

针对光场图像的多尺度抗混叠绘制方法

肖照林, 王庆*, 周果清, 杨恒

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

(zlin.xiao@gmail.com)

摘要: 针对现有光场图像存在混叠的问题, 提出一种多尺度抗混叠绘制光场图像的方法. 首先分析了光场角度降采样引起图像混叠的原因, 然后给出角度采样率与图像混叠关系的数学描述, 并且指出了影响图像混叠的相关因素. 在此基础上, 提出采用多尺度光场图像梯度融合的方法降低图像混叠, 其优点在于无需场景深度先验信息. 分别在虚拟光场数据和真实光场数据集上进行了抗混叠绘制实验, 结果表明该方法优于经典光场绘制方法, 能够得到与已知深度绘制方法相近的结果.

关键词: 光场图像; 混叠效应; 多尺度图像; 光场绘制

中图法分类号: TP391.4

A Multi-scale Anti-Aliasing Rendering Algorithm for the Light Field Imaging

Xiao Zhaolin, Wang Qing*, Zhou Guoqing, and Yang Heng

(School of Computer Science Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: As aliasing artifacts can significantly reduce the quality of light field imaging, we propose a multi-scale anti-aliasing rendering algorithm to alleviate these artifacts. First, we explain that the angular under-sampling is an essential cause of aliasing artifacts. Then, we model the relationship between the aliasing and angular under-sampling. Distinct from existing methods, we address angular aliasing in the light field rendering stage, and the proposed algorithm does not need scene depth as the rendering prior. To avoid boundary problem, we introduce a multi-scale gradient field fusion algorithm, which can seam different level of non-aliased image parts together to reduce the light field aliasing. We test the proposed algorithm on both synthetic data and real scene data sets. In the experiments, the proposed rendering approach can significantly outperform the traditional light field rendering and can obtain similar results as the depth prior based rendering method.

Key words: light field image; aliasing artifacts; multi-scale image; light field rendering

1 相关工作

光场理论作为新兴计算摄影学的基础理论之

一, 其核心是利用平行双平面模型实现对空间中任意光线的四维存储和索引^[1-2]. 研究人员设计了光场相机^[3-4]、相机阵列^[5-6]、编码孔径相机^[7-9]等多种光场数据获取装置. 与传统光学成像用镜头聚焦光线不同, 光场聚焦是对光场数据集的数字化重采样过

收稿日期: 2013-06-21; 修回日期: 2014-01-10. **基金项目:** 国家自然科学基金(61272287); 教育部博士点基金(20116102110031); 虚拟现实技术与系统国家实验开放基金(BUAA-VR-12KF-02). **肖照林**(1984—), 男, 博士研究生, CCF 学生会员, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理; **王庆**(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像处理、模式识别和计算机视觉(qwang@nwpu.edu.cn); **周果清**(1980—), 男, 博士, 讲师, CCF 会员, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、最优化理论及方法; **杨恒**(1981—), 男, 博士, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理.

程.不同采样方法对应不同的成像参数,重采样后数据再经过绘制最终生成光场图像.因此,光场成像聚焦深度、视点位置、景深控制等成像参数可以在数据采集后灵活设定,它具有比传统成像方法更大的优势^[10-11].然而,光场成像也存在其特有的问题,如图像分辨率低、存在混叠效应等,其中图像分辨率由双平面模型中位置平面采样率决定,而图像混叠则由角度平面采样率决定.在给定图像分辨率的条件下,本文主要研究降低图像混叠的方法.

现有光场采集设备只能获取离散的光场信号,而角度域的降采样导致了图像混叠效应.目前,降低图像混叠的方法大致可以分为改进光场采集设备和改进光场绘制2类.

改进光场采集设备方法的目的是提高光场角度采样率,研究人员尝试使用空-频域复用技术提升光场角度采样率.例如,Liang等^[12]和Veeraraghavan等^[13]分别利用可编程孔径光圈及掩模调制实现频域复用的光场采集.这些方法通过在镜头前加入特定模式的遮挡模板对入射光信息进行频域调制,再利用传感器记录调制后的入射光场信号,最终对已知调制函数进行频域反卷积来恢复原始光场.但是,对孔径遮挡会造成光通量的损失,进而降低成像质量.Green等^[14]和Agrawal等^[15]利用多次曝光实现高角度分辨率光场的采集,其曝光次数决定了角度分辨率的大小;该方法能够同时获得较高的空间采样率和角度采样率,但不适合采集动态光场.

