单次采样路径追踪与时空域降噪

黄霖, 刘世珩, 许天一

摘 要: 大量采样的路径追踪由于循环计算量大难以达到实时全局光照。而通过单次采样1 sample per pixel (1spp)的路径追踪再配合后期时空域降噪算法的图像处理可以近似实现高效高质量实时全局光照。路径追踪可以根据Lambert和GGX模型采用重要性采样分布模型随机选择一条光路。空域降噪需要利用G-buffer的双边滤波，而时域降噪可以采用时域超级采样算法（temporal super sampling）。渲染流程使用Visibility Buffer避免光线追踪瑕疵。

1 SPP Ray Tracing with Spatiotemporal Denoiser

Huanglin, Liu Shiheng, Xu Tianyi

**Abstract**: Due to the large amount of cyclic computation, it is difficult to achieve real-time global illumination for path tracing with a large number of samples. The high-efficiency and high-quality real-time global illumination can be approximately realized through the path tracking of one sample per pixel (1spp) in a single sampling and the image processing of the later spatio-temporal noise reduction algorithm. For path tracing, an optical path can be randomly selected by using the importance sampling distribution model according to Lambert and GGX models. Spatial noise reduction needs to use the bilateral filtering of g-buffer, while temporal super sampling algorithm can be used for time-domain noise reduction. The rendering process is the visibility buffer to avoid ray tracing defects.

**Key word：**Ray tracing, Spatiotemporal Variance-Guided Filtering, denoiser, monte-carlo method

# 简介与意义/Introduction

## 项目意义和依据/Significance

近年来，路径追踪变为工业界常用的渲染算法。为了减少蒙特卡洛方法不可避免的噪声，刺激了更高级的滤波器的发展。游戏和电影近年来都从基于经验的模型转向了基于物理的渲染模型，但是为了得到更加准确的阴影与反射，开发者们还是更加愿意考虑使用光线追踪以及多次反射的全局光照。但是当前的光线追踪技术限制在200到300 Mrays/sec, 使在1920\*1080的分辨率和30Hz刷新率的情况下每个像素仅有几根光线。这个数字在不同性能的GPU/CPU下，以及在使用动态加速结构，在更大的场景下甚至更低。因此在可预见的未来，以及随着分辨率和刷新率不断提高的趋势下，这种方法是不可行的。

因此，通过研究重构滤波器，我们才有可能实现实时路径追踪。然而，在低采样率下进行重构是非常困难的。低采样率下的高方差使高频信号变得很模糊，并且，每个像素只有一个采样点，分辨噪声的来源也是很困难的。

为了实现目标性能，本课题小组使用的滤波器利用前一帧的采样来区分细节以及消除噪声。在512\*512的分辨率下，使用手机或者电脑均可以在0~4ms内进行渲染。我们实现了一种从单采样路径的输入中进行重构的高效且时域稳定的算法。这种算法基于由空间域和时间域中的估计方差引导的滤波器。

## 本方法/系统框架/Article Structure

本实验中用到的图形渲染流程包括路径追踪以及如何通过重构滤波器以及其他后处理步骤来隔离噪声源。

关于路径追踪。即利用了光线追踪以及蒙特卡罗方法。我们的路径追踪器利用光栅化渲染管线来更加高效地生成主光线。这提供了一个包含额外几何属性的G-buffer，用来指导重构滤波器。

我们的重构主要实施以下三个步骤：时间上积累1spp路径追踪的输入来增加有效采样率，并使用这些时域增强的颜色样本来估计局部照明方差以及利用这些方差估计来驱动一个低通滤波器。

# 相关工作/Related Works

实现实时全局光照很多年来一直困扰着研究人员。当前的近似通常依赖于预先计算或缓存光传输计算[1] ,在曲面上或在稀疏采样的体积中。为了增加缓存的照明，其他技术允许包含特定的所需效果，例如环境光遮挡、光泽屏幕空间反射和柔和阴影[2] 。虽然通常看似合理，但最终的照明效果却远非真实。为了在实时渲染中接近真实效果，本课题小组认为开发者们必须转向基于物理的蒙特卡洛光线追踪上来。

