在第9章中,我们讨论了基于物理的材料的理论,以及如何使用精确光源对其进行评估.使用此内容,我们可以通过模拟灯光与表面的交互方式执行着色计算,以测量在给定方向上向虚拟相机发送的辐射量.该光谱辐射度是场景参考的像素颜色,它将被转换(见第8.2节)为给定像素在最终图像中将具有的显示参考颜色.

实际上,我们需要考虑的交互从来都不是精确的.我们已经在9.13.1节中看到了,为了正确评估着色,我们如何解决整个像素覆盖区上表面BRDF响应的积分,这是像素区域在表面上的投影. 这种集成过程也可以视为一种抗锯齿解决方案.我们不是对采样频率函数没有限制的阴影函数进行采样,而是对其进行了预积分.

到现在为止，仅提出了点光源和定向光源的效果，这限制了表面接收来自多个离散方向的光。 照明的描述不完整。 实际上，表面从所有入射方向接收光。 户外场景不仅被太阳照亮。 如果是这样，则阴影或背向太阳的所有表面都是黑色的。天空是太阳光从大气中散射而来的重要光源。通过查看月球图片可以看出天光的重要性，因为月球缺少大气，因此缺少天光。参见图10.1。

在阴天,以及黄昏或黎明,室外照明都是天光.即使在晴朗的日子里,从地球上看,太阳也照着圆锥形,所以它并不是无限小.奇怪的是,尽管它们的大小相差很大,但太阳和月亮都以相似的角度对着，大约相差半个角度，即太阳的半径比月亮大两个数量级。

实际上，照明永远不会精确光。在某些情况下，无穷小实体可用作廉价的近似值，或作为更完整模型的构建基块。为了形成更逼真的照明模型，我们需要在表面入射方向的整个半球上集成BRDF响应。 在实时渲染中，我们更喜欢通过找到封闭形式的解或近似解来解决渲染方程（第11.1节）所需要的积分。我们通常避免平均多个样本（射线），因为这种方法往往会慢得多。参见图10.2。

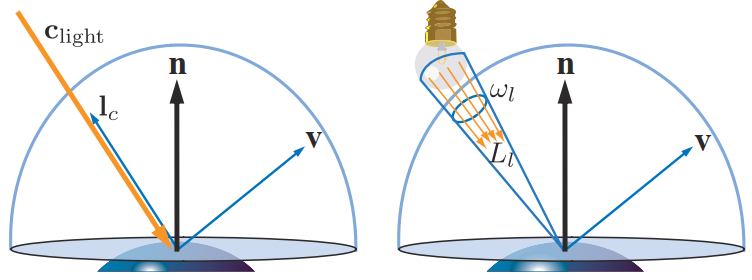
本章专门探讨这种解决方案。特别是，我们想通过使用各种非点光源来计算BRDF来扩展着色模型.通常,为了找到廉价的解决方案（或根本没有解决方案），我们将需要估算光发射器，BRDF或两者.重要的是要在感知框架中评估最终着色结果,了解最终图像中最重要的元素,并为此付出更多的努力。

本章从公式开始，以集成分析区域光源。此类发射器是场景中的主要光源，负责大部分直接照明强度，因此，对于这些发射器，我们需要保留我们选择的所有材质。应为此类发射器计算阴影，因为漏光会导致明显的伪影。然后，我们研究表示更一般的照明环境的方式，这些环境由传入的半球上的任意分布组成。在这些情况下，我们通常接受更近似的解决方案。环境照明用于大型，复杂但强度较小的光源。示例包括从天空和云层散射的光，从场景中的大型物体反射回来的间接光以及调光的直接区域光源。这样的发射器对于正确平衡图像（否则会显得太暗）很重要。即使考虑间接光源的影响，我们仍然不在全局照明的范围内（第11章），这取决于场景中其他表面的明确知识。

10.1 区域光源

在第9章中,我们描述了理想的无穷小光源:精确和定向光源.图10.3显示了一个表面点上的入射半球,以及无限小光源和非零尺寸的面光源之间的差异.左侧的光源使用第9.4节中讨论的定义.它从单个方向照亮表面.它的亮度由颜色表示,定义为白色朗伯表面的反射辐射.点或方向光在方向上对输出辐射的贡献为(请注意,在第1.2节中介绍了将负数截断为零的表示法).区域光源的亮度(在右侧)由其辐射度表示.区域光在表面位置所对的立体角为.它在方向上的输出辐射贡献是在上的积分.

无限小光源背后的基本近似值用以下公式表示:



**图10.3** 考虑到由表面法线定义的可能入射光方向的半球,由光源照射的表面.在左侧,光源是无限小的.在右侧,它被建模为面光源.

区域光源对表面位置的照明的贡献量是其辐射度()和从该位置观察到的大小()的函数.正如我们在9.4节中所看到的那样,点光源和定向光源是近似值,在实践中无法实现,因为它们的零立体角意味着无限的辐射.了解近似法引入的视觉误差将有助于知道何时使用近似值,以及何时无法使用近似值.**这些误差将取决于两个因素:光源大小引起从误差,该误差从着色点覆盖的立体角来衡量,以及表面的光滑度**.

图10.4显示了表面上镜面高光的大小和形状如何取决于材料的粗糙度和光源的大小.对于较小的光源(与视角相比,它具有较小的立体角),误差很小.粗糙的表面也倾向于显示出小于抛光的光源大小的效果.通常,朝向表面点的面发光和表面BRDF的镜面波瓣都是球形的.如果我们考虑这两个函数的贡献显着的方向集,则会获得两个立体角.与BRDF镜面高光立体角的大小相比,误差的决定因素与发射角的相对大小成比例.

最后,请注意,**可以通过使用点光源并增加表面粗糙度来近似区域光的高光**.该观察对于得出面积光积分的成本较低的近似值很有用.这也解释了为什么在实践中许多实时渲染系统仅使用精确光源产生合理的结果:艺术家补偿误差.但是,这样做会有害,因为它将材料属性与特定的照明设置耦合在一起.更改照明方案时,以这种方式创建的内容将看起来不正确.

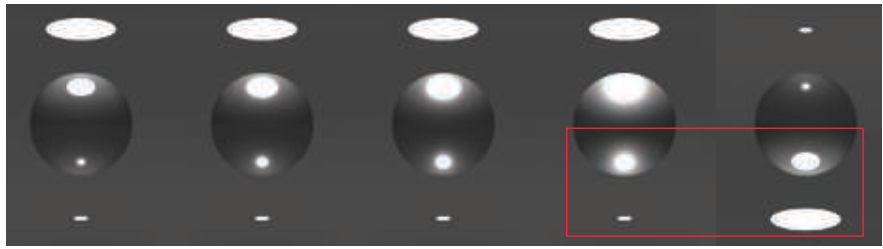
对于Lambertian曲面的特殊情况,可以将点光源用作面光源.对于此类表面,输出辐射度与辐照度成正比:

其中是次表面反照率或漫反射颜色(第9.9.1节).这种关系使我们可以使用等式10.1来计算辐照度,这要简单得多:

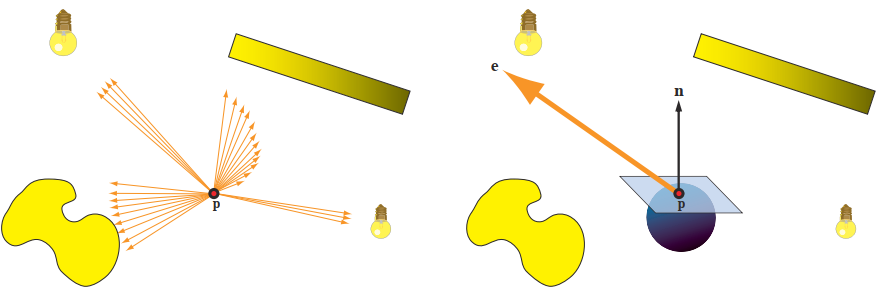
**矢量辐照度[vector irradiance]**的概念对于了解存在面光源的情况下辐照度的行为很有用.矢量辐照度是由Gershun[**526**]引入的,他称其为光矢量,并由Arvo[**73**]进一步扩展.使用矢量辐照度,可以将任意大小和形状的面光源精确地转换为点光源或定向光源.

想象辐射度的分布进入空间点.参见图10.5.现在我们将假设与波长无关,因此可以表示为标量.对于以入射方向为中心的每个无穷小立体角,构造一个与对齐且长度等于从该方向入射的(标量)辐射度乘以.最后,将所有这些向量求和以产生矢量辐照度:

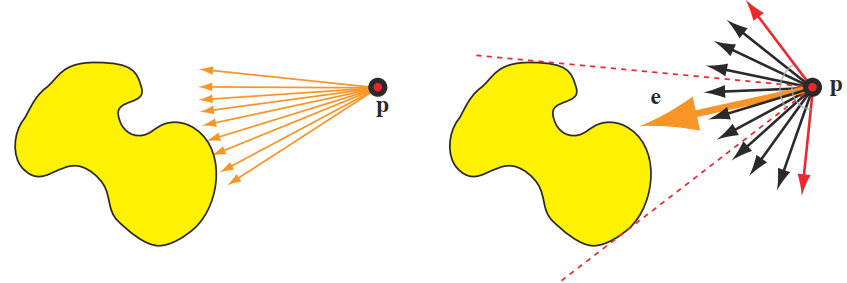
其中表示积分是在方向的整个范围内执行的.



**图10.4**:使用GGX BRDF,从左到右,球体的表面粗糙度会增加.最右边的图像复制了系列中的第一个图像,垂直翻转.请注意,由低粗糙度材料上的较大的磁盘光引起的高光和着色看起来与由粗糙得多的材料上的较小光源导致的高光看起来相似.



**图10.5**:矢量辐照度的计算.左:点被各种形状,大小和辐射分布的光源包围.黄色的亮度表示发出的辐射量.橙色箭头是指向所有入射辐射的方向矢量,每个长度等于该方向的辐射量乘以箭头所覆盖的无穷小立体角.原则上应该有无数个箭头.右:矢量辐照度(橙色大箭头)是所有这些矢量的总和.矢量辐照度可用于计算点处任何平面的净辐照度.



**图10.6**:单面光源的矢量辐照度.在左侧,箭头代表用于计算矢量辐照度的矢量.右边的橙色大箭头是矢量辐照度.红色虚线表示光源的范围,红色矢量(每个垂直于红色虚线之一)定义了一组表面法线的界限.该集合外的法线与面光源的某些部分的夹角大于90°.这样的法线无法使用正确计算其辐照度.

通过执行点积,可以使用矢量辐照度通过任意方向的平面找到处的净辐照度:

其中是平面法线.通过平面的净辐照度是流经平面“正侧”(由平面法线定义)的辐照度与流经“负侧”的辐照度之间的差.就其本身而言,净辐照度对着色无用.但是,如果没有辐射通过“负侧”发出(换句话说,被分析的光分布不包含和之间的角度超过90°的部分),则且

只要与面光源的任何部分相距不超过90°,就可以将公式10.6与单面光源的矢量辐照度一起使用,用任意法线照亮朗伯表面.参见图10.6.

如果我们的假设依赖于波长,那么通常情况下我们将无法再定义单个向量.(**这句话的意思是之前假设光是灰色的,因此辐照度E是个标量.而我们常用的颜色是三元向量,E是向量,因此无法定义单个向量**)但是,彩色光在所有点上通常具有相同的相对光谱分布,这意味着我们可以将分解为颜色和与波长无关的辐射度分布.在这种情况下,我们可以为计算并通过将乘以来扩展等式10.6.这样做会导致使用相同的公式来计算定向光源的辐照度,但有以下替换:

我们已经有效地将任意形状和大小的面光源转换为定向光源,而不会引入任何误差.

2020年4月16日13点32分

对于简单的情况，可以通过解析解找到用于查找矢量辐照度的公式10.4.例如,设想一个球形光源,其中心为,半径为.光从球上的每个点在所有方向上发出恒定的辐射.对于这种光源,公式10.4和10.7得出以下结果:

该公式与的标准反平方距离衰减函数的全向灯(第5.2.2节)相同.可以调整此衰减函数以解决球体内的点,并将光线影响限制到给定的最大距离.有关此类调整的更多详细信息,请参见第5.2.2节.

