

硕 士 研 究 生 读 书 报 告



题目 基于示例材料的高效模拟

作者姓名 张浩

作者学号 21651043

指导教师 李启雷

学科专业 软件工程

所在学院 软件学院

提交日期 二○一七 年 四 月

摘要

该文章主要介绍了有效地模拟引导艺术变形材料的新方法。所使用的例子姿势是通过线性插值来构成定义子空间的理想变形。作为该新方法的一个核心方面，其使用一个不兼容的表示来作为输入和内插的姿势，使其能够单独插入元素之间。这一方法能使我们绕过昂贵的重建步骤，从而实现显着的性能改进。作为一个自然的延续，还提出了一个制定基于实例的可塑性。最后，文章展示了一些新的概念，一些固体和外壳动画，包括艺术变形行为，卡通物理，基于实例的姿态空间动力学。

**关键词**：材料模拟，图形学，线性插值

**Abstract**

This article mainly introduces a new method to simulate the artifacts of guided art. The example posture is used to construct the ideal deformation of the defined subspace by linear interpolation. As a core aspect of this new approach, it uses an incompatible representation as an input and an interpolated posture so that it can be inserted individually between elements. This approach allows us to bypass costly rebuild steps to achieve significant performance improvements. As a continuation of nature, also proposed a formulation based on the case of plasticity. Finally, the article shows some new concepts, some solid and shell animations, including art deformation behavior, cartoon physics, and instance-based attitude space dynamics.  
**Key words**: material simulation, graphics, linear interpolation

1.引言

可变形材料是动画电影、电影和电脑游戏的重要组成部分，因为它们用于动画布料、肉质字符和其他非刚性形状。由于在仿真和采集方法的进步，许多实际材料的变形行为可以非常准确地模拟再现。然而，虽然一些计算机动画材料的目的是匹配真实世界的对应物体，但许多物体在其艺术本质上的区别是很大的，它们都要根据动画师的视角按照一个程式化的方式变形。控制这种艺术直接材料是具有挑战性的因为传统的模型具有直观的参数且并不能直接控制变形。

马丁和他的同事们最近的工作表明，基于实例的弹性材料（EBEM）更适合于造型艺术的变形行为。取代手工选择笨重的参数的是由艺术家提供的一组姿势例子，用以描述理想的变形对象。不幸的是，EBEM提供的控制具有实质的计算成本，因为它需要求解非线性优化问题来重建内插示例姿态的一致的几何表示。他们通过模拟使用基于示例的弹性材料的不兼容的休息形状和兼容的变形配置来达到艺术控制和效率的目的。使用的示例姿势是通过线性插值来定义所需变形的子空间。还将基于示例的模拟范例扩展到贝壳，探索了基于示例的可塑性的优势，并且强调了明确控制示例姿势激活的各种场景是有益的。总而言之，这些贡献在艺术控制和效率方面提供了基于示例的材料，使动画师能够更好地实现其非刚性材料的艺术视野。

2.现状

自Terzopoulos等人的开创性工作以来，模拟可变形材料一直是图形的主要焦点。在接下来的二十五年中，已经将精确度，速度和弹性进行了改进，并将其融入强大的模拟可变形固体，表面和曲线的方法。作为软体模拟的中心组件，对材料行为进行建模，即施加的力与所产生的变形之间的关系受到了很多的关注。虽然许多作品都针对非弹性材料，但大多数应用都是由弹性变形所主导的。许多现有的方法依赖于线性弹性材料定律，其通常不能对艺术应用的变形行为提供足够的控制。然而，动画中使用的艺术材料通常不具有真实世界的对应物，并且手工选择非线性材料模型的参数以获得期望的变形是实际上不可能的任务。一些专门的方法提供了更直观的参数来控制，例如通过对变形施加方向依赖来限制布料的材质表现。然而，只有少数材料可以通过变形极限充分描述。即使在某种程度上变形可以在本地进行控制，通常更需要规定全局的变形行为。例如，一位艺术家可能会对角色如何变形有一个清晰的认识，但是将这个想法转化为传统的材料法很难，甚至是不可能。Martin等人的基于示例的材料提出了一个实际的解决方案，让艺术家可以通过一系列的例子来直接描述变形行为。这与艺术家的典型工作流程非常一致，艺术家通常会使用人物动画塑造变形技术（如混合形状或姿势空间变形）。

在大多数实际应用中，控制动画是必需的。一种方法是计算全局最优控制力，使对象满足通过稀疏密钥帧定义的给定运动目标。另一种方法是使用本地控制器来计算来自较小时间窗口的控制力，例如，具有单个时间步长的大小。进行高分辨率模拟跟踪粗略的输入动画对于动画布局可能是有用的。另一种类型的运动控制可以通过对可变形特征的其余形状进行添加关键帧来实现。

