

## 平面狭缝图像场\*

蒋纯, 石教英

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

E-mail: cjiang@cad.zju.edu.cn

http://www.cad.zju.edu.cn

**摘要:** 提出了一种新的基于图像的绘制技术: 平面狭缝图像场, 即利用狭缝图像的集合来表示和生成场景. 在分析平面狭缝图像场性质的基础上, 提出了相似狭缝图像概念, 从而推导出用有限采样拟合平面狭缝图像场, 进而可以实时生成具有高真实感漫游场景的方法. 据此提出了采样和拟合的实现. 最后, 提出了分段狭缝图像映射的方法, 大大压缩了所用到的数据量.

**关键词:** 基于图像的绘制技术; 相似狭缝图像; 分段狭缝图像

**中图法分类号:** TP391

**文献标识码:** A

由 Adelson 和 Bergen 提出的全视函数(plenoptic function)<sup>[1]</sup>是大多数基于图像的绘制(image based rendering, 简称 IBR)技术的参考模型. 这是一个由空间位置( $V_x, V_y, V_z$ )、视角( $\theta, \varphi$ )、波长( $\lambda$ )和时间( $t$ )唯一确定的 7 维函数  $p = P(V_x, V_y, V_z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ . 在任何时刻、任何空间位置、以任何视角看见的场景, 都可以由此函数表示.

如果仅考虑静态场景, 时间  $t$  可以不考虑, 波长代表场景的颜色分布, 也可以隐含, 所以一般采用 5 维的全视函数形式<sup>[2]</sup>. 在场景中没有遮挡的情况下, 这个 5 维函数还可以降为 4 维, 也就是说, 利用光线在无遮挡场景中通过时的不变性, 以两个平行平面来表征此光线, 这样, 一条光线就可以由它与这两个平面的交点坐标( $u, v$ )和( $s, t$ )来表示. Lumigraph<sup>[3]</sup>和 Lightfield<sup>[4]</sup>就是这样的系统. 在这样的方法中, 整个光场记录的是通过任意点上所有光线的集合. 有了这个光场以后, 生成某观察点场景的过程可理解为从光场中抽取所有通过该观察点的光线的过程.

IBR 技术通过图像采样, 直接生成有照片效果的真实感场景, 具有传统的基于模型的显示方法无法比拟的真实感. 但以上这些 IBR 方法所需采样数据过多, 采样条件过于苛刻, 实现起来较为困难. 过去纯粹的 IBR 惟一可以实用于真实场景的只有全景图技术(panorama). 这种技术通过图像对齐(registration)和拼接(mosaics), 将在一个观察点拍摄的几幅图像拼成一个圆柱面<sup>[5]</sup>或者球面<sup>[3]</sup>的全景图, 可以通过变焦, 给用户提供一个固定视点的场景浏览. 虽然限制很多, 但因为它们的数据是二维的, 数据量小, 采集容易, 故而已经有商业化产品.

在限制观察点只在水平面上移动的情况下, 同心拼接(concentric mosaics)<sup>[7]</sup>是 IBR 技术中的一个很大的进步. 在这种方法中, 照相机在一个圆形区域  $R$  内的各个同心圆上转动, 从同心圆的切线角度拍摄一系列纵向的狭缝图像(slits image), 于是在这个平面圆  $R$  内的任意点上, 朝任意视线方向看到的场景可用这些狭缝图像拼接而成, 这就是“同心拼接”这个名词的由来. 同心拼接是一种

\* 收稿日期: 1999-08-09; 修改日期: 2000-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50033010)

作者简介: 蒋纯(1972-), 男, 浙江杭州人, 博士生, 主要研究领域为计算机图形学, 虚拟现实; 石教英(1937-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机图形学, 计算机辅助设计, 科学计算可视化.

