我们介绍了一种基函数,旨在准确有效地表示单位球面上的照明信号.这些基函数是由局部支持函数构建的,在给定的方向上需要三到六个基函数.这样可以最大程度地减少重建所需的内存事务数量和带宽需求.

我们的基有三种变化.所有这些都是基于在二十面体的12个顶点处存储系数.第一个直接存储这些值,以及它们的方向导数和混合Bézier块用于插值.这样一来,人们可以获得与3至5阶球面谐波相当的质量,同时仍然需要27个系数来进行重构.第二个变体在YCoCg空间中对信号进行编码,并对色度分量使用质量降低的线性重构-仅需要15个系数,同时略微降低了质量.第三种选择利用了由cos2和cos4形成的统一分区,该分区仅限于沿二十面体顶点方向定向的半球.它使用18个系数进行重建,但是为了简化计算而牺牲了额外的带宽需求.

该版本的质量仍可与三阶球谐(SH)媲美.我们将“环境骰子”的基础命名为“Ambient Dice”的参考:“Ambient Cube”基(是我们对它的某些属性的扩展),以及通常在纸和纸角色扮演游戏中使用的20面骰子。二十面体。

介绍

现代游戏通常需要某种方式来表示间接照明.对于漫射照明,最常见的解决方案是将辐照度存储在规则[GSHG98，McT04]或不规则[Cup12]的体数据结构中.数据必须以某种定向形式表示,以使照明对正常变化做出响应.两种最受欢迎的解决方案是环境光立方[Ambient Cube](AC)[McT04],它存储投影到沿基本轴定向的六个半球状波瓣上的辐照度,或低阶球谐(SH),其中辐照度存储为一组在单位球[RH01]上定义的相互正交的基函数的系数.

两种解决方案都有局限性.AC基由覆盖整个半球的宽瓣形成,几乎没有重叠,这使得它很难再现辐照信号.但是,它在运行时既简单又高效-在任何方向上,六个基本函数中只有三个是非零的,需要从内存中获取.

球谐函数提供更高的精度.SH基函数覆盖整个球体,可以在任何方向上评估所有系数.对于三阶SH,三个颜色通道中的每一个有9个系数,总共27个,这是昂贵的,游戏一般使用质量较低的二阶SH(每个通道4个系数).此外,SH可能会表现出典型的截短频谱型解决方案的伪像-输入信号的不连续会引起振铃,因此需要对系数[Slo08]进行额外处理以消除它.

最近,一些开发人员开始使用一组9-12个球形高斯波瓣（SGs）[TS06]作为辐射信号的表示,后来与余弦波瓣卷积以形成辐照度[NP15],而这些基函数显示的振铃伪像较少,SG在单位范围内也具有全球支持,因此评估期间需要所有系数.

我们的目的是设计这些基函数的替代方案.在现代GPU上,将过多的数据从内存带到计算单元会带来性能问题.我们希望将构成基函数的局部支持(这样评估只需要少数几个系数,从而限制带宽和寄存器需求)与更复杂基础的典型重建质量相结合.我们假设表示所消耗的总体内存较少,而是在带宽和计算之间寻求了更好的平衡.

我们将提议的基Ambinet Dice(AD)称为“环境骰子”（Ambient Cube），同时引用了纸质角色扮演游戏中常用的20面骰子.在本文中描述的变化中,我们认为其中两个是很有希望的:具有12个半球瓣的球面径向基函数(SRBF),另一个使用YCoCg颜色空间和Bézier色块,分别需要18和15个系数来重建给定法线的辐照度.

