



LineUp:一种基于链式结构的物理变形方法

报告人：余旻婧

目录

□ 研究背景

□ 研究内容

- 基于分层的路径寻找算法
- 多模型间路径对齐方法
- 基于能量函数的梯度流多边形展开算法

□ 实验结果

□ 物理实现

□ 未来展望

研究背景

- 三维可变形模型在诸多产业都有着丰富的应用场景
 - 数字内容产业：影视游戏特效



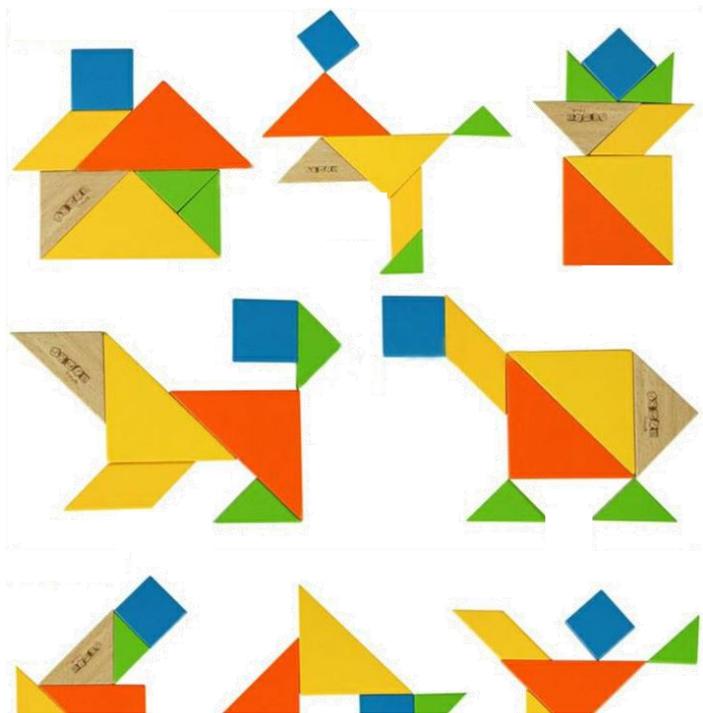
《变形金刚》电影中擎天柱变形



《超能陆战队》中的微型机器人变形

研究背景

- 三维可变形模型在诸多产业都有着丰富的应用场景
 - 教育产业：帮助提高儿童创造力、协调能力



七巧板



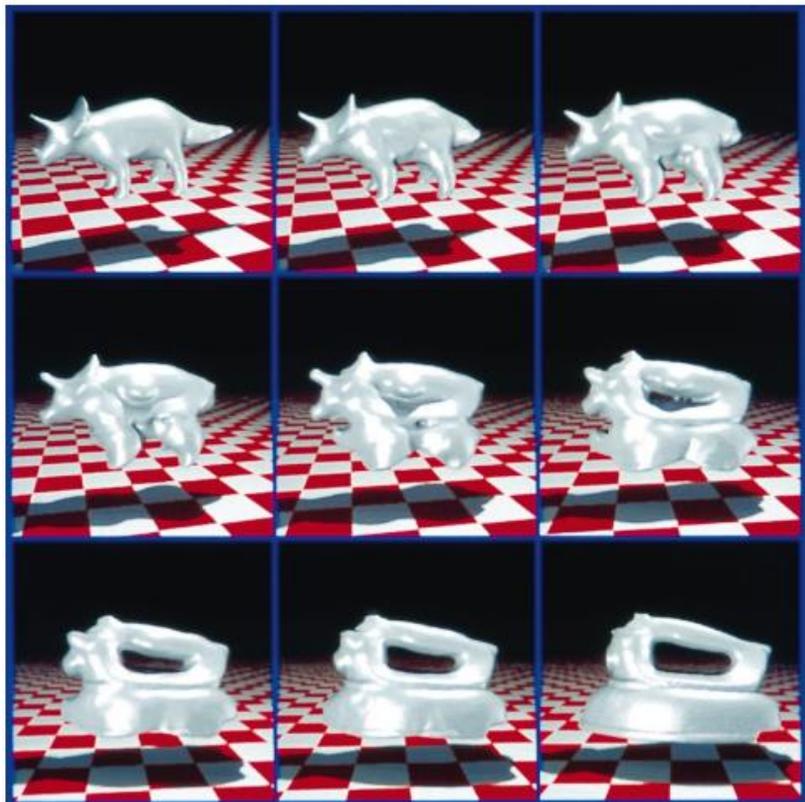
魔尺



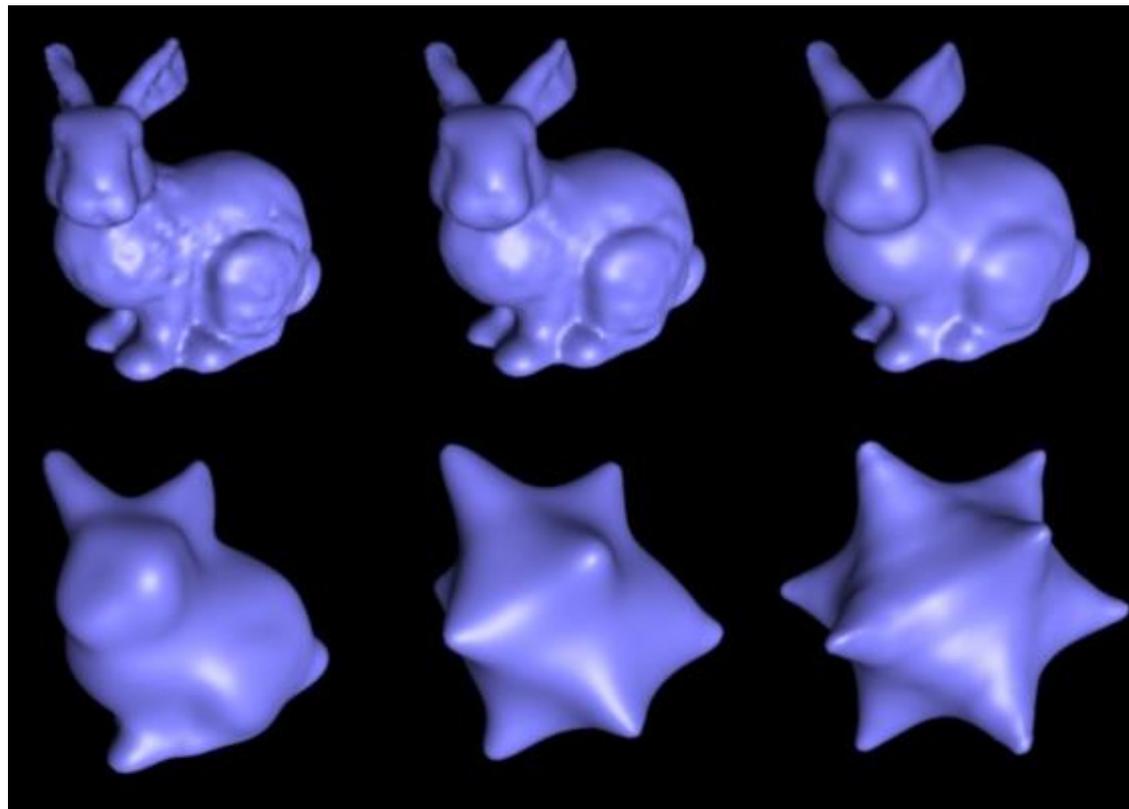
乐高积木

研究背景

- 计算机图形学领域中针对三维模型变形方法的研究较多，但其中大多数算法仅仅面向三维数字模型，并未考虑物理实现，无法直接应用于生产



Cohen-Or D, Solomovic A, Levin D. Three-dimensional distance field metamorphosis[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1998, 17(2): 116-141.