改进光场绘制方法可在不改动硬件的条件下降低图像混叠.Levoy等^[1]提出对光场原始采样进行预滤波以降低图像混叠;Gortler等^[2]在已知深度信息基础上采用高斯扩散函数滤除混叠高频;Isaksen^[16]等提出一种动态重参数化方法,以降低指定深度的图像混叠;Stewart等^[17]提出一种基于空域大孔径重建的二次滤波算法,将低频模板与有效高频混合,以降低图像混叠;Bishop等^[18]提出一种基于深度估计的贝叶斯迭代抗混叠算法;Yu等^[19]提出一种基于深度先验的空域滤波方法,能够利用光场数据实时绘制无混叠的景深效果.上述方法虽然在一定程度上降低图像混叠,但大多需要已知场景准确的深度信息,而高精度的场景深度获取本身就是计算机视觉领域未能圆满解决的问题之一,这使得该类方法的实用性受到了较大限制.

本文提出一种多尺度光场图像绘制方法,它不但能够有效地提升光场混叠区域图像质量,而且无需场景深度作为先验信息,如图1所示.

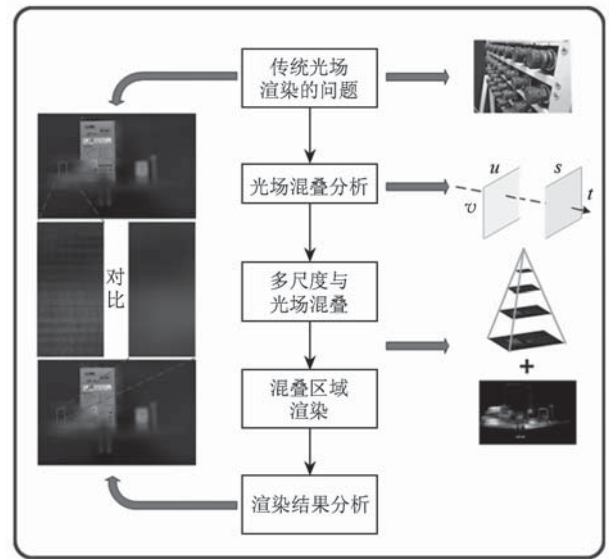


图1 本文方法概览

2 光场图像混叠分析

广义上光学成像是七维全光函数 $f(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 所表示光线集的记录和再现过程.平面成像则可看作高维全光信号向二维成像平面的投影过程^[1].最简单的投影成像模型是针孔成像模型,其特点是没有景深效应,所有穿过针孔的光线都能够清晰成像.由于针孔成像方式需要较长的曝光时间且信噪比低,因此多数成像系统采用更高光通量的孔径成像模型.假设传感器像点 I_p 是由穿过 p 不同角度光线的累积,定义 θ 为光线与传感器平面法向的夹角,则有

$$I_p = \int r(p, \theta) G(\theta) d\theta \approx \int r(p, \theta) d\theta \quad (1)$$

其中 $r(p, \theta)$ 表示以角度 θ 到达点 p 的一条光线, $G(\theta)$ 是不同角度的权值函数.考虑传感器对不同角度光线的响应差异,一般认为式(1)中 $G(\theta) = \cos^4 \theta$ ^[1].但是传统相机 θ 可变范围很小且 $\theta \rightarrow 0^\circ$,通常假设 $G(\theta) = 1$,即传感器响应角度变化不敏感.

狭义光场成像一般特指采用双平面模型对全光信号进行记录和索引成像方式,因此式(1)中光线索引函数 $r(p, \theta)$ 可用 $r(u, v, s, t)$ 替代;其中 uv 平面代表图像平面, st 平面代表相机平面,2个平面分别记录光线的位置和角度.由于 st 平面的离散采样特性,而光场成像角度域的采样率与传统成像不同,存在明显的降采样,即 $I_{u,v} = \int r(p, \theta) \delta(\theta - n\Delta x) d\theta$;其中 $\delta(\theta - n\Delta x)$ 是降采样函数, Δx 是采样间隔, n 是降采样次数.令 $\bar{\delta}(\cdot) = 1 - \delta(\theta - n\Delta x)$,则有

$$I_{u,v} = I_p - (I_p - I_{u,v}) + \epsilon = I_p - I_p * \delta(\cdot) + \epsilon \quad (2)$$

其中 ϵ 代表光场成像的系统噪声. 为了进一步说明混叠问题, 以下采用简化的二维光场采样模型进行分析.

