14.2 特殊的体积渲染

本节介绍了以基本的有限方式渲染体积效果的算法。 有人甚至可能说这是老派的把戏，通常依赖于临时模型。 使用它们的原因是它们仍然运行良好。

14.2.1 大规模雾

雾可以近似为基于深度的效果。它最基本的形式是根据距相机的距离对场景顶部的雾色进行alpha混合，通常称为深度雾。这种效果是观看者的视觉提示。 首先，它可以提高真实感和戏剧性，如图14.11所示。 其次，这是一个重要的深度提示，可帮助场景的查看者确定物体的位置。 参见图14.12。 第三，它可以用作遮挡剔除的一种形式。 如果对象在距离太远时完全被雾遮挡，则可以安全地跳过其渲染，从而提高应用程序性能。

表示雾量的一种方法是在[0，1]中使用f表示透射率，即f = 0.1表示可见10％的背景表面。 假设一个表面的输入颜色是而雾色是,则最终颜色由下式确定：

可以用许多不同的方式评估值f,雾可以使用下列公式线性增加

其中和是确定雾在哪里开始和结束(即变得完全雾)的用户参数,是从查看者到要计算雾的表面的线性深度.评估雾透过率的一种物理上准确的方法是使雾度随距离呈指数增加,因此要遵循比尔-兰伯特透过率定律（第14.1.2节）.使用以下方法可以达到此效果

标量是控制雾的密度的用户参数.这种传统的大雾是对大气中光散射和吸收的一般模拟的粗略近似（第14.4.1节），但今天在游戏中仍能发挥很大的作用.参见图14.12.

这就是传统的OpenGL和DirectX API中暴露硬件雾的方式.仍值得考虑将这些模型用于移动设备等硬件上的简单用例.当前许多游戏都依赖更高级的后处理来产生大气效果,例如雾和光散射.透视图中雾的一个问题是深度缓冲值是以非线性方式计算的（第23.7节）。 可以使用逆投影矩阵数学方法将非线性深度缓冲区的值转换回线性深度[**1377**]。 然后可以使用像素着色器将雾作为全屏通道应用，从而实现更高级的结果，例如与高度有关的雾或水下着色.

高度雾表示具有参数化的高度和厚度的参与介质的单个平板.对于屏幕上的每个像素,其密度和散射光将根据视线在撞击表面之前已穿过平板的距离进行评估.Wenzel[**1871**]提出了一种封闭形式的解决方案,用于评估f用于平板中参与介质的指数下降。 这样做会导致平板边缘附近的平滑雾过渡。 这在图14.12左侧的背景雾中可见。

深度雾和高度雾可能有许多变化.颜色可以是单色,可以从使用视图矢量采样的立方体贴图中读取,甚至可以是复杂的大气散射的结果,其中每个像素的相位函数都应用了方向性颜色变化[**743**].还可以使用组合深度和高度的雾透射率,并使两种类型的雾在场景中交织在一起.

深度雾和高度雾是大规模的雾效果.人们可能想渲染更多局部现象,例如在洞穴中或墓地中几座坟墓附近的雾气分开的区域.诸如椭圆或盒子之类的形状可用于在需要的地方添加局部雾[**1871**].这些雾元素使用其边界框从后到前渲染。沿每个形状的视图矢量的前和后交点在像素着色器中进行评估.使用体积深度为,其中是代表最接近的不透明表面的线性深度,可以评估透射率(第14.1.2节),覆盖率为.然后可以将添加到顶部的散射光的量评估为.为了允许从网格中评估更多不同的形状,Oat和Scheuermann [**1308**]提供了一种巧妙的单遍方法来计算体积中最接近的入口点和最远的出口点.他们将表面距离保存在一个通道中的表面上,将保存在另一通道中.通过设置alpha混合模式以保存找到的最小值,在渲染体积之后,第一个通道将具有最接近的值df,而第二个通道将具有最远的值db，编码为1-d，从而可以恢复d。

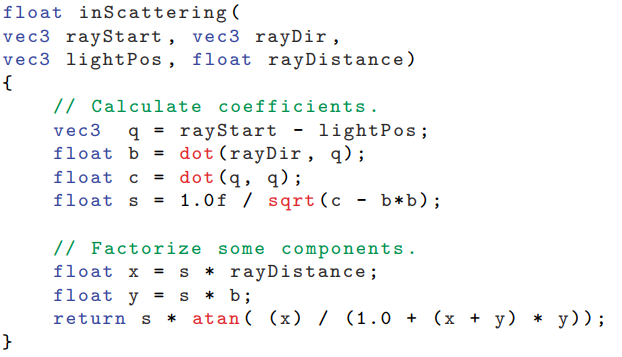
水是一种参与介质，因此，它表现出相同类型的基于深度的颜色衰减。海水每米的透射率约为（0.3，0.73，0.63）[]，因此使用公式14.23，我们可以得到.使用不透明的表面渲染深色水时，可以在照相机位于水面以下时启用雾逻辑，而在水面以上时将其关闭.Wenzel [**1871**]提出了一种更高级的解决方案。如果相机在水下，则散射和透射率会累积在一起，直到碰到固体或水面。如果在水面之上，则这些元素仅从水的顶部表面到海床的实体几何形状之间的距离集成在一起.

14.2.2 简单的体积光 2020年7月30日10点44分

参与介质内的光散射可能很难评估.幸运的是,在许多情况下,有许多有效的技术可以令人信服地近似这种散射.获得体积效果的最简单方法是渲染在帧缓冲区上混合的透明网格.我们将其称为“泼溅法”（第13.9节）.

为了使光轴通过窗户,茂密的森林或聚光灯发光,一种解决方案是使用与相机对齐的粒子,每个粒子上都带有纹理.每个带纹理的四边形都始终朝着相机（光轴约束）在光轴方向上拉伸.