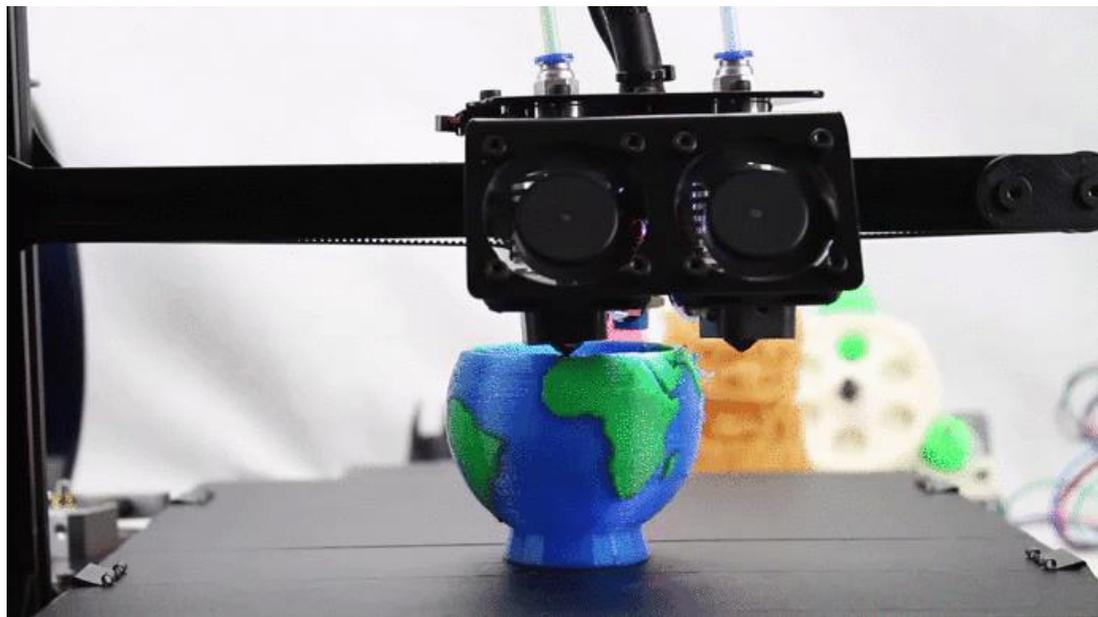


Turk G, O'brien J F. Shape transformation using variational implicit functions[C]//ACM SIGGRAPH 2005 Courses. ACM, 2005: 13.

研究背景

□ 3D 打印

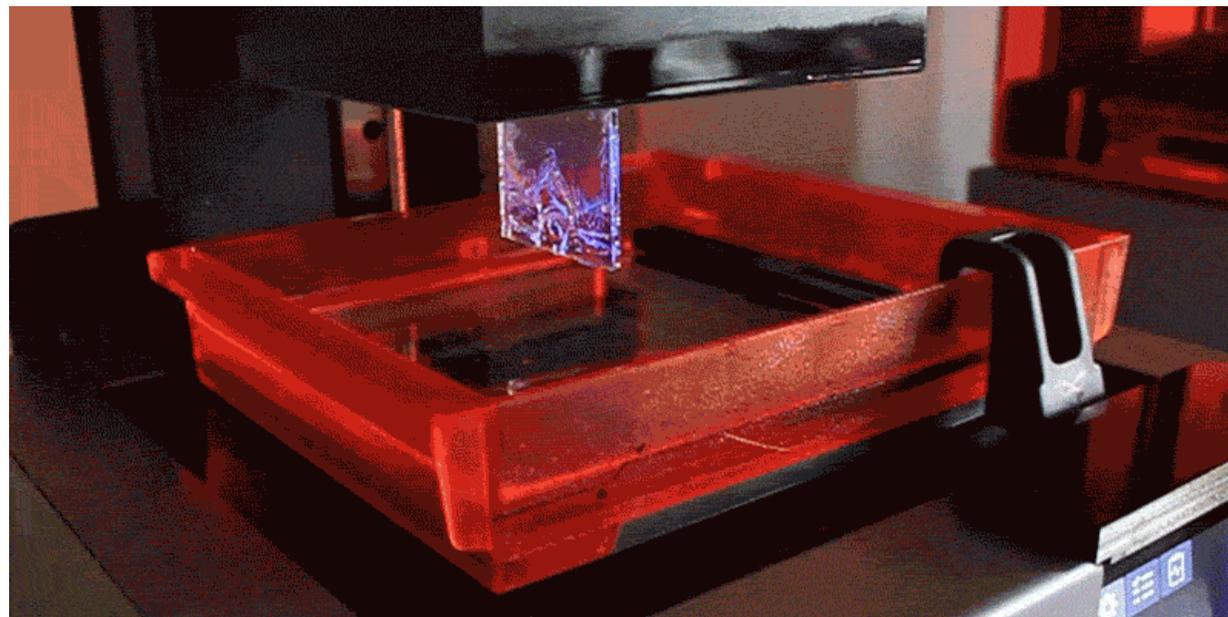
- 又称增材制造，以三维模型数据为基础，利用打印头、喷嘴或其他打印技术，通过材料堆积的方式来制造零件或实物的工艺



熔融沉积快速成型 (FDM)

图片来源于

<https://giphy.com/gifs/3d-printing-R3H7UiNMdykYE>



光固化成型 (SLA)

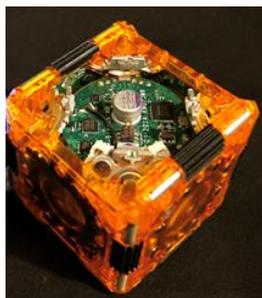
图片来源于

<https://i.gifer.com/QJUbgif>

研究背景

□ 模块化机器人

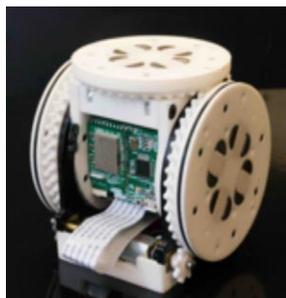
- 根据环境和任务的不同自适应的改变自身构型
- 每个模块都可视为一个独立的机器人单元，具有驱动器、连接器、计算与通信元件、传感器和电源等，通过连接器的断开连接，对模块进行重新组合，实现构型变换