在图 2 所示的二维采样空间中, V 轴和 T 轴分别代表光场中的位置与角度, 黑色线条代表一条角度采样线 b , 像点 I_p 是处于位置 p 并与 b 相交的所有光场采样累加的结果; b 的宽度代表最终光场图像空间分辨率, b 的长度代表最终光场图像空间分辨率, b 的长度代表孔径大小, 即采样角度范围. 假设目标场景物体满足朗伯条件, 在光场图像的聚焦区域, 同一位置的采样点将不随角度而变化. 如图 2 a 所示, 聚焦点表现为 3 条垂直于 V 轴的直

线; 而非聚焦点的采样将发生倾斜, 倾斜角度与 Δz 大小相关, 如图 2 b 所示. 对图 2 b 中的连续光场进行角度降采样, 可以得到图 2 c 所示的降采样光场, 使得 V 轴相邻位置的成像结果发生跳变, 其表现为光场图像的混叠效应. 直观上, 可用以下 3 种方法缓解光场混叠: 1) 如图 2 d 所示, 如果增加采样线 l 的宽度, 即降低光场图像分辨率, 可减缓邻近成像点的跳变现象; 2) 如图 2 e 所示, 如果提高光场角度采样密度, 同样能够缓解图像混叠; 3) 在场景深度已知的前提下, 通过角度信号的估计和恢复来降低图像混叠, 如图 2 f 所示. 上述分析中, 场景的纹理信息以及几何结构都较为简单, 真实场景情况则较为复杂.

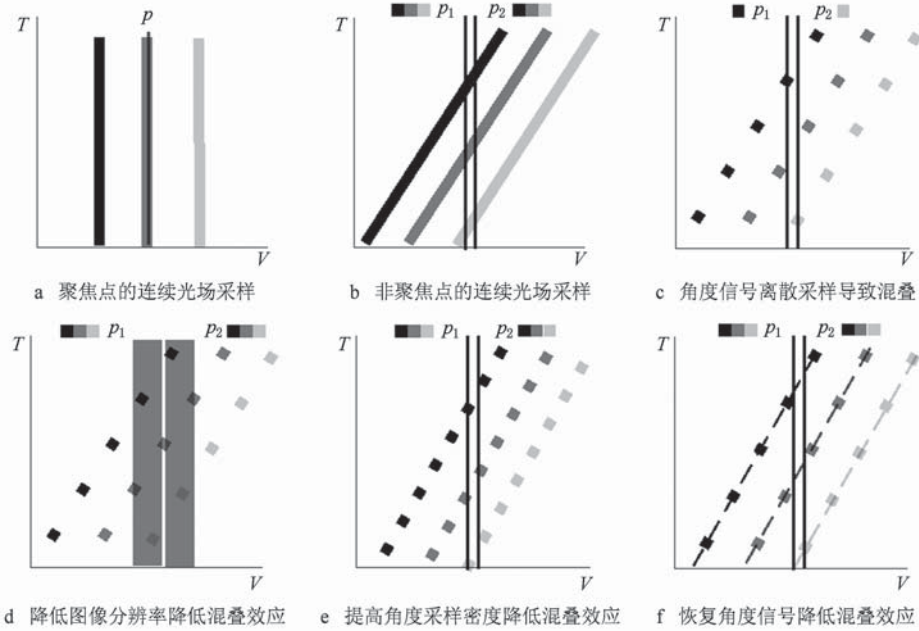


图 2 二维光场采样与混叠示意

考虑到纹理影响以及成像系统本身的特点, 定义光场角度采样率为

$$R = \frac{N}{\alpha_t |v_a - v'_a|} = \frac{1}{f} \cdot \frac{N}{A} \cdot \frac{z^2 + z \cdot \Delta z}{\Delta z} \cdot \frac{1}{\alpha_t} \\ \rho \frac{1}{f} \cdot \frac{z^2 + z \cdot \Delta z}{\Delta z} \cdot \frac{1}{\alpha_t} \quad (3)$$

其中 f 代表光场双平面间距离, z 表示聚焦平面位置, Δz 表示目标物距离聚焦平面的距离, $\rho = N/A$ 表示角度采样密度, N 是采样数量, A 是孔径大小, α_t 代表纹理因子. 显然, 当 $R < 1$ 时, 欠采样区域存在图像混叠; 当 $R \geq 1$ 时, 过采样区域不存在图像混叠.

由此可见, 角度采样密度、光场图像分辨率、场景深度以及纹理因子是影响图像混叠的主要因素. 高精度场景深度获取和角度采样率提升需要改变采样硬件系统, 而整体降低光场图像分辨率将会损失

大量有效高频信息. 因此, 本文提出一种多尺度的抗混叠绘制方法, 对于不同图像区域, 采用不同尺度的光场图像在梯度域中进行融合绘制.

