

6-14-2018

## Detail-Preserving Shape Deformation in SPH Fluid Control

Feng Gang

*1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;;*

Shiguang Liu

*1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;;2. Tianjin Key Laboratory of Cognitive Computing and Application, Tianjin 300350, China;*

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 Original Article 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.

---

## Detail-Preserving Shape Deformation in SPH Fluid Control

### Abstract

**Abstract:** It remains a challenging problem to drive particles-based fluid simulation to match target shape and deform fluid shape between different models smoothly in fluid control, especially when the natural fluid motion should be preserved. To achieve the desired behavior, the models are divided into source objects and target objects, and the control particles are generated from them. *According to a space point correspondence between source control particles and target control particles, the control particles' movements are calculated which drive fluid to match different models. The control energy from source control particles is transferred to target control particles so as to avoid the leak of control energy and preserving fluid detail.* The effectiveness of the method was demonstrated in various scenarios.

### Keywords

fluid simulation, fluid control, detail preserving, fluid deformation, SPH

### Recommended Citation

Feng Gang, Liu Shiguang. Detail-Preserving Shape Deformation in SPH Fluid Control[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2368-2376.

# 细节保持的 SPH 流体形变约束控制

冯刚<sup>1</sup>, 刘世光<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300350; 2. 天津市认知计算与应用重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 在流体控制研究中, 保留丰富的流体运动细节和控制流体在不同目标形状之间形变是极具挑战性的一类问题。为了解决这类问题, 提出一种细节保持的 SPH 流体形变约束控制新方法。将目标形状分为源模型和目标模型, 并分别对其体素化得到源控制粒子和目标控制粒子。根据源和目标控制粒子的空间对应关系驱动源控制粒子移动, 并通过控制粒子的运动驱动流体粒子运动以实现流体形变。通过源到目标粒子的能量转移方法避免流体形变过程控制力缺失的问题, 以保留丰富的流体细节。通过不同的实验场景验证了该方法的有效性。

**关键词:** 流体模拟; 流体控制; 细节保持; 流体形变; SPH

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 06-2368-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806046

## Detail-Preserving Shape Deformation in SPH Fluid Control

Feng Gang<sup>1</sup>, Liu Shiguang<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Cognitive Computing and Application, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** It remains a challenging problem to drive particles-based fluid simulation to match target shape and deform fluid shape between different models smoothly in fluid control, especially when the natural fluid motion should be preserved. To achieve the desired behavior, the models are divided into source objects and target objects, and the control particles are generated from them. According to a space point correspondence between source control particles and target control particles, the control particles' movements are calculated which drive fluid to match different models. The control energy from source control particles is transferred to target control particles so as to avoid the leak of control energy and preserving fluid detail. The effectiveness of the method was demonstrated in various scenarios.

**Keywords:** fluid simulation; fluid control; detail preserving; fluid deformation; SPH

## 引言

流体控制是流体模拟中的关键技术之一, 其在自然现象模拟、动画设计、影视特效等领域有着广泛的应用。但是, 由于流体运动的非线性特征和不

可预测性, 保留流体丰富细节的同时控制流体形成特定的目标形状是非常困难的。特别的, 控制流体在不同目标形状之间平滑的形变是流体控制研究中非常有意义的一类问题, 例如一只由水构成的兔子平滑地变为一辆汽车等。流体模型平滑形变需要考虑不同目标形状的差异性, 同时还需要在形变过程中保留丰富的流体细节, 这使得这类控制问题变得更加复杂。

目前的流体形状控制方法主要包括基于细节保



收稿日期: 2016-05-10 修回日期: 2016-08-04;  
基金项目: 国家自然科学基金(61672375, 61170118),  
天津市自然科学基金(14JQCQNJC00100);  
作者简介: 冯刚(1992-), 男, 山东济宁, 硕士生, 研究方向为流体仿真与交互控制; 刘世光(通讯作者  
1980-), 男, 山东临沂, 博士, 教授, 博导, 研究方向为可视化仿真、计算机图形学、虚拟现实等。

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

• 2368 •

持的控制方法<sup>[1-2]</sup>和基于目标驱动的控制方法<sup>[3-4]</sup>。基于细节保持的流体控制方法在对流体控制的同时更加关注流体细节的表达,而基于目标驱动的流体控制方法更加关注流体向目标形状匹配的效果和效率等。

基于细节保持的流体控制方法:对于流体控制,由于固有的数值耗散产生的湍流损失会导致流体细节不够真实。Fedkiw<sup>[5]</sup>提出了用涡流约束来放大网格中现有的流体的涡流,但是如果网格不够精细,涡流约束也无法恢复涡流原来的效果。文献[6-8]采用自适应的方法在高分辨率网格中建模湍流细节,但是当移出高分辨率区域以后,湍流会难以保持。Selle等<sup>[9]</sup>采用涡流粒子来模拟涡流效果,可以建模旋转的效果并把旋转力传回给网格。Park等<sup>[10]</sup>则通过分布于整个网格的涡流粒子并采用拉格朗日方法传输涡度来模拟气体现象。之后一些其他的网格粒子耦合的方法(如文献[11-12])使用涡流粒子在欧拉网格中模拟逼真的湍流效果,然而这些方法不能简单推广到其他特殊情况。

