

硕士研究生学位论文

|  |  |
| --- | --- |
| 题目： | **基于UE5的真实感水体** |
|  | **渲染技术研究与实现** |

|  |  |
| --- | --- |
| 姓 名： | 邱松涛 |
| 学 号： | 2001210398 |
| 院 系： | 软件与微电子学院 |
| 专 业： | 计算机技术 |
| 研究方向： | 虚拟与增强现实 |
| 导师姓名： | 王平 教授 |
|  | 许捷 讲师 |

二〇二三 年 六 月

版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

# 摘 要

水体渲染不论在离线渲染还是实时渲染中都是十分重要的一个课题，一直是计算机图形学和游戏开发领域的核心难点之一。随着计算机技术及硬件的不断发展，水体渲染的技术在不断发展着。目前业界主流的水体渲染技术主要分成了几大类，比较常用的如基于波形叠加方法的正弦波和Gerstner波，基于统计模型的快速傅里叶变换方法，基于粒子物理的欧拉方法、拉格朗日方法等。其中基于波形的方法适用于大规模的水体，如海洋等的渲染，但是在互动和水流的物理逼真程度上不如基于粒子物理的方法。基于粒子物理的方法则是利用流体力学的原理，模拟粒子之间的黏性和碰撞，水互动方面也是基于物理实现，效果十分逼真。但缺点在于性能耗费较高。

目前计算机硬件的逐渐强大，同时Unreal Engine提供了强大粒子物理引擎Niagara，所以本文将利用Niagara粒子引擎强大的并行特性，在其上构建一套基于流体力学模拟的水体系统，其中包括水体粒子的粘度、压力、速度解算，水体材质渲染、场景交互实现等一系列工作。本文也将探索和解决基于流体模拟的真实感水体系统的性能优化方案，以便在实时渲染项目和游戏中推广普及该方法，使得虚拟世界变得更加真实。

本文将介绍项目背景和研究意义，并分析相关技术的发展现状以及市场案例。同时会给出水体模拟的理论依据，以及在UE的Niagara中的具体实现。同时还会对整个系统进行优化，提升性能和效果表现。

关键词：实时渲染，流体模拟，水体渲染

Research and Implementation of Realistic Water Simulation based on Unreal Engine 5

Qiu Songtao( Computer Technology )

Directed by Xu Jie

# **ABSTRACT**

KEY WORDS: , ,

# 目 录

[第一章 绪论 4](#_Toc126098190)

[1.1 研究背景与意义 4](#_Toc126098191)

[1.2 研究现状与文献综述 5](#_Toc126098192)

[1.2.1 研究现状 5](#_Toc126098193)

[1.3 项目概述与创新 5](#_Toc126098194)

[1.4 本章小结 5](#_Toc126098195)

[第二章 6](#_Toc126098196)

[2.1 6](#_Toc126098197)

[2.1.1 6](#_Toc126098198)

[第三章 7](#_Toc126098199)

[3.1 7](#_Toc126098200)

[3.1.1 7](#_Toc126098201)

[第四章 结论 8](#_Toc126098202)

[4.1 8](#_Toc126098203)

[4.1.1 8](#_Toc126098204)

[参考文献 9](#_Toc126098205)

[附录 A 10](#_Toc126098206)

[致 谢 11](#_Toc126098207)

[北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明 12](#_Toc126098208)

# 绪论

## 研究背景与意义

电子游戏伴随着信息产业的发展而诞生，至今已有数十年的历史。其发展至今，不仅仅成为了人们生活娱乐的方式，本身对文化的承载也让它成为了国家民族文化输出的载体。在我国，2022年游戏用户已达到了6.66亿人的规模，仅上半年就创造了1477.89亿元的销售收入[1]。电子游戏产业的不断发展和用户需求的不断变化也要求游戏工业技术的不断迭代。图形硬件和相关的图形开发技术与游戏产业相辅相成，共同促进，不断带给玩家更为逼真和精致的游戏画面。

现在的真实感渲染技术力求做到照片般的画面，采用了PBR（基于物理的渲染 ）技术，包括基于物理光照系统、基于物理的材质、基于物理的相机。而PBR所能构建的只是一个静态的世界。真实的世界不仅仅包括各种光照和材质效果，同时也包括和世界中各种物体运动的交互，所以基于物理的模拟也是让虚拟世界真正活起来的关键所在。水是生命之源，在真实世界中无处不在，发挥着重要作用，点缀着绚丽多彩的世界。所以在虚拟世界中，对于水体的渲染也是我们在还原真实世界的工作中必不可少的一部分。