请注意,尽管对于球形光源,衰减的确采用了通常的平方反比公式(此处的距离是相对于光源表面而不是其中心的距离),但对于所有区域光源形状而言,通常情况并非如此.值得注意的是,圆盘灯的衰减量与成正比.

所有这些都只有在没有“负向”辐射的情况下才是正确的.另一种思考的方式是,区域光源的任何部分都不能“在水平线以下”或被表面遮挡.我们可以概括这一说法.对于朗伯曲面,面光源和点光源之间的所有差异都是由遮挡差异引起的.点光源的辐照度对于所有不遮挡光的法线都遵循余弦定律.考虑到遮挡,Snyder得出了球形光源的解析表达式[1671].这个表达很复杂.但是,由于它仅取决于两个量(和,即和之间的夹角),因此可以将其预先计算为二维纹理.Snyder还提供了两个适合实时渲染的函数近似值.

在图10.4中,我们看到粗糙表面的区域照明效果并不明显.此观察结果还使我们能够使用基于物理的,但仍不那么有效的方法来建模区域光在Lambertian曲面上的效果:环绕照明[Wrap Lighting].在这种技术中,在将的值截断为0之前,对它进行了一些简单的修改.Forsyth [487]给出了一种环绕照明的形式:

其中的范围从点光源的0到覆盖整个半球的面光源的1到不等.Valve[1222]使用了模拟大面积光源效果的另一种形式:

通常,如果我们计算区域照明,还应该修改阴影计算以考虑非精确光源.如果我们不这样做,那么一些视觉效果可以被刺眼的阴影抵消掉[193].如第7章所述,柔和的阴影可能是面光源最常见的效果.

10.1.1 光滑材质

区域光在非朗伯表面上的影响更多.Snyder得出了球形光源的解决方案[1671],但它仅限于原始的反射矢量Phong材料模型,并且极其复杂.现在,实践中需要近似值.

高光是区域光在光滑表面上的主要视觉效果.参见图10.4.它的大小和形状类似于区域光,而高光的边缘会根据表面的粗糙度而变得模糊.该观察结果导致了该效应的一些经验近似.在实践中,这些可以说服自己.例如,我们可以修改高光计算的结果,以纳入一个临界阈值,该阈值会创建一个较大的平坦高光区域[606].如图10.7所示,这可以有效地产生来自球形光的镜面反射的错觉.



**图10.7**:光滑物体上的亮点是光源形状的清晰反射.在左侧,通过对Blinn-Phong着色器的高光值进行阈值来近似此外观.在右侧,使用未修改的Blinn-Phong着色器渲染同一对象以进行比较. (图片由Larry Gritz提供.)

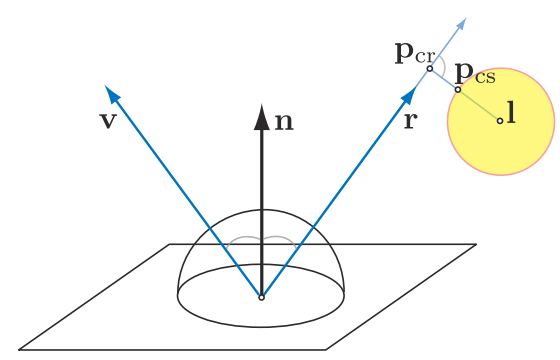
用于实时渲染的大多数区域照明效果的实际近似值均基于以下想法:针对每个着色点找到等效的点光源设置,该设置将模仿非无限小光源的效果.这种方法通常用于实时渲染中以解决各种问题.在处理表面像素覆盖区上的BRDF积分时,这与我们在第9章中看到的原理相同.它产生的近似值通常不贵,因为所有工作都是通过更改着色方程的输入来完成的,而不会引起任何额外的复杂性.由于数学没有其他改变,因此我们通常可以保证在某些条件下,我们可以恢复对原始阴影的评估,从而保留其所有属性.由于大多数典型系统的阴影代码都是基于精确光源,因此将它们用于区域光源只会引入局部代码更改.

最早开发的一种近似方法是在虚幻引擎的“元素演示”[1229]中使用的Mittring粗糙度修改.这个想法是首先找到一个圆锥体,该圆锥体包含入射到表面方向的半球上大部分的光源辐照度.然后,我们在镜面波瓣周围安装一个类似的圆锥体,其中包含“大部分”BRDF.参见图10.8. 然后,这两个圆锥都是半球上的函数的替身,它们包含了这两个函数的值大于给定的任意截止阈值的方向集.这样做之后,我们可以通过找到具有不同粗糙度的新BRDF凸角来近似估计光源和材料BRDF之间的卷积,该凸角具有对应的圆锥,其立体角等于光凸角与材料的和.

Karis[861]展示了Mittring原理在GGX/TrowbridgeReitz BRDF(第9.8.1节)和球形区域光上的应用,从而对GGX粗糙度参数进行了简单的修改:

请注意,将第1.2节中引入的符号用于在0和1之间进行截断.这种近似效果相当好,并且非常高效,但是对于有光泽的,几乎像镜子的材料会失效.之所以会发生这种问题,是因为镜面波瓣始终是光滑的,无法模仿区域光源在表面上的尖锐反射所引起的高光.同样,大多数微面BRDF模型的叶不是“紧凑的”(局部化),而是表现出较大的衰减(镜面尾部),这使得粗糙度重映射效果不佳.参见图10.9.

除了改变材料的粗糙度之外,另一个想法是用光的方向来表示区域照明的光源,该方向根据被着色的点而改变.这被称为**最有代表性点**解,它修改了光矢量,因此区域光表面上的点的方向朝着色表面产生最大的能量贡献.参见图10.9.Picott[1415]利用光线上与反射射线形成最小角度的点.Karis[861]通过有效地将最小角度的点与球体上与反射射线距离最短的点近似来改进了Picott的公式.他还提出了一种廉价的公式来缩放光的强度,以尝试保留总的发射能量.参见图10.10.大多数具有代表性点解很方便,并且已针对各种几何形状开发,因此了解它们的理论背景非常重要.这些方法类似于“蒙特卡洛”积分中的重要性采样的概念,在蒙特卡洛积分中,我们通过对积分域上的样本求平均值来数值计算定积分的值.为了更有效地执行此操作,我们可以尝试确定对总体平均值有较大贡献的样本的优先级.



**图10.10**: Karis球的最有代表点近似.首先,计算反射射线上最接近球心的的点:.球表面上最接近的点就是.

关于其有效性的更严格的证明在于定积分的均值定理,这使我们可以用同一函数的单个求值来代替一个函数的积分:

如果在中是连续的,则是区域的面积,点位于函数最小值和最大值之间.对于照明,积分是BRDF和光覆盖的半球区域上的光辐照度的乘积.我们通常认为光是均匀照射的,因此我们只需要考虑光衰减,并且大多数近似值还假定域区域从着色点完全可见.即使采用这些假设,确定点和归一化因子仍然可能过于昂贵,因此采用了进一步的近似方法.

代表性点的解决方案也可以通过其对高光形状的影响来构架.在表面的一部分点上,由于反射矢量在区域光所对向的方向锥之外,因此代表性点不变,所以有效地使用点光进行照明.然后,高光的形状仅取决于镜面波瓣的基本形状.或者,如果我们在反射矢量击中区域光的表面上加阴影,则代表点将连续变化以指向最大贡献方向.这样做可以有效地扩展镜面波瓣峰,使其“加宽”,其效果类似于图10.7的硬阈值.

这个宽且恒定的高光峰值也是近似值中其余的误差源之一.在较粗糙的表面上,该区域的光反射比地面真溶液（即通过蒙特卡洛积分获得）更“陡峭”，这与粗糙度修改技术过度模糊的视觉缺陷相反。为了解决这个问题,Iwanicki和Pesce [**807**]通过将BRDF瓣，软阈值，代表点参数和缩放因子（用于节能）拟合到通过数值积分计算的球形照明结果中，得出了近似值。这些拟合函数生成一个参数表，该表由材质粗糙度，球体半径以及光源中心与表面法线和视图向量之间的角度索引。由于在着色器中直接使用此类多维查找表很昂贵，因此提供了封闭形式的近似值。最近，de Carpentier [**231**]提出了一种改进的配方，可以更好地保留基于微面的BRDF的球形区域光源在掠射角时的高光形状。该方法的工作原理是找到一个代表点，该代表点使n·h（表面法线和光视图半矢量之间的点积）最大化，而不是原始公式（由Phong BRDF导出）的n·r最大化。

10.1.2 一般光源形状

到目前为止,我们已经看到了几种均匀发射的球形区域光和任意有光泽的BRDF计算着色的方法.这些方法中的大多数都采用各种近似方法,以便得出可以实时快速评估的数学公式,从而与问题的真实答案相比,显示出不同程度的误差.但是,即使我们具有得出精确解的计算能力,我们仍然会犯下一个很大的误差,该误差已嵌入到照明模型的假设中.现实世界中的灯光通常不是球体,很难成为完美的均匀发射器.参见图10.11.球形区域光在实践中仍然有用,因为它们提供了打破照明和点光源引入的表面粗糙度之间错误关联的最简单方法.但是,只有当光源相对较小时,球形光源通常才能很好地近似大多数真实的光源.

由于基于物理的实时渲染的目的是生成有说服力的图像,因此到目前为止,我们只能通过将自己局限于理想的场景来进行这种追求.这是计算机图形学中经常出现的折衷方案.我们通常可以在为更简单的问题生成准确的解决方案(简化假设)或为更现实的问题(为更现实的模型建模)得出近似解之间进行选择.

球形灯最简单的扩展之一是“管状”灯(也称为“胶囊”),它可用于表示现实世界中的荧光灯.参见图10.12.对于Lambertian BRDF,Picott [1415]显示了照明积分的封闭公式,该公式等效于通过具有适当衰减函数的线性光段的极限来评估两个点光源的照明:

其中和是线性光的两个端点,是表面法线.Picott还为Phong镜面反射BRDF积分提供了一个代表性的点解,从点光源的照明近似该点解决方案,该点光源位于光段上的位置,当与所考虑的曲面点合并时，与该点形成最小角度。 反射向量。 这种具有代表性的点解决方案将线性光动态转换为一个点，因此我们可以对球形光使用任何近似值，以将照明器材“加厚”到一个胶囊中.

像球形光一样,Karis [861]通过使用直线上与反射矢量的距离最小(而不是最小角度)的点,在Picott的原始解决方案上提出了一种更有效(但准确性稍差)的变体.并提出缩放比例公式,以尝试恢复能量守恒效果.

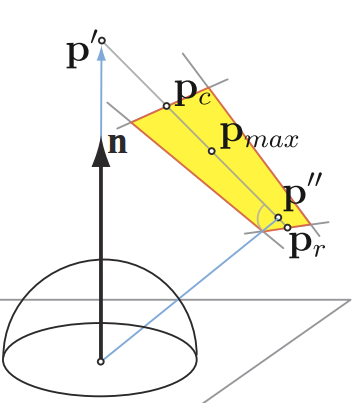
可以很容易地获得许多其他灯光形状的代表点近似值,例如环形和B´ezier线段,但是我们通常不希望对着色器进行过多分支.好的灯光形状可以用来代表场景中的许多现实世界的灯光.最具表现力的形状类别之一是平面区域灯,它定义为由给定几何形状(例如,矩形(在这种情况下,它们也称为卡片灯)),圆盘或更常见的形状所限制的平面的一部分.这些图元可用于诸如广告牌和电视屏幕之类的发光面板,以代表常用的摄影照明(柔光箱,弹跳卡),为许多更复杂的照明灯具的光圈建模,或表示从墙壁和其他物体反射的照明 场景中的大表面.

Drobot [**380**]首次提出了对卡片灯(以及圆盘灯)的实用近似方法.这再次是一个有代表性的点解决方案,但由于将这种方法扩展到平面的二维区域的复杂性以及解决方案的整体方法而特别值得注意.Drobot从平均值定理开始,并作为一阶近似值,确定用于光评估的良好候选点应位于照明积分的全局最大值附近.

