概览

我们提供了基于微面BRDF中的遮蔽阴影函数(或几何衰减因子)的新描述,并回答了有关其应用的一些常见问题.我们的主要动机是为微面模型定义正确的(以几何图形表示)基于物理的遮蔽函数,以及该函数应展现的属性.确实,文献中经常介绍几种不同的遮蔽函数,正确的选择并不总是显而易见的.我们首先显示了基于物理的遮蔽函数受可见微表面在出射方向上的投影区域的约束.我们使用此属性从微表面导出可见法线的分布,其归一化因子就是遮蔽函数.然后，我们展示了基于微面BRDF的常见形式是如何从这种分布中出现的.结果就是,遮蔽函数与基于微面BRDF的正确规范化有关.但是,尽管正确的遮蔽函数满足了这些归一化约束,但只能为给定的微表面方案确定其显式形式.

我们的推论强调,在各自微表面方案的假设下,Smith’s函数和V型凹凸遮蔽函数都是正确的.但是,我们显示出V型凹凸表面产生的结果缺少遮挡效果,类似于法线贴图而不是位移贴图的着色.该观察结果解释了为什么V型凹凸模型在掠射视角下会产生不正确的光泽高光.

我们还回顾了其他常见的遮蔽函数,这些功能与微表面轮廓无关,因此不是基于物理的. 从这些观察中获得的见解激发了微面理论领域的新研究方向.例如,我们显示了遮蔽函数是拉伸不变的,并且演示了如何使用此属性以一种简单的方式来导出各向异性微表面的遮蔽函数.我们还将讨论未来的工作,例如将微表面上的多重散射纳入BRDF模型.

1 介绍

微面理论最初是在光学物理学领域发展的,用于研究统计表面上的散射[Beckmann and Spizzichino 1963].在图形界,我们使用它来导出基于物理的双向反射率分布函数（BRDF）[Cook and Torrance 1982;Oren和Nayar，1994年;Walter等人[2007年],广泛用于实时渲染和生产渲染中.如今,微面理论已成为计算机图形学中的一个基本背景主题.例如,在过去的两年中,基于物理渲染的SIGGRAPH课程首先介绍了微面理论[McAuley等人2012;McAuley等人2013],目的是提供源自基础物理学的主要直觉.在整个课程中还将讨论其他考虑因素，例如艺术指导的灵活性和计算效率.微面是一个持续发展的领域,因为基于微面的BRDF中不同组件的组合提供了广泛的可能性.因此,对于每个组件的正确选择通常并不明显,根据我们的经验,这是该领域常见的混乱原因.

***本文内容*** 本文的目的是提供新的见解并回答长期以来有关基于微面BRDF的遮蔽函数选择的问题.总结部分将回答以下问题：2.5、3.6和4.4.开发者可以直接跳到这些部分.其余部分供寻求发展直觉和对微面理论理解的读者阅读.

***本文不涉及的内容*** 我们不会引入新的BRDF模型;只讨论常用模型.我们不建议读者在只使用一种模型;我们旨在提供有关这些模型的背景知识,以帮助了解它们来自何处,它们在做什么以及我们可以从中得到什么.我们不回顾它们在特定渲染技术上的实现或用法,因为它们已在计算机图形社区中使用;我们专注于了解其物理性质.

***关于微面模型的“基于物理”的含义***.物理模型是系统或物理现象的简化表示,可以对其进行分析,解释并对其行为进行预测.

在微面理论中,要研究的模型在宏观尺度上是平坦的几何表面,其表面在微观尺度上是粗糙的并且由微面组成.该表示用于解释和预测在几何表面界面处发生的散射事件，即与几何表面相交的光如何在其他方向反射和散射.

一个有意义的微面模型由法线分布和微面轮廓来描述,其中法线分布对微面朝向进行统计建模,而微面轮廓则对微面的组织方式进行建模.从该微表面模型精确地得出的BRDF方程称为“基于物理的”,因为它们基于微表面模型.相反，如果微面模型无法从BRDF方程导出,则它不是“基于物理”的微面模型.遮蔽和阴影函数是微面BRDF的一部分.它们给出了在出射方向(遮蔽)或入射方向(阴影)微面可见的概率.对于BRDF,只有从微表面模型派生的微面遮蔽和阴影函数才可以称为“基于物理的”.

在本文中,我们解释了如何正式描述微表面模型,以及如何从中推导基于物理的遮蔽和阴影函数.我们还将展示这如何导致相关的基于物理的BRDF.