水体渲染技术伴随着电子游戏技术的发展一同进步，目前市面上大多数游戏的水体渲染还是通过波形叠加对网格体进行偏移实现水波，然后编写相应的着色器实现水体效果，例如经典的Gerstner Wave方法。这一方法简单高效，但是在水体交互以及水流模拟上由于只能采用贴图绘制的方法而显得不够真实。基于流体力学的流体模拟技术则提供了另外一种水体渲染的方法，它通过流体动力学中的Navier-Stokes方程[2]，根据流体粒子之间的粘度、压力等物理特性，计算出粒子的速度场从而实现流体的模拟。这种方法在物理上是准确的，同时对水体交互也有很好的表现效果，但是由于有大量的粒子需要参与解算，性能上耗费很高。

得益于当前GPU和游戏引擎技术的发展，GPU的并行性得到了充分的利用，最新的DirectX12图形API可以实现CPU和GPU之间完全的并行，极大解放了GPU的算力。同时Unreal Engine（以下简称UE）提供了Niagara粒子系统，可以充分利用GPU强大的并行计算能力，实现各种复杂的粒子效果。这些都为本文的项目提供了坚实的技术基础。

UE发展至今已经迭代到了5.1版本，在渲染方面，最新的版本提供了诸如Lumen、Nanite等强大的功能特性，使得虚拟世界更加真实。同时它也更新了在4.26版本中加入的Niagara粒子系统，提供了最新的空间网格加速结构Neighbor Grid，极大加速了对粒子进行物理模拟的效率。

目前UE5.1版本提供了基于PIC/FLIP的流体模拟系统，但是由于FLIP算法性能耗费较高，导致无法在游戏项目中使用。同时，市面上的游戏水体渲染项目，基本以波形叠加和基于统计学模型的方法实现，在对水体流动的效果表现上不如流体模拟的方法。本项目的主要意义在于探索基于流体动力学的水体模拟和渲染技术在游戏项目中的运用，同时探索一个高性能的解决方案，让其可以较大规模地进行实装。同时本项目还会验证多种流体模拟算法在Niagara粒子系统中的性能表现，为以后的研发提供参考。

## 研究现状与文献综述

### 研究现状

水体渲染技术是计算机图形学中的一大分支，同时也是计算机图形学发展至今都在不断探索的研究方向。水体渲染技术主要涉及两个大方向，一是水体状态的模拟，例如波形的形成，水流的实现；另外就是水体材质的渲染，包括水体本身材质和水下后处理材质。近年来的很多研究主要集中在水体状态模拟以及如何加速渲染效率上。

Gerstner Wave理论最早于1804年被Gerstner F.J.提出，提供以摆线模拟周期性水波的方法[3]。 伴随着可编程渲染管线的发展与成熟，Laeuchli于2002年实现了根据Gerstner Wave计算水面波形的着色器。Gerstner Wave方法采用多个不同振幅、周期和频率的正弦波叠加的方式产生高度场。然后根据高度场计算出水面法线朝向，这样就可以完成水面的渲染。这种方法十分简单快速，适用于湖泊和简单的海面渲染，直到今天依然被大规模应用到各类游戏项目中。缺点在于它并非物理正确，对于河流等有具体流向的水体，无法表现流体的细节。目前UE中自带的水体系统使用的就是Gerstner Wave方法。

Fast Fourier Transform Ocean方法在SIGGRAPH 2001上由Jerry Tessendorf提出[4]。这种方法基于统计学模型，将三角函数所描述的海浪波形，包括振幅（波高）、频率（海洋运动速度）、相位（海洋的初相）由实数域通过欧拉公式转换到了复数域，从而可以用离散的复数域的点表示海洋波形，然后使用海洋波普和高斯噪声作为初始化的振幅。最后利用逆快速傅里叶变换就可以将波形从频域空间转换到时域空间，从而得到了随时间变化的海洋波形。这种方法因为需要实时进行计算，消耗较高，较早应用在离线渲染中。近年来由于实时渲染技术，特别是Compute Shader技术的发展，使得其得以在实时渲染项目中得到使用。它可以生成极为逼真的海浪波形，并具有十分优秀的动态效果。

