元素需要修改，以及如何修改才能贴近目标模型。这些操作对于设计师要求很高，而且对于大多数设计师来说，需要专业的建模工程师来辅助完成设计。这些现象无论从建模效果还是建模花费来说都不利于整个建模工作。

本工作提出了一种形状创成式设计方法与制造方法及系统。本工作使用布料仿真作为基础的模型生成方法，创造出了自然、美观、复杂度高的几何模型供用户选择。为了减少用户的选择，本工作提出了一个评价算法用于初筛模型，选取具有特点模型供用户选择。

相比于传统的建模方式，本工作提出的方法不需要对模型进行具体的修改，仅需要调整参数，就可以生成大量的模型。经过本工作的评价算法初筛后，过滤了大量重复模型以及无特点模型。用户在网站上只需要进行简单的交互，就可以得到符合自己审美偏好的模型，并可以使用增材制造技术进行制造。

关键词：创成式设计；布料仿真；建模；模型评价

ABSTRACT

CAD modeling tools usually use basic geometric model elements for a variety of shape transformation and logical operations. Designers need to have a good understanding of the relationship between the target model and the basic shape model, and need to know exactly what elements need to be modified and how to change them to fit the target model. These operations are very demanding for designers, and for most designers, professional modeling engineers are required to help complete the design. These situations are not conducive to the whole modeling work either in terms of modeling effect or modeling cost.

In this work, a shape creation design and manufacturing method and system are presented. In this work, the model generation method based on cloth simulation is used to create a natural, beautiful and complex geometric model for users to choose. In order to reduce the user's choice, we propose an evaluation algorithm for the initial screening model to select the model with characteristics for the user to choose.

Compared with the traditional modeling method, the method proposed in this work does not need to modify the model, only need to adjust the parameters, can generate a large number of models. After the initial screening of our evaluation algorithm, a large number of repeated models and featureless models were filtered. Users only need to conduct simple interaction on the website, so that they can get models that conform to their aesthetic preferences, and can use additive manufacturing technology to manufacture.

Keywords: Generative Design; Cloth Simulation; Modeling; Model Evaluation.

第1章 绪 论

1.1 选题背景和研究意义

随着计算机图形学的不断发展，计算机对于图形图像的表现能力越来越强。为了在计算机中展现更丰富的信息，二维图像显然已经不足以达到人们的要求，人们对于三维模型的需求越来越多，要求越来越高。三维建模已经应用于各个领域：在医疗领域使用三维建模技术制作精确的器官模型^[1]；电影行业、视频游戏行业将它作为场景资源；化学领域用三维模型制备化合物模型；建筑行业用三维建模进行建筑规划；地质学领域用三维建模构建三维地质模型；天文学领域使用三维建模技术构建天体模型^[2]；考古领域利用三维建模技术进行文物修复……

目前三维模型的获取主要有两种方法：逆向工程和正向设计。逆向工程是通过扫描物体，然后进行三维重建，将物体转为数字模型^[3]，这一类模型缺乏结构信息，难以复用。而正向设计是使用计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）三维建模软件进行建模，这是目前使用最多的建模方法。用户通过此方法建模，必须要掌握多种三维建模软件的使用。设计师通过操作基础几何模型，建成复杂的模型，是非常复杂耗时的任务。

为了解决 CAD 建模费时费力、操作复杂的问题，近年来，有不少学者开始探索其他建模方式。

创成式设计是一个利用人机交互进行建模、在建模过程中不断自我创新的过程。通过设计软件中的算法自动生成三维模型，其中包括艺术品、建筑模型、产品模型等。在设计的过程中，当设计师输入产品参数之后，算法将自动进行调整判断，直到获得最优化的设计。整个设计流程为：设计师输入一些建模过程中的约束以及条件，通过“创成式设计”的算法，生成潜在的可行性设计方案的几何模型，然后进行综合对比，筛选出设计方案推送给设计者进行最后的决策。

使用创成式设计进行建模，可以快速建立模型。建模时，设计师无需对具体的模型进行修改，只需要调整参数即可，从根本上改变了建模方法，简化建模流程，提高了建模效率。本文提出了一种基于布料仿真的创成式建模方法，可以通过仿真快速轻松的生成三维模型。

通过基于布料仿真的创成式设计进行建模,可以得到一系列模型,这个数据库是庞大的,并不是库中所有的模型都符合标准,因此需要对模型进行评价。评价的目标是筛选出一个或多个符合设计要求且符合设计者审美偏好的模型,并使用增材制造技术进行制造。

选择布料仿真作为创成式模型生成方法的制造方面的优势在于:布料满足水密性等一系列打印约束,每个状态都是可制造的,天然满足可打印性,对于布料模型,只要稍作处理即可直接用三维打印机进行制造。

此外,布料在形状上也具有很大的优势:布是一种具有无限多种形状的柔韧材料,它可以反映力场以及模型的形态;而且布料有多种材质(不同的材质在相同的力场作用下有不同的形状),布料模型很难手工制作。因此,本工作中使用了布料仿真作为模型生成的基础。

本工作提出了一种基于布料仿真的创成式建模方法。主要的贡献点为:

- 提出了一种创成式建模方法。使用布料仿真作为基础的模型生成方法,创造出了自然、美观、复杂度高的几何模型。
- 提出一种基于模型几何形状的评价方法。该方法在生成的模型库中删除特点不明显的模型,减少用户评价的次数。并让用户进行评价,选出符合用户偏好的模型。

1.2 研究现状

该部分内容从两个方面介绍目前的研究现状,分别是:三维模型的建模方式和三维模型的评价方法。

1.2.1 三维模型的建模方式

1. CAD 建模方式

郑^[4]等人对当前的计算机辅助设计软件进行了调研,基本的三维建模软件主要包括: MAYA、3DMAX、Modo、Zbrush 等,更专业的工业建模软件包括 Sketchup、SolidWorks、PROE、UG。

CAD 建模工具大多使用了构造实体几何(Constructive solid geometry, CSG)进行建模,通常是使用基本的几何模型元素,包括圆柱、方体、圆锥、球体等^[5],然后进行各种各样的形状变换以及逻辑运算,包括求交、求并集、求补

集等^[6]。这就要求设计师对于目标模型和基本形状模型之间有深刻的理解，需要清楚的知道哪些元素需要修改，以及如何修改才能贴近目标模型^[7]，需要设计师在大脑中生成一个坐标系，准确的输入所有基础模型的参数^[8]。根据模型的细节和尺度不同，花费时间成倍的增加^[9]。这些操作对于对设计师要求很高，而且对于大多数设计师来说，需要专业的建模工程师来辅助完成设计。而且得到的模型不一定满足设计要求，还要进行一系列的分析测试^[10]，并根据分析的结果重新进行设计，再进行分析，如此不断迭代，直到满足需求。这无论从建模效果还是建模花费来说都不利于整个建模工作。

在本工作中，将水杯、风车、灯罩等人造物品的模型称为人造物品模型，如流动的溪流，喷射的火山等表现自然的模型称为自然模型。

人造物品的建模工作对于使用 CAD 建模方式的设计师来说相对容易，因为模型的形状是确定的，设计师是有明确的设计目标；但是自然模型具有很强的不确定性，使用 CAD 的方法难以生成自然美观的模型。

2. 创成式建模方式

创成式设计（Generative Design, GD）利用参数和目标来快速探索数千种设计变体，以产生一系列符合要求的解决方案。在每一次迭代中，生成式设计都在测试结构，并从每个步骤中学习，在每个阶段应用变化，以帮助生成一个符合研究设置中概述的设计目标的优化解决方案^[11]。它们与设计过程的集成使得开发新的设计解决方案成为可能，这是通过其他方法很难或不可能实现的^[12]。创成式设计简单来说就是一种基于算法设计方法，通过设定预期目标，设计变量、设计约束。通过算法生成大量的结果，构成整个设计空间，设计者探索设计空间，进行决策。

如图 1-1 所示，创成式设计首先由程序开发者定义设计理念，表明这个设计算法的目标，然后定义设计规则，完成生成的代码。设计师在使用的时候，需要定义基本模型，设计的输入，在生成工作完成后，需要对模型进行评价，最后选择生成结果。

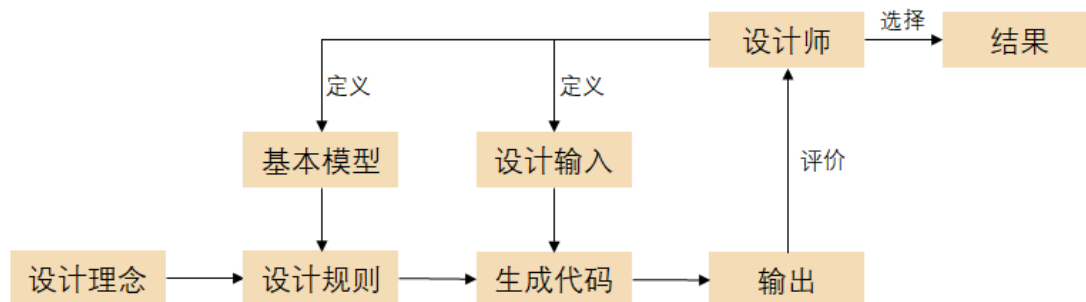


图 1-1 创成式设计流程图

生成式设计和建模越来越多地灵活地结合在一起^[13]，生产出具有高性能功能结构和数字材料，应用于航空航天、汽车、医疗植入物、软机器人、定制消费产品等领域^[14]

Nishino^[15]等人提出了一种基于隐式曲面的建模方式，允许用户使用一个原始的形状创建一个新的三维模型。Kaneko^[16]等人提出了一种基于模型变形的建模方式，可以在原始模型和目标模型之间快速生成一系列模型。Nishino^[17]等人设计了一种基于用户草图的语义分析模型生成器，生成一系列候选模型供用户选择。Salta^[18]等人通过对一个紧急避难所解决方案的分析，探讨数字化建模和创成式设计结合的可行性及其在建筑设计过程中的优化要求。Jiang^[19]等人提出了一个创成式优化方案用于优化种植结构的几何结构，以满足流态和结构设计目标。Marin^[20]等提出了一种基于遗传算法的创成式设计工具。这些都启发着本工作。

1.2.2 三维模型的评价问题

在三维模型建立完成后，需要对模型进行评价。建模的用途不同，则评价的目的、方法都不一样。例如，对电影游戏中建立的模型进行评价，评价的目的是保证模型的真实感和观看的舒适度^[21]。而医疗领域模型的评价目的是为了保证模型的精度以及真实度^[22]，以便设计手术方案、治疗方案等。评价的目的主要是保证模型的美观以及可制造性等性质，对模型进行制造之前，需要对模型进行可打印性评价，以保证模型可以制造。为了保证模型的美观，还需要对模型进行用户评价。评价方法可以分为客观评价和主观评价。

1. 客观评价

增材制造理论上来说可加工任意几何复杂度的三维模型，但是在实际应用中，客观存在很多约束。模型的水密性要求，模型必须是封闭的，不能缺失网格。模型必须具有厚度，是一个实体模型，不能为开曲面。模型必须为流形^[23]等约束。

模型只有满足这些打印约束后，才能在三维打印机上进行打印。

而在实际建模中，常常会出现模型面片存在退化三角形、自交点、缝隙、多余的几何形状、重复的面片等问题^[24]。因此，当建模完成后，需要使用 Magics, Netfabb, MeshLab 等用于 3D 打印检查的软件对模型进行检测，如果不满足打印约束，则需要对模型重新进行设计，然后再检测，直到模型满足打印要求为止。这是一个漫长而复杂的过程。

此外还有对三维模型的形状特征进行评价。描述三维模型特征的方法有很多。基本可以分为两大类，一类是基于几何的，一类是基于视觉的^[25]。三维模型可以由多种方式表达，如多面体网格表达，体素表达，参数表达，隐式方程表达等。因此三维模型的特征是模型的固有属性，并且在三维物体平移、旋转等变换下保持不变，因此应该独立于模型数据表达形式之外。考虑多种不同的特征来定义三维模型的特征。这些方法包括考虑二维矩形图像：基于投影轮廓（Silhouette-based）基于深度缓冲（Depth buffer-based）；球面图像：基于射线（Ray-based (icosahedron)）、基于球面表示的射线（Ray-based with spherical harmonic representation）、基于阴影（Shading-based）；以及利用三维特征：基于体积（Volume-based）和体积数据：基于体素（Voxel-based）等^[26]。除此之外，三维模型的特征也涉及到颜色、纹理等其他表面属性^[27]。

三维模型的形状是评价的主要标准。在三维模型形状特征提取中，局部特征提取已经成为一个越来越重要的方面。与全局特征相比，它更适合于部分检索，对模型变形的鲁棒性更强^[28]。因此，在本工作中，选取了部分局部形状特征进行评价，作为模型的筛选标准。

2. 主观评价

主观评价是指根据用户的偏好，对三维模型的用户喜爱度进行评价。评价的目的主要是保证三维模型的美观。

在生成了大量模型之后，模型库填充了整个参数空间，而本工作的目的是在如此庞大的模型库里选出“美观”的模型进行打印。但是每个人对于“美观”的定义都是不一样的，本工作希望每个人能根据自己的喜好在模型库中选择模型。此外，用户的评价是代价高昂的，在生成的模型库中逐个选择模型对于用户来说时间成本太高，因此，需要尽量减少用户的评价次数^[29]。

已经有很多基于用户偏好的模型评价工作。Kelly^[30]等人提出了一种提出了一种交互式进化计算的技术来提取用户视觉审美偏好。Nsihino^[31]等人以进化算法为基本思想,通过模拟自然进化过程进行建模,生成的模型根据用户主观偏好进行选择。之后又基于免疫算法提出了一种三维模型的评价框架,用户对模型评价,然后算法根据用户的评价生成新的模型,不断迭代,最终生成的模型全局最优解,即为用户最喜爱的模型^[32]。Zhang^[33]等人基于交互式进化算法,以用户偏好作为导向进行设计,并作为 CAD 软件的插件使用。Reed^[34]等人使用了美学测量作为适应度函数,基于志愿者的偏好,迭代了花瓶的形状,迭代结果受到志愿者的喜爱,并且实现了从概念到制造的一体化。