M-Blocks
MIT



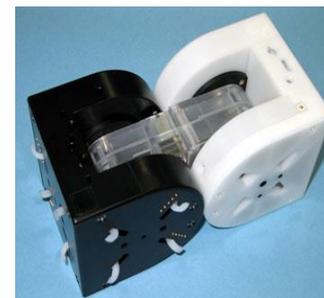
ATRON
USD



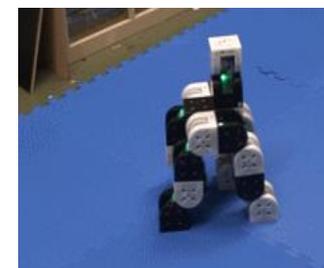
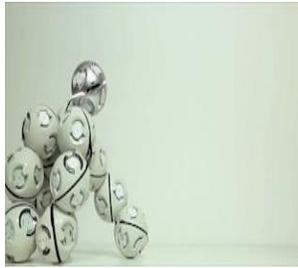
SMORES
UPenn



CellRobot
Keyi

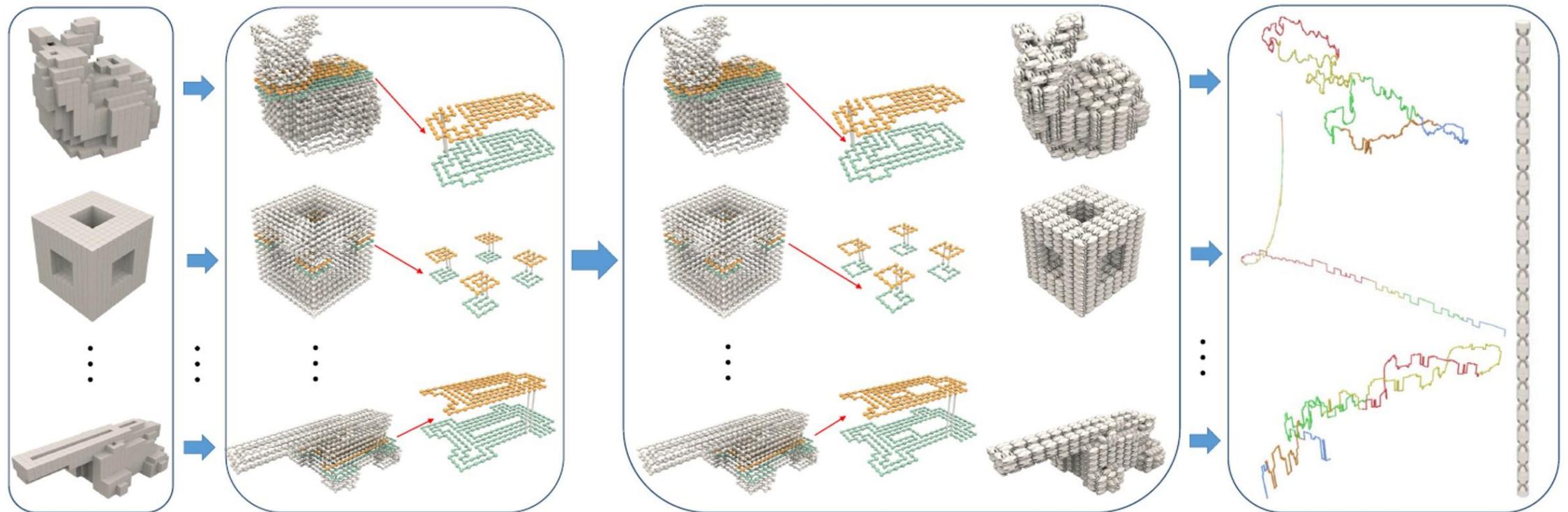


M-TRAN III
AIST



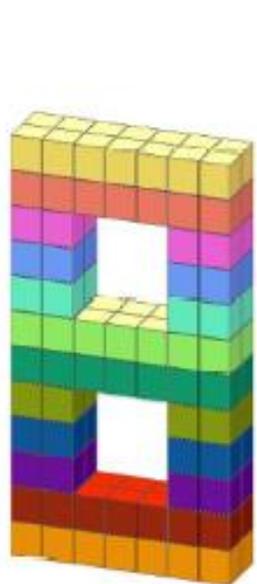
研究内容

- 物理可实现的任意三维模型间变形方法
- 主要分为三个部分：基于分层的路径寻找算法、多模型间路径对齐方法、基于能量函数的梯度流多边形展开算法