对于Lambert BRDF,此积分为

其中是光源发出的恒定辐射,是光源几何体对的立体角,是光线从表面到光平面沿方向的长度.的最大值是光区域边界上的点,该点最接近点,该点是通过将沿法线方向从表面发出的光线与光平面相交而找到的.类似地,最大值是最靠近点的边界上的点,点在光平面上最接近被着色的表面点.参见图10.13.然后,被积数的全局最大值将位于连接和的线段上的某个位置:.Drobot使用数值积分来找到许多不同配置的最佳代表点,然后找到平均效果最佳的单个.

Drobot的最终解决方案对漫反射和镜面照明采用了进一步的近似值,所有这些近似值都是通过与在数值上找到的Ground Truth解决方案进行比较而得出的.他还推导了一种重要的算法,用于纹理卡片灯的重要情况,在这种情况下,矩形区域上的发光不是恒定不变的,而是由纹理调制的.使用三维查找表执行此过程,该查找表包含不同半径的圆形覆盖区上的发射纹理的预集成版本.Mittring [**1228**]对光泽反射采用了类似的方法,将反射光线与带纹理的矩形广告牌相交,并根据光线的相交距离对纹理的预先计算的模糊版本进行索引.这项工作先于Drobot的发展,但它是一种经验更丰富,原则性更强的方法,它的确尝试与真实的整体解决方案相匹配.



**图10.13**: Drobot矩形区域光代表点近似的几何构造.

对于平面多边形区域光的更一般的情况,Lambert [967]最初为完全扩散的表面得出了精确的封闭形式的解.Arvo [**74**]改进了该方法,允许将光泽材料建模为Phong镜面瓣.Arvo通过将矢量辐照度的概念扩展到高维辐照张量并采用斯托克定理来解决面积积分问题,即将积分作为沿积分域轮廓的简单积分来实现.他的方法所做的唯一假设是,从着色表面点完全可见(要制造的常见点,可以通过将光多边形剪切为与表面相切的平面来避开),并且BRDF是径向对称的余弦波.不幸的是,Arvo的解析解对于实时渲染而言是非常昂贵的,因为它需要评估一个公式,该公式的时间复杂度在区域光多边形的每个边沿上,在所使用的Phong瓣的指数中呈线性关系.最近,Lecocq [**1004**]通过找到轮廓积分函数的O(1)近似并将解扩展到基于半矢量的常规BRDF,使该方法更实用.

到目前为止描述的所有实际的实时区域照明方法都采用了某些简化的假设以允许推导解析结构和近似值来处理所得的积分.Heitz等人[**711**]采用线性变换余弦(LTC)产生了一种实用,准确和通用的技术.他们的方法始于在球上设计一类既具有高度表现力的函数(即它们可以采用多种形状),又可以轻松地集成到任意球形多边形上.参见图10.14.LTC仅使用由3×3矩阵转换的余弦波,因此可以在半球上调整大小,拉伸和旋转它们以适应各种形状.一个简单的余弦波瓣(与Blinn-Phong不同,未取幂)与球形多边形的积分是公认的,可以追溯到Lambert [74,967].关键观察Heitz等.这样做的好处是,用叶上的变换矩阵扩展积分不会改变其复杂性.我们可以通过矩阵的逆变换多边形域,并取消积分内部的矩阵,返回到一个简单的余弦波作为积分.参见图10.15.对于通用BRDF和区域光源形状,剩下的唯一工作是找到方法(近似值)将球上的BRDF函数表示为一个或多个LTC,这些工作可以离线完成,并在用BRDF参数索引的查找数组中制成表格:粗糙度,入射角等.线性变换的基于余弦的解决方案既适用于一般的纹理多边形区域光源,也适用于特定的,较便宜的计算形状,例如卡形,圆盘形和线形光源.LTC可能比代表点解决方案昂贵,但准确性更高.

10.2 环境光 2020年4月19日11点19分

原则上,反射率(公式9.3)不能区分直接来自光源的光和已经从天空或场景中的物体散射的间接光.所有入射方向都具有辐射,并且反射方程式对它们进行积分.然而,实际上,直接光通常以具有较高辐射值的相对较小的立体角来区分,并且间接光趋于以中等至低辐射值扩散地覆盖半球的其余部分.此拆分提供了很好的实际原因,分别处理这两个问题.

到目前为止,面光源技术已经讨论了整合从光源形状发出的恒定辐射的问题.这样做会为每个着色表面点创建一组方向,这些方向具有恒定的非零入射辐射.我们现在研究的是在所有可能的入射方向上积分由变化函数定义的辐射率的方法.参见图10.16.

虽然我们在这里通常会讨论间接照明和“环境”照明,但我们不会研究全局照明算法.关键区别在于,在本章中,所有着色数学都不取决于场景中其他曲面的知识,而是取决于一小部分灯光图元.因此,虽然我们可以使用区域光来模拟光从墙反弹的效果,这是一个整体效果,但着色算法不需要知道墙的存在.它拥有的唯一信息是关于光源的,所有着色都在局部执行.全局照明(第11章)通常会与本章的概念紧密相关,因为许多解决方案可以看作是计算适用于每个对象或表面位置的一组正确的局部光图元的方法,以模拟物体之间的相互作用——光线在场景弹跳.

环境光是环境照明的最简单模型,其辐射率不随方向变化,并且具有恒定值.即使是这样的基本环境照明模型,也可以显着改善视觉质量.没有考虑从物体间接反射的光的场景显得非常不现实.在这样的场景中,处于阴影中或背离光线的对象将是完全黑色的,这与现实中发现的任何场景都不一样.第376页的图10.1中的月景很近,但是即使在这样的场景中,一些间接的光也会反射附近的物体.

环境光的确切影响将取决于BRDF.对于朗伯曲面,无论表面法线或视图方向如何,固定辐射度都会对出射辐射度产生恒定的影响:

该公式存在一个假设:是以法线为中心的半球区域,也就是说不论着色点是否在半球上存在其它其它发光物体,但是最简单的环境光始终假设存在.

着色时,此恒定的向外辐射贡献将添加到直接光源的贡献中.对于任意BRDF,等效方程为

该公式中的积分与定向反照率相同(9.3节中的公式9.9),因此该公式等效于.较早的实时渲染应用程序有时会为假定一个恒定值,称为环境颜色.这进一步简化了等式.

反射率方程忽略了遮挡,即许多表面点将被其他物体或同一物体的其他部分“看不到”某些入射方向.这种简化通常会降低真实感,但对于环境照明尤为明显,当忽略遮挡时,环境照明显得极为平坦.11.3节中将讨论解决此问题的方法,尤其是在11.3.4节中.

10.3 球和半球函数 2020年4月19日11点48分

为了将环境照明扩展到一个常数项之外,我们需要一种方法来表示从任何方向到物体的入射辐射.首先,我们将把辐射率看作是仅积分方向的函数,而不是表面位置的函数.这样做的前提是照明环境无限远.

对于每个入射方向,到达给定点的辐射可能会有所不同.照明可以从左侧为红色,右侧为绿色,或者从顶部而不是侧面遮挡.这些类型的量可以由定义在单位球体表面上或空间上的球形函数表示.我们将这个域表示为.这些函数如何工作不受它们产生单个值还是多个值的影响.例如，通过为每个颜色通道存储单独的标量函数,用于存储标量函数的相同表示形式也可以用于编码颜色值.

假定为朗伯表面,则可以通过针对每个可能的表面法线方向存储预先计算的辐照度函数(例如,与余弦波卷积的辐照度)来使用球形函数来计算环境照明.更复杂的方法可以存储辐射度,并在运行时针对每个着色曲面点使用BRDF计算积分.球形函数在全局照明算法中也得到了广泛使用(第11章).

与半球形相关的是球形函数,其中仅定义了一半方向的值.例如,这些功能用于描述没有光从下半球入射的表面处的入射辐射.

我们将这些表示称为球面基,因为它们是定义在球面上的函数向量空间的基.尽管从技术上讲,环境/高光/方向形式(第10.3.3节)在技术上并不是基,但为简单起见,我们也将使用此术语来引用它.将函数转换为给定表示称为**投影**,将从给定表示中评估函数的值称为**重构**.

每个表示都有自己的一组权衡，我们可能会在给定基上寻求的属性是:

1. 高效的编码(投影)和解码(查找).
2. 能够以较少的系数和较低的重构误差表示任意球面函数.
3. 投影的旋转不变性是旋转函数的投影然后进行投影的结果,旋转不变性是旋转函数的投影的结果. 这种等效意味着,例如具有球谐函数的函数在旋转时不会改变.
4. 易于计算和和编码函数的乘积.
5. 易于计算球形积分和卷积.

10.3.1 简单的表格形式

表示球形(或半球形)函数的最直接方法是选择多个方向并为每个方向存储一个值.评估函数涉及在评估方向上找到一些样本,并通过某种形式的插值重建值.

这种表示很简单,但很富有表现力.添加或乘以此类球函数就像添加或乘以其对应的列表项一样容易.我们可以根据需要添加更多样本,以任意低的误差编码许多不同的球函数.

以允许有效检索的方式在一个球体上分布样本(参见图10.17)并非易事,同时又可以相对平均地表示所有方向.最常用的技术是先将球体展开为矩形区域,然后使用点网格对该区域进行采样.由于二维纹理恰好表示矩形上的点(纹素)网格,因此我们可以将纹素用作样本值的基存储. 这样做可以让我们利用GPU加速的双线性纹理过滤进行快速查找(重建).在本章的后面,我们将讨论环境映射(第10.5节),它是这种形式的球形函数,并讨论了展开球形的不同选择.

表格形式有缺点.在低分辨率下,硬件过滤提供的质量通常是不可接受的.卷积的计算复杂性是处理光照时的常见操作,它与样本数成正比,因此可能会令人望而却步.而且,投影在旋转下不是不变的,这对于某些应用可能是有问题的.例如,想象一下如何对从一组方向照射到的光照射到对象表面时的辐射进行编码.如果物体旋转,则编码结果可能会有所不同.这可能导致编码的辐射能数量发生变化,当场景动画化时,这可能表现为脉动伪像.通过在投影和重构过程中采用与每个样本关联的精心构造的内核函数,可以减轻这些问题.但是,更常见的是,仅使用足够密集的采样就足以掩盖这些问题.

通常,当我们需要存储需要对许多数据点进行低误差编码的复杂的高频函数时,会采用表格形式.如果我们只需要几个参数就可以紧凑地编码球形函数,那么可以使用更复杂的基数.

一种流行的基本选择,环境立方体(AC)是最简单的表格形式之一,它由沿主轴方向定向的六个平方余弦波瓣构成[**1193**].之所以称为环境“立方体”,是因为它等效于将数据存储在立方体的面中并在我们从一个方向移动到另一个方向时进行插值.对于任何给定方向,只有三个瓣是相关的,因此不需要从内存中获取其他三个瓣的参数[766].从数学上讲,环境立方体可以定义为

其中和包含立方体面的六个值,而是一个矢量函数,该函数针对每个分量假定基于和的值为正.

环境立方体集类似于立方体贴图(第10.4节),每个立方体面上都有一个纹理元素.在某些系统中,对于这种特殊情况,用软件执行重建可能比在立方体贴图上使用GPU的双线性过滤要快.Sloan[**1656**]导出了一个简单的公式,可以在环境立方和球谐基之间进行转换（见10.3.2节）.

使用环境立方体的重建质量相当低.通过存储和内插八个值而不是六个值(对应于立方体顶点),可以获得稍微更好的结果.最近,Iwanicki和Sloan [**808**]提出了一种称为环境骰子[Ambient dice,AD]的替代方法.基由沿着二十面体的顶点定向的平方和四次方余弦波形成.重建需要存储12个值中的6个,并且确定要检索哪个6个的逻辑比环境立方体的相应逻辑稍微复杂些,但是结果的质量要高得多.

10.3.2 球形基

有无数种方法可以将函数投影(编码)到使用固定数量的值(系数)的表示形式上.我们需要的是一个数学表达式,该表达式跨越球面域,并带有一些可以更改的参数.然后我们可以通过拟合来近似所需的任何给定函数,即找到使表达式与给定函数之间的误差最小的参数值.