之后 Thürey 等<sup>[2]</sup>和 Rasmussen<sup>[13]</sup>提出的基于控制粒子的控制方法,通过控制粒子来调整液体的流速,粘度和其它性能,以达到控制流体的目的。但该方法无法实现流体在形状控制过程中动态效果,并且填充效率不够高。此外,这种基于控制粒子的控制方法缺少目标驱动控制,在目标形状差异较大时不能有效地实现流体形状的平滑形变。

Zhang 和 Liu<sup>[1]</sup>在细节保留上对 Thürey 等<sup>[2]</sup>的方法做了改进,根据目标形状表面曲率细节计算流体涡度值,产生涡度字节更加丰富的流体细节。此外, Ren<sup>[14]</sup>和 Cornelis<sup>[15]</sup>在流体细节保持上做了有效的拓展,但是这些方法在流体控制上跟 Thürey 方法类似,缺乏特定目标形状的控制。

基于目标驱动的流体形状控制方法:对流体的控制方法最早由 Foster 和 Metaxas 通过使用嵌入式控制器引入计算机图形学<sup>[16]</sup>,之后 Treuille 等<sup>[17]</sup>开创性的提出了一种基于关键帧的控制方法,他们将流体控制视为流体方程组的一部分并通过最小

化目标函数的方式来求解控制力。这种方法由于计算耗费过于昂贵,所以在实际应用中并不理想;为改善效率,与关键帧方法不同, Shi 和 Yu<sup>[18-19]</sup>提出了一种高效烟雾模拟的方法,通过匹配水平集表面和目标形状来控制流体。文献[19]介绍了用于液体自由表面的新技术,其中的一个比例微分控制器可跟踪快速变化的形状控制目标; Hong 等<sup>[20]</sup>提出一种基于势能场的目标控制方法,该方法首先推导出流体从初始分布到目标分布的势能场,然后将势能场的梯度作为控制力驱动流体向目标分布变化。

这些基于网格的方法可以有效地实现流体在不同目标形状之间的形变,但是这类方法由于欧拉方法本身的局限性在流体细节表现上有所缺失。而相对欧拉方法,SPH 方法的优势在于它的概念和实施非常简单,特别是在流体细节表现,可扩展性等问题上有着很好的效果。

Madill 和 Mould<sup>[4]</sup>提出基于粒子的目标驱动的控制方法,将控制粒子分为源控制粒子和目标控制粒子,用源控制粒子向目标控制粒子的运动来带动流体粒子形成目标形状。该方法简单直观,但是难以保持流体细节。

针对流体形变控制问题,本文提出一种针对流体在不同目标形状之间平滑形变的形变约束控制新方法。该方法首先将目标模型分为源模型和目标模型。再对源模型和目标模型分别采样得到对应的源控制粒子和目标控制粒子。根据源控制粒子与目标控制粒子的匹配关系,驱动源控制粒子向目标控制粒子运动,实现流体模型平滑形变。此外,本文方法可以实现实时模拟,允许用户自由交互操作。

本文的主要贡献包括:

- 1、提出一种新的细节保持的 SPH 流体形变约束控制方法,能够有效的解决流体模型平滑形变这一问题,同时保持丰富的流体细节。
- 2、提出了一种新的源控制粒子到目标控制粒子的空间对应方法,使得源控制粒子到目标控制粒子的运动平滑、高效。
- 3、针对流体模型形变过程中的流体细节保留

问题,设计了一种新的针对控制能量的能量转移方法,避免了源控制粒子运动后控制力不足的现象,较好地保留了流体细节。

## 1 算法

本文方法的主要思想是利用控制粒子对流体粒子的控制能量,驱动流体向目标形状形变,同时通过控制能量的转移保持形变过程中的流体细节。

### 1.1 SPH 算法基础

SPH 方法的思想是用粒子系统来代表流体,并通过插值的方法估算空间中每个点的标量场<sup>[2]</sup>。采用 Navier-Stokes 方程组对 SPH 方法表示如下:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot u \quad (2)$$

式中:  $u$  代表速度;  $\rho$  是密度;  $p$  是压力;  $f$  是所受的外部力;  $\mu$  是粘度系数。式(1)(2)分别代表流体动量守恒和质量守恒。

在 SPH 方法中,空间中的任意点的标量场都可以通过在一个光滑半径内的所有 SPH 粒子在核函数加权下叠加获得:

$$A(x_i) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(x_{ij}, h) \quad (3)$$

式中:  $A(x_i)$  是空间中  $x_i$  点的某一标量场;  $h$  为核函数的作用半径,在以该点为中心;  $h$  为半径的球体中包含的邻近的 SPH 粒子  $j$  都会参与加权计算;  $A_j$  为 SPH 粒子的携带的标量场;  $m_j$  为 SPH 粒子的质量;  $\rho_j$  为密度;  $x_{ij}$  为  $i$  和  $j$  两粒子间的距离。