蒙特卡洛降噪。降噪滤波器通过组合多个每个像素的蒙特卡洛估计器来降低方差，以引入偏差为代价。他们希望在保留例如边缘和表面细节等清晰的图像特征的前提下实现平滑的输出。

基于回归的方法[3] 可以在高采样率的情况下产生好的结果，然而，这些滤波器在低分辨率下并不能可靠的工作由于他们对于异常值很敏感。

Munkberg[4] 显示在纹理空间中操作允许使用更简单的滤波器，这些滤波器可以在时域中重复使用。然而，将这种方法扩展到用于实时渲染的大型资源并不容易。过滤也可以发生在路径空间中[5], 但是这使用了昂贵的KNN搜索技术，并且耦合了渲染和过滤算法。

非线性滤波器不缩小滤波器覆盖区，而是调整滤波器权重以保留显著特征。非线性蒙特卡洛降噪的开创性工作使用异常值去除[6] , 平稳的能量再分配和各向异性扩散。一种边缘保持双边滤波器可应用与蒙特卡洛降噪。一种新的交叉（或联合）双边滤波器[7] 将每个像素替换为附近像素的加权平均值，使用考虑距离、颜色和 其他差异的高斯分布权重，通过边缘停止函数引导图像。 在边缘停止函数中考虑几何信息，提高了交叉双边滤波器 对输入噪声的鲁棒性。

时间滤波利用跨多帧的时间信息有助于解决空间滤波器的缺点，并提高低采样率下的时间稳定性。Delbracio等人[8] 考虑跨三个帧的光线直方图以减少闪烁，Meyer和 Anderson[9] 在所有帧上计算PCA，丢弃不重要的基以提高 时间稳定性。齐默等人[10] 将路径空间分解用于运动估计，并对多个缓冲器应用去噪。但是这些方法需要先计算的帧的输入集合，而不是如实时所需的那样仅在先前帧上进行时间滤波。 交互式滤波器通常基于运动矢量将样本从一个帧重新投影到另一个帧[11] 这类似于视图插值[12] , 其从预渲染的一组图像中重新投影样本以生成新的视点。

最近，通过广泛采用时间抗锯齿（TAA）[13] ，重投影得到了普及。TAA从时域均摊超采样中获得灵感[14] , 但不是丢弃陈旧的样本，而是对它们进行调节，以匹配其重新投影位置的颜色。Patney [15] 通过估计颜色的统计分布来改进这一点。

# 研究内容与方法/Contnts and Methods

## 路径追踪

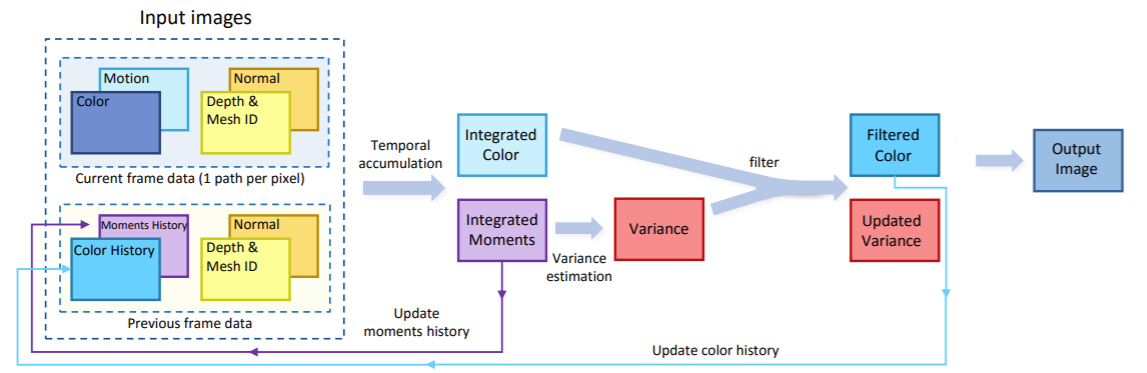
本项目使用路径追踪来生成1 spp的颜色样本。路径追踪给之后的降噪阶段提供了一个包含光照信息的buffer和一个g-buffer，其中的光照、深度和法线属性可用于辅助降噪。光线散射方向有几个可选的采样函数，能模拟出金属、半金属和漫反射的材质。光线追踪步骤所使用的buffer都是双份的，每次渲染的时候轮换，所以降噪阶段能够同时获取当前帧和上一帧的光线追踪结果。