3 多尺度光场图像绘制算法

在给定焦深的前提下, 光场图像可由离散角度采样进行均值合成, 即

$$I_f(d) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{H}_k(d) \cdot I_k \quad (4)$$

其中, $I_f(d)$ 是在给定深度 d 上用 N 个不同角度采样 I_k 合成的光场图像, $\mathbf{H}_k(d)$ 是由深度所确定的单应矩阵. 类似的光场图像合成方法还包括中值法、熵值法等^[20]. 在均值法的基础上, 本文采用不同尺度光场图像梯度域融合绘制, 以降低光场混叠效应. 首先,

采用图像金字塔方法生成不同尺度的光场图像 $I_{lf}(d, l)$, 其中 l 代表尺度级别且 $l \in [0, L]$, 原始光场图像为 $I_{lf}(d, 0)$. 计算不同尺度光场图像公式为

$$I_{lf}(d, l+1) = I_{lf}(d, l) * G(\sigma) \circ S_{\text{down}} \circ S_{\text{up}} \quad (5)$$

其中 $G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$. 本文采用标准 5×5 且 $\sigma = 1$ 的高斯核, S_{down} 和 S_{up} 分别是对目标图像的降采样和升采样操作. 由于降采样操作中存在一定的图像信息丢失, 因此仅靠 $I_{lf}(d, l+1)$ 无法完全恢复 $I_{lf}(d, l)$. 根据图像金字塔理论, 其中损失的拉普拉斯信息项为 $I_{la}(d, l) = I_{lf}(d, l) - I_{lf}(d, l+1)$, 即图像高频信息项. $I_{la}(d, l)$ 中既包括边缘、纹理等正常高频信息, 也包含欠采样导致的混叠信息, 而后者影响光场图像质量. 由于频域的全局特性, 相关频域方法很难在不影响正常高频信息的情况下去除混叠高频^[17]; 因此, 本文在空域中将不同尺度无混叠像素在梯度域进行融合, 以降低混叠效应. 与泊松图像融合方法^[21]类似, 基于梯度域的优化代价函数为

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla \mathbf{g} - \mathbf{v}_l^*|^2 \text{ with } \mathbf{g}|_{\partial\Omega} = I_{lf}(d, 0)|_{\partial\Omega} \quad (6)$$

其中 $\nabla \cdot = [\partial \cdot / \partial x, \partial \cdot / \partial y]$ 代表梯度算子, Ω 代表图像混叠区域, $\partial\Omega$ 代表混叠像素与原始光场图像的边界, $\nabla \mathbf{g}$ 是待求的融合区域梯度, l^* 表示像素点无混叠的图像尺度, \mathbf{v}_l^* 是在 l^* 尺度下所有像素点的梯度计算结果. \mathbf{v}_l^* 的维度由混叠图像点的像素数决定, 其中任意 2 个元素 v_i 和 v_j 可以分别来自不同尺度图像 $I_{lf}(d, l_1)$ 和 $I_{lf}(d, l_2)$. 可见, 无混叠的图像尺度 l^* 对绘制结果有重要影响.

下面进一步讨论 Ω 中像素无混叠尺度 l^* 如何确定的问题. 由式(3)可知, 光场的角度采样率 R 与场景相关, 因此直接计算 R 值在大多数真实场景绘制中较为困难. 由于角度采样率 R 可由预期采样数和实际采样数所决定, 因此式(2)中降采样函数 $\bar{\delta}(\cdot)$ 同样可以看作角度采样率 R 的函数 $\varphi(R)$. 当 $R \gg 1$ 时, ρ 的变化对光场成像影响较小, 因为 $I_p * \bar{\delta}(\cdot) = I_p * \varphi(R)$ 趋近于 0; 反之, 当 $R < 1$ 或 $R \rightarrow 1$ 时, $I_p * \varphi(R)$ 随 ρ 的变化较大, 导致光场成像的差异明显. 利用光场角度采样率与成像变化间关系, 本文提出通过改变相机数量或密度的方法检测混叠. 假设由 N 台相机组成孔径大小为固定的相机阵列系统, 其角度采样密度为 $\rho = N/A$. 如果设定可变采样密度下限为 $\rho_{\min} = K/A$, $K < N$, 则在不改变单台相机位置的情况下, 所有可能的相机组合方式为 $\sum_{k=K}^N C_N^k$ 种. 假设对所有可能的相机组合方式依照式

(4)进行成像, 则全部成像点的集合为 S . 如果 S 中成像点变化显著, 则认为存在图像混叠; 反之, 则不存在图像混叠. 当相机数量与密度变化较大时, 获取 S 中全体成像点差异的计算代价很高, 因此本文通过随机抽样对 S 中全体点的差异特性进行估计, 计算变异系数 C_v 作为对 m 次随机抽样差异的度量. 令 m 次抽样成像点集为 $S_m = \{I_{lf}(d, l, i) | i = 1, 2, \dots, m\}$, 则

