

## 散景效果的真实感绘制

吴佳泽<sup>1,2)</sup>, 郑昌文<sup>1)</sup>, 胡晓惠<sup>1)</sup>, 欧阳冠军<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家级重点实验室 北京 100190)

<sup>2)</sup> (中国科学院研究生院 北京 100049)

(wujiaze05@mails.gucas.ac.cn)

**摘要:** 针对现有方法绘制的散景效果真实感较差的问题,提出一种基于几何光学理论的散景效果真实感绘制方法。该方法以光线传播的折射定律为基础,利用序列光线追踪方法对相机镜头的光学成像特性进行精确建模;对相机镜头的内部结构进行精确模拟,包括孔径光阑和渐晕光阑,以绘制出由孔径形状和渐晕共同作用的散景效果;利用几何光学理论和序列光线追踪方法精确计算出出射光瞳的位置和大小,以辅助光线采样,提高光线追踪效率。绘制结果表明,利用该方法能够绘制出较为逼真的散景效果,正确模拟了孔径形状和渐晕对散景效果的影响,并具有较高的光线追踪效率。

**关键词:** 散景;相机镜头模型;序列光线追踪;孔径形状;渐晕

**中图法分类号:** TP391

## Realistic Rendering of Bokeh Effects

Wu Jiaze<sup>1,2)</sup>, Zheng Changwen<sup>1)</sup>, Hu Xiaohui<sup>1)</sup>, and Ouyang Guanjun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup> (Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

**Abstract:** This paper proposes a new high quality rendering approach of bokeh effect based on geometrical optics theory. A sequential ray tracing technique based on refraction law for transporting light, is employed to accurately model optical imaging characteristics of a camera lens; the internal structure of a camera lens is precisely simulated, including the aperture stop and the vignetting stop, in order to simulate bokeh effect influenced by both the aperture shape and the vignetting; The geometrical optics theory and sequential ray tracing method are used to accurately estimate the position and size of exit pupil in a camera lens, improving the performance of ray tracing. The results show that our method can quickly render realistic bokeh effects with faithful influences from the aperture shape and the vignetting.

**Key words:** bokeh; camera lens model; sequential ray tracing; aperture shape; vignetting

近年来,计算机图形学领域出现不少关于光学成像效果绘制的研究成果,如眩光<sup>[1-2]</sup>、景深<sup>[3-7]</sup>、散景<sup>[3-12]</sup>等。眩光效果是一类与衍射相关的波动光学现象,针对这类效果的绘制算法主要以波动光学<sup>[13]</sup>

收稿日期:2009-05-17;修回日期:2009-08-24. 基金项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2009AA01Z303). 吴佳泽(1982—),男,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实等;郑昌文(1969—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要研究方向为计算机图形学、计算机仿真等;胡晓惠(1960—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学、计算机仿真等;欧阳冠军(1981—),男,硕士,软件工程师,主要研究方向为计算机图形学、计算机仿真等。

的衍射理论为基础,结合相机或人眼内部结构的衍射效应绘制出光芒四射的眩光效果;景深效果是一种与镜头孔径大小、焦距和物距有关的几何光学现象,针对这类效果的绘制算法以几何光学理论<sup>[14]</sup>为基础,结合针孔相机模型或薄透镜模型绘制出具有背景或前景模糊的效果;散景效果与景深类似,但其形成的光学原理更加复杂,不仅与镜头孔径大小、焦距和物距有关,还与相机镜头的内部结构有关,主要包括相机镜头内的孔径光阑和渐晕光阑。目前,绘制散景效果的方法可分为 2 类<sup>[6]</sup>。1) 基于图像的绘制方法<sup>[3-9]</sup>。这类方法使用图像后过滤技术,如基于空间卷积的收集法<sup>[3,8-9]</sup>和基于弥散圈的散射法<sup>[4,6-7]</sup>,对由标准绘制算法绘制的图像(也可以是实际相机拍摄的图像)进行处理,以绘制出散景效果。该类方法的优点是无需建立三维场景,避免了烦琐的建模过程,节省大量的时间,绘制速度较快,通过与层组合技术<sup>[6]</sup>和硬件加速技术<sup>[5]</sup>结合,可以实现散景效果的实时渲染;但是这类方法使用了针孔相机模型或具有有限孔径的单透镜模型,不能精确地模拟相机镜头的成像过程,也不能绘制出由孔径形状和渐晕共同作用的散景效果。2) 基于分布式光线追踪的绘制方法<sup>[10-12]</sup>。这类方法首先建立三维场景,然后利用分布式光线追踪技术对三维场景进行采样,以绘制出散景效果。该类方法可以绘制出较为精确的散景效果,但由于采用的是针孔相机模型,因此同样不能精确地模拟相机镜头的成像过程,也不能绘制出由孔径形状和渐晕共同作用的散景效果。

