

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2023 年 6 月 29 日 (29.06.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/116456 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/23 (2020.01)

东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道
1068号, Guangdong 518055 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/137665

(22) 国际申请日: 2022 年 12 月 8 日 (08.12.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202111575432.1 2021年12月21日 (21.12.2021) CN

(71) 申请人: 深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道1068号, Guangdong 518055 (CN)。

(72) 发明人: 钱银玲 (QIAN, Yinling); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道1068号, Guangdong 518055 (CN)。 廖祥云 (LIAO, Xiangyun); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道1068号, Guangdong 518055 (CN)。 孙寅紫 (SUN, Yinzi); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道1068号, Guangdong 518055 (CN)。 王琼 (WANG, Qiong); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道1068号, Guangdong 518055 (CN)。 王平安 (WANG, Pingan); 中国广

(74) 代理人: 北京中巡通大知识产权代理有限公司 (BEIJING ZHONG XUN TONG DA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国北京市西城区西直门外大街1号院2号楼7层7C1, Beijing 100044 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR,

(54) Title: SIMULATION METHOD FOR SHEAR FRACTURE OF DEFORMABLE OBJECT AND MATERIAL SIMULATION METHOD

(54) 发明名称: 一种用于可变形物体剪切断裂的仿真方法及材料仿真方法

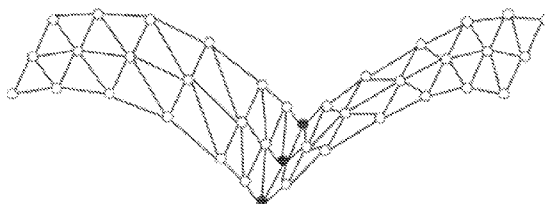


图 7

(57) Abstract: The present invention relates to a simulation method for shear fracture of a deformable object, which facilitates medical applications such as virtual operation training and interactive operation planning. A composite finite element model is used to simulate the shape of a deformable object, and when and how to generate new cutting are determined on the basis of Griffith energy minimization, so as to realize interactive virtual cutting simulation. Furthermore, a material simulation method is designed to ensure that the indentation is consistent with a cutter blade and the indentation induces deformation visually, so that a large amount of calculation is avoided.

(57) 摘要: 本公开涉及一种用于可变形物体的剪切断裂的仿真方法, 方便虚拟手术训练和交互式手术规划等医学应用。通过采用复合有限元模型实现对可变形物体的外形进行模拟, 基于格里菲斯能量最小化来确定何时以及如何产生新的切割, 以实现交互式虚拟切割模拟; 进一步地, 通过设计一种材料仿真的方法, 来保证压痕与刀具刀片一致, 以及视觉上似是而非的压痕诱导变形, 以避免大量的计算。

HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO,
PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN,
TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种用于可变形物体剪切断裂的仿真方法及材料仿真方法

技术领域

本公开涉及手术仿真，具体涉及一种用于可变形物体剪切断裂仿真方法及材料仿真方法。

背景技术

作为虚拟外科训练系统的核心模块，可变形目标切割仿真一直是一项重要的研究课题。现有方法重点在于解决虚拟切削的三大任务模拟，即变形体的模拟，碰撞的检测和处理，以及合并到计算模型中。

根据根本情况变形模型、切割仿真等方法都可以分为三类：基于网格的方法，无网格方法和自适应/多分辨率方法。其中，基于网格的方法可以有效地对切割单元进行重构，最常见的比如有限元法(FEM)。近年来研究将扩展有限元法应用于变形模型的切削仿真确保切面附近的变形行为在物理上是正确的；无网格技术减少了对仿真网格的依赖。该方法采用的模型由一组移动节点表示，这些节点根据弹性控制方程相互作用。由于模拟物体的视觉质量与几何表示的精度密切相关，视觉效果提高将伴随着仿真单元的稳定线性增长；而自适应多分辨率方法，其中复合有限元法(CFEM)将高分辨率的视觉网格嵌入到精细的六面体网格中并能进行分支分析。

无论采用何种剪切仿真方法，现有的剪切仿真方法大多数方法都遵循“相交即断裂”模式，即只要切削刃与物体相交就会发生切削断裂，而真实软体一般具有一定的抗断裂能力，当刀具按压到软组织上

之后，通常会先产生压痕，当按压能量积累到一定程度是，才会发生组织断裂。所以现有剪切仿真结果与真实软体剪切现象差距甚大。

发明内容

有鉴于此，本申请的主要目的在于提供一种高度逼真的虚拟切削断裂仿真方法和/装置，用于模拟变形物体抗断裂能力的高真实感切削现象。

一方面，本发明提出了一种用于可变形物体的剪切断裂的仿真方法，所述方法包括下述步骤：

S100、基于复合有限元模型对可变形物体的外形进行模拟，获得连接网格，在连接网格上嵌入原始物体曲面，得到可变形物体的可视化网格；

所述复合有限元模型的建立方法为：先将可变形物体的模型导入世界坐标系，使其重心与世界坐标系的原点重合后，对模型进行归一化处理；然后构建模型的轴对称立方体，按照第一网格分辨率，将包围可变形物体的一个立方体划分为若干第一网格，存储每个第一网格信息；再按照第二网格分辨率，将每个第一网格按照第二网格分辨率划分为第二网格，存储第二网格信息；将相邻第二网格的中心点连接起来，组成连接网格；

S200、若发生切削，更新第一网格、第二网格以及连接网格的存储信息，结合生成切削后的曲面，重构可视化网格。

优选地，在所述方法中，所述更新包括下属步骤：

S201、获取模拟刀具的网格节点，获取第二网格的网格节点；

S202、使用宽相位碰撞检测判断模拟刀具的网格节点和第二网格的网格节点是否发生重合，若有，执行 S203；否则，执行 S204；

S203、获取每个与模拟刀具相交的连接上的点，进而获取该点的符号场距离值，执行 S204；

S204、获取每个可视化网格节点，使用宽相位碰撞检测确定模拟刀具穿透到的第一网格，进而通过窄相位碰撞检测确定穿透到的第二网格上的点，并获取该点的符号场距离值，执行 S205；

S205、利用点的符号距离场值，建立连接网格连接的能量函数，通过使能量函数取得最小值，确定需要更新存储信息的第一网格、第二网格以及连接网格上的连接，从而更新存储信息。

优选地，在所述方法中，所述能量函数的计算过程如下：

$$\Phi(x, t) = \varphi + \Delta t^* \frac{\partial \varphi}{\partial t^*}$$

式中： t^* 是时间演化的伪参数； φ 为当前时间交点的符号距离场值，所述交点为与刀具轨迹相交的连接上的点；

$$Q = \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial x}$$

式中： x 为初始未变形状态的区域的任意位置； Q 为时间 t 时刻可变形物体在变形区域上的能量密度函数；

$$\Psi = \mu \|S - I\|_F^2 + \frac{\lambda}{2} \text{tr}^2(S - I)$$

式中： S 是将 Q 进行极分解后得到的对称张量； I 和 S 大小一样的单位矩阵； μ 和 λ 为计算的系数，计算式如下：

$$\mu = \frac{E}{1+V}, \quad \lambda = \frac{E}{1-2V}$$

式中: E 为根据可变形物体的材质设定的杨氏模量, V 是泊松比;

$$e_g = \int_{\Omega H} \Psi dx + \int_{\Omega D} k dx$$

式中: e_g 为能量函数, ΩH 表示所有第二网格之间为连接状态的连接, Ψ 为每个连接的能量密度; ΩD 表示所有第二网格之间的连接状态由连接变为断开的连接, k 为第二网格之间的连接状态由连接变为断开的能量释放速率。