网格喷溅方法的缺点是,积累许多透明的网格会增加所需的内存带宽，可能会导致瓶颈，并且有时可以看到面向相机的带纹理的四边形。 为了解决这个问题，已经提出了使用封闭形式的解决方案对光进行单次散射的后处理技术。 假设均匀且球形的均匀相位函数，则可以沿着假设恒定介质的路径以正确的透射率对散射光进行积分。 结果如图14.13所示。 GLSL着色器代码段[**1098**]中显示了此技术的示例实现:



其中rayStart是射线的起始位置,rayDir是射线的归一化方向,rayDistance是沿着射线的积分距离,而lightPos是光源位置.Sun等人[1722]的解决方案另外考虑了散射系数.它还描述了从朗伯和庞氏表面反射回来的漫反射和镜面辐射应如何受到以下事实的影响:光在撞击任何表面之前会以非直线路径散射.为了考虑透射率和相位函数,可以使用更重的ALU解决方案[**1364**].所有这些模型在执行操作时都是有效的，但无法考虑深度图或异构参与媒体的阴影。

依靠称为bloom的技术，可以近似估计屏幕空间中的光散射[**539,1741**]。模糊帧缓冲区并将其少量添加回自身[**44**]将使周围的每个明亮对象泄漏辐射。该技术通常用于近似相机镜头中的瑕疵，但是在某些环境中,这种近似对于短距离和无遮挡散射效果很好。第12.3节更详细地描述了光晕.

Dobashi等人[**359**]提出了一种使用一系列采样体积的平面来渲染大规模大气效果的方法.这些平面垂直于相机方向，并从后到前渲染. Mitchell [**1219**]也提出了相同的方法来渲染聚光灯光束,使用阴影贴图从不透明物体投射体积阴影.在第14.3.1节中详细介绍了通过切片分割渲染的体积.

Mitchell [**1225**]和Rohleder and Jamrozik [**1507**]提出了一种在屏幕空间中工作的替代方法.参见图14.14.它可以用于渲染来自诸如太阳等远距离光的光轴。首先，在清除为黑色的缓冲区中，在远平面上围绕太阳渲染伪造的明亮对象，并使用深度缓冲区测试来接受未遮挡的像素。其次，在图像上施加方向性模糊，以使先前累积的辐射从太阳向外泄漏。可以使用具有两次通过的可分离滤波技术（第12.1节），每次使用个样本,以获得与个样本相同的模糊结果，但渲染速度更快[**1681**]。最后，可以将最终的模糊缓冲区添加到场景缓冲区中。该技术是有效的，尽管有缺点，即只有屏幕上可见的光源才能投射光轴，但它以较低的成本提供了明显的视觉效果.

14.3 一般的体积渲染

在本节中,我们介绍了基于物理的体绘制技术,即试图表示介质的材料及其与光源的交互作用(第14.1.1节).一般的体积渲染与空间变化的参与媒体有关，通常使用体素来表示（13.10节），体积的光相互作用导致视觉上复杂的散射和阴影现象。 常规的体积渲染解决方案还必须考虑其他场景元素（例如不透明或透明表面）的正确体积构成。 在空间上变化的媒体属性可能是需要在游戏环境中进行渲染的烟雾模拟和火焰光影互动的结果。 或者，我们可能希望将固体材料表示为半透明体积，以用于医学可视化等应用。

14.3.1 体积数据可视化

体数据可视化是用于显示和分析体数据（通常是标量字段）的工具。计算机断层扫描（CT）和磁共振图像（MRI）技术可用于创建体内结构的临床诊断图像。数据集可以是2563个体素，每个位置保存一个或多个值。该体素数据可用于形成三维图像。体素渲染可以显示实体模型，或使各种材质（例如，皮肤和头骨）部分或完全透明。剖切平面只能用于显示部分或部分源数据。除了将其用于医学和石油勘探等各种领域中的可视化之外，体积渲染还可以产生逼真的图像。有许多体素渲染技术[**842**]。在复杂的照明环境下，可以使用常规的路径跟踪或光子映射来可视化体积数据。已经提出了几种较便宜的方法来实现实时性能。对于固体对象，可以使用隐式曲面技术将体素转换为多边形曲面，如第17.3节所述。对于半透明现象，可以通过垂直于视图方向的分层中的一组等距切片对体积数据集进行采样。图14.15显示了它是如何工作的。也可以用这种方法渲染不透明表面[797]。在这种情况下，当密度大于给定阈值时，则认为存在固体体积，并且可以将法线n评估为密度场的三维梯度。

对于半透明数据，可以存储每个体素的颜色和不透明度。 为了减少内存占用并使用户能够控制可视化，已经提出了传递函数。 第一种解决方案是使用一维转移纹理将体素密度标量映射到颜色和不透明度。 但是，这不允许识别特定的材料过渡，例如，人类鼻窦以单独的颜色从骨骼到空气或从骨骼到软组织。 为了解决这个问题，Kniss等人[912]建议使用基于密度d和密度场的梯度长度||▽d ||的二维传递函数。 变化区域具有较高的梯度幅度。 该方法导致密度过渡的更有意义的着色。 参见图14.16.

Ikits等人[797]深入讨论了该技术和相关问题。肯尼斯等人[913]扩展这种方法，而不是根据半角切片。切片仍会背对前渲染，但方向位于灯光和视图方向之间。使用这种方法，可以从光的角度渲染辐射和遮挡，并在视图空间中累积每个切片。渲染下一个切片时，可以使用切片纹理作为输入，使用来自光方向的遮挡来评估体积阴影，并使用辐射率来估计多重散射，即在到达眼睛之前，光在介质中多次反弹。由于先前的切片是根据磁盘中的多个样本采样的，因此该技术只能合成由圆锥内的前向散射导致的地下现象。最终的图像是高质量的。参见图14.17。 Schott等人已经扩展了这种半角方法。 [1577，1578]评估环境光遮挡和景深模糊效果，从而改善了查看体素数据的用户的深度和体感。

如图14.17所示，半角切片可以呈现高质量的次表面散射。然而，由于光栅化而导致的存储器带宽成本必须为每个切片支付.Tatarchuk和Shopf [**1744**]使用着色器中的光线行进来执行医学成像，因此只需支付一次光栅化带宽成本。如下一节所述，可以实现照明和阴影.