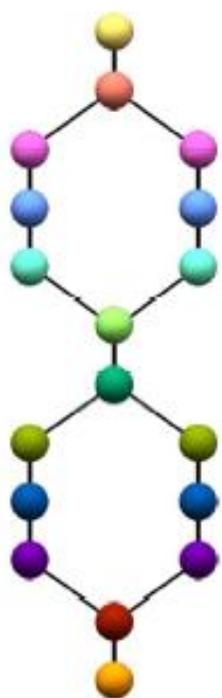


研究内容

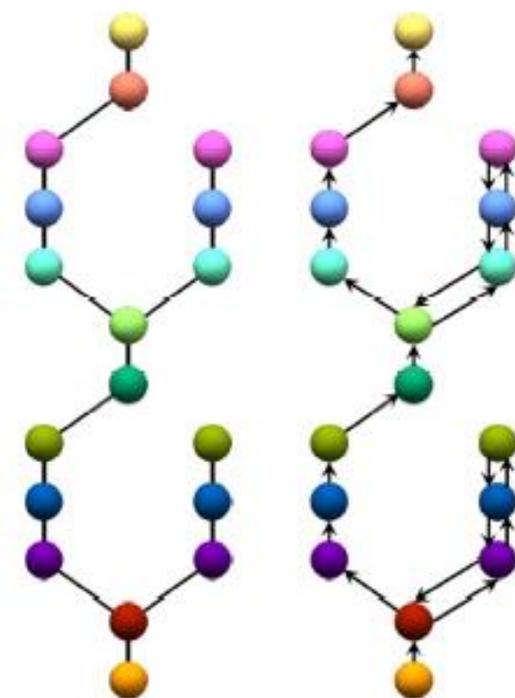
基于分层的路径寻找算法



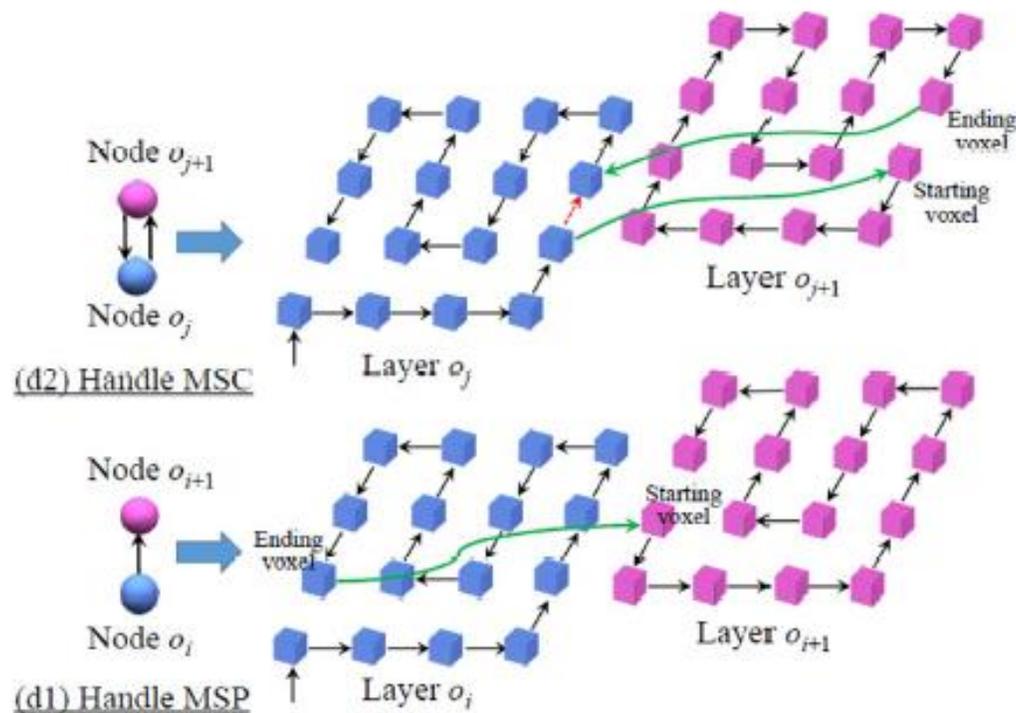
(a) 三维模型



(b) Reeb图



(c) 生成树及其遍历路径

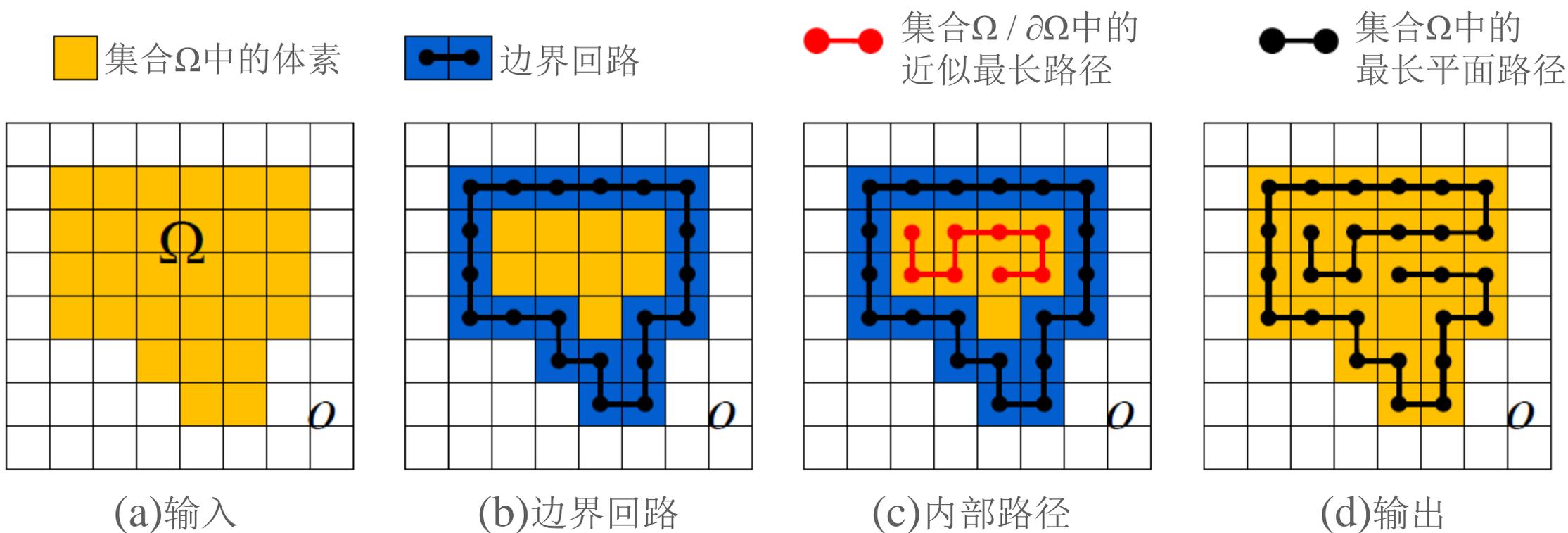


(d) 两种类型的层间路径合并操作

研究内容

基于分层的路径寻找算法

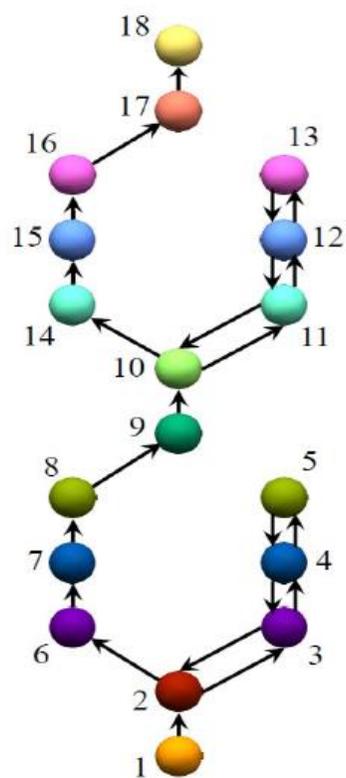
每层近似最长路径求解