图 1：降噪流程图

本项目的算法改进自Christoph等的时空域降噪算法[16] 。

## 降噪

降噪分为三个主要步骤：首先，在时间上累积路径追踪的数据以提高采样率，其次，利用样本估计局部亮度方差，最后，根据估计的方差执行滤波。

### 时域累积

我们的时域滤波器的输入是当前帧和上一帧的路径追踪颜色buffer和g-buffer，输出是降噪后的图像和方差。g-buffer包含法线和深度。

图 2展示了我们过滤管道中的主要步骤。

时域上累积得的颜色样本由第i帧（当前帧）的颜色样本*Ci*和历史缓冲区中对应的颜色样本*Ci-1*计算而来：

其中*α*是时域的衰减参数，根据经验取为0.1。

颜色样本的几何一致性检测利用了法线方向和深度。当两次采样的法线的点乘小于0.01，而且深度差小于0.01时（经验值，和场景相关），就认为两次采样具有一致性，否则就舍弃时域累积的样本。同理，还对颜色样本采用邻域限制（neighborhood clamping）。对新的采样点周围的样本求上下界，如果时域累积的样本超出这个上下界，就把它舍弃。

累积过程中还为空域滤波提供另一个变量，称为样本可信度，该变量初值为0，每次采样累加0.1，最大值为1，在时域累积的样本被舍弃时重新置0。

最终，方差的估计值为：

是调节整体方差大小的参数，因为光线反射次数、场景复杂度等会影响整体方差大小，在本实验中取50。

### 空域滤波

滤波应当避开噪声很少的区域。本项目利用时域累积的颜色样本来检测噪声。通过分析时间线上的不同样本，可以检测到某次采样的可信度。要注意，空域上的方差并不能有效代表噪声的程度，因为噪声会提高方差，但是方差并不一定来自噪声。

本项目使用每像素原始亮度的一阶矩*μ1i*和二阶矩*μ2i*来估计它的真实亮度。为了收集足够的样本来提高估计的可信度，重用了几何一致性检测。然后，用公式来计算时域上的方差。

下一步是参照估计的方差来进行滤波。本项目使用的a-trous小波滤波，每次滤波后把尺度翻倍，一共滤波三次。滤波公式为：

是的卷积核，是卷积的尺度。是估算的方差，估算公式为：

为像素和的权重函数，计算公式为：

其中深度的权重函数定义为：

其中是防止除以0的一个极小值。

法线的权重函数定义为：

# 实验结果与分析/Experiment Results and Analysis

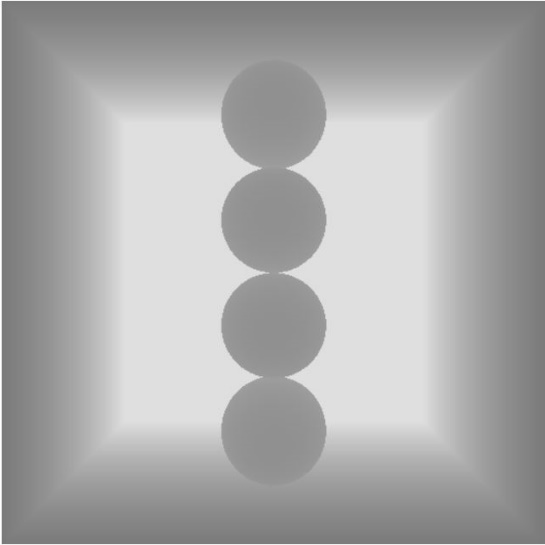
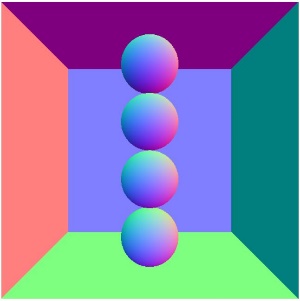


