摘要

随着游戏，动画和视觉特效行业采用更实际接地的光传输方法和材料表示法，人们致力于能量守恒,以确保计算的数值稳定性和逼真的图像.但是,与确保过程中没有能量损失相比，这种努力更多地集中在避免过度发光上。 Microfacet模型已成为表面材料的标准构建块，用于表示粗糙度不同的镜面组件。然而，尽管它们除了产生令人信服的结果外还具有许多理想的特性，但它们的设计却忽略了重要的散射源，这可能导致能量的大量损失。具体而言，他们仅对微面之间的单散射建模，而忽略后续的相互作用，随着粗糙度的增加，相互作用将变得越来越重要。从用户的角度来看，这会导致粗糙的镜面波幅出乎意料地变暗，这通常必须以特殊方式解决。在本文档中,我们介绍并比较了旨在解决此缺陷并确保节能的不同方法，包括ILM已开发的一种方法。

介绍

自库克和托伦斯（Cook and Torrance，1982年）提出以来，微面模型已成为代表粗糙镜面反射和折射的普遍方法[Walter等人2007],实时和离线渲染.如果考虑镜面反射面,可以使用众所周知的公式表示微面BRDF :

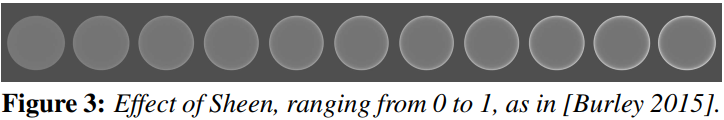
其中为几何法线,为微面法线,和入射和出射方向,为菲涅耳项，为阴影掩蔽函数,为微面分布函数。除其他优点外，该公式还提供了极大的模块化，因为可以在具有不同特征的候选项之间选择所有三个项F,G和D.

一个特别受欢迎的选择是使用GGX分布作为D（及其关联的项G;有关它们应如何关联的信息,请参见[Heitz 2014]）以及导体菲涅耳项,以重生粗金属（如图1顶部所示）。 行）。 或者，将BTDF与二烯F结合使用可以复制折射材料，例如毛玻璃.

不幸的是,该模型还存在一个重要的局限性:它仅模拟微平面上入射光线的单一交互作用,此后,由G确定,从ωi/ωo可见或不可见散射光线。当光线不可见（即一次或多次击中另一个微面）时，将不会发生这种情况（有关更多详细信息，请参见[Heitz 2014]的第3节）。正如人们所期望的，当粗糙度为零时，不会丢失任何能量，因为这对应于一个完美的平坦表面且没有可能的咬合。但是表面越粗糙（或微面方向的分布越宽），这种多重散射能量的缺乏就越明显。回顾图1的第一行，最右边的对象与明亮的对象相比显得过于暗淡和暗淡。事实上，在GGX的情况下，如果忽略菲涅耳吸收，则粗糙度值α= 1时，能量损失会达到60％左右。当使用尾部较长的分布（例如GTR）时，能量损失会更加严重[Burley 2012 ]或STD [Ribardiere等。 2017]，它可以达到90％以上，如图2所示。在生产环境中，这要求对反照率进行目测和手动补偿，通常在外观开发阶段应用，并且可能会破坏其他方式的能量守恒。幸运的是，已经设计出了更简单，更合理的方法.

先前工作

重新注入丢失的多重散射贡献的各种方法，从试探性和艺术性地控制到完全基于物理的和自动化的，范围广泛。 它们在复杂性，实用性和速度方面也有很大差异。



Burley [2015]使用Schlick Fresnel轮廓引入了一个简单的，物理上合理的，由用户驱动的Sheen分量，该分量增加了掠射前向反射以更好地匹配观察到的材料，并补充了已经提出的漫射后向反射[Burley 2012]。该项的动机是近似补偿假定的缺失“在微表面特征之间并通过微表面特征的多重散射效应”.

不幸的是,这种定性补偿（如图3所示）没有考虑到重要因素，例如粗糙度变化的影响，因此每当编辑BSDF的其他属性时都需要重新调整.在这些课程笔记的第5.1节中，着重说明了仍在生产中的实际问题的数量，同时还提到了一种更精确和自动的方法作为未来的工作。

在[Heitz 2014]的第7节的“多重散射”小节中，建议“结合能量守恒知识和经验观察”，并考虑将新的BRDF模型表示为:

其中是常用的,方程(1)的单次散射项,而是要定义的新的多重散射项,它解释了所有次级瓣.对的第一个重要约束自然是通过能量保存施加的.让我们将反照率介绍为:

(和同样如此).然后,如果我们暂时忽略菲涅耳（即认为F = 1）,则必须满足以下等式:

表示这样一个事实,即在微面上经过一个或多个反弹之后,所有入射能量都会被反射回去.换句话说:

鉴于已完全定义,我们有不同的选项来(预)计算它或.遵守式5可以防止能量损失,并且自然会根据需要生成完美恒定的图2.现在,有待探索的是:

* 的形状
* 如何整合菲涅耳吸收.