### 1.2 控制粒子生成

为了得到用于流体控制的控制粒子,本文首先采用已有的体素化方法<sup>[21]</sup>对网格模型进行采样,即对源模型和目标模型分别采样得到源控制粒子和目标控制粒子。这一方法对被采样网格模型的细节保留较好,同时算法效率较高。但是,对于流体模型形变问题,不仅需要采样出控制粒子,同时还

需要考虑源控制粒子和目标控制粒子的对应关系。

由于流体运动受控制能量驱动,流动性较强,故这里不需要太精细的 3D 体素形变算法。本文通过对采样的控制粒子进行简单的处理,得到满足流体形变需要的体素数据结构。首先将源模型和目标模型的质心调整到相同的位置。之后,所有的控制粒子(包括源控制粒子和目标控制粒子)的位置  $Q_i$  都表示与质心的相对位置  $P_i$ 。最后,对所有的控制粒子  $P_i$  按位置进行排序。得到的控制粒子的相对空间位置较为相似,可被用来实现流体形变。

本文通过对采样得到的控制粒子进行简单的处理,保留了控制粒子之间的空间相对位置信息。尽管这种相对位置信息较简单,但是对于基于 SPH 控制粒子的流体形状控制来说,这样的相对位置信息已经足够解决流体模型平滑形变这一问题。

### 1.3 控制粒子形变

为实现流体模型形变,首先需要计算控制模型的形变。本节将控制模型的形变分为两部分: 1) 控制粒子空间对应; 2) 基于空间对应的控制粒子运动。一方面,本文利用控制粒子的空间相对位置信息来计算源控制粒子与目标控制粒子的对应关系,如图 1(a)所示。另一方面,在得到控制粒子之间的对应关系之后,本文利用基于空间对应的控制粒子运动算法计算源控制粒子到目标控制粒子的运动轨迹,如图 1(b)所示。

#### 1.3.1 控制粒子空间对应

在流体模型形变这一问题中,传统的控制方法<sup>[4]</sup>是将源模型和目标模型分别采样出对应的源控制粒子和目标控制粒子,然后计算源控制粒子和目标控制粒子的点对应关系,最后利用源控制粒子向其对应的目标控制粒子的运动带动流体粒子的运动,从而实现流体在不同目标形状之间的平滑形变。但是,这类方法中的控制粒子对应关系比较生硬,并且要求源控制粒子和目标控制粒子的数量相同。在这种情况下,当源模型与目标模型的体积有

一定差别时,会造成其中一个模型的控制粒子较为稀疏或者过度稠密。而无论是过度稀疏还是过度稠密的控制粒子,都会使得控制粒子对流体粒子的控制力不协调,导致流体模型出现细节上的缺失。

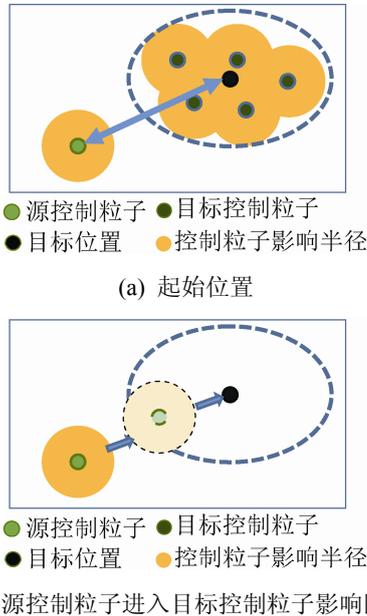


图1 源控制粒子移动过程

Fig. 1 The movement of source control particle

针对上述问题,本文提出一种可以适应源控制粒子和目标控制粒子数目不对等的控制粒子对应关系。首先,通过1.2节得到具有一定空间对应关系的源控制粒子和控制粒子序列。然后,对于得到的源控制粒子集合 $P_s$ 和目标控制粒子集合 $P_t$ ,需要找到两者之间的对应关系,即需要对任意 $P_s$ 中的粒子,都能找到 $P_t$ 区域内的一个对应位置集合 $P_{s \rightarrow t}$ ,使得 $P_s$ 与 $P_{s \rightarrow t}$ 两集合中的元素一一对应。由于采样得到的控制粒子 $P_s$ 和 $P_t$ 密度的均匀性特点, $P_{s \rightarrow t}$ 也需要分布均匀的对应关系,因此本文提出公式(4)~(5)所示的对应关系。

$$P_{s \rightarrow t}(i) = \frac{\sum_{j=i^*r}^{(i+1)^*r} P_t(j)}{r} \quad (4)$$

式中: $P_{s \rightarrow t}(i)$ 为第 $i$ 个源控制粒子对应的目标位置; $P_t(j)$ 为第 $j$ 个目标控制粒子的位置。这里将每 $r$ 个目标位置定义为一个目标簇,每个源位置对应一个目标簇的质心,由于控制粒子质量均匀,目