14.3.2 参与介质渲染

实时应用程序可以通过渲染参与媒体来描绘更丰富的场景。当涉及诸如一天中的时间，天气或诸如建筑物破坏之类的环境变化之类的因素时，这些效果变得更加苛刻。例如，中午或黄昏时，森林中的雾看起来会有所不同。树木之间闪耀的光束应适应太阳不断变化的方向和颜色。光束还应根据树木的运动进行动画处理。例如，通过爆炸清除一些树木，这会导致该区域散射光的变化，这是由于较少的遮挡物和产生的灰尘所致。篝火，手电筒和其他光源也会在空气中产生散射。在本节中，我们讨论可以实时模拟这些动态视觉现象影响的技术。

一些技术专注于从单个源渲染阴影大规模散射。Yusov [**1958**]深入描述了一种方法。它基于对沿极线散射的采样，这些光线投射到相机图像平面上的一条线上。从光源的角度来看，深度图用于确定样品是否被阴影遮挡。该算法从相机开始执行光线行进。沿着光线的最小/最大层次结构用于跳过空白空间，而仅在深度不连续处（即实际需要准确评估体积阴影的地方）进行光线行进。除了沿对极线采样这些不连续性，还可以通过渲染从光空间深度图生成的网格在视图空间中进行处理[**765**]。在视图空间中，仅需要正面和背面之间的体积即可评估最终的散射辐射。为此，通过将正面产生的散射辐射与视图相加，然后减去背面的辐射，可以计算出散射。

这两种方法均有效地再现了具有不透明表面遮挡所产生的阴影的单散射事件[765,1958].但是,这两种方法都不能代表异构参与介质，因为它们都假设介质是恒定的材料。此外，这些技术无法考虑非透明表面的体积阴影，例如，参与介质的自阴影或粒子的透明阴影（第13.8节）。由于可以跳过高分辨率[1958]，因此它们可以以高分辨率进行渲染并且速度很快，因此它们仍在游戏中得到了很好的应用。

已经提出了溅射方法来处理异构介质的更一般情况，沿着射线对体积材料进行采样。不考虑任何输入照明，Crane等人[**303**]使用喷溅来渲染烟雾，火和水，所有这些都是流体模拟产生的。在冒烟和起火的情况下，在每个像素处都会生成一条射线，该射线穿过整个体积，以均匀的间隔沿材质的长度从材质中收集颜色和遮挡信息。对于水来说，一旦遇到射线与水面的第一个碰撞点，就终止体积采样。表面法线被评估为每个样品位置的密度场梯度。为了确保水面光滑，使用三次三次插值法过滤密度值。使用这些技术的示例如图14.18所示。

考虑到太阳以及点光源和聚光灯，Valient[**1812**]将边界体积的集合渲染到半分辨率缓冲区中，在该边界体积中应该发生每个光源的散射。对每个光量进行光线行进，并将每个像素的随机偏移应用于光线行进开始位置。这样做会增加一点噪声，这具有消除由于恒定步进而导致的条带失真的优点。每帧使用不同的噪声值是一种隐藏伪影的方法。重新投影前一帧并与当前帧融合后，噪声将被平均并因此消失。通过将平面粒子体素化为三维纹理（以屏幕分辨率的八分之一映射到相机视锥上）来渲染非均质媒体。在光线行进期间，此体积用作材料密度。考虑到像素之间的深度差异，可以先使用双边高斯模糊，然后再使用双边上采样滤波器[**816**]，在全分辨率主缓冲区上合成半分辨率散射结果。当深度增量与中心像素相比过高时，将丢弃样本。这种高斯模糊在数学上是不可分离的（第12.1节），但在实践中效果很好。该算法的复杂性取决于屏幕上所散发的光量的数量，并取决于其像素覆盖率。

这种方法已经通过使用蓝噪声得到了扩展，蓝噪声更好地在帧像素上产生随机值的均匀分布[**539**]。这样做可以在使用双边滤波器在空间上对样本进行向上采样和混合时获得更流畅的视觉效果。使用四个混合在一起的随机样本也可以对半分辨率缓冲区进行上采样。结果仍然很嘈杂，但是由于它提供了全分辨率的每像素噪声，因此可以通过时间抗锯齿后处理轻松解决（第5.4节）。所有这些方法的缺点是，体积元素与其他任何透明表面的深度排序喷溅将永远不会给出结果的视觉正确排序，例如，使用大的非凸面透明网格或大规模的粒子效果。当在透明表面上应用体积照明时，所有这些算法都需要进行特殊处理，例如包含体素内散射和透射率的体积[**1812**]。因此，为什么不从一开始就使用基于体素的表示法来不仅表示空间变化的参与介质特性，还表示由光散射和透射率导致的辐射度分布？这种技术早已用于电影业[**1908**]。

Wronski [**1917**]提出了一种方法，其中将场景中来自太阳和光的散射辐射体素化为映射在视锥片段空间上的三维体纹理.针对每个体素中心世界空间位置评估散射的辐射度,其中体积的轴和轴对应于屏幕坐标,而坐标则映射在相机视锥的深度上.该体积纹理的分辨率远低于最终图像.此技术的典型实现方式是使用体素分辨率,该分辨率是和轴中屏幕分辨率的八分之一.沿坐标的细分取决于质量和性能的折衷,典型的选择是64切片.该纹理包含入散射(RGB形式)辐射和消光 (存储在alpha通道中).根据此输入数据,通过使用从近到远的迭代遍历每个切片来生成最终散射量

其中.这将在世界空间切片深度ds上从先前的切片z-1数据更新切片z.这样做将导致包含到达查看器的散射辐射和每个体素中背景的透射率.在公式14.15中,请注意仅受来自先前切片的透射率的影响.此行为是不正确的,因为还应受当前切片内导致的透射率的影响.

