

基于环境光场和漫反射光场的动态场景绘制

李维 黄小虎 郑南宁

(西安交通大学人工智能与机器人研究所, 西安 710049)

摘要 利用光强的可叠加性, 本文提出了将光场分解为不随场景变化的子光场的思想, 使得物体、光源、观察点都可自由变动的动态场景绘制也能利用基于图象的绘制技术之优势。

依靠漫反射与观察方向的无关性, 本文还提出了漫反射光场的四维表示法, 并且利用物体对不同点光源的漫反射之间以及环境光与漫反射光之间的内在联系, 只用一个单位强度的单色点光源为物体构造漫反射光场, 从而节省了存储空间和预处理时间。利用其数据结构的一致性, 环境光场、漫反射光场和深度场中对应点的数据被合并成5维矢量以便更有效地压缩。本文给出的绘制算法, 能准确地计算出物体的颜色和场景中阴影的变化等动态场景的典型特征, 从而为在低档计算机实现动态场景的实时绘制提供了理论和技术依据。

关键词 计算机图形学, 图形生成, 基于图象的绘制, 光场, 环境光场, 漫反射光场

1 引言

传统的基于几何的三维图形绘制算法需要处理分割场景的边界描述(多边形绘制)或者空间函数的采样(体数据绘制)以及各种光源模型。当几何模型非常复杂时, 绘制一幅图象的时间将极其漫长。而为了使场景满足真实感要求, 这种复杂性却又不可避免。

近年来, 基于图象的绘制算法越来越引起研究者的兴趣。这类算法使用预先绘制的合成图象或者采集的自然图象作为输入, 通过简单的处理(如内存操作和线性插值), 输出一幅新的场景。算法花费的时间通常与场景的复杂程度无关, 可以在微机或者低档工作站上达到交互的或近似交互的绘制速率。早期的基于图象的绘制算法以环境图(Environment Map)为典型代表。一幅环境图记录从各个方向入射到空间某点的光线的颜色值。Apple的QuickTime VR^[1]就是以这种思想为基础的商业系统。在QuickTime VR中, 用户可以在某些固定位置以任意方向观察周围的环境。基于环境图的绘制算法的最大缺点在于观察点是固定的, 这使得观察者在6自由度空间中同场景交互时只有3个旋转自由度,

即只能改变观察角度。为克服这种缺点, 有人提出了基于图象变形(Image Warping)和视图插值(View Interpolation)的图象合成方法^[2,3]。这类算法需要每个象素点的深度信息或者需要找出不同图象中的对应点。

最近, Marc Levoy和Pat Hanrahan提出了光场绘制算法^[4]。与此同时, Steven Gortler等人也提出了基于被他们称为光照图(Lumigraph)的类似方法^[5]。光场是描述光强度(Radiance)相对空间坐标和入射角度变化的4维函数, 它包含了在空间中任意一点以任意角度观察场景所得的信息, 因此图象的绘制就变成了对每个象素在光场中进行采样。

上述光场绘制算法只能处理静态场景, 即场景中的物体和光源位置都是固定的。而在动态场景中, 物体表面的反射光和物体对光线的遮挡是变化的。本文提出了一种可以绘制动态场景的光场绘制算法。用户或应用程序可以任意地改变场景中物体的空间位置、观察点的位置和方向以及光源的位置和颜色属性。其基本思想是将整个场景的光场分解为若干不随场景变化子光场, 包括与方向无关的环境光场和与方向有关的反射光场。这样, 绘制动态场景时只需相应地将各个子光场采样和叠加。

本文的主要目的是研究一种适用于低档通用计

算机的,能够供用户实时交互的动态虚拟环境生成技术,为此我们将算法限制于从合成图象构造光场的情形。在这个前提下,绘制系统能够获得物体和光源的准确位置和旋转角度以及所需的深度信息。