2 Ambient Dice

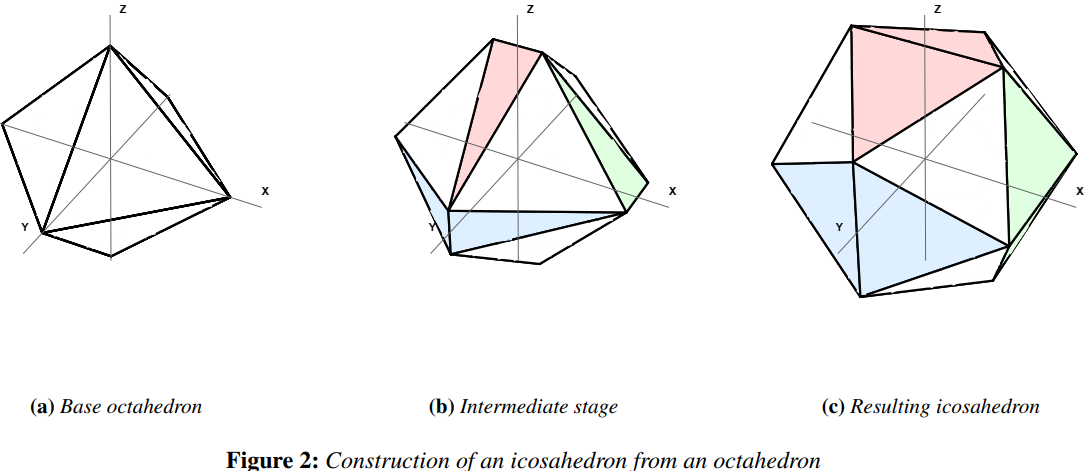
2.1 描述

AD基将值存储在规则二十面体的顶点上,并刻在单位球体内.二十面体由12个顶点和20个等边三角形组成.所有的顶点都位于单位球面上,三角形在球体上的投影形成20个相同的球形三角形.在任何方向上评估函数都需要来自包含该方向的球面三角形角处三个顶点的数据.球体的细分通常用于气象建模,其中单位球体代表地球.从二十面体到球体表面的投影具有低畸变,并且可以在不牺牲质量的情况下直接在构成二十面体的扁平三角形上而不是在球形三角形上执行许多操作.

2.2 索引二十面体

要将二十面体用作基本构建块,需要一种有效的索引方法.一种选择是确定给定方向指向的三角形可以在二十面体三角形上进行迭代,或者使用某种形式的空间层次结构来提高搜索效率.这会导致代码复杂,分支繁多,而在现代GPU上无法高效执行.为了简化索引编制,我们依赖于在[Ban96]中描述的常规八面体构造二十面体的方法.

八面体放置在坐标系的原点,顶点放置在主轴上(见图2a).接下来将这些顶点拆分,以创建另外的12个三角形,同时缩小和旋转初始的八面体面(图2b).随着顶点进一步分开,我们到达一个点,其中所有三角形都是等边的,而3d形状是二十面体(图2c).我们将由初始八面体面形成的三角形称为*基础三角形*,并将在顶点拆分过程中创建的三角形称为*边三角形*.



所有二十面体顶点均具有以下三种形式之一:

* 组A:
* 组B:
* 组C:

其中是黄金分割率的倒数.以这种方式形成的顶点不在单位球体的表面上,而是具有相同的长度.

给定三个不同的顶点组,每个组有4个顶点,我们可以使用其坐标的符号位及其所属的组对它们进行索引.来自A组的顶点的索引为0-3,来自B和C组的顶点的索引分别为4-7和8-11.两个非零坐标的两个符号位形成相对于组起始位置的索引,第一个符号为低位.例如,坐标为的顶点的索引为9(组C,符号位1和0).对于基三角形,每个顶点来自不同的组,对于边三角形,两个顶点来自同一组(其中一个轴上的符号翻转).

要获得与给定方向相交的球面三角形的顶点,我们以指定索引的方式提取方向坐标的符号位,并将其应用于二十面体顶点组的三种模式.这样,我们获得了构成基本三角形的3个顶点的坐标(以及它们在二十面体中的索引),该基本三角形完全包含在该方向所指向的坐标系的八分之内.给定八分圆,方向可以指向基本三角形,也可以指向三个边三角形之一.每个边三角形与基本三角形共享两个顶点,并且可以根据以下规则更改基本三角形的第三顶点的组来获得其余顶点.并用值翻转坐标的符号.要检查应使用哪个三角形,只需检查一下成对的基本三角形顶点对所跨越的平面的哪一侧.可以在（+;+;+）八分圆中执行此检查,以受益于计算具有固定向量的点积.为此,需要计算方向坐标的绝对值,但是在最近的GPU上,这是一项免费操作.