1.3 论文组织结构

文章主要分为五章,分别从选题背景、研究意义、目前的研究状况、算法内容和实验结果与结论几个方面进行阐述。在本节中将概述每一章节的主要内容。

第一章为绪论,介绍了该论文的研究背景、三维打印中的建模问题和三维模型的用户评价问题的研究现状,并概括本文的算法内容。

第二章详细描述了本文提出的基于布料仿真的创成式建模整体流程。

第三章阐述了模型的评价算法。

第四章阐述了模型优化算法。

第五章为实验结果展示以及算法评价,根据实验得到的结果对算法进行总体评价,并总结优缺点。

第2章 基于布料仿真的创成式建模整体流程

2.1 概述

本工作提出了一种形状创成式设计建模方法。如图 2-1 为本系统运行的整体流程。本工作使用了仿真的方法生成模型。布料作为模型和力场之间的载体。然后在力场的作用下，布料和模型进行交互，在一段时间后，仿真完成。本工作在过程中得到了大量的模型。然后改变布料的大小、性质、力场等，进行仿真，通过仿真，得到了在这一个边缘模型（边缘模型的概念将在 2.2.2 节进行详细说明）条件下的所有参数空间的模型。然后构建评价系统，让用户进行选择，选出最符合自己审美的模型，进行打印。

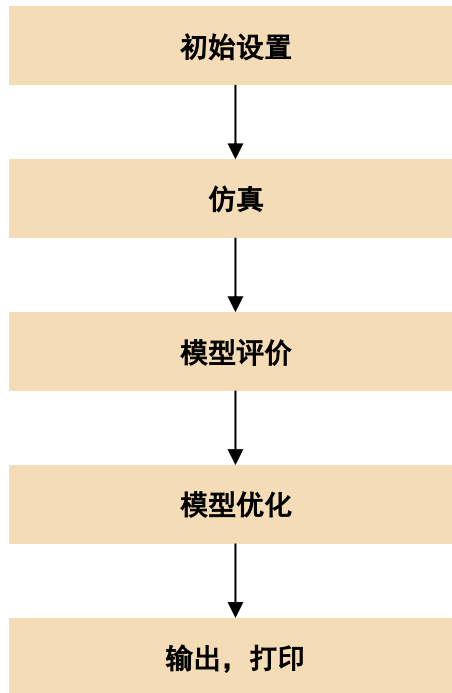


图 2-1 形状创成式设计建模方法流程图

2.2 初始条件设置及分析

2.2.1 布料模型的设置

本工作选择布料作为一个模型基础来反映力场和模型的共同作用。所有的模型生成都是基于布料在力场中的变化的。使用布料作为模型基础具有以下优点：

1. 传统描述力场的都是粒子系统，但是经典的粒子系统不能直接制造。即使

考虑到 3D 重建，也可能会损失很多细节，从而损害打印性。

2. 布料保证每个状态是可制造的，天然满足可打印性，减少很多面向制造的约束，扩大了模型空间。

3. 布是一种具有无限多种形状的柔韧材料。它可以反映力场以及模型的形态。

4. 布料有多种材质(不同的材质在相同的力场作用下有不同的形状)。

5. 布料模型很难手工制作，如图 2-2 所示的模型，具有自然美。

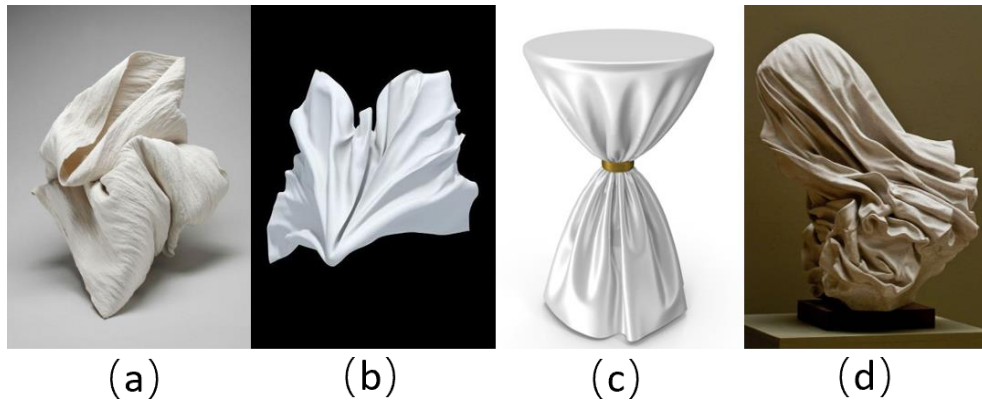


图 2-2 部分布料模型

并且，不同材质的布料可以生成不同的模型。布料使用的是经典的“弹簧-质点”模型，如图 2-3 所示。其中公有四种弹簧，分别是：蓝色：张力弹簧(Tension Springs)、红色：压缩弹簧(Compression Springs)、青色：剪切弹簧(Shear Springs)、绿色：角弯曲弹簧(Angular Bending Springs)。他们的作用分别为：张力弹簧：控制布料的硬度；压缩弹簧：控制折叠或压缩布料所需的力；剪切弹簧：就像压缩弹簧一样，但它能控制角度变形；角弯曲弹簧：控制布料折叠或褶皱的弹性。通过修改张力弹簧、压缩弹簧、剪切弹簧、角弯曲弹簧的劲度系数以及质点的质量，可以达到改变布料性质的目的。此外，布料的面积和形状也是影响模型的因素。

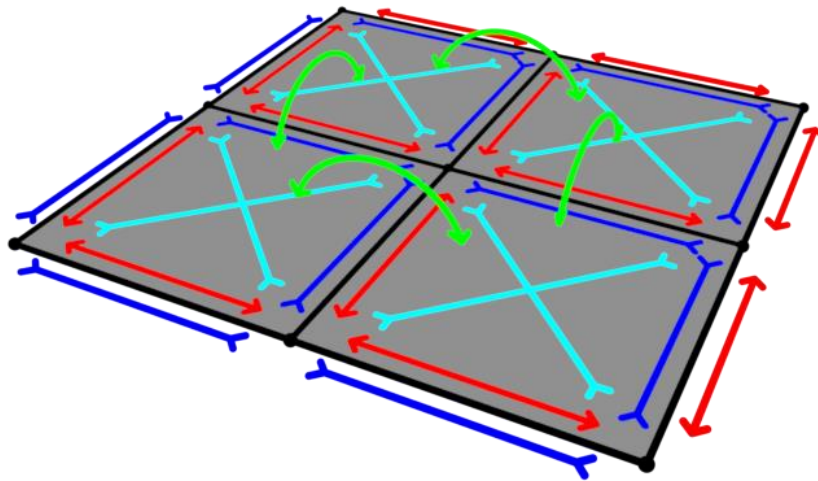


图 2-3 “弹簧-质点”模型示意图;张力弹簧(蓝色), 压缩弹簧(红色), 剪切弹簧(青色), 角弯曲弹簧(绿色)

2.2.2 边缘模型的设置

如错误!未找到引用源。所示, 图 2-2- (a) 和图 2-2- (b) 是布料在力场下的作用, 图 2-2- (c) 与图 2-2- (d) 是布料在力场和边缘模型共同作用下的结果, 他们同样都是美观的模型。因此, 本工作希望用户可以添加自己喜欢的基础模型作为仿真的边界条件, 使得布料可以产生与基础模型相似的布料模型, 在本工作中, 把添加的基础模型称之为边缘模型。

如图 2-4 所示, 布料模型可以在力场和边缘模型双重作用下生成美观的模型。力场的作用是让模型和布料发生交互, 布料在力的作用下和模型发生碰撞, 从而产生和边缘模型相似的布料模型。

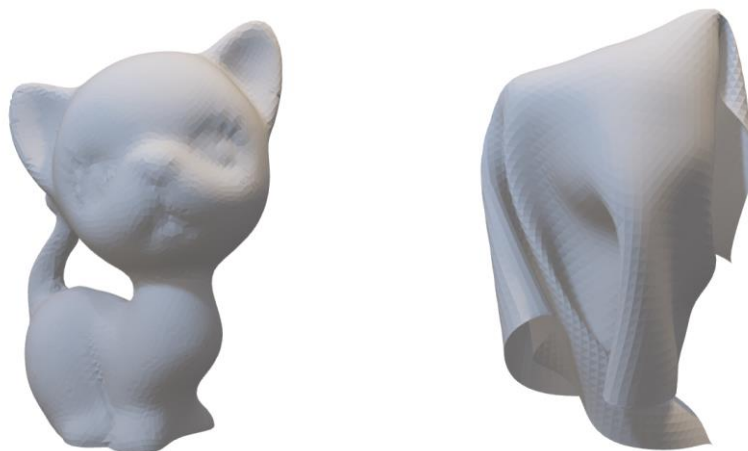


图 2-4 左: 边缘模型, 右: 布料模型

2.2.3 物理模型的设置

根据牛顿第一运动定律，力是改变物体运动状态的原因。因此要构造一个力让布料发生形态的改变，产生复杂多样美观的模型。但是仿真是实时的，根据现有的技术，无法根据当前的力场和布料运动状态直接预测出布料模型的最终形状。同样的，也无法根据一个美观的模型设计一个最优的力场用于生成。

为了解决这一问题，尽可能的让布料和模型发生碰撞接触，本工作采用一个正对着模型的风力，将布料放在垂直与力的方向上，如图 2-5 所示，这样可以使布料最大程度上反应模型的基本形状。而力从哪个方向吹向模型则是由用户自行定义，如图 2-5，左边的为风向自上而下，中间为风向自左上向右下，右面的为风向自下而上，用户可以自由选择，选择的依据条件为尽可能选择模型特征点最多的一面。

为了让布料只受到用户设置的力的作用，假设这个仿真过程在无重力环境下进行，消除了重力对布料的影响。当然，如果想使用重力作为使布料发生变化的力的话，可以在设置力时候，把重力作为额外力添加上。

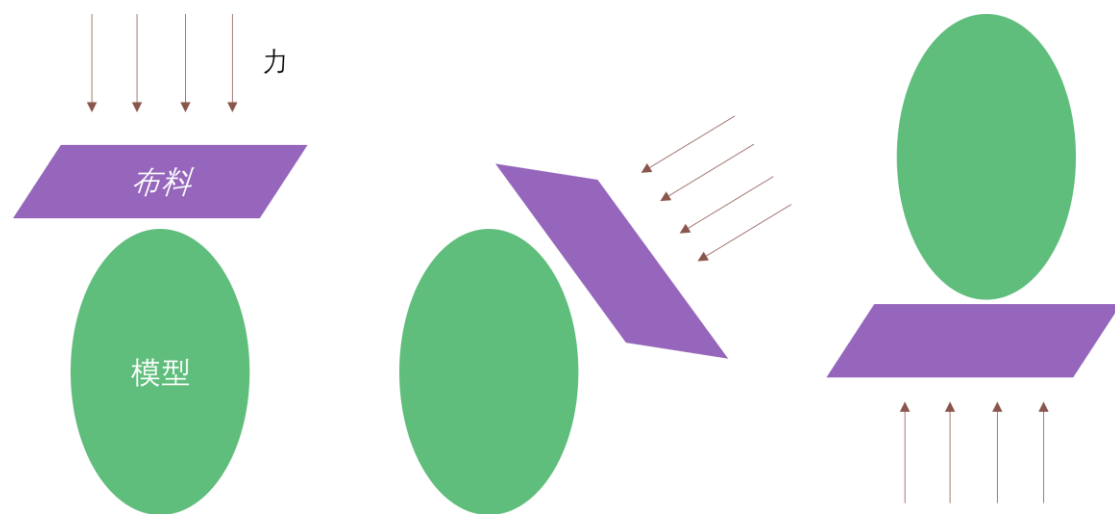


图 2-5 力的设置示意图

力场的强度同样影响着布料模型的形状，本工作中把这个作为一个可调的参数，关于这一部分将在 2.4 节详细说明。

2.3 布料仿真

2.3.1 基本运动方程

仿真的基本原理是牛顿第二定律，在进行布料仿真时，主要算法有显式方法和隐式方法^[35]，在本工作中，采用了显示方程进行计算。在进行仿真时，需要计算每一个的加速度。如公式（2-1）所示，求出当前状态下该质点的加速度，然后根据当前时刻的质点速度。计算出质点在下一时刻的速度，更新下一时刻的位置。

$$F_{net}(v) = F_{wind} + F_{air\ resistance} - \sum_{Springsev} k(x_{current} - x_{rest}) + Mg = Ma \quad (2-1)$$

其中 v 表示每一个质点， M 表示质点的质量， g 表示重力加速度，一般取值为 $9.80\ m/s^2$ ， k 是弹簧的劲度系数， $x_{current}$ 是当前弹簧的长度， x_{rest} 是弹簧松弛状态下的长度，也就是弹簧的初始长度， F_{wind} 是风力， $F_{air\ resistance}$ 是空气阻力

为了完全使用用户给定的外力（ F_{wind} ）影响模型，在本工作中消除了重力对布料运动的影响，可以理解为布料是在无重力的环境下进行仿真。因此，公式（2-1）可以写为公式（2-2）

$$F_{net}(v) = F_{wind} + F_{air\ resistance} - \sum_{Springsev} k(x_{current} - x_{rest}) = Ma \quad (2-2)$$

2.3.2 仿真求解器

在确定布料模型后，需要对运动方程进行积分的方法，来求解每个质点具体的位置和速度。求解的方法为欧拉方法，主要分为有两种，分别是显式方程和隐式方程。

1. 显式方程

用 V_t 表示当前时间的质点速度， Δt 表示时间间隔， $V_{t+\Delta t}$ 表示下一时间点的速度，显式方程的速度更新公式如公式（2-3）所示。 X_t 表示当前时间点质点的位置， $X_{t+\Delta t}$ 表示下一时间点质点的位置，位置更新公式如公式（2-4）所示

$$V_{t+\Delta t} = V_t + \Delta t \left(\frac{dV}{dt} \right)_t \quad (2-3)$$

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \Delta t V_t \quad (2-4)$$

这种方法实现起来非常简单，但是也有明显的缺点，就是时间步长（ Δt ）必

须设置的很小。如果时间步长设置的过大，弹簧很可能会出现左右晃动，振幅越来越大，整个仿真系统就会直接崩溃[35]。时间步长设置的小的话，整个仿真的效率就降低。解决这个问题方法是使用隐式方程。

2. 隐式方程

与显式积分不同，隐式积分器使用当前时间步的状态变量和下一个时间步的导数来计算下一个时间步的状态变量。隐式方程的更新公式如公式(2-5)所示，公式(2-6)所示。

$$V_{t+\Delta t} = V_t + \Delta t \left(\frac{dV}{dt} \right)_{t+\Delta t} \quad (2-5)$$

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \Delta t V_{t+\Delta t} \quad (2-6)$$