优选地, 在所述方法中, 所述切削后的曲面通过下述步骤确定因切削操作要改变位移的网格节点:

通过与模拟刀具的相交情况, 找到需要进行投影的点;

基于可视化网格, 获取这些点的三角网格, 进而得到这些三角网格的雅克比矩阵;

对模拟刀刃进行均匀采样获取采样点;

对于每个待投影的点, 计算其投影到模拟刀刃采样点的位移后, 通过雅克比矩阵计算所有包含该待投影点的三角网格的代数质量测度之和;

通过使代数质量测度之和最小, 确定投影到模拟刀具上的点的位置。

优选地, 在所述方法中, 所述切削后的曲面通过采用 B 样条实现剖面压痕的生成, 包括下述步骤:

基于控制点 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) 用 B 样条构造压痕调整函数, 其中:

$$x_0 = 0, y_0 = -a_i; x_1 = 0.2 \cos \theta_i, y_1 = a_i(0.2 \sin \theta_i - 1);$$

$$x_2 = \frac{1}{3}, y_2 = \gamma; x_3 = \frac{5}{6}, y_3 = 0, x_4 = \frac{11}{12}, y_4 = 0;$$

$$x_5 = 1, y_5 = 0;$$

其中： a_i 是网格节点 v_i 投影后的位移， i 是要进行投影的网格节点序号， $i=1, 2, \dots, N$ ， N 为要投影的节点个数，要投影的节点是因切削或按压产生位移变化的节点； $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{s_i}{a_i})$ ， $s_i = \frac{a_i}{D}$ ； D 为最大测地距离； γ 为一个与材料相关的参数，可以通过调节该参数，调整该控制节点因压痕带来的位移变化；

获取网格节点 v_i 的最大测地范围内的节点，将它们作为潜在调整节点，继续获取潜在调整节点的最大测地范围内的节点，直至获取的节点达到设定数目；

将要调整节点的横坐标代入压痕调整函数，获得压痕产生后这些节点的纵坐标，结合投影点的位移 a_i ，可以获得调整节点的新位置，更新这些网格的节点信息，获得压痕产生后的可视化网格。

优选地，在所述方法中，所述 γ 通过下式计算：

$$\gamma = \frac{\tau}{E}$$

式中： τ 为根据材料设定的一个值， E 为杨氏模量。

优选地，在所述方法中，所述最大测地距离与材料相关，通过下式计算：

$$D = \frac{V}{E}$$

式中， V 是泊松比， E 为杨氏模量。

另一方面，一种材料仿真方法，来保证压痕与刀具刀片一致，以

及视觉上似是而非的压痕诱导变形，以避免大量的计算。所述方法通过采用 B 样条调整压痕的生成，包括下述步骤：

构造材料的可视化网格；

基于控制点 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) 用 B 样条构造压痕调整函数，其中：

$$x_0 = 0, y_0 = -a_i; x_1 = 0.2 \cos \theta_i, y_1 = a_i(0.2 \sin \theta_i - 1);$$

$$x_2 = \frac{1}{3}, y_2 = \gamma; x_3 = \frac{5}{6}, y_3 = 0, x_4 = \frac{11}{12}, y_4 = 0;$$

$$x_5 = 1, y_5 = 0;$$

其中： a_i 是网格节点 v_i 因按压产生的位移， i 是网格节点序号， $i=1, 2, \dots, N$, N 为按压影响的节点个数； $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{s_i}{a_i})$, $s_i = \frac{a_i}{D}$ ； D 为最大测地距离； γ 为一个与材料相关的参数，可以通过调节该参数，调整该控制节点因压痕带来的位移变化；

获取网格节点 v_i 的最大测地范围内的节点，将它们作为潜在调整节点，继续获取潜在调整节点的最大测地范围内的节点，直至获取的节点达到设定数目；

将要调整节点的横坐标代入压痕调整函数，获得压痕产生后这些节点的纵坐标，结合投影点的位移 a_i ，可以获得调整节点的新位置，更新这些网格的节点信息，获得压痕产生后的可视化网格。

优选地，在所述材料仿真方法中，所述 γ 通过下式计算：

$$\gamma = \frac{\tau}{E}$$

式中： τ 为根据材料设定的一个值， E 为杨氏模量。

最后，本发明还涉及一种终端设备，包括存储器、处理器以及存

储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任一所述方法的步骤。

与现有技术相比，本发明采用基于共旋转线性有限元模型设计的支持软物体大变形的框架，并采用复合有限元方法，很好地平衡了模拟精度和算法效率；配合格里菲斯能量的切割断裂演化模型进行交互式虚拟切削模拟，能够确定何时以及如何产生新的切割；特别提出了一种材料仿真方法，来保证压痕与刀具刀片一致，以及视觉上似是而非的压痕诱导变形，以避免大量的计算。因此，本发明非常适用于虚拟手术训练和交互式手术规划等医学应用。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1、为切割前仿真的示意图；

图 2、为切割后仿真的示意图；

图 3、用刀具切削前的涉及的压痕调整节点示意图；

图 4、切削过程中压痕调整节点的变化示意图；

图 5、切削发生后压痕调整节点的变化示意图；

图 6、为不做压痕处理的切削示意图；

图 7、为压痕调整区域构建示意图；

图 8、为作完压痕处理后的切削示意图；

图 9、为采用本发明方法与采用基本复合有限元模型进行切割时切割变化仿真示意图；

图 10、为对不同材料进行切割时的仿真对比示意图；

图 11、为使用另一形状工具切削物体从变形到断裂过程的仿真示意图；

图 12、为采用本发明方法对肝脏进行任意切割时切削变化过程的仿真示意图；

图 13、为采用本发明方法对马进行任意切割时切削变化过程的仿真示意图；

图 14、为采用本发明方法对狢狢进行任意切割时切削变化过程的仿真示意图；

图 15、为采用本发明方法对兔子进行任意切割时切削变化过程的仿真示意图。

具体实施方式

下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

本申请的说明书和权利要求书的术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含。例如，包含了一系列步骤或设备的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或设备，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其他步骤或设备。

在本申请的描述中，需要说明的是，术语“第一”、“第二”、仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多个该特征。

在一个肝脏切削仿真实例中，采用下述方法进行仿真模拟切削实验，与切口方向相垂直的剖面图如图 1 和图 2 所示，图 1 为切削前示意图，图 2 为切削后的剖面图。在这个实施例中，仿真采用下述步骤：

S100、基于复合有限元模型对可变形物体的外形进行模拟，获得连接网格，在连接网格上嵌入原始物体曲面，得到可变形物体的可视化网格；

S200、若发生切削，更新第一网格、第二网格以及连接网格的存储信息，结合生成切削后的曲面，重构可视化网格。

在上述步骤中，所述复合有限元模型的建立方法为：先将可变形物体的模型导入世界坐标系，使其重心与世界坐标系的原点重合后，对模型进行归一化处理；然后构建模型的轴对称立方体，按照第一网格分辨率，将包围可变形物体的一个立方体划分为若干第一网格，存储每个第一网格信息；再按照第二网格分辨率，将每个第一网格按照第二网格分辨率划分为第二网格，存储第二网格信息；将相邻第二网格的中心点连接起来，组成连接网格。存储的网格信息包括节点信息，连接网格中需要存储与原始物体曲面相交的交点和法线。

第一网格主要用于变形计算，较高的离散度保证了方法的实时性。

第二网格用于逼近物体实际形状，可以表示物体各部分的连接情况。利用原始物体曲面与第二网格之间连线的相交情况，得到可视化网格，可以更精细的表示物体本身。因此，第一网格在空间上包含第二网格，可视化网格。优选地，第一网格为六面体，第二网格为六面体。原始物体曲面由三角网格组成。

