我们对计算机图形学中使用的8种晴朗天空模型进行定性和定量评估.我们将模型彼此进行比较,并与物理社区的测量值和参考模型进行比较.在简短地描述了问题的物理原理之后,我们介绍了测量值和参考模型,以及如何“取逆”它以获取模型参数.然后,我们使用与参考模型中相同的参数来概述每个CG模型,并详细说明其范围,算法复杂性及其结果.我们还将模型与感知研究进行比较.我们的定量结果证实,使用更少的简化和近似来求解物理方程,结果越精确.最后,我们讨论了每种模型的优缺点,以及如何进一步提高其准确性.

介绍

天空是室外场景中的关键元素，因此许多室内场景的主要光源也是计算机图形学中的重要主题。 解释天空色彩的物理方程式已广为人知，但求解起来的计算量很大。这激发了计算机图形学社区中高效，准确的晴朗天空渲染算法的设计.

在本文中,我们定性和定量地评估了这些模型中的8个，即Nishita93 [1]，Nishita96 [2]，Preetham [3]，O'Neal [4]，Haber [5]，Bruneton [6]，Elek [7] ]和Hosek [8]模型。 我们的定量评估是基于Kider等人[9]对真实晴朗天空的地面真实测量.我们还将计算机图形学模型与libRadtran [10]进行了比较，libRadtran是一种众所周知的，经过全面测试的模型，已在大气科学的数百种出版物中使用. 为此

1. 我们通过找到可以使libRadtran结果最适合地面实测值的值，来估算模型参数，例如气溶胶的密度及其特性。
2. 我们将这些参数用作模型评估的输入，并将其结果与测量结果以及libRadtran结果进行比较。 我们还将这些结果与知觉研究进行比较。

本文的其余部分安排如下:在第2节中进行了一些相关工作之后,我们在第3节中介绍了参考度量和参考模型.在第4节中,我们继续了比较框架,在第5节中,我们对每种模型的比较结果进行了介绍.到12,第13节介绍了我们的知觉研究.在第14节中,我们将讨论每种模型的优缺点以及提高其准确性的可能方法.

相关工作

关于计算机图形学中晴朗天空模型的评估和比较,已经发表的论文很少.Sloup[11]为调查提供了一些定性比较,但是这项工作不包括一些较新的模型,也不包含定量比较.可以在[12]中找到最新的调查.它提供了一些定性比较(包括渲染结果的比较)以及每个模型获得的帧速率的比较. 与我们的工作最接近的论文是Kider等人[9]的论文,它提供了地面测量和六个晴空模型的定量比较.

我们的工作基于Kider等人的地面实况测量,并通过以下方式扩展了晴朗天空模型的比较:

另外两个计算机图形学模型：O’Neal [4]和Elek [7],

来自物理学界的参考模型:libRadtran [10](版本2.0.1),

比较模型的绝对亮度和相对亮度以及它们的色度,

比较每个模型的时间和内存复杂度,

比较每个模型的范围和局限性（例如，支持的视点和太阳角度，是否支持空中透视等），

对每个模型的渲染结果的感知研究，

我们实现这些模型的完整源代码(<https://github.com/ebruneton/clear-sky-models>)

参考测量和模型

本节在下一节介绍用于定量评估8种计算机图形学模型的参考测量和模型。 我们首先介绍测量值，然后介绍模型，最后介绍模型参数.

测量

为了将模型与Ground truth进行比较,我们使用了Kider等人[9]提供的测量结果.这些测量包括天穹上的81个样本,时间为9h30到13h30之间的17天.每个样品都是一个辐射光谱,覆盖从350到2500 nm的所有波长,步长为1 nm.数据集还包括辐照度测量值和HDR照片.有关获取此数据的更多详细信息,请参见[9].

物理模型

天空的颜色是由于空气分子和气溶胶颗粒对太阳光的散射和吸收而产生的。可以在[11]和与此处评估的8个模型相对应的论文中找到对基本物理方程式的完整介绍和讨论。在本节中，我们仅提供简要概述.

空气分子对光的散射由瑞利理论描述.它与成正比,其中是波长,解释了天空的蓝色.描述散射方向相关性的散射相位函数是平滑的,并且与波长无关.散射也与分子的密度成正比,其随天气条件变化不大,并且随海拔高度呈指数下降.最后,空气分子也吸收一些光(例如臭氧),但大部分在可见光谱之外(在360-830 nm范围内,空气分子仅吸收1.5％的光).

相反,气溶胶以更加复杂和高度可变的方式散射和吸收光.这种散射由米氏理论描述,并且取决于粒径的概率分布函数.所得的相位函数是强各向异性的,通常具有很强的正向峰,并且可能取决于波长和高度.气溶胶还吸收可见范围内不可忽略的光量,而这种吸收取决于波长.最后,从清洁到污染的条件,气溶胶颗粒的密度及其高度依赖性是高度可变的.