隐式积分与显式积分唯一的变化下标，由 t 变成了 $t + \Delta t$ ，此时求解方式由递推变为求解方程组。求解法可以使用牛顿法迭代求解，迭代的次数越多，结果越准确，耗时越长；迭代次数低，结果误差较大，耗时越短。Baraff 等人[35]证明出最后结果一定是收敛的，因此不必担心系统会崩溃，可以设置较大的 Δt 。但是在进行碰撞检测时候 Δt 过大，会造成穿模现象，导致结果错误。

本工作中，对于碰撞检测要求很高，穿模会影响建模效果，因此选择显式方程作为本工作仿真的基本方法。

2.3.3 碰撞

碰撞主要分为两个过程，碰撞的检测与碰撞的处理。这是布料模拟中最耗时的操作之一。在布料仿真中，主要的碰撞发生在布料-物体之间与布料-布料之间^[36]，这两个在检测上没有区别，因此在本工作中检测部分不做区分。Provot^[37]等人对碰撞检测和处理做出了详细的研究。

1. 碰撞检测

碰撞检测所面临的挑战主要是通过利用时间和空间一致性来减少比较的数量，提高碰撞检测的准确性，以及创建物理上正确和稳定的碰撞响应^[38]。

碰撞的检测是基于面片的。假设 t_0 是布料没有发生碰撞的瞬间。经过一个时间间隔 Δt 后，根据文中的方法，可以求出每个质点在 $t_0 + \Delta t$ 时的位置和速度和位置，碰撞检测就是要求出在这个时间间隔内，布料是否发生了碰撞。碰撞主要有两种类型，一种是一个三角面片的节点穿过了另一个三角面片，如图 2-6 左图所

示；第二种是一个网格的三角面片穿过了另一个三角面片的边缘，如图 2-6 右图所示。

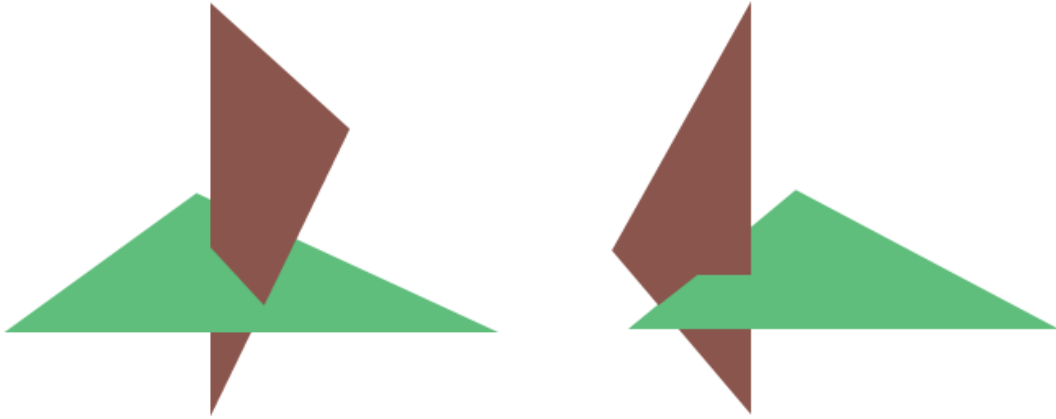


图 2-6 碰撞示意图

碰撞检测要在任意可能发生碰撞的三角面片之间进行检测，分别检测上述两种碰撞情况有没有出现，因此花费时间较长。

2. 碰撞检测优化

碰撞检测所面临的挑战主要是通过利用时间和空间一致性来减少比较的数量，提高碰撞检测的准确性。

上述的检测方法需要在任意两个三角面片之间进行检测，对于 N 个三角面片的布料， M 个三角面片的物体，检测的时间复杂度为 $O(MN)$ ，布料自交检测的时间复杂度为 $O(N^2)$ 。这个时间复杂度是很高的，是布料仿真中最耗时的部分，因此必须要进行优化。

最直接的思路就是减少不相关面片的碰撞查询，大范围排除完全不可能发生碰撞的部分，减少碰撞判断，仅在有可能发生碰撞的小范围里进行碰撞检测。

整个检测过程分为两步^[39]，第一步是泛碰撞测试阶段，这一步的目的是将完全不可能发生碰撞的部分排除在检测之外，剩下的部分视为潜在碰撞集 (Potentially Colliding Set, PCS)。一种常用的优化算法是层次包围盒加速算法^[40] (Bounding Volume Hierarchies, BVH)。BVH 是将体积较大、结构复杂的几何物体，用体积大而几何特征简单的嵌套包围盒来表示，通过对包围盒进行相交测试，来判断物体是否发生了相交，本质上是以空间换时间。BVH 的核心思想就是首先对物体不断进行分割，之后构建 BVH 树，每次在 BVH 树上进行查询，这个查询的时间复杂度是 $O(\log N)$ ，然后在点的位置更新后，更新 BVH 树。整体每

次检测碰撞的时间复杂度是 $O(N \log N)$ 。处理完成后，得到了 PCS。

第二步是精细碰撞测试阶段，在 PCS 中进行碰撞检测，分别检测图 2-6 中的两种情况。之后将发生碰撞的三角面片进行碰撞处理。

3. 碰撞处理

如果是布料-物体之间的碰撞，首先计算物体表面切向的速度，如果速度较低，则直接将质点移动到物体的表面。如果速度较高，则设置好物体表面摩擦力、阻尼等参数，让质点在物体表面滑动。

当布料-布料之间发生碰撞时，可以设置一个弹力，将两个质点弹开。

2.4 实现细节

这一部分的所有内容都是使用 Blender 的仿真框架进行实现。

导入模型之后，将模型设置上碰撞属性，然后才能和布料发生碰撞。若模型网格密度太小，则需要对网格进行表面细分。

在 Blender 框架下设置一个平面，然后对布料进行表面细分，提高渲染层级，平滑显示，并且进行三角网格化。然后把平面设置为设置布料属性，之后进行布料的设置。Blender 中使用的是“弹簧-质点”模型，如图 2-3 所示。因此设置的属性主要包括张力弹簧、压缩弹簧、剪切弹簧、角弯曲弹簧各自的劲度系数，以及质点的质量，阻尼，空气阻力等。为这个布料添加碰撞属性和自碰撞属性，碰撞属性使得布料可以和前面导入的模型进行交互，自碰撞属性避免布料发生自交。以及设置摩擦，摩擦可以在碰撞时使模型更加自然。最后设置仿真质量，仿真质量越低，耗时越短，但是因为使用显式方程求解，会出现穿模或者爆炸的现象（仿真系统崩溃）；仿真质量越高，耗时越长，但是可以避免系统崩溃。然后在力场效果设置中，消除重力影响。这样整个仿真过程就是在无重力的环境下进行了。

之后在 Blender 中设置力场，包括力的形状、力的方向、以及力的强度。

然后设置仿真的总时长，在 Blender 中表示为仿真多少帧，可以设置每隔一定次数的帧，输出一次布料模型，由此获得全部布料仿真序列。

Blender 框架提供了 Python API，因此这些设置使用脚本完成。

第3章 模型的评价

3.1 模型客观评价

这一步的目的是使用特征提取的方法，使用固定的得分函数对每个模型进行打分，筛选出特征明显的模型，减少用户评价的次数。本工作中，选择了模型的体积和模型的曲率作为客观评价函数的影响因素。

3.1.1 体积的计算

模型计算体积是十分复杂的，需要花费很多时间。为了快速计算，本工作使用包围盒的体积来替代模型的体积。

轴对齐包围盒 (Axis Aligned Bounding Box, AABB) 是一个简单的长方体，这个长方体的每一条边都和坐标轴平行，每一个面都和一条坐标轴垂直，因此命名为轴对齐包围盒。

方向包围盒 (Oriented Bounding Box, OBB) 与轴对齐包围盒相同，也是一个长方体。他们最大的区别是有向包围盒的边不需要平行于对称轴。OBB 最大的特点就是它具有很大的任意性，它可以朝向任何方向，它的目标只有一个：尽可能紧密的包裹物体，让包围盒的体积最小化^[41]。

AABB 的优势是效率高，缺点是不准确。OBB 的优势是求解精确，缺点是效率低下。本工作中结合这两个包围盒的优点，提出使用混合包围盒进行求解。

首先，求解出物体的几何中心，然后将这个几何中心定义为模型的旋转中心。将模型围绕旋转中心，沿 X 方向，Y 方向，Z 方向分别枚举旋转 6 次的情况，每次旋转 15° ，共计 90° ，可以近似枚举完所有的主方向，共计枚举了 343 个方向的模型。枚举出的每个模型，对它求一遍轴对齐包围盒，然后在这 343 个轴对齐包围盒中，取体积最小的那个，作为混合包围盒的体积。

如图 3-1 所示，用二维平面上求解举例，描述整个混合包围盒的求解过程。在二维的平面上，绕旋转中心在平面上旋转，每旋转一次，求解一次 AABB，最后根据找到里面最小的一个，作为混合包围盒。

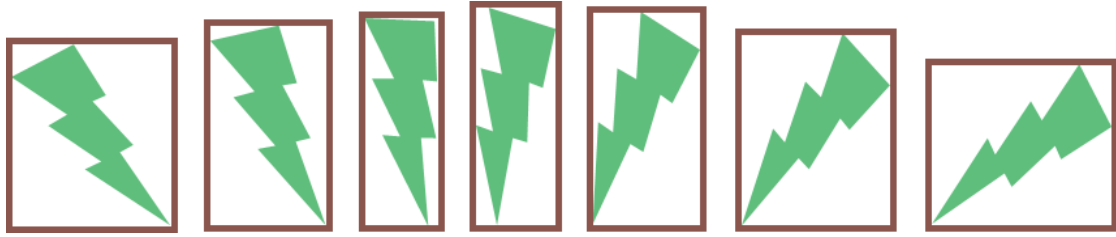


图 3-1 混合包围盒二维求解示意图。绿色部分为被求物体，棕色部分为混合包围盒。

混合包围盒的优点首先是他的算法时间复杂度相较于 OBB 很低，是在线性时间复杂度的基础上多了一个系数，依然是线性的时间复杂度。在每一个模型混合包围盒求解中，要求出 343 个 AABB 包围盒，这个时间花费远低于 OBB，在本工作中可以接受这个时间花费。

其次，这 343 个不同的方向涵盖了所有的旋转方向，近似的枚举出了模型的主轴，虽然相较于 OBB 损失了一定的精度，但是相较于 AABB 已经精确太多，综合来看精度损失很小。

混合包围盒的优势就是结合了 AABB 的高效与 OBB 的精准。混合包围盒的核心算法伪代码见算法 3-1。

算法 3-1 混合包围盒算法

混合包围盒

INPUT: *model*:用于求解包围盒体积的模型

OUTPUT: *boxVolume*:最小包围盒体积

```

1:  angleX=0
2:  while angleX< $\frac{\pi}{2}$  do
3:    angleY=0
4:    while angleY< $\frac{\pi}{2}$  do
5:      angleZ=0
6:      while angleZ< $\frac{\pi}{2}$  do
7:        tempModel=model: 临时存储，不破坏原模型、
8:        tempModel.rotate(angleX, angleY, angleZ): 绕 X 方向旋转 angleX, 绕 Y
          方向旋转 angleY, 绕 Z 方向旋转 angleZ
9:        boxVolume=MIN(boxVolume,AABB(tempModel)): 求出当前的 AABB 的
          体积, 与 boxVolume 作比较, 取最小值
10:       angleZ+= $\frac{\pi}{12}$ 
11:      end while
12:     angleY+= $\frac{\pi}{12}$ 
13:    end while
14:   angleX+= $\frac{\pi}{12}$ 
15: end while
16: return boxVolume.

```

3.1.2 曲率的计算

在本工作中，模型是用网格结构存储的（mesh），评价、优化等处理也是基于网格。三角网格是由一个个三角面片组成。对于每一个三角网格来说，他们都是一个平面，不存在曲率。因此，三角网格的曲率是指三角面片顶点处的曲率。

曲率主要包括高斯曲率、主曲率、平均曲率。这三者的定义如下：

定义 1：主曲率：在曲面上取出一点，过该点可以有无限多的切平面，每个切平面与曲面相交构成一条曲线。曲面上有无数个不同方向的曲线，每条曲线有自己的曲率，其中最大值和最小值为称为主曲率，主曲率分别命名为 k_1 、 k_2 。

定义 2：高斯曲率：两主曲率乘积， $K = k_1 k_2$ 。高斯曲率的几何意义表示曲面的弯曲程度。高斯曲率为正，则曲面为球面。高斯曲率为负，则曲面为双曲面。绝对值越大，弯曲程度越大。

定义 3：平均曲率：两主曲率算数平均数， $H = k_1 + k_2$ ，平均曲率可以反映曲面凹凸程度。若平均曲率为正的话，曲面是局部凹陷的。若平均曲率为负的话，局部凸出。

本工作的目的是用曲率反应模型的弯曲程度。若使用平均曲率的评价标准，如所示，在马鞍面和三周期极小曲面这种曲面上，P 点处的平均曲率都为 0，但是两曲面的弯曲程度都很高，因此平均曲率并不适合作为当前的评价标准，因此在本工作中使用了高斯曲率进行评价。

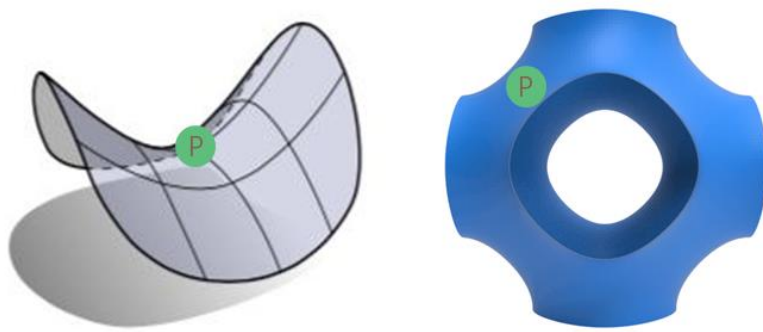


图 3-2 左：马鞍面；右：三周期极小曲面

Bishop 等人探索了高斯-博内定理的一些应用^[42]。

整体高斯-博内定理可以用公式表述为如公式（3-1）所示。

$$\int_M K dA + \int_{\partial M} k_g ds = 2\pi X(M) \quad (3-1)$$

M 是一个二维黎曼流形， ∂M 是 M 的边界，而 K 是其高斯曲率， k_g 为 ∂M 的测

地曲率。而 X 为显性欧拉示性数。

将公式应用到三维空间坐标里，进行三角网格的计算，由于每个三角面片的高斯曲率为 0，针对三角网格，公式可以变形为公式如公式（3-2）所示。

$$\sum_{i=1}^n K_i A_i = \sum_{i=1}^n \varphi_i = 4\pi \quad (3-2)$$

K_i 是每个顶点的高斯曲率， A_i 是指每个顶点对应的曲面面积，如图 3-3 所示。 φ_i 则等于将顶点连接的所有的三角网格，展开到一个二维平面上后，角度之和和 2π 的差值。

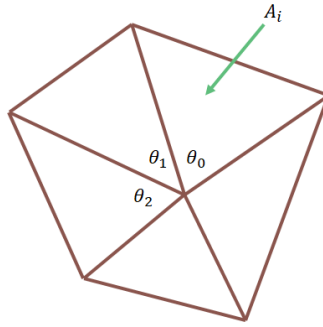


图 3-3 高斯曲率求解面积示意图

对于一个顶点来说，公式（3-2）可以写为公式（3-3）

$$K_i A_i = 2\pi - \sum_0^k \theta_j \quad (3-3)$$

其中， $\sum_0^k \theta_j$ 为所求的顶点对应所有面片的角度之和，如图 3-3 所示。因此，该顶点的高斯曲率可以由公式（3-3）推导出公式（3-4）：

$$K_i = \frac{2\pi - \sum_0^k \theta_j}{A_i} \quad (3-4)$$

算法 3-2 计算高斯曲率算法

计算高斯曲率

INPUT: *model*:用于求解高斯曲率的模型

OUTPUT: *gaussianCurvature*:每个点高斯曲率的最小值

```

1:  for each point c in model do
2:    angle=0: 用于计算当前点所有临界三角面片的角度和
3:    area=0: 用于计算当前点所有邻接三角面片的面积和
4:    for each link triangle t about c do
5:      //遍历与当前点 c 邻接的所有的三角面片
6:      angle += triangle.angle
7:      area += triangle.area
8:    end for
    
```

```

9:   gaussianCurvature[c] = (( 2 * pi - angle ) / area ); 计算当前点的高斯曲率
10: end for
11: return gaussianCurvature.