标簇的质心可以简单的表示为公式(4)。当 $r$ 值为2时控制粒子的对应关系如图2所示。

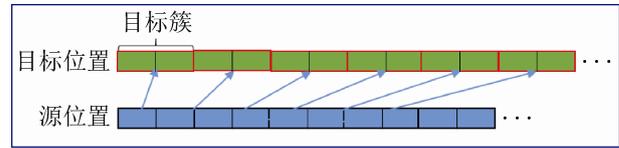


图2 源控制粒子与目标控制粒子对应关系

Fig. 2 The correspondence between source control particle and target control particle

### 1.3.2 基于空间对应的控制粒子运动

源控制粒子向目标控制粒子运动是控制模型形变计算过程非常重要的一部分。好的运动方法可以使模型形变过程更加平滑。此外,为了更好的用户交互,模型形变需要提供相应的控制参数,使用户实现不同场景下的不同效果,其中比较重要的控制参数是形变时间参数。同时,为追求流体控制的实时性,需保证运动轨迹的计算要足够简洁高效。

针对这一问题,本文采用简单的位移插值方法计算源控制粒子的运动轨迹,目的是在对流体控制的同时保持实时性。首先,对于1.3.1节得到源控制粒子集合 $P_s$ 对应的目标位置集合 $P_{s \rightarrow t}$ ,考虑将源控制粒子从初始位置平滑的移动到目标位置。此外,对于用户交互问题,最直观的方法是让用户设定总的形变时间 $T_{total}$ ,那么单位时间的位移量为 $distance(P_{s \rightarrow t}, P_s) / T_{total}$ 。这样做的好处是计算简洁,时间复杂度低,用户操作简单。但是,当源控制粒子的位置逐渐趋于目标位置时,过大的位移会使得被吸引的流体粒子运动过量,从而导致形变过程缺乏平滑性和自然性。

为了实现平滑自然的流体形变,本文提出一种新的策略来计算已知目标位置的控制粒子的运动。首先指定可变的时间步长 $TS$ ,这一参数用来控制形变过程的快慢,即时间步长越大,形变越快,反之越慢;然后,对于 $P'_s$ ,本次迭代源控制粒子的位移量为 $distance(P_{s \rightarrow t}, P'_s) / TS$ 。最后,当位移量大于匹配阈值 $\epsilon$ 时,更新 $P'_s$ 到新位置。算法如下:

**算法** 更新源控制粒子位置

```

1:  $TS \leftarrow \text{TIMESTEP}$ 
2: FOR ALL source control particles  $p_i$  DO
3:   find its target position  $t_i$ 
4:    $move = \text{distance}(t_i, p_i) / TS$ 
5:    $M = |move|^2$ 
6:   IF  $M \geq \varepsilon$  DO
7:     update  $p_i \leftarrow p_i + move$ 
8:   END IF
9: END FOR

```

这里  $p_i \in P'_s$ ,  $t_i \in P_{s \rightarrow t}$ ;  $M$  表示位移量的标量,  $\varepsilon$  为提前设定的匹配阈值。与上文提到的方法不同点在于, 本文方法是根据源控制粒子当前位置计算每次迭代的位移量, 这样做的好处是当源控制粒子距离目标越近时, 位移量越小; 由此使得流体粒子再匹配控制粒子时更加准确。

## 1.4 控制能量转移

### 1.4.1 控制能量计算

在基于控制粒子的流体控制方法中, 控制能量是指由控制粒子对流体粒子做产生的作用力的集合, 流体粒子由于控制能量的作用才能形成特性的目标形状。为保证流体细节的丰富性, 本文控制能量包括粗控制能量<sup>[2]</sup>, 弹簧约束能量<sup>[22]</sup>, 速度约束能量<sup>[2], [22]</sup>等。粗控制能量用来吸引控制粒子构成目标形状; 弹簧约束能量用来修正控制粒子运动过快时流体粒子脱离控制问题; 速度约束能量用来约束被控制粒子的粘性, 调整流体模型表面僵硬程度。

粗控制力是指控制粒子对流体粒子粗糙的吸引力和速度修正力, 用控制粒子的控制力吸引其控制半径  $h$  内的流体粒子向其流动, 达到流体的粗控制效果。该方法主要需要通过控制粒子产生的两种控制力与流体的体积力相叠加获得控制效果, 控制粒子原始的控制力公式为:

$$f_a(j) = w_a \sum_i a_i \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} W(x_{ij}, h) \quad (5)$$

$$f_v(j) = w_v \sum_i (v_i - v_j) W(x_{ij}, h) \quad (6)$$

式中:  $f_a(j)$  为吸引力;  $f_v(j)$  为速度修正力;  $p_i$  为控制粒子  $i$  的位置;  $p_j$  为 SPH 流体的位置;  $a_i$  为一个缩放因子, 可以使得当控制粒子的控制区域覆盖较多 SPH 流体粒子时, 该控制粒子的控制力会依尺度缩小以保持流体的自然特征;  $w_a$  与  $w_v$  是两个调整力的大小与方向的常量, 当他们的值为正时控制力表现为引力, 负值为斥力。