尽可能最小的选择是使用一个常数:

通过将给定函数的投影在单位球面的表面上取平均,可以推导出该函数的投影:.周期函数的平均值也称为DC分量.该基具有简单性的好处.甚至尊重我们正在寻找的某些属性(易于重构,加法,乘积,旋转不变性).但是,它不能很好地表达大多数球形函数,因为它只是用它们的平均值代替了它们.我们可以使用两个系数和构造稍微复杂一点的近似值:

它创建了一个表示,该表示可以在极点上编码精确的值,并且可以在球体的整个表面之间进行插值.这种选择更具表现力,但现在投影更加复杂,并且并非所有旋转都不变.实际上,此基可以看作是表格形式,只有两个样本放在极点.

通常,当我们谈论函数空间的基时,是指我们具有一组函数,它们的线性组合(加权和求和)可用于表示给定域上的其他函数.图10.18给出了这个概念的示例.本节的其余部分探讨了一些可用于近似球体函数基的选择.

球面径向基函数[Spherical Radial Basis Functions]

使用GPU硬件过滤的列表形式的重建质量低,至少在某种程度上是由用于插值样本的双线性形状函数引起的.其他功能可用于对样本进行加权以进行重建.这样的函数可能比双线性滤波产生更高质量的结果,并且它们可能还有其他优点.通常用于此目的的一种函数是球形径向基函数(SRBF).它们是径向对称的,这使它们仅作用于一个参数,即它们所沿的轴与评估方向之间的夹角.基础由分布在整个球体上的一组此类函数(称为叶)形成.函数的表示由每个波瓣的一组参数组成.该集合可以包括它们的方向,但是会使投影变得困难得多(需要非线性,全局优化).由于这个原因,通常假定波瓣方向是固定的,均匀地分布在整个球体上,并且使用其他参数,例如每个波瓣的大小或其波幅,即所覆盖的角度.通过评估给定方向的所有波瓣并对结果求和来执行重构.

球面高斯[Spherical Gaussians]

SRBF瓣的一种特别常见的选择是球形高斯(SG),在方向统计中也称为von Mises-Fisher分布.我们应注意,von-Mises-Fisher分布通常包含归一化常数,我们在公式化中应避免使用该常数.单个波瓣可以定义为

其中是评估方向(单位矢量),d是波瓣方向轴(分布的均值,也已归一化),λ≥0是波瓣清晰度(控制其角宽度,也称为浓度参数或散布）[1838].

为了构造球形基,然后使用给定数量的球形高斯线性组合:

执行球面函数到该表示的投影需要找到最小化重构误差的参数集{wk，dk，λk}.此过程通常通过数值优化来完成，通常使用非线性最小二乘法优化算法（例如Levenberg-Marquardt）。注意，如果我们允许在优化过程中更改完整的设置参数，则将不会使用函数的线性组合，因此公式10.18并不表示基础。只有当我们选择一组固定的波瓣（方向和扩展）时，才能获得适当的基础，从而使整个域都得到很好的覆盖[1127],并仅通过拟合权重wk进行投影。这样做还极大地简化了优化问题，因为现在可以将其表达为普通的最小二乘优化。如果我们需要在不同的数据集（投影函数）之间进行插值，这也是一个很好的解决方案。对于该用例，由于这些参数是高度非线性的,因此使波瓣方向和锐度发生变化是有害的.

这种表示的优势在于,SG上的许多操作都具有简单的解析形式.两个球形高斯的乘积是另一个球形高斯(参见[1838]):

其中

球面上的高斯球积分也可以通过解析计算:

这意味着两个球形高斯积的积分也具有简单的公式.

如果我们可以将光辐射表示为球形高斯,则可以将其乘积与以相同表示形式编码的BRDF集成在一起以执行照明计算[1408,1838].由于这些原因,SG已被用于许多研究项目[582，1838]和工业应用[1268].

至于平面上的高斯分布,可以将von Mises-Fisher分布一般化化以允许各向异性.徐等人 [1940]引入了各向异性球面高斯（ASG;请参见图10.19）,其定义是通过用两个补充轴t和b扩展单个方向d来共同形成正交切线框架:

其中控制沿切线框架两个轴的波瓣扩展,是平滑项.该项是定向统计中使用的Fisher-Bingham分布与我们用于计算机图形学的ASG之间的主要区别.徐等人还提供了积分,乘积和卷积运算符的解析近似.

尽管SG具有许多理想的属性,但它们的缺点之一是,与列表形式不同,并且通常来说,在有限范围(带宽)的内核中,它们具有全局支持.即使它的衰减相当快,每个波瓣对于整个球都是非零的. 这种全局范围意味着,如果我们使用N个瓣来表示一个函数,则将需要所有N个瓣在任何方向上进行重构.

球谐函数

球谐(SH)是球面上正交的基函数集.基函数的正交集合是一个集合,使得该集合中任意两个不同函数的内积为零.内积是与点积更通用但相似的概念.两个向量的内积是它们的点积:成对的分量之间相乘的总和.通过考虑将这些函数的积分相乘,我们可以类似地得出两个函数的内积定义:

在相关域上执行积分.对于图10.18所示的函数,相关域在x轴上介于0和5之间(请注意,这组特定的函数不是正交的).对于球形函数,形式略有不同,但是基本概念相同:

其中表示积分是在单位球面上执行的.

正交集是正交集，其附加条件是该集合中任何函数的内积相等1.更正式地说，一组函数为正交的条件为

图10.20显示了类似于图10.18的示例,其中基函数是正交的.请注意,图10.20中所示的正交基函数不重叠.对于正交非负函数集合,此条件是必需的,因为任何重叠都将暗示一个非零内部积.在部分范围内具有负值的函数可以重叠,并且仍然形成正交集.这种重叠通常会导致更好的逼近度,因为它可以使底面平滑.具有不相交域的碱基往往会导致不连续.

正交基础的优点是找到最接近目标函数的近似过程非常简单.为了执行投影,每个基函数的系数是目标函数与适当的基函数的内积:

实际上,该积分必须通过数值计算,通常是通过蒙特卡洛采样,对均匀分布在球体上的个方向求平均.

正交基在概念上与4.2.4节中介绍的三维向量的“标准基”相似.标准基的目标不是函数,而是点的位置.标准基由三个向量(每个维一个)组成,而不是由一组函数组成.通过与公式10.22中相同的定义,标准基是正交的.将点投影到标准基础上的方法也相同,因为系数是位置矢量和基矢量之间的点积的结果.一个重要的区别是标准基精确地再现了每个点,而一组有限的基准函数仅近似于其目标函数.由于标准基使用三个基础向量来表示三维空间,因此结果永远无法准确函数空间具有无限数量的维,因此有限数量的基函数永远无法完美地表示它.

球谐是正交的,它们还有其他一些优点.它们是旋转不变的,SH基函数的评估成本不高.它们是单位长度向量的x，y和z坐标中的简单多项式.但是,像球形高斯算子一样,它们具有全局支持,因此在重建过程中需要评估所有基本函数.基函数的表达式可以在几个参考文献中找到,包括Sloan [**1656**]的介绍.他的演讲值得注意,因为它讨论了许多处理球谐函数的实用技巧,包括公式以及在某些情况下的着色器代码.最近,斯隆还得出了执行SH重建的有效方法[**1657**].

SH基函数被布置在频带中.第一个基函数是常数,接下来的三个是线性函数,它们在球体上缓慢变化,而接下来的五个表示二次函数,它们的变化速度稍快.参见图10.21.低频(即在球体上缓慢变化)的函数(例如辐照度值)可以用相对较少的SH系数准确表示(如我们在10.6.1节中所见).

当投影到球谐函数时,所得系数表示投影函数的各个频率(即其频谱)的幅度.在此光谱域中,具有一个基本属性:两个函数的乘积的积分等于函数投影系数的点积.此属性使我们能够有效地计算照明积分.

关于球谐函数的许多操作在概念上都很简单,简化为系数矢量的矩阵变换[**583**].在这些运算中,重要的情况是计算两个函数的乘积,这些函数被投影到球谐函数,旋转的投影函数,并计算卷积.实际上,SH中的矩阵变换意味着这些运算的复杂度在所使用系数的数量上是二次的,这可能是一笔不小的成本.幸运的是,这些矩阵通常具有特殊的结构,可以利用这些结构来设计更快的算法.考茨等人[869]提出了一种通过将旋转计算分解为围绕x轴和z轴的旋转来优化旋转计算的方法.Hable [633]给出了一种快速旋转低阶SH投影的流行方法.格林的调查[583]讨论了如何利用旋转矩阵的块结构进行更快的计算.当前,如Nowrouzezahrai等人[1290]所提出的,以分解成区域谐波为代表.

如下所述,诸如球谐函数和H基谱之类的频谱变换的一个常见问题是,它们可能表现出一种称为振铃的视觉伪像（也称为吉布斯现象）.如果原始信号包含不能由带限近似表示的快速变化,则重构将显示振荡.在极端情况下,这种重构函数甚至可以生成负值.可以使用各种预过滤方法来解决此问题[1656,1659].

其它球形表达

许多其他表示形式也可以使用有限数量的系数来编码球形函数.线性变换余弦(第10.1.2节)是一种表示形式的示例,可以有效地近似BRDF函数,同时具有易于在球体的多边形截面上积分的特性.

球形小波[1270,1579,1841]是平衡空间(具有紧凑支撑)和频率(平滑度)局部性的基,从而可以压缩表示高频函数.球面分段常数基函数[1939]将球体划分为常数值区域,并且依赖矩阵分解的双簇近似[1723]也已用于环境照明.

10.3.3 半球基

即使上述基数可以用来表示半球函数,但它们是浪费的.信号的一半始终等于零.在这些情况下,通常首选直接在半球域上构建的表示形式.这对于在曲面上定义的函数尤其重要:BRDF,入射辐射和到达物体给定点的辐射都是常见示例.这些函数自然地限制在以给定表面点为中心并与表面法线对齐的半球;它们没有指向函数内部的方向值.

环境/高光/方向

沿这些线的最简单表示之一是恒定函数和单个方向的组合,其中信号在半球上最强.通常将其称为环境/高光/方向（AHD）基,其最常见的用途是存储辐照度.名称AHD表示各个成分代表的含义:恒定的环境光,加上近似“高光”方向上的辐照度的定向光,以及大多数入射光聚集的方向.AHD基础通常需要存储八个参数.方向矢量使用两个角度,环境和方向光强度使用两种RGB颜色.它的第一个显着用途是在Quake III游戏中,该游戏以这种方式存储了动态对象的体积照明.从那以后,它被用于多个游戏中,例如《使命召唤》系列.

投影到该表示上有些棘手.因为它是非线性的,所以找到逼近给定输入的最佳参数在计算上是昂贵的.在实践中,使用启发式代替.首先将信号投影到球谐函数,然后使用最佳线性方向定向余弦波瓣.给定方向,可以使用最小二乘最小化来计算环境值和高光值.Iwanicki和Sloan [**809**]展示了如何在执行非负性的同时执行这种投影.

光能传递法线贴图/半条命2基

Valve对半条命2系列游戏使用了一种新颖的表示形式,该表示形式在辐射度法线贴图的背景下表示方向照度[**1193**,**1222**].最初被设计为存储预先计算的漫射照明,同时允许进行法线贴图,现在通常称为“半条命2”基.它通过在切线空间中采样三个方向来表示表面上的半球函数.参见图10.22.切线空间中三个相互垂直的基向量的坐标为

为了进行重构,在给定切线空间方向的情况下,我们可以沿着三个基向量对值和进行插值:

Green [579]指出,如果在切线空间方向上预先计算以下三个值,则可以使方程10.25的成本大大降低:

当时,等式10.25简化为

格林描述了此表示法的其他优点,第11.4节讨论了其中一些优点.

Half-Life 2基对于定向辐照度非常有效.斯隆[1654]发现,这种表示产生的结果优于低阶半球谐波.

**半球谐波/ H基**

Gautron等人[518]将球形谐波专门用于半球域,他们将其称为半球谐波(HSH).有多种方法可以执行此专业化.

例如,Zernike多项式是正交函数,类似球谐函数,但定义在单位圆上.与SH一样,它们可以用于在频域(频谱)中变换函数,从而产生许多方便的属性.由于我们可以将单位半球转换为圆,因此可以使用Zernike多项式来表达半球函数[918].但是,用这些执行重建非常昂贵.Gautron等人的解决方案不仅更经济,而且可以通过在系数矢量上进行矩阵乘法来实现相对快速的旋转.