索引三角形也很简单.我们用放置的八分圆符的三个符号位对基本三角形进行索引(例如,来自（+x;-y;-z）八分圆的基本三角形的索引为6）.其余12个边三角形根据它们相交的坐标系平面进行分类.与平面YZ相交的边三角形在图中标记为红色,与XZ平面相交的三角形为绿色,而与XY平面相交的三角形为蓝色-我们将通过标记三角形的颜色来指代这些三角形组.红色组中的三角形使用索引8-11,绿色和蓝色组中的三角形分别使用索引12-15和16-19.每个平面有4个相交的三角形,每个三角形都属于该平面的一个不同象限,该平面中坐标的符号位用于在组内进行索引.红色组中的三角形使用象限的（y;z）坐标的符号进行索引,绿色和蓝色组中的三角形分别使用（x;z）和（x;y）.翻转边缘（B;C）（在顶点C0而不是A之间选择）从红色组中选择三角形,翻转边缘（A;C）从绿色组中选择三角形,而从边缘（A;B）选择蓝色组中的三角形.

***原文有关于选择相应三角形的源码***

2.3 在球面上评估函数

给定索引方案,我们指定如何使用存储在顶点处的值来计算球面上的函数值.

实际上,这是一个分散的数据插值问题,已针对不同领域(尤其是地球物理学[FS])中的应用进行了广泛研究.

虽然最有效的解决方案是使用球面三角形上的线性插值来计算单位球面上任意点的值,但这种解决方案的质量不足以满足我们的目的.例如,当用于对漫射辐射信号进行编码时,导数在三角剖分边缘上的快速变化会在平滑表面上创建可见的马赫带(见图4).

我们提出以下替代方案作为解决方案,它们具有不同的性能特征:

* 混合立方Bézier贴片适用于各个颜色通道.在此版本中,我们在两个垂直方向上存储颜色(RGB三元组)及其导数,并与球面相切(两个RGB三元组),与二十面体的每个顶点相切(重建RGB信号所需的27个值).
* 用于亮度分量的混合立方Bézier面片与用于色度分量的线性插值相结合.在此版本中,我们为二十面体的每个顶点存储颜色(YCoCg三元组)和发光度分量的导数(两个标量值)(重构RGB信号需要15个值).
* SRBF(和瓣与半球形支撑的混合物)沿二十面体顶点定义的方向定向.在此版本中,我们为二十面体的每个顶点存储一种颜色(RGB三元组)(重构RGB信号需要18个值).

2.3.1 用于各个颜色通道的混合立方Bézier贴片

我们选择使用球面混合三次Bézier面片[ANS96b]在顶点之间执行插值.混合球形三次方贴片是三个具有不同中心系数(系数-有关三次方Bézier贴片的控制点配置的图5)的球形三次Bézier贴片的凸组合.

三个基本面片中的每个面片均选择中心系数,以确保整个三角形边缘之一上的C1连续性.贴片的混合方式是,在每个边缘附近,仅混合提供该边缘连续性的组件.还有其他计算中心系数的方法[LS96],我们使用针对平面情况描述的方法[GS91,LS96].它迫使重构信号的互导沿边缘以线性方式变化.用这种方法获得的结果不像交叉导数二次变化那样平滑，但是这种方法不需要存储任何其他数据(平滑度的差异在我们的测试中并不明显).

由于所有三个基本补丁仅相差一个系数,因此评估代码首先确定该系数的值,然后继续对Bézier补丁进行单个评估,而不是进行三个评估并将结果组合在一起.

我们使用球形重心坐标[ANS96a]评估Bézier面片.由二十面体定义的所有球形三角形都是相同的,因此给定方向的球形重心坐标的计算简化为计算三个点积.

给定一个查找点的重心坐标,我们根据存储在二十面体顶点上的值构造Bézier面片的系数.

