

1-15-2021

Local Deformation Method for Soft Cylindrical Model

Hongqian Chen

1. *Beijing Technology and Business University, Beijing 00048, China; ;*

Fang Yi

1. *Beijing Technology and Business University, Beijing 00048, China; ;*

Qianyu Yang

1. *Beijing Technology and Business University, Beijing 00048, China; ;*

Fengxia Li

2. *Beijing Laboratory of Intelligent Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Local Deformation Method for Soft Cylindrical Model

Abstract

Abstract: To simulate the bending effect for the soft cylindrical objects in realtime, *a deformation method was proposed that could achieve the detail-preservation and surface area-preservation*. The method obtained the shape properties such as the bottom and the height from the original cylindrical model. The base model consisted of the regular mesh was built according to the shape properties. The detail model could be obtained by the radius function of separating from the base model. The uniform deformation algorithm for the base model was adopted to decrease the complexity of the processing. *The damping oscillation curve was employed to simulate the gofferes indwelling in the inner warping side of the soft cylindrical model*. The surface area-preservation could be achieved due to the gofferes. The method has been proved feasible and valid to simulate the bending deformation for 3D soft object by the experiments. It can deform the model containing thousands of vertices in 30 FPS.

Keywords

model deformation, bending goffer, detail-preservation, surface area-preservation

Authors

Hongqian Chen, Fang Yi, Qianyu Yang, Fengxia Li, and Chen Yi

Recommended Citation

Chen Hongqian, Fang Yi, Yang Qianyu, Li Fengxia, Chen Yi. Local Deformation Method for Soft Cylindrical Model[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1255-1261.

一种柔软柱状模型的弯曲变形方法

陈红倩¹, 方艺¹, 杨倩玉¹, 李凤霞², 陈谊¹

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 北京理工大学智能信息技术北京市重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对柔软柱状物体模型的弯曲变形, 提出了一种能够实现细节保持与表面积保持的弯曲变形方法。该方法将柱状模型以及近似柱状模型提取其底面积、高度、弯曲形状等形状属性; 建立柱体规则网格作为基础模型, 通过径向计算获取细节模型, 通过细节模型分离降低模型变形计算复杂度; 使用阻尼曲线模拟柔软柱状物体弯曲内侧表面皱褶并实现表面积保持; 最终通过细节模型合并, 实现细节保持的弯曲变形。实验证明, 本方法能够有效仿真柔软柱状物体模型的弯曲变形, 并仿真物体表面皱褶特征, 对于 10,000 顶点内的 3D 模型, 可达到 30FPS 的变形渲染帧速率。

关键词: 模型变形; 弯曲皱褶; 细节保持; 表面积保持

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 06-1255-07

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.06.015

Local Deformation Method for Soft Cylindrical Model

Chen Hongqian¹, Fang Yi¹, Yang Qianyu¹, Li Fengxia², Chen Yi¹

(1. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Laboratory of Intelligent Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To simulate the bending effect for the soft cylindrical objects in real-time, a deformation method was proposed that could achieve the detail-preservation and surface area-preservation. The method obtained the shape properties such as the bottom and the height from the original cylindrical model. The base model consisted of the regular mesh was built according to the shape properties. The detail model could be obtained by the radius function of separating from the base model. The uniform deformation algorithm for the base model was adopted to decrease the complexity of the processing. The damping oscillation curve was employed to simulate the gofferes indwelling in the inner warping side of the soft cylindrical model. The surface area-preservation could be achieved due to the gofferes. The method has been proved feasible and valid to simulate the bending deformation for 3D soft object by the experiments. It can deform the model containing thousands of vertices in 30 FPS.

Keywords: model deformation; bending goffer; detail-preservation; surface area-preservation

引言

柔软物体模型的变形是计算机仿真技术中的重要仿真的内容之一, 柔软物体的变形仿真已经广

泛应用于角色动画、交互建模和医疗手术等领域中。随着计算机仿真技术的发展, 模型变形结果的真实也越来越要求增高。对于 1 个能优秀的变形算法来说, 通常需要实现 3 个主要的内容: 首先, 变形操作的操作过程较为简单; 其次, 变形计算的复杂度能够在可接受范围内, 最好是在实时范围内; 最后是变形算法的结果合理, 并能够较为逼真。为了达到这 3 个目标, 研究人员进行了大量工作。