下面先简单回顾场景的光场表示^[4,5],然后描述本文提出的环境光场、漫反射光场和深度场等概念和构成方法,以及以此为依据的图象合成算法。最后给出实验结果和讨论。

2 场景的光场表示

光场是随表征空间坐标和方向的 5 个变量变化的光强度的连续函数。McMillan 等人用一系列投影到圆柱面上的全景图表示与光场定义等价的 5 维全光空间(Plenoptic Space)^[3]。事实上,当光线沿直线传播而不被遮挡时,其强度等于常数。因此,可以用 4 维的光场代替冗余的 5 维全光空间。Marc Levoy 等人以及 Steven Gortler 等人利用空间任意光线与 2 个平行平面的交点有效地刻划了光场。

如图 1 所示,三维空间中任意射线可以通过该射线(或其延长线)分别与 uv 平面和 st 平面的交点唯一确定,光场中的点与射线一一对应,其值为场景沿射线反方向发射出的颜色值。理论上,光场是无限且连续的空间。但为了实际应用,必须用有限的、离散的采样值表示它。

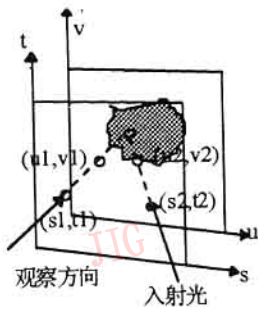


图 1 反射光场的参数化表示

3 动态场景的绘制

如果我们将上一节提到的适用于静态场景的光场分解为一系列子光场,且当场景变化时,这些子光场仅仅是整体发生平移和旋转,而数据并不改变,就可以利用光强度的可叠加性绘制出变化后的场景。这里所说的变化包括:(1) 刚性物体的平移、旋转;(2) 点光源位置的改变、色彩(强度)的变化、光源个

数的增加和减少;(3) 观察点和观察方向的变化。所以本文的算法不考虑柔性物体。

3.1 环境光场(Ambient Light Field)和漫反射光场(Diffuse Light Field)

设 P 为某一表面点, l 为发光强度为 I_l 的点光源。事实上, I_l 由 R, G, B 3 个颜色分量组成。根据基本照明模型,观察 P 点所看到的光强可表示为:

$$I_p = I_{ad} + \sum_l I_{ld} + I_{ls}$$

式中 I_{ad} 是环境光引起的漫反射分量, I_{ld} 是 l 引起的漫反射分量, I_{ls} 是 l 产生的镜面反射分量。

我们将整个场景的光场分解为每个物体的环境光场和反射光场。环境光场仅受环境光强度的影响,而由点光源产生的反射光场则不同。当物体或者光源位置变化时,不仅物体表面的反射光可能变化,物体遮挡光线从而在其它物体上或者其自身的其它部分形成的阴影的形状和位置通常也要改变。无论是漫反射还是镜面反射都与入射光的方向有关。如图 1 所示,由于入射光方向可变,反射光场中一点须由 $(u1, v1, s1, t1, u2, v2, s2, t2)$ 8 元组确定。

事实上,漫反射与观察方向无关,即与 $u1, v1, s1, t1$ 无关。我们用 $(u2, v2, s2, t2)$ 表示漫反射光场中的一点,该点的值为:当光线沿 $(u2, v2, s2, t2)$ 方向入射时,入射光线与物体表面交点处漫反射光的强度。不幸的是,重构图象时,仅仅通过观察方向和点光源的位置无法确定入射光的方向。为此,我们为每个物体建立一个深度场。深度场采用与光场相同的 4 维坐标系,只是场中的数据定义为射线 $ray(s, t, u, v)$ 与物体表面交点到 uv 平面的距离。