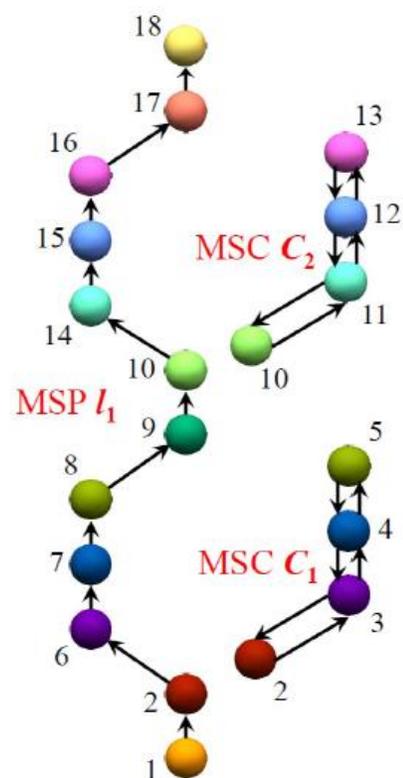
研究内容

基于分层的路径寻找算法

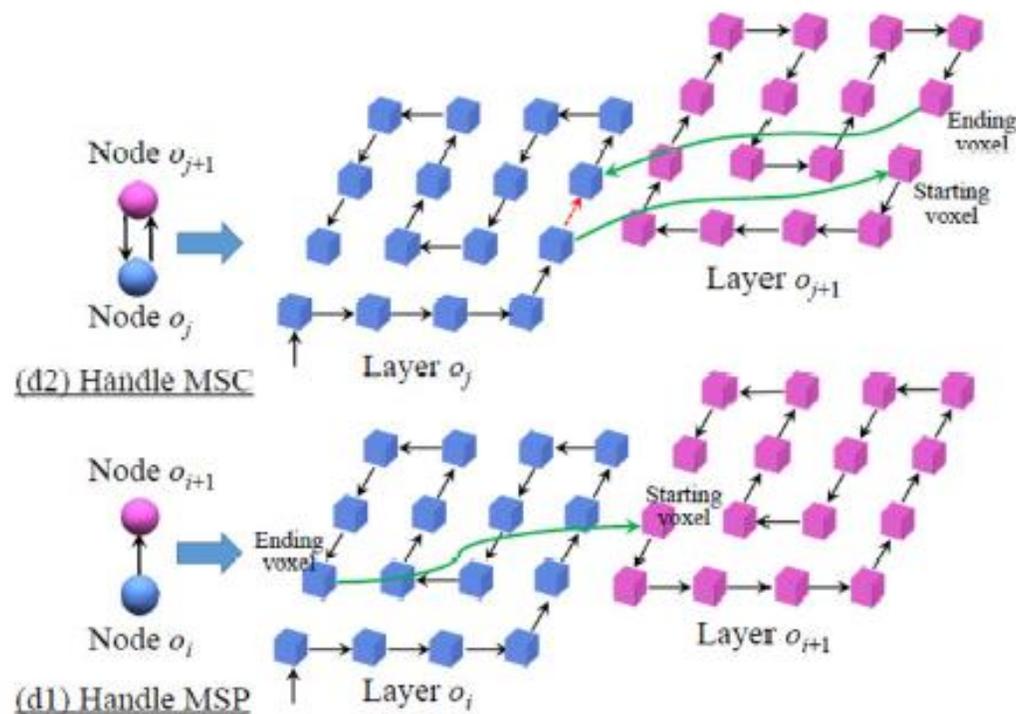
层间路径合并方法



(a) Reeb 图 \mathcal{G} 的一条遍历路径 $p(\mathcal{G})$



(b) 将 $p(\mathcal{G})$ 分解为两条最长子回路 C_1, C_2 和一条最长子路径 l_1



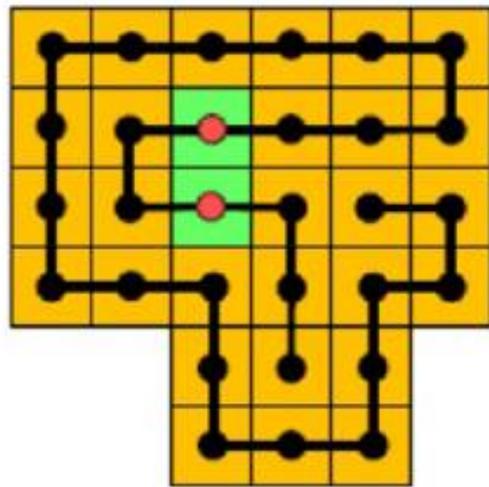
研究内容

□ 多模型间路径对齐方法

- 由于不同的模型路径的长度往往并不相同，需要进行对齐
- ◆ 去除较长路径中的部分体素直至其与较短路径长度相同
- ◆ 去除模型内部的部分模块，避免影响模型外形