三维全视函数<sup>[1]</sup>. 它既具有数据量小、采样容易的优点,又可以在平面圆  $R$  内部的自由漫游观察,能反映不同视点的光照、可见性变化,具有很强的真实感. 但它的缺点是有场景畸变现象. 因为拼合时选用狭缝图像的要求仅仅是符合当前视点的采样角度,把在不同距离上采样的狭缝图像拼合在一起形成新的场景视图,实际上假设了所有光线都来自无穷远处. 如果这一假设不成立,这种简单的代替就会产生误差.

我们提出一种新的 IBR 方法:平面狭缝图像场,利用狭缝图像的集合来表示场景. 这种方法仍然是一种数据量为三维的 IBR 技术,仍然保持了采样容易、数据量小的优点,但却没有场景畸变现象.

本文第 1 节介绍平面狭缝图像场的概念,并研究其性质. 利用相似狭缝图像这个重要概念,推导出利用有限采样拟合整个平面狭缝图像场的方法. 第 2 节提出一个采样和拟合的实现方法,解决实际采样中的一些问题. 最后,为了使这个方法符合实用的要求,我们提出分段狭缝图像的方法,以压缩场景数据量,达到实时性的要求.

## 1 平面狭缝图像场

### 1.1 概念

观察点只在水平面上运动是场景漫游中的一种重要情况,因为这通常是人的一般漫游观察方式. 而在这种情况下,把狭缝图像作为场景的基本元素是一种很好的简化. 一般地,在不考虑采样设备焦距等内部参数的情况下,一幅狭缝图像可以由采样设备的位置坐标(更确切地说是采样设备焦点的位置)和采样时镜头的水平方向角  $\theta$  来惟一确定. 在以后的叙述中,我们把  $\theta$  称为狭缝图像的采样角度,简称采样角度. 因为我们考虑的观察点只在一个水平面上运动,为了方便起见,将这个水平面上的坐标用极坐标  $(\rho, \varphi)$  表示,  $-\pi < \varphi \leq \pi$ . 所以在本文中,我们把狭缝图像记为  $s(\rho, \varphi, \theta)$ . 把这个平面上狭缝图像的全集  $\{s(\rho, \varphi, \theta)\}$  记作  $L$ ,并明确采样角度为采样设备位置  $(\rho_s, \varphi_s)$  到坐标原点连线(即直线  $\varphi = \varphi_s$ )和镜头方向的夹角(如图 1 所示,  $-\pi < \theta \leq \pi$ ). 所有角度均以逆时针方向为正方向.

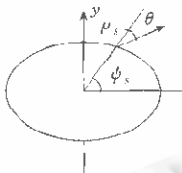


Fig.1 The definition of  $\theta$   
图1 方位角  $\theta$  的定义

现在我们来研究如何用狭缝图像集的概念来表示漫游中看到的场景这一问题. 在任意一点  $A(\rho_s, \varphi_s)$  上向  $\theta_0$  方向观察到的场景可以表达为集合  $S_r = \{s(\rho, \varphi, \theta) \mid \rho = \rho_s, \varphi = \varphi_s, \theta_0 - \omega/2 \leq \theta \leq \theta_0 + \omega/2\}$ , 其中  $\omega$  为观察者的水平视域. 而在点  $(\rho_p, \varphi_p)$  的柱状全景图则是  $S_p = \{s(\rho, \varphi, \theta) \mid \rho = \rho_p, \varphi = \varphi_p\}$ . 当以  $\rho = 0$  为中心时,半径为  $R$  的同心拼接中用到的所有狭缝图像的集合即为  $\{s(\rho, \varphi, \theta) \mid \theta = -\pi/2 \text{ 或 } \theta = \pi/2, \rho \leq R\}$ .

集合  $\{s(\rho, \varphi, \theta) \mid \rho \leq R\}$  具有重要的意义. 因为它完整地包含了中心为  $\rho = 0$ , 半径为  $R$  的区域内所有的场景信息,我们把这个集合称为半径为  $R$  的平面狭缝图像场,记为  $L_R$ . 如果我们能得到这个集合,就可以在这个区域内漫游,显示正确的场景.