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (I_{lf}(d, l, i) - \bar{I}_{lf}(d, l, \cdot))^2}}{\bar{I}_{lf}(d, l, \cdot)} \quad (7)$$

其中 $\mu = \bar{I}_{lf}(d, l, \cdot)$ 代表随机抽样集合的均值. 选取 C_v 作为差异度量是因为人眼对图像点差异的感知不仅与亮度差异绝对值相关, 还与背景亮度本身相关. 假设 T 为给定的阈值, 对尺度 l 下某一图像点应用上述方法进行成像点差异度量; 当 $C_v \leq T$ 时, 则认为改变采样密度对成像的影响不明显, 即在该尺度 l 下该成像点不存在混叠. 由于图像各通道强度级值为 256, 本文设定变异系数的划分阈值 $T = 0.02$, 表示小于 5~6 个灰度级的像素跳动属于系统噪声范围. 为了表述简便, 将混叠检测子定义为 $\chi(\cdot)$, 则光场图像无混叠的尺度计算公式为

$$l^* = \arg \min \chi(l), \text{ s. t. } \chi(l) = C_v \leq T \quad (8)$$

综上所述, 多尺度的抗混叠绘制方法总体流程如下:

- Step1. 获取原始光场数据.
- Step2. 利用式(4)生成目标光场图像 $I_{lf}(d)$.
- Step3. 利用式(5)生成 $I_{lf}(d)$ 的分辨率归一化图像金字塔 $I_{lf}(d, l)$.
- Step4. 利用式(7)(8)逐像素确定无混叠尺度级值 l^* .
- Step5. 生成多尺度混叠区域的梯度场 \mathbf{v}_l^* .
- Step6. 依据目标光场图像 $I_{lf}(d)$ 与梯度场 \mathbf{v}_l^* , 求取混叠区域 \mathbf{g} 像素值.
- Step7. 用 \mathbf{g} 替换 $I_{lf}(d)$ 中的对应像素, 降低混叠效应.

其中 Step3 和 Step4 中生成无混叠尺度 l^* 获取部分的详细流程如图 3 所示. S_{down} 采用隔行隔列方式进行降采样, 降采样后图像宽度和高度均为原图像一半; S_{up} 采用了双线性插值方法进行采样提升, 从而获取与 0 层分辨率一致的光场图像. 在确定无混叠尺度级值 l^* 后, 依据目标光场图像 $I_{lf}(d)$ 与梯度场 \mathbf{v}_l^* , 采用式(6)在梯度域将两者进行泊松融合^[21], 避免了采用直接替换方法所引起的边界效应, 并降低了光场图像的混叠效应.

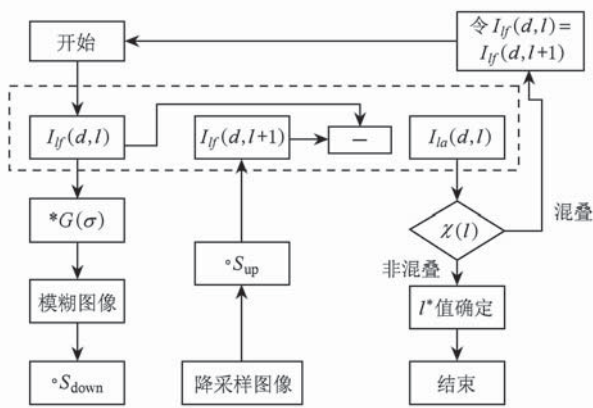


图 3 无混叠尺度 l^* 计算流程示意图

4 光场绘制实验

本文首先采用虚拟场景数据定量验证算法的有效性. 虚拟场景实验可以避免非均匀光照、相机标定误差、不同相机白平衡标定等因素对光场绘制造成的影响. 由于虚拟相机能够精确获取场景深度及相机内外参数, 因而便于实验比较. 本文采用 OpenGL 引擎对虚拟场景进行绘制, 如图 4 a 所示, 虚拟相机阵列布置在左侧方框所在位置、水平和垂直方向均匀分布, 通过变换视点生成不同视角分辨率为 512×512 的图像, 参考相机视角下的场景深度如图 4 b 所示.