设物体表面一点 P 对于强度分别 I_{l1} 和 I_{l2} 的 2 个点光源 $l1, l2$ 均可见,则 $l1$ 和 $l2$ 在 P 点引起的漫反射分量分别为: $I_{l1,d} = I_{l1} k_d \cos\theta$ 和 $I_{l2,d} k_d \cos\theta$, 式中 θ 为入射角。显然, $I_{l1,d} / I_{l2,d} = I_{l1} / I_{l2}$ 因此,可以假设一个强度为 1 的点光源并建立光场,绘制时根据需要将光场中的数据乘以相应光源的光强。绝大多数的材质对于红、绿、蓝三色的漫反射系数之比等于或近似等于其本身颜色中三色之比。如果环境光为白光,通过环境光场就可以确定物体本身的颜色。

设环境光场中入射到物体表面点 P 的光线的颜色值为: $(R_A(P), G_A(P), B_A(P))$, 再设光强为 $(1, 1, 1)$ 的白色点光源,引起的 P 点的漫反射分量为: $(R_d(P), G_d(P), B_d(P))$ 。令:

$$L_d(P) = \begin{cases} \frac{R_A(P) + G_A(P) + B_A(P)}{R_d(P) + G_d(P) + B_d(P)}, & \text{if } R_d(P) + G_d(P) + B_d(P) \neq 0 \\ 0 & \text{,else} \end{cases} \quad (1)$$

则当场景中有光强为 (R_l, G_l, B_l) 的点光源 l 且 P 对 l 可见时, l 引起的 P 点的漫反射分量为:

$$(R_{dl}(P), G_{dl}(P), B_{dl}(P)) = (R_l L_d(P), G_l L_d(P), B_l L_d(P)) \quad (2)$$

因此,对于一个物体,可以只针对一个单位光强的白色点光源建立漫反射光场,并且在漫反射光场中,对于每条光线只储存一个比值。

镜面反射光场不仅与光线的入射角有关,还依赖于反射光与观察方向的夹角。实际上,许多物体的镜面放射分量都很小甚至等于零。所以,本文算法不考虑镜面放射。

综上所述,我们需要为每个物体建立:(1)一个环境光场,场中每点记录 R, G, B 3个颜色分量;(2)一个漫反射光场,场中每点记录对强度为 $(1, 1, 1)$ 的白色电光源的3个漫反射分量之和与环境光场中对应点的3个颜色分量和之比;(3)一个深度场,场中每点记录一个深度信息。

3.2 光场的构造

利用光线追踪算法可以直接获取光场中的采样点。不过这样做需要修改现有的算法流程。Marc Levoy等指出,可以将场景的图象看成四维光场空间中的两维切片^[5],因此可以通过重新排列图象中的像素而获得所需的光场。

环境光场可用类似方法构造。对漫反射光场,为保证漫反射光在图象中见,绘制图象片时,应使观察点与点光源重合。深度场也可以用类似方法生成。只需要在绘制环境光场的图象片时,记录深度信息。绘制时,应将物体的中心置于坐标原点,并且使坐标轴与各 uv 平面平行,同时排除其它物体的遮挡和其它光源的影响。

3.3 图象重构

场景的绘制类似于光线投射算法。从观察点发出射线,逐个通过图象平面各象素的中心,计算射线与包围物体的 uv 平面和 st 平面相交的座标 (u_1, v_1, s_1, t_1) ,根据该座标从环境光场中找出对应点的颜色值 $L(u_1, v_1, s_1, t_1)$ 。从深度场中取出座标 (u_1, v_1, s_1, t_1) 处的深度信息,从而求出投射光线与物体表面的实际交点 P ,然后计算 P 点与点光源 l 连线同 uv 平面和 st 平面的交点 (u_2, v_2, s_2, t_2) ,并根据此交点从

漫反射光场得到该点的针对 l 的漫反射分量 $L_{dl}(u_2, v_2, s_2, t_2)$ 。最后,根据阴影判断结果将各漫反射分量有选择地与环境光分量相加。计算前应根据物体与观察点和点光源距离建立物体的排序表以减少求交的次数。

