

中国地质大学（北京）

本科毕业论文文献综述

学 院： 信息工程学院

专 业： 计算机科学与技术

姓 名： 陈雨航

学 号： 1004171217

指导教师： 季晓慧

完成日期： 2021 年 1 月 14 日

随着实时阴影算法的发展，在大型开放场景中仍然很难生成高质量的阴影。该课题作为图形学领域的重要课题受到了广泛的关注。目前而言，解决实时阴影生成有两种主要方法，一是阴影贴图方法，二是稀疏的体素八叉树方法（SVO）。阴影贴图方法已经经过了长期的发展和演变，但随着虚拟场景规模的不断增大，阴影贴图的大小也呈立方级上升，在实际生产中面临着多种性能和效果问题；而 SVO 方法直到 2013 年才由 Erik 团队引入到实时阴影问题中，该方法的发展围绕着 SVO 树的压缩存储进行，现已出现多种不同方向的改良技术并且仍存在提升空间。

现如今多数研究者决定使用 Williams 于 1978 年提出的阴影贴图方法及其改进方法处理实时阴影问题，该方法属于一种动态的阴影技术。该方法在实际生产中得到了普及，并在某种形式上是得到了所有主要游戏引擎的支持。一种常见的方案是在纹理贴图（通常称为光线贴图）中存储预先计算的可见性信息，这些信息可以在阴影处理过程中立即查询。光线贴图可以几乎零成本的在阴影处提供光源可见性信息，但依旧存在一些无法忽视的问题：

- 1、只能用来评估静态几何体表面的阴影，而动态几何体必须使用一些其他技术被静态环境遮蔽；

- 2、对于静态几何体，必须创建一个独特的参数化 UV，这既困难又繁琐；

- 3、即使使用有损图像压缩技术，这些贴图仍然需要相当大的内存。

针对于传统阴影贴图方法的不足，ENGEL 团队提出了级联阴影贴图算法（Cascaded Shadow Maps，简称 CMS）。该方法根据对象到观察者的距离提供不同分辨率的深度纹理来弥补阴影贴图的一些不足。它将相机的视锥体分割成若干部分，然后为分割的每一部分生成独立的深度贴图。这为所有视图样本提供了大致统一的阴影贴图分辨率。然而，即使使用最好的剔除技术，可能还是需要多次重新渲染场景的某些部分，这仍旧对性能有着相当的负面影响。此外，该方法虽有助于减少重采样误差，但即使阴影贴图的采样率和主视图的采样率匹配良好，也仍然不能解决初始采样误差。CSM 减少了因使用单个阴影贴图而引起的欠采样和过采样问题。然而为了完全隐藏分区之间的锯齿和可见性过渡多引起的瑕疵，仍然需要大量的高分辨率阴影贴图，而即使使用有损图像压缩技术，这些贴图仍然需要相当大的内存。

与此同时，一部分研究者关注到对于绝大多数对实时性有需求的虚拟场景而言，基本都包含静态几何体和一个或多个的静态光源。而选择静态技术预计算这部分的阴影，将获得相较于使用完全动态的阴影技术更高的质量和更快的评估。因此，Rasmusson 团队提出了一种专门针对光线贴图的硬件加速压缩方案，并提供了技术标准的概述。Hoppe 团队则建议使用空间相干数据（如光线贴图）的层次表示来提高压缩率，而代价是查找变得更昂贵了。然而即使使用有损数据压缩方案，捕获高频率的可见性变化仍然需要过多内存以使光线贴图在大场景中可用。Green 团队建议对表面上的二进制可见度通过距离场进行编码，该方法的阴影数据通常可以从低分辨率贴图中很好地重建，但却无法捕捉到瘦或复杂的阴影。此外，这些技术都需要对所有几何体进行明确的 UV 参数化，并且只能准确存储所指定的静态表面的光可见性信息，存在很大的局限性，难以推广。

来自于查尔姆斯理工大学的 Erik 团队决定采用八叉树数据结构管理体素化的阴影。密集网格是体素最简单的表示形式，该表示形式简单直观，但缺点在于每当体素网格的分辨率提升到原来分辨率的两倍，所需的存储空间便上升到了原先的八倍之多。幸运的是，计算机图形学中的体素数据集往往表现出大量的稀疏性，这便可以用来更有效地对数据进行编码。三维体素数据的稀疏八叉树表示法（SVO）由 Meagher 于 1982 年提出。八叉树的根对应于整个体素网格的体积，八个子节点对应于将每个网格沿三个维度等分成的八个子网格，分裂沿树伸展方向递归进行，直到达到所需的分辨率。

Erik 团队不仅将 SVO 引入到了阴影的管理中，还对八叉树的树形结构的存储方式进行优化和压缩，将 SVO 转换成一种紧凑的有向无环图（DAG）。该方法的基本算法思想是创建体素