收稿日期: 2014-05-31 修回日期: 2014-07-11;
基金项目: 十二五国家科技支撑计划项目 (2012BAD29B01-2); 北京市自然科学基金 (4154066); 北京市教委科技计划面上项目 (PXM2014_014213_000004);
作者简介: 陈红倩 (1982-), 男, 山东人, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟现实与可视分析; 李凤霞 (1953-), 女, 山西人, 教授, 研究方向为虚拟现实与视景仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1255 •

柔软物体在真实世界中是一类较为常见的变形对象,比如动物肌肉、橡胶物品以及布艺玩具等,而柔软柱状物体或者类柱状物体,也是柔软物体中最为常见的类型。柔软柱状物体在变形过程中的一个显著特征是,变形物体的表面可拉伸性较低,但在变形过程中会出现较高的可挤压性。基于这种原因,柔软柱状模型在弯曲变形过程中,弯曲方向外侧的部分会使得模型保持长度不变,从而使得弯曲方向内侧出现皱褶,从而应对模型外壳部分所受的挤压作用。经过研究表明,挤压过程出现的皱褶可以使得模型的外表面总面积在变形时保持不变。

本文针对柔软柱状物体或近似柱状物体模型的弯曲变形仿真,提出了一种能够实现细节保持与表面积保持的弯曲变形方法。该方法首先针对柱状物体或近似柱状物体模型获取其底面积、高度等形状属性;然后根据这些形状属性建立圆柱体规则网格作为基础模型;然后根据基础模型与原模型进行径向求差运算进行细节分离,从而获得细节模型。在变形过程中,首先针对基础模型进行变形,然后在通过径向合并过程,将细节模型合并至变形后的基础模型上。在基础模型变形过程中,使用阻尼振荡曲线作为模拟模型表面皱褶的仿真曲线,使其在变形过程中保持模型的表面积不变。在细节模型与变形后的基础网格合并过程中,使用三线性插值实现合并的顶点位置的准确采样。本变形方法,能够通过建立圆柱型基础模型减少模型变形的计算量,并能实现细节保持和表面积模型变形。

本文的其他部分将包含如下几部分内容:第 1 部分介绍物体变形技术,以及柔软物体变形技术的现状,第 2 部分介绍主题模型的基础模型以及基础模型的变形方法,并介绍基础模型变形过程中的皱褶仿真方法和表面积保持方法,第 3 部分给出本文所提出方法的具体实现过程,并针对实验结果进行分析,第 4 部分对本文提出的方法进行总结。

1 相关工作

在模型变形方法中,主流的变形方法有自由体

变形方法(Free-Form Deformation, FFD)、基于骨骼的变形方法和基于物理的变形方法等。其中,自由体变形方法主要使用点阵网格划分所需变形的模型,将模型的整体分割至多个小区域中,并针对每个小区域进行拉伸,最终实现模型的整体变形。在自由体变形方法中,Igarashi^[1]使用三角网格划分二维角色,并通过最小二乘法求解自由顶点的位置实现模型的变形。Chen^[2]针对交互过程中的柔软物体的触觉反应,借助自由体变形方法,并结合 mass-spring 弹簧模型,实现变形计算。

基于骨骼的变形方法,首先根据骨骼将模型划分为多个部分,然后计算每一段骨骼的运动对模型中各个顶点的影响值,最终通过解方程的方式获得变形后的顶点位置,从而实现变形。但基于骨骼的变形方法一般需要复杂的配置或者较多的模型训练,才能使得模型中的各顶点获得合适的影响权值,从而获得满意的变形结果。Lewis^[3]建立一个名为 pose 的空间映射统一表达方法,基于骨骼驱动实现模型变形,并通过插值运算加速变形。Capell^[4]根据图像所表达模型的骨骼分布,将二维模型图像划分为多个变形子区域,使用基于骨骼的驱动方式对二维模型图像实现变形计算。Mohr^[5]借助变形示例对各姿态下的骨骼模型进行权值配置,在变形过程中通过调整变形参数实现变形。

基于物理的变形方法,一般来说需要根据变形所遵循的物理规律,通过公式计算出各位置的变形特征。Karen^[6]根据模型的形状设置控制曲线,并通过控制曲线来引导模型的变形,Oscar^[7]将模型的变形计算表达为线性方程组,通过针对方程组的逆运动计算逆向获得模型关节的位置,从而实现与分辨率无关的模型变形。Martin^[8]将黎曼几何距离概念引入到模型变形过程中,使用形状插值获得任意姿态下的模型变形结果。