HSH基的评估仍然比球谐函数更昂贵,因为它是通过将球体的负极移到半球的外边缘来构造的.这种移位运算使基函数成为非多项式,需要计算除法和平方根,这在GPU硬件上通常较慢.此外,基在半球边缘始终是恒定的,因为它在移动之前映射到球体上的单个点.靠近边缘时,近似误差可能会很大,尤其是如果仅使用几个系数(球形谐波频带)时.

Habel[627]引入了H基,H基是纵向参数化的一部分球谐基,而纬度是HSH的一部分.这个基混合了SH的偏移版本和非偏移版本,仍然是正交的,同时可以进行有效的评估.

10.4 环境映射 2020年4月19日15点35分

在一个或多个图像中记录球形函数称为环境映射,因为我们通常使用纹理映射来实现表查找.这种表示形式是最强大和最受欢迎的环境照明形式之一.与其他球形表示相比,它消耗更多的内存,但实时解码简单,快速.此外,它可以表示任意高频的球形信号(通过增加纹理的分辨率),并可以准确捕获任何范围的环境辐射(通过增加每个通道的位数).这种准确性是有代价的.与其他常用纹理中存储的颜色和着色器属性不同,环境贴图中存储的辐射值通常具有较高的动态范围.每纹素更多的比特意味着环境贴图倾向于比其他纹理占用更多空间,并且访问速度可能更慢.

对于任何全局球面函数(即用于场景中所有物体的一个球面函数),我们都有一个基本假设,**即入射辐射仅取决于方向.该假设要求被反射的物体和光都距离遥远,并且反射器不反射自身**.

依赖于环境贴图的着色技术通常不以其表示环境光照的能力为特征,而是以将它们与给定材料集成的程度来表征.也就是说,为了执行集成,我们必须在BRDF上采用哪种近似和假设?反射映射是环境映射的最基本情况,我们假设BRDF是完美镜面.光学平面或镜面将入射光线反射到反射方向(第9.5节).类似地,输出辐射包括仅一个方向的入射辐射,即反射视角向量.该向量的计算方法与相同(公式9.15):

镜子的反射方程式大大简化为:

其中是菲涅耳项(第9.5节).请注意,与基于半矢量的BRDF中的菲涅耳项不同(使用半矢量和或之间的夹角),公式10.29中的菲涅耳项使用表面法线与反射矢量之间的夹角(即与和之间的角度相同).

由于入射辐射强度仅取决于方向,因此可以将其存储在二维表中.这种表示使我们能够有效地照亮具有任意入射辐射分布的任何形状的镜面.为此,我们为每个点计算并在表中查找辐射率.该表称为环境贴图,由Blinn和Newell提出[158].参见图10.23.

反射映射算法的步骤为:

1. 生成或加载代表环境的纹理.
2. 对于包含反射物体的每个像素,在物体表面上的位置计算法线.
3. 根据视角向量和法线计算反射的视角向量.
4. 使用反射视角矢量可计算出环境贴图坐标,该坐标表示反射视图方向上的入射辐射.
5. 将来自环境贴图的纹理像素数据用作公式10.29中的入射辐射.

值得一提的是潜在的绊脚石.使用环境贴图时,平整表面通常无法正常工作.平面的问题在于,从平面反射回来的光线变化通常不会超过几度.这种紧密的聚类导致环境表的一小部分被映射到相对较大的表面上.在第11.6.1节中讨论的还使用辐射出处的位置信息的技术可以提供更好的结果.同样,如果我们假设完全平坦的表面(例如地板),则可以使用实时的平面反射技术(第11.6.2节).

用纹理数据照亮场景的想法也称为基于图像的照明(IBL),通常是当使用捕获360度全景,高动态范围图像的摄像机从真实场景中获取环境图时[332,1479].

将环境映射与法线映射一起使用特别有效,可产生丰富的视觉效果.参见图10.24.这些功能的组合在历史上也很重要.凹凸环境映射的一种受限形式是在消费者级图形硬件中首次使用从属纹理读取(第6.2节),从而使这种功能成为像素着色器的一部分.

有多种投影仪功能可将反射的视图矢量映射到一个或多个纹理中.我们在这里讨论更流行的映射,并指出每种映射的优势.

10.4.1 纬度-经度映射

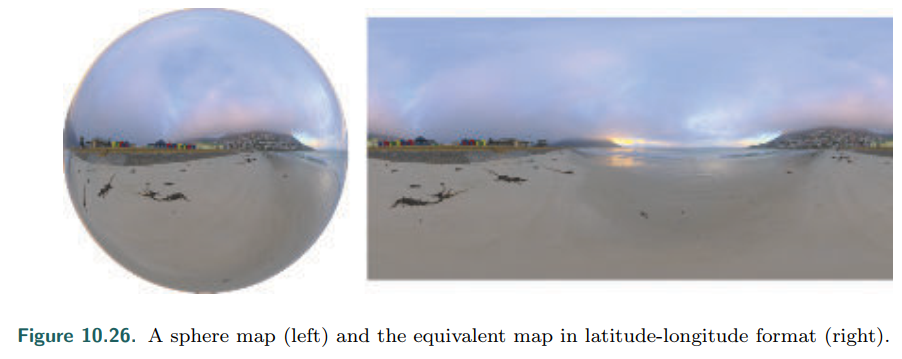
1976年,Blinn和Newell[158]开发了第一个环境映射算法.他们使用的映射是地球上使用的熟悉的纬度/经度系统,这就是为什么将此技术通常称为纬度-经度映射或纬度-经度映射的原因.他们的设计与其从外面看似不是一个地球仪一样,不如像是夜空中的星座图.正如可以将地球上的信息展平到墨卡托（Mercator）或其他投影图一样,围绕空间点的环境也可以映射到纹理.当针对特定表面位置计算反射视角矢量时,该矢量将转换为球坐标.在此,相当于经度的在到弧度之间变化,而纬度在到弧度之间变化.由公式10.30计算得出,其中是归一化的反射视角矢量,向上:

有关atan2的说明,请参见第8页.这些值然后用于访问环境贴图并检索在反射视图方向上看到的颜色.请注意,纬度-经度映射与墨卡托投影不同.它使纬线之间的距离保持恒定,而墨卡托在极点处达到无穷远.

要将球体展开到平面中总是需要一定的变形,尤其是在不允许多次切割的情况下,并且每个投影在保留区域,距离和局部角度之间都有自己的权衡.这种映射的一个问题是信息的密度远没有达到均匀.从图10.25的顶部和底部的极端拉伸中可以看出,极点附近的区域比赤道附近的区域多得多的纹理像素.这种失真是有问题的,不仅因为它不会导致最有效的编码,而且在采用硬件纹理过滤时也会导致伪像,尤其是在两极奇点处可见.过滤内核不会跟随纹理的拉伸,因此会在具有更高纹理像素密度的区域有效收缩.还要注意,虽然投影数学很简单,但可能效率不高,因为诸如arccosine之类的先验功能在GPU上成本很高.

10.4.2 球形映射

最初由Williams [1889]提及,并由Miller和Hoffman [1212]独立开发,球形映射是通用商业图形硬件中支持的第一种环境映射技术.纹理图像是从在完美反射的球体中正交查看的环境外观得出的,因此此纹理称为球形贴图.制作真实环境的球形图的一种方法是拍摄有光泽的球形的照片,例如圣诞树装饰品.参见图10.26.



产生的圆形图像也称为光探测器,因为它捕获了球体位置处的照明情况.即使我们在运行时使用其他编码,拍摄球形探头也可能是捕获基于图像的光照的有效方法.如果捕获的分辨率足以克服方法之间的畸变差异,我们总是可以在球面投影和其他形式之间进行转换,例如稍后讨论的立方映射(第10.4.3节).

反射球体仅在球体的正面显示整个环境.它将每个反射的视图方向映射到此球的二维图像上的一个点.假设我们要朝另一个方向移动,即给定球面贴图上的一个点,我们就需要反射的视图方向.为此,我们将在该点取球体上的表面法线,然后生成反射视图方向.因此,要逆转该过程并从反射的视图向量中获得球体上的位置,我们需要导出球体上的表面法线,然后将产生访问球体图所需的参数.

球体的法线是反射视图向量和原始视图向量之间的半角向量,在球面贴图的空间中为.参见图10.27.该法线向量是原始和反射视图向量的总和,即.归一化此向量得到单位法线:

如果球体在原点且半径为1,则单位法线的坐标也就是法线在球体上的位置.我们不需要,因为描述了球面图像上的一个点,每个值的范围为.要将此坐标映射到范围以访问球面图,请将它们除以二并加一半:

与纬度-经度映射相比,球面映射更易于计算,并且显示出一个奇点,位于图像圆的边缘周围.缺点是球体贴图纹理仅捕获对单个视图方向有效的环境视图.该纹理确实捕获了整个环境,因此可以为新的查看方向计算纹理坐标.但是,这样做会导致出现视觉伪影,因为新视图会放大球形图的一小部分,并且边缘周围的奇异性会变得明显.在实践中,通常假定球体贴图跟随摄影机在视野中操作.

由于球面贴图是为固定的视图方向定义的,因此原则上,球面贴图上的每个点不仅定义反射方向,还定义表面法线.参见图10.27.可以针对任意各向同性BRDF求解反射率方程,并将其结果存储在球面图中.此BRDF可以包括漫反射,镜面反射,回射和其他术语.只要照明和观察方向固定,球体图就正确.只要球的BRDF是均匀且各向同性的,甚至可以使用在实际照明下的真实球的摄影图像.

还可以索引两个球体贴图,其中一个带有反射矢量,另一个带有表面法线,以模拟镜面反射和漫反射环境效果.如果我们对存储在球体贴图中的值进行调制以考虑表面材料的颜色和粗糙度,则我们拥有一种廉价的技术,可以产生令人信服的(尽管与视图无关)的材料效果.雕刻软件Pixologic ZBrush将该方法推广为“MatCap”阴影.参见图10.28.

10.4.3 立方体映射

1986年,Greene [590]提出了立方环境贴图,通常称为立方体贴图.这种方法是当今最流行的方法,它的投影直接在现代GPU的硬件中实现.立方体贴图是通过将环境投影到以相机位置为中心的立方体侧面上而创建的.然后将立方体面上的图像用作环境贴图.参见图10.29和10.30.立方体贴图通常以“十字”图可视化,即打开立方体并将其展平到平面上.但是,在硬件上,立方体贴图存储为六个正方形纹理,而不是单个矩形纹理,因此不会浪费空间.

可以通过使用相机位于立方体中心的位置渲染六次场景并以90°视角查看每个立方体表面来合成六次场景来创建立方体贴图.参见图10.31.为了从实际环境中生成立方体贴图,通常将通过缝合或专用相机获取的球形全景图投影到立方体贴图坐标系中.

与球形映射不同,立方体环境映射与视图无关.与纬度-经度映射相比,它还具有更加均匀的采样特性,纬度-经度映射与赤道相比对极点进行了过度采样.Wan等人[1835，1836]提出了一个称为isocube的映射,它的采样率差异甚至比立方体映射更低,同时仍然利用多维数据集映射纹理硬件来提高性能.

访问立方体映射非常简单.任何矢量都可以直接用作三分量纹理坐标,以沿其指向的方向获取数据.因此,对于反射,我们可以将反射的视图向量传递给GPU,甚至不需要对其进行归一化.在较早的GPU上,由于纹理硬件无法在不同的立方体表面上正确过滤,双线性过滤可能会沿多维数据集边缘显示接缝(此操作执行起来有些昂贵).已经开发出避免此问题的技术,例如使视图投影稍微宽一些,以便单个面也将包含这些相邻的纹理像素.现在,所有现代GPU都可以跨边缘正确执行此过滤,因此不再需要这些方法.

10.4.4 其它投影

如今,立方体贴图因其多功能性,再现高频细节的准确性以及在GPU上的执行速度而成为环境照明中最受欢迎的表格表示形式.但是,还有其他一些值得一提的投影方式.