基于流体动力学的不可压缩流体模拟通常由著名的Navier-Stokes方程来描述。求解该方程主要有两种方法，一种是基于网格的欧拉视角，另一种则是基于粒子的拉格朗日视角。对于水体模拟来说，一般使用基于粒子的拉格朗日视角来进行解算，例如光滑粒子动力学（Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH）方法。它最早由Lucy、Gingold等人提出并应用于天体物理学领域[5]，后来被拓展到流体力学领域解决流体模拟问题[6,7]。它具有实现简单直观，材料边界划分准确，适用性广等优点。但是其效率不够高，同时存在数值计算不稳定的问题。针对它的缺点和不足，后续又有多种解决方案提出，其中在实时渲染中应用较多的则是基于位置的流体模拟方法（Postion Based Fluid，PBF）[8]方法，它来源于基于位置动力学方法（Position Based Dynamics，PBD）[9]。它通过约束实现粒子物理量的更新，可以有效解决模拟过程中的不稳定问题，同时允许较大的时间步长，进而可以提高实时模拟的效率。

目前游戏项目中使用最为广泛的还是Gerstner Wave方法，在一些大规模的水模拟中则会用到FFT方法。此外还有一些诸如波动粒子方法等[11]。而基于流体力学的水体模拟技术还没有在游戏中广泛使用。经过调研，目前市面上使用比较广泛的水体插件有：

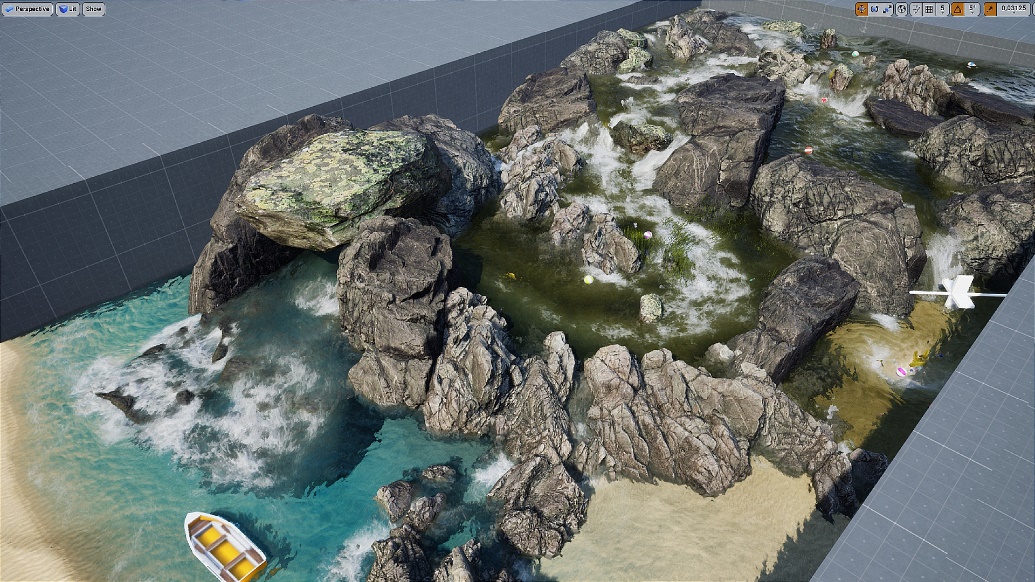
1. Fluid Flux[12]

图1.1 Fluid Flux示例关卡

该插件总体采用的是波形叠加的技术形成波形，实现重点在于大面积、实时的浅水区渲染，实时的水体交互，可烘焙成静态模型的水面工具等。

1. Waterline Pro[13]
2. UIWS(Unified Interactive Water System)[14]

### 文献综述

1. 《Fluid Simulation for Computer Graphics 2rd》[2]

本书是流体模拟的入门书籍。总共分为三个部分。第一部分介绍了流体模拟领域的基本方程，也就是Navier-Stokes方程的推导过程，以及欧拉视角和拉格朗日视角的求解方法。同时也介绍了数值模拟方法的原理和实现。第二部分则介绍了具体流体类型，如火、水等的模拟方法。第三部分介绍了涡方法、流体和固体的交互等算法。

本书深入浅出，由表及里地讲述了流体模拟的基础框架结构，十分适合入门流体模拟领域使用。同时其中也加入了很多优化方法和解决方案，例如水体表面张力的实现、海洋模型等。为读者研究流体模拟和理解相关概念提供了十分有利的参考。