细节保持是在模型变形过程中的一种提高变形质量的有效方法。细节保持方法通过将原始模型分离为基础模型和细节模型,首先对基础模型进行变形,然后将细节模型合成到变形后的基础模型

上, 从而使得变形不损失尖角凸起等细节。Shi^[9]在网格模型变形过程中, 通过细节保持提高变形质量, 并通过优化骨骼了加速计算, Wu^[10]在基于骨骼的变形方法中实现模型的细节保持, Huang^[11]也实现了细节保持的变形, 但其基础网格是通过原模型的包围盒形式实现的。Balaniuk^[12]实现了医学应用中探针触压下的软组织变形, 通过迭代计算估算在不同的探针压力下软组织的表面弹性。

模型变形过程中, 变形计算的实时性是考核方法优越性的重要方面, Paul^[13]对模型每个关节点计算其变形影响因子, 并基于图形硬件实现皮肤的非线性变形计算。Zhong^[14]使用 Poisson 方程表达软组织变形, 并使用神经网络求解该 Poisson 方程, 实现外力作用下的软组织变形仿真。Cretu^[15]通过图像识别变形物体的各姿态轮廓, 结合神经网络计算仿真机器人手臂上的手指运动。Behzad^[16]通过硬件实现 FPGA 架构下的并行有限元变形算法的算法, 实现柔软物体的快速变形。

本文的变形方法的主要特点在于: (1)采用规则圆柱体网格作为柔性物体变形的基础模型, 有利于简化变形算法, 且利于硬件加速; (2)通过皱褶实现模型变形过程中的表面积保持, 提高变形真实感。

2 柔软柱状模型变形方法

本文针对柔软柱状物体的变形, 提出一种能够同时实现细节保持和表面积保持的变形方法, 并能实现柔软物体弯曲过程中产生的皱褶。模型变形的基本过程为:

(1) 针对原模型, 获取原模型的形状属性, 包括底面积、高度、弯曲形状等, 并根据该形状属性建立基础模型;

(2) 通过径向求差运算, 将原模型与基础模型进行径向求差计算, 获取细节模型;

(3) 计算基础模型的弯曲变形结果。基础模型的变形计算, 需通过极坐标旋转与向量叠加两步完成;

(4) 实现基础模型的表面皱褶以及表面积保持。本步需首先设置基础模型的模型变化率; 并计

算仿真表面皱褶的曲线函数, 实现基础模型的表面积保持;

(5) 进行基础模型与细节模型的合并。该步骤需通过变形后的基础模型与细节模型的径向加和完成。

最终生成表面积保持和细节保持的柔软柱状模型的变形结果。

2.1 基础模型与细节模型获取

本文采用与原模型类似弯曲形状的圆柱体网格作为基础模型。将基础模型与原模型进行中心线对齐后, 转换至极坐标系中进行径向求差, 从而获得细节模型。

图 1 为基础模型建立与细节模型获取的纵向切面示意图, 图 1 中 $P_1P_2Q_1'Q_2'$ 是原模型对应的基础模型, 不规则曲线 M 和 N 是原物体模型的纵切面轮廓线。该基础模型建立方法为: 首先根据原模型的底面积、高度, 建立圆柱体网格模型; 然后根据原模型的弯曲形状, 调整该圆柱体模型的弯曲形状, 使其与原模型的形状达到最佳匹配。

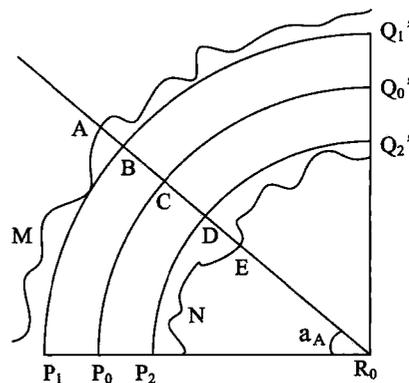


图 1 基础模型建立与细节模型获取的纵向切面示意图

圆柱体基础模型的形状匹配过程中, R_0 是形状匹配变形焦点, P_0Q_0' 为变形控制曲线, 平面 $R_0P_0Q_0'$ 为变形平面。圆柱体基础模型的中心线 C 可以通过向量 $|R_0P_0|$ 旋转获得, 俯仰角 α_A 为顶点 A 变形旋转角, 可以根据公式(1)求得,

$$\alpha_A = \arctan \frac{z_A - z_0}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \quad (1)$$