Hillaire[**742,743**]讨论了这个问题.他针对给定深度上恒定消光的积分提出了一种解析解决方案:

不透明表面的辐射度为的最终像素辐射度将由的和修改,并使用裁剪空间坐标作为进行采样.由于很粗糙,因此会因摄像机运动以及高频明亮的灯光或阴影而产生锯齿.可以使用指数移动平均值重新投影前一帧Vf并将其与新Vf组合[**742**].

在这个框架的基础上,Hillaire[**742**]提出了一种基于物理的方法来定义参与的介质材料,如下：散射σs，吸收σa，相函数参数g和发射辐射率Le。将该材质映射到相机视锥，并存储到参与的媒体材质体积纹理Vpm中，该材质是G缓冲区的三维版本，其中存储了不透明的表面材质（第20.1节）。仅考虑单次散射，并且考虑到体素离散，Hillaire显示，使用这种基于物理的材质表示，可以得到接近路径追踪的视觉效果.与网格类似,将位于世界上的参与媒体体积体素化为Vpm（请参见图14.19）.由于从三维输入纹理中采样了密度，因此定义了一种材料并添加了变化，从而产生了异构的参与介质。结果如图14.20所示。虚幻引擎[1802]中也实现了相同的方法，但是不是使用盒子体积作为参与介质的源，而是使用粒子，并假设使用球形体积而不是盒子。也可以使用稀疏结构[**1191**]，使用最顶部的体积（每个体素为空）或指向包含参与媒体材料数据的更细粒度的体积来表示材料体积纹理。

基于照相机视锥台体积的方法[**742,1917**]的唯一缺点是屏幕空间分辨率较低，以便在功能较弱的平台上达到可接受的性能（并使用合理的内存量）。这就是前面解释的喷溅方法之所以出类拔萃的地方，因为它们会产生清晰的视觉细​​节。如前所述，splatting需要更多的内存带宽，并且提供的统一解决方案较少，例如，很难将其应用于任何其他透明表面而没有排序问题或参与的媒体自身投射出卷影。不仅直射光，而且已经反射或散射的照明也可以通过介质散射。与Wronski [1917]类似，虚幻引擎可以烘焙体积光照贴图，将光照度存储在体积中，并在视图体积中体素化时使其散射回到介质中[1802]。为了在参与的媒体中实现动态全局照明，还可以依靠光传播体积[**143**]。

一个重要的功能是使用体积阴影。如果没有它们，那么在多雾的场景中的最终图像看起来可能会比应有的亮度和平坦度更高[**742**]。此外，阴影是重要的视觉提示。它们帮助观看者感知深度和体积[1846]，产生更逼真的图像，并可以带来更好的沉浸感。 Hillaire [742]提出了实现体积阴影的统一解决方案。根据剪贴图分配方案[1777]，参与的媒体体积和粒子被体素化为围绕相机而级联的三个体积，称为消光体积。这些包含评估Tr所需的消光σt值，并表示要采样的单个统一数据源，以便使用不透明阴影图获得体积阴影[742，894]。参见图14.21。这样的解决方案使粒子和参与的媒体能够自阴影化并在彼此之间以及场景中的任何其他不透明和透明元素上投射阴影。

可以使用不透明度阴影贴图表示体积阴影。但是，如果需要高分辨率来捕捉细节，则使用体积纹理会很快成为一种限制。因此，已经提出了替代表示来更有效地表示Tr，例如使用诸如傅立叶[816]或离散余弦变换[341]之类的正交函数基。详细信息在第7.8节中给出。

14.4 天空渲染

渲染世界本质上需要行星的天空，大气效果和云。我们将地球上的蓝天称为“阳光”在大气参与介质中散射的结果。第14.1.3节说明了白天天空为蓝色而太阳位于地平线时为红色的原因。气氛也是关键的视觉提示，因为它的颜色与太阳的方向有关，而太阳的方向与一天中的时间有关。大气层（有时）的雾状外观有助于观看者感知场景中元素的相对距离，位置和大小。因此，重要的是要准确地呈现越来越多的游戏和其他应用程序所需要的这些组件，这些应用程序具有动态的一天时间，不断变化的天气影响云的形状以及广阔的开放世界，以供探索，绕行甚至飞越。

14.4.1 天空和空中透视

为了渲染大气效果,我们需要考虑两个主要组成部分,如图14.22所示.首先,我们模拟太阳光与空气颗粒的相互作用,从而产生与波长有关的瑞利散射.这将导致天空变色和薄雾,也称为空中透视.第二,我们需要大颗粒集中在阳光下靠近地面的效果.这些大颗粒的浓度取决于天气条件和污染等因素.大颗粒会引起与波长无关的米氏散射.这种现象将在太阳周围引起明亮的光晕,特别是在粒子浓度较高的情况下.

第一个基于物理的大气模型[**1285**]从太空渲染了地球及其大气,模拟了单个散射.使用O'Neil[**1333**]提出的方法可以达到类似的结果。使用单通道着色器中的光线行进可以将地球从地面渲染到太空。渲染天空穹顶时，每个顶点都需要进行昂贵的射线行进以整合Mie和Rayleigh散射。但是，在像素着色器中评估了视觉上高频的相位函数。这样可以使外观平滑，并避免由于插值而露出天空几何图形。也可以通过将散射存储在纹理中并将评估分布在几个帧上，接受更新等待时间以获得更好的性能来获得相同的结果[**1871**]。

解析技术在测得的天空辐射率上使用拟合的数学模型[**1443**]或使用大气中光散射的昂贵路径跟踪生成的参考图像[**778**]。与参与媒体材料相比，输入参数集通常受到限制。 例如，浊度代表了导致Mie散射的粒子的贡献，而不是σs和σt系数。 Preetham等人[1443]提出的这种模型使用浊度和太阳高度评估任何方向的天空辐射。 通过增加对光谱输出的支持，对太阳周围的散射辐射更好的方向性以及新的地面反照率输入参数的改进[778]。分析性天空模型可以快速评估。但是，它们仅限于地面视图，并且不能更改大气参数来模拟地球外行星或获得艺术驱动的特定视觉效果。