在可变物体的切削仿真过程中，首先要确定切削发生的时间，将可视化网格仿真出切口断开。在切口断开这个过程中，会存在两种碰撞。一种是刀具与可变形物体的碰撞，另一种是可变形物体的断开组织之间的碰撞。因此，本发明在仿真时采用哈希表，将要检测的对象放入空间哈希表中，结合宽相位检测法，判断它们在空间上的是否重合，即刀具和可变形物体、可变形物体自身、可变形物体断开的组织之间是否在相关节点上重合。如果有刀具和可变形物体的碰撞，则仿真切口断开，或者有断开组织之间的碰撞，则仿真穿透到了哪些第一网格，确定穿透的具体位置。对于切口断开时，通过更新发生形变的节点信息，进行切口模拟。因此对于碰撞中的重合的点，可能是发生变形的点。利用该点的符号场距离值，建立连接网格连接的能量函数，通过使能量函数取得最小值，确定需要更新存储信息的第一网格、第二网格以及连接网格上的连接，从而更新存储信息，

本发明对能量函数的计算过程如下：

$$\Phi(x, t) = \varphi + \Delta t^* \frac{\partial \varphi}{\partial t^*}$$

式中： t^* 是时间演化的伪参数； φ 为当前时间交点的符号距离场值，所述交点为与刀具轨迹相交的连接上的点；

$$Q = \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial x}$$

式中： x 为初始未变形状态的区域的任意位置； Q 为时间 t 时刻可变形物体在变形区域上的能量密度函数；

$$\Psi = \mu \|S - I\|_F^2 + \frac{\lambda}{2} \text{tr}^2(S - I)$$

式中： S 是将 Q 进行极分解后得到的对称张量； I 和 S 大小一样的单位矩阵； μ 和 λ 为计算的系数，计算式如下：

$$\mu = \frac{E}{1+V}, \quad \lambda = \frac{E}{1-2V}$$

式中： E 为根据可变形物体的材质设定的杨氏模量， V 是泊松比；

$$e_g = \int_{\Omega H} \Psi dx + \int_{\Omega D} k dx$$

式中： e_g 为能量函数， ΩH 表示所有第二网格之间为连接状态的连接， Ψ 为每个连接的能量密度； ΩD 表示所有第二网格之间的连接状态由连接变为断开的连接， k 为第二网格之间的连接状态由连接变为断开的能量释放速率。

上述过程是找到因受到切削压力而要发生变形的点，但是切口的仿真，还需要知道切削的深度。在一个实施例中，采用下述方式实现对切削深度的仿真，即：通过与模拟刀具的相交情况，找到需要进行投影的点；基于可视化网格，获取这些点的三角网格，进而得到这些三角网格的雅克比矩阵；对模拟刀刃进行均匀采样获取采样点；对于每个待投影的点，计算其投影到模拟刀刃采样点的位移后，通过雅克比矩阵计算所有包含该待投影点的三角网格的代数质量测度之和；通过使代数质量测度之和最小，确定投影到模拟刀具上的点的位置。这

个实施例处理过程如图 3-5 所示。图 3-5 中, Blade curve 是刀具采样点, 通过对模拟刀具的刀刃进行均匀采样获得。Contact region vertice 是通过与刀具的相交情况, 找到的可能需要进行投影的点。对于包含这些点的三角网格, 构造雅克比矩阵。进一步对所有可能需要投影的点, 计算该点移动到刀刃采样点的距离, 即为所述投影。通过雅克比矩阵计算所有包含该待投影点的三角网格的代数质量测度之和, 使代数质量测度之和取得最小值的点, 为最终确定的投影点。Local coordinate system 是根据投影的位置建立的坐标系。Local mesh that may need to adjust 是图中示意的需要调整位置可视化网格。Approximate indentation curve 是近似凹陷的刀口。

如果不对刀口进行处理, 上面仿真的刀口如图 6 所示, 只要切割刀片与模型相交就会发生切割断裂, 这与实际的切割经验不同。具有弹性的表面, 切削后是不会出现棱角, 从未切削部分到切口的边缘是不会出现显著不连续的, 如图 7 所示。本发明为了更逼真的模拟切削口, 提高模拟效率, 提出了一种材料仿真方法。该方法利用与材料参数相关的最大测地距离来寻找压痕附近的需要产生形变的顶点, 通过与材料参数相关的变形模型实现模拟不同硬度的物体形变和/或切割过程。

在这个变形模型中, 首先构造材料的可视化网格, 构造方法优选采用上述用于可变形物体的剪切断裂的仿真方法中, 基于复合有限元模型的方法。其次, 基于控制点 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) , 用 B 样条构造压痕调整函数, 其中:

$x_0 = 0, y_0 = -a_i; x_1 = 0.2 \cos \theta_i, y_1 = a_i(0.2 \sin \theta_i - 1); x_2 = \frac{1}{3}, y_2 = \gamma;$
 $x_3 = \frac{5}{6}, y_3 = 0, x_4 = \frac{11}{12}, y_4 = 0; x_5 = 1, y_5 = 0。$ 其中： a_i 是网格节点 v_i 因按压产生的位移， i 是网格节点序号， $i=1, 2, \dots, N$ ， N 为按压影响的节点个数，即要进行变形的节点个数； $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{s_i}{a_i})$ ， $s_i = \frac{a_i}{D}$ ； D 为最大测地距离； γ 为一个与材料相关的参数，可以通过调节该参数，调整该控制节点因压痕带来的位移变化；获取网格节点 v_i 的最大测地范围内的节点，将它们作为潜在调整节点，继续获取潜在调整节点的最大测地范围内的节点，直至获取的节点达到设定数目；将要调整节点的横坐标代入压痕调整函数，获得压痕产生后这些节点的纵坐标，结合投影点的位移 a_i ，可以获得调整节点的新位置，更新这些网格的节点信息，获得压痕产生后的可视化网格。压痕引起的变形与物体的材质有关。材料越软，变形就会越明显。因此压痕调整就是用来模拟材料在受到压力后的变形情况。为了更贴近材料的性质，在计算时，最大测地距离 D 可通过下式计算：

$$D = \frac{V}{E}$$

式中， V 是泊松比， E 为杨氏模量。

同样的，为了便于材料参数值的设定， γ 通过下式计算：

$$\gamma = \frac{\tau}{E}$$

式中： τ 为根据材料设定的一个值， E 为材料的杨氏模量。

通过上面一个变形模型的应用，可以实现切面与原始物体曲面的平滑过渡，使仿真切口看起来更加自然逼真，而且上述计算过程可以避免大量计算。

图 9-15 是采用本发明进行切削的各自仿真效果对比图。

图 9 为与基本复合有限元切割仿真结果对比示意图。第一行为复合有限元方法基本切割效果，第二行为裂缝演化和压痕生成的中间结果。第三行为基于复合有限元模型，进一步进行压痕调整后的仿真效果。每一行的图像由切割效果的前视图和相应的放大视图组成。由图可以看出，本发明方法中的剪切仿真更加逼真自然。

图 10 为不同材料的切割效果示意图。这组对比图展示了三种不同材料的模拟效果。每两行颜色相近代表一种材料的模拟效果。这两行的底部一行显示了相应的放大视图。由图可以看出，本发明中的剪切仿真适用于不同材料的仿真，实用性强。

图 11 为一组使用另一形状工具切削物体从变形到断裂过程的仿真结果图。第一组到第三组为变形，最后一组为断裂开。每一组图都展示了切割效果的侧视图，对应的顶视图，以及局部放大视图，以便看清细节。通过这四组对比图可以看出，本发明方法能够对工具形状不具有限制性，剪切效果依然是高度逼真。