尽管Heitz[2014]并未提供对任何一个问题的直接解决方案,但他指出:

“例如,可以通过在粗糙表面样本上计算蒙特卡洛模拟来研究ρms的形状.”(Q1)

现在加上

“如果结果很简单，那么作为第一近似值，我们可以使用解析函数（例如作为单个叶）对其进行建模。”(Q2)

关于菲涅耳，他建议预先计算一次弹跳的平均期限Fss，然后按此比例调整Ems.如果认为不够准确，则“也许也可以预先计算多次反弹后的平均值Fms”结论:

“由于多重散射趋于平滑函数，因此可以合理地期望它可以用简单的分析函数或小的预计算的查找纹理有效地表示和存储。”(Q3)

在随后的工作中,Heitz等人[2016]遵循了Q1表达的想法,并提出了一个完整的随机模型来模拟多重散射,使用微薄片理论对微表面上的体积和随机游动进行了模拟.该模型被证明是非常精确的,不仅对于导体反射而且对于介电散射,如果不是因为其涉及的性质而使得它不那么容易插入到现有的生产渲染系统中（特别是通过使用附加的渲染系统），则该模型将是理想的,随机数，更重要的是在计算上非常昂贵.

这项工作的一个有趣且让人有些意外的收获(在其论文的图15中可见,为方便起见,在此处部分复制在图4中)是,次瓣看上去并不弥散,而像是主瓣的缩小版本.

在与我们同时进行的努力中，Kulla和Conty[2017]利用了Q2和Q3的观察结果,提出了精度明显较低,但更为简单和快速的解.他们使Kelemen和Szirmay-Kalos [2001]的工作适应了当前的问题，并使用了它们具有弥散外观的遮罩分量作为多重散射波瓣，通过构造考虑了方程5：

其中菲涅尔项定义为:

假定漫反射和进行计算.请注意,他们选择重映射F和来替换,,这非常好,因为两个项在方位角上都是不变的.使用几何级数获得的项的详细推导在[Jakob等人2014年]中给出,第5.6节.整个方法依赖于小的1D（α）和2D（α，µ）查找表来平滑地改变Eavg和Ess（在其实现中,尺寸分别为32和32×32）, 对于每个给定的微面分布,这些表必须预先计算.通过设计，波瓣也是倒数的（即ρms（ωo，ωi）=ρms（ωi，ωo）），如果在双向设置中使用，则至关重要.

作为另外的贡献,考虑到F还取决于其IOR（导体的两个波长相关值），它们为各种菲涅耳公式（Schlick近似，导体，艺术家友好的导体）提供了Fss的简单分析拟合。 它们还支持粗糙的介电反射和折射，这一次使用了几张桌子，每张桌子分别用于每种类型的界面（外部朝向内部，另一方向围绕内部）。 在这种情况下，必须将菲涅耳合并到能量查找表中，因为它现在代表反射光线和折射光线之间的比率，因此会在分辨率匹配的表中增加尺寸。 总而言之，此方法非常快速且健壮，可以通过对其BSDF进行相对较小的修改将其添加到渲染器中。 但是，它选择使用具有弥散性的ρms瓣，因此与Heitz等人[2016]的先前结果相矛盾。，这表明次要裂片的形状与主要裂片相似。

我们的方法

尽管Kulla和Conty的主要关注点和设计约束是保持互惠性，但我们的方法源于这种观察到的瓣之间形状的相似性，同时还旨在极简主义（除非更多的复杂性对用户有利）。 这使我们可以简单地尝试将缩放后的用作:

其中是要定义的因素,表示了缺少的能量.在本节中,除非另有说明,否则我们将使用GGX BRDF.