1. Smoothed Particle Hydrodynamics Techniques for the Physics Based Simulation of Fluids and Solids[7]

该论文是SPH的入门文章，详细讲述了SPH方法的前世今生。前两章主要介绍了SPH的原理以及离散化形式的求解方法。第三章介绍了近邻搜索等空间加速结构。第四章主要介绍压力求解，以及各种不同的求解方法，例如预测矫正的SPH，Divergence-Free SPH等。第五、六、七三章则分别介绍了边界条件、粘度求解、表面张力求解的方法。最后则是对于一些特殊流体和弹性物体的模拟。

该论文介绍的基础SPH方法原理简单，方便在UE中使用Niagara进行部署，搭建了流体模拟从理论到实践的桥梁。

1. 《虚拟现实引擎特效制作》[10]

游戏特效中对于粒子效果的模拟是不可或缺的一部分，流体的模拟也可以用粒子实现。所以对于UE中粒子系统的学习和研究也是十分有必要的一环。

本书主要介绍了UE中Cascade和Niagara两种特效系统的基础使用方法。提供了包括力场特效、云层、角色粒子等特效案例，方便读者深入研究和理解Niagara粒子系统。

## 本文主要工作

本文的主要工作有：

1. 对实现基于流体模拟的水体渲染所需要的相关技术进行研究学习并分析游戏项目中的需求。主要包括利用UE进行游戏开发以及Niagara粒子系统相关技术。
2. 基于Niagara实现各种流体模拟算法，进行比较和测试，找到了适合实时交互的流体模拟、材质渲染、场景交互的方法。通过对各种算法的测试和改造，提升渲染和模拟的效率，使得可以在当前硬件水平流畅运行。
3. 利用UE的插件机制，部署水体渲染插件，并根据用户需求提供相关可调节参数。同时搭建示例关卡，展示水体模拟的不同使用场景。
4. 在项目中暴露的性能问题和渲染问题进行修复和调优。完成UE蓝图和特效系统的协作。

## 本章小结

# 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

## 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

### 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

# 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

## 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

### 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

# 结论

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

## 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

### 

>>>>>>>>>[图加软件《论文抽屉》，一站式毕业论文插件！](http://www.tujiastudio.com/prod_tad/ch/intro.html)

# 参考文献

1. 2022年1-6月中国游戏产业报告,2022
2. Bridson, Robert. Fluid simulation for computer graphics. CRC Press, 2015
3. [Gerstner, F.J.](https://en.wikipedia.org/wiki/Franti%C5%A1ek_Josef_Gerstner" \o "František Josef Gerstner) "Theorie der Wellen", Abhandlunger der Königlichen Böhmischen Geselschaft der Wissenschaften, Prague. Reprinted in: Annalen der Physik 32(8), pp. 412–445, 1809
4. Jerry Tessendorf. Simulation Ocean Water, SIGGRAPH 2001
5. Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astrophysical Journal. 1977, 8(12): 1013-1024.
6. Matthias Müller, David Charypar and Markus Gross. Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications. Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (2003)
7. Koschier D, Bender J, Solenthaler B, and Teschner M. Smoothed Particle Hydrodynamics Techniques for the Physics Based Simulation of Fluids and Solids. In: Eurographics Proceedings. Tutorials. 2019
8. Miles Macklin, Matthias Muller. Position Based Fluids. ACM Transcations on Graphics(TOG) 32.4 (2013):104
9. Matthias Müller Bruno Heidelberger Marcus Hennix John Ratcliff. Position Based Dynamics. 3rd Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS" (2006)
10. 刘跃军, 龙姝羽. 虚拟现实引擎特效制作.
11. 浅墨. 真实感水体渲染技术总结. [EB/OL]. [https://zhuanlan.zhihu.com/p/95917609. 2021](https://zhuanlan.zhihu.com/p/95917609.%202021)
12. Epic Game Marketplace. Fluid Flux. [EB/OL]. <https://www.unrealengine.com/marketplace/zh-CN/product/fluid-flux>
13. Epic Game Marketplace. Waterline Pro. [EB/OL]. <https://www.unrealengine.com/marketplace/zh-CN/product/waterline>
14. Epic Game Marketplace. UIWS-Unified Interactive Water System. [EB/OL]. <https://www.unrealengine.com/marketplace/zh-CN/product/uiws-unified-interactive-water-system?sessionInvalidated=true>



# 致 谢

# 北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

**原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

**学位论文使用授权说明**

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

* 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
* 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
* 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
* 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校□一年/□两年/□三年以后，在校园网上全文发布。

（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 导师签名：

日期： 年 月 日