但是公式(5)中  $f_a(j)$  的缩放因子  $a_i$  更注重流体流动的自然性, 而这一控制力还不能高效的吸引流体粒子填充被控制区域, 进而可能会出现部分被控制区域流体缺失的问题。而对于流体形变这一问题, 需要保持形变过程中流体模型填充的完整度。

本文提出了以下策略以提高粗控制下的填充效率: 首先, 本文计算在每个控制粒子位置的流体密度, 得到受控制区域的流体密度场。其中流体粒子填充较好的区域, 密度场较大, 而对于未能充分填充的趋于, 密度场较小。故在计算控制力公式中使用新的缩放因子  $\beta_i$ , 使得控制力在该缩放因子的作用下根据周围的流体粒子的密度做一定尺度的放大。

$$f_a(j) = w_a \sum_i \beta_i \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} W(x_{ij}, H) \quad (7)$$

$$\beta_i = 1 + \frac{\rho_0}{(\rho_i + \mu)} \quad (8)$$

$$\rho_i = \sum_j m_j W(x_{ij}, H) \quad (9)$$

式中:  $\rho_0$  为流体粒子的初始密度;  $\mu$  为不为 0 的缩放因子;  $\rho_i$  为第  $i$  个控制粒子处的密度; 该值已在文献[2]中给出, 如公式(9)所示。综上所述, 第  $j$  个流体粒子收到的粗控制能量如公式(10)所示。

$$E_c(j) = \zeta (f_a(j) + f_v(j)) \quad (10)$$

式中:  $\zeta$  为能量缩放因子。

在源控制粒子的运动过程中, 会出现控制粒子运动过快导致流体粒子突发性的脱离控制的现象。为解决这一问题, 本文使用弹簧约束力来控制运动过快状态下流体粒子飞溅问题。本文使用流体粒子和控制粒子的距离作为关键参数, 即找到距离当前

流体粒子最近的控制粒子,当流体粒子正在远离控制粒子时,控制粒子会对其有一个拉力,使得回到其控制范围内。当流体粒子距离控制粒子太近时,控制粒子会对其有一个推力。弹簧约束公式如下:

$$f(d) = \frac{1}{1 + e^{\gamma - \delta d}} \quad (11)$$

式中:  $d$  为流体粒子到控制粒子的距离,  $\gamma$  和  $\delta$  为调整弹簧力的可变参数, 则弹簧约束能量如公式(12)所示。

$$E_s(j) = \psi f(|r_j - q_j|) \left| \frac{r_j - q_j}{|r_j - q_j|} \right| \quad (12)$$

这里  $\psi$  被用来调整弹簧约束的强度,  $r_j$  表示第  $j$  个流体粒子的位置,  $q_j$  表示与  $r_j$  距离最近的控制粒子的位置。

速度约束用来调整运动流体的僵硬程度。在某些场景中,用户需要实现流体在不同僵硬程度下的运动特效。所以,需要引入速度约束来约束流体的流动性。本文采用文献[14]中提到的速度约束来调整流体的僵硬程度,这一方法可以使流体粒子在向目标形状运动时联系更紧密。首先,针对每一个流体粒子,利用与它临近的所有控制粒子进行插值得到它的速度约束,这里用  $\Delta v_j$  表示第  $j$  个流体粒子所受的速度约束,如公式(13)所示。

$$\Delta v_j = \frac{\sum_i v_i W(x_{ij}, h)}{\sum_i W(x_{ij}, h)} \quad (13)$$

式中:  $v_i$  表示第  $i$  个控制粒子的速度,  $v_j$  表示流体粒子的速度。那么,速度约束的能量为:

$$E_v(j) = \eta(\Delta v_j - v_j) \quad (14)$$

式中:  $\eta$  是比例因子,用来控制速度约束的强度。

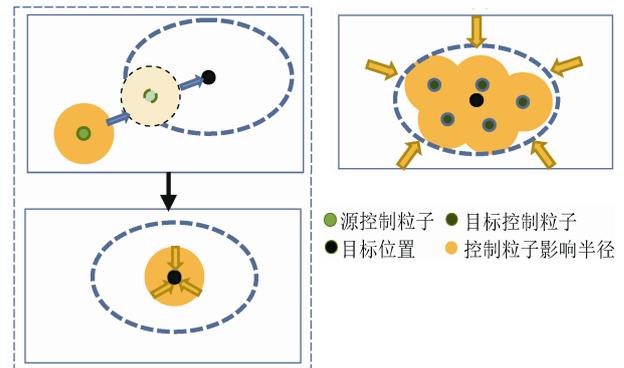
综上所述,第  $j$  个流体粒子受到的总控制能量如公式(15)所示。

$$E(j) = E_c(j) + E_s(j) + E_v(j) \quad (15)$$

#### 1.4.2 基于控制能量转移的细节保持

在源控制粒子带动流体粒子向目标位置的运动过程中,控制粒子到达目标位置后所提供的控制力如图 3(a)所示,其中目标位置对流体所提供的驱

动能仅由源控制粒子提供。但是理想状态下目标位置所提供的能量应该为目标控制粒子所提供控制能量的总和,如图 3(b)所示。故目标控制粒子簇越大,目标模型的控制力损失就越大。并且,由于源控制粒子的运动轨迹相对粗糙,流体形变缺乏平滑性,流体模型会出现局部的生硬变化,如棱角等。