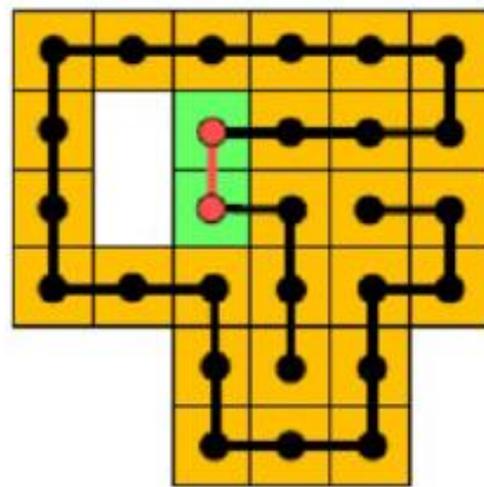


收缩对



(a)收缩前

收缩后路径



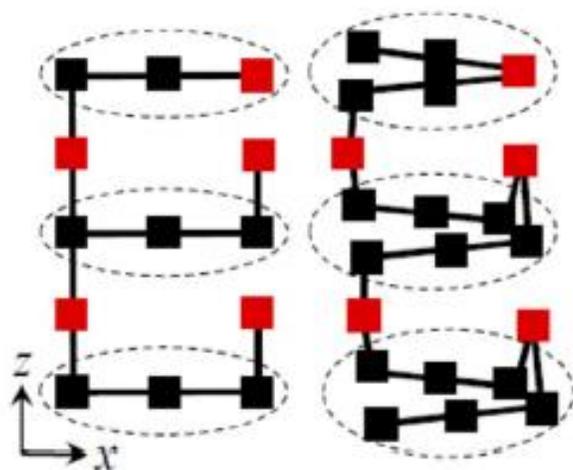
(b)收缩后

研究内容

基于能量函数的梯度流多边形展开算法

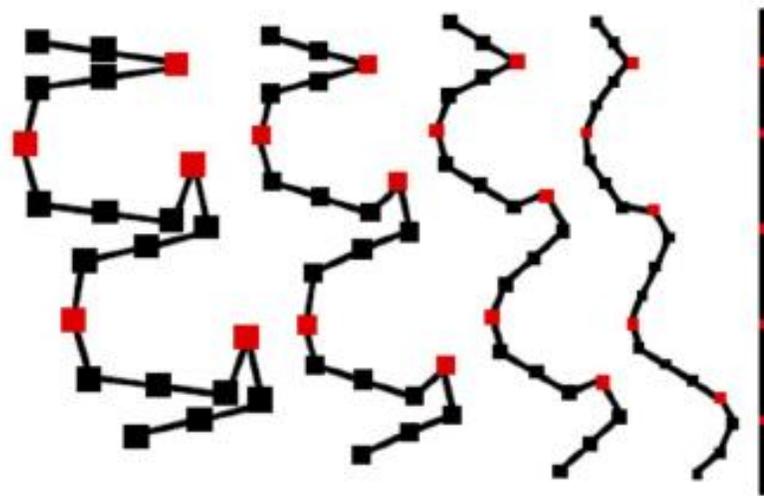


(a) 三维路径 P

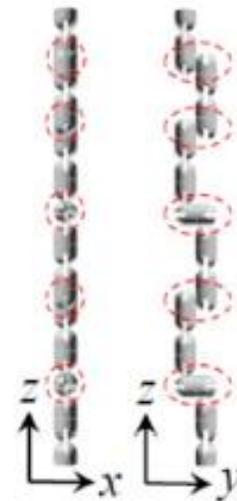


(b) 二维路径

$$P_{xz} = \Pi_{(x,z)}(P)$$



(c) xz 平面上 P_{xz} 的无碰撞展开过程



(d) $\Pi_{(x,z)}^{-1}(P_{xz})$

实验结果

模型名	体素化过程		生成 \tilde{P}		生成 P		路径展开	
	体素数	时间	体素数	时间	体素数	时间	时间/每步	总步数
兔子	1643	0.19s	1536	1.40s		0.03s	0.72s	240K
高亏格立方体	1868	0.43s	1504	0.68s		0.03s	0.12s	240K
加农炮	2105	0.59s	1508	0.74s	1508	0.04s	0.15s	240K
双环	1520	0.42s	1512	0.38s		0.06s	0.09s	80K
鸭子	1586	0.40s	1484	0.70s		0.02s	0.36s	240K
狢狢	5280	0.48s	5898	11.86s		0.12s	1.80s	70K
恐龙	6522	0.34s	5966	11.50s		0.14s	1.10s	150K
飞机	7088	0.99s	6482	27.47s	5890	0.19s	0.9s	180K
大象	6478	0.55s	5892	11.94s		0.01s	1.32s	180K
麋鹿	6425	0.42s	5890	20.24s		0.13s	2.04s	180K

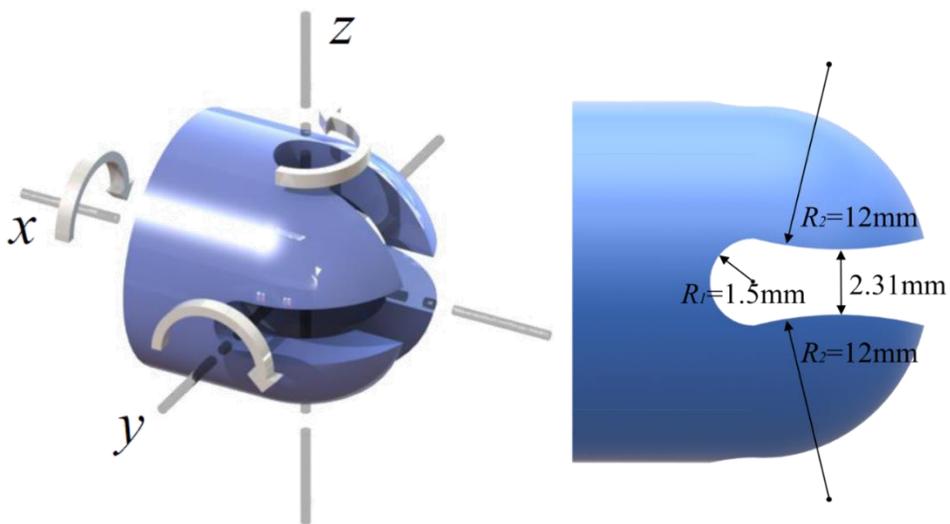
物理实现

- 3D 打印基本单元的设计
- 设计原则
 - 自由度大
 - 强度大
 - 便于打印
 - 体积小

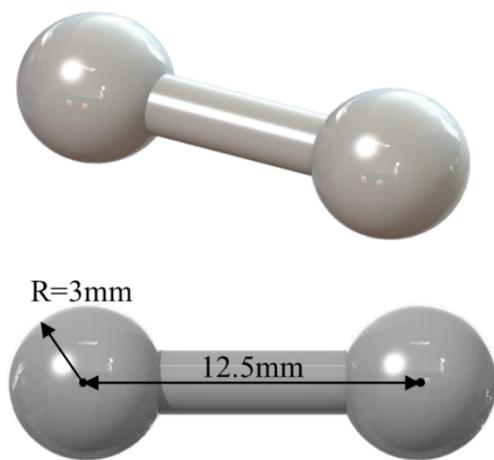
物理实现

□ 3D 打印基本单元的设计

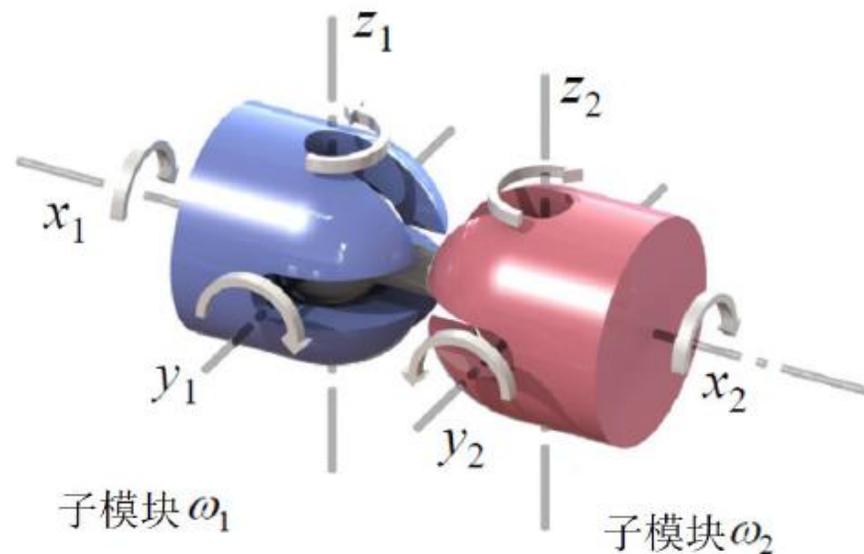
- 一个子模块代表模型中的一个体素
- 模块表面覆盖了尼龙魔术贴，在必要位置也会使用热熔胶进一步固定
- 每个单元呈双子模块类型，两个子模块间由连接件相连
 - 子模块：一端带有两两相对的四个凹槽的半球的半圆柱体型
 - 连接件：两端呈球体的圆柱体