```

为了验证所求的高斯曲率的准确性，将部分模型计算结果进行了可视化操作，如图 3-4 所示，蓝色表示高斯曲率为负，红色表示高斯曲率为正，越靠近红色或者蓝色表示模型在该处的弯曲程度越大。

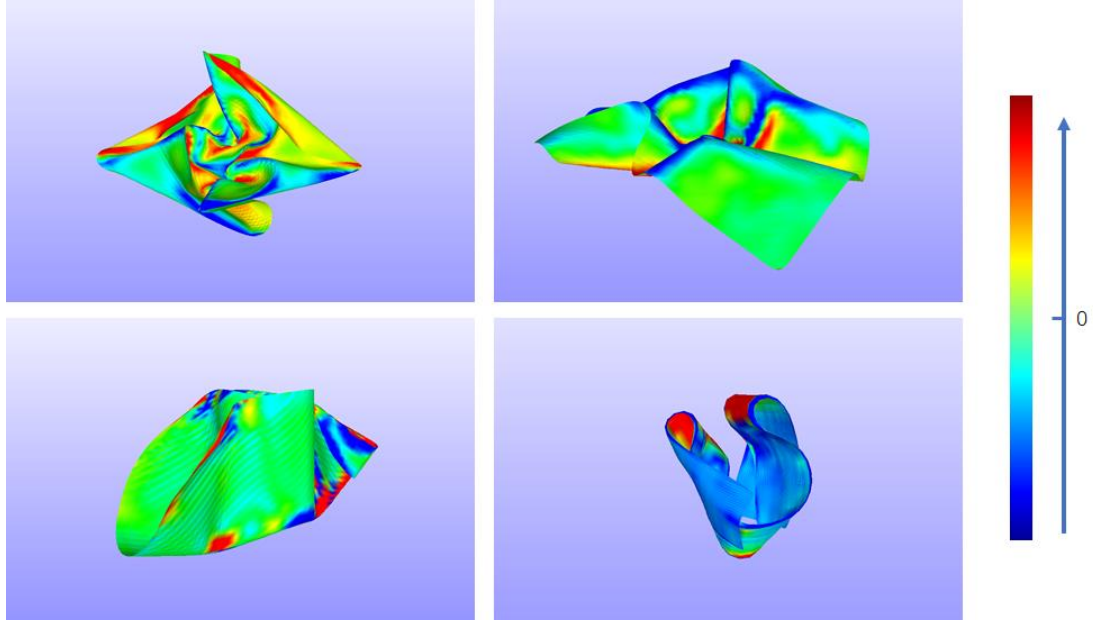


图 3-4 部分模型高斯曲率可视化

在图 3-4 中，红色表示球面，蓝色表述双曲面，本工作的目的是评价曲面的弯曲程度，并不关心曲面是球面还是双曲面，因此红色部分和蓝色部分都应作为要求取的特征点，高斯曲率是正值还是负值对当前工作来说没有意义。因此在本工作中没有使用真实的高斯曲率，而是只关心高斯曲率的绝对值大小，因此当前工作使用了高斯曲率的绝对值来进行评价。

将模型上每个点的高斯曲率之和作为这个模型整体的曲率得分，如公式(3-5)所示。

$$C_i = \sum_0^k \text{gaussianCurvature}(i,j) \quad (3-5)$$

3.1.3 模型的评价函数

这是两个不同的打分标准，他们的单位不同、精读不同、在数值上的跨度不同、数量级也不同。对于一个综合的评价函数，需要将这二者放到同一个尺度下进行操作。因此，在本工作中，分别将这两个得分进行了归一化操作。

归一化 (Normalization) 是指把数变为 $[0, 1]$ 之间的小数。归一化的目的就是限制数据, 将待处理的数据限制在一定范围之内, 从而消除数据导致的不良影响。在机器学习领域有很大的应用。目前有很多归一化的技术, 如最大最小标准化 (Min-Max Normalization)、Z-score 标准化和小数定标标准化 (Decimal scaling Normalization) 等^[43]。其中 Z-score 标准化要求原始数据分布是近似高斯分布的, 否则归一化效果会很差, 而模型参数分布不满足这个要求。而小数定标标准化是通过移动小数点的位置来进行数据的标准化处理, 小数点移动的位数则取决于输入的原始数据中绝对值最大的数据, 也不适用于当前工作。

因此, 在当前工作中采用了最大最小标准化, 对原始数据进行线性变换, 将值映射到 $[0, 1]$ 之间, 具体的计算方法如公式 (3-6) 所示。这里最大最小取值范围是整个仿真生成的序列, 即所有用于评价的模型, 整体进行操作。

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3-6)$$

本工作选取了综合评价函数上的极大值点, 作为初筛结果。如图 3-5, 灰色的曲线为综合评价函数的曲线, 而红色的点为这根曲线上的极大值点, 为了排除相似模型, 在本工作中规定两个相邻点之间最少相隔 10 帧, 并且要大于前 5 帧以及后 5 帧。这些极大值点对应的模型的特点是特征点丰富, 造型奇特, 是潜在的美观模型。把这些给到用户进行选择。让用户根据自己的偏好选出最美观的模型。

本工作中分别对模型的体积得分以及曲率得分进行归一化处理。根据这个处理结果, 提出了综合评价分数这一概念, 记为 E_i 具体的计算方法如公式 (3-7) 所示。

$$E_i = Cn_i + Vn_i \quad (3-7)$$

用这个函数求解出所有的模型的综合评价分数。如图 3-5 所示, 横坐标为帧数。

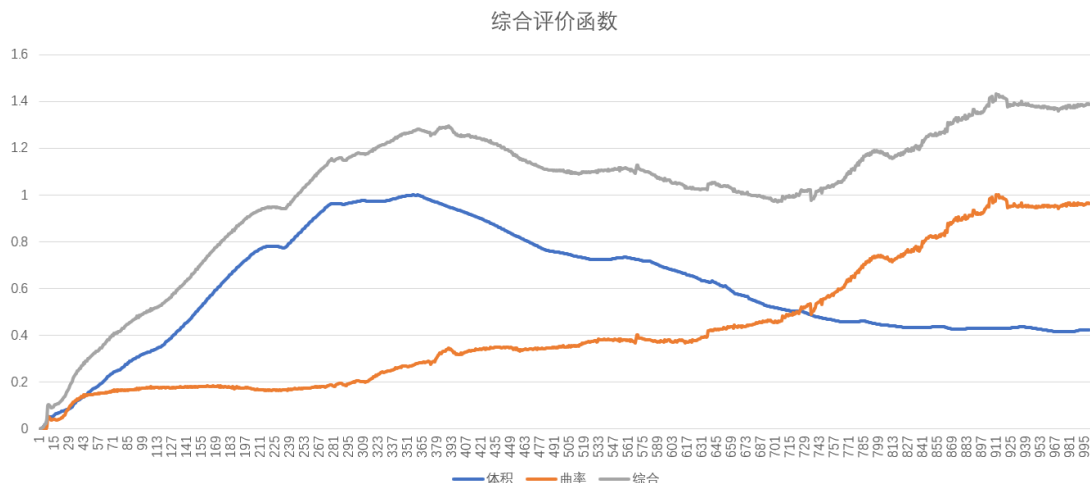


图 3-5 综合评价函数图

3.2 模型的主观评价

通过 3.1 筛选出了特征明显的模型，但是，不同用户的偏好是不同的，这些模型并不一定全都符合用户的审美。因此将筛选后的模型推送给用户，让用户自己选择符合自己审美偏好的三维模型。并且，根据用户选择结果，可以反向验证在本工作中提出的客观评价函数的合理性，验证体积和曲率是否是影响模型美观的重要因素。

对于每个模型，让用户直接打分是很困难的[29]，且不准确，因此，在本工作中，用户评价部分并没有使用打分的方式。本工作的用户评价是基于判断的。对于每个模型，用户只需建档的评价它“好”还是“不好”，而不需要评价这个模型究竟好到什么程度。这样的评价方法对于用户来说更友好的，因为用户可以更加容易的做出选择。而且这个选择结果更加符合用户的主观偏好，更加准确。本工作中还设置了“特别喜爱”的选择项，用于用户选择特别喜爱的模型。

第4章 模型优化

4.1 模型的平滑

由于在仿真计算中，各个质点之间是相互独立计算的，因此这些布料仿真模型的表面并不光滑，网格上噪声较多，网格质量较差。为了保证模型的美观，在模型生成后，对每个模型进行了平滑处理。

拉普拉斯平滑（Laplacian Smoothing）是网格平滑处理的经典算法^[44]，能够较好地保持网格模型的局部细节。算法的输入为三维模型以及迭代次数，迭代次数控制的是三维模型进行平滑操作的次数，迭代的次数越多，模型越光滑，但是相应的模型特征损失越多。经过实验测试，迭代三次后，大多数模型能实现网格去噪，而且模型的特征保持较好。

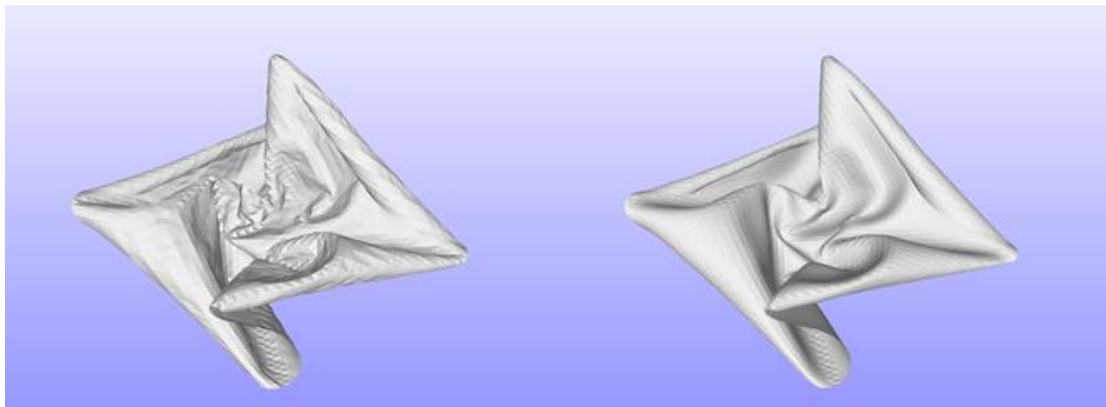


图 4-1 左：原模型 右：拉普拉斯平滑迭代三次后模型

如图 4-1 所示，左边为仿真生成的布料原模型，右边为使用拉普拉斯平滑迭代三次后的结果。可以明显的对比出，右边的模型比左边的光滑，模型表面的噪声都已经去除。而且模型的特征得以保留。

4.2 模型的稳定性

4.2.1 模型稳定性的检测

模型的稳定性在本工作中主要是指静态放置的稳定性，即模型能在主方向垂直于水平面的前提下，保持稳定放置。这里的模型主方向是指在仿真过程中确立的方向，仿真时与 Z 轴平行的方向定为模型的主方向。如图 2-4 所示，左图为稳

定模型，右图为不稳定模型。



图 4-2 左：稳定模型，右：不稳定模型

本工作中，将模型在仿真时最底部的平面，定义为基面，模型静态稳定性与位于基础之上的物体质量的比例有关^[45]。本工作中使用这种性质的几何估计。

首先计算出布料模型的重心 G_0 ，然后求出模型最底部（ Z 值最小的所有点），求出这些点的凸包，这个求得的多边形就是当前模型的基面。然后将布料模型的重心投影到基面所在的平面上。因为投影的重心在四边形内部且远离支撑多边形的边界，稳定性通常会更好。因此若质点在基面内部，且到基面边缘的最短距离大于基面最短直径的 10%，在本工作中判定这个模型是稳定的，否则，这个模型不满足稳定性要求。

根据边缘模型的不同以及物理模型的不同，模型的基面可能会不存在如图 4-3 所示。最低处的点可能会少于三个或者大于三个但无法构成平面，无法求取凸包，此时将这一类模型归为不稳定模型。