针对上述方法的缺点,本文以分布式光线追踪方法和精确的相机镜头模型<sup>[15]</sup>为基础,提出一种基于几何光学理论的散景效果的真实感绘制方法。该方法以序列光线追踪方法建立精确的相机镜头模型,来模拟不同形状的孔径光阑和渐晕对散景效果的影响;并利用几何光学理论和序列光线追踪方法精确地计算出出射光瞳的位置和大小,以提高光线追踪效率。

## 1 散景效果的光学原理

在摄影学中,散景<sup>[16]</sup>效果是一种焦外高亮部分(包括点状光源)在照片上逐渐模糊的现象,又称为焦外成像。散景效果常在具有浅景深的相机镜头中出现,如大孔径镜头、微距镜头或长焦镜头,这些相

机镜头通过生成散景效果来增强照片离焦模糊区域的艺术效果,许多镜头厂商(如尼康、佳能等)设计的镜头都具有这一特性。

在几何光学中,散景是一种景深外成像现象,其基本光学原理可用景深理论描述。图 1 所示为景深的示意图,相机镜头用单透镜表示,镜头聚焦于平面  $O$ ,即为物平面,平面  $I$  为相应的像平面,其中物距为  $U_0$ ,像距为  $V_0$ 。平面  $N$  为近景平面,平面  $F$  为远景平面,景深为近景平面与远景平面之间的距离。严格地说,只有物平面上的点可以在像平面上成清晰像,近景平面和远景平面之间(不包括物平面)的任何物点在像平面成弥散像,但其弥散圈大小不会超过人眼能分辨的弥散圈大小,因此也可以认为是成清晰像。而对于近景平面内侧或远景平面外侧的任何物点,其在像平面所形成的弥散圈能够被人眼所分辨,则认为是成模糊像,即散景效果。弥散圈的大小与孔径、焦距和物距密切相关,孔径越大,弥散圈就越大;焦距增加,像的放大率随之增加,弥散圈的直径变大;物距减小,像的放大率随之增加,弥散圈的直径变大。散景效果的表现形式(即弥散圈的形状)与相机镜头的内部结构相关,主要包括镜头内的孔径光阑和渐晕光阑。在不受渐晕光阑影响的情况下,弥散圈的形状即为孔径光阑的形状。实际相机镜头中,渐晕光阑是普遍存在的,它使得靠近像平面边缘的弥散圈不再完全反映孔径的形状。图 2 所示为用真实相机拍摄的照片,其中,图 2 a、2 b 所示为使用圆形孔径光阑的相机镜头拍摄的照片,可以看出,焦外高亮部分的弥散圈在图片中央部分为圆形,即呈现出孔径光阑的形状,而越靠近图片边缘,弥散圈就越呈现不规则的类似椭圆形状;图 2 c 所示为使用三角形孔径光阑<sup>[15]</sup>的相机镜头拍摄的照片,可以看出其焦外高亮部分呈现出与镜头孔径形状类似的三角形弥散斑。这些焦外高亮部分的弥散现象就是散景效果。下面将从几何光学原理的角度出发,分析相机镜头的内部结构对散景效果的影响。

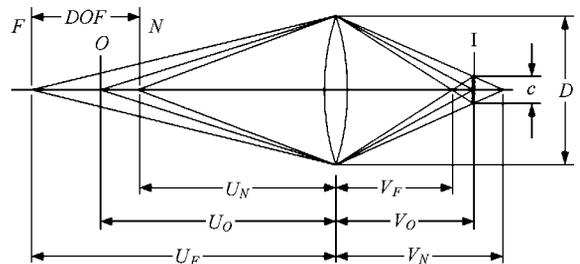


图 1 散景效果的光学原理

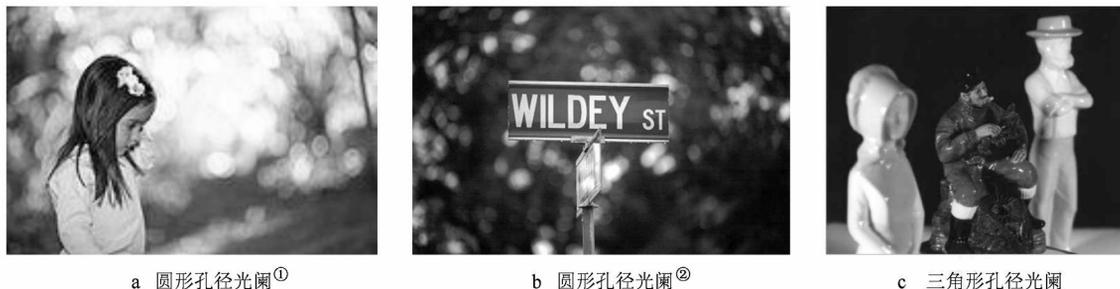


图 2 具有散景效果的照片

## 2 相机镜头的内部结构

相机镜头通常由一系列共轴的透镜和光阑组成. 光阑是用来限制成像光束的光学元件, 通常是开孔的不透明屏(也可以是透镜框), 其中孔径光阑和渐晕光阑极大地影响着散景效果.