Heidrich和Seidel[702,704]提出使用两个纹理来执行双抛物面环境映射.这个想法类似于球体贴图,但是不是通过记录环境从球体上的反射来生成纹理,而是使用了两个抛物线投影.每个抛物面都会产生类似于球体贴图的圆形纹理,每个都覆盖一个环境半球.

与球面贴图一样,反射的光线是在贴图的基(即在其参考系中)计算的.反射视图矢量的分量的符号用于确定要访问两个纹理中的哪个.访问函数

用于正面图像,对于背面图像使用符号反转的.

与球形图甚至立方体图相比,抛物线图具有更均匀的环境纹理像素采样.但是,必须注意在两个投影之间的接缝处进行适当的采样和内插,这使得访问双抛物面图更加昂贵.

八面体映射[434]是另一个值得注意的预测.与其将周围的球体映射到一个立方体,不如将其映射到一个八面体(见图10.32).为了将此几何图形平整为纹理,将其八个三角形面切割并排列在一个平面上.正方形或矩形配置都是可能的.如果我们使用正方形配置,则访问八面体图的数学将非常有效.给定反射方向,我们使用绝对值范数计算归一化版本:

部分公式请查阅原始论文,这里不再重复.

八面体映射不会遇到双抛物面映射的过滤问题,因为参数化的接缝与所用纹理的边缘相对应.纹理“环绕”采样模式可以从另一侧自动访问纹理像素并执行正确的插值.尽管投影的数学方法稍微复杂一些,但在实践中性能会更好.引入的失真量与立方体贴图相似,因此当不存在立方体贴图纹理硬件时,八面体贴图可能是一个很好的选择.另一个显着用途是作为仅使用两个坐标表示三维方向(规范化矢量)的方式,作为压缩的平均值(第16.6节).

对于特殊的环境贴图,它围绕一个轴呈放射状对称,Stone [1705]提出了一种简单的分解方法,即使用一个一维纹理来存储沿对称轴沿任何子午线的辐射值.他将该方案扩展到二维纹理,在每行中存储预先与不同的Phong瓣卷积的环境图.这种编码可以模拟各种材料,并被用来编码从晴朗的天空发出的辐射.

**10.5 基于图像的镜面光照** 2020年4月19日17点39分

尽管环境贴图最初是作为一种渲染镜面表面的技术而开发的,但它也可以扩展到光泽反射.当用于模拟无限远光源的一般镜面反射效果时,环境贴图也称为镜面反射光探头.之所以使用该术语,是因为它们捕获了场景中给定点处所有方向的辐射(从而进行探测),并使用该信息来评估常规BRDF,而不仅限于纯镜面反射或朗伯曲面的有限情况.镜面反射立方贴图的名称也用于将环境照明存储在立方体贴图中的常见情况,该立方体贴图已被操纵以模拟在光泽材料上的反射.

为了模拟表面粗糙度,可以预先过滤环境在纹理中的表示[590].通过模糊环境贴图的纹理,我们可以呈现比完全像镜子的反射看起来更粗糙的镜面反射.这种模糊应该以非线性方式进行,即,纹理的不同部分应该不同地模糊.需要进行此调整是因为环境贴图纹理表示具有到理想方向球面空间的非线性映射.两个相邻纹理像素的中心之间的角距离不是恒定的,单个纹理像素所覆盖的立体角也不是恒定的.预处理立方体贴图的专用工具(例如AMD的CubeMapGen,现已开源)在过滤时会考虑这些因素.使用来自其他面的相邻样本来创建mipmap链,并考虑每个纹理像素的角度范围.图10.33显示了一个示例.

在凭经验接近粗糙表面的外观时,模糊环境贴图与实际的BRDF没有任何关系.一种更原则的方法是,当考虑到给定的表面法线和视图方向时,考虑BRDF函数在球体上的形状.然后,我们使用此分布过滤环境贴图.参见图10.34.用镜面波瓣过滤环境贴图并非易事,因为BRDF可以采用任何形状,具体取决于其粗糙度参数以及视图和法向矢量.输入值至少有五个维度(粗糙度和两个极角分别用于视图和法线方向)来控制最终的瓣形.为每个选择存储多个环境图是不可行的.

10.5.1 预过滤的环境映射

应用于光泽材料的环境照明的预过滤的实际实现需要近似所用的BRDF,以使生成的纹理与视图和法向矢量无关.如果我们仅将BRDF的形状变化限制为材料的光泽度,则可以计算并存储一些与粗糙度参数的不同选择相对应的环境贴图,并选择合适的运行时贴图.在实践中,这意味着将我们使用的模糊核(以及波瓣形状)限制为围绕反射矢量径向对称.

想象一些光从给定的反射视图方向附近入射.直接来自反射视图方向的光将产生最大的贡献,因为入射光的方向与反射视图方向的差异越来越大,所以会下降.环境贴图纹理元素的面积乘以纹理元素的BRDF贡献即可得出该纹理元素的相对效果.将该加权贡献乘以环境贴图纹理元素的颜色,然后将结果求和以计算.还计算了加权贡献的总和.最终结果是在反射视图方向的波瓣上积分的整体颜色,并存储在生成的反射贴图中.

如果我们使用Phong材质模型,则径向对称性假设自然成立,并且我们可以几乎精确地计算环境光照.Phong [1414]凭经验推导了他的模型,与我们在9.8节中看到的BRDF相反,没有物理动机.在Phong模型和我们在9.8.1节中讨论的Blinn-Phong[159] BRDF都是提升到幂的余弦波瓣,但是在Phong阴影的情况下,余弦由反射的点积形成(公式9.15)并查看矢量,而不是半矢量(见公式9.33)和法线.这导致反射波瓣旋转对称.请参阅第338页的图9.35.

对于径向对称的镜面波瓣,由于它使波瓣形状取决于视图方向,因此我们仍然无法适应的唯一效果是水平修剪.考虑查看一个有光泽(而不是镜面)的球体.靠近球体表面中心看,可以看到对称的Phong瓣.实际上,在观察球体轮廓附近的表面时,必须切除其一部分波瓣,因为水平以下的光线无法到达眼睛.参见图10.35.这是我们之前讨论区域照明近似值时遇到的相同问题(第10.1节),实际上,实时方法经常忽略它.这样做可能会导致在掠射角度产生过高的着色.

Heidrich和Seidel[704]以这种方式使用单个反射贴图来模拟表面的模糊性.为了适应不同的粗糙度级别,通常使用环境立方体贴图的Mipmap(第6.2.2节).每个级别用于存储传入辐射的模糊版本,而更高的mip级别用于存储更粗糙的表面,即,较宽的Phong凸瓣[80,582,1150,1151]. 在运行时,我们可以通过使用反射向量并根据所需的Phong指数(材料粗糙度)强制选择给定的Mip级别来解决立方体贴图.参见图10.36.

较粗糙的材料使用较宽的滤波区域会消除高频,因此需要较低的分辨率才能获得足够的结果,这完全映射到mipmap结构.此外,通过采用GPU硬件的三线性过滤,可以在预过滤的mip级别之间进行采样,以模拟我们没有确切表示的粗糙度值.当与菲涅耳项结合使用时,这样的反射贴图可能对光滑表面效果很好.

出于性能和混淆的原因,选择使用的Mipmap级别时,不仅应考虑着色点处的材料粗糙度,而且还应考虑被着色的屏幕像素覆盖的表面区域的法线和粗糙度的变化.Ashikhmin和Ghosh [80]指出,为了获得最佳结果,应比较两个候选mipmap级别(由纹理化硬件计算的最小化级别和与当前过滤器宽度相对应的级别)的索引,并且应使用较低分辨率的Mipmap级别.为了更准确,应考虑表面变化的扩大影响,并且应采用与BRDF瓣相对应的新粗糙度级别,该BRDF瓣最适合像素覆盖区中瓣的平均值.此问题与BRDF抗锯齿完全相同(第9.13.1节),并且应用相同的解决方案.

前面介绍的过滤方案假定给定反射视图方向的所有波瓣都具有相同的形状和高度.该假设还意味着凸角必须是径向对称的.除了地平线上的问题之外,大多数BRDF并非在所有角度都具有均匀的径向对称凸角.例如,在掠射角处,裂片通常变得更尖和更细.而且,裂片的长度通常随仰角而变化.

通常对于弯曲表面是无法察觉的.但是,对于平坦的表面(例如地板),径向对称滤镜可能会引入明显的误差.(请参阅第338页的图9.35.)

**对环境贴图作卷积**

生成预过滤的环境图意味着针对每个纹理像素(对应于方向)计算环境辐射与镜面波瓣D的积分:

该积分是球面卷积,通常无法解析地执行,因为对于环境贴图,仅以表格形式已知.一个流行的数值解决方案是采用蒙特卡洛方法:

其中是单位球面上(方向)的离散样本,是与方向上生成样本相关的概率函数.如果我们对球体进行均匀采样,则.尽管此求和对于我们要积分的每个方向都是正确的,~~但是在将结果存储到环境贴图,我们还必须考虑投影所产生的失真,方法是对每个计算的纹理像素乘以它所对向的立体角进行加权~~(请参见 Driscoll [376],**实际上采用蒙特卡洛算法不需要作立体角加权,只需要N足够大就行.除非计算所有纹素的贡献值,即使用黎曼和求解该积分**).

尽管蒙特卡洛方法简单,正确,但它们可能需要大量样本才能收敛到积分的数值,即使对于脱机过程也可能很慢.对于mipmap的第一个级别,这种情况尤其如此,我们在其中编码了浅镜面波瓣(在Blinn-Phong中,指数高,对于Cook-Torrance,粗糙度低).我们不仅要计算更多的纹理像素(因为我们需要分辨率来存储高频细节),而且对于不接近完美反射之一的方向,波瓣可能接近于零.大多数样本被“浪费”,因为它们的.

为了避免这种现象,我们可以使用重要性采样,在该采样中,我们会生成具有与镜面波瓣形状匹配的概率分布的方向.这样做是用于蒙特卡洛积分的一种常用方差降低技术,并且存在针对最常用叶的重要性采样策略[279,878,1833].对于更有效的采样方案,还可以结合镜面瓣的形状来考虑环境图中的辐射分布[270,819].但是,所有依赖点采样的技术通常仅用于脱机渲染和地面真实性仿真,因为通常需要数百个采样.

为了进一步减少采样方差(即噪声),我们还可以估计样本之间的距离并使用视锥和而不是单个方向进行积分.使用圆锥体采样环境图可以通过对其中一个mip级别进行点采样来近似进行,选择其texel大小跨度类似于圆锥体的立体角的级别[280].这样做会引入偏差,但它可以使我们大大减少获得无噪声结果所需的样本数量.这种类型的采样可以借助GPU以交互速率执行.

McGuire等人还利用面积样本.[1175]开发了一种技术,旨在实时近似镜面波瓣的卷积结果,而无需任何预计算.通过明智地混合多个未经预过滤的环境立方体贴图的mipmap级别来完成此过程,以重新创建Phong瓣的形状.Hensley等[718，719，720]以类似的方式使用求和面积表（第6.2.2节）快速执行逼近.McGuire等人和Hensley等人的技术都不是没有预先计算的,因为在绘制环境图之后,它们仍然需要我们分别生成mip级别或前缀和.对于这两种情况,都存在有效的算法,因此所需的预计算比执行完整的镜面波瓣卷积要快得多.两种技术都足够快,甚至可以实时用于环境光照下的表面着色,但是它们不如依赖于临时预过滤的其他方法那么精确.

Kautz等人[868]提出了另一种变体,一种用于快速生成滤波后的抛物线反射图的分层技术.最近,Manson和Sloan[1120]使用有效的二次B样条滤波方案来生成环境图的mip级别,极大地改善了现有技术.然后,通过与McGuire等人和Kautz等人的技术类似的方式,合并几个样本,即可使用这些经过特殊计算的B样条滤波后的mips,从而获得快速而准确的近似值.这样做可以实时生成结果,该结果与通过重要性采样的蒙特卡洛技术计算出的基本事实无法区分.

快速卷积技术允许实时更新预过滤的立方体贴图,当我们要过滤的环境贴图是动态呈现时,这是必需的.使用环境图通常使物体在不同的照明情况下难以移动,例如,从一个房间到另一个房间.立方环境图可以在帧与帧之间(或每隔几帧一次)动态生成,因此,如果采用有效的过滤方案,则在新的镜面反射图中进行交换相对便宜.