图 4-3 不存在基面的模型

4.2.2 不稳定模型的处理

对于稳定的模型，打印完成后可以直接摆放，因此不需要进行处理。

对于不稳定的模型，包括不存在基面的模型需要为它添加一个支撑底面。具体的添加算法是：设基面所在的平面为 P ，若不存在基面，则求出模型最低的质点 Q 。将这个点所在的与 XOY 平面相平行的平面作为基面所在的平面 P 。将模型的重心 G 投影在这个平面上，假设这个点为 G_0 。若存在基面，则基面上距离 G_0 最远的点为 Q 。连接 QG_0 。因为投影的重心在四边形内部且远离支撑多边形的边界，稳定性通常会更好。因此要做出稳定补偿，把补偿系数定为 10%。根据公式(4-1)、公式(4-2)可以求出 Q_1 、 G_1 。

$$\overrightarrow{Q_1G} = 1.1 * \overrightarrow{QG} \quad (4-1)$$

$$\overrightarrow{G_1Q} = 1.1 * \overrightarrow{GQ} \quad (4-2)$$

将 $|G_1Q_1|$ 作为对角线，以平行于 X 轴， Y 轴的线段为边，在 P 上构建一个矩形 W ， W 就作为添加的支撑底面。整个计算构造的过程如图 4-4 所示。

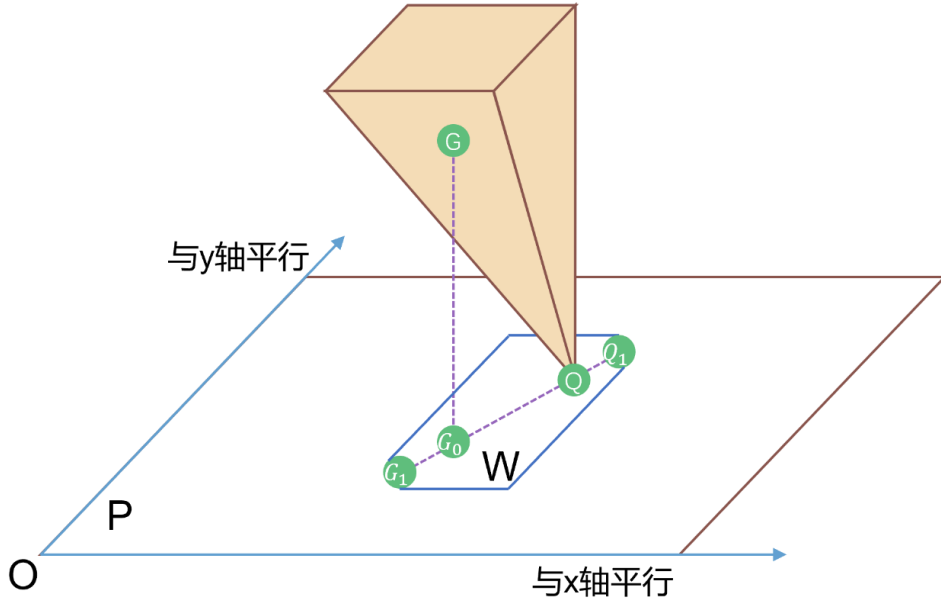


图 4-4 支撑底面构造示意图

4.3 面向制造的优化

在仿真过程中，布料使用的是一个平面，对平面进行表面细分然后添加弹簧

质点等属性，将它作为布料。在仿真过程中将这个面采样输出，得到的结果是一系列开曲面模型。但是在三维打印中，要求模型必须是封闭的，即模型必须有体积。因此，在仿真中得到的开曲面模型不能直接用于打印，需要将模型转为有体积的实体模型。

将开曲面模型转为有体积的实体模型最常用的方法是进行曲面偏距，简单的来说就是曲面加厚，增加曲面的厚度，生成一个有体积的实体模型。具体的做法如图 4-5 所示是：将曲面特征沿某方向偏移一定的距离来创建一个新的曲面，偏移的距离为曲面增厚的厚度，新的曲面就是偏距曲面。然后将两曲面连接生成模型。

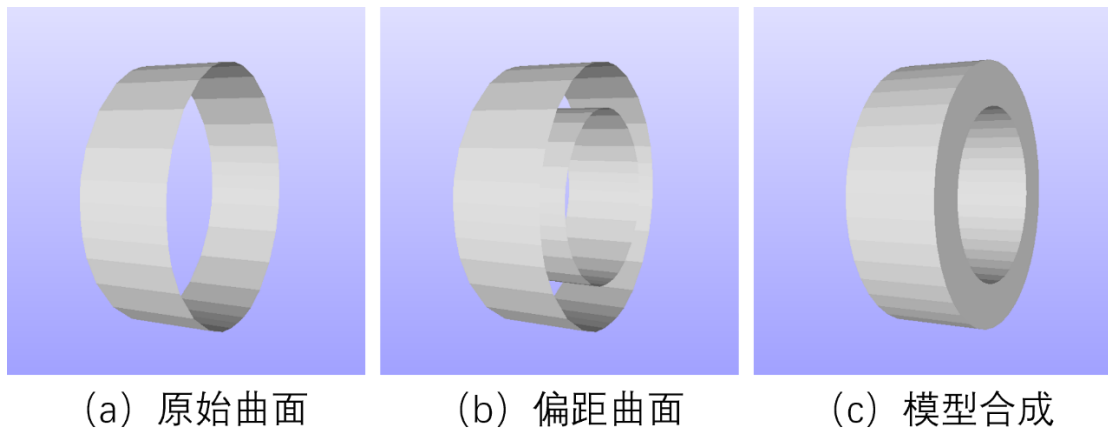


图 4-5 曲面加厚流程

这一部分操作在本工作中使用 Meshmixer 完成。

第5章 结束语

5.1 实验结果

5.1.1 运行环境及参数

本文所有程序由三部分组成，仿真部分使用了 Blender 的内核，使用 Python 语言编写脚本；评价部分使用了 C++语言完成；用户评价部分前端使用了 HTML、CSS、JavaScript 语言完成，后端使用了 Node.js 语言。

仿真部分、客观评价部分、模型优化的程序运行运行的硬件配置为 CPU:11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11700F @ 2.50GHz，内存:32GB，仿真部分使用了 GPU 加速，GPU 型号为 NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti。软件配置为：操作系统：Windows 10； Blender 版本：Blender 2.9.1； Meshmixer 版本：3.5.474。

用户评价部分部署在腾讯云云服务器，具体参数为 Ubuntu Server 20.04 LTS 64 位，4 核，8GB。

制造部分中使用了光固化（DLP）打印方式进行打印，打印机型号为先临三维 AccuFab-D1S，打印材料为模型树脂 DM11。

5.1.2 实验结果与分析

表 5-1 实验设计

边缘模型 设置	布料模型设置			物理模型设置	
	布料 形状	布料面积 (单位: mm ²)	布料材质	力的方向	力的大小 (单位: N)
	圆形	24964	丝绸	自下而上	10
	圆形	24964	棉布	自下而上	10
	圆形	24964	丝绸	自下而上	20
	圆形	24964	丝绸	自上而下	10

本工作的实验设计如表 5-1 实验设计所示，共进行了 4 组实验，其中布料材质部分，丝绸和棉布的具体参数如图 5-1 左：棉布具体参数；右：丝绸具体参数所示。

▼ 布料

质量步数 5

速率倍增 1.000

▼ 物理属性

顶点质量 0.3 kg

空气粘度 1.000

弯曲模型 棱角

▼ 硬度

张力 15.000

压缩 15.000

切变 15.000

弯曲 0.500

▼ 布料

质量步数 5

速率倍增 1.000

▼ 物理属性

顶点质量 0.15 kg

空气粘度 1.000

弯曲模型 棱角

▼ 硬度

张力 5.000

压缩 5.000

切变 5.000

弯曲 0.050

图 5-1 左：棉布具体参数；右：丝绸具体参数

在第一组与第三组的对照实验中，二者的区别是力的大小不同，通过观察实验结果发现，二者的区别仅为布料运动的速度不同，生成的模型并没有明显的区别。本工作还进行了其他的关于力的大小的测试实验，发现力的大小仅影响布料速度，但是当力过大时，整个系统会直接崩溃。

对第一组、第二组、第四组的实验进行模型评价。评价结果分别如图 5-2、图 5-3、图 5-4 所示，横坐标均为帧数，纵坐标均为综合得分。

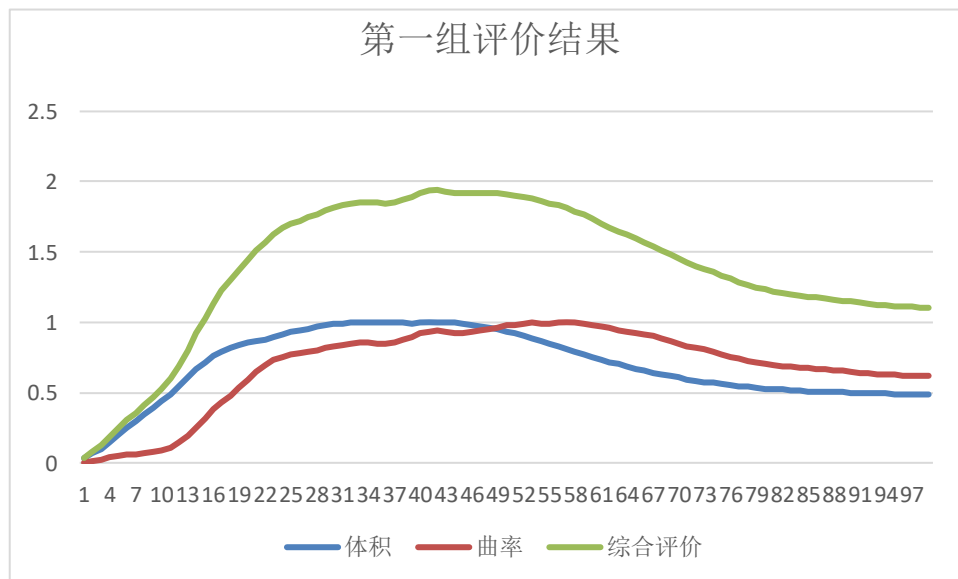


图 5-2 第一组实验评价结果

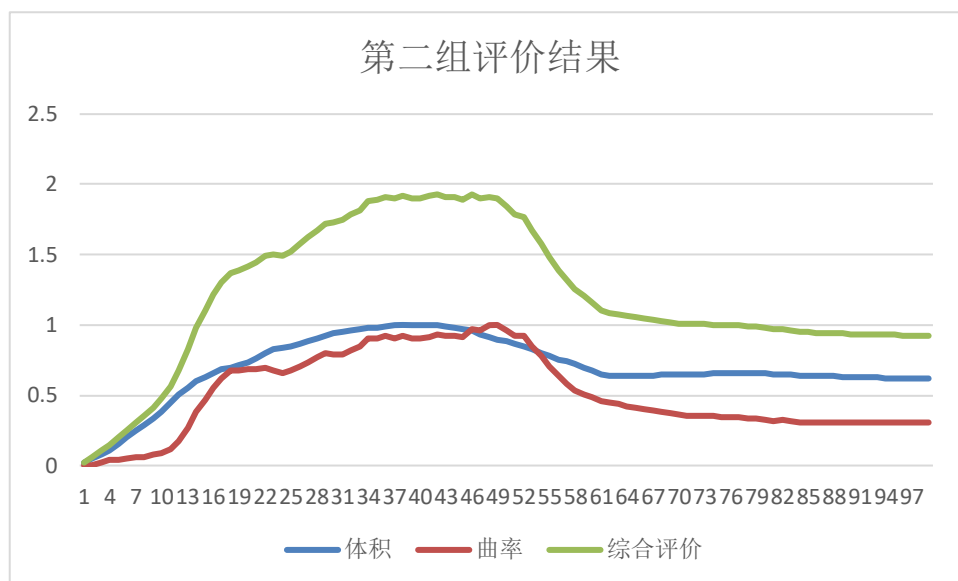


图 5-3 第二组实验评价结果

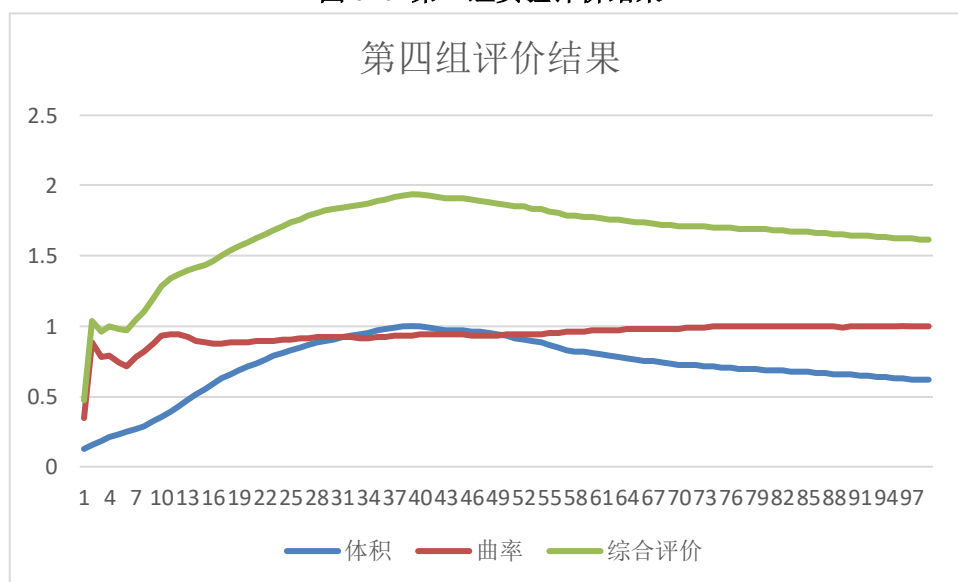


图 5-4 第四组实验评价结果

为了验证体积和曲率是否为有效的评价标准，本工作进行了用户评价并对结果进行分析。

在第一组实验中，选取了第 17、35、52、59、77 帧对应的模型进行测试。这些模型之中第 17、59 帧具有相同的体积不同的曲率，且体积得分超过 0.5；第 52、59 帧具有相同的曲率不同的体积，且曲率得分超过 0.5。第 77、35 帧为随机选取的模型。

在第二组实验中，选取了第 26、52、59、79、96 帧对应的模型进行测试。这些模型之中第 26、52 帧具有相同的体积不同的曲率，且体积得分超过 0.5；第 26、59 帧具有相同的曲率不同的体积，且曲率得分超过 0.5。第 79、96 帧为

随机选取的模型。

在第四组实验中，选取了第 14、26、56、77、99 帧对应的模型进行测试。这些模型之中第 26、56 帧具有相同的体积不同的曲率，且体积得分超过 0.5；第 14、26 帧具有相同的曲率不同的体积，且曲率得分超过 0.5。第 77, 99 帧为随机选取的模型。