### 2.1 孔径光阑

相机镜头中能最大限制成像光束的光阑称为孔径光阑, 孔径光阑通过其前面镜头所成的像称为入射光瞳, 通过其后面镜头所成的像称为出射光瞳. 图 3 a 中,  $PQ$  是孔径光阑,  $P'Q'$  是入射光瞳,  $P''Q''$  是出射光瞳. 从物点  $A$  发出的成像光束  $APQ$  经过前面透镜折射后, 恰好通过孔径光阑  $PQ$ ; 再被后面透镜折射后, 恰好通过出射光瞳  $P''Q''$ , 最后交于像点  $A'$ . 可以看出, 孔径光阑对成像光束起着最大的限制作用. 根据光学成像原理<sup>[16]</sup>, 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳存在共轭关系. 也就是说, 从物点发出

的光线如果通过入射光瞳, 则一定通过孔径光阑和出射光瞳; 否则, 一定不通过孔径光阑和出射光瞳. 图 3 a 中, 光线  $AM$  通过入射光瞳, 同样也通过孔径光阑和出射光瞳, 光线  $AN$  不能通过入射光瞳, 折射后也不能通过孔径光阑和出射光瞳. 第 3 节将利用这种共轭关系提升光线追踪效率. 孔径光阑常见的形状是圆形, 也可以是方形或其他不规则的形状, 不同形状的孔径光阑产生不同弥散形状的散景效果. 图 3 b 中, 紧靠透镜的孔径光阑为向上的三角形, 因此通过孔径光阑的成像光束截面也为三角形, 成像光束在平面  $I$  聚焦. 当像平面放在靠近透镜的位置  $N$  时, 成像光束在像平面上形成向上的三角形弥散像. 同样, 当像平面放在远离透镜的位置  $F$  时, 成像光束在像平面上成向下的三角形弥散像. 图 2 c 所示为使用三角形孔径光阑的相机拍摄的照片, 可以看出, 前景中弥散的三角形是朝下的, 而背景中弥散的三角形是朝上的.

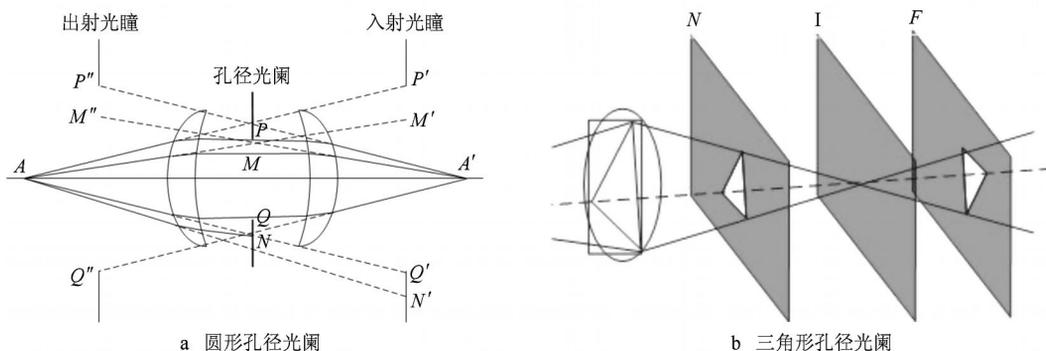


图 3 孔径光阑形状对散景效果的影响

### 2.2 渐晕光阑

轴外点的成像光束被拦截的现象称为渐晕, 产生渐晕的光阑称为渐晕光阑, 渐晕光阑通常是透镜框. 渐晕光阑通过其前面镜头所成的像称为入射窗, 通过其后面镜头所成的像称为出射窗. 图 4 中,  $P_1 P_2$  为出射光瞳,  $Q_1 Q_2$  为出射窗, 该图不考虑相机

镜头内的具体光学元件, 仅画出出射光瞳、出射窗和像平面来分析像空间成像光束的渐晕. 可以看出, 在像平面上的点  $A$  和  $B_1$  之间, 任意像点的成像光束 (成像光束的孔径大小由孔径光阑  $P_1 P_2$  决定) 都可

<http://en.wikipedia.org/wiki/Bokeh>

<http://www.vanwalree.com/optics/bokeh.html>

以通过出射窗  $Q_1 Q_2$ ; 在  $B_1$  和  $B_3$  之间, 任意物点 (如  $B_2$ ) 的成像光束都会部分地被入射窗遮挡, 导致成像光束的截面变成类似于椭圆的形状, 如  $M$  处的阴影. 显然在点  $B_3$  之外, 任意点的成像光束都全部地被入射窗遮挡, 因此无法通过镜头成像. 前景 (或背景) 中的高亮部分通过相机镜头成像时, 图 4 中的像平面后移 (或前移), 导致高亮部分在像平面上成弥

散像. 弥散像的形状既与孔径光阑的形状有关, 又与渐晕光阑产生的渐晕有关. 高亮部分在像平面中间部分的弥散像只与孔径光阑的形状有关, 而在像平面外围部分的弥散像则是孔径光阑形状和渐晕共同作用的结果. 图 2 a, 2 b 中照片边缘部分呈现的椭圆状弥散斑就是孔径光阑形状和渐晕共同作用而产生的散景效果.