(a) 控制粒子形变前 (b) 控制粒子形变完成后

图 3 基于控制能量转移的细节保持效果

Fig. 3 The detail preserving effect by control energy transferring

针对这一问题,本文提出了一种基于控制能量转移的方法,即在源控制粒子运动过程中将控制能量转移到目标控制上,当形变运动结束,控制能量将全部由源控制粒子转移至目标控制粒子。初始状态所有的控制能量只与源控制粒子有关;随着源控制粒子向目标控制粒子移动,两者之间的距离减小,目标控制粒子提供更多的控制能量。另一方面,源控制粒子到目标控制粒子的运动过程存在一个基础的变量—时间变量  $t$ , 故采用如下方法: 分别定义关于  $t$  的时间函数  $\omega(t)$  和  $\theta(t)$ 。有如下公式:

$$E_{\text{total}} = \omega(t) \cdot E_{\text{scp}} + \theta(t) \cdot E_{\text{tcp}} \quad (16)$$

总控制能量  $E_{\text{total}}$  由源控制粒子的控制能量  $E_{\text{scp}}$  和目标控制粒子的控制能量  $E_{\text{tcp}}$  的综合, 由与时间  $t$  相关的函数  $\omega(t)$  和  $\theta(t)$  调整。能量转移过程如图 4 表示, 其中图 4(a)表示能量转移前控制能量分布情况; 图 4(b)表示能量转移过程; 图 4(c)表示能量转移后控制能量分布情况。

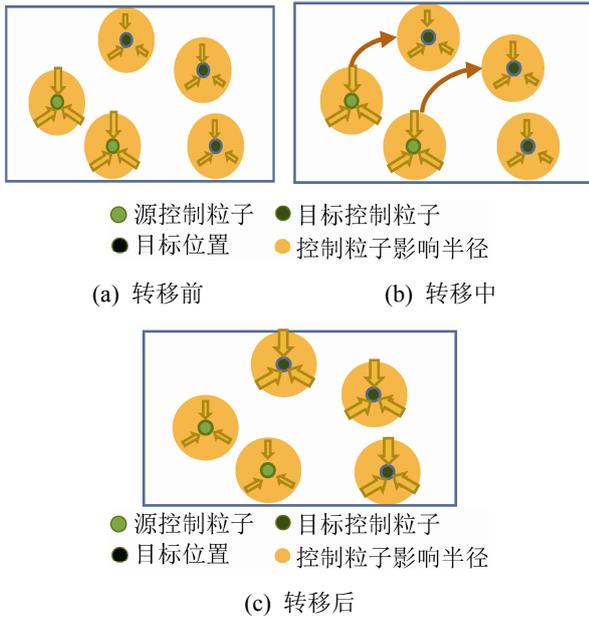


图4 能量转移过程  
Fig. 4 Illustration of the energy transfer

## 2 实验及结果分析

本文的实验环境为 HP 台式机, CPU 为 INTEL Core i5 4460, 显卡为 NVIDIA GTX745。本文所有的实验均由 C++ 和 CUDA 7.0 实现, 实验结果渲染采用离线渲染方法。

图 5 展示了控制粒子的运动过程。其中源模型为图 5(a)所示的图形, 目标模型如图 5(d)所示。模型形变算法使得源控制粒子沿对应的轨迹运动, 逐步形成目标形状。

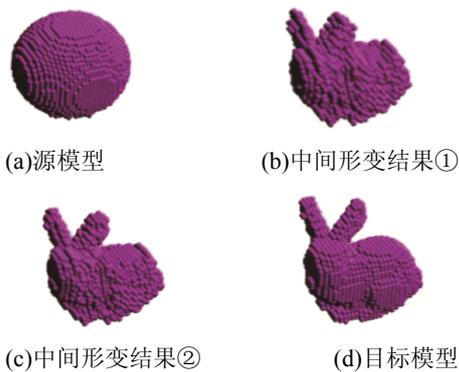


图5 源控制粒子运动过程  
Fig. 5 The movement of the source control particles

图 6 展示了细节保持的 SPH 流体形变效果。

在本次实验中, 首先将图 5(a)和图 5(d)所示的模型分别作为源模型和目标模型导入控制系统, 然后根据流体形变控制管线计算形变过程。

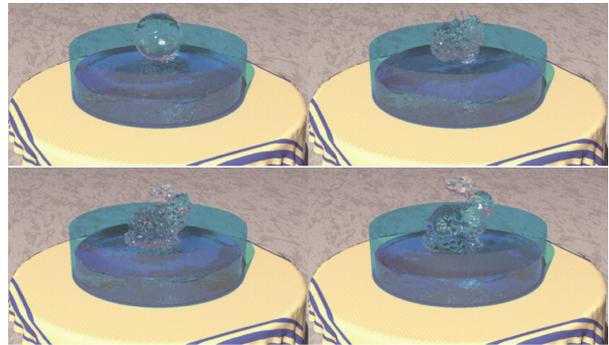
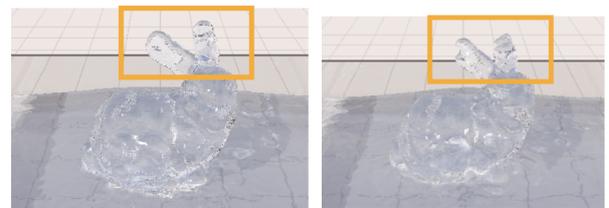