随后，邀请了五位用户进行评价，评价方式按照 3.2 节中的方法，在本工作中定义喜欢则加 1 分，不喜欢则减一分，特别喜欢则加 3 分，对每个模型进行评价。评价结果如表 5-2 用户评价结果所示。

表 5-2 用户评价结果

实验	模型	喜欢	不喜欢	特别喜欢	总得分
实验一	17	2	3	0	-1
	35	1	4	0	-3
	52	4	1	0	3
	59	5	0	0	5
	77	2	3	0	-1
实验二	26	3	2	0	1
	52	4	1	0	3
	59	2	2	1	3
	79	1	4	0	-3
	96	2	3	0	-1
实验四	14	1	4	0	-3
	26	1	4	0	-3
	56	1	4	0	-3
	77	4	1	0	-3
	99	3	1	1	5

通过用户评价结果可以看出，用户喜欢的模型与曲率相关度高，与体积相关度低。用户更大概率喜欢曲率高的模型，而并不关心在整个序列中，模型的体积大小。

将实验中得分较高的模型进行了优化处理，并进行制造。如图 5-5，左上为

实验一 59 帧模型，右上为实验二 52 帧模型，左下为实验二 59 帧模型，右下为实验三 99 帧模型。此外，实验三 99 帧模型不满足稳定性，经过计算为它添加了支撑底面。

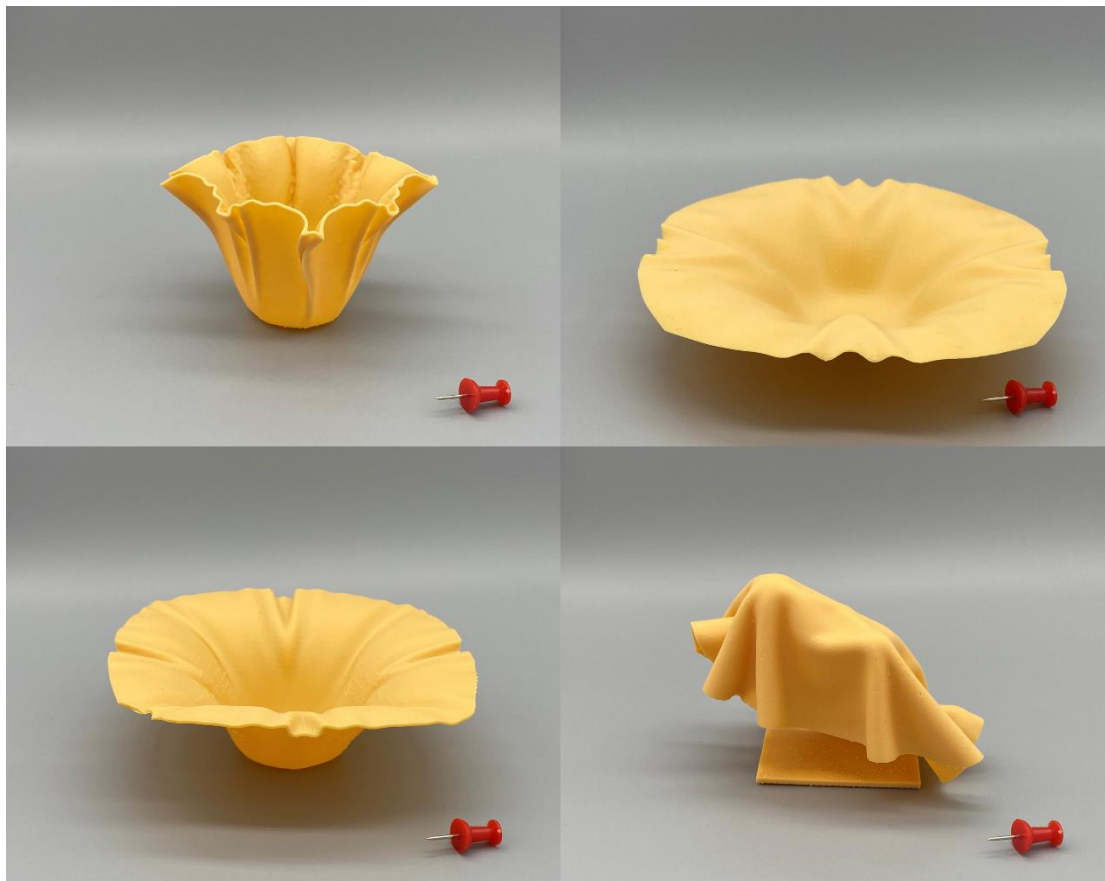


图 5-5 打印结果

在本工作中，还测试了大量的模型，如图 5-6 所示，通过改变边缘模型、布料的形状、硬度等参数，生成了 1000 帧模型。

对于每一组生成的模型，使用客观评价方程进行评价，对每一帧模型进行打分，在每一个序列里选择出 5 个得分高且帧数不相近模型，作为客观评价初筛的结果。讲这些模型推送给用户进行主观评价。并且打印出了用户评价中得分最高的模型。

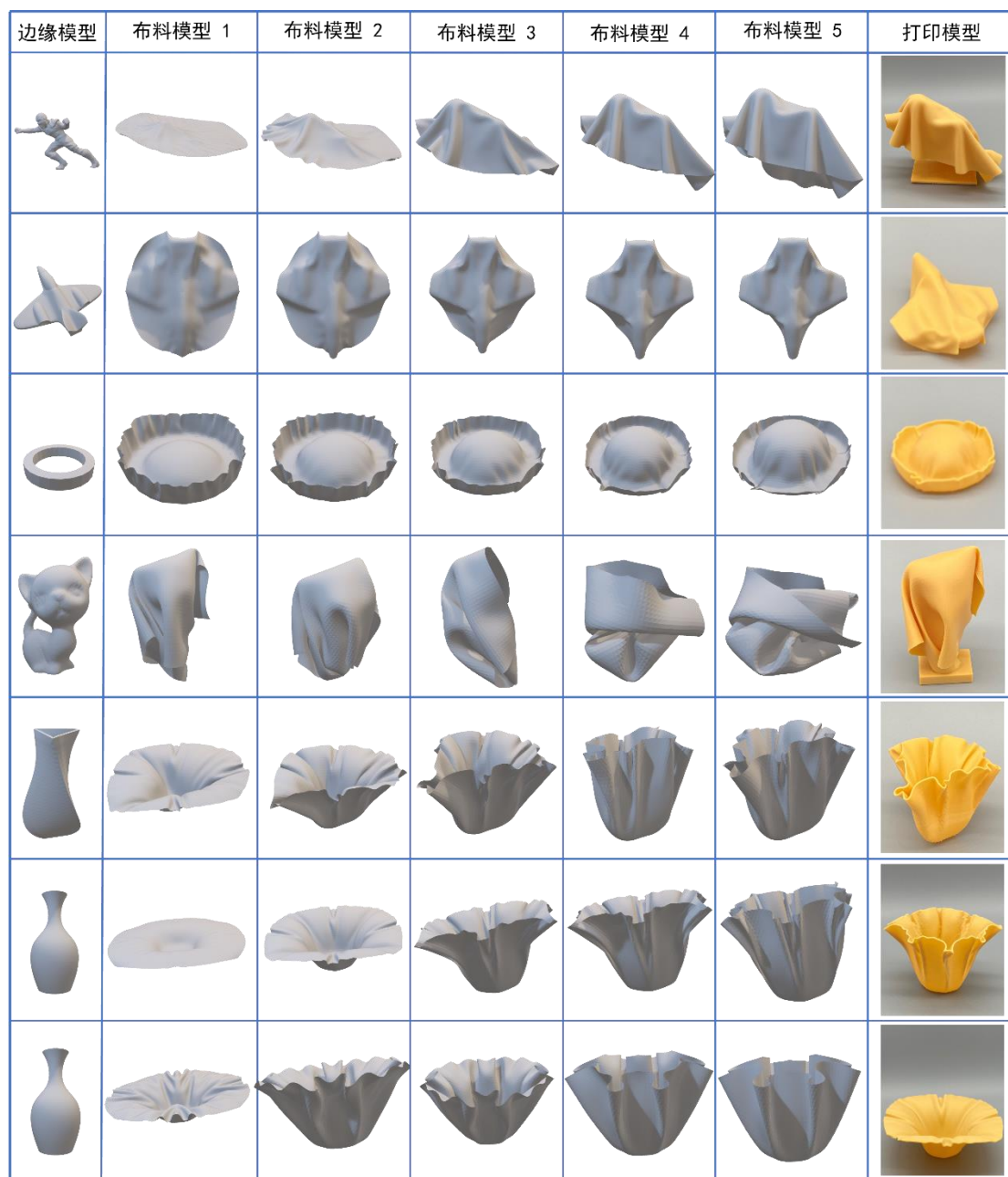


图 5-6 不同模型的仿真与打印结果

5.2 本文总结

本论文面向增材制造中的建模问题，提出了一种基于形状创成式设计制造方法。主要提出了一种创成式建模方法。主要工作总结如下：

- (1) 提出了一种创成式建模方法。使用布料仿真作为基础的模型生成方法，创造出了自然、美观、复杂度高的几何模型。
- (2) 提出一种基于模型几何形状的评价方法。该方法在生成的模型库中删除特点不明显的模型，减少用户评价的次数。并让用户进行评价，选出符合用

户偏好的模型。

通过本文提出的方法，用户可以只通过很简单的交互，获取模型，极大地节约了建模时间。所得的模型满足自然美观，造型复杂，使用 CAD 建模软件难以制造。

5.3 工作展望

本文的研究工作仍然有许多问题值得进一步研究探索，具体包括以下三个方面。

5.3.1 探索多种基础建模方式

本工作提出的是一种关于建模和仿真的结合，在本文提出的建模方法是基于布料仿真的，但是不是仅局限于布料仿真这一个类型。因此，在后续的工作中，会探索更多的建模方式，比如流体仿真等。

5.3.2 改进模型评价

在本文提出的评价方法是使用了体积和曲率评价方程进行初筛之后，把筛选结果推送给用户进行评价。通过用户评价可以证明，体积的影响效果很小。在未来的工作中可以改进这个评价方程。此外，用户的个人偏好是不同的，通过图 5-2 可以看出，即使有的模型被有些用户判定为“非常喜欢”，同样也有用户不喜欢这个模型。这主要取决于用户的主观意愿，因此评价也需要考虑用户的因素。一个值得探究的方向是将模型参数化之后使用深度学习的方法进行选择。

5.3.3 模型的自稳定性

当用户选取模型后，对这个模型进行制造，对于无法自行站立的模型，本工作中为它添加了支撑底座，让它能按照主方向放置在水平面上。但是，这个底座也破坏了模型的美观，在未来，一个值得探究的方向是，通过对模型本身做出细微的调整，使得模型可以在不添加底座的条件下，能按照主方向放置在水平面上。

致 谢

行文至此，已是盛夏。最后一版论文改完，我的本科生活也将画上句点。

教诲如春风，师恩似海深。得遇恩师是我的幸运。三年前在恩师的帮助下，我来到了交叉研究中心，开始探索科研的世界。我的思维方向，习惯养成，都得益于恩师孜孜不倦的教诲。恩师严谨求实的科研态度和不断探索的科研精神也一直深深的影响着我。

谁言寸草心，报得三春晖。父母含辛茹苦的把我拉扯大，经历了太多的不容易。离家四年，自己陪伴他们的实在是太少，有时候甚至半个月也没有一次通话，感谢父母的包容与理解。

海内存知己，天涯若比邻。感谢一直以来帮助我的挚友，是你们一直以来的支持与帮助使我走到了现在，是你们给予了我奋发的勇气和向上的动力。无论近在咫尺还是相隔千里，在我所有最需要的时候，你们都在。希望我们多年后仍可谈天说地一如少年时。

愿自己在今后的道路上能永怀赤子之心，一直坚定的走下去。

参考文献

- [1] Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art[J]. Journal of healthcare engineering, 2019, 2019.
- [2] Steffen W, Koning N, Wenger S, et al. Shape: A 3D modeling tool for astrophysics[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 17(4): 454-465.
- [3] Ma Z, Liu S. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 37: 163-174.
- [4] 郑少京, 吕志强. 主导 3D 打印技术的关键-3D 建模[J]. 办公自动化, 2015 (14): 61-62.
- [5] Feeman S M, Wright L B, Salmon J L. Exploration and evaluation of CAD modeling in virtual reality[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2018, 15(6): 892-904.
- [6] Pottmann H, Leopoldseder S, Hofer M, et al. Industrial geometry: recent advances and applications in CAD[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(7): 751-766.
- [7] Westin S H. Computer-aided industrial design[J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1998, 32(1): 49-52.
- [8] Chen Y, Song Z, Xu W, et al. Parametric 3D modeling of a symmetric human body[J]. Computers & Graphics, 2019, 81: 52-60.
- [9] Alcock C, Hudson N, Chilana P K. Barriers to using, customizing, and Printing 3D designs on thingiverse[C]//Proceedings of the 19th international conference on supporting group work. 2016: 195-199.
- [10] Xing Y, Zhou Y, Yan X, et al. Shell thickening for extrusion-based ceramics printing[J]. Computers & Graphics, 2021, 97: 160-169.
- [11] McKnight M. Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer[J]. KnE Engineering, 2017: 176-181.
- [12] McCormack J, Dorin A, Innocent T. Generative Design: A Paradigm for Design Research[J]. 2004.
- [13] Krish S. A practical generative design method[J]. Computer-Aided Design, 2011,

43(1): 88-100.

- [14] Wu J, Quian X, Wang M Y. Advances in generative design[J]. Computer-Aided Design, 2019, 116: 102733.
- [15] Nishino H, Utsumiya K, Korida K, et al. A method for sharing interactive deformations in collaborative 3D modeling[C]//Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology. 1999: 116-123.
- [16] Kaneko K, Okada Y, Niijima K. 3D model generation by morphing[C]//International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation (CGIV'06). IEEE, 2006: 341-346.
- [17] Nishino H, Takagi H, Saga S, et al. A virtual modeling system for intuitive 3D shape conceptualization[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2002, 4: 6 pp. vol. 4.
- [18] Salta S, Papavasileiou N, Pyliotis K, et al. Adaptable emergency shelter: A case study in generative design and additive manufacturing in mass customization era[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 44: 124-131.
- [19] Jiang L, Chen S, Sadasivan C, et al. Structural topology optimization for generative design of personalized aneurysm implants: Design, additive manufacturing, and experimental validation[C]//2017 IEEE Healthcare Innovations and Point of Care Technologies (HI-POCT). IEEE, 2017: 9-13.
- [20] Marin P, Bignon J C, Lequay H. A genetic algorithm for use in creative design processes[C]//Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). 2008 (28).
- [21] López J P, Rodrigo J A, Jiménez D, et al. Stereoscopic 3D video quality assessment based on depth maps and video motion[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2013, 2013(1): 1-14.
- [22] Tinscherta J, Nattb G, Hassenpflug S, et al. Status of Current CAD/CAM Technology in Dental Medicine Stand der aktuellen CAD/CAM-Technik in der Zahnmedizin[J]. Int. J. Comput. Dent, 2004, 7: 25-45.
- [23] Chen Y, Wang C C L. Regulating complex geometries using layered depth - normal images for rapid prototyping and manufacturing[J]. Rapid Prototyping

Journal, 2013.