插值形状是几何加工的一个重要问题。已提出的众多解决方案中，文章作者的方法与在变形或应变空间中插值的方法最相关。作为应变空间方案的共同点，内插配置必须被重建为几何。由于不是所有的应变空间配置都具有几何对应关系，所以重建必须以最小二乘法进行。在动画的上下文中，这个要求导致了巨大的计算开销。然而，正如Coros等人所示，重建可以通过使用不兼容的休息形状表示来回避。

3.基于示例的材料

其方法作为输入的可变形对象，其运动方程，在空间中离散化如下图所示：

C:\Users\111\AppData\Roaming\Tencent\Users\741331408\QQ\WinTemp\RichOle\YI1~V17PG{MAOO(@3@I@LNW.png

这里，x和x是物体节点自由度（DOF）的位置和加速度，M是质量矩阵，W i = W（X，x）表示内部势能，X表示物体的未变形配置， 并且由于重力，摩擦力和接触力而导致的外力的总和。按照EBEM范式，向上式添加第二弹性能量项W p，以促进用户指定的内部变形。该能量的其余状态是从示例歧管E动态地选择的，所述示例歧管E是由一组输入示例姿势X i，1≤i≤n所跨越的期望变形的子空间。 每个配置X w = X w（w）∈E由示例姿态唯一地定义，权重向量w =（w 1，...，w m），权重w i对应于X i。在不失一般性的情况下，将给定的变形配置x的距离d E（x）定义为示例歧管：

C:\Users\111\AppData\Roaming\Tencent\Users\741331408\QQ\WinTemp\RichOle\F[SO8JYEP4~1(NOF2I_}W18.png

这里，W p（w，x）= W（X w（w），x）被用作广义距离度量，最小化器X w是最接近x的示例歧管上的点。并且参考从给定的x映射到最接近的X w作为投影的操作。在动画过程中，我们希望始终选择X w作为当前配置x的投影，使得由W p生成的内力直接吸引x到示例文件。除此之外，我们通过最小化将时间积分和投影相结合。

EBEM基于应变空间插值，即每个内插配置E w（w）是输入姿势E i = E（X i）的应变向量的凸组合。这里，E i是单个（四面体）元素的绿色应变向量的级联。内插应变向量E w通常在几何空间中不具有对应的配置。然而，为了定义示例性电位W p（至少对于固体），需要几何信息。因此，必须从应变空间配置E w（w）重构对应于内插配置的几何X w（w）。从给定的应变配置重新构建一个兼容的网格是一个不允许闭合形式解决方案的非线性操作。因此，X w的节点坐标必须被视为显式优化参数，并且X w对应于w的条件通过惩罚项来执行。与普通动画相比，这大大增加了DOG的数量，导致了计算时间的显著增加。

作者的方法是对示例歧管使用不兼容的表示，即我们将示例X i和插值配置X w都表示为断开元素的集合。根据可变形模型，这些元素可以由无旋转参考框架（实体）或边缘长度和二面角（贝壳）表示的顶点位置来表示。由于示例的元素使X i在旋转变量空间中，因此可以将示例空间中的每个配置X w表示为示例构图的元素的线性组合。因此，这就可以绕过需要重构全局兼容的几何，这具有重大的影响：X w是w和X i的显式（线性）函数，不需要引入额外的自由度。分析在EBEM公式中，示例性潜力W p在通过构造的歧管上处于零。这确保了示例空间中的变形是自由的，而远离其的变形将被惩罚。该作者的方法导致了略有不同的图片。当在示例空间中变化X w时，相对于x的W p（X w，x）的最小值在实例中为零，而对于任何其它配置，其不为零。这种能量景观是内插不兼容配置时不能重建成相容几何体却不引入失真而导致的直接结果。这引起了两个潜在的问题：（1）能量最小化可能产生变形构型x朝着W p假定其最小值为零的示例漂移的趋势。 （2）由于W p的最小值在歧管上不是恒定的，所以必须进行一些工作，以便将x从一个示例移动到另一个示例，这可能导致在示例空间中的变形阻力。

为了在实践中估计这些问题的意义，它们必须相对于常规电势W i的变化来看待倾斜变形的形状，如漂移一样，W i抵抗一般的非刚性变形，包括示例性空间中的那些，如阻力。除了用作者的方法创建的许多动画之外，他们还进行了一个额外的实验来分离和量化这些效果。他们使用四面体有限元素和修改的St. Venant-Kirchhoff材料模型来模拟三维固体。评估此能量需要变形和未变形配置的顶点坐标。因此，对于X w的元素使用基于位置的表示是很自然的。