图 12-15 分别为采用本发明方法对肝脏、马、狢狢和兔子进行任意切削时切削过程变化示意图。

由此可见，本发明方法具有很广的适用性和实用性，对任意材质、任意刀具以及任意形状的物体，都能进行具有逼真自然的仿真，能够模拟变形物体抗断裂能力的真实切削现象，方便虚拟手术训练和交互式手术规划等医学应用，具有较高的实用和推广价值。

上述方法均可以通过一种终端设备来实现，所述终端设备包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计

算机程序，通过所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任一方法的步骤。

通过以上的实施方式的描述，所属领域的技术人员可以清楚地了解到本公开方法还可借助软件加必需的通用硬件的方式来实现，当然也可以通过专用硬件包括专用集成电路、专用 CPU、专用存储器、专用元器件等来实现。一般情况下，凡由计算机程序完成的功能都可以很容易地用相应的硬件来实现，而且，用来实现同一功能的具体硬件结构也可以是多种多样的，例如模拟电路、数字电路或专用电路等。但是，对本公开而言更多情况下，软件程序实现是更佳的实施方式。

综上所述，以上仅为本发明的较佳实施例而已，并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种用于可变形物体的剪切断裂的仿真方法，其特征在于，所述方法包括下述步骤：

S100、基于复合有限元模型对可变形物体的外形进行模拟，获得连接网格，在连接网格上嵌入原始物体曲面，得到可变形物体的可视化网格；

所述复合有限元模型的建立方法为：先将可变形物体的模型导入世界坐标系，使其重心与世界坐标系的原点重合后，对模型进行归一化处理；然后构建模型的轴对称立方体，按照第一网格分辨率，将包围可变形物体的一个立方体划分为若干第一网格，存储每个第一网格信息；再按照第二网格分辨率，将每个第一网格按照第二网格分辨率划分为第二网格，存储第二网格信息；将相邻第二网格的中心点连接起来，组成连接网格；

S200、若发生切削，更新第一网格、第二网格以及连接网格的存储信息，结合生成切削后的曲面，重构可视化网格。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述更新包括下
属步骤：

S201、获取模拟刀具的网格节点，获取第二网格的网格节点；

S202、使用宽相位碰撞检测判断模拟刀具的网格节点和第二网格的网格节点是否发生重合，若有，执行 S203；否则，执行 S204；

S203、获取每个与模拟刀具相交的连接上的点，进而获取该点的符号场距离值，执行 S204；

S204、获取每个可视化网格节点，使用宽相位碰撞检测确定模拟

刀具穿透到的第一网格，进而通过窄相位碰撞检测确定穿透到的第二网格上的点，并获取该点的符号场距离值，执行 S205；

S205、利用点的符号距离场值，建立连接网格连接的能量函数，通过使能量函数取得最小值，确定需要更新存储信息的第一网格、第二网格以及连接网格上的连接，从而更新存储信息。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述能量函数的计算过程如下：

$$\Phi(x, t) = \varphi + \Delta t^* \frac{\partial \varphi}{\partial t^*}$$

式中： t^* 是时间演化的伪参数； φ 为当前时间交点的符号距离场值，所述交点为与刀具轨迹相交的连接上的点；

$$Q = \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial x}$$

式中： x 为初始未变形状态的区域的任意位置； Q 为时间 t 时刻可变形物体在变形区域上的能量密度函数；

$$\Psi = \mu \|S - I\|_F^2 + \frac{\lambda}{2} \text{tr}^2(S - I)$$

式中： S 是将 Q 进行极分解后得到的对称张量； I 和 S 大小一样的单位矩阵； μ 和 λ 为计算的系数，计算式如下：

$$\mu = \frac{E}{1+\nu}, \quad \lambda = \frac{E}{1-2\nu}$$

式中： E 为根据可变形物体的材质设定的杨氏模量， ν 是泊松比；

$$e_g = \int_{\Omega_H} \Psi dx + \int_{\Omega_D} k dx$$

式中： e_g 为能量函数， Ω_H 表示所有第二网格之间为连接状态的

连接， Ψ 为每个连接的能量密度； ΩD 表示所有第二网格之间的连接状态由连接变为断开的连接， k 为第二网格之间的连接状态由连接变为断开的能量释放速率。

4、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述切削后的曲面通过下述步骤确定因切削操作要改变位移的网格节点：

通过与模拟刀具的相交情况，找到需要进行投影的点；

基于可视化网格，获取这些点的三角网格，进而得到这些三角网格的雅克比矩阵；

对模拟刀刃进行均匀采样获取采样点；

对于每个待投影的点，计算其投影到模拟刀刃采样点的位移后，通过雅克比矩阵计算所有包含该待投影点的三角网格的代数质量测度之和；

通过使代数质量测度之和最小，确定投影到模拟刀具上的点的位置。

5、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述切削后的曲面通过采用 B 样条实现剖面压痕的生成，包括下述步骤：

基于控制点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$ ，用 B 样条构造压痕调整函数，其中：

$$x_0 = 0, y_0 = -a_i; x_1 = 0.2 \cos \theta_i, y_1 = a_i(0.2 \sin \theta_i - 1);$$

$$x_2 = \frac{1}{3}, y_2 = \gamma; x_3 = \frac{5}{6}, y_3 = 0, x_4 = \frac{11}{12}, y_4 = 0;$$

$$x_5 = 1, y_5 = 0;$$

其中： a_i 是网格节点 v_i 投影后的位移， i 是要进行投影的网格节

点序号, $i=1, 2, \dots, N$; N 为要投影的节点个数; $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{s_i}{a_i})$, $s_i = \frac{a_i}{D}$; D 为最大测地距离; γ 为一个与材料相关的参数, 可以通过调节该参数, 调整该控制节点因压痕带来的位移变化;

获取网格节点 v_i 的最大测地范围内的节点, 将它们作为潜在调整节点, 继续获取潜在调整节点的最大测地范围内的节点, 直至获取的节点达到设定数目;

将要调整节点的横坐标代入压痕调整函数, 获得压痕产生后这些节点的纵坐标, 结合投影点的位移 a_i , 可以获得调整节点的新位置, 更新这些网格的节点信息, 获得压痕产生后的可视化网格。

6、根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 所述 γ 通过下式计算:

$$\gamma = \frac{\tau}{E}$$

式中: τ 为根据材料设定的一个值, E 为杨氏模量。

7、根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 所述最大测地距离与材料相关, 通过下式计算:

$$D = \frac{V}{E}$$

式中, V 是泊松比, E 为杨氏模量。

8、一种材料仿真方法, 其特征在于, 所述方法通过采用 B 样条调整压痕的生成, 包括下述步骤:

构造材料的可视化网格;

基于控制点 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) 用 B 样条构造压痕调整函数, 其中:

$$x_0 = 0, y_0 = -a_i; x_1 = 0.2 \cos \theta_i, y_1 = a_i(0.2 \sin \theta_i - 1);$$

$$x_2 = \frac{1}{3}, y_2 = \gamma; x_3 = \frac{5}{6}, y_3 = 0; x_4 = \frac{11}{12}, y_4 = 0;$$

$$x_5 = 1, y_5 = 0;$$

其中： a_i 是网格节点 v_i 因按压产生的位移， i 是网格节点序号， $i=1, 2, \dots, N$ ， N 为按压影响的节点个数； $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{s_i}{a_i})$ ， $s_i = \frac{a_i}{D}$ ； D 为最大测地距离； γ 为一个与材料相关的参数，可以通过调节该参数，调整该控制节点因压痕带来的位移变化；