- [24] 胡江北. 面向 3D 打印的复杂拓扑结构设计与优化.
- [25] Li B, Johan H. View context: a 3D model feature for retrieval[C]//International Conference on Multimedia Modeling. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 185-195.
- [26] Vranic D V, Saupe D. 3D model retrieval[D]. University of Leipzig, 2004.
- [27] 杨育彬, 林琤, 朱庆. 基于内容的三维模型检索综述[D]. , 2004.
- [28] Liu Y J, Zhang X D, Li Z M, et al. Extended cone-curvature based salient points detection and 3D model retrieval[J]. Multimedia tools and applications, 2013, 64(3): 671-693.
- [29] Koyama Y, Sato I, Goto M. Sequential gallery for interactive visual design optimization[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2020, 39(4): 88: 1-88: 12.
- [30] Kelly J, Papalambros P, Wakefield G. The development of a tool for the preference assessment of the visual aesthetics of an object using interactive genetic algorithms[C]//9th Generative Art Conference GA2005. 2006.
- [31] Nishino H, Takagi H, Cho S B, et al. A 3D modeling system for creative design[C]//Proceedings 15th International Conference on Information Networking. IEEE, 2001: 479-486.
- [32] Nishino H, Sueyoshi T, Kagawa T, et al. An Interactive 3D Graphics Modeler Based on Simulated Human Immune System[J]. Journal of Multimedia, 2008, 3(2).
- [33] Wenli Z. Adaptive interactive evolutionary computation for cctive intent-oriented design[C]//2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. IEEE, 2008: 277-282.
- [34] Reed K. Improving aesthetic measures for evolutionary vase design[D]. University of Birmingham, 2013.
- [35] Baraff D, Witkin A. Large steps in cloth simulation[C]//Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1998: 43-54.
- [36] Huh S, Metaxas D N, Badler N I. Collision resolutions in cloth simulation[C]//Proceedings Computer Animation 2001. Fourteenth Conference

- on Computer Animation (Cat. No. 01TH8596). IEEE, 2001: 122-127.
- [37] Provot X. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garments[M]//Computer Animation and Simulation'97. Springer, Vienna, 1997: 177-189.
- [38] Choi K J, Ko H S. Research problems in clothing simulation[J]. Computer-aided design, 2005, 37(6): 585-592.
- [39] Hu S, Yu L. Optimization of collision detection algorithm based on obb[C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, 2010, 2: 853-855.
- [40] Bridson R, Fedkiw R, Anderson J. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation[C]//Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 2002: 594-603.
- [41] Gottschalk S A. Collision queries using oriented bounding boxes[M]. The University of North Carolina at Chapel Hill, 2000.
- [42] Bishop R L, Goldberg S I. Some implications of the generalized Gauss-Bonnet theorem[J]. Transactions of the American Mathematical Society, 1964, 112(3): 508-535.
- [43] Patro S, Sahu K K. Normalization: A preprocessing stage[J]. arXiv preprint arXiv:1503.06462, 2015.
- [44] Sorkine O. Laplacian mesh processing[J]. Eurographics (State of the Art Reports), 2005, 4.
- [45] Fu H, Cohen-Or D, Dror G, et al. Upright orientation of man-made objects[M]//ACM SIGGRAPH 2008 papers. 2008: 1-7.

攻读学位期间参与科研项目及发表学术论文情况

学术论文：

- [1] Shell thickening for extrusion-based ceramics printing[J]. Computers & Graphics, 2021, 97: 160-169. (SCI 收录, 中科院 2 区, 第一作者)
- [2] Man-made by Computer: On-the-Fly Fine Texture 3D Printing[C] ACM Symposium on Computational Fabrication. 2021: 1-10. (EI 收录, 第四作者)

国家发明专利：

- [1] 一种面向陶瓷 3D 打印的薄壳加厚方法及系统, 专利号:
ZL202110261307.7, 授权日期: 2021-12-24, 第二位
- [2] 一种面向 3D 打印的过程纹理合成系统及方法, 申请号:
CN202010871745.0, 公开公告日: 2020-12-25, 第四位 (实审中)
- [3] 一种面向 3D 打印的自然纹理合成系统及方法, 申请号:
CN202010873374.X, 公开公告日: 2020-12-25, 第四位 (实审中)
- [4] 面向针织纹理陶瓷的 3D 打印控制方法及系统, 申请号:
CN202210570352.5, 公开公告日: 2022-05-24, 第三位 (实审中)

附录 1 代码及相关附件

计算混合包围盒分数

```
float VolumeEvaluation::CalculatePerFileVolume(vector<point3Df> pointCloud) {
    clock_t startTime0, endTime0;
    startTime0 = clock();
    float minVolume = 1000000000;
    int allD = 10; //每个方向分成多少段
    for (int aX = 0; aX < allD; aX++) {
        for (int aY = 0; aY < allD; aY++) {
            for (int aZ = 0; aZ < allD; aZ++) {
                clock_t startTime3, endTime3;
                startTime3 = clock();
                float maxX, minX;
                float maxY, minY;
                float maxZ, minZ;
                float nowVolume;
                maxX = -100000; minX = 100000;
                maxY = -100000; minY = 100000;
                maxZ = -100000; minZ = 100000;
                float angleX = aX * 1.0 / allD * PI / 2;
                float angleY = aY * 1.0 / allD * PI / 2;
                float angleZ = aZ * 1.0 / allD * PI / 2;
                vector<point3Df> tempPoint(pointCloud);
                matrix3f rotationMatrixX;
                rotationMatrixX.element[0][0] = 1.0;
                rotationMatrixX.element[0][1] = 0;
                rotationMatrixX.element[0][2] = 0;
                rotationMatrixX.element[1][0] = 0;
                rotationMatrixX.element[1][1] = cos(angleX);
                rotationMatrixX.element[1][2] = -sin(angleX);
                rotationMatrixX.element[2][0] = 0;
                rotationMatrixX.element[2][1] = sin(angleX);
                rotationMatrixX.element[2][2] = cos(angleX);
                matrix3f rotationMatrixY;
                rotationMatrixY.element[0][0] = cos(angleY);
                rotationMatrixY.element[0][1] = 0;
                rotationMatrixY.element[0][2] = sin(angleY);
                rotationMatrixY.element[1][0] = 0;
                rotationMatrixY.element[1][1] = 1;
                rotationMatrixY.element[1][2] = 0;
                rotationMatrixY.element[2][0] = -sin(angleY);
                rotationMatrixY.element[2][1] = 0;
```

```

rotationMatrixY.element[2][2] = cos(angleY);
matrix3f rotationMatrixZ;
rotationMatrixZ.element[0][0] = cos(angleZ);
rotationMatrixZ.element[0][1] = -sin(angleZ);
rotationMatrixZ.element[0][2] = 0;
rotationMatrixZ.element[1][0] = sin(angleZ);
rotationMatrixZ.element[1][1] = cos(angleZ);
rotationMatrixZ.element[1][2] = 0;
rotationMatrixZ.element[2][0] = 0;
rotationMatrixZ.element[2][1] = 0;
rotationMatrixZ.element[2][2] = 1.0;
for (int i = 0; i < tempPoint.size(); i++) {
    matrix3f pointT;
    pointT.element[0][0] = tempPoint.at(i).x;
    pointT.element[0][1] = tempPoint.at(i).x;
    pointT.element[0][2] = tempPoint.at(i).x;
    pointT.element[1][0] = tempPoint.at(i).y;
    pointT.element[1][1] = tempPoint.at(i).y;
    pointT.element[1][2] = tempPoint.at(i).y;
    pointT.element[2][0] = tempPoint.at(i).z;
    pointT.element[2][1] = tempPoint.at(i).z;
    pointT.element[2][2] = tempPoint.at(i).z;

    pointT = rotationMatrixX * pointT;
    pointT = rotationMatrixY * pointT;
    pointT = rotationMatrixZ * pointT;

    maxX = max(maxX, pointT.element[0][0]);
    maxY = max(maxY, pointT.element[1][1]);
    maxZ = max(maxZ, pointT.element[2][2]);
    minX = min(minX, pointT.element[0][0]);
    minY = min(minY, pointT.element[1][1]);
    minZ = min(minZ, pointT.element[2][2]);
}
nowVolume = (maxX - minX) * (maxY - minY) * (maxZ - minZ);
minVolume = min(minVolume, nowVolume);
endTime3 = clock();
}
}
}
endTime0 = clock();
return minVolume;
}

```

计算模型曲率得分

```

float CurvatureEvaluation::GetModelCurvatures(MatrixXd V, MatrixXi F, vector<int>DU)
{
    float sumCurvatures = 0;
    vector<float> pointArea(V.rows(), 0);
    vector<float> pointAngle(V.rows(), 0);
    vector<vector<int>> pointLink(V.rows());

    for (int i = 0; i < F.rows(); i++) {
        int pointID0 = F(i, 0);
        int pointID1 = F(i, 1);
        int pointID2 = F(i, 2);
        float x0 = V(pointID0, 0);
        float y0 = V(pointID0, 1);
        float z0 = V(pointID0, 2);
        float x1 = V(pointID1, 0);
        float y1 = V(pointID1, 1);
        float z1 = V(pointID1, 2);
        float x2 = V(pointID2, 0);
        float y2 = V(pointID2, 1);
        float z2 = V(pointID2, 2);
        pointArea[pointID0] = pointArea[pointID0] + GetArea(point3Df{ x0, y0, z0 },
point3Df{ x1, y1, z1 }, point3Df{ x2, y2, z2 });
        pointArea[pointID1] = pointArea[pointID1] + GetArea(point3Df{ x0, y0, z0 },
point3Df{ x1, y1, z1 }, point3Df{ x2, y2, z2 });
        pointArea[pointID2] = pointArea[pointID2] + GetArea(point3Df{ x0, y0, z0 },
point3Df{ x1, y1, z1 }, point3Df{ x2, y2, z2 });
        pointAngle[pointID0] = pointAngle[pointID0] + GetAngle(point3Df{ x0, y0, z0 },
point3Df{ x1, y1, z1 }, point3Df{ x2, y2, z2 });
        pointAngle[pointID1] = pointAngle[pointID1] + GetAngle(point3Df{ x1, y1, z1 },
point3Df{ x0, y0, z0 }, point3Df{ x2, y2, z2 });
        pointAngle[pointID2] = pointAngle[pointID2] + GetAngle(point3Df{ x2, y2, z2 },
point3Df{ x0, y0, z0 }, point3Df{ x1, y1, z1 });
        AddLink(pointID0, pointID1, pointLink);
        AddLink(pointID1, pointID2, pointLink);
        AddLink(pointID2, pointID0, pointLink);
    }
    vector<float> perFileCurvature(V.rows());
    for (int i = 0; i < V.rows(); i++) {

        perFileCurvature[i] = (2 * Pi - pointAngle[i]) / pointArea[i]; //第0帧率
        if (pointLink[i].size()) perFileCurvature[i] = 0;;
        sumCurvatures += fabs(perFileCurvature[i]);
    }
    // if (originalAngle == NULL) originalAngle = new vector<float>(pointAngle);
}

```

```

pointCurvatureList->push_back(perFileCurvature);

    return sumCurvatures;
}
归一化
void VolumeEvaluation::NormalizeEvaluationList() {
    float maxValue = -1111;
    float minValue = 11111111;
    for (int i = 0; i < volumeList->size(); i++) {
        maxValue = max(maxValue, volumeList->at(i));
        minValue = min(minValue, volumeList->at(i));
    }
    for (int i = 0; i < volumeList->size(); i++) {
        volumeList->at(i) = (volumeList->at(i) - minValue) / (maxValue - minValue);
    }
}
综合评价计算
void OverallEvaluation::CalculateOverallEvaluation() {
    ifcalculation = true;
    for (int i = 0; i < evaluationList->size(); i++) { //不同评价指标
        float nowValue = 0;
        for (int j = 0; j < evaluationList->at(i).size(); j++) { //不同文件
            if (overallEvaluationList->size() <= j) {
                overallEvaluationList->push_back(evaluationList->at(i).at(j) *
weightList->at(i));
            }
            else {
                overallEvaluationList->at(j) += (evaluationList->at(i).at(j) *
weightList->at(i));
            }
        }
    }
}
}

```

附录 2 文献英文原文

Shell thickening for extrusion-based ceramics printing

Yu Xing, Yu Zhou, Xin Yan, Haisen Zhao, Wenqiang Liu, Jingbo Jiang, Lin Lu*

ABSTRACT

Additive manufacturing of ceramics gains increasing attention in recent years, as ceramic material like clay processes distinctive merits, including hardness, thermal and chemical stability, etc. The customer level extrusion-based ceramics 3D printer is getting easily achievable. However, due to its semi-liquid and highly viscoelastic properties, the clay material causes new challenges to the computational aspects. It does not dry instantly and may collapse during the accumulated force from new layers breaks the moment equilibrium, especially when adjacent layers have less overlap region. We tackle this unique problem, focusing on shell-like models in extrusion-based ceramics printing in this paper. We propose a structural analysis algorithm that considers the moment equilibrium for each layer along the fabrication process. We also present a computational framework to enhance the structural stability by local thickening of the shell models without affecting the appearance. We demonstrate the printing process and physical results to validate our method.