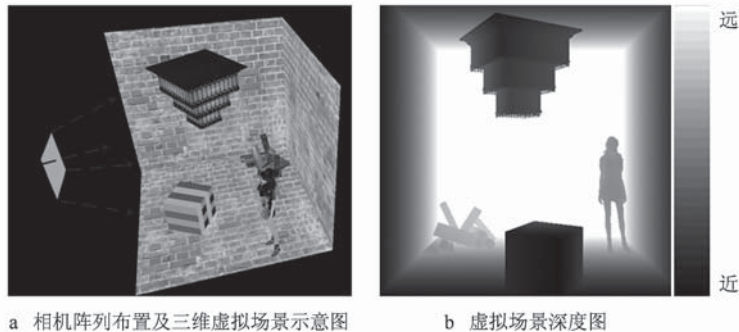


图 4 虚拟平面相机阵列获取虚拟场景光场数据

获取虚拟光场数据后, 采用经典光场绘制方法^[1]对不同焦平面图像进行绘制. 根据给定焦面不同生成不同景深效果的图像, 如图 5 b~5 d 所示, 3 幅光场图像分别聚焦在立方体, 人物和墙面位置在图像非聚焦区域存在明显的混叠现象.

按照前文分析, 随着光场绘制分辨率的降低, 混叠现象也将随之减弱. 图 6 依次生成不同尺度的光场图像, 最左 2 幅图像在方框区域内具有明显的混叠效应, 右侧从左至右依次以 1.0 倍, 0.5 倍, 0.25 倍分辨率进行了光场绘制; 可以发现, 降低分辨率能够有效地抑制混叠效应. 为了避免空间分辨率降低引起的图像走样, 图 6 采用双线性插值将图像分辨率提升至原始分辨率. 简单降低绘制分辨率的负面

效应造成聚焦区域的特征变得模糊不清, 即全局尺度变化对提升光场成像质量具有一定局限性.

为了测试光场角度采样变化对混叠区域的影响, 图 7 分别选取具有代表性的数个混叠与非混叠区域图像点, 统计了 100 种随机孔径所生成图像的变化. 图像点差异为 $E = \sum_{c=1}^3 |I_{lf}(d, l, i, c) - \bar{I}_{lf}(d, l, \cdot, c)|$; 其中 $I_{lf}(d, l, i, c)$ 代表第 i 次随机成像点, $\bar{I}_{lf}(d, l, \cdot, c)$ 代表 100 次随机成像的均值. 由图 7 c 可以看出, 随着孔径的改变, 混叠像素点的变化明显, 而非混叠像素点则无明显差异. 由此, 图 5~7 初步验证了本文之前的分析: 光场混叠对相机数量和密度的改变较为敏感, 而降低光场图像分辨率可以

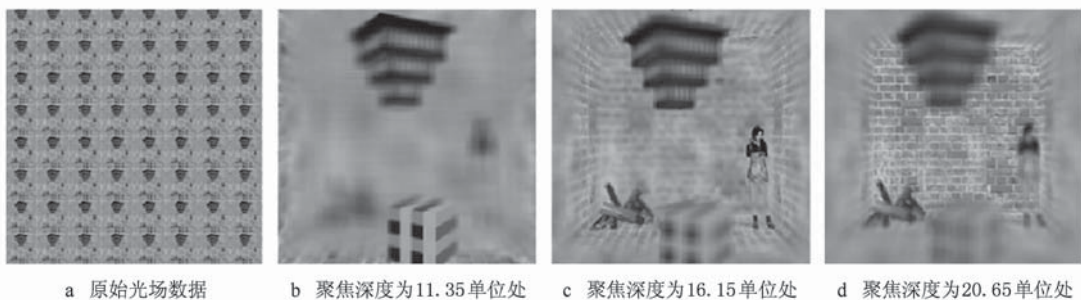


图 5 文献[1]中光场成像方法的绘制结果

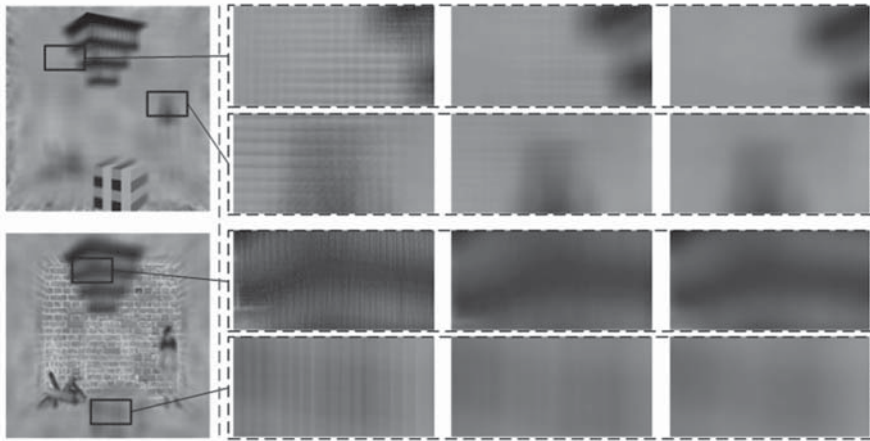
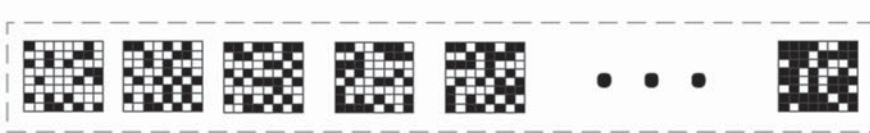
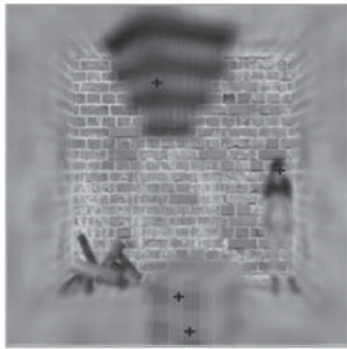