3.1 导体

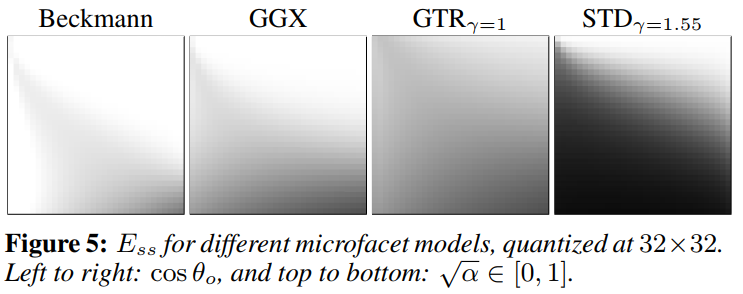
3.1.1 能量项

如果我们忽略菲涅耳对多重散射项的影响,我们实际上可以将视为的归一化版本:

自然地给我们:

并且通过构造，这样的BRDF验证方程式4：

由于其平滑的变化,我们发现像Kulla和Conty一样,可以预先计算(同样,F = 1)并存储在小的LUT中，并通过出射角（或余弦）和粗糙度进行参数化.在我们的实现中,我们也使用cosθo和的32×32表（见图5）。 对于具有其他γ尾长参数的分布（例如GTR或STD），我们使用针对每个分布量身定制的γ映射将表扩展到32×32×32.



但是，虽然能量项可能是整体补偿中最关键的组成部分，但微面每次弹跳时所发生的菲涅耳吸收仍不可忽略,如图6所示.我们仍然需要找到一个令人满意的项.

3.1.2 菲涅尔项

在继续进行之前，我们必须承认对单个波瓣的多个散射进行建模并将视为可分离且方向不变的决定是非常粗略的近似。在这种设计中，我们最多只能期待部分匹配.但是,简单的定性匹配可能足以满足我们的生产需求,并且对于用户而言,它的补偿行为更容易预测,其饱和度与所添加的能量成正比.

Fms的一个很好的选择是简单地重用等式7中定义的项.此函数从当（或Eavg = 1）时恰好等于Fss到确实仅存在单散射的情况,到 （或Eavg≃0.4）时接近.

从图7 左侧可以看出,的饱和度甚至比此公式还高,这在视觉上更接近地面真实结果(第4节中的更多内容).

但是,我们使用它进行了较小的更改,因为已经合并了方向性单散射菲涅耳系数(请参见公式1),从而有效地替代了分子上的.我们可以证明这是为整体效果赋予更多方向性的一种方式,以平衡原始推导中做出的弥散假设.

该函数的行为证实了用Heitz [2016]模型进行的测量,结果表明,当α从0变为1时，平均随机游走深度（可以看作Fss的指数）从1到几乎为2（请参见图7）。 对）.

利用这些结果,另一种(甚至更简单的)合适的公式将是:

我们可以观察到,作为方程式8中kms的乘数,可以进一步简化Fresnel项,当kms值较高时,它会产生更大的影响,而kms值对应于较大的粗糙度值.

由于当α= 1时,Fms的影响最为明显,因此我们可以将其剥离为这样的粗糙度所需的值:

我们尚未完全完成:可以应用最后的简化.在[Kulla and Conty 2017]中定义的Fss表示为多项式拟合,其中包含与波长相关的参数η和κ，或者F0和Fedge（F0为法线角度的颜色；有关此细节，请参见[Gulbrandsen 2014] 参数化）。 评估需要付出一定的代价，尤其是在针对实时应用程序时。

这使我们得出了最终的简单公式:

如果我们更明确地重写公式8中定义的BRDF:

这是用于生成图1(最下面一行)结果的公式.有趣的是,无论在12、13、14和15之间选择哪个Fresnel项,结果在视觉上都非常接近,并且它们都能达到我们最初寻找的饱和效果.接近于F 2形状且具有较高粗糙度的任何东西都可以满足我们的生产需求.

3.2 电介质

对于电介质，该方法类似，只有几个主要区别。 在确定反照率归一化时，我们不能像在公式9中对导体所做的那样忽略菲涅耳，因为它表示反射与透射的能量之间的比率,而不仅仅是反射与吸收的比值.但是,可以标准化,.

如果我们将单散射电介质BSDF定义为:

并考虑到相同的反射/透射比适用于多次散射，我们可以获得能量守恒的BSDF:

鉴于ES术语中包含了菲涅耳,我们的LUT变成了3D，而IOR是一个附加维度.另一方面，这意味着我们不再需要担心单独的多重散射菲涅耳项.如Kulla和Conty [2017]所述,我们分别为两种类型的接口计算表,从而生成两个32×32×32的表（请注意,如果针对尾长参数化模型进行计算,这些表甚至将是4D的），并使用 有界的F0∈[0，1]，而不是额外的η.