渲染天空的另一种方法是假设地球是完美的球形，周围有一层由异质参与介质组成的大气层。Bruneton和Neyret[**203**]以及Hillaire [**743**]对大气的组成作了广泛的描述。利用这些事实，可以根据当前的视图高度r，相对于天顶µv的视图矢量角度的余弦值，相对于天顶µs的太阳方向角度的余弦值以及预先计算的表格来存储透射率和散射。方位角ν中相对于太阳方向的视图矢量角的余弦值。例如，可以通过两个参数r和µv设置从视点到大气边界的透射率。在预计算步骤中，可以将透射率整合到大气中并存储在二维查找表（LUT）纹理Tlut中，该纹理可以在运行时使用相同的参数化进行采样。这种纹理可用于将大气透射率应用于天空元素，例如太阳，星星或其他天体。

考虑到散射，Bruneton和Neyret [203]描述了一种将其存储在由上一段中的所有参数参数化的四维LUT Slut中的方法。 它们还提供了一种通过迭代n次来评估n阶多重散射的方法：（i）评估单散射表Slut，（ii）使用Sn-1 lut评估Slut n，以及（iii）将结果添加到Slut。 做（ii）和（iii）n − 1次。 Bruneton和Neyret [203]提供了有关该过程的更多详细信息以及源代码。有关结果的示例，请参见图14.23。Bruneton和Neyret的参数化有时可能会在地平线上显示出视觉伪像。Yusov [**1957**]提出了一种改进的转换方法。 通过忽略ν[**419**]，也可以仅使用三维LUT。 使用此方案，地球不会在大气层中投下阴影，这可以接受。 优点是该LUT将更小且更新和采样成本更低。

最后一种三维LUT方法已被许多电子艺界的《冰冻之锤》实时游戏使用，例如《极品飞车》，《镜之边缘催化剂》和《 FIFA》 [**743**]。在这种情况下，艺术家可以驱动基于物理的大气参数来达到目标​​天空的视觉效果，甚至可以模拟地球外的大气。参见图14.24。更改大气参数时，必须重新计算LUT。为了更有效地更新这些LUT，还可以使用一种函数来近似大气中材料的积分，而不是通过它进行光线行进[**1587**]。通过临时分配LUT的评估和多次散射，可以将LUT的更新成本摊销至原始成本的6％。这可以通过仅更新给定散射阶数n的Slut n的一部分来实现，同时对最后两个已求解的LUT进行插值，并接受几帧延迟。作为另一个优化，为避免每个像素多次对不同的LUT进行采样，Mie和Rayleigh散射在相机视锥台映射的低分辨率体积纹理的体素中烘焙。在像素着色器中评估视觉上的高频相位函数，以便在太阳周围产生平滑的散射光晕。使用这种类型的体纹理还可以将每个顶点的空中透视应用于场景中的任何透明对象。

14.4.2 云

云是天空中的复杂元素。当代表即将来临的暴风雨时，它们看上去可能会令人生畏，或者交替出现谨慎，史诗，稀薄或大块。云的变化缓慢，其大型形状和小型细节都会随着时间而发展。具有天气和时间变化的大型开放世界游戏是更复杂的情况，需要动态的云渲染解决方案。根据目标性能和视觉质量，可以使用不同的技术。

云是由水滴组成的，具有高散射系数和复杂的相函数，从而具有特定的外观。如第14.1节所述，通常使用参与介质对它们进行模拟，并且对它们的材料进行了测量，其单散射反照率ρ= 1高，层的消光系数σt在[0.04，0.06]范围内（低水平水平云层）和[0.05，0.12]表示积云[743]（孤立的低层棉花状蓬松云）。参见图14.25。给定ρ接近1的事实，可以假定σs=σt。

云渲染的经典方法是使用通过alpha混合在天空上合成的单个全景纹理。渲染静态天空时这很方便。 Guerrette [**620**]提出了一种视觉流动技术，该技术给出了受全球风向影响的天空中云运动的幻觉。这是一种有效的方法，可以改善静态云全景纹理集的使用。但是，它将无法表示云形状和光照的任何变化。

哈里斯将云渲染为大量的颗粒和冒充者[**670**]。 请参阅第13.6.2节和第557页上的图13.9。Yusov [**1959**]提出了另一种基于粒子的云渲染方法。他使用称为体粒子的渲染图元。这些中的每一个都由一个四维LUT表示，允许根据太阳光和视线方向获取散射光和面向视线的四方粒子上的透射率。参见图14.26。这种方法非常适合渲染平积云。参见图14.25。

当将云渲染为粒子时，通常会看到离散和爆裂伪像，尤其是在绕云旋转时。通过使用体积感知混合可以避免这些问题。通过使用称为栅格化程序顺序视图的GPU功能（第3.8节），可以实现此功能。体积感知混合使每个基本资源上的像素着色器操作同步，从而允许确定性的自定义混合操作。最接近的n个粒子的深度层以与我们要渲染到的渲染目标相同的分辨率保存在缓冲区中。读取此缓冲区，并通过考虑相交深度将其用于混合当前渲染的粒子，然后最终再次为要渲染的下一个粒子再次写出。结果如图14.27所示。

考虑到云是孤立的元素，Bouthors等人[**184**]表示云由两个部分组成：一个显示其整体形状的网格和一个超纹理[**1371**]，它在网格表面下增加了高频细节，直到网格内部一定深度为止。 云。 使用此表示法，可以对云边缘进行精细的射线编组以收集细节，而内部可以视为均匀的。 射线行进云结构时会集成辐射度，并且根据散射顺序使用了不同的算法来收集散射的辐射度。 使用第14.1节中所述的分析方法对单个散射进行积分。 使用位于云表面的圆盘状光收集器的离线预计算转移表，可以加快多重散射评估的速度。 最终结果是高视觉质量，如图14.28所示。