重新生成完整环境图的一种替代方法是将动态光源的镜面反射高光添加到静态基础环境图上.添加的突出显示可以是预先过滤的“斑点”,这些斑点会添加到预先过滤的基础环境图上.这样做避免了在运行时进行任何过滤的需要.这些限制是由于环境贴图的假设而造成的,即灯光和反射的对象距离较远,因此不会随所查看对象的位置而变化.这些要求意味着本地光源不容易使用.

如果几何是静态的,但是某些光源(例如太阳)在移动,则一种更新探针的廉价技术(不需要在立方体贴图中动态渲染场景)是将曲面属性(位置,法线,材质)存储在G缓冲区环境图.G缓冲区将在20.1节中详细讨论.然后,我们使用这些属性来计算表面到环境贴图的向外辐射.这项技术曾在《使命召唤：无限战争》[384]，《巫师3》[1778]和《孤岛惊魂4》[1154]等中使用.

10.5.2 分割积分近似微面BRDFs

环境照明的实用性非常可观,以至于已开发出许多技术来减轻立方体贴图预滤波中固有的BRDF近似问题.

到目前为止,我们已经描述了近似方法,其工作原理是假设一个Phong瓣,然后再乘以一个完美镜像的菲涅耳项.

其中,将每个的预计算为环境立方体贴图.如果我们使用第3.3页的公式9.34考虑镜面微面BRDF ,为方便起见在此重复,

我们注意到,即使假设有效,我们也将从照明积分中删除了BRDF的重要部分.去除了阴影项和半向量菲涅耳项,它们在积分之外的应用没有任何理论基础.Lazarov[998]表明,使用依赖于的完美镜面菲涅耳，而不是像微面BRDF中那样使用,会产生比根本不使用菲涅耳项更大的误差.Gotanda[**573**],Lazarov [**999**]和Karis[**861**]独立地得出了类似的分割积分近似值:

请注意,即使此解决方案通常称为“分裂积分”,我们也不会将积分分解为两个不相交的项,因为这不是一个很好的近似值.记住包括镜面波瓣D,我们注意到后者以及项在两侧均被复制.在分裂积分近似中,我们在两个积分中都包含围绕环境图中反射向量对称的所有项.Karis之所以称其分割和,是因为该求和是在他在预计算中使用的重要性抽样数值积分器(公式10.36)上完成的,但实际上是相同的解决方案.

由此产生的两个积分都可以有效地预先计算.第一个仅取决于表面粗糙度和反射矢量,并假设径向对称的D瓣.在实践中,我们可以使用任何波瓣,将.可以像往常一样预先计算该积分并将其存储在立方体贴图的mip级别中.当将半矢量BRDF转换为反射矢量周围的波瓣时,要在环境照明和分析光之间获得相似的亮点,径向对称波瓣应使用修改后的粗糙度.例如,要将使用半角的纯基于Phong的反射向量镜面项转换为Blinn-Phong BRDF,可通过将指数除以四来获得良好的拟合[472,957].

第二个积分是镜面反射项的半球方向反射率(第9.3节).函数取决于仰角,粗糙度和菲涅耳项.通常,使用Schlick近似公式(公式9.16)实现,该近似仅在单个值F0上进行参数设置,从而使成为三个参数的函数.Gotanda用数字方式预先计算,并将结果存储在三维查询表中.Karis和Lazarov指出,可以从中分解出F0的值,从而导致两个因素,每个因素取决于两个参数:仰角和粗糙度.Karis利用这种洞察力将的预先计算的查找减少为可以存储在双通道纹理中的二维表,而Lazarov通过函数拟合得出了两个因子中每个因子的解析近似.后来Iwanicki和Pesce [**807**]得出了一个更准确,更简单的解析近似.请注意,还可以用于提高漫射BRDF模型的精度(请参见第352页的公式9.65).如果这两种技术都在同一应用程序中实现,则的实现可同时用于这两种方法,从而提高了效率.

拆分积分解决方案对于恒定的环境图是精确的.立方体贴图部分提供了可缩放镜面反射率的光照强度,这是在均匀光照下正确的BRDF积分.从经验上看,Karis和Lazarov都认为近似值也适用于一般环境图,尤其是在频率含量相对较低的情况下(在室外场景中并不罕见).参见图10.37.与地面真实情况相比,此技术中最大的误差源是对预过滤环境立方体贴图的径向对称,非剪切镜面波瓣的限制(图10.35).Lagarde [960]建议根据表面粗糙度,将用于提取预过滤环境图的矢量从反射方向朝向法线倾斜,因为与地面真实情况相比,从经验上讲,这会减少误差.这样做是合理的,因为它可以部分补偿不用表面的入射辐射半球修剪波瓣.

10.5.3 不对称各向异性波瓣

到目前为止,我们已经看到的解决方案都限于各向同性的镜面波瓣,这意味着当入射方向和出射方向围绕表面法线旋转时(第9.3节),并且围绕反射矢量径向对称时,它们不会改变.围绕半向量定义微面BRDF瓣.(方程9.33),因此即使在各向同性的情况下,也永远不会具有我们需要的对称性.半矢量取决于光方向,对于环境照明,该方向不是唯一定义的.因此,根据Karis[861],对于这些BRDF,我们施加并得出一个恒定的粗糙度校正因子,以使镜面高光的大小与原始半矢量公式匹配.这些假设都是造成误差的重要原因(见图10.38).

我们在第10.5.1节中提到的某些方法可用于以交互速率计算具有任意BRDF的环境照明,例如Luksch等人[1093]的方法和Colbert和K andriv´anek [279,280].但是，由于这些方法需要数十个样本，因此很少在曲面的实时着色中使用它们.相反,它们可以看作是用于Monte Carlo集成的快速重要性抽样技术.

通过在镜面波瓣上施加径向对称性而创建的预滤波环境贴图,以及访问与当前表面镜面粗糙度相对应的预滤波波瓣的简单直接逻辑,只有在直视表面时才保证我们的结果正确.在所有其他情况下,都没有这样的保证,并且无论BRDF凸角的形状如何,在掠射角度我们都会产生误差,因为我们忽略了真实的凸角不能浸入曲面着色点的水平线以下.通常,镜面反射的精确方向上的数据可能不是现实的最佳匹配.

Kautz和McCool通过从存储在预过滤环境图中的径向对称波瓣中使用更好的采样方案,改进了天真预集成[867].他们提出了两种方法.第一种使用单个样本,但是尝试找到最佳的波瓣以在当前视图方向上近似BRDF,而不是依赖于恒定的校正因子.第二种方法对来自不同波瓣的几个样本求平均值.第一种方法可以更好地模拟掠角的表面.他们还推导了一个校正因子,以解决与原始BRDF相比使用径向对称波瓣近似反射的总能量差异.第二种解决方案将结果扩展为包括典型的半向量模型的拉伸高光.在这两种情况下,都使用优化技术来计算驱动预滤波瓣采样的参数表. Kautz和McCool的技术使用贪婪拟合算法和抛物线环境图.

最近,Iwanicki和Pesce[807]使用一种称为Nelder-Mead最小化的方法,对GGX BRDF和环境立方体贴图得出了类似的近似值.他们还分析了利用现代GPU的硬件各向异性过滤功能来加速采样的想法.

Revie[1489]也探索了使用来自预过滤立方体贴图的单个样本,但将其位置调整为更复杂的镜面BRDF的峰的想法,以进行毛皮渲染和延迟着色(第20.1节).在这种情况下,限制并不直接源于环境映射,而是源于在G缓冲区中编码尽可能少的参数的需求.McAuley[1154]扩展了这一思想,对延迟渲染系统中的所有曲面都使用了这种技术.

McAllister等人[1150,1151]开发了一种技术,该技术可以通过利用Lafortune BRDF的特性来渲染各种效果,包括各向异性和回射.此BRDF [954]本身是基于物理渲染的近似值.它由多个在反射方向上扰动的Phong瓣组成.Lafortune通过将这些波瓣拟合到He-Torrance模型[686]并通过测角反射仪测量实际材料,证明了BRDF代表复杂材料的能力.McAllister的技术依赖于注意到Lafortune裂片是广义Phong裂片,因此可以使用常规的预过滤环境图,其mips编码不同的Phong指数.格林等[582]提出了一种类似的方法,该方法使用高斯叶而不是Phong叶.此外,它们的方法可以扩展为支持环境图的定向阴影(第11.4节).

10.6 辐照度环境映射 2020年4月20日19点03分

上一节讨论了使用过滤后的环境贴图进行光泽镜面反射.这些贴图也可以用于漫反射[590,1212].镜面反射的环境贴图具有一些共同的属性,无论是未过滤并用于镜面反射,还是已过滤并用于光泽反射.在这两种情况下,镜面环境贴图都使用反射的视图矢量建立索引,并且它们包含辐射值.未过滤的环境贴图包含传入的辐射值,而过滤的环境贴图包含传出的辐射值.

相反,用于漫反射的环境贴图仅使用表面法线进行索引,并且包含辐照度值.因此,它们被称为辐照环境贴图[1458].图10.35显示,由于环境映射的固有模糊性,在某些情况下带有环境贴图的光泽反射存在误差.相同的反射视图矢量可以对应于不同的反射情况.辐照环境贴图不会发生此问题.表面法线包含所有与漫反射有关的信息.由于辐照环境图与原始照明相比非常模糊,因此可以以低得多的分辨率存储它们.通常,将预过滤的镜面环境贴图的最低Mip级别之一用于存储辐照度数据.而且,与我们之前研究过的光泽反射不同,我们没有针对需要修剪到表面法线周围的半球的BRDF波瓣进行积分.环境照明与所夹余弦波瓣的卷积是精确的,而不是近似值.

对于地图中的每个纹理像素,我们需要对影响面向给定法线方向的表面的所有照明的余弦加权贡献进行汇总.通过将覆盖整个可见半球的影响深远的滤镜应用于原始环境图来创建辐照环境图.滤波器包括余弦因数.参见图10.39.第408页上的图10.26中的球体图具有图10.40中所示的相应辐照度图.图10.41给出了一个使用中的辐照度图的示例.

辐照度环境贴图通常与视图无关的表示形式(例如立方体贴图)与镜面环境或反射贴图分开存储和访问.参见图10.42.代替反射的视图矢量,曲面法线用于访问立方体贴图以检索辐照度.从辐照度环境贴图检索的值乘以漫反射率,从镜面环境贴图检索的值乘以镜面反射率.菲涅耳效应也可以建模,以掠射角增加镜面反射率(并可能降低漫反射率)[704,960].

由于辐照环境贴图使用非常宽的滤镜,因此难以通过采样实时有效地创建它们.King[897]讨论了如何在GPU上进行卷积以创建辐照度图.通过将环境图转换到频域,他能够在2004年代的硬件上以超过300 FPS的速率生成辐照图.

可以以低分辨率存储用于漫反射或粗糙表面的已过滤环境贴图,但有时也可以从相对较小的场景反射贴图生成,例如64×64纹素的立方体贴图面.这种方法的一个问题是,渲染成如此小的纹理的面光源可能“落在纹理像素之间”,从而导致光线闪烁或完全掉光.为了避免这个问题,Wiley和Scheuermann[1886]建议在渲染动态环境图时用大的“卡片”(带纹理的矩形)来表示这种光源.

与有光泽的反射一样,动态光源也可以添加到预过滤的辐照度环境图中.布伦南[195]给出了一种廉价的方法来做到这一点.想象一下单个光源的辐照度图.沿光的方向,辐射最大,因为光直接照射在表面上.给定表面法线方向(即给定纹理像素)的辐射度随与光的夹角的余弦值下降,并且在表面背向光的位置为零.通过渲染一个半球(代表余弦波),以观察者为中心,使半球的极点沿着光的方向,GPU可用于将这种贡献直接直接添加到现有的辐照度图中.

10.6.1 球谐辐射

尽管我们已经讨论过仅用诸如立方贴图之类的纹理表示辐照环境贴图,但是其他表示方式也是可能的,如10.3节所述.特别是球形谐波作为辐照环境图表示非常受欢迎,因为来自环境照明的辐照是平滑的.将辐射与余弦波相乘会导致从环境图中删除所有高频分量.