但是,应该注意的是,微面模型仅仅是模型.它们始终基于有关微表面光学行为的一些假设,例如几何光学,完美镜面或漫反射,单散射等.因此,需要牢记的是,将它们称为“基于物理的”并不意味着它们可以从真实的物理表面精确地预测测量结果.在那些假设是错误的情况下,与测量数据相比,经验模型有时甚至可能比数学上严格的“基于物理的”模型更为准确.

思想与组织 本文提出的思想受到了之前三部作品的强烈启发:

* Smith(1967)的遮蔽函数是计算机图形文献中最著名的函数之一.但是,鲜为人知的是, Smith在其文章的结尾指出,他的函数具有保留可见投影区域的特性,这是正确的遮蔽函数所期望的.
* Ashikhmin等人[2000]还观察到可见投影面积是从几何表面到微表面守恒的量.他们利用这些知识来推导用于正确遮蔽项的通用方程式，从而确保正确的归一化和守恒.通过这样做,他们实际上是在不知不觉中重新发明了Smith遮蔽函数.实际上,它们的遮蔽项以积分形式表示,并没有导出解析形式.取而代之的是,对它进行数值预计算并将其存储在查找表中.
* 罗斯等人[2005]提出了对海洋反射率的研究.他们使用高斯粗糙表面(Beckmann分布)对海洋进行建模,并结合Smith遮蔽和阴影函数计算出归一化的BRDF.在推导过程中,他们观察到在高斯表面上，BRDF和史密斯遮蔽函数的归一化系数具有相抵消的相似表达式.他们注意到此属性对于计算目的是方便的,但是他们没有提供关于可能(或必须)发生这种情况的物理原因.

在此文档中,我们提出了一个统一的微面框架,所有这些先前的结果(从遮蔽函数到整个BRDF)都能从可见投影区域的守恒导出.

在第2节中,我们介绍微观方面的统计量,并得出了可见投影区域的守恒方程式,这是正确遮蔽函数所满足的.

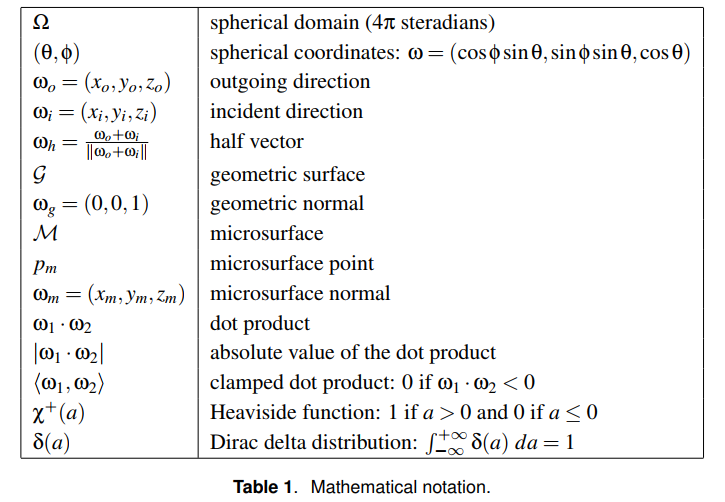
在第3节中,我们介绍可见法线的分布,并说明如何从该分布中导出常见的BRDF模型. 微面BRDF需要遮挡的原因是它们仅对微表面上发生的第一个散射事件进行建模.普通的微面BRDF不能对多重散射进行建模,因此无法归一化,也就是说,它们的积分并不是恰好等于1(即使在模拟完美反射的表面时也是如此).从这一观察开始,我们提出了归一化测试(我们称为“弱白炉测试”),该测试可用于验证常见的基于微面的BRDF设计合理,即使它们仅对第一个散射事件进行建模也是如此.