除了将云渲染为孤立的元素外，还可以将它们建模为大气中参与的媒体层。 Schneider和Vos依靠射线行进，提出了一种有效的方法以这种方式渲染云[**1572**]。仅需几个参数，就可以在动态的一天中的光照条件下渲染复杂，动画和详细的云形状，如图14.29所示。 该层是使用两个级别的过程噪声构建的。 第一级使云具有基本形状。 第二层通过腐蚀该形状来添加细节。 在这种情况下，据报道Perlin [**1373**]和Worley [**1907**]噪声的混合很好地表示了积云和类似云朵的菜花状形状。生成此类纹理的源代码和工具已公开共享[**743，1572**]。通过使用沿视线分布在云层中的样本对来自太阳的散射光进行积分来实现照明。

可以通过评估该层内几个样品的透射率，并作为二次射线行进，朝着太阳进行测试，从而实现体积阴影化（743，1572）。 可以为这些阴影样本采样较低的mipmap噪声纹理级别，以实现更好的性能并消除仅使用几个样本时可见的伪像。 避免每个样本发生二次光线行进的另一种方法是，使用许多可用技术之一（第13.8节）对纹理中的每帧从太阳发出的透射曲线进行编码。 例如，游戏《最终幻想XV》 [**416**]使用透射率函数映射[**341**]。

如果要捕获每个小细节，以光线行进方式渲染高分辨率的云可能会变得昂贵。 为了获得更好的性能，可以以低分辨率渲染云。 一种方法是仅更新每个4×4块内的单个像素，然后重新投影以前的帧数据以填充其余的帧[1572]。 Hillaire [743]提出了一种变体，该变体始终以固定的较低分辨率进行渲染，并在视线行进开始位置上增加了噪点。可以使用指数移动平均值[**862**]重新投影前一帧结果并将其与新帧组合。 这种方法以较低的分辨率渲染，但是可以收敛得更快。

云的相函数很复杂[**184**]。在这里，我们提出了两种可用于实时评估它们的方法。 可以将函数编码为纹理并根据θ对其进行采样。 如果这样做需要太多的存储带宽，则可以通过组合第14.1.4节[**743**]中的两个Henyey-Greenstein相位函数来近似函数：

有多种方法可以近似估算来自云中环境照明的散射光。一个简单的解决方案是使用从天空渲染均匀地集成到立方体贴图纹理中的单个辐射输入。自底向上的暗光渐变色也可以用于缩放环境光照，以近似估计来自云本身的遮挡。 也可以将此输入辐射分为底部和顶部，例如地面和天空[**416**]。 然后，假设云层内的介质密度恒定，则可以同时分析两种散射对环境散射的影响[1149]。

在渲染有云的场景时，为了视觉连贯性，考虑与大气散射的相互作用非常重要。 参见图14.32。

由于云是大型元素，因此应将大气散射应用于它们。对于通过云层采集的每个样品，可以评估第14.4.1节中介绍的大气散射，但是这样做很快会变得昂贵。相反，可以根据代表平均云层深度和透射率的单个深度在云层上应用大气散射[**743**]。如果增加云量以模拟阴雨天气，应减少云层下大气中的阳光散射。只有散布在云层中的光才能在云层下面的大气中散射。可以通过减少天空对空中视角的照明贡献并将散射的光添加回大气中来修改照明[743]。视觉效果如图14.32所示。总而言之，可以使用基于物理的高级材质表示和照明来实现云渲染。可以通过使用过程噪声来实现逼真的云形状和细节。最后，如本节所述，记住大图景（如云层与天空的相互作用）也很重要，以便获得连贯的视觉效果。

14.6 次表面散射 2020年7月30日16点42分

次表面散射是在具有高散射系数的固体材料中发现的复杂现象(更多信息请参见第9.1.4节).此类材料包括蜡,人的皮肤和牛奶,如第592页的图14.2所示.

一般的光散射理论已在14.1节中进行了解释。 在某些情况下，对于具有高光学深度的介质（例如人体皮肤），散射的规模相对较小。 散射光从接近其原始入射点的表面重新发出。 这种位置偏移意味着不能使用BRDF对地下散射进行建模（第9.9节）。 即，当散射发生在大于像素的距离上时，其更整体的性质是显而易见的。 必须使用特殊方法来呈现这种效果。

图14.42显示了散射通过对象的光。散射导致入射光采用许多不同的路径。由于单独模拟每个光子是不切实际的（即使是对于脱机渲染也不可行），因此必须通过可能的路径上的积分或近似这样的积分来概率性地解决该问题。除了散射以外，穿过材料的光也会吸收。区分图14.42中所示的各种光路的一个重要因素是散射事件的数量。对于某些路径，光被散射一次后离开材料。对于其他人，光被散射两次，三次或更多。散射路径通常分为单次散射和多次散射。通常为每个组使用不同的渲染技术。对于某些材料，单次散射是整体效果中相对较弱的部分，而多次散射则占主导地位，例如皮肤。由于这些原因，许多次表面散射渲染技术专注于模拟多重散射。在本节中，我们介绍几种近似次表面散射的技术。

14.6.1 Wrapping Lighting

也许最简单的次表面散射方法是环绕照明[**193**]。第382页上讨论了该技术,它是面光源的近似值.当用于近似地下散射时,我们可以添加色移[**586**].这解释了穿过材料传播的光的部分吸收.例如,渲染皮肤时,可以应用红色偏移.