图 2 为细节模型获取的横向切面示意图, 图 2

中圆 BDQ 为基础模型与切面的交线。以模型顶点 A 为例, 其模型细节的获取过程中, C 为控制曲线与切面的交点, \overline{BA} 为顶点 A 的模型细节值, 即向量 \overline{CA} 与 \overline{CB} 的差。

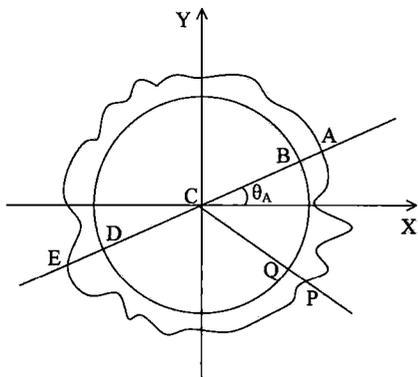


图 2 细节模型获取的横向切面示意图

通过原模型与基础模型的向量差值运算 $Detail = |\overline{AC}| - rad$, 可以获得与原模型对应的细节模型, 其中 rad 为原模型的形状属性中的底面半径。

2.2 基础模型弯曲变形

柔软柱状物体模型的各种姿态的变形, 均可以由多个基本的弯曲变形形式组成。复杂弯曲变形可以通过将柱状物体模型划分为多个区域, 连接各区域变形结果实现。

本文采用普通圆弧曲线作为基础模型弯曲变形的控制曲线。圆弧型控制曲线可用其所在平面和圆弧角度 2 个参数来定义: 控制曲线所在平面称为变形基本面, 该基本面与变形空间中 XOZ 的夹角称为变形方向角; 控制曲线所在圆弧的扇形角度称为变形旋转角, 变形旋转角的大小决定模型变形过程中的基础模型的弯曲程度大小, 角度越大则弯曲程度越大。

图 3 为以圆弧作为控制曲线的基础模型网格垂直截面图, 图 3 中 $P_1P_0P_2 - Q_1Q_0Q_2$ 是拉直状态的截面, $P_1P_0P_2 - Q'_1Q'_0Q'_2$ 为其弯曲状态的截面, P_0Q_0 和 $P_0Q'_0$ 分别是两状态下的控制线, $\angle P_0R_0Q_0$ 即 α 是变形旋转角。

一般情况来说, 柔软柱状物体的表面往往会有

一个外皮, 这层外皮的拉伸系数很大, 很多情况下可以认为是不可拉伸, 因此, 在该类型物体模型的弯曲变形仿真中, 可以设定表面在变形方向上长度保持不变。基于该设定, 图 3 中的 $|R_0P_0|$ 可由公式 (2) 求得,

$$radius = \frac{|P_1Q_1|}{\alpha} = \frac{|P_1Q'_1|}{\alpha} = \frac{length}{\alpha} \quad (2)$$

其中, $length$ 是原模型的形状属性中的模型长度, α 是变形旋转角。

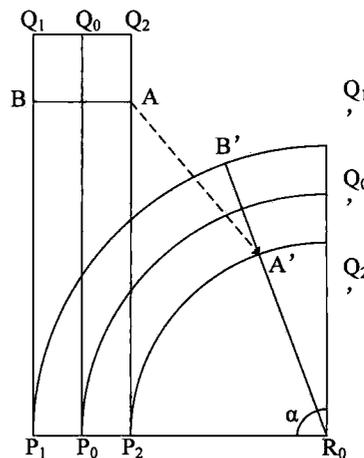


图 3 基础模型变形垂直截面图

图 4 为基础模型在变形过程中的变形横截面示意图, 图 4 中所示为图 3 中的 $R_0A'B'$ 面的横截面, 图 4 中 R_0 与图 3 中 R_0 为同一点。