Bézier贴片的系数构造如下:

* ,和系数只是顶点处的函数值.
* 可以使用信号值及其在顶点的方向导数来计算和.计算Bézier补丁的导数 重心坐标并使用链规则来计算沿三角形边缘的方向导数,边缘系数的形式为:

其中是顶点沿边的函数的方向导数.(通过将存储在顶点上的导数投影到边缘上进行计算),并且是沿着边缘与球体相切的单位矢量,以用于插值的三角形的球重心坐标表示.由于二十面体的所有三角形都是相同的,因此和是恒定的,分别等于和.

* 为了确保C1在整个三角形边缘上的连续性,信号在边缘中间的交叉导数必须等于边缘两端信号的交叉导数的平均值.此条件使交叉导数沿边线性变化,而不是平方线性变化.由于给出了顶点的交叉导数,因此可以保证共享边两侧的三角形在整个边上的交叉导数的值相同,从而使C1连续.

通过计算交叉导数,可以看出,要确保沿与顶点0相反的边上的上述约束,则中心系数必须等于:

其中:

且

最终系数是以上各项的凸组合:

其中:

其中和是评估点的球重心坐标(就是给定方向所在的三角的重心坐标).当重心坐标中的任何两个等于零(在顶点处)时,上式具有奇点.在这种情况下,应该使用值1代替与该顶点关联的组件的权重,对于其余两个权重使用零.

要构造系数,我们需要:

* 顶点处的函数值.
* 函数在两个正交方向上与单位球面相切的顶点处的方向导数.计算Bézier斑块系数所需的沿边缘的导数,只需将梯度投影到沿边缘的轴上(与单位球体的表面相切)即可.

球形重心坐标中的三次Berenstein多项式不具有恒定再现,这意味着不能准确表示恒定功能.由于在处理预计算的照明时不会经常遇到恒定信号,因此在我们的测试中这不是问题(这也意味着共享三角形边缘上的交叉导数的变化实际上并不是纯粹的线性,而是接近线性的-但由于边缘的两侧相同,因此不会造成任何问题).如果需要恒定的再现,则可以在二十面体的平面三角形上执行常规的重心插补.这带来了将梯度信息从与单位球体相切的空间变换到三角形表面的问题.我们的实验表明,做到这一点最直观的方式就是简单地使用切线空间梯度,就好像它们是在用于插值的三角形平面中定义的一样.由于每个顶点的角度不足,我们不能再确保相邻三角形上的交叉导数在整个边上相同,但是在许多情况下,所产生的质量损失是可以接受的.另一种选择是使用球状重心权重来计算边缘系数,并将其用于线性插值-但这会丢失恒定的再现特性,而且即使交叉导数匹配,也会缺乏质量.

对于评估任何方向的完整RGB颜色,需要27个系数-与三阶球谐函数相同.有关两者之间的质量比较,请参见结果部分.

2.3.2 混合三次贝塞尔曲线补丁用于亮度和色度线性插值

对于某些应用,上述解决方案的成本可能太高.为了减少带宽和ALU成本,我们提出以下替代方案:首先将输入RGB信号转换为YCoCg空间.由于人类视觉系统对亮度的变化比对颜色的变化更敏感,因此我们将Y分量(亮度)及其方向导数存储在一起,并使用上述方案进行重构,而Co和Cg分量(色度)为不带导数存储并线性插值.这会产生轻微的变色伪影,但是由于插值的局部特征,它们的角度范围非常有限,几乎看不到.这样一来,每个二十面体顶点仅需要存储5个系数.值得注意的是,在处理球谐函数时,类似的技巧不起作用-存储Y和Co/Cg,因为不同次的SH往往会产生覆盖球形域大部分的相当明显的伪像.

2.3.3 SRBF沿二十面体顶点形成的方向定向

对于某些应用,就ALU而言,即使是简化方案也可能过于昂贵.我们提出了基函数的另一种变型,即以一些额外的带宽换取廉价的重建.可以注意到,一组夹在半球上的cos2瓣（比例为0：5）沿二十面体顶点形成的方向定向,在单位球体上形成单位的分区.这是令人惊讶的特性,因为在许多域中,RBF无法形成统一的分区.