子模块旋转轴示意图及尺寸图



连接件示意图及尺寸图



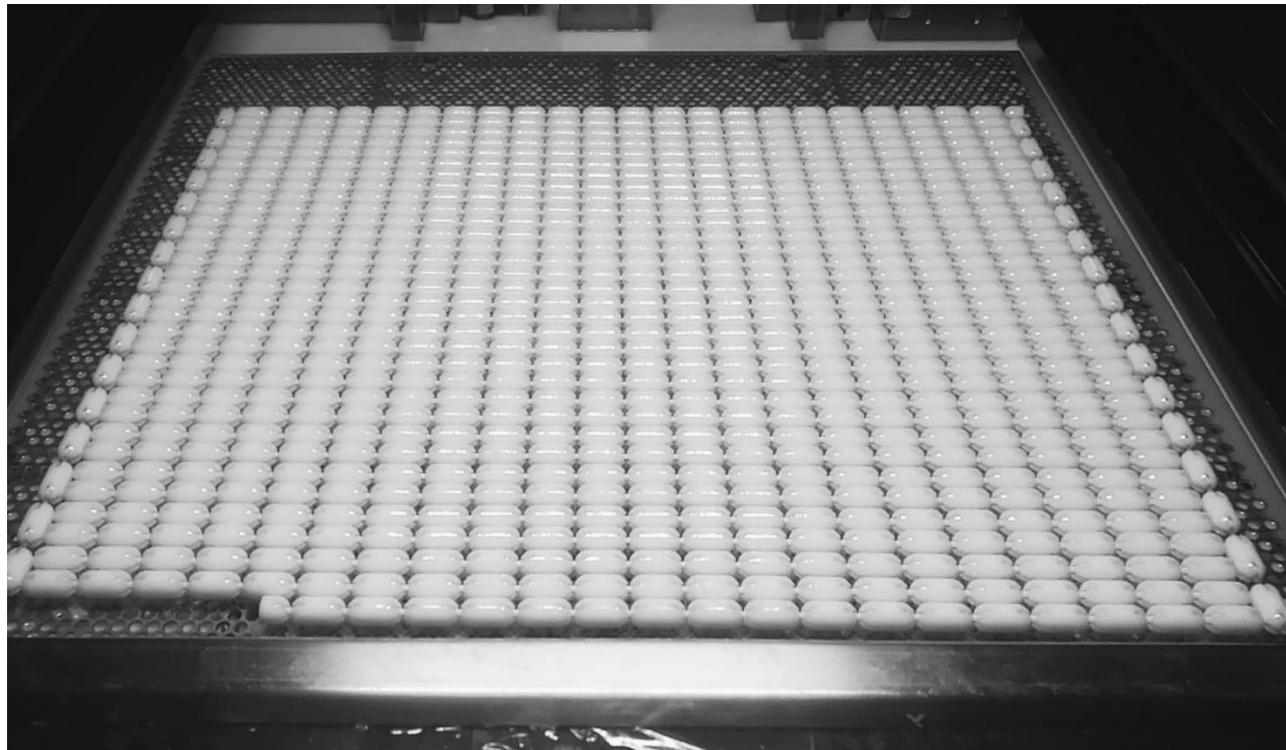
单个打印单元示意图

物理实现

□ 实验验证与力学分析

◆ 3D打印链

- 打印机型号为iSLA-650 Pro, 打印材料为UV9400 光敏树脂
- 包含754 个基本单元



3D 打印链

物理实现

□ 实验验证与力学分析

◆ 应力测试

模块组成的三维模型，结构强度取决于单位模块所能承受的最大应力，包括法向压应力、法向拉应力与临界屈曲应力。

法向压应力

- 外界施力挤压模型，使模型有压缩趋势的力
- 取决于打印材料本身的物理特性，实验中光敏树脂的抗压强度为28-56MPa.

物理实现

□ 实验验证与力学分析

◆ 应力测试

模块组成的三维模型，结构强度取决于单位模块所能承受的最大应力，包括法向压应力、法向拉应力与临界屈曲应力。

法向拉应力

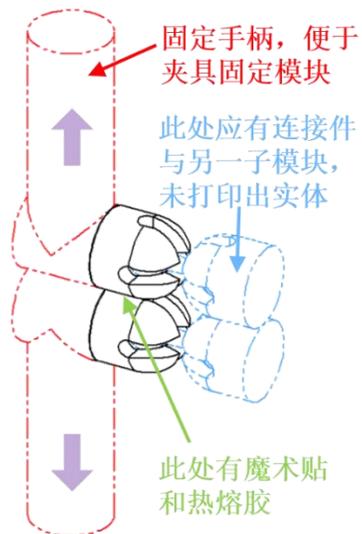
- 外界施力牵拉模型，使模型有拉伸趋势的力
- 取决于模块间热熔胶与魔术贴的粘性大小



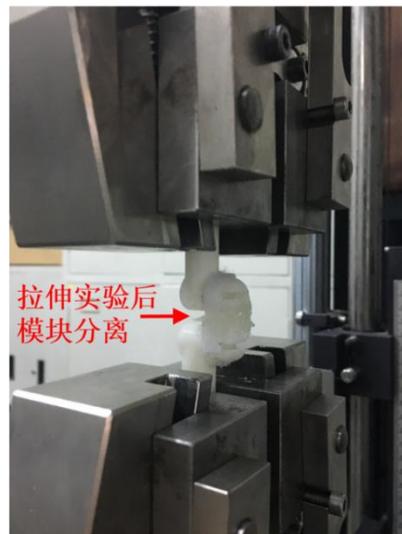
(a) 实验整体图



(b) 实验前模块实物图



(c) 实验模块线框图



(d) 实验后模块实物图

模块承受的最大拉应力为206.7KPa

物理实现

□ 实验验证与力学分析

◆ 应力测试

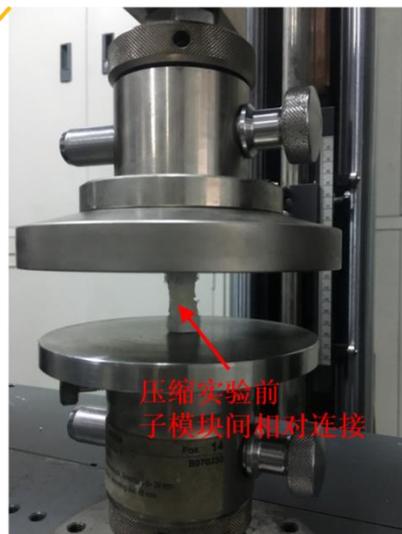
模块组成的三维模型，结构强度取决于单位模块所能承受的最大应力，包括法向压应力、法向拉应力与临界屈曲应力。

临界屈曲应力

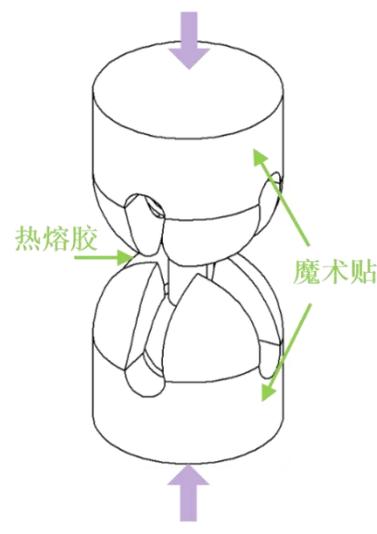
- 模块受到压力时可能发生屈曲形变，即连接件突然发生侧向偏转
- 取决于连接件在凹槽中运动的阻力与热熔胶的黏着力



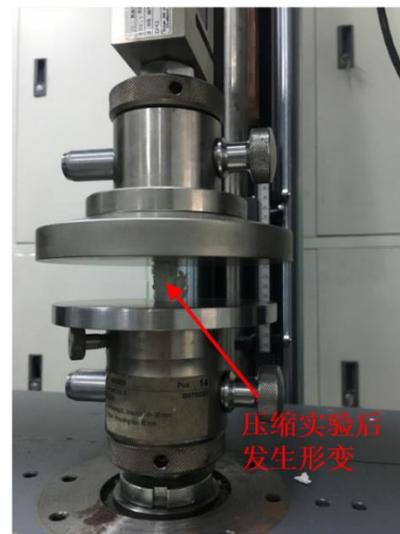
(a) 实验整体图



(b) 实验前模块实物图



(c) 实验模块线框图



(d) 实验后模块实物图

模块承受的临界屈曲应力为2892KPa

物理实现

□ 实验验证与力学分析

◆ 有限元分析

- 将连续的求解区域离散为一组有限个相互联结在一起的单元的组合体
- 通过求解每个单元内的近似函数，进一步推导得到整个求解区域的近似解
- 广泛应用于固体力学、流体力学等连续性问题的工程分析上