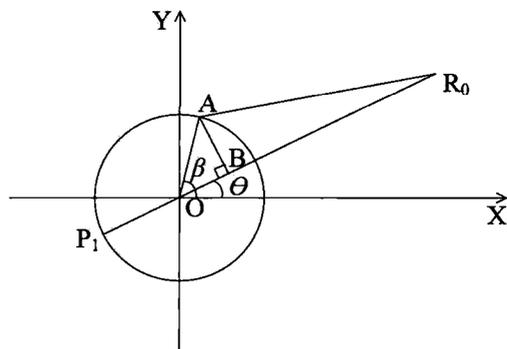


图 4 基础模型变形横截面图

顶点 A 变形后的位置可以通过公式 (3) 获得, $\overline{R_0A} = (\overline{R_0B} + \overline{BA})$ (3) 其中, $\overline{R_0A}$, $\overline{R_0B}$ 和 \overline{BA} 分别为向量。在基础模型的变形过程中, 模型网格以焦点

R_0 为中心改变弯曲姿态, 垂点 B 在变形平面中与基础模型中心曲线处于同一弧线上, 该弧线的半径可用公式(4)求得,

$$R_0 B = |R_0 O| - |BO| = |R_0 O| - radius * \cos(\beta - \theta) \quad (4)$$

其中, $radius$ 为基础模型的底面半径, β 为顶点 A 在基础模型中的坐标方向角, θ 为变形弯曲控制的弯曲方向角, 俯仰角 $\alpha_A = \alpha * z_A / length$ 为顶点所在高度与总高度的比值。根据向量的模、方向角和俯仰角, 可以通过极坐标与普通坐标的转换, 获得控制点 O 的位置坐标。

向量 \overrightarrow{AB} 在图 2 所示的横截面所示的坐标系中, 变形控制的方向角为 θ , 变形向量的模为顶点 A 到变形平面 $R_0 P_1$ 的距离, 因此向量 \overrightarrow{AB} 可用公式(5)求得,

$$\begin{bmatrix} x_{AB} \\ y_{AB} \end{bmatrix} = dist * \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, 方向角 θ 为的 $\angle XOR_0$, $dist$ 为向量 AB 的模, 其可用公式 $dist = x_A * \sin(\theta) + y_A * \cos(\theta)$ 求得。

针对基础模型中的顶点通过公式(3)计算变形后位置, 即可得基础模型变形结果。图 5 为柔软柱状模型的变形基础模型的几个姿态下的变结果。



图 5 基础网格的几个变形结果

2.3 模型表面积保持

柔软柱状物体模型在变形过程中, 弯曲方向内侧由于受挤压的原因, 会出现多条皱褶。本文为实现仿真变形过程中的皱褶现象, 引入振荡函数作为仿真函数, 本文所采用的振荡曲线函数如公式(6),

$$f(x) = A * \left(1 - \frac{x}{x_{max}}\right) * \cos\left(\frac{2 * k * \pi}{x_{max}} * x\right) \quad (6)$$

其中: A 为曲线的最大振幅; x_{max} 是振荡时长; k 为振荡次数。

为保持变形基础模型在变形前后表面积保持不变, 通过调整振荡曲线参数, 使顶点列长度在各姿态下均保持不变。

变形基础模型的顶点可以划分为列, 在图(3)中, 顶点列 $P_1 Q_1$ 与顶点列 $P_1' Q_1'$ 为变形不同弯曲姿态下的同一顶点列, 因此长度相同, 即 $|P_1 Q_1| = |P_1' Q_1'|$ 。

其他顶点列在变形后均为一条振荡曲线, 其顶点列长度可用公式(7)计算,

$$length = 2 * \int_0^{x_{max}} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad (7)$$

其中: $f'(x)$ 为曲线函数导数; x_{max} 为振荡时长; 其可用公式(8)计算得出,

$$x_{max} = length * Scale / 2 \quad (8)$$

其中, $length$ 与公式(2)中意义相同, 是原模型的模型长度, $Scale$ 为顶点列压缩比。对于任一顶点列, 其顶点列压缩比可推导为公式(9),

$$Scale = \frac{|P_2 Q_2'|}{|P_2 Q_2|} = \frac{|P_2 Q_2'|}{|P_1 Q_1|} = \frac{|P_2 Q_2'|}{|P_1 Q_1'|} = \frac{R}{R'} \quad (9)$$

其中: R 为当前顶点列的圆弧半径; R' 为顶点列 $P_1 Q_1$ 的圆弧半径。因此当前顶点列的压缩比可用公式(10)求得,

$$Scale = \frac{R}{R'} = \frac{|OR_0| - rad * \cos(\beta - \theta)}{|R_0 P_1|} \quad (10)$$