对于可变形对象（未变形配置）的每个四面体元素e，令e i为第i个输入示例姿态中的相应元素，e w为X w中的相应元素。 我们首先将所有元素置于原点，然后提取e和e i之间的旋转矩阵R i。这是通过对两个元件之间的变形梯度进行极化分解来实现的。将e i的顶点位置乘以R Ti导致对应于e的所有元素在公共参考帧中表示。 在这个空间中，元素插值减少到顶点坐标的插值。e w的每个顶点p j因此可以表示为



其中p ji是在公共参考系中表示的e i的对应顶点。值得注意的是，在此设置中，顶点坐标的插值等效于内插共同旋转的柯西应变。最后，由于输入示例的姿势不改变，所以仅需要计算一次参考帧作为预处理步骤。

为了模拟薄壳和布，作者使用了Grinspun等人的离散壳模型。在这种情况下，弹性电势被定义为未变形和变形构型之间边缘长度和二面角差异的函数。因此，根据这些基本元素而不是顶点位置来表示X w是很自然的。作者在示例姿态的各个边缘长度和二面角之间进行线性内插。再次，由于插值配置仅用于计算示例电位W p的休止状态。

4. 基于示例的可塑性

使用实例对弹性（可逆）变形行为进行建模具有许多有用的应用，因此希望以类似的方式控制塑性（持续）变形。作者的框架可以以自然的方式扩展，以支持这种基于示例的弹性塑料材料。概述我们的固体和壳体模型以不同的方式测量变形（张量与标量），从而实现可塑性所需的不同方法。然而，在这两种情况下，基本概念是相同的：我们要限制塑性变形到由一组输入形状的插值定义的空间。根据塑料材料模型的典型设计，我们通过修改常规电位W i的其余形状来实现基于示例的可塑性，确保修改保留在所需的子空间中。通过存储元素转换，即用于固体的塑性变形梯度和用于外壳的边缘长度和二面角的塑性偏移来减少塑性变形。可以使用基于示例的可塑性模型来仅修改常规的弹性电位W i，但也可以与基于示例的电位W p耦合。在这种情况下，我们另外修改W p以适当地反映塑性变形。由于未变形的姿态始终是W p的一个例子，所以作者简单地将相同的元素塑性变换应用于为W i。

作者还扩展了Irving等人的弹性实体模型，使用基于将变形梯度F = F e F p分解成弹性和塑性部件的乘法方法的塑性变形。作者跟踪塑料变形存储F -1p，这简化了弹性变形F e = FF -1p的计算。在模拟步骤n之后，使用其弹性变形梯度F e，n = U nΣn V T n的奇异值分解（SVD），对每个元素计算步骤n + 1的塑性变形。更新规则如下图：



其中Σn = det（Σn）-1/3Σn，γ是塑性变形率。注意，该公式确保塑性变形是体积保持，因为V n是正交矩阵，并且Σn通过定义具有单位行列式。塑性变形率计算如下：



其中τ是塑性屈服阈值，||σ|| F是柯西应力张量σ的Frobenius范数。 为了获得σ，我们首先计算第二个Piola Kirchoff应力



其中C = F T F是正确的柯西绿张量。 然后柯西应力如下：σ= J -1 FSF T其中J = det（F）。上式中的参数τ控制在发生塑性变形之前需要多少弹性变形。由于我们希望塑性变形仅在输入示例所跨越的空间中发生，所以我们在每个元素的基础上执行这个条件。在这种情况下，最方便的是表示输入示例以及内插配置。假设四面体，首先将其当前的绿色应变E = 1/2 \*（C-1）投影到元素的示例空间上。这导致计算一组权重w =（w 1，...，w n）T，使得预计的应变



最小化距离度量d = || E-Eproj||F。如果距离d太大，变形距离所需的子空间很远，应当尽量阻止塑性变形。这可以通过将塑性屈服准则修改为τ0 =τ+ηd来方便地进行，其中η控制d对塑性流动开始的影响。

参考文献

[1] Efficient Simulation of Example-Based Materials．Christian Schumacher， Bernhard Thomaszewski ，Stelian Coros ，Sebastian Martin ，Robert Sumner， Markus Gross，Disney Research Zurich ，DOI 10.2312/SCA/SCA12/001-008，2012

[2] L IPMAN Y., S ORKINE O., L EVIN D., C OHEN -O R D.: Linear rotation-invariant coordinates for meshes. In Proc. Of ACM SIGGRAPH ’05 (2005), pp. 479–487.

[3] C OROS S., M ARTIN S., T HOMASZEWSKI B., S CHU - MACHER C., S UMNER R., G ROSS M.: Deformable objects alive! In Proc. of ACM SIGGRAPH ’12 (2012)