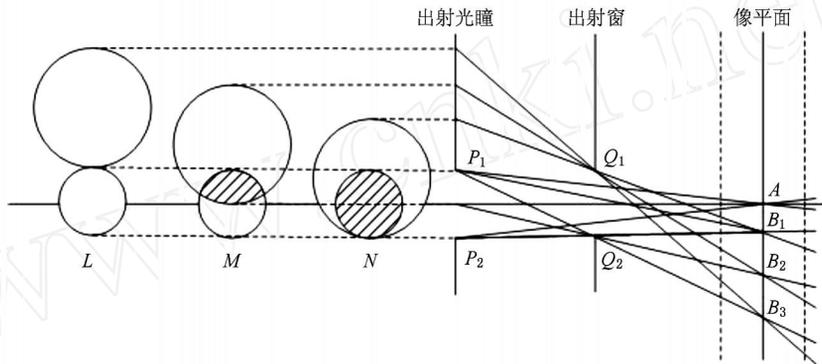


图 4 渐晕对散景效果的影响

### 3 相机镜头内的光线追踪方法

为了精确地模拟孔径光阑形状和渐晕对散景效果的影响, 本文提出相机镜头内的序列光线追踪方法. 应用光学理论<sup>[14]</sup>, 对于摄影相机的镜头, 本文提出的光线追踪方法能够很好地模拟其光学成像特性.

#### 3.1 折射定律

折射定律又称为斯涅耳定律, 用以描述光线穿过透明介质时发生的现象. 相机镜头内的透镜都是用透明材料制作而成, 因此可以用折射定律来描述透镜的光学行为. 为了方便后面的光线追踪计算, 本文使用矢量形式的折射定律来描述透镜的光学行为, 如图 5 所示.

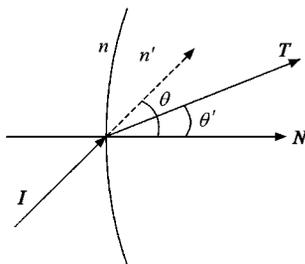


图 5 矢量形式的折射定律

图 5 中,  $I$  和  $T$  分别为入射光线和折射光线的单位矢量,  $N$  为法线光线的单位矢量,  $\theta$  和  $\theta'$  分别为入射角和折射角,  $n$  和  $n'$  分别是折射面两边的介质的折射率. 因此折射定律可以表示为

$$n(I \times N) = n'(T \times N),$$

将该式进行整理可得

$$\left( T - \frac{n'}{n} I \right) \times N = 0 \quad (1)$$

式(1)说明矢量  $T - \frac{n'}{n} I$  和矢量  $N$  的方向是一致的, 可得

$$T - \frac{n'}{n} I = N \quad (2)$$

其中  $\frac{\partial}{\partial N}$  称为偏向导数. 用  $N$  对式(2)两边作点积, 可得

$$T \cdot N - \frac{n'}{n} I \cdot N = \cos \theta - \frac{n'}{n} \cos \theta' = \sqrt{1 - \frac{n'^2}{n^2} (1 - (I \cdot N)^2)} - I \cdot N.$$

于是, 可求得折射光线的单位方向矢量为

$$T = \frac{n'}{n} I + N \quad (3)$$

在相机镜头内的序列光线追踪方法中, 利用式(3)可以方便地求出折射光线方向.

#### 3.2 出射光瞳的计算

在进行相机镜头内的光线追踪时, 最直接的光线采样方法是在像平面和后透镜 (最靠近像平面的透镜) 之间进行. 然而这是因为通过后透镜的许多光线都被相机镜头内部的光阑阻挡掉, 不能穿过整个镜头, 所以采用这种光线采样方法的光线追踪效率很低.

第 2.1 节指出,孔径光阑、出射光瞳和入射光瞳存在共轭关系,也就是说,从一物点发出的光线,如果通过入射光瞳,就必然通过孔径光阑和出射光瞳,同时通过整个相机镜头;如果不能通过入射光瞳,则其同样不能通过孔径光阑和出射光瞳.因此,在像平面和出射光瞳之间采样光线可以大大提高光线追踪的效率,在孔径光阑直径相对较小时尤其如此,这一点将在第 4.1 节进行验证.

出射光瞳是孔径光阑的像,在实际中是不存在的,因此在利用出射光瞳进行光线采样之前,首先需要计算出射光瞳的位置(在光轴上)和孔径(半径或直径).本文首先利用光线追踪方法精确地计算出射光瞳的位置,然后利用高斯光学理论和光线追踪方法确定出射光瞳的直径.