通过长度不变原则, 通过联合公式(6)-(10), 可为公式(6)求得各种姿态下的振幅 A 。

通过设置合适的振幅 A , 基础模型变形过程中表面积可保持不变。图 6 为添加皱褶效果的基础模型变形结果。

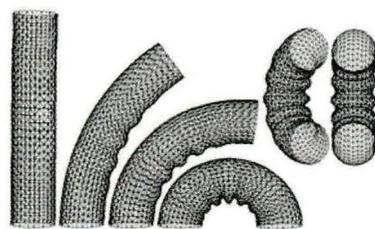


图 6 表面积保持的基础网格变形结果

2.4 模型细节保持

将细节模型与弯曲变形后的基础模型进行合

并，即可得到原模型进行弯曲变形的结果。

原几何模型分离为基础模型和细节模型过程是通过径向求差实现的，因此基础模型与细节模型的合成实际上就是径向求差过程的反运算——径向求和。

以图 1 中分离示意图为例，对于细节模型的任一顶点 A ，根据 α 和 θ 值求得其在基础模型上的投影点 B ，将顶点 A 处所携带的模型细节值与 B 点进行径向求和，最终求得顶点 A 的变形后位置。

3 算法实现和实验结果

根据本文所述的方法，我们已经实现了细节保持与表面积保持的柔软柱状物体的变形。整个过程可划分初始化计算部分和变形计算部分：

初始化部分 导入原始模型网格；获得原模型的形状属性，并建立与之对应的基础模型；将原模型与基础模型进行径向求差，获得其细节模型；计算各姿态下的曲线振幅。

变形计算部分 计算新变形姿态下的变形基础模型，设置曲线振幅，并据此获得表面积保持的基础模型。将细节模型与变形后的基础模型进行径向叠加，获得变形结果。

图 7 与图 8 为本文中的两个柱状模型变形结果。由结果可以看出，该方法能仿真柱状物体的柔性变形，以及变形过程中出现的皱褶现象，并能够很好

的保持模型的原有细节和表面积。



图 7 表面积保持的模型网格变形结果 1

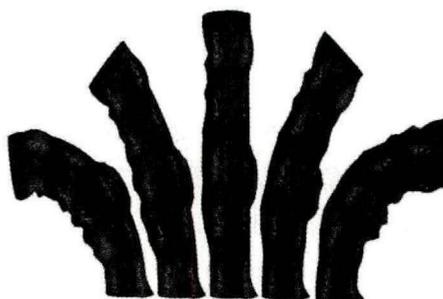


图 8 表面积保持的模型网格变形结果 2

图 9 是针对图 7 中的模型变形计算的各步骤执行时间统计图，原变形模型中包含 10 000 个顶点，共实施 7 次实验，每一次实验各步骤时间来自于 500 帧变形计算的平均值。实验数据表明，对于相当规模的几何模型，每帧变形计算与渲染总时间可以保持在 30 ms 左右，能够达到实时变形计算与绘制要求。