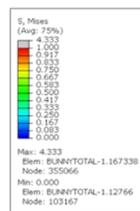
物理实现

实验验证与力学分析

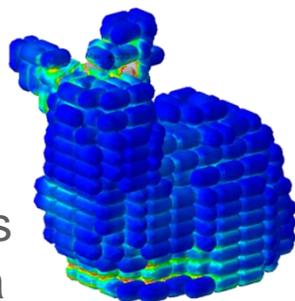
◆ 有限元分析

□ 使用有限元分析软件ABAQUS (6.12 版) 施加重力

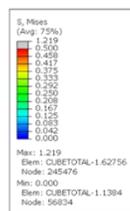
□ 蓝色表示此处所受应力最小，灰色表示所受应力最大



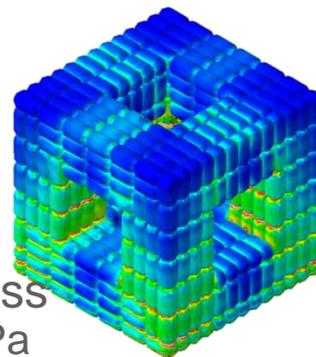
Max stress
4.333 KPa



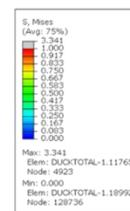
(a)兔子



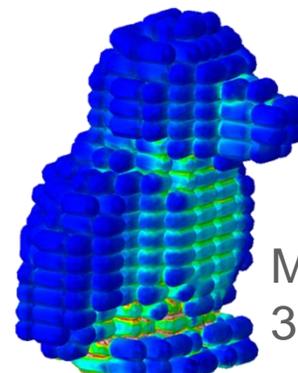
Max stress
1.129 KPa



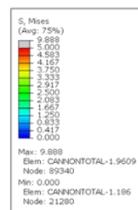
(b)高亏格立方体



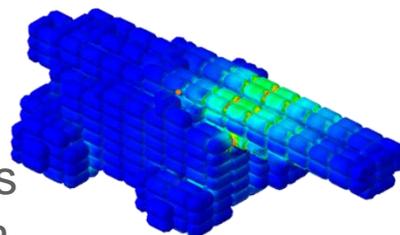
Max stress
3.314 KPa



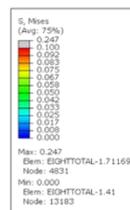
(c)鸭子



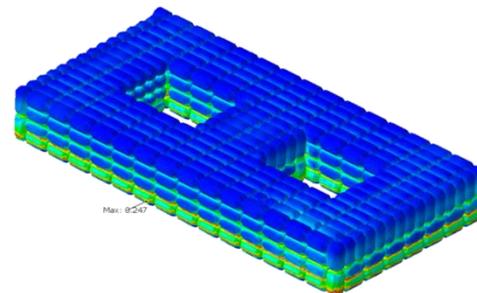
Max stress
9.888 KPa



(d)加农炮

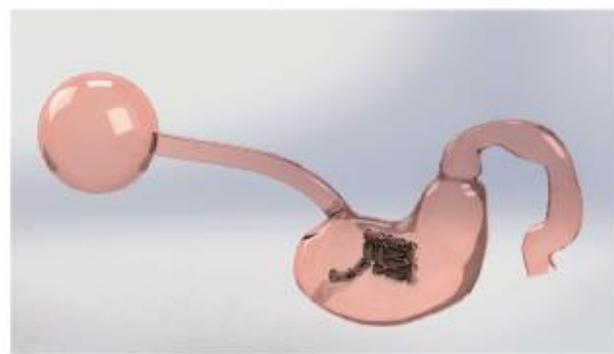
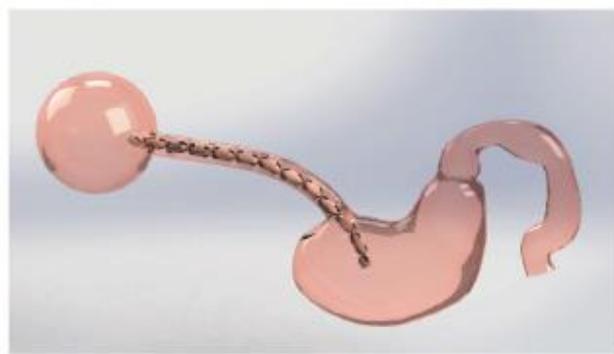
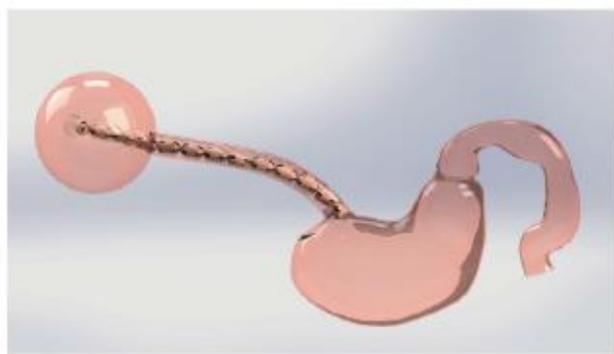
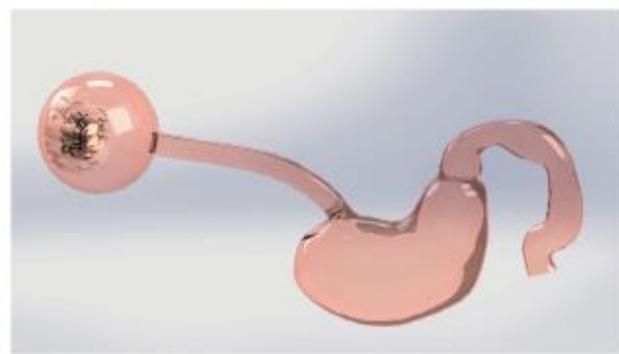


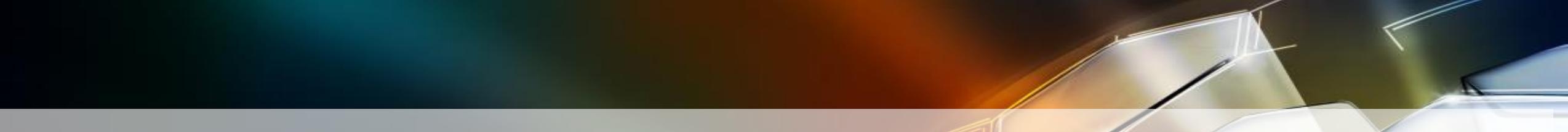
Max stress
0.247 KPa



(e)双环

未来展望





谢谢！