1 Introduction

3D printing enables manufacture of solid objects with highly complex geometry from digital files. Owing to excellent merits of ceramics such as hardness, good thermal and chemical stability, resistance to corrosion and abrasion, as well as unique appearance, 3D printing with ceramics has attracted attention across academia and industry. DIW is considered one of the most reliable and widely-used techniques among these methods. It is an extrusion-based 3D printing, dropping and depositing viscous paste layer-by-layer to build a tangible product, usually taking clay as printing material, which is cost-effective and environmentally friendly. Shell structures are surfaces with a thin layer of material without fillings inside their volumes, which have wide

applications, such as rocket engine bodies, aircraft bodies, boilers in oil and gas industries, art and craft artifacts. Extrusion-based ceramics printing is an efficient tool to fabricate shell structures because of its large extrusion. The print material, clay, as a semiliquid paste with high solid loading and viscoelastic properties, has a larger extrusion amount through the nozzle at a time, comparing to PLA or other thermoplastics materials. Thus ceramics printing of shell structures is of high efficiency in terms of material and time. Nevertheless, the fabrication of shell models with clay faces more complex problems than that of thermoplastics in FDM. They are both deformed or collapsed during fabrication. The essence behind these phenomena is the specific property of clay and DIW printing technique. Compared to thermoplastics, the freshly deposited clay of DIW does not dry instantly, indicating weak adhesion force between layers. Along with the accumulation of new layers, the balance between the torque of adhesion force and the gravity of upper layers has the risk of being broken. Furthermore, the weak adhesion force cannot resist the horizontal shear force produced by the printer head moving. Therefore, the crux factor for improving the structural integrity during extrusionbased ceramics printing is to enlarge the overlap area to increase the adhesion force between layers. Motivated by this intuition, we apply shell thickening toward the inner surface to strengthen the model in this work, without modifying the exterior surface.

The main contributions of our approach are as follows:

- We investigate the structural stability problem for shell models in extrusion-based ceramics 3D printing and explore the factors that cause instability or collapse during fabrication.
- We introduce a lightweight structural analysis solver for the given shell model based on moment equilibrium instead of volumetric mesh-like finite element methods. The structural analysis considers the gravity and adhesion force during printing and provides the real-time visualization of stability distribution.
- We propose a structural optimization algorithm based on local shell thickening that enhances the stability during fabrication and does not affect the object's exterior appearance, expanding the feasible shape space of shell structures fabricated by

extrusion-based ceramics 3D printing. The algorithm works directly on the printing file and produces the new G-code commands.

2 Shell structural analysis

During ceramics 3D printing, the gravity of upper layers deeply affects the stability of the current layer. Thus, to ensure the correctness of the structural analysis, we implement a top-down layer-by-layer detection for shell structures, only requiring to traverse the layer stack of the input once. For each layer, we detect whether it can provide sufficient support for the above layers. To simplify the analysis, we treat each layer as a whole. We find that the gravity and the vertical adhesion force between layers are two major forces that affect model's stability during printing. Therefore, when we do structural analysis for clay, the adhesion force and the gravity are two crux factors to be considered.

2.1 Torque calculation

Through experiments, we found that the models' distortion during printing is primarily caused by the rotation and separation between layers but not the fracture within the layer. Hence, we only consider the torques' equilibrium but not forces when we do shell structural analysis layer by layer. For current layer, we extract its contour(s) from G-code commands. The contours are then resampled into the line segment of length for structural analysis. In extrusion-based printing, the cross-section is a rounded rectangle after deposition. The extruded clay at each point of the contour is approximately a cuboid. We test the coefficient of viscosity denoting the adhesion force per square meter for clay. We printed several cuboids layer by layer through our ceramic's printer, then we fixed one end of the cuboid and tested the force required to pull the cuboid into two segments. We got values of dividing the force by the cross-sectional area of the disconnection position. The average of these values is the final value we used.

2.2 Weakness detection

Our structural analysis on the model is based on the torque equilibrium under the gravity and the adhesion force. Forces at different points within the same contour are

often different. To detect whether the contour is printable, we need to calculate the torque of each point of it.

We treat all cuboids within the same contour as a whole. Therefore, if the overhang gravity torque of current contour and its upper contours is greater than the adhesion torque between current contour and its under contour, the current contour will rotate around the rotation axis, which is precisely the unstable circumstance.

Our strategy is to traverse the layer stack from top to bottom. If the current contour is stable during fabrication and we continue traversing the next contour. Otherwise, the width of current contour should be optimized.

3 Shell structural optimization

According to the structural analysis result described above, we utilize shell thickening to optimize the weak contour. The basic strategy of our optimization is to enlarge the overlap area to increase the adhesion torque between layers until it is able to resist the gravity torque. Local thickening fails when the model needs exterior support structures.

3.1 Overall pipeline

Given a print file (G-code) that implied a target shell shape, we provide a lightweight framework to analyze and optimize the printability on G-code level under the constraint to keep the exterior surface unchanged. Suppose we apply the optimization from the bottom layer. In that case, the upper layers' shell thickening will change the gravity applied on its under layers, making them unstable and induce a preoptimization from the bottom. Thus, we perform a top-down procedural analysis and optimization scheme, which only traverses the input layer stack once. In the first step, we use the analyzer mentioned above to test the stability of the current layer. To simplify the force analysis, we ignore the in-layer bonds and consider the layer as a whole only accounting for the gravity and the adhesion force it subjects to. We calculate the torque of gravity and adhesion force of the current layer in a discretized manner.

By examining the two torques, we could know the stability of the current layer. Then if the current layer is unstable, we perform a local thickening method to do

structural optimization. The basic strategy of optimization is to enlarge the overlap area to increase the adhesion force torque until it is able to resist gravity torque. To avoid modifying the shell's exterior surface, only thickening toward the interior surface is allowed. After that, move to the next layer and perform the same operations until the bottom layer. If the local thickening operation makes the current layer fully solid while the balance condition is still unsatisfied, we report the model is unfabricatable. Finally, suppose all the layers have been traversed, and there is no unfabricatable layer. In that case, we rebuild the print path and fabricate the physical model by extrusion-based ceramics printing.

3.2 Thicken width calculation

To keep the exterior surface unchanged, the model is only allowed to thicken toward the inner surface. We repeat this process until the current contour is stable. While if the under contour is thicker toward the inner surface, we thicken the current contour to increase the adhesion torque until it is stable. Then the following process is similar to the left. We note that if the contour to be thickened is enlarged to a full solid while the current contour is still unstable, the model cannot be optimized by our scheme.

3.3 Print path generation

After the thickening width of the current contour is calculated, we compute its divided loop width through enumeration and check whether there is an overhanging block. If the blocks overhang toward the inner surface, we thicken the under contour to the middle of the innermost overhang block; then, we start optimizing this contour's width. If the blocks overhang toward the outer surface, this model needs exterior support and cannot be optimized by our method. To ensure the exterior surface's quality, we print the divided loops for each contour from inner to outer so that the inner loop's print will not affect the outer one.

附录 3 文献中文译文

陶瓷 3D 打印的薄壳加厚

星宇, 周宇, 闫鑫, 赵海森, 刘文强, 姜静波, 吕琳*

摘要

近年来, 使用陶瓷材料进行增材制造受到越来越多的关注, 因为像粘土这样的陶瓷材料具有独特的优点, 其中包括硬度、热稳定性和化学稳定性等。然而, 打印过程中陶泥是非牛顿流体, 这给计算方面带来了新的挑战。打印过程中, 打印材料不会立即干燥, 并且在新层的累积力破坏力矩平衡时可能会塌陷, 尤其是当相邻层的重叠区域较少时。我们解决了这个问题。本文重点关注陶瓷打印中的壳状模型。我们提出了一种结构分析算法, 该算法考虑了制造过程中每一层的力矩平衡。我们还提出了一个计算框架, 通过在不影响外观的情况下局部加厚壳状模型来增强结构稳定性。我们展示了打印过程和物理实验结果来验证我们的方法。

1 引言

3D 打印可以从数字文件中制造具有高度复杂几何形状的实体物体。由于陶瓷具有硬度高、热稳定性和化学稳定性好、耐腐蚀和耐磨以及独特的外观等优异优点, 陶瓷 3D 打印引起了学术界和工业界的广泛关注。墨水直写 (DIW) 被认为是所有的打印方法之中最可靠和最广泛使用的技术之一。它是一种基于挤压的 3D 打印方法, 将粘性浆料逐层滴落沉积, 形成有形的产品。陶瓷 3D 打印通常以粘土为打印材料, 既经济又环保。

壳结构是具有薄层材料的表面, 其体积内没有填充物, 具有广泛的应用, 例如火箭发动机机身、飞机机身、石油和天然气工业中的锅炉、艺术和工艺制品。

基于挤压的陶瓷印刷是一种制造外壳结构的有效工具, 因为它的挤压量很大。与 PLA 或其他热塑性塑料材料相比, 打印材料粘土作为一种非粘性流体, 具有独特的物理性质, 一次通过喷嘴的挤出量更大。因此, 壳结构的陶瓷 3D 打印在材料和时间方面具有很高的效率。然而, 与 FDM 打印中的热塑性塑料相比, 用粘土制作壳模型面临着更复杂的问题。它们在制造过程中都会变形或塌陷。这些现象背后的本质是粘土和 DIW 3D 打印技术的特殊性质。与热塑性塑料相比, DIW

新沉积的粘土不会立即干燥，表明层之间的粘附力较弱。随着新层的堆积，附着力扭矩与上层重力的平衡有被打破的风险。此外，较弱的附着力无法抵抗打印头移动产生的水平剪切力。因此，提高挤压陶瓷印刷过程中结构完整性的关键因素是扩大重叠面积以增加层间的粘附力。受这种直觉的启发，我们在不修改外表面的情况下，对内表面应用壳增厚来加强模型。

我们的方法的主要贡献如下：

- 我们研究了基于 DIW 的陶瓷 3D 打印中薄壳模型的结构稳定性问题，并探讨了在制造过程中导致不稳定或塌陷的原因。
- 我们没有使用有限元的分析方法，而是为给定的薄壳模型引入了基于力矩平衡的轻量级结构分析求解器。结构分析考虑了打印过程中的重力和层间附着力，并提供了稳定性分布的实时可视化。
- 我们提出了一种基于局部壳增厚的结构优化算法，提高了制造过程中的稳定性，并且不影响物体的外观，扩大了基于 DIW 陶瓷 3D 打印制造的壳结构的可行的形状空间。该算法直接作用于打印文件并产生新的 G-code 命令文件。

2 薄壳结构分析

在陶瓷 3D 打印过程中，上层的重力严重影响当前层的稳定性。因此，为了保证结构分析的正确性，我们对壳结构进行了自上而下的逐层检测，只需要遍历输入的层堆栈一次，即可获得当前模型的稳定情况。对于每一层，我们检测它是否可以为上述层提供足够的支持。为了简化分析过程，我们将每一层视为一个整体。我们发现重力和垂直的层间附着力是影响打印过程中模型稳定性的两个主要影响力。因此，在对陶泥进行结构分析时，层间附着力和重力是需要考虑的两个关键因素。

2.1 力矩计算

通过实验，我们发现模型在打印过程中的变形主要是由于层间的旋转和分离造成的，而不是由于层内的断裂。因此，我们在逐层进行壳结构分析时只考虑力矩平衡而不考虑力。对于当前层，我们从 G-code 命令中提取其轮廓。然后将轮廓重新采样到设定的长度线段以进行结构分析。在基于 DIW 的 3D 打印中，横截面在沉积后是一个圆角矩形。同一层内，等高线各点的挤压粘土近似长方体。我们测试了粘度系数，表示粘土每平方米的单位层间附着力。我们通过陶瓷打印机

逐层打印了几个长方体，然后我们固定了长方体的一端并测试了将长方体拉成两段所需的力。我们得到了力除以断开位置的横截面积的值。这些值的平均值是我们使用的最终值。

2.2 薄弱区域检测

我们对模型的结构分析是基于重力和层间附着力下的力矩平衡。同一轮廓内不同点的力矩通常不同。为了检测轮廓是否可打印，我们需要计算它的每个点的力矩。

我们将同一轮廓内的所有长方体视为一个整体。因此，如果当前轮廓与其上轮廓的悬垂重力力矩大于当前轮廓与其下轮廓之间的附着力矩，则当前轮廓将围绕旋转轴旋转，这正是不稳定的情况。

我们的策略是从上到下遍历层堆栈。如果当前轮廓在制造过程中稳定，我们继续遍历下一个轮廓。否则，应优化当前轮廓的宽度。

3 薄壳结构优化

根据上述结构分析结果，我们利用壳加厚来优化弱轮廓。我们优化的基本策略是扩大重叠区域以增加层间附着力的力矩，直到它能够抵抗重力扭矩。当模型需要外部支撑结构时，局部加厚失败。

3.1 整体流程

给定一个隐含目标外壳形状的打印文件（G-code 文件），我们提供了一个轻量级框架来分析和优化 G-code 级别的可打印性，以保持外表面不变。假设我们从底层应用优化。在这种情况下，上层的壳增厚将改变施加在其下层上的重力，使其不稳定并从底部引发预优化。因此，我们执行自上而下的过程分析和优化方案，它只遍历输入层堆栈一次。第一步，我们使用上面提到的分析器来测试当前层的稳定性。为了简化力分析，我们忽略了层内的内力，并将一层视为一个整体，仅考虑重力和它所承受的粘附力。我们以离散的方式计算当前层的重力扭矩和层间附着力。

通过检查这两个力矩，我们可以知道当前层的稳定性。然后如果当前层不稳定，我们执行局部加厚的方法来做结构优化。优化的基本策略是扩大重叠面积以增加层间附着力力矩，直到能够抵抗重力扭矩。为避免修改外壳的外表面，只允

许向内表面加厚。之后，移动到下一层并执行相同的操作，直到最底层。如果局部加厚操作使当前层完全填充，而平衡条件仍未满足，我们判定该模型无法制造。最后，假设所有的层都被遍历过了，并且没有不可制造的层。在这种情况下，我们重建打印路径并通过基于 DIW 陶瓷 3D 打印机制造物理模型。

3.2 加厚宽度计算

为了保持外表面不变，模型只允许向内表面变厚。我们重复这个过程，直到当前轮廓稳定。而如果下轮廓向内表面更厚，我们会加厚当前轮廓以增加层间附着力矩，直到它稳定为止。我们注意到，如果要加厚的轮廓被扩大到一个完整的实体，而当前的轮廓仍然不稳定，则我们的方案无法优化模型。

3.3 打印路径生成

在计算出当前轮廓的加粗宽度后，我们通过枚举计算其分割的环宽，并检查是否有悬垂块。如果块向内表面突出，我们将下轮廓加厚到最里面的轮廓的中间；然后，我们开始优化这个轮廓的宽度。如果块向外悬垂，则该模型需要外部支撑，无法通过我们的方法进行优化。为了确保外表面的质量，我们从内到外打印每个轮廓的分割循环，这样内循环的打印不会影响到外循环，保证外观不变。