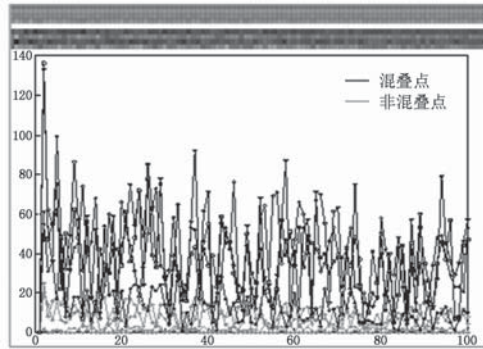
图 6 不同尺度图像混叠区域对比



a 不同光场角度采样模式



b 混叠点和非混叠点



c 不同采样模式下图像点变化对比

图 7 采样密度变化对混叠与非混叠区域影响的对比

有效地降低混叠效应. 为了与现有方法对比, 本文采用虚拟数据进行了光场绘制, 实验结果如图 8 所示.

图 8 中同一场景的 2 组实验分别采用图 5 b 与图 5 d 的聚焦设定. 在远离焦平面位置, 采用文献[1]绘制方法存在较明显的图像混叠, 如图 8 a 所示. 由于已知虚拟场景的深度, 依据孔径相机成像模型, 采用文献[19]方法基于深度逐像素计算弥散圆, 进而利用空域滤波器对光场图像进行低通滤波, 其结果如图 8 c 所示. 而在假设深度未知条件下, 用本文方法进行绘制也可明显减缓混叠效应, 如图 8 b 所示. 基于深度的绘制方法通常具有较高的质量, 因此实验将其与本文方法及文献[1]方法进行对比, 以验证本文方法的有效性.

本文方法绘制结果离焦模糊随深度变化的细节不如已知深度的绘制方法^[19], 如第 1 组实验中吊灯表面效果与第 2 组实验中墙角处木堆效果, 两者的

差异如图 8 f 所示. 虽然本文方法绘制结果在散焦区域与已知深度的绘制方法有一定差异, 但是整体视觉效果明显优于文献[1]方法绘制结果. 本文绘制结果与已知深度的绘制结果细节差异集中于图像低频部分, 文献[1]绘制中的混叠效应却集中在图像高频部分, 而人眼视觉对高频差异敏感性较高, 因此本文方法绘制结果更接近于已知深度方法绘制结果, 如图 8 d 中的放大结果所示. 为了进行量化比较, 图 8 e 和图 8 f 分别给出文献[1]方法、本文方法与已知深度方法^[19]绘制结果的图像差异以及相关统计量、均值和方差. 在图像的梯度域进行类似比较, 对比结果更加明显, 如图 8 g 和图 8 h 所示.

如图 9 所示, 本文采用真实相机阵列获取了多组不同场景的光场数据. 相机阵列由 64 台 CCD 相机组成, 64 台相机分别由 6 台服务器控制. 为了保证相机的同步拍摄, 相机触发由同步触发盒进行控制,