化的阴影空间并将其存储为八叉树，即创建 SVO，然后通过合并公共子树来压缩 SVO，从而将 SVO 转为存储上更为紧凑的稀疏体素有向无环图（SVDAG）。经证明，该方法仅需沿着包围阴影空间的表面进行存储，因此 SVO 的大小很大程度上取决于这些表面的表面积。由于该方法中 SVO 仅需管理体系素的光可见性，因此 SVO 会存在大量的公共子树，所以对公共子树的合并能够有效提高最终的压缩率，减少存储空间占用。除此之外该团队还提出对完全封闭空间内无定义体素的可见性依据其在树上合并后对树大小的影响做动态分配。值得一提的是，在文中的测试阶段，该团队发现这种动态分配无定义体素的方法不仅是一种存储优化，也能大幅加快运行时的性能，因为针对具体体素的可见性查询往往因此在树的更高层级结束。

Erik 团队的研究使 SVO 成功应用在了三维空间阴影的管理与生成上。由于 SVO 已被广泛应用于三维空间的多种属性的管理上了，围绕 SVO 也衍生出了一系列的优化结构。

Erik 团队提出了一系列无损压缩方案用于提高 SVO 的存储性能和运行效率，而 Laan 团队则是提出了另一种有损压缩方案，以一定量的误差为代价，换取更高的压缩率。Laan 团队的方法利用了这样一个事实：图中的绝大多数子树很少被引用，通常只被引用一次。在大多数场景中，这些不常被引用的子树彼此间通常十分相似。Laan 团队对这些相似的子树进行聚类，并用单个代表代替聚类中的所有子树。该方法在允许一定压缩误差的前提下，进一步对 SVDAG 进行了压缩。该方法的结果被称为有损系数体素 DAG（LSVDAG）。为防止误差的无限增长，Laan 团队的方法会避免对于叶节点基于相似性的直接修改，因为叶节点总共只有 256（8 个子空间对应的阴影情况数）种可能类型，对其进行修改会造成整体上的较大误差。经测试，在 San Miguel 场景中，该方法仅通过修改了 0.57% 的体素，便将最终场景存储空间从 1228MB 压缩到了 938MB，说明在付出较小的误差代价的情况下，对 SVO 存储空间的进一步压缩是切实可行的。

Villanueva 团队则通过发现体素分布的反射对称性，提出了一种被称为对称感知 SVDAG（SSVDAG）的新的无损压缩方法，该方法利用体素在空间分布的对称性，进一步对 SVDAG 进行压缩。Villanueva 团队提出体素在空间中的分布规律可用一部分“原子”表示，这些“原子”的种类十分有限，各种“原子”通过反复的对称变换组合成了复杂的体素分布。因此，Villanueva 团队的方法致力于利用相似性变换合并相同“原子”的子树，并利用可变比特位编码存储子指针，实现对 SVDAG 的无损压缩。

无论是 Erik 团队，还是 Laan 团队和 Villanueva 团队的方法都建立在 SVO 只管理单一属性这一前提之上（在实时阴影生成中即是管理光可见性）。失去这一前提，三个团队的 SVO 压缩优化方法都将大打折扣，因为无论是公共子树、相似子树，对称子树都只有在单一属性前提下会出现高度重复，对其进行公共引用才能产生足够高的压缩率。Dado 团队则致力于探索一种新的技术，将多属性 SVO 的高度压缩变成可能。Dado 团队提出了一种基于影响 SVDAG 数据结构中指针大小的无损压缩方法，该方法被称为 ESVDAG。该方法提供了一种压缩任意数据，如颜色、法线或反射信息的方法。它通过一种新的映射方案将几何体数据和体素属性数据解耦，并应用 DAG 原理对拓扑进行编码，同时对体素属性使用基于调色板的压缩方式，从而大大减少了内存消耗，该方法被证明是一种对 SVDAG 的无损压缩。

从目前的研究状况来看，Erik 团队引入的 SVO 方式处理阴影具有很好的发展和应用前景。在 SVO 的优化使用问题上，Erik 团队提出了以合并公共子树为主的无损压缩方法，而 Laan 团队则是提出了以合并相似子树为主的有损压缩方法，Villanueva 团队则是提出了合并对称子树的无损压缩方案，而 Dado 团队则是关注于多属性树的压缩，提出了一种新的无损压缩方案。这些优化方法都从各自不同的角度挖掘了 SVO 存储数据的冗余性质，并针对这些冗余做出了不同角度和不同适用范围的优化与改进。而现有的优化技术仍存在一定的优化空间，也依然存在着通过交叉使用不同的优化技术进一步提升 SVO 性能的可能。