#### 算法 1. 计算出射光瞳的位置和大小

输入. 存储相机镜头所有光学元件的数据结构.

输出. 出射光瞳的位置和大小.

Step1. 点  $P_0$  初始化为像平面中心,点  $P_{min}$  初始化为后透镜中心,点  $P_{max}$  初始化为后透镜边缘上一点.

Step2. 令光线  $R_{min} = Ray(P_0, P_0, P_{min})$ , 光线  $R_{max} = Ray(P_0, P_0, P_{max})$ , 光线  $R =$  光线  $R_{max}$ .

Step3. 如果光线  $R_{min}$  和  $R_{max}$  的方向余弦相差大于某最小值,且迭代次数不超过预先设定的最大值时,则执行下一步;否则,转 Step6.

Step4. 在镜头内逆向追踪光线  $R$ , 光学元件  $E$  为光线  $R$  能通过最后一个光学元件.

Step5. 如果光线  $R$  能通过镜头,  $R_{min} = R$ ; 否则,  $R_{max} = R$ ,  $R = (R_{min} + R_{max})/2$ , 转 Step3.

Step6. 光线  $R$  即为出射光瞳的边缘光线, 光学元件  $E$  即为孔径光阑.

Step7. 点  $P_0$  初始化为孔径光阑中心,点  $P_3$  初始化为位于孔径光阑后面的光学元件上的近轴点.

Step8. 光线  $R_3 = Ray(P_0, P_0, P_3)$ , 正向追踪光线  $R_3$ .

Step9. 出射光瞳的位置  $P$  即为由光线  $R_3$  通过镜头后与光轴的交点,出射光瞳的孔径  $D$  由出射光瞳的位置  $P$  和边缘光线  $R$  确定,算法结束.

注意,如果孔径光阑不是圆形的,应先求出包含该非圆形孔径光阑的最小圆,以该最小圆替代孔径光阑,求得出射光瞳.求出的出射光瞳只用于光线采样,而在进行相机镜头内的序列光线追踪时,将使用实际的孔径光阑形状.

### 3.3 相机镜头内的序列光线追踪

相机镜头内的光学元件以一种有序的方式排列.与普通的光线追踪方法不同,在镜头内进行光线追踪时不需要寻找光线的最近交点,避免了大量的排序和相交测试计算,因此序列光线追踪方法效率

较高,且与通用的光线追踪绘制程序集成时,既可以建立精确的相机镜头模型,又不会明显降低渲染程序的性能.渲染一个复杂的三维场景时,三维场景中的光线追踪计算占用绝大部分的计算时间,而镜头内的序列光线追踪所占时间几乎可以忽略.序列光线追踪方法的基本思路是,首先将相机镜头的所有光学元件存储到一个数据结构中,顺序并逐个取出该镜头的光学元件,接着利用该光学元件的相关信息,计算光线与该元件的交点及被该元件折射的光线方向;最后通过相机镜头的光线被通用的光线追踪绘制程序使用,进行三维场景中的光线追踪.

#### 算法 2. 顺序追踪相机镜头内的光线

输入. 存储相机镜头所有光学元件的数据结构.

输出. 相机镜头的出射光线.

Step1. 在成像平面上随机采样一个点  $P_1$ , 在出射光瞳随机采样一个  $P_2$ , 生成采样光线  $R = Ray(P_1, P_1, P_2)$ .

Step2. 遍历镜头中每一个光学元件,如果还有光学元件,则执行下一步;否则,转 Step6.

Step3. 计算光线  $R$  与该光学元件的交点  $P_0$ .

Step4. 如果交点  $P_0$  在光学元件的孔径范围外,光线  $R$  不能通过该光学元件,光线被阻挡,算法结束;否则,光线  $R$  能通过该光学元件,执行下一步.

Step5. 计算该光学元件在交点处的法线  $N$ , 以及光线  $R$  被光学元件折射或反射后的光线  $T$ , 更新  $R (R = T)$ , 转 Step2.

Step6.  $R$  即为相机镜头的出射光线,算法结束.

通过镜头的每条光线相互独立,互不影响,在镜头内的光线追踪方法可以并行执行,以充分利用主流 CPU 的多核优势,提高追踪效率.

## 4 实验及结果分析

### 4.1 光线追踪效率比较

第 3.2 节从理论上分析了基于出射光瞳的光线采样方法在效率上要优于基于后透镜的光线采样方法.下面分别用这 2 种采样方法进行镜头内的序列光线追踪实验,比较它们的光线追踪效率.实验中, D-GAUSS 镜头光学参数<sup>[14]</sup>如表 1 所示,像平面尺寸为 35 mm,分辨率为 512 × 512,每个像素采样 16 条光线.对这 2 种采样方法进行光线追踪的结果如表 2 所示.