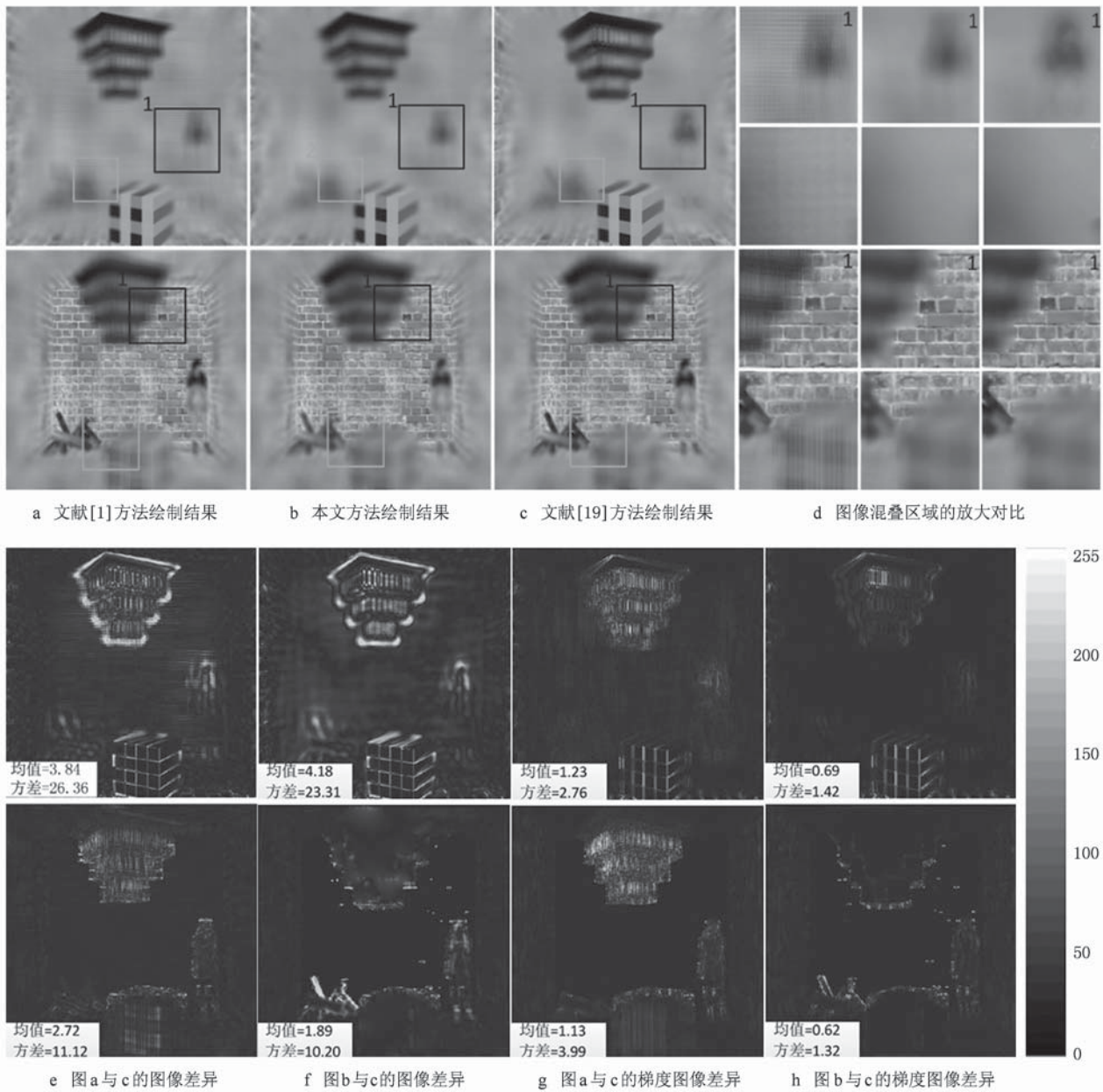


图 8 虚拟场景光场成像绘制结果对比



图 9 用于获取光场数据的相机阵列系统

相机同步精度可控制在 $1/60\text{ s}$ 以内. 在数据采集之初, 采用张氏标定方法获取了相机的内外参数, 并利用灰板对相机进行统一的白平衡设定, 进而获取了

距离相机阵列 2 m 左右的真实场景数据. 由于场景深度信息未知, 真实场景实验仅对比文献[1]方法与本文方法的绘制结果. 如图 10 所示, 本文方法绘制

效果明显优于文献[1]方法。

在上述实验中,变异系数 C_v 的阈值 T 均设定为 0.02. 假设光场采集系统的密度为 1.0, 随机孔径密度变化范围应在 (0, 8, 1.0) 之间, 采样次数 m 应不小于 100 次. 另外, 光场图像绘制的尺度变化范围为 $l \in [0, 4]$ 级, 0 级为当前图像尺度, 图像绘制分辨

率随尺度增加依次降低. 本文方法的不足之处在于绘制效率不高, 主要原因是混叠区域的检测与多尺度图像融合求解泊松方程计算量较大. 目前, 对于分辨率为 512×512 的单帧图像, 本文方法绘制时间约为 5 s, 尚无法满足实时绘制要求. 未来工作中, 将考虑采用 GPU 并行加速来提高绘制的效率.