获取网格节点 v_i 的最大测地范围内的节点，将它们作为潜在调整节点，继续获取潜在调整节点的最大测地范围内的节点，直至获取的节点达到设定数目；

将要调整节点的横坐标代入压痕调整函数，获得压痕产生后这些节点的纵坐标，结合投影点的位移 a_i ，可以获得调整节点的新位置，更新这些网格的节点信息，获得压痕产生后的可视化网格。

9、根据权利要求8所述的方法，其特征在于，所述 γ 通过下式计算：

$$\gamma = \frac{\tau}{E}$$

式中： τ 为根据材料设定的一个值， E 为杨氏模量。

10. 一种终端设备，包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求1至9任一项所述方法的步骤。

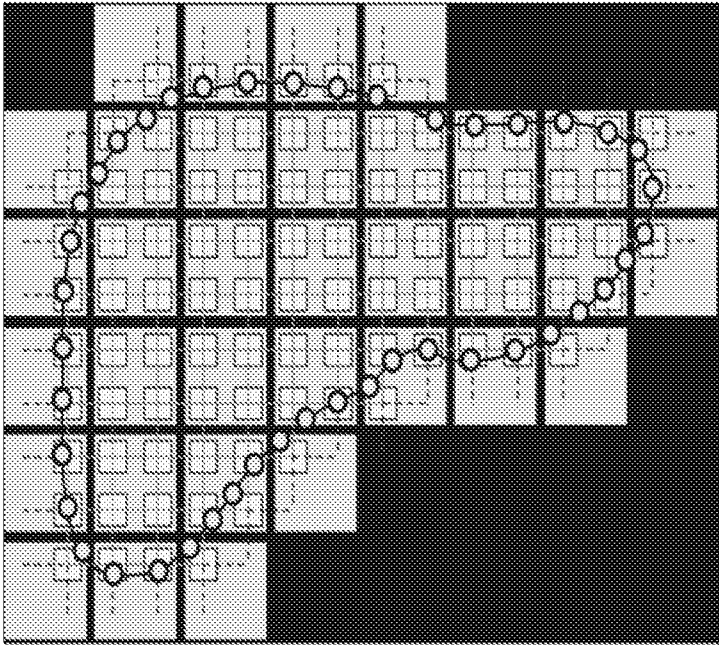


图 1

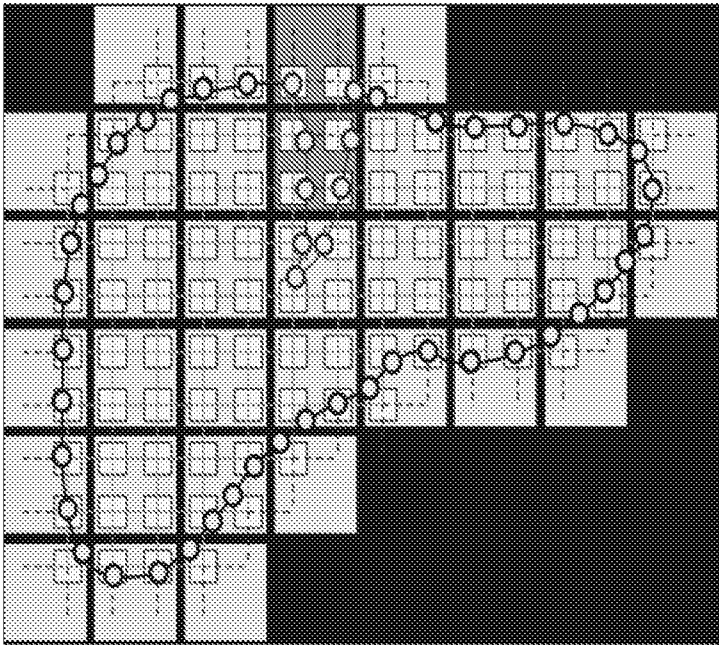


图 2

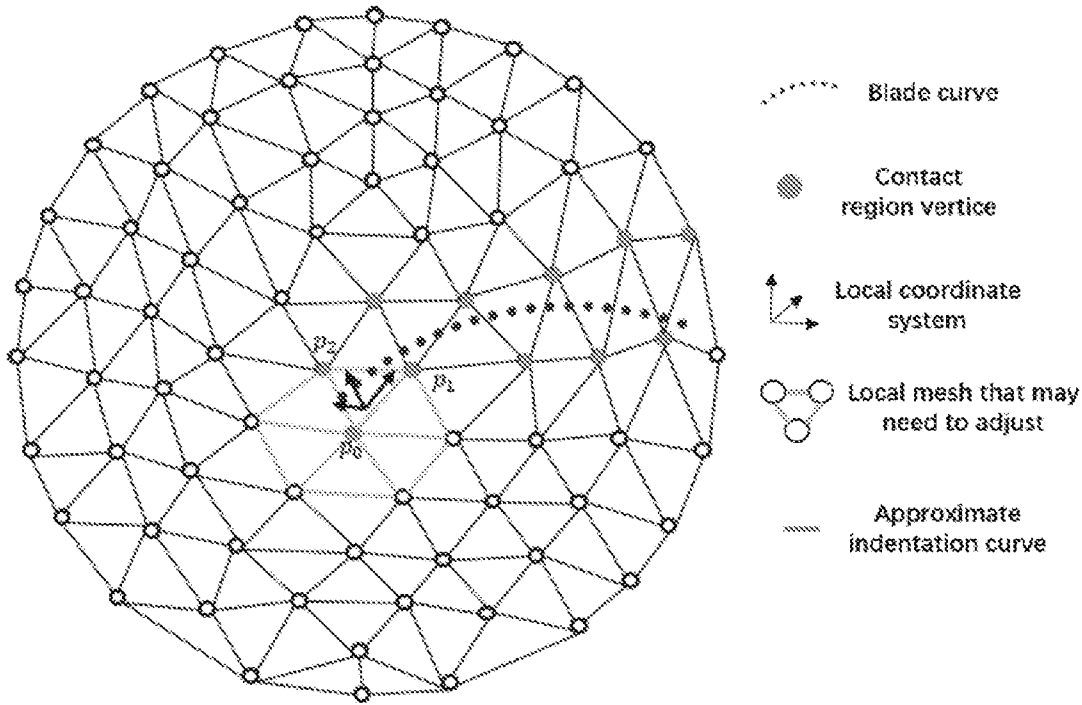


图 3

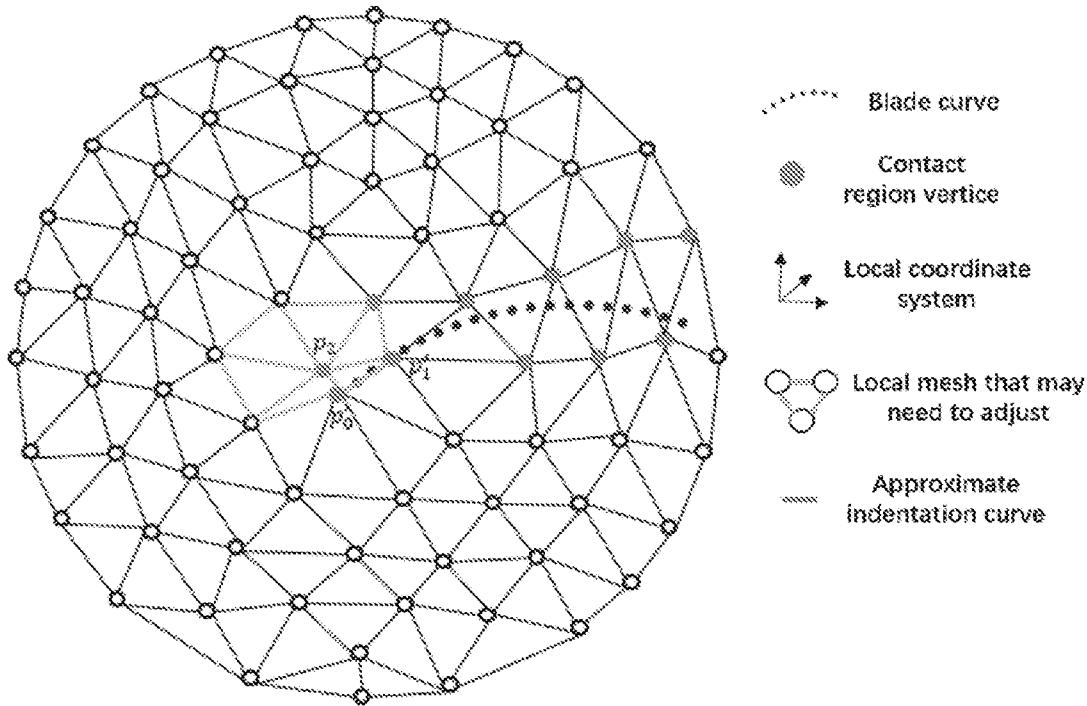


图 4

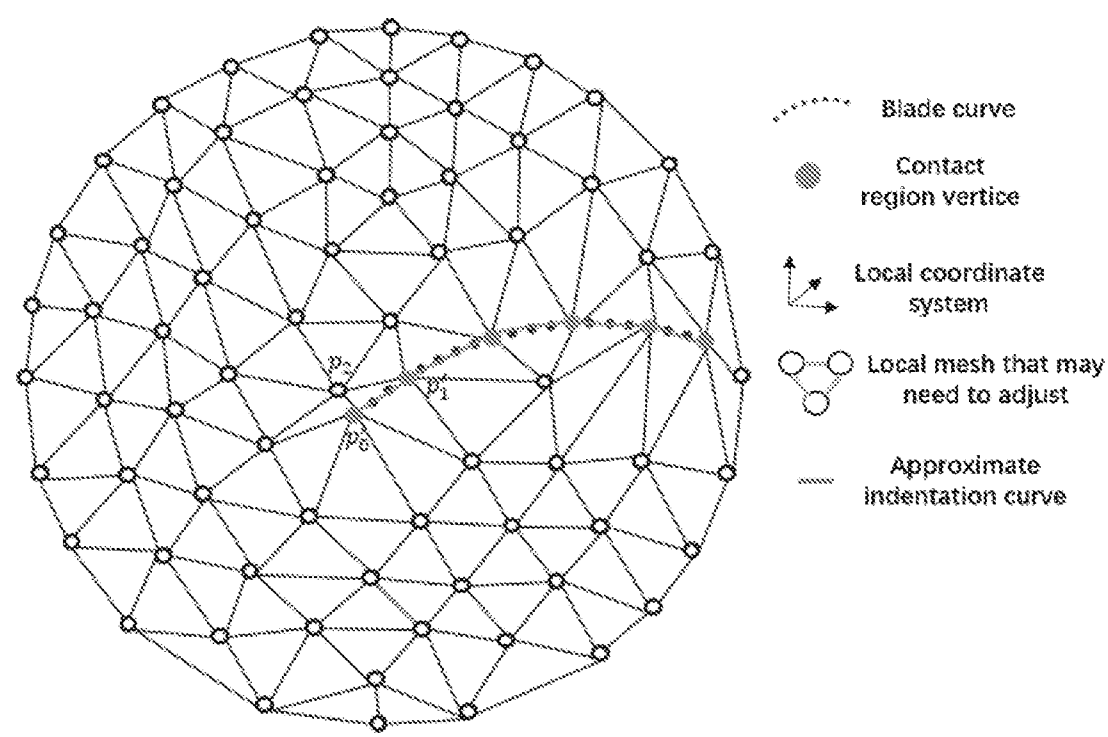


图 5

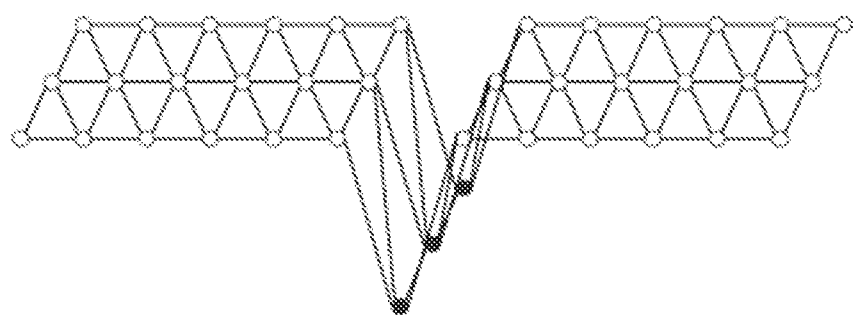


图 6

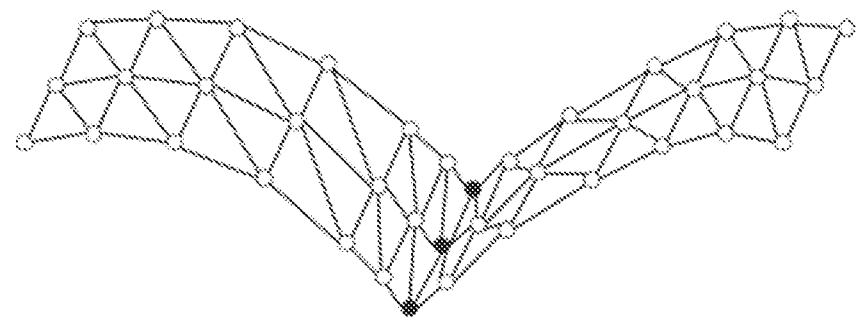


图 7

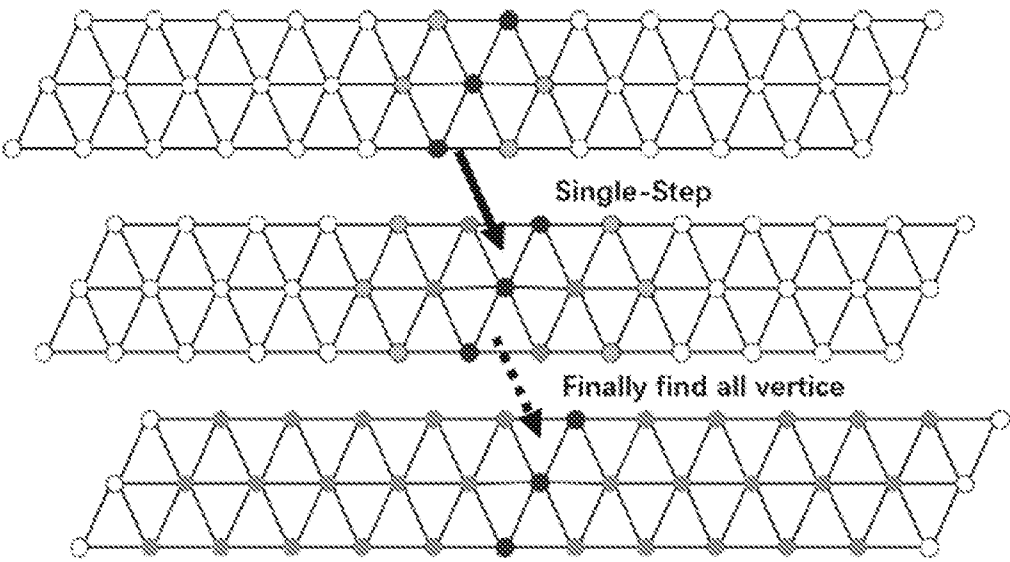


图 8

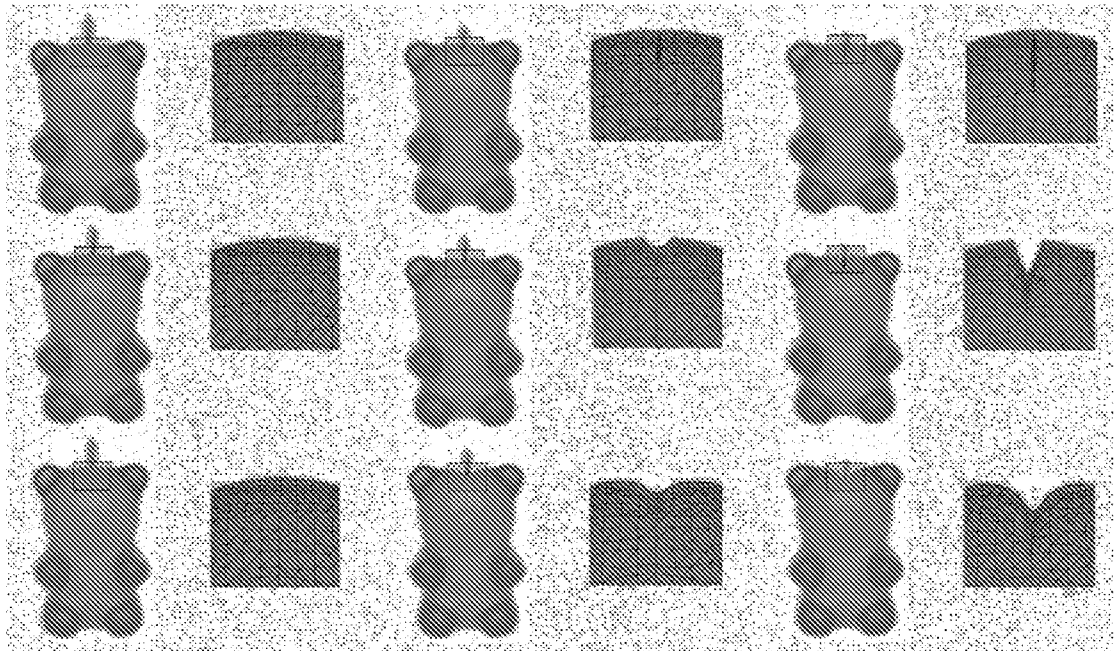


图 9

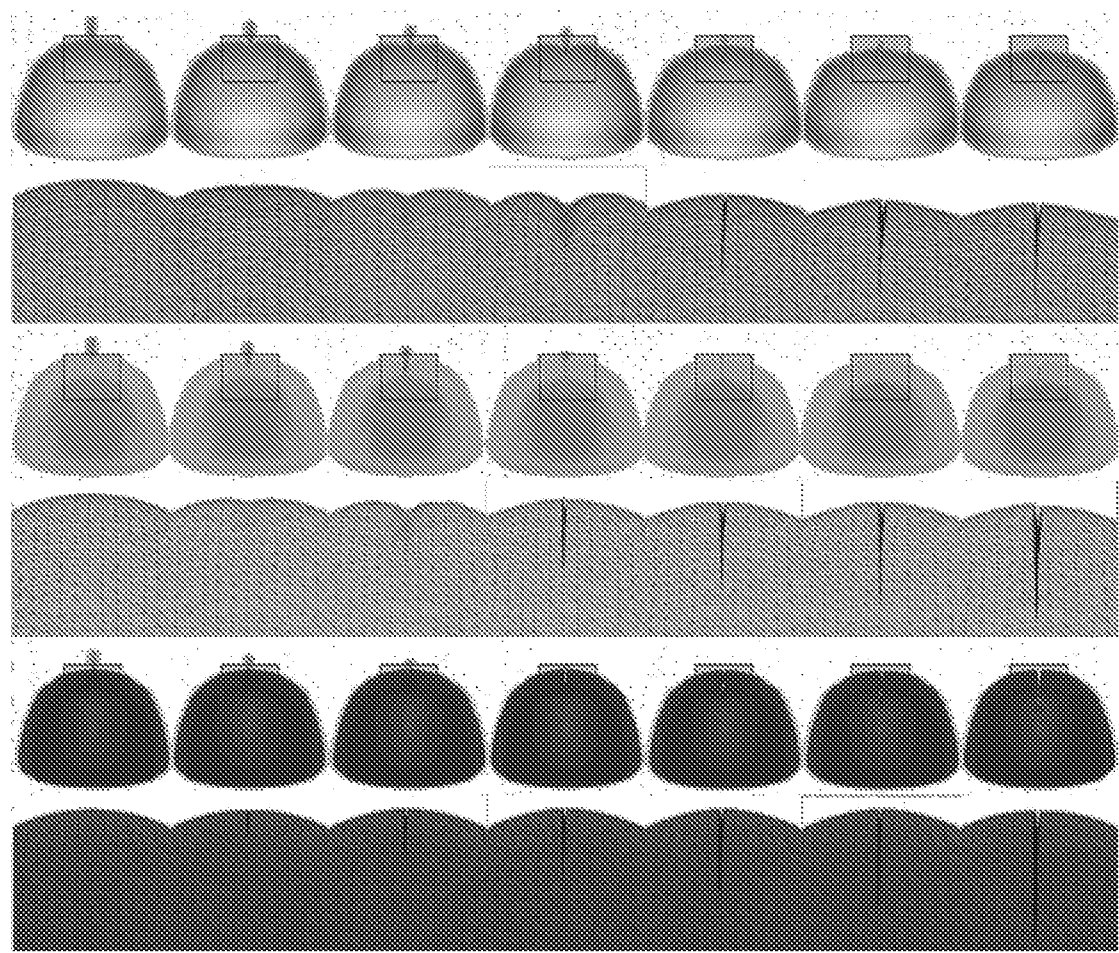


图 10

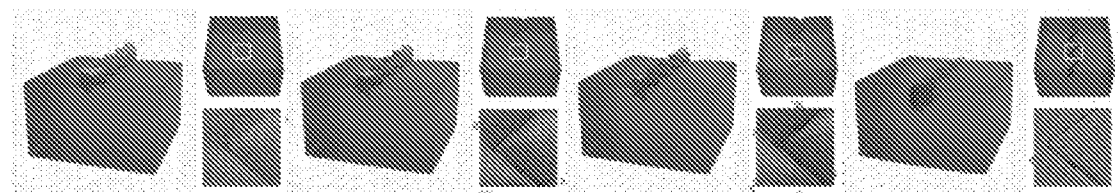


图 11

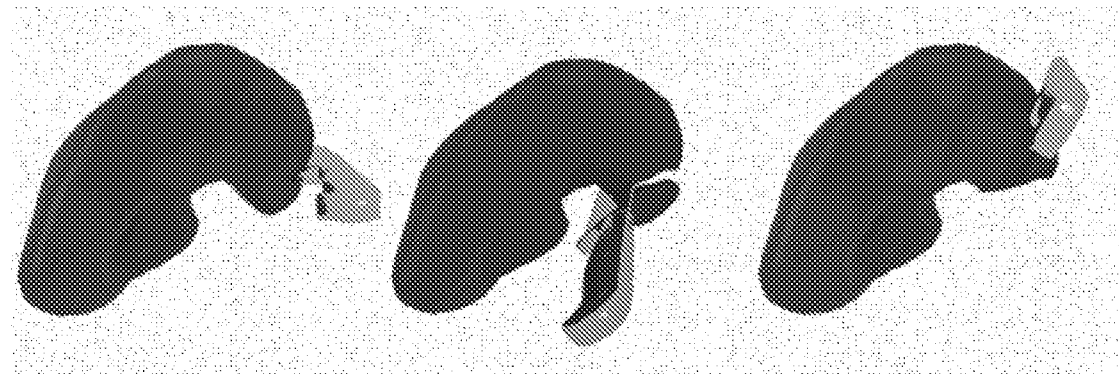


图 12

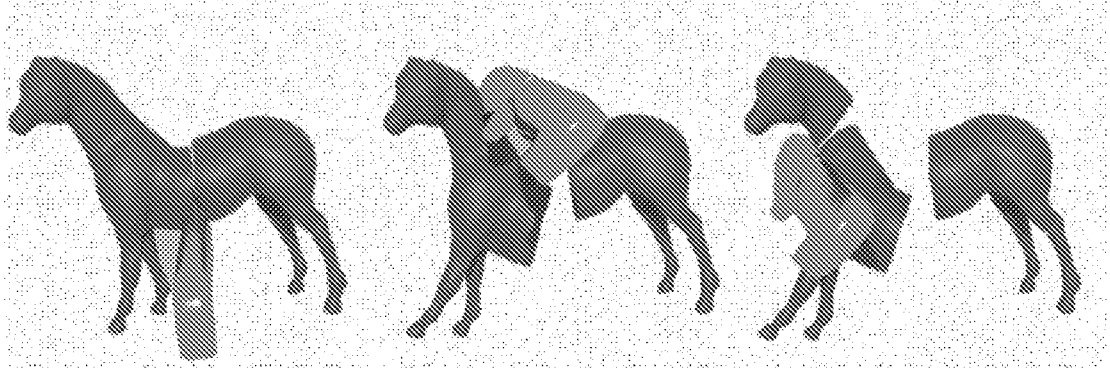


图 13