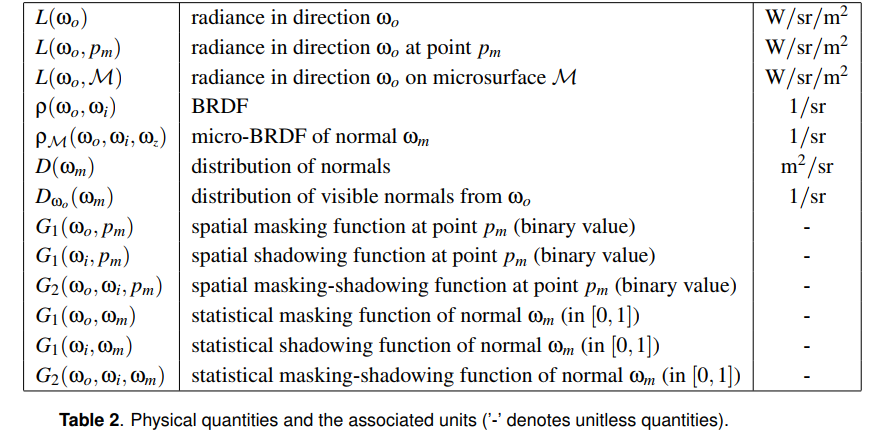
在第4节中,我们用Smith和V型凹凸微面轮廓实例化了在前面各节中得出的方程,并比较了它们各自的BRDF的特性.尽管我们的推导没有提供新的结果,但它们的优点是强调了结果是准确的而不是近似,并显示了遮蔽如何与任意随机曲面上可见投影区域的概念相关.我们还将回顾其他常见的遮蔽函数,这些函数不是从微表面模型得出的,因此既不精确也不基于物理.

在第5节中,我们首次展示遮蔽函数的拉伸不变性以及如何将其用于对法线几种各向异性分布的遮蔽函数的微分推导.简化了对先前几个结果的各向异性的概括.

在第6节中,我们讨论用于阴影的Smith遮蔽函数的属性,并回顾处理不同相关性类型的几遮蔽膜阴影模型.

最后,在第7节中,我们讨论当前微面框架的一些局限性,并根据从调查中获得的见识，提出了有前途的未来工作的可能性.



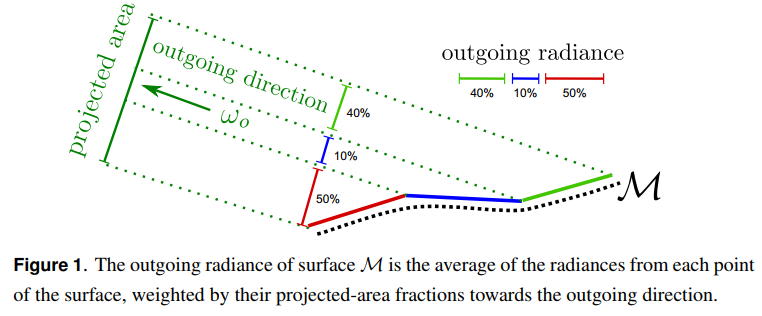


2 遮蔽函数的推导

在本节中,我们将按照Ashikhmin等人[2000]的方法,展示如何将微表面的投影面积用于对基于物理的遮罩功能施加约束.我们首先定义投影面积(2.1)的概念，并说明为什么它对辐射度的测量至关重要.然后,我们定义微面理论的统计框架(2.2).投影面积(2.3)的守恒给出了一个新的微面方程,我们用它来约束遮蔽函数(2.4).这种约束与微面轮廓的选择有关,导致基于物理的遮蔽函数的推导.

2.1 测量表面辐射

辐射(radiance)是从立体角度传播通过某个区域的能量密度.单位为瓦/每等弧度每平方米().给定表面在方向上的输出辐射等于来自该表面上以为中心的微面的辐射的积分,从输出方向进行测量,并从该方向观察到的投影面积（如图1所示）加权:

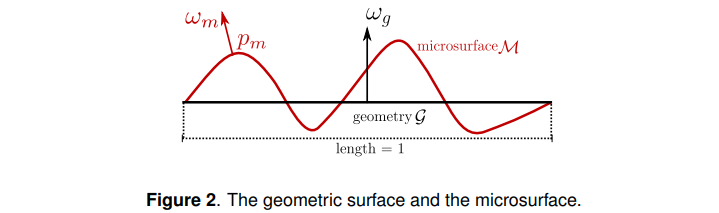


在出射方向上投影的每个曲面点的面积是与视角相关的加权因子,积分是投影面积的归一化系数.注意,该归一化系数给出整个表达式的辐射单位;没有它,结果将丢失分母中的面积单位.

在以下各节中,我们将看到,根据微面理论,微面也通过其投影区域进行加权,并且遮蔽函数(或几何衰减因子)是能量守恒所需的归一化项.

2.2 微面统计

我们考虑一个表面的平面区域,我们称其为“几何表面”,为了方便,其面积为.微面模型假设真实表面以微面集合的形式相对于此偏移，我们称其为“微面”.准确地说:如果是几何的法线,则是 沿投射到的微面点集合.微表面的每个点具有法线向量，即是从微表面上的一点到该点上的表面法线向量的函数.我们将此向量的三个坐标表示为.