图6 细节保持的 SPH 流体形变约束控制效果图  
Fig. 6 Detail-Preserving shape deformation result of SPH fluid

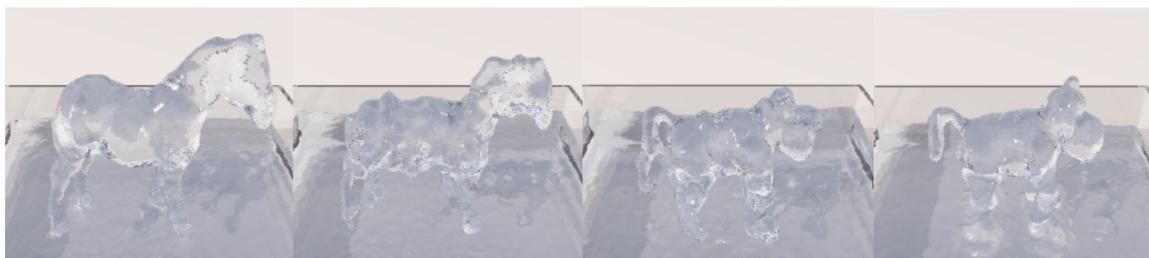
图 7 对比了在有控制能量转移和没有控制能量转移的情况下形变效果。传统的基于目标驱动的流体控制方法由源控制粒子提供控制能量, 目标控制粒子不对流体粒子提供控制能量。本文考虑流体形变过程的细节保持, 加入了控制能量转移方法。有控制能量转移的实验可以有效地填充目标模型中黄色框标注的部分, 反之不能较好的填充。



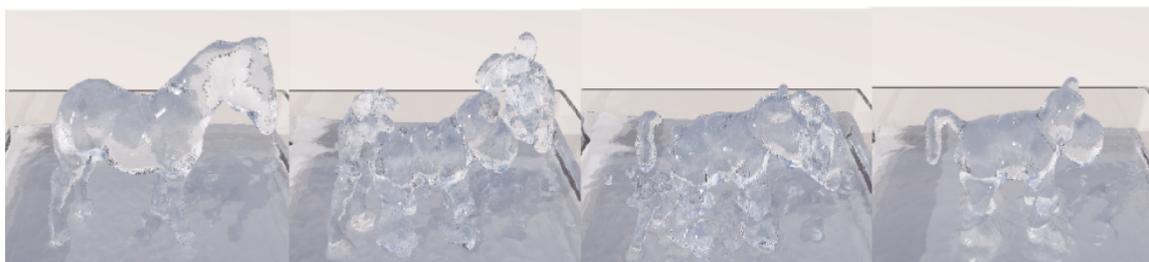
(a) 有控制能量转移 (b) 无控制能量转移

图7 形变效果对比  
Fig. 7 Comparison of the shape deformation result

图 8 对比了有无形变约束的情况下流体模型形变的差别。其中图 8(a)为有形变约束时流体形变效果, 可以看到流体模型由源模型渐变到目标模型, 变形过程没有流体飞溅等现象。图 8(b)为传统的基于细节保持的流体控制效果, 这类方法由于没有形变约束的限制, 从实验中可以观察到有明显的流体飞溅现象。



(a) 有形变约束



(b) 无形变约束

图 8 有形变约束和无形变约束时的效果对比

Fig. 8 Comparison of the deforming results with deforming constraint and without deforming constraint.

表 1 展示了方法在不同场景下的时间效率。本文对所有的实验均采用相同的作用半径。由表中可以观察到, 本文方法可以实现实时模拟。

表 1 不同场景下方法性能对照表

Tab. 1 The performance of our method under different simulation scenes

| 实验场景 | 流体粒子(千个) | 源控制粒子(千个) | 目标控制粒子(千个) | 总时间(帧/s) |
|------|----------|-----------|------------|----------|
| 图 6  | 150      | 10        | 9          | 16.235   |
| 图 7  | 100      | 5         | 9          | 20.224   |
| 图 8  | 100      | 4         | 5          | 22.479   |

### 3 结论

本文提出一种新的基于 SPH 的流体形变控制方法, 该方法可用于解决流体在不同模型之间平滑形变的问题。本文方法主要包括两部分, 分别是控制模型形变和基于控制能量转移的细节保持。控制模型形变可以用来驱动流体粒子的运动, 从而实现流体模型的形变, 而能量转移策略可以在控制粒子运动过程保持流体细节。本文方法可以有效的实现流体模型平滑形变, 而且该方法在性能上可以实现实时的流体模拟。展望将来的工作, 本文希望在以