表 2 中,每次进行光线追踪实验时,总的采样光线数目为  $4.261 \times 10^6$  条.当相机光圈系数  $F = 2.0$  时,使用基于后透镜的采样方法进行光线追踪,有效光线为  $2.556 \times 10^6$  条,耗时 21.4 s,使用基于出射光瞳的采样方法进行光线追踪,有效光线为  $3.076 \times$

$10^6$  条,耗时 23.5 s,追踪效率提升约 20%;类似地,当  $F=2.8$  时,追踪效率提升约 235%; $F=4.0$  时,追踪效率提升约 374%。由此可见,基于出射光瞳的光线采样方法明显优于基于后透镜的光线采样方法,并且随着  $F$  值的增加,基于出射光瞳的光线采样方法的效率更高,优势更明显。在时间方面,随着  $F$  值的增加,基于后透镜的采样方法所耗时间减少,这是因为光线采样效率逐渐降低;而基于出射光瞳的采样方法所耗时间增加,这是因为光线采样效率逐渐提高。由于基于出射光瞳的采样方法光线采样效率相对较高,需要对更多的光线进行追踪计算,因此需要耗费更多的时间。

表 1 D-GAUSS 镜头光学参数

序号	镜头参数			
	半径/mm	厚度/mm	折射率	孔径(半径)/mm
0	29.475	3.76	1.67	25.2
1	84.83	0.12	1.0	25.2
2	19.275	4.025	1.67	23.0
3	40.77	3.275	1.699	23.0
4	12.75	5.705	1.0	18.0
5	0	4.5	0	17.1
6	-14.495	1.18	1.603	17.0
7	40.77	6.065	1.658	20.0
8	-20.385	0.19	1.0	20.0
9	437.065	3.22	1.717	20.0
10	-39.73	0.0	1.0	20.0

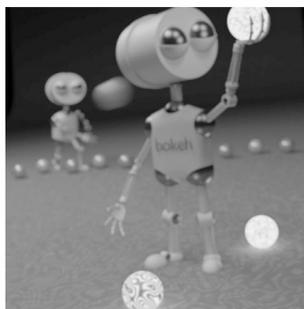
表 2 2 种方法追踪效率比较

采样方法	$F$	有效光线数 $\times 10^6$ /条	耗时/s
后透镜	2.0	2.5560	21.4
	2.8	1.8140	19.1
	4.0	0.8967	16.9
出射光瞳	2.0	3.0760	23.5
	2.8	4.1600	26.6
	4.0	4.2490	26.8

从表 2 可以看出,尽管使用基于出射光瞳的采样方法进行光线追踪效率很高,但是仍然有部分光线不能通过镜头,这是因为存在渐晕现象。而且随着  $F$  值的变小,孔径光阑的变大(与  $F$  值成反比),渐晕现象越来越明显,导致光线追踪效率逐渐降低。

#### 4.2 绘制结果

采用第 3 节提出的散景效果绘制算法绘制出由孔径形状和渐晕共同作用的散景效果,结果如图 6 所示,其中每幅图像的原始尺寸为  $512 \times 512$ ,每个像素采样 1000 条光线。散景效果的绘制在图形工作站上完成,其硬件配置为 Intel Xeon CPU 3.0 GHz (8 个),16 GB 内存(单个 2 GB,共 8 个),NVIDIA Quadro FX 4600 显卡。相机镜头模型所需的镜头参数如表 1 所示。图 6 a ~ 6 e 中物距为 500 mm,图 6 f 中物距为 700 mm。图 6 a 所示为针孔相机模型绘制的散景效果,可以看出背景中的高亮部分呈模糊效果,但未能反映出孔径形状和渐晕的影响。图 6 b ~ 6 e 所示为采用本文相机镜头模型绘制的散景效果,



a 没有孔径光阑(绘制时间2 147 s)



b 圆形孔径光阑(绘制时间2 238 s)



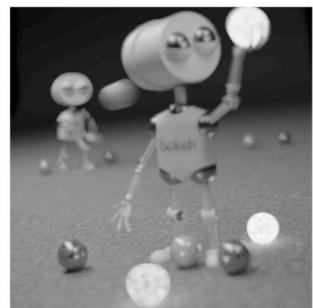
c 正三角形孔径光阑(绘制时间2 392 s)



d 正五边形孔径光阑(绘制时间2 448 s)



e 正五角星形孔径光阑(绘制时间2 526 s)



f 正三角形孔径光阑(绘制时间2 385 s)