本文讨论的阴影是指物体部分地遮挡点光源发出的光线,使得其它物体或同一物体的其它部分的部分或全部区域无法为该点光源照射,从而形成一块较暗的区域。所以,阴影判别需3个步骤:(1)判断物体表面点与点光源的连线是否与其它物体相交。(2)判断该点是否被同一物体的其它部分遮挡,这可以从深度信息得出。如图2所示,当 $d_2 < d_1$ 时, A 点不能被点光源照到。当且仅当 $d_2 = d_1$ 时, A 点能被点光源照到,且 A 与 B 重合。(3)判断该点是否在光源的照射范围内。

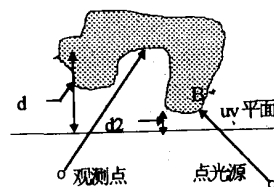


图2 利用深度场计算阴影

3.4 数据压缩

光场绘制技术的最大缺点在于存储光场需要占用大量的空间。幸运的是光场中的数据之间具有极大的相关性。Levoy等人使用矢量量化和熵编码混合的技术获得了大于 $100:1$ 的压缩比。

由于物体对环境光和点光源的反射分量都只是总反射光的组成部分,且这2个分量大于等于零,所以环境光场和漫反射光场中数据的平均值肯定小于同一场景的静态光场。此外物体的视图分辨率远远小于整个场景的分辨率。因此,光场在 uv 平面的采样密度应该只有类似的静态场景的几分之一。

利用环境光场、漫反射光场和深度场在结构上的相似性,我们将每个物体的这3个场合并为一个新场。该场中大每个元素是一个5维矢量,包含环境光场中的 R, G, B 3个颜色分量、漫反射光场中一个比值分量和深度场中的一个深度分量。压缩时,根据光场和深度场在 uv 平面和 st 平面的采样分辨率,将场中的若干点合并成更大的矢量。例如,当在 uv

平面和 st 平面分别取相邻的四点时,就组成了 $4 * 4 * 5 = 80$ 维矢量。

4 实验结果

我们在具有 32M 内存的 Pentium 133 上实现了上述算法。图 3 是利用该方法绘制的动态场景的几幅图象,图象分辨率均为 320×240 。可以看出算法正确地反映出了反射光和阴影的变化。在图示的场景中,所有的物体均不产生镜面反射,但几幅图象仍然有较强的真实感。

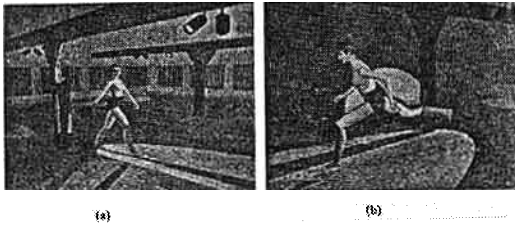


图 3 利用环境光场和漫反射光场绘制的动态场景

环境光场和漫反射光场的两维图象切片。可以看到,环境光场主要反映了物体的纹理(颜色)特征,而漫反射光场则包含了物体的形状信息。表 1 中包含了动态场景的数据压缩信息。绘制时需调入内存的总数据量为 17.99Mb。



图 4 场景中部分物体的环境光场和漫反射光场两维切片

采用光场技术绘制本文讨论的动态场景,在 Pentium 133 平均每帧图象约花费 0.2 秒;而采用传统的基于几何模型的方法,在同样的机器上每帧的生成的时间超过 3 分钟。

图 4 示出了作为独立物体的人体的各个部分的

表 1 场景中部分物体的光场数据量

物体	头部	上身上部	上身下部	上臂	前臂和手	大腿
包围面数	5	5	4	5	5	5
uv 平面分辨率	$64 * 64$	$64 * 64$	$64 * 64$	$64 * 32$	$64 * 32$	$64 * 32$
st 平面分辨率	$32 * 32$	$32 * 32$	$32 * 32$	$16 * 8$	$32 * 16$	$32 * 16$
矢量维数	80	80	80	20	20	20
码字个数	16384	16384	16384	8192	16384	16384
压缩后数据量	3.66	3.60	3.15	0.65	2.17	2.17
压缩比	34.4	29.1	26.6	8.6	9.7	9.7