下方面进行改进:

- 1、改进涡流生成方法, 加入更多涡流细节。
- 2、改进约束方法, 减小在控制粒子运动过程中流体粒子的飞溅问题。
- 3、通过减少控制力带来的粘性力, 改进带有涡度的 SPH 粒子的生成方法使其更加符合物理特性的用户交互。

### 参考文献:

- [1] Zhang XiaoYong, Liu ShiGuang. SPH fluid control with self-adaptive turbulent details[J]. Computer Animation and Virtual Worlds (S1546-4261), 2015, 26(3): 357-366.
- [2] Thürey N, Keiser R, Pauly M, et al. Detail-preserving fluid control[J]. Graphical Models (S1524-0703), 2009, 71(6): 221-228.
- [3] Fattal R, Lischinski D. Target-driven smoke animation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2004, 23(3): 441-448.
- [4] Madill J, Mould D. Target particle control of smoke simulation[C]// Proceedings of Graphics Interface 2013. Ontario, Canada, 2013: 125-132.
- [5] Fedkiw R, Stam J, and Jensen H W. Visual simulation of smoke[C]// Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. Los Angeles, CA, USA, 2001: 15-22.

- [6] Adams B, Pauly M, Keiser R, Guibas LJ. Adaptively sampled particle fluids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2007, 26(3): 48.
- [7] Solenthaler B, Gross M. Two-scale particle simulation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2011, 30(4): 81.
- [8] Losasso F, Gibou F, Fedkiw R. Simulating water and smoke with an octree data structure[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2004, 23(3): 457-462.
- [9] Selle A, Rasmussen N, Fedkiw R. A vortex particle method for smoke, water and explosions[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2005, 24(3): 910-914.
- [10] Park S I, Kim M J. Vortex fluid for gaseous phenomena [C]// Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH Eurographics symposium on Computer animation, Los Angeles, California, USA, 2005: 261-270.
- [11] Yoon J C, Kam H R, Hong J M, et al. Procedural synthesis using vortex particle method for fluid simulation[J]. Computer Graphics Forum (S0167-7055), 2009, 28(7): 1853-1859.
- [12] Pfaff T, Thuerey N, Cohen J, et al. Scalable fluid simulation using anisotropic turbulence particles[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2010, 29(6): 174.
- [13] Rasmussen N, Enright D, Nguyen D, et al. Directable photorealistic liquids[C]// Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/ Eurographics symposium on Computer animation. Switzerland, 2004: 193-202.
- [14] Cornelis J, Ihmsen M, Teschner M. Liquid boundaries for implicit incompressible SPH[J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2015, 52(C): 72-78.
- [15] Bo Ren, Chen-Feng Li, Ming C Lin, et al. Flow field modulation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2013, 19(10): 1708-1719.
- [16] N Foster, D Metaxas. Controlling fluid animation[C]// Proceedings of Computer Graphics International, 1997: 178-188.
- [17] Treuille A, McNamara A, Popovic Z, et al. Keyframe control of smoke simulations[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2003, 22(3): 716-716.
- [18] Shi Lin, Yu Yi-Zhou. Controllable smoke animation with guiding objects[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2005, 24(1): 140-164.
- [19] Shi Lin, Yu Yi-Zhou. Taming liquids for rapidly changing targets[C]// Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. Los Angeles, CA, USA, 2005: 229-236.
- [20] Hong J, Kim C. Controlling fluid animation with geometric potential[J]. Computer Animation and Virtual Worlds (S1546-4261), 2004, 15(34): 147-157.
- [21] Dionne O, de Lasa M. Geodesic voxel binding for production character meshes[C]// Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Anaheim, CA, USA, 2013: 173-180.
- [22] Zhang Shuai, Yang XuBo, Wu ZiQi, et al. Position-based fluid control[C]// Proceedings of the 19th Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. San Francisco, USA, 2015: 61-68.

(上接第 2367 页)

- [4] Seul-Ki Han, Won-Sang Ra, Ick-Ho Whang, et al. Linear recursive passive target tracking filter for cooperative sea-skimming anti-ship missiles[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8(7): 805 - 814.
- [5] Wang Y, Liu H, A Hierarchical Ship Detection Scheme for High-Resolution SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 4173-4184.
- [6] Lu Yi, Jiang-Yonghua, Zhai Longjun, et al. Notice of Retraction A target selection method for ASM based on ICP algorithm[C]// 2010 IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology USA: IEEE, 2010: 185-188.
- [7] 赵晶, 戴幻尧, 来庆福, 等. 基于选择点的反舰导弹录取对比搜捕方式分析[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(2): 5-9.
- Zhao Jing, Dai Huan-yao, Lai Qing-fu, et al. Analysis on Recode-then-comparing Target Searching Mode for Anti-ship Missile Based on Selectivity Point[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(2): 5-9.