图 2 用于几何一致性检测和小波滤波加权的法线和深度缓冲区。根据几何信息区分物体边缘，在空域降噪阶段避免把边缘模糊化。

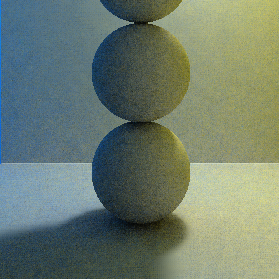
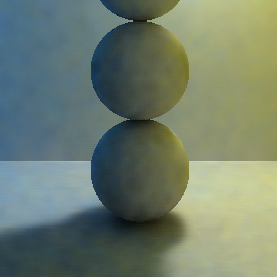
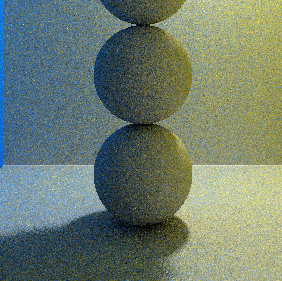
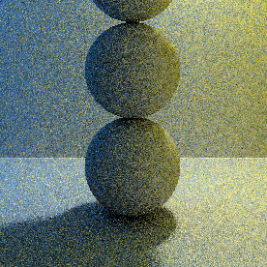
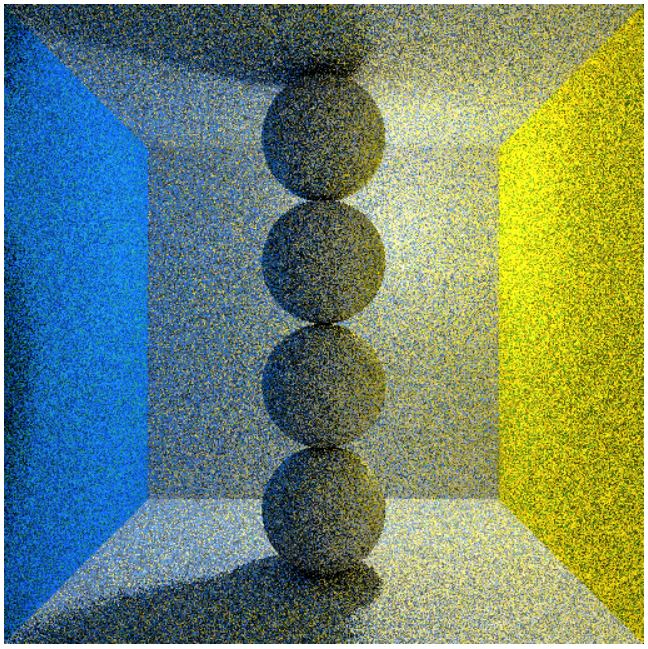
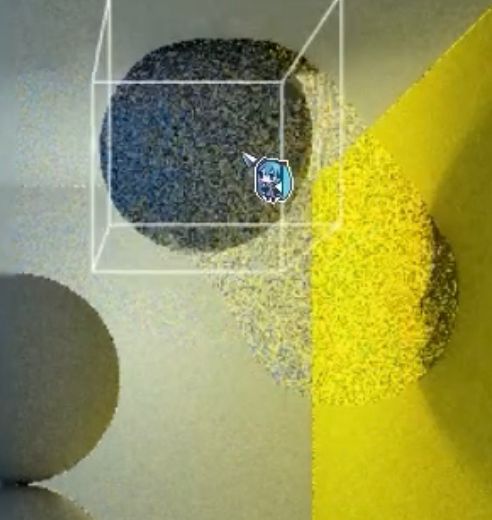
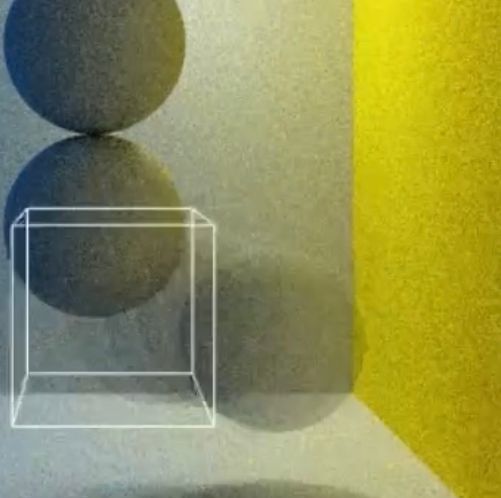