5 结 论

本文提出了环境光场、漫反射光场的概念,并且据此提出了动态场景的绘制算法,从而使光场绘制不再局限于静态场景。对于实验中采用的场景数据,算法可在个人计算机上达到交互的速率。这使得在微机实现具有动态场景的虚拟环境成为可能。

尽管本文算法的时间复杂度与场景中物体以及光源的个数有关,但是物体的交互形状和表面纹理仍然可以任意复杂而不影响绘制速度。同静态光场绘制相比,本文算法在重构图象时,求交的次数和内存的访问都增加了,同时还要额外进行几次加法和

乘法。这些操作降低了速度,不过以此为代价使得光场绘制技术应用用于动态场景还是值得的。如果我们在光场中包括透明度信息,就可以稍加改动算法使之能处理透明物体。今后,我们将对此进行研究。通过本文的工作,可以看到光场绘制技术不仅适用于静态场景,也可以用于动态场景的实时生成。这对于在低档计算机上实现包含运动物体的虚拟环境具有实用价值,同时也对基于图象的绘制技术的发展有一定的意义。

参 考 文 献

1 Chen S E. Quicktime VR-an image-based approach to virtual environment navigation. In Computer Graphics. Annual Conference Series, 1995:29~38.

- 2 Chen S E, Williams L. View interpolation for image synthesis. In Computer Graphics. Annual Conference Series, 1993;279~288.
- 3 McMillian L, Bishop G. Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System. Annual Conference Series, 1996;39~46.
- 4 Levoy M, Hanrahan P. Light Field Rendering. In Computer Graphics. Annual Conference Series, 1996;31~42.
- 5 Gortler S, Grzeszczuk R, Szeliski R, Cohen M. The Lumigraph. In Computer Graphics. Annual Conference Series, 1996;43~54.



黄小虎 1997年获西安交通大学博士学位。主要研究方向:并行处理、虚拟现实、基于面和体并行三维图形绘制算法。



李维 1995年毕业于西安交通大学,获工学硕士学位。现为西安交通大学人工智能与机器人研究所讲师,主要研究兴趣包括计算机图形学,科学可视化、分布式并行计算,虚拟现实等,已在国内外刊物发表论文10余篇。



郑南宁 教授,博士生导师,1985年获日本庆应大学工学博士学位,1996年被评为中国青年科学家,曾在国内外发表多篇论文,著有《数字信号处理》、《计算机视觉与模式识别》等,现主要从事计算机视觉与模式识别、神经网络、智能系统并行处理的研究。

Rendering Dynamic Scene based on Ambient Light Field and Diffuse Light Field

Li Wei, Huang Xiaohu, Zheng Nanning

(Xi'an Jiaotong University Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xian 710049)

Abstract According to the fact that radiance may be superposed, the paper raise the idea of decomposing the light field into sub-light-field that do not change as scene changes, which extend the preponderance of light field rendering to dynamic scenes where coordinates and direction of object, light and view point in addition with the variation of light intensity can be modified freely. By exploiting the independence of diffuse light on viewing direction, the paper also proposes a four-dimensional representation of diffuse light field. Considering the intrinsic relationship between diffuse reflections to different spot lights and between ambient light and diffuse light, all the diffuse light fields caused by different spot lights for an object can be recorded with a single diffuse light field generated by a pure-color light with unit intensity, which decreases storage and preprocessing. Owing to their coherency of data structure, corresponding points of ambient light field, diffuse light field and depth field (used to compute shadow) are combined to 5-dimensional vectors that are more efficient to be compressed with vector quantization. The rendering algorithm given in this paper can accurately compute typical characteristics of dynamic scene as changes in surface color and shadow.

Keywords Computer graphics, Image-based rendering, Light field, Ambient light field, Diffuse light field