图 6 散景效果绘制结果

图 6b 中,相机镜头聚焦在前景,导致前景在焦内清晰成像,而背景在焦外模糊成像,背景中接近图像中央的球上呈现与孔径光阑形状相似的圆形光斑,而靠近图像边缘的球上呈现出类似椭圆的光斑,这就是渐晕作用的结果.同样地,在图 6c~6e 中,孔径光阑的形状分别为正三角形、正五边形和正五角星形,背景中靠近图像中间的球上可以看到与孔径光阑形状类似的弥散光斑,而在接近边缘的球上则可以看到由于镜头渐晕影响而有所变化的弥散斑.为了反映三角形孔径光阑在前景和背景中对散景效果的不同影响,图 6f 中,前景和背景均在焦外模糊成像,可以看出散景效果在前景中表现为一系列倒三角形的弥散斑,如地面上 3 个球的三角斑,机器人眼中的三角斑;而散景效果在背景中表现为一系列正三角形的弥散斑.从图 6a~6e 中还可以看出,本文算法在绘制时间上有所增加,这是因为其采用了更为复杂和精确的相机镜头模型,与所获得的精确散景效果相比,绘制时间的少量增加是可以接受的.

## 5 总结及展望

本文提出一种基于几何光学理论的散景效果真实感建模与绘制方法.该方法基于光线传播的折射定律精确建立相机镜头的光线追踪模型,以模拟相机镜头中各个光学元件对入射光线的不同光学行为;精确建立不同形状的孔径光阑模型,以模拟具有不同形状的孔径光阑对散景效果的影响;通过精确建立渐晕光阑模型,以模拟视场中不同角度的散景效果;利用出射光瞳而不是后透镜来进行光线采样,大大减少了无效的光线样本,提高了光线采样效率.与已有的散景效果绘制方法相比,本文方法具有如下优点:1) 基于精确的相机镜头模型,而不是理想模型(如针孔相机模型或透视相机模型),因此绘制结果更加真实和准确;2) 基于序列光线追踪方法,易于集成到任何支持光线追踪方法的渲染器中,在渲染复杂场景时,与场景中光线追踪所耗费的时间相比,相机镜头中光线追踪所耗费的时间几乎可以忽略,且基于出射光瞳的光线采样算法进一步地减少了相机镜头中光线追踪所耗费的时间;3) 能够模拟任何孔径形状对散景效果的影响,增加的代价仅为光线与孔径光阑的相交测试时间;4) 能够模拟渐晕对散景效果的影响,增加的代价仅为光线与相机镜头中各个透镜框的相交测试时间.

我们下一步将结合已有的理论和绘制成果,进一步研究相机镜头中的光学像差对散景效果的影

响,绘制出反映光学像差的散景效果;建立含有反射镜的相机镜头模型,绘制出折反射式相机镜头特有的散景效果;建立含有非球面透镜或反射镜的相机镜头模型,绘制出非球面式相机特有的散景效果;考虑衍射效应对散景效果的影响,绘制出同时具有散景和眩光的效果;改进散景效果绘制算法,并利用 GPU 的加速能力实现散景效果的实时绘制.

## 参考文献(References):

- [1] Spencer G, Shirley P, Zimmerman K, *et al.* Physically-based glare effects for digital images [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, 1995: 325-334
- [2] Kakimoto M, Matsuoka K, Nishita T, *et al.* Glare generation based on wave optics [C] //Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Seoul, 2004: 133-142
- [3] Potmesil M, Chakravarty I. A lens and aperture camera model for synthetic image generation [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Dallas, 1981: 297-305
- [4] Riguer G, Tatarchuk N, Isidoro J. Real-time depth of field simulation [M] //Engel W F. Shader X<sup>2</sup>: Shader Programming Tips and Tricks with DirectX 9. Plano: Wordware, 2003: 529-556
- [5] Kass M, Lefohn A, Owens J. Interactive depth of field using simulated diffusion on a GPU [R]. Emeryville: Pixar Animation Studios, 2006
- [6] Lee S, Kim G J, Choi S. Real-time depth-of-field rendering using point splatting on per-pixel layers [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(7): 1955-1962
- [7] Lee S, Kim G J, Choi S. Real-time depth-of-field rendering using anisotropically filtered mipmap interpolation [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(3): 453-464
- [8] Kodama K, Mo H, Kubota A. Virtual bokeh generation from a single system of lenses [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Boston, 2006: 77
- [9] Lanman D, Raskar R, Taubin G. Modeling and synthesis of aperture effects in cameras [C] //Proceedings of International Symposium on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging, Lisbon, 2008: 102-106
- [10] Cook R L, Porter T, Carpenter L. Distributed ray tracing [J]. Computer Graphics, 1984, 18(3): 137-145
- [11] Buhler J, Wexler D. A phenomenological model for bokeh rendering [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Antonio, 2002: 142

(下转第 761 页)

近处矢量数据走样明显,而远处效果反而较好.这是因为其用于绘制近处矢量的纹理像素太少而用于远处的像素过多,当视线与地面逐渐平行时,近处的纹理像素占用率更是急剧下降,走样会变得很严重,如图16c所示.本文提出的视点相关透视纹理有效地改善了矢量纹理的像素利用率,一些可观察到的走样发生在视线几乎平行地面时场景的远处,如图16d所示,以及地形陡峭处,如图16e所示.