Ramamoorthi和Hanrahan[1458]表明,仅前9个SH系数(每个系数都是RGB向量,因此我们需要存储27个浮点数)就可以将辐照环境图表示为精度约为1％.然后可以使用公式10.21和10.23将任何辐照环境图解释为球面函数并投影到九个RGB系数上.这种形式比立方或抛物线贴图更紧凑,并且在渲染过程中可以通过评估一些简单的多项式来重建辐照度,而不用访问纹理.如果辐照环境贴图表示间接照明(在交互式应用程序中很常见),则通常需要的精度较低.在这种情况下,用于常数基函数和三个线性基函数的四个系数通常可以产生良好的结果,因为间接照明往往是低频的,即随角度缓慢变化.

Ramamoorthi和Hanrahan [1458]还表明,通过将每个系数乘以一个常数,可以将传入辐射函数的SH系数转换为辐照函数的系数.这样做产生了一种将环境图过滤为辐照环境图的快速方法,即将它们投影到SH基础上,然后将每个系数乘以一个常数.例如,这就是King[897]的快速辐照度过滤实现的工作原理.这个想法是从辐射度计算辐照度等效于在入射辐射度函数和截断余弦函数之间执行球面卷积.由于截断余弦函数关于球体的z轴旋转对称,因此它在SH中采用一种特殊形式:其投影在每个频带中只有一个非零系数.非零系数对应于图10.21(第401页)中心栏中的基函数,也称为区域谐波.

在一般球形函数和旋转对称函数(例如截断余弦函数)之间执行球形卷积的结果是球体上的另一种函数.该卷积可以在函数的SH系数上有效执行.卷积结果的SH系数等于两个函数的系数的乘积(相乘),按进行缩放,其中是频带索引.然后,辐照度函数的SH系数等于辐照度函数系数乘以截断余弦函数的系数,并按频带常数进行缩放.超出前九个的系数具有较小的值,这解释了为什么九个系数足以表示辐照度函数.可以通过这种方式快速评估SH辐照环境图.Sloan[1656]描述了一种有效的GPU实现.

这里有一个固有的近似,因为尽管的高阶系数很小,但它们不为零.参见图10.43.尽管在和之间的曲线“摆动”应为零,但在信号处理中称为“振铃”,因此近似值非常接近.如第10.3.2节所述,当高频函数与少量基函数近似时,通常会发生这种情况.处的截断为零是一个急剧变化,这意味着我们的截断余弦函数具有无限的频率信号.在大多数情况下,铃声并不明显,但是在极端光照条件下,物体的阴影侧会发生色移或明亮的“斑点”,因此可以看到铃声.如果辐照度环境图仅用于存储间接照明(通常会发生这种情况),那么响铃就不太可能成为问题.有一些预过滤方法可以最大程度地减少问题[1656,1659].参见图10.44.

图10.40显示了如何直接得出的辐照度贴图与通过九项函数合成的辐照度图进行比较.可以在使用当前表面法线 [1458]进行渲染时评估此SH表示,或者可以将其用于快速创建三次或抛物线贴图以备后用.这种照明是廉价的,并且对于漫射箱具有良好的视觉效果.

动态绘制的立方环境图可以投影到SH基础上[871,897,1458].由于立方环境贴图是入射辐射函数的离散表示,因此公式10.21中球体上的积分成为立方贴图纹理上的总和:

其中是当前立方体贴图纹理元素的索引,是指向当前纹理元素的方向向量,是在评估的第个SH基函数,是存储在纹素中的辐射率,是由纹素对着的立体角.考茨[871],金[897]和斯隆[1656]描述了如何计算.

要将辐射系数转换为辐照系数,需要将它们乘以截断余弦函数的比例系数:

其中是辐照度函数的第个系数,是入射辐射度函数的第个系数,是钳位余弦函数乘以(是频带索引)后的第个系数.

给定和立方图分辨率,对于每个基函数,因子是恒定的.这些基本因子可以离线进行预先计算,并存储在立方体贴图中,其分辨率应与将要渲染的动态环境贴图相同.通过在每个颜色通道中填充单独的基本因子,可以减少使用的纹理数量.为了计算动态立方体贴图的辐照系数,将适当的基本因子贴图的纹素与动态立方体贴图的纹素相乘,并对结果求和.除了有关动态辐照度立方体贴图的信息之外,King[897]还提供了有关GPU SH投影的实现细节.

可以将动态光源添加到现有的SH辐照环境贴图中.合并是通过计算灯光的辐照度贡献度的SH系数并将其添加到现有系数中完成的.这样做避免了重新计算整个辐照环境图的需要.这是一个简单的过程,因为对于点,圆盘和球形光的系数存在简单的分析表达式[583,871,1656,1690].对系数求和与对辐照度求和具有相同的效果.通常,对于与z轴对齐的光,这些表示以区域谐波给出,然后可以旋转以将光定位到任意方向.区域谐波旋转是SH旋转的一种特殊情况(第10.3.2节),效率更高,仅需要点积而不是完整的矩阵变换.通过将形状更复杂的光源绘制成图像,然后将其数值投影到SH基础上,可以计算出它们的系数[1690].对于物理天空模型的特殊情况,Habel [626]显示了Preetham天窗在球谐中的直接扩展.

普通分析光源投射到SH上的简便性很重要,因为通常使用环境照明来代替远处或强度较小的光源.填充光很重要.在渲染中，放置这些光源以模拟场景中的间接光，即从表面反射的光.通常不会为填充光计算镜面反射的贡献,尤其是因为这些光相对于着色对象在物理上可能较大,并且与场景中的其他照明源相比相对较暗.这些因素使它们的镜面反射高光更加散布并且不那么引人注目.这种类型的灯在电影和视频照明中具有现实世界的类比,其中通常使用物理补光灯在阴影中添加照明.

在球谐空间中,进行相反的推导也很简单,即从SH投影的辐射中提取分析光源.在对SH技术的调查中,Sloan [1656]展示了如何在给定具有已知轴的定向光源的情况下,很容易从SH辐照度表示中计算出光应具有的强度,以最大程度地减少自身与编码后的误差.

Sloan[1653]在先前的著作中展示了如何通过仅采用第一（线性）频带中的系数来选择接近最佳的方向.该研究还包括一种提取多个定向光的方法.这项工作表明球形谐波是光求和的实用基础.我们可以将多个光源投射到SH中,并提取数量较少的定向光源,这些光源可以非常接近投影集.lightcuts[1832]框架提供了一种聚集不太重要的灯光的原则方法.

尽管最常用于辐照度,但SH投影可用于模拟光泽的,依赖于视图的BRDF照明.Ramamoorthi和Hanrahan[1459]描述了一种这样的技术.它们将颜色而不是单色存储在立方体贴图中,将球形谐波投影的系数编码为环境贴图的视图依赖性.但是,实际上,此技术比我们之前看到的预过滤环境图方法需要更多的空间.考茨等人[869]使用SH系数的二维表得出了一种更经济的解决方案,但是这种方法仅限于相当低频的照明.

10.6.2 其它表达法

尽管立方体贴图和球谐函数是辐照环境贴图的最流行表示形式,但其他表示形式也是可能的.参见图10.45.许多辐照度环境贴图具有两种主要颜色:顶部是天空色,底部是底色.出于这一观察的动机,Parker等人[1356]提出了一种仅使用两种颜色的半球照明模型.假设上半球发射出均匀的辐射,而下半球发射出均匀的辐射.这种情况下的辐照度积分为

其中是表面法线与天空半球轴之间的角度.Baker和Boyd提出了一个更快的近似值(由Taylor [1752]描述):

使用作为插值因子,是天空和地面之间的线性插值.项通常很快就可以计算为点积,在通常情况下,即天空半球轴是基本轴之一(例如,y轴或z轴)时,不需要将其计算为全部,因为它等于n的世界空间坐标之一.近似值相当接近并且明显更快,因此对于大多数应用而言,它比完整表达式更可取.

Forsyth[487]提出了一种廉价且灵活的照明模型,称为三光灯,其中包括定向照明,双向照明,半球形照明和环绕照明.

Valve最初引入了环境立方体表示法(见10.3.1节)以用于辐照度.通常,我们在10.3节中看到的所有球面函数表示都可以用于预先计算的辐照度.对于辐照度函数表示的低频信号,我们知道SH是一个很好的近似值.我们倾向于创建特殊的方法来简化或使用比球形谐波更少的存储.

如果我们要评估遮挡和其他全局照明效果,或者想要合并光泽反射,则需要更复杂的高频表示形式（第10.1.1节）.预计算照明以解决所有相互作用的一般想法称为预计算辐射传输(PRT),将在11.5.3节中讨论.为有光泽的照明捕捉高频也称为全频照明.在此情况下,小波表示常用于[1059]作为压缩环境图的手段,并以类似于我们在球谐函数中看到的方式设计有效的算子.Ng等人 [1269,1270]演示了使用Haar小波来概括辐照环境映射以建模自阴影.它们以小波为基础存储环境图和阴影函数,它们在对象表面上有所不同.该表示形式值得注意,因为它相当于环境立方体贴图的变换,对每个立方体面执行二维小波投影.因此,可以将其视为立方体贴图的压缩技术.

10.7 源误差

为了正确执行着色，我们必须评估非点光源上的积分.实际上,此要求意味着根据所考虑的灯光的属性,我们可以采用许多不同的技术.实时引擎通常会分析一些重要的灯光,对灯光区域的积分进行近似并通过阴影贴图计算遮挡.所有其他光源-远处的照明,天空,补光和在表面弹起的光-通常由用于镜面反射分量的环境立方体贴图和用于散射辐照的球形底座表示.

混合使用多种照明技术意味着我们永远不会直接使用给定的BRDF模型,而是采用具有不同程度误差的近似值.有时,BRDF近似是明确的,因为我们拟合中间模型来计算照明积分-LTC是一个示例.其他时候,我们建立的近似值在特定(通常很少见)的条件下对于给定的BRDF来说是精确的,但是通常会受到误差的影响-预过滤的立方体贴图属于此类.

开发实时着色模型时要考虑的重要方面是确保不同形式的照明之间的差异不明显.在视觉上,具有来自不同表示的相干光结果甚至比每个表示的绝对近似误差更为重要.

遮挡对于逼真的渲染也至关重要,因为在不应该存在的地方,光线“泄漏”通常比在不应该存在的地方更引人注目.大多数区域的灯光表示对阴影并不重要.如今,即使考虑到“柔化”效果(第7.6节),现有的实时阴影技术都无法准确考虑光的形状.我们计算了一个标量因子,将其乘以减少当物体投射阴影时给定光的贡献,这是不正确的.在与BRDF进行积分时,我们应该考虑到这种遮挡.环境照明的情况特别困难,因为我们没有明确的主导光方向,因此无法使用点光源的遮蔽技术.

即使我们已经看到了一些相当先进的照明模型,也要记住,这些模型并不是真实照明源的精确表示.例如,在环境照明的情况下,我们假设无限远的辐射源,这是不可能的.我们所看到的所有分析光都基于一个更强的假设进行工作,即这些光在其表面上的每个点均在向外的半球上均匀地发出辐射.实际上,这种假设可能是错误的来源,因为实际的灯光通常是强方向性.在摄影和电影照明中,通常采用特制的遮光罩和滤光片(称为遮光板,小印版或饼干)来达到艺术效果.例如,请参见摄影师Gregory Crewdson制作的图10.46中复杂的电影摄影灯.为了限制发光角度并同时保持较大的发射面积,可以在大型发光面板(所谓的柔光箱)的前面添加被称为蜂窝的黑色屏蔽材料网格.反射镜和反射镜的复杂配置也可以用在灯罩中,例如内部照明,汽车前灯和手电筒.见图10.47.这些光学系统会在远离物理中心辐射光的位置创建一个或多个虚拟发射器,并且在执行衰减计算时应考虑此偏移量.

请注意,这些错误应始终在可感知的,面向结果的框架中进行评估(除非我们的目标是进行预测性渲染,即可靠地模拟表面的真实外观).在艺术家的手中,某些简化,即使不切合实际,仍然可以产生有用且富有表现力的原语.物理模型在使艺术家更容易创建视觉上合理的图像时很有用，但是它们本身并不是目标.