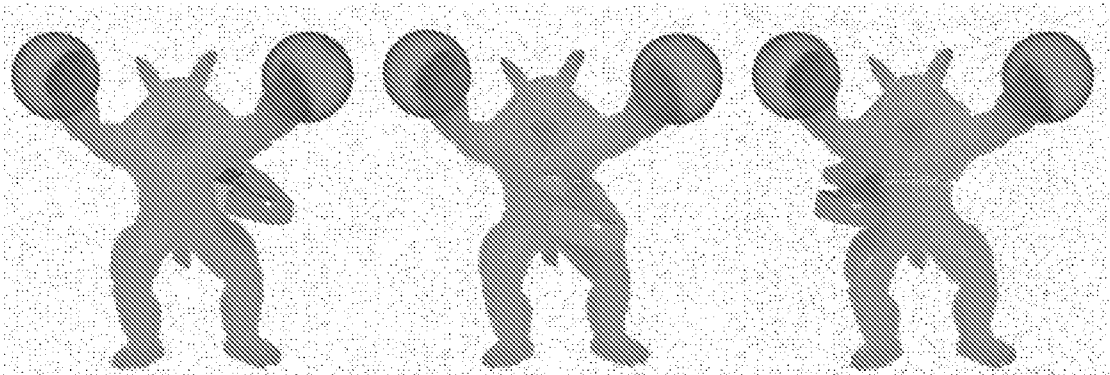


图 14

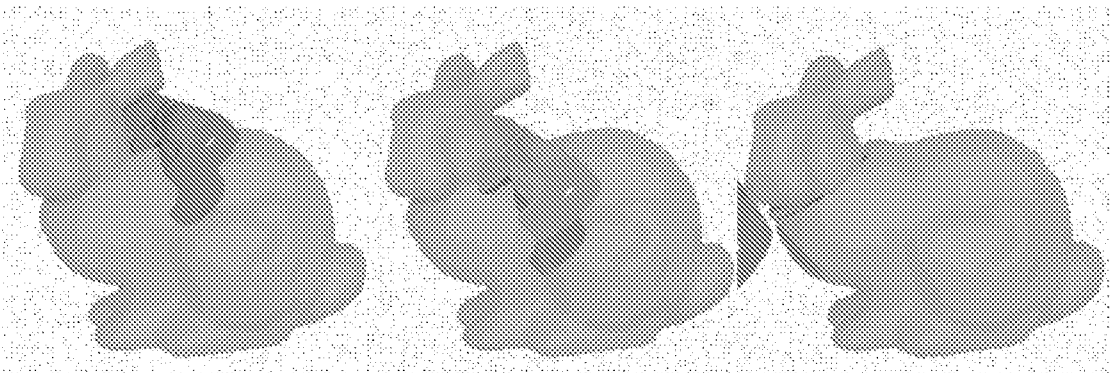


图 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/137665

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F30/23(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F, G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

DWPI, VEN, CNABS, CNTXT, CNKI, IEEE, ENTXT: 变形, 柔性, 仿真, 有限元模型, 网格, 碰撞, 能量, 刀, 压痕, B样条, energy, simulation, shear, finite element, knife, grid, B spline

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 114462265 A (SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY) 10 May 2022 (2022-05-10) claims 1-10	1-10
X	CN 111144043 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 12 May 2020 (2020-05-12) description, paragraphs 0031-0161	1, 10
A	CN 106932271 A (XIAMEN UNIVERSITY) 07 July 2017 (2017-07-07) description, paragraphs 0009-0026	1-10
A	CN 105302974 A (BEIHANG UNIVERSITY) 03 February 2016 (2016-02-03) entire document	1-10