图 3 左侧：带噪声的原始图像。右上：时域降噪的第3帧和第10帧。右下：时空域降噪的第3帧和第5帧。时域降噪需要累积足够多的采样后才有较好的效果，空域降噪弥补了这个缺陷。

图 4 两个渲染瑕疵。左侧：动态模糊，通过几何一致性检验解决。右侧：伪影，通过邻域限制解决。



# 特色与创新/ Distinctive or Innovation Points

本实验对原有的时空域降噪算法做了几处改进。

首先，引入了样本可信度这一变量。原算法在采样次数不足时转到空域去估算方差，实际上，采样不足的时候有明显的噪点，并不需要特地去估算，所以引入样本可信度，采样不足的时候方差即是，减少计算量，也加强了降噪效果。

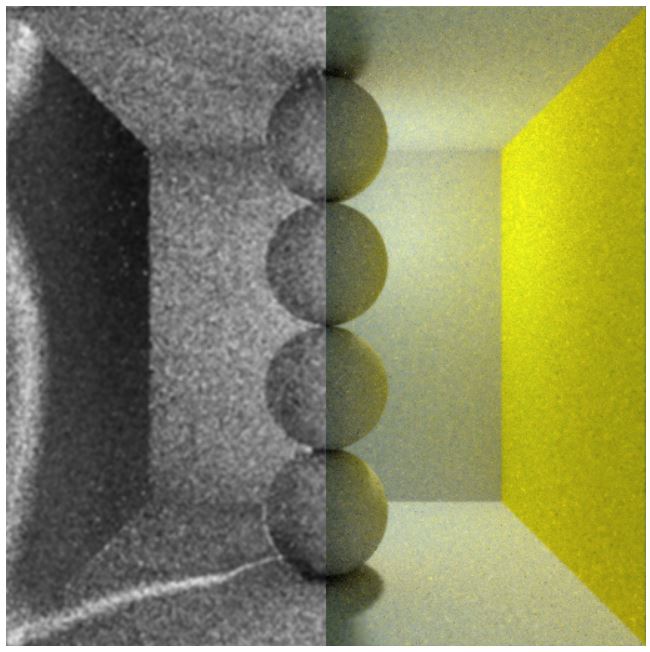
其次， 在时域滤波的过程中，加入了邻域限制，防止伪影瑕疵。

图 5 左侧：经过3\*3高斯模糊后，方差的分布。方差的噪声通过权重函数残留了在降噪后的图像。

最后，在小波滤波的过程中，方差也进行滤波，滤波后再用方差作为颜色模糊度的权重。原算法把方差作为滤波函数内权重函数的变量之一，因为方差本身也有噪声（见图4），会影响降噪效果，对方差进行滤波可以避免这个问题。

References:

1. James T Kajiya. 1986. The Rendering Equation. In Computer Graphics, Vol. 20. 143–150.
2. Tobias Ritschel, Carsten Dachsbacher, Thorsten Grosch, and Jan Kautz. 2012. The State of the Art in Interactive Global Illumination. Computer Graphics Forum 31, 1 (2012), 160–188.
3. Benedikt Bitterli, Fabrice Rousselle, Bochang Moon, Jose A Iglesias-Guitian, David Adler, Kenny Mitchell, Wojciech Jarosz, and Jan Novak. 2016. Nonlinearly Weighted First-order Regression for Denoising Monte Carlo Renderings. In Computer Graphics Forum, Vol. 35. 107–117.
4. Jacob Munkberg, Jon Hasselgren, Petrik Clarberg, Magnus Andersson, and Tomas Akenine-Moller. 2016. Texture Space Caching and Reconstruction for Ray Tracing. ACM Transactions on Graphics 35, 6 (2016), 249:1–249:13.
5. Nikolaus Binder and Alexander Keller. 2016. Effcient Stackless Hierarchy Traversal on GPUs with Backtracking in Constant Time. In High Performance Graphics. 41–50.
6. M. E. Lee and R. A. Redner. 1990. A Note on the Use of Nonlinear Filtering in Computer Graphics. IEEE Computer Graphics and Applications 10, 3 (1990), 23–29.
7. Elmar Eisemann and Fredo Durand. 2004. Flash Photography Enhancement via Intrinsic Relighting. ACM Transactions on Graphics 23, 3 (2004), 673–678.
8. Mauricio Delbracio, Pablo Muse, Antoni Buades, Julien Chauvier, Nicholas Phelps, and Jean-Michel Morel. 2014. Boosting Monte Carlo Rendering by Ray Histogram Fusion. ACM Transactions on Graphics 33, 1 (2014), 8:1–8:15.
9. Mark Meyer and John Anderson. 2006. Statistical Acceleration for Animated Global Illumination. ACM Transactions on Graphics 25, 3 (2006), 1075–1080.
10. Henning Zimmer, Fabrice Rousselle, Wenzel Jakob, Oliver Wang, David Adler, Wojciech Jarosz, Olga Sorkine-Hornung, and Alexander Sorkine-Hornung. 2015. Path-space Motion Estimation and Decomposition for Robust Animation Filtering. Computer Graphics Forum 34, 4 (2015), 131–142.
11. Diego Nehab, Pedro V. Sander, Jason Lawrence, Natalya Tatarchuk, and John R. Isidoro. 2007. Accelerating Real-time Shading with Reverse Reprojection Caching. In Graphics Hardware. 25–35.
12. Shenchang Eric Chen and Lance Williams. 1993. View Interpolation for Image Synthesis. In Proceedings of SIGGRAPH 93. 279–288.
13. Brian Karis. 2014. High-quality Temporal Supersampling. In SIGGRAPH Courses: Advances in Real-Time Rendering in Games.
14. Lei Yang, Diego Nehab, Pedro V Sander, Pitchaya Sitthi-amorn, Jason Lawrence, and Hugues Hoppe. 2009. Amortized Supersampling. ACM Transactions on Graphics 28, 5 (2009), 135:1–135:12.
15. Anjul Patney, Marco Salvi, Joohwan Kim, Anton Kaplanyan, Chris Wyman, Nir Benty, David Luebke, and Aaron Lefohn. 2016. Towards Foveated Rendering for GazeTracked Virtual Reality. ACM Transactions on Graphics 35, 6 (2016), 179:1–179:12.
16. Christoph Schied, Anton Kaplanyan, Chris Wyman, Anjul Patney, Chakravarty R. Alla Chaitanya, John Burgess, Shiqiu Liu, Carsten Dachsbacher, Aaron Lefohn, and Marco Salvi. 2017. Spatiotemporal Variance-Guided Filter- ing: Real-Time Reconstruction for Path-Traced Global Illumination. In Proceedings of HPG ’17, Los Angeles, CA, USA, July 28-30, 2017, 12 pages. DOI: 10.1145/3105762.3105770

分工统计表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **组员信息**（含组长） | | | |
| 学生姓名 | 黄霖 | 学 号 |  |
| 项目分工 | 代码，报告 | | |
| 学生姓名 | 许天一 | 学 号 |  |
| 项目分工 | 报告，答辩ppt | | |
| 学生姓名 | 刘世珩 | 学 号 |  |
| 项目分工 | 报告 | | |