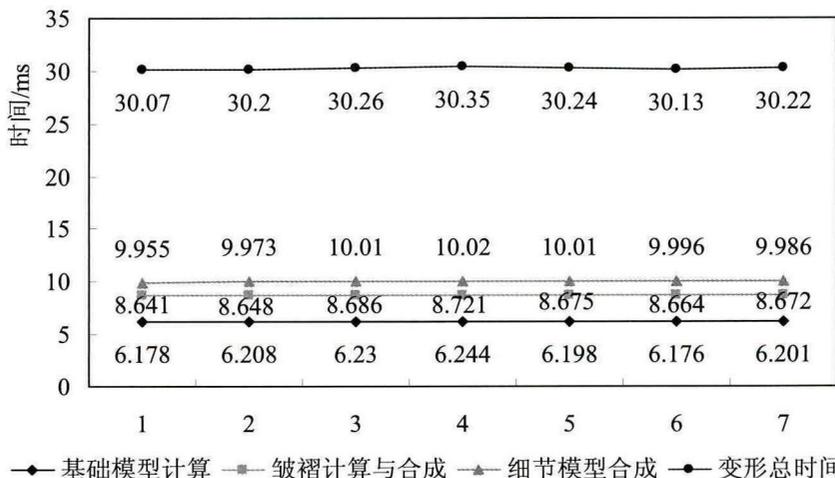


图 9 变形计算的各步骤执行时间统计

4 结论

本文针对柔软柱状物体模型, 提出了一种细节保持与表面积保持的变形方法。本方法首先通过原模型的形状属性, 如姿态、底面积、高度等, 建立相应的基础模型, 基础模型使用圆柱体网格模型实现, 通过统一基础模型提高变形计算效率; 通过振荡曲线仿真模型在弯曲变形时的褶皱现象, 并通过振荡函数的参数计算实现表面积保持; 通过径向求差运算从原模型上分离细节模型, 变形后再通过径向加和叠加细节模型。

本文的变形方法的主要贡献有: 通过统一基础模型简化变形算法; 实现褶皱仿真; 使用表面积保持和细节保持降低变形过程中的失真。实验数据表明, 本方法能够快速实现柔软柱状物体的弯曲变形, 并在变形过程中实现褶皱仿真, 实现较高的变形结果真实感。

参考文献:

- [1] T Igarashi, T Moscovich, J F Hughes. As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2005, 24(3): 1134-1141.
- [2] Chen Hui, Sun Hanqiu, Jin Xiaogang. Interactive haptic deformation of dynamic soft objects [C]// Proceedings of The 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications, New York, NY, USA. USA: ACM, 2006: 255-261.
- [3] J P Lewis, M Corder, N Fong, *et al.* Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation [C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. USA: ACM, 2000: 165-172.
- [4] S Capell, S Green, B Curless, *et al.* Interactive Skeleton-Driven Dynamic Deformations [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2002, 21(3): 586-593.
- [5] A Mohr, M Gleicher. Building efficient, accurate character skins from examples [J]. ACM Trans. Graph. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2003, 22(3): 562-568.
- [6] G D Kevin, R W Sumner, J Popovic. Inverse Kinematics for Reduced Deformable Models [C], SIGGRAPH. USA: ACM, 2006 (25): 1174-1179.
- [7] K C A Oscar, H B Fu, C L Tai, *et al.* Handle-Aware Isolines for Scalable Shape Editing [C]// Proceeding of ACM Siggraph Conferences, SIGGRAPH. USA: ACM, 2007, 26(3): Article 83.
- [8] K Martin, J M Niloy, P Helmut. Geometric modeling in shape space [C]// Proceeding of ACM Siggraph Conferences, SIGGRAPH. USA: ACM, 2007, 26(3): Article 64.
- [9] X H Shi, K Zhou, Y Y Tong, *et al.* Mesh Puppetry: Cascading Optimization of Mesh Deformation with Inverse Kinematics [C]// Siggraph 2007, ACM Transactions on Graphics. USA: ACM, 2007, 26(3): Article 81.
- [10] J Z Wu, X H Liu, E H Wu. Mesh Deformation under Skeleton-based Detail-preservation [C]// 2007 10th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics. USA: IEEE, 2007: 453-456.
- [11] J Huang, X Shi, X Liu, *et al.* 2006, Subspace Gradient domain mesh deformation [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2006, 25(3): 1126-1141.
- [12] Remis Balaniuk. A differential method for the haptic rendering of deformable objects [C]// Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, New York, NY, USA. USA: ACM, 2006: 297-304.
- [13] G K Paul, L J Doug, K P Dinesh. Eigenskin: real time large deformation character skinning in hardware [C]// Proceeding of the 2002 ACM Siggraph Symposium on Computer Animation. USA: ACM, 2002: 153-159.
- [14] Y Zhong, B Shirinzadeh, G Alici, J Smith. A Poisson-based methodology for deformable object simulation [J]. International Journal of Modelling and Simulation (S1726-4529), 2008, 28(2): 156-164.
- [15] Ana-Maria Cretu, Pierre Payeur, Emil M. Petriu. Learning and prediction of soft object deformation using visual analysis of robot interactions [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Visual Computing - V2. Germany: Springer, 2010: 232-241.
- [16] Behzad Mahdavihah, Ramin Mafi, Shahin Sirouspour, *et al.* A Multiple-FPGA parallel computing architecture for real-time simulation of soft-object deformation [J]. Transactions on Embedded Computing Systems (TECS) (S1539-9087), 2014, 13(4): Article 81.