地面在天空的颜色中也起着作用[8].它的反照率和BRDF可能相差很大,例如在海洋,森林,沙滩或积雪条件之间.

参考求解器

libRadtran [10]被广泛用于大气科学，并在数百篇论文中被引用.它提供了一种统一的方法来指定大气条件，然后可以使用各种求解器对其进行求解，以获取天空辐射率（以及其他数量）。 默认求解器是DISORT [13]，基于离散坐标算法.

输入参数由图层指定.可以使用任何数量的层,并且对于每一层,可以指定压力,温度,空气分子的密度和空气分子的吸收.对于气溶胶,每一层都可以指定与波长有关的散射和吸收系数,以及与波长有关的相位函数.也可以指定水或冰云.最后,可以自由指定地外太阳辐射光谱以及地面光谱反照率和BRDF.提供了用于植被和海洋的复杂BRDF模型(例如,取决于风速).

一旦选择了求解器(可以使用不同的选项,例如平面平行,伪球形或全球形几何,是否支持偏振等),就可以针对任意数量的视线方向和任意数量的视场获得天空辐射度 波长或波段.

模型参数

为了将计算机图形学模型与地面真实情况进行比较,我们需要上述所有参数的值(例如,散射和消光系数,密度分布,米氏相函数和地面BRDF).理想情况下,我们将对这些参数使用直接测量,但没有此类数据.可以通过从太阳光环区域中的密集辐射测量中进行模型反演来推断列积分值（与每层值相反）[14]。但是我们也没有这些数据。自1993年以来，AERONET项目[15]为全球约1000个地面站提供了一些反演结果。但是，康奈尔大学（Cornell University）进行的与Kider测量相对应的最近数据来自多伦多附近的地面站。因此，由于缺乏对模型参数的直接或间接测量，我们决定通过“倒置” libRadtran模型来计算它们。为此，我们计算了将libRadtran结果与测量值（所有辐射测量值之和）之间的均方根误差（RMSE）最小化的参数值。请注意，由于我们不使用要评估的CG模型来计算其参数（并且这里不评估libRadtran），因此该方法不会对结果产生偏差.

逆方法:

为了降低这些非线性优化问题的复杂性,我们首先消除了尽可能多的参数.为此,我们要:

1. 我们使用了CG模型的参数空间,小于整个参数空间.实际上,计算这些模型忽略的参数毫无意义. 因此,我们假设空气分子不吸收光,气溶胶的相位函数不依赖于波长,地面具有朗伯BRDF,等等.
2. 我们为空气分子参数选择了典型值,如上所述,这些值没有太大变化:从15℃下的[16]到海平面的散射系数,在8 km的标高下呈指数下降.
3. 我们从[17]中将地面反照率固定为草光谱反照率(在5月纽约州进行的测量,每年的这个时候,该州大部分被植被覆盖).
4. 我们将气溶胶颗粒的高度固定为1.2km(通常使用的值),并将其单个散射反照率(散射与消光系数之比)固定为0.8,与波长无关.

由于这些简化,唯一剩下的自由参数是气溶胶的光学深度和相位函数.假设气溶胶光学深度为形式(即,使用Angstr˚om浊度公式[18],其中为)和取决于单个不对称参数的Cornette-Shanks [19]相位函数,则可转换到3个自由的无量纲参数:和.

逆结果

在参数空间(涵盖从清晰到朦胧的各种气溶胶特性)使用11x10x5的均匀分布的样本,我们发现在得到最小RMSE.可以使用NLopt [20]将其精确到.但是,由于在消除某些参数时采用了上述近似方法,并且由于在区域时,RMSE近似了常数(请参阅补充材料),这种改进实际上并没有提供任何其他有效数字,因此,在下文中,我们使用和.

浊度

除上述参数外,对于Preetham和Hosek模型,我们还需要浊度T的值.为此,我们使用浊度使天顶亮度和经验关系 [21]的测量之间的RMSE最小[21],即.这仅给出了浊度的粗略估计,但是对于2到3之间的任何值,我们的定性结果和模型排名均保持不变(请参阅补充材料),尤其是对于使Preetham之间的RMSE最小的值（resp） （Hosek）模型和测量值（T = 2：33，RMSEmin = 86-分别是T = 2：2，RMSEmin = 41:45）.

比较框架

在使用测量值和参考模型评估计算机图形模型之前,在下一部分中,我们在这里介绍如何定性和定量地评估它们.