当以这种方式使用时，环绕照明会尝试模拟多重散射对曲面着色的影响。从相邻点到当前着色点的“泄漏”会柔化从曲面到远离曲面的从暗到暗的过渡区域。 Kolchin [**922**]指出，这种效应取决于表面曲率，他得出了基于物理的形式。尽管派生的表达式评估起来有些昂贵，但其背后的想法很有用。

14.6.2 法相模糊

斯坦[**1686**]指出,可以将多重散射建模为扩散过程.Jensen等人[**823**]进一步发展了这个想法,以导出双向分析表面散射分布函数（BSSRDF）模型。 BSSRDF是BRDF在全局次表面散射情况下的概括[**1277**]。扩散过程对输出辐射具有空间模糊作用。

该模糊仅应用于漫反射率。镜面反射发生在材料表面，不受地下散射的影响。由于法线贴图通常会编码小范围的变化，因此，对地下散射有用的技巧是将法线贴图仅应用于镜面反射[569]。平滑，不受干扰的法线用于漫反射。由于没有增加的成本，因此在使用其他地下散射方法时通常值得应用此技术。

对于许多材料，在相对较小的距离上会发生多次散射。皮肤是一个重要的例子，其中大多数散射发生在几毫米的距离上。对于此类材料，不干扰漫射法线法线本身的技术可能就足够了。 Ma等人[**1095**]基于测量数据扩展了该方法。他们确定了来自散射对象的反射光，并发现，尽管镜面反射基于几何表面法线，但次表面散射使漫反射的行为就像使用模糊表面法线一样。此外，模糊量可以在可见光谱范围内变化。他们提出了一种实时着色技术，该技术使用独立获取的法线贴图来获取镜面反射率以及漫反射率的R，G和B通道[**245**]。对于每个通道使用不同的法线贴图将导致颜色渗色。由于这些漫射法线贴图通常类似于镜面贴图的模糊版本，因此可以很容易地修改此技术以使用单个法线贴图，同时调整mipmap级别，但以失去色移为代价，因为法线对于每个频道。

14.6.3 预积分皮肤着色

Penner [**1369**]结合了环绕照明和正常模糊的思想，提出了一种预先集成的皮肤阴影解决方案。

散射和透射率被集成并存储在二维查找表中。 LUT的第一根轴基于n·l进行索引。第二轴基于表示表面曲率的1 / r = || n / np ||进行索引。曲率越高，对透射色和散射色的影响越大。因为每个三角形的曲率是恒定的，所以必须离线烘焙和平滑这些值。为了处理次表面散射对小的表面细节的影响，Penner修改了Ma等人的技术。 [1095]，在上一节中进行了讨论。 Penner不需要获取R，G和B漫反射率的单独的法线贴图，而是根据每个颜色通道的地下材料的漫射轮廓模糊原始法线贴图来生成它们。由于使用四个单独的法线贴图会占用大量内存，因此作为优化，他使用了一个平滑的法线贴图，该图与每个颜色通道的顶点法线混合。该技术将忽略光在阴影边界上的扩散，因为默认情况下它仅依赖于曲率。为了使散射轮廓跨越阴影边界，可以使用阴影半影轮廓来偏置LUT坐标。因此，这种快速的技术能够近似于下一部分[**345**]中介绍的高质量方法。

14.6.4 纹理空间扩散

模糊漫射法线会导致多重散射的某些视觉效果，而不能消除其他散射（如柔化的阴影边缘）的视觉效果。纹理空间扩散的概念可用于解决这些限制。Lensch等人[**1032**]介绍了这个想法。但Borshukov和Lewis [**178,179**]提出的版本最具影响力。他们将多重散射的概念形式化为模糊过程。首先，将表面辐照度（漫射照明）渲染为纹理。这是通过使用纹理坐标作为栅格化位置来完成的。分别对真实位置进行插值以用于着色。该纹理被模糊，然后在渲染时用于漫反射着色。滤光片的形状和大小取决于材料和波长。例如，对于皮肤，R通道使用比G或B宽的滤镜进行滤波，从而导致阴影边缘附近变红。用于模拟大多数材料中的地下散射的正确滤波器在中心处具有窄的尖峰，而在底部浅而宽。这项技术最初是供离线渲染使用的，但是实时GPU的实现很快由NVIDIA [**345,586**]和ATI [**568,569,803,1541**]的研究人员提出。

d'Eon和Luebke [**345**]的演讲代表了该技术最完整的处理方法之一，包括支持模仿多层地下结构效果的复杂滤波器。 Donner和Jensen [**369**]表明，此类结构可产生最逼真的皮肤效果。 d'Eon和Luebke提出的完整的NVIDIA皮肤渲染系统产生了出色的效果（示例请参见图14.43），但价格昂贵，需要大量的模糊处理。但是，可以很容易地将其缩小以提高性能。

Hable [**631**]并没有应用多个高斯遍，而是提出了一个12个样本的内核。可以在纹理空间中将滤镜作为预处理，也可以在对屏幕上的网格进行栅格化时应用于像素着色器。这使得面部渲染要快得多，但要付出一些真实感。当关闭时，少量采样可以显示为色带。但是，距离适中，质量差异不明显。

14.6.5 屏幕空间扩散 2020年7月30日18点13分

为场景中的所有网格渲染光照贴图并对其进行模糊处理，无论是在计算上还是在存储方面，都可能很快变得昂贵。此外，网格需要渲染两次，一次在光照图中，一次在视图中，并且光照图需要具有合理的分辨率，以便能够从小范围的细节表示地下散射。

为了解决这些问题，希门尼斯提出了一种屏幕空间方法[**831**]。首先，照常渲染场景，并在模板缓冲区中记录需要地下散射的网格（例如人脸）。然后，对包含半透明材质的像素，使用模版测试仅在需要的地方应用昂贵的算法，对存储的辐射度进行两次Pass的屏幕空间处理，以模拟地下散射。额外的遍将水平和垂直应用两个一维和双边模糊核。彩色模糊内核是可分离的，但是由于两个原因，它不能以完全可分离的方式应用。首先，必须考虑线性视图深度，以根据表面距离将模糊拉伸到正确的宽度。第二，双边过滤避免了光从不同深度的材料泄漏，即在不应相互作用的表面之间泄漏。此外，必须考虑法线方向，以使模糊滤镜不仅应用于屏幕空间，而且与表面相切。最后，这使模糊核的可分离性接近，但仍是高质量的。后来，提出了一种改进的可分离滤波器[**833**]。由于算法依赖于屏幕上的材质区域，因此对于脸部特写而言该算法昂贵。但是，此成本是合理的，因为这些区域的高质量才是所期望的。当场景由许多字符组成时，此算法特别有用，因为它们将同时处理。参见图14.44。