A	CN 112965440 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 15 June 2021 (2021-06-15) entire document	1-10
A	US 2005010326 A1 (HAYWARD, Vincent et al.) 13 January 2005 (2005-01-13) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 February 2023

Date of mailing of the international search report

15 February 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/137665

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	114462265	A	10 May 2022	None			
CN	111144043	A	12 May 2020	None			
CN	106932271	A	07 July 2017	None			
CN	105302974	A	03 February 2016	None			
CN	112965440	A	15 June 2021	None			
US	2005010326	A1	13 January 2005	CA	2469103	A1	28 November 2004

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/137665

A. 主题的分类

G06F30/23 (2020.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G06F, G06T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

DWPI, VEN, CNABS, CNTXT, CNKI, IEEE, ENTXT: 变形, 柔性, 仿真, 有限元模型, 网格, 碰撞, 能量, 刀, 压痕, B 样条, energy, simulation, shear, finite element, knife, grid, B spline

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 114462265 A (深圳先进技术研究院) 2022年5月10日 (2022 - 05 - 10) 权利要求1-10	1-10
X	CN 111144043 A (中国科学院深圳先进技术研究院) 2020年5月12日 (2020 - 05 - 12) 说明书第0031-0161段	1, 10
A	CN 106932271 A (厦门大学) 2017年7月7日 (2017 - 07 - 07) 说明书第0009-0026段	1-10
A	CN 105302974 A (北京航空航天大学) 2016年2月3日 (2016 - 02 - 03) 全文	1-10
A	CN 112965440 A (广东工业大学) 2021年6月15日 (2021 - 06 - 15) 全文	1-10
A	US 2005010326 A1 (HAYWARD, Vincent 等) 2005年1月13日 (2005 - 01 - 13) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年2月8日

国际检索报告邮寄日期

2023年2月15日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

赵昕

电话号码 (+86) 010-53961319

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/137665

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	114462265	A	2022年5月10日	无			
CN	111144043	A	2020年5月12日	无			
CN	106932271	A	2017年7月7日	无			
CN	105302974	A	2016年2月3日	无			
CN	112965440	A	2021年6月15日	无			
US	2005010326	A1	2005年1月13日	CA	2469103	A1	2004年11月28日