定性评估

我们的定性评估包括范围和算法复杂性分析.范围由模型支持的视点和太阳方向定义.一些模型仅支持从地面的视图,而其他模型则支持从地面到太空的任何视图.有些模型只能计算天空颜色,而其他模型则支持渲染真实地形所需的空中透视.最后,某些模型仅限于地平线上方的太阳方向,而其他模型则支持任何太阳方向.

算法复杂度由预计算和渲染阶段的时间和内存复杂度给出.所有模型都具有多项式复杂度,为了便于比较,我们以单个抽象参数给出它.复杂度意味着,如果在每个单个数值积分中以及沿着每个数组维使用2倍以上的样本,则复杂度将增加倍.所有模型在波长的数量上也具有线性复杂度,以下将省略-即是的简称.

定量评估

为了以合理的方式将模型相互比较,在适用时,我们对每个模型使用相同的大气参数.这些参数包括地外太阳光谱,地面反照率以及瑞利和米氏散射和吸收系数,相位函数,密度分布等.

同样,为了便于与Kider等人[9]的结果进行比较,我们对每个模型进行光谱分析,使用与[9]中相同的360nm和830nm之间的40个波长（尽管模型最初使用3至15个波长–我们讨论了14.3节中使用的波长数量的影响）.然后,我们以不同的形式绘制从每个模型获得的结果:

1. 图1,天穹的渲染,
2. 图2,绝对明度(luminance),
3. 图3,相对明度,
4. 图4,色度,
5. 图5,测量的相对误差,
6. 图6,4个样本的光谱辐射度,
7. 图7,固定垂直平面上的亮度,
8. 图8,天空辐照度与时间的关系,

下一节按时间顺序介绍了我们要评估的8种计算机图形学模型.每个部分都会简要概述该模型,并在适用时提供一些重要的实现细节,然后给出定性和定量结果.

NISHITA93模型

Nishita93模型[1]是计算机图形学中最早的现实天空渲染算法之一.它基于单散射方程的数值积分(因此忽略了多个散射).对于每个像素,沿数值计算沿相应视线的积分.被积物包括两个透射率项:一个是从观察者到当前样品沿视线的透射率,另一个是从该样品到太阳的透射率.这两项都需要数值积分.为了避免必须在每个像素处计算一个双积分,Nishita等人提出.在评估外部积分的同时递增计算第一项,并在2D数组中预先计算第二项.

我们的实现

Nishita93模型将恒定光学深度的同心层中的大气离散化（与恒定高度的层相比，精度更高），并将这些球形层与同心圆柱体的朝向太阳的交点作为预先计算的2D透射率数组的采样点.[1]中未指定层数和圆柱数.在我们的实现中,我们使用个球体(即63层)和个圆柱体（将和加倍会使RMSE降低不到2％）.

定性评估

尽管此模型使用一些预先计算的数据,但此数据不依赖于观看者的位置也不依赖于太阳的方向.因此,该模型支持从地面到太空的所有视点,空中视点(仅通过整合观察者和地形之间的单个散射)以及地平线以下的太阳方向即可.

预计算阶段针对ns×nc数组的所有元素评估一个具有O（ns）样本的单个积分,因此分别具有O（n2 snc）和O（nsnc）的时间和内存复杂度.由于有了这个预先计算的表格,渲染像素的时间复杂度为O（ns）（而不是O（n2 s））.

定量评估

我们的定量结果,从图1至图8可以看出,该模型几乎总是低估了测量值.例如,计算的辐照度(图8)大约比测量值小三分之一.这似乎是合乎逻辑的,因为在此模型中忽略了多重散射.这也表明,在测量值中,多重散射是天空辐照度的三分之一,这似乎与[22]一致(尤其是对于浊度T = 2，表1中的值).Nishita93模型与测量值之间的RMSE在17个白天，81个方向样本中求和,并且波长在360至720 nm之间，为26：6 mW =（m2：sr：nm）.

相对亮度（图3）与测量值非常相似,但是色度(图4)与libRadtran结果在地平线附近以及日出和日落时(未测量)显示出一些差异.

NISHITA96模型

概览:

Nishita96模型[2]向Nishita93模型添加(近似)多重散射.该模型支持任何散射顺序,但作者仅计算两次散射.计算双重散射涉及沿视线在每个采样点在所有方向上积分的计算,其被积等于单个散射积分.换句话说,它在沿视线的每个样本处都需要一个附加的三重积分.为了优化此计算,Nishita等人建议:

在包含垂直和太阳矢量的平面中,将所有方向上的积分减小为8个特定方向上的总和,称为采样方向.

对于这8个方向中的每个方向,预先计算在一个轴与该方向平行的nx×ny×nz 3D网格的顶点处的单散射.单散射是沿着该轴从一个顶点到下一个顶点递增计算的.

然后,在渲染时,在沿着视线的每个采样点上,对这8个预先计算的表进行8次三线性内插查找就足以计算出两次散射的影响.