为了进一步优化该过程，可以将线性深度存储在场景纹理的Alpha通道中。一维模糊依赖少量样本，因此在关闭的脸部上可以看到欠采样。为避免此问题，可以按像素旋转内核，这将隐藏带有噪声的重影伪影[**833**]。通过使用时间抗混叠可以大大降低这种噪声的可见性（第5.4.2节）。在实现屏幕空间扩散时，必须注意仅使辐照度模糊，而不使漫反射反照率或镜面照明模糊。实现此目标的一种方法是将辐照度和镜面照明渲染到单独的屏幕空间缓冲区中。如果使用延迟着色（第20.1节），则具有漫反射反照率的缓冲区已可用。为了减少存储带宽，Gallagher和Mittring [**512**]建议使用棋盘图案将辐照度和镜面照明存储在单个缓冲区中。辐照度模糊后，通过将漫反射反照率与模糊辐照度相乘并在顶部添加镜面照明来合成最终图像。

在此屏幕空间框架内，还可以渲染大规模的地下散射现象，例如穿过鼻子或耳朵的光线。当渲染网格漫射照明时，Jimenez等人[**827**]提出的技术还通过使用反面法线-n对来自相反侧的入射光进行采样，增加了来自背面贡献的地下透射。该结果通过使用透射率值来估计，该透射率值是通过对从光的角度渲染的传统阴影贴图进行采样而恢复的深度来估算的，类似于下一部分中Dachsbacher和Stamminger的方法[**320**]。为了表示圆锥中的前向散射，可以多次采样阴影贴图。为了使用每个像素较少的样本数来降低渲染成本，可以获取两个阴影样本，每个阴影具有随机偏移或每个像素旋转。这样做会导致不必要的视觉噪音。值得庆幸的是，可以通过实现半透明的次表面光扩散所需的屏幕空间次表面模糊内核自动免费滤除这种噪声。因此，有可能呈现高质量的半透明效果，以模拟圆锥中的前向光通过脸部的细小部分散射，每个光源仅包含一个额外的深度图样本。

14.6.6 深度贴图技术

迄今为止讨论的技术对在相对较小的距离例如皮肤上的光散射进行建模。对于表现出大范围散射的材料，例如穿过手的光，还需要其他技术。其中许多集中于单一散射，这比多重散射更容易建模。大规模单次散射的理想仿真如图14.45左侧所示。由于折射，光路在进入和离开对象时会改变方向。需要汇总所有路径的效果以对单个曲面点进行着色。还需要考虑吸收-路径中的吸收量取决于其在材料内部的长度。即使对于离线渲染器，为单个阴影点计算所有这些折射射线也很昂贵，因此通常会忽略进入材料时的折射，并且仅考虑离开材料时方向的变化[**823**]。由于投射的光线始终沿光的方向，因此Hery [**729,730**]指出，可以访问通常用于阴影的光空间深度图，而不用执行投射光线。参见图14.45的中间部分。对于根据相位函数散射光的介质，散射角也会影响散射光的量。执行深度图查找的速度比射线投射的速度快，但是所需的多个样本使Hery的方法对于大多数实时渲染应用程序来说太慢了。 Green [**586**]提出了一种更快的近似值，如图14.45右侧所示。尽管此方法的物理基础较少，但其结果令人信服。一个问题是物体背面的细节可以显示出来，因为物体厚度的每次变化都会直接影响阴影颜色。尽管如此，格林的逼近效果足以被皮克斯用于《料理鼠王》 [**609**]等电影。皮克斯将这种技术称为口香糖灯。 Hery实施的另一个问题是深度图不应包含多个对象或高度非凸的对象。这是因为假定阴影（蓝色）点和相交（红色）点之间的整个路径都位于对象内。皮克斯通过使用一种深阴影图[**1066**]解决了这个问题。

实时对大规模多重散射进行建模非常困难，因为每个表面点都会受到来自其他任何表面点的光的影响。 Dachsbacher和Stamminger [320]提出了阴影映射的扩展，称为半透明阴影映射，用于对多重散射进行建模。其他信息（例如辐照度和表面法线）存储在光空间纹理中。从这些纹理中获取了几个样本，包括深度图，并将它们组合起来以形成散射辐射的估计值。 NVIDIA的皮肤渲染系统使用了对此技术的修改[345]。 Mertens等。 [1201]提出了一种类似的方法，但是在屏幕空间而不是光空间中使用纹理。树木中的叶子也表现出很强的地下散射效果，当光线从后面进入时，它会显示为亮绿色。除了反照率和正常纹理外，可以将表示通过叶体积的透射率Tr的纹理映射到表面上[1676]。然后，可以使用一个自组织模型来近似估算灯光的其他地下贡献。由于叶子是薄元素，因此可以使用负法线作为对侧法线n的近似值。可以将背光贡献评估为（l·-n）+·（-v·l）+，其中l是光方向，v是视线方向。然后可以将其与表面反照率相乘，并添加到直接光贡献之上。

Barr'e-Brisebois和Bouchard [105]以类似的方式对网格上的大规模次表面散射提出了一种廉价的即席近似。 首先，对于每个网格，它们会生成一个灰度纹理，该纹理存储平均局部厚度，该平均厚度是从向内法线-n计算得出的环境光遮挡的一分之一。 这种被称为tss的纹理被认为是可以应用于从表面的相反侧发出的光的透射率的近似值.