#### 4 结束语

本文改进了基于纹理的矢量数据绘制方法,采用与视点相关的透视投影将矢量数据实时绘制到地形纹理上.理论分析和实验结果表明,该算法能够提高矢量纹理的像素利用率,在一定程度上抑制走样的发生,从而提高矢量数据的绘制质量.为了支持大规模场景中复杂矢量数据的绘制,本文还提出了一个多层多尺度矢量数据绘制机制.该机制不仅能根据视点变化,以渐变的方式展现多层矢量数据不同分辨率的层次细节;还能支持各层矢量数据的实时选取与动态编辑;更重要的是它能与目前大多数的多分辨率地形绘制算法以及遥感影像金字塔技术很好地结合在一起使用.

#### 参考文献(References):

- [1] Wang Chenhao, Tang Xiaolan, Chen Min, *et al.* Adaptive road modeling method based on terrain-matching[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(10): 2824-2826 (in Chinese) (王晨昊, 汤晓安, 陈敏, 等. 一种基于地形匹配的自适应道路建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(10): 2824-2826)
- [2] Asirvatham A, Hoppe H. Terrain rendering using GPU-based geometry clipmaps [M]. New Jersey: Addison Wesley, 2005: 27-44
- [3] Rui X P, Zhang Y M. Overlaying vector data on 3D terrain [C] //Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, 2004: 4560-4563
- [4] Wartell Z, Kang E, Wasilewski T, *et al.* Rendering vector data over global multi-resolution 3D terrain [C] //Proceedings of the Symposium on Data Visualization, Grenoble, 2003: 213-222
- [5] Zou Wan, Fang Jinyun, Liu Jingang. Research about visualization of hybrid multi-resolution terrain and vector data [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18 (Suppl1): 324-325 (in Chinese) (邹焯, 方金云, 刘金刚. 混合多分辨率地形与空间矢量数据的可视化研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(增刊1): 324-325)
- [6] Kersting O, Döllner J. Interactive 3D visualization of vector data in GIS [C] //Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, McLean, 2002: 107-112
- [7] Schneider M, Guthe M, Klein R. Real-time rendering of complex vector data on 3D terrain models [C] //Proceedings of the 11th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Ghent, 2005: 573-582
- [8] Wimmer M, Scherzer D, Purgathofer W. Light space perspective shadow maps [C] //Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, Norrköping, 2004: 1-9
- [9] Schneider M, Lein R. Efficient and accurate rendering of vector data on virtual landscapes [J]. *Journal of WSCG*, 2007, 15(1/3): 59-65
- [10] Green S. The OpenGL framebuffer object extension [OL]. (2005-04-15) [2009-05-19]. <http://download.nvidia.com>
- [11] Leng Zhiguang, Tang Xiaolan, Hao Jianxin, *et al.* Study on dynamic rapid rendering technique of large scale terrain [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(10): 2832-2835 (in Chinese) (冷志光, 汤晓安, 郝建新, 等. 大规模地形动态快速绘制技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(10): 2832-2835)
- [12] Xie Yaohua, Tang Xiaolan, Sun Maoyin. Image pyramid structures without truncation and data expansion [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(6): 30-34 (in Chinese) (谢耀华, 汤晓安, 孙茂印. 不产生精度截断及数据膨胀的图像金字塔[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(6): 30-34)
- [12] Wu Xiangyang, Bao Hujun, Chen Wei, *et al.* Real-time simulation of camera imaging by forward ray tracing [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(7): 1427-1433 (in Chinese) (吴向阳, 鲍虎军, 陈为, 等. 采用正向光线追踪的照相机成像实时模拟[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(7): 1427-1433)
- [13] Moravec H P. 3D graphics and the wave theory [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Dallas, 1981: 289-296
- [14] Zhang Yimo. Applied optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (in Chinese) (张以谟. 应用光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008)
- [15] Kolb C, Mitchell D, Hanrahan P. A realistic camera model for computer graphics [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, 1995: 317-324
- [16] Merklinger H M. A technical view of bokeh [J]. *Photo Techniques*, 1997, 18(3): 37-41

#### (上接第752页)

- [12] Wu Xiangyang, Bao Hujun, Chen Wei, *et al.* Real-time simulation of camera imaging by forward ray tracing [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(7): 1427-1433 (in Chinese) (吴向阳, 鲍虎军, 陈为, 等. 采用正向光线追踪的照相机成像实时模拟[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(7): 1427-1433)
- [13] Moravec H P. 3D graphics and the wave theory [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Dallas, 1981: 289-296
- [14] Zhang Yimo. Applied optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (in Chinese) (张以谟. 应用光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008)
- [15] Kolb C, Mitchell D, Hanrahan P. A realistic camera model for computer graphics [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, 1995: 317-324
- [16] Merklinger H M. A technical view of bokeh [J]. *Photo Techniques*, 1997, 18(3): 37-41