**高效的处理布料与织物模拟—<<** Anisotropic Elastoplasticity for Cloth, Knit and Hair Frictional Contact**>>**

近三十年来，基于物理的弹性表面和曲线的动画一直是计算机图形学的一个重要方面。无论是虚拟服装中的不同层次的衣服，还是头顶上的个别发丝，甚至是针织服装中的纱线，这些材料的碰撞和接触现象对于基于物理的模拟所提供的丰富性和真实性都是至关重要的。不幸的是，这些材料的薄的性质使得碰撞检测和解决具有挑战性。这个过程往往是现代视觉效果的瓶颈。在最近通过弹塑性表征颗粒材料摩擦接触的方法基础上[Daviet和Bertails-Descoubes 2016；Klár等人2016；Narain等人2010]，文章提出了一种新的二维弹性方法，使用混合拉格朗日/欧拉材料点方法（MPM[Sulsky等人1994]）离散化来模拟摩擦接触的连续体视图。与传统方法不同，文章的弹塑性描述完全表征了连续体中所有的碰撞/接触反应连续体中的所有碰撞/接触反应，不需要单独的后处理。

二维弹性物体自然是用拉格朗日网格来表示。这种方法是由Terzopoulos等人[1988年；1987年]在图形学中开创的，至今仍主要使用。在拉格朗日网格模型中，单个粒子被跟踪，网格多边形或片段被用来近似材料变形映射的空间导数（通常被称为变形梯度）。在这种拉格朗日视角下，弹性力学会得到一个很自然的离散化。然而，需要额外的建模手段来处理自我和外部接触的影响，因为这些现象可能会导致网格中遥远区域之间的相互作用。例如，像点和三角形这样的网格面或线段之间在一个时间步长内不能发生穿透。要实现这些限制，除了刚才的提到的对弹性建模，我们还需要一些其他的处理手段。比如互斥惩罚法，动力学的线性补方法。

欧拉视角是拉格朗日视角的一个有效替代方案。在欧拉视角中，当材料在域中流动时，解的离散采样可以在静止的背景网格上被计算出来。拉格朗日方法需要两个不同的算法组成部分：弹性建模和碰撞/接触求解，而欧拉方法通常不需要。接触的行为被表达为材料本身的行为。例如，对于自由表面不可压缩的流动，除了强制执行的速度发散条件外，没有强加任何自我碰撞模型。最近，许多研究人员已经利用欧拉方法的一些优势来设计弹性材料的碰撞和接触弹性材料的碰撞和接触处理。对于弹性物体，需要准确处理对流，以保持材料的准确静止状态，例如Levin等人[2011]中对体积物体的处理令人印象深刻。然而，这对二维弹性来说是困难的。

混合拉格朗日/欧拉方法试图结合两种观点的好处。例如，Particle-In-Cell（PIC）和MPM结合了拉格朗日视角的对流和规则背景网格的动量更新。不同的研究者已经开发了这种类型的方法，意图简化拉格朗日方法的接触，或提高欧拉方法的对流精度。例如，McAdams等人[2009]使用FLIP和欧拉不可压缩性来有效地对头发进行自我碰撞建模。Petrovic等人[2005]使用了一种混合方法，其中拉格朗日视角下的毛发速度场在欧拉网格上被平滑化。Faure等人[2007]也使用了一种混合方法，在将质量、动量和密度映射到欧拉网格后，为拉格朗日物体定义了交互惩罚和约束。MPM与此有一些相似之处，可以模拟各种弹性材料的接触，而无需单独的碰撞模型。Jiang等人在2015年模拟了与MPM接触的体积超弹性物体。最近，多位作者表明，沙子的摩擦接触可以用适当的塑料流的混合离散化来建模。

文章也提供了一种混合拉格朗日/欧拉的MPM方法。其重新设计了余维物体在欧拉视角下的接触能量，并使用MPM方法做离散化。并且其方法计算效率高，本质是由于处理接触的本构模型足够简单。不仅如此，该方法天然的能够耦合多种材料。文章通过模拟一系列具有数百万自由度的耦合弹性表面和曲线、流体和颗粒材料，仅需每帧几分钟的时间，证明了其高效性。文章研究了MPM中基于网格的动量更新的隐式和显式版本。对于显式时间步长，文章开发了一种新的阻尼模型，它不惩罚刚性运动，而且与标准方法如Rayleigh阻尼不同，它不影响时间步长的限制。总结看来，文章给出了以下的结果：

1) 给出了一个弹性模型，将表面或曲线中的弹性反应与正交方向的接触反应简洁地联系起来。

2) 给出了一个各项异性的塑性模型，其可以处理弹性表面以及曲线之间的摩擦。

3) 提出了一个回映算法，用于塑性流的离散化。

4) 给出了一个显式的damping模型，其不会惩罚刚体形变。