微面理论是微面散射特性的统计模型.因此,对于本研究而言,编写统计公式而不是空间公式更为方便.在微面理论中,统计量是在法线空间中定义的,即球面空间.

法线的分布要将微面上的积分与球体上的积分相关联——即,从空间积分转换为统计积分——我们需要一种在切换域时测量面积变化的工具.法线分布提供了这一点.定义为

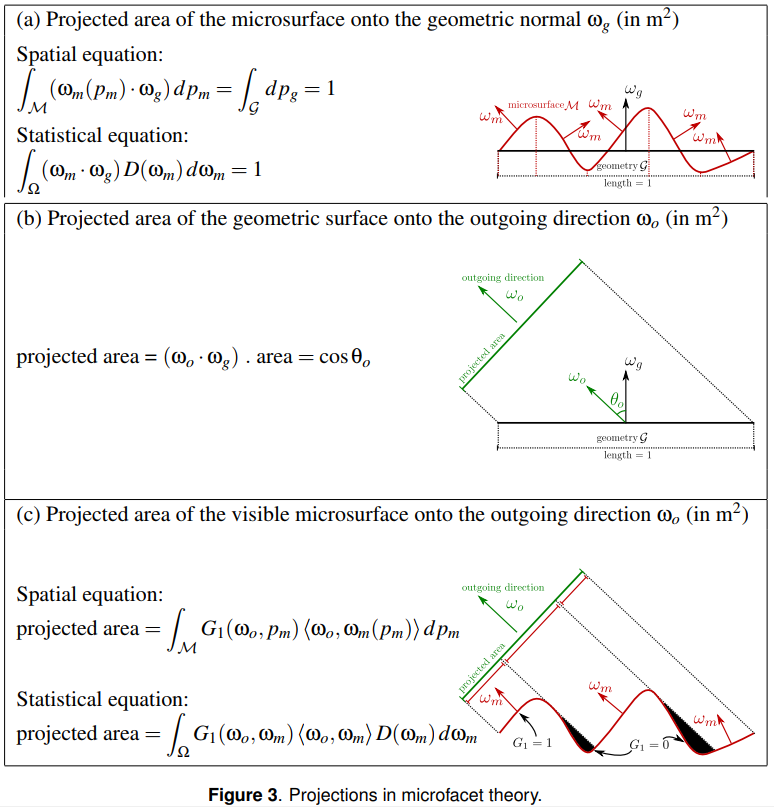
狄拉克分布的单位是,即其自变量的倒数.考虑单位球面的某个区域.现在考虑包含所有点的微表面的子集,其中这些点的法线是的元素,使得

法线分布具有以下性质:在单位球面任何区域上的积分给出法线位于的所有点的集合的面积:

作为结果,法线分布的积分就是微面的面积:

***空间和统计方程*** 由于的定义,如果是微面法线的任何函数,则的空间积分可以用统计积分代替：

其中左侧是空间积分,右侧是统计积分.此属性在图3中使用,其中是点积.



统计函数 如果是定义在微面上的空间函数,我们可以将相关的统计函数定义为

可以按以下方式将统计函数用于统计积分:

此属性在图3(c)中使用,其中是遮蔽函数,我们在2.3节中介绍该函数.

2.3 微面投影

(a)微面在几何法线上的投影面积 微面投影到几何法线上的的面积是几何表面的面积(图3(a)),按惯例其面积为.因此,法线分布到几何上的投影被归一化:

(b)几何表面在出射方向上的投影面积 几何表面积为,其在出射方向上的投影面积(图3(b))是面积乘以出射角的余弦值:

(c)可见微表面在出射方向上的投影面积 现在,我们显示几何表面在出射方向上的投影面积也是可见微表面的投影面积(图3(c)).它是每个可见微面投影面积的总和.法线为的微面的投影面积等于几何投影因子.请注意,这里的点积符号表示不能为负,因为背面微面不可见.同样,被微表面遮挡的微面不会影响投影面积,因此必须从总和中删除.这是通过乘以具有布尔值的空间遮蔽函数来实现的:如果被遮挡,则为0,如果可见,则为1.这给出

统计遮蔽函数的范围为[0,1],沿输出方向,给出具有法向量的微面可见百分比:

统计方程为