但是,直接采样出这样一个平面狭缝图像场,就要求我们在这个半径为  $R$  的圆周内的每一点上,向所有方向采集狭缝图像. 这不仅需要设计专用的采样设备,采样的数据量也会急剧上升,实际上很难实现.

### 1.2 相似狭缝图像和相似狭缝图像集

我们来研究一下平面狭缝图像场  $L_R$  的一些性质. 我们把图像采样设备(摄像机)用针孔模型

考虑,以下所称焦距、焦点等设备参数均指在针孔模型下的情况。

定义相似狭缝图像为在一个平面狭缝图像场中采样角度和焦距都相同的狭缝图像。

显然,狭缝图像的相似关系具有自反性、对称性和传递性,是一种等价关系。在一个平面狭缝图像场中,所有互有相似关系的狭缝图像组成一个相似图像集。由集合论知识可知,所有相似图像集的集合构成平面狭缝图像场的一个划分。也就是说,任意相似图像集的交集为空集,而所有相似图像集的并集等于平面狭缝图像场。

我们引入一个相似狭缝图像集的规范划分方法。记在圆周  $\rho=R$  上向外采样而得到的那些狭缝图像为  $s_R(\varphi, \theta) \in \{s(\rho, \varphi, \theta) | \rho=R, -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2\}$ , 定义与它们相似的狭缝图像组成的集合为  $S_R(\varphi, \theta) = \{s | s \text{ 和 } s_R(\varphi, \theta) \text{ 相似}\}$ , 那么  $\{S_R(\varphi, \theta)\}$  就构成了  $L_R$  的一个划分。对于任意的  $s \in L_R$ , 沿着其观察方向作延长线, 必然和圆周相交, 根据相似狭缝图像的定义, 相交点上同方位角的狭缝图像就是  $s$  的相似狭缝图像。而圆周上所有向外观察的狭缝图像都是属于集合  $\{s(\rho, \varphi, \theta) | \rho=R, -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2\}$  的, 所以根据  $S_R(\varphi, \theta)$  的定义,  $s \in$  某个  $S_R(\varphi, \theta)$ 。

于是,由以上提到的集合论定理可得,

$$\bigcup_{\varphi} \bigcup_{\theta} S_R(\varphi, \theta) = L_R. \quad (1)$$

下面,我们来考虑相似狭缝图像集的一些性质。

定义相似狭缝图像的对应点为在各相似狭缝图像上,由场景中同一个点投影所成的像点。如图2所示,狭缝图像  $s_d$  和  $s_n$  是同一个相似狭缝图像集里的两幅相似狭缝图像。它们的采样位置分别位于  $C_d$  和  $C_n$  ( $C_d \neq C_n$ )。现在,我们考虑场景中如果有一个点  $M$ , 在这两幅狭缝图像中分别成像在  $m_d$  和  $m_n$  点处, 则  $m_d$  和  $m_n$  就是对应点。

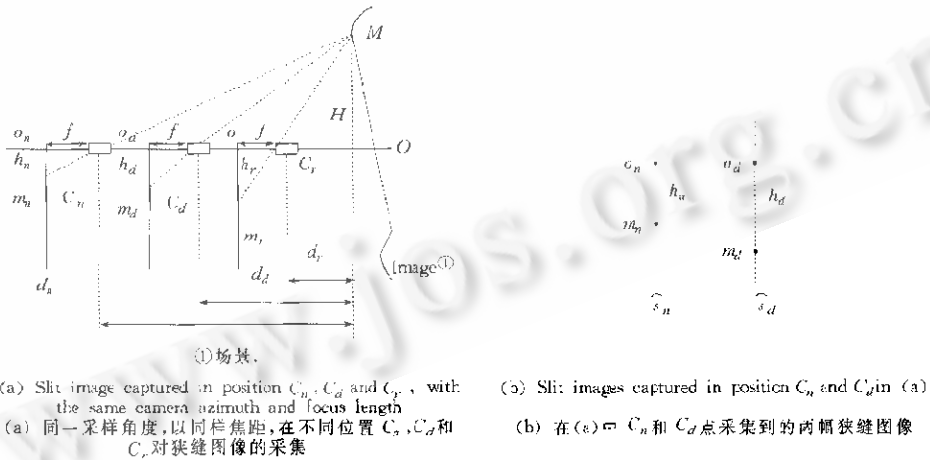


Fig. 2 Pixel mapping between analogy slit images  
 图2 相似狭缝图像像素之间的映射

假设我们讨论的两幅狭缝图像之间的距离相对于它们到场景中物体的距离足够小,  $|C_n C_d|$  的大小不对  $m_d$  和  $m_n$  的颜色值产生影响。那么,如果  $m_d$  和  $m_n$  的位置(因为是一维狭缝图像,位置就是高度参数,所以下也称像素点的高度)分别为  $h_d$  和  $h_n$ , 当  $h_n$  不等于 0, 有

$$(h_n - h_d) / h_d = (d_d - d_n) / d_n. \quad (2)$$

式(2)所描述的关系对于所有与  $s_d$  相似狭缝图像  $s_n$  都成立,这意味着我们可以尝试从已知的一幅狭缝图像  $s_d$  通过映射恢复与其相似的任何狭缝图像  $s_n$ , 进而正确地恢复整个新的合成场景。因此

我们把  $s_d$  称为数据狭缝图像,  $s_n$  称为合成狭缝图像.

式(2)牵涉到了图像深度  $d$ , 这在一般图像中是难以取得的. 为了消去深度值, 我们引入与狭缝图像  $s_d$  和  $s_n$  都相似的狭缝图像  $s_r$ , 采样位置在直线  $C_d C_n$  上的某点  $C_r$ . 类似地, 在这幅狭缝图像中  $M$  所成像  $m_r$  的位置  $h_r$  应有下式:

$$(h_n - h_r) / h_r = (d_r - d_n) / d_n, \tag{3}$$

其中  $d_r$  为  $C_r$  到  $M$  的距离在光轴上的投影.

利用式(2)和式(3), 可得到:

$$(h_d - h_r) / h_r / ((h_d - h_r) / h_r) = (d_n - d_d) / (d_r - d_d). \tag{4}$$

记  $\text{offset}_{nr} = (d_n - d_d)$ ,  $\text{offset}_{rd} = (d_r - d_d)$ ,  $k = h_d / h_r$ , 就有

$$h_n = h_d / ((k - 1) \cdot \text{offset}_{nr} / \text{offset}_{rd} + 1).$$

给定  $S_n$  的位置, 容易得出  $\text{offset}_{nr} / \text{offset}_{rd}$ . 这里顺便研究一下图 2 所示的  $O$  点. 场景物体与光轴的交点  $O$  总是成像在各狭缝图像像素点高度为 0 的那一点  $o$  (如  $o_n, o_r, o_d, \dots$ ) 上. 我们称  $s_r$  为参考狭缝图像.

但随着采样位置到场景物体距离的变化, 当用数据狭缝图像恢复其他狭缝图像时, 可能出现空洞问题. 这种因为数据狭缝图像信息不足而造成的空洞的存在, 使得合成狭缝图像不能完全与真实拍摄的狭缝图像一致, 只能拟合真实的狭缝图像.

由前面的讨论我们知道, 所有相似狭缝图像集的集合可以覆盖整个平面狭缝图像场  $L_R$ . 这样, 实际上我们就得到了在有限采样的情况下拟合  $L_R$  的方法.

## 2 平面狭缝图像场 $L_R$ 拟合

这一节我们来实现平面狭缝图像场  $L_R$  的拟合.

### 2.1 采样方法

受第 1.2 节中相似狭缝图像集划分方法的启发, 我们用类似的方法来配置采样设备. 如图 3 所示, 我们把采样设备 (摄像机) 配置在一个圆周上, 沿着圆周旋转一圈, 向圆周的法线方向进行采样.

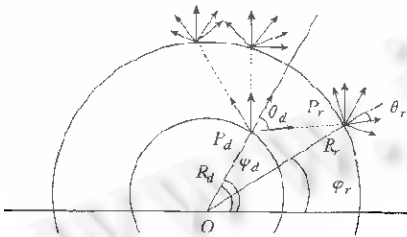


Fig. 3 The sampling method in planar slit image field synthesizing  
图3 平面狭缝图像场拟合中的采样

由于当普通摄像机采样时, 有水平视野范围的限制, 不可能像第 1.2 节中理论上描述的那样进行  $180^\circ$  的采样, 所以, 在半径为  $R'$  的圆周上采样到的狭缝图像集实际上分别为  $\{s(\rho, \varphi, \theta) \mid \rho = R', -\omega/2 \leq \theta \leq \omega/2\}$ , 不足以和圆周内部的所有狭缝图像建立相似关系, 因此, 只能和半径为  $R' * \sin(\omega/2)$  的圆内部的所有狭缝图像建立相似关系. 我们称  $R = R' * \sin(\omega/2)$  为有效半径. 以后我们所称的采样圆半径都是指有效半径  $R$ .

对这种采样, 我们用不同的圆周半径共进行两圈, 称沿半径为  $R_d$  的内圈采样得到的一组狭缝图像为数据图像, 沿半径为  $R_r$  的外圈采样得到的一组狭缝图像为参考图像, 仍然以逆时针方向为方位角的正方向.

### 2.2 相似狭缝图像对应

现在我们解决如何在参考图像中得到数据图像中的各狭缝图像的相似狭缝图像的问题.

如图 3 所示, 采用极坐标, 可以得到

$$\varphi_d - \varphi_r = \theta_r - \theta_d, \quad (5)$$

$$\sin \theta_r / R_d = \sin(\pi - \theta_d) / R_r = \sin(\varphi_r - \varphi_d) / |P_d P_r|. \quad (6)$$

解式(5)和式(6),可以得到数据图像上每一条狭缝图像  $s(R_d, \varphi_d, \theta_d)$  在参考图像上相似狭缝图像  $s(R_r, \varphi_r, \theta_r)$  的  $\varphi_r, \theta_r$  参数以及  $|P_d P_r|$ , 也就是式(4)中的  $\text{offset}_{mr}$ .

在获得相似狭缝图像之后,就可以用一个简单的模式匹配函数,沿着狭缝图像搜索,寻找两幅相似图像的对应点.为了使对应点的匹配更精确,寻找对应点时可将对应两幅狭缝图像邻近的几幅狭缝图像一起考虑.从而得到这两幅狭缝图像中各对应点的高度.

### 2.3 拟合

类似于式(5)和式(6),对于极坐标为  $(\rho, \varphi)$  的任意点  $P$ , 水平方位角为  $\theta$  的狭缝图像  $s(\rho_n, \varphi_n, \theta_n)$ , 有

$$\varphi_n - \varphi_r = \theta_r - \theta_n, \quad (7)$$

$$\sin \theta_r / \rho_n = \sin(\pi - \theta_n) / R_r = -\sin(\varphi_n - \varphi_r) / |P_n P_r|. \quad (8)$$

得到  $s(\rho_n, \varphi_n, \theta_n)$  在数据图像中的相似狭缝图像  $s(R_d, \varphi_d, \theta_d)$  和  $\text{offset}_{mr}$ . 依照式(4), 将  $s(R_d, \varphi_d, \theta_d)$  中的各像素点映射到  $s(R_r, \varphi_r, \theta_r)$ . 式(1)保证了我们能对  $\{s(\rho, \varphi, \theta) | \rho \leq R_r\}$  中的每个狭缝图像都作这样的映射,于是我们就可以得到  $L_{R_r}$ .

实现时,寻找对应点以及计算映射位置都作为显示的预处理过程.处理完成后,规范化到一个标准的映射位置参数,作为数据图像中每个像素的一个属性,和颜色属性一样存储.以后显示时,可以直接读出,不必再计算.

### 3 分段狭缝图像

以上我们阐述了拟合平面狭缝图像场  $L_r$  的方法.在进行漫游时,可以通过拟合相应的狭缝图像,拼合生成观察点的场景.但具体实现时还存在一个问题.通常在 IBR 系统中,像素的颜色属性总是在进行某种有损压缩(如 VQ)后存放.这类有损压缩算法能大幅度地压缩颜色属性数据,以使其符合实时显示的要求.但是,映射位置参数不可能进行此类有损压缩,因为压缩中信息的丢失可能造成无法预测的结果.于是,我们附加的映射位置参数将占有非常庞大的存储空间,从而会妨碍显示的实时性.

为了解决这个问题,我们对狭缝图像进行分段处理.不是以像素点,而是以像素段为基本单位进行类似于式(4)中的重映射,拟合狭缝图像.像素段内则通过插值得到像素的映射位置.这就是分段狭缝图像的基本思想.这里的关键是如何对狭缝图像进行恰当的分段.注意到图像中的各条边缘通常也是深度变化的分界点这一事实,我们通过图像处理,勾勒出各幅狭缝图像中的边缘点,然后选择其中合适的点作为狭缝图像的分段点.选择的过程可以通过交互完成.像素段内则通过线性插值得到像素的映射位置.

因为各狭缝图像包含场景的复杂度不同,所以每幅狭缝图像分的段数也不同.图 4(a)是我们实验场景中用到的一组狭缝图像的局部.我们将这组狭缝图像放在一起展示,以便读者能看清它们所代表的场景.图 4(b)是它们的分段点.分段点的亮度表示在图像处理中得出的此边缘点的重要程度.可以通过控制采纳的边缘点的重要程度阈值来控制分段的个数.同时也可控制所生成场景的质量.

分段处理后只需对各段的端点进行第 2 节中的算法,计算和记录其映射位置,从而大大简化了计算,减少了数据量.

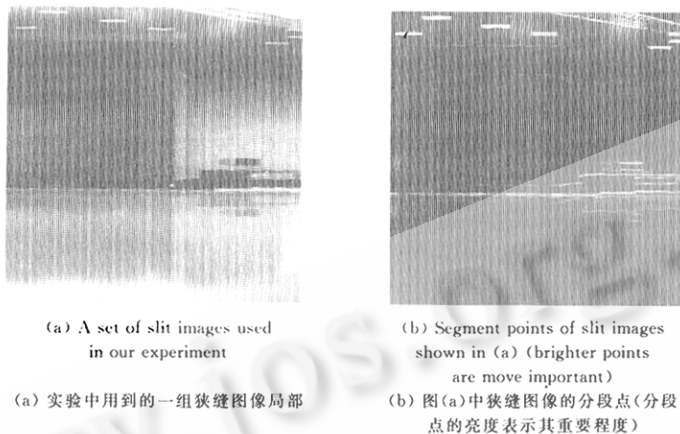


Fig. 4 Segmented slit images

图4 分段狭缝图像

#### 4 结 论

以上我们提出了一种新的 IBR 方法:平面狭缝图像场. 利用狭缝图像的集合来表示场景. 这种场景表示完整地包含了在一个平面上观察到场景的全部信息. 从而可以生成具有高真实感的漫游场景.

为了解决平面狭缝图像场在采样上的困难,我们通过研究这个光场的性质,提出相似狭缝图像这个概念,从而推导出利用有限采样得到的狭缝图像,拟合整个平面狭缝图像场,进而生成具有高真实感漫游场景的方法,并提出了一种采样和拟合的实现方法.

最后,为了使这个方法符合实用的要求,我们提出了分段狭缝场景的方法,以段为单位进行合成狭缝图像的拟合,大大减少了这个方法的计算和存储开销.

与全景图、同心拼接方法一样,平面狭缝图像场具有采样简单、数据量小的优点,容易投入实用. 而且,这种方法避免了同心拼接方法中存在的场景畸变现象.

如何对狭缝图像进行恰当的分段是利用狭缝图像段正确地进行新场景拟合的关键,我们将在这方面作进一步的探索.

图5显示了我们在一个实验场景中利用平面狭缝图像场生成的漫游场景. 它们正确地显示了距离变化对图像中物体大小的影响以及视角变化带来的可见性变化.

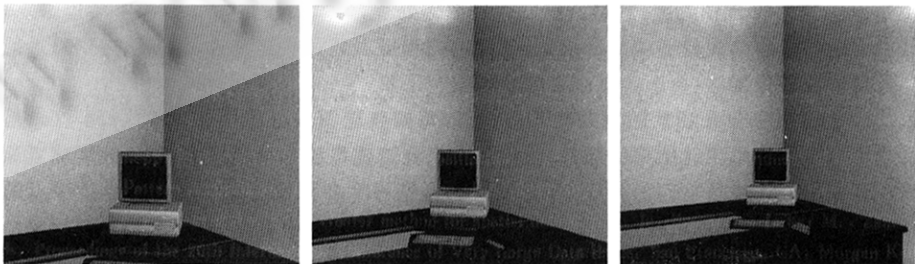


Fig. 5 Walk around the computer corner

图5 计算机桌周围的一个漫游

致谢 中国微软研究院 Heung-Yeung Shum 研究员在浙江大学就 Rendering with Concentric Mosaics 所作的精彩演讲,给了作者很大启发,在此表示感谢。

## References:

- [1] Anderson, E.H., Bergen, J. The plenoptic function and the elements of early vision. In: Landy, M., Movshon, J.A., eds. *Computational Models of Visual Processing*, Cambridge, MIT Press, 1991. 3~29.
- [2] McMillan, L., Bishop, G. Plenoptic modeling: an image-based rendering system. In: Cook, R., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'95*. New York: ACM Press, 1995. 39~46.
- [3] Gortler, S. J., Grzeszczuk, R., Szeliski, R., et al. The lumigraph. In: Rushmeier, H., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'96*. New York: ACM Press, 1996. 43~54.
- [4] Levoy, M., Hanrahan, P. Light field rendering. In: Rushmeier, H., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'96*. New York, ACM Press, 1996. 31~42.
- [5] Chen, S. E. QuickTime VR: an image based approach to virtual environment navigation. In: Cook, R., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'95*. New York: ACM Press, 1995. 29~38.
- [6] Szeliski, R., Shum, H. Y. Creating full view panoramic image mosaics and texture-mapped models. In: Whitted, T., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'97*. New York: ACM Press, 1997. 251~258.
- [7] Shum, H. Y., He, L. W. Rendering with concentric mosaic. In: Rockwood, A., ed. *Proceedings of the SIGGRAPH'99*. New York: ACM Press, 1999. 299~306.

## Planar Slit Image Field\*

JIANG Chun, SHI Jiao-ying

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

E-mail: cjiang@cad.zju.edu.cn

http://www.cad.zju.edu.cn

**Abstract:** A new method for image-based rendering (IBR): rendering using plane slit image field is discussed in this paper. Slit image field is a set of slit images that can represent and generate all scenes in a given region. A concept of analogical slit image is presented. By using it, a method to reconstruct the slit image field as well as work-through scenes from limited samplings is presented. A slit image segment mapping technology to simplify the reconstruct process and reduce data is presented too.

**Key words:** image based rendering (IBR); analogical slit image; slit image segments

\* Received August 9, 1999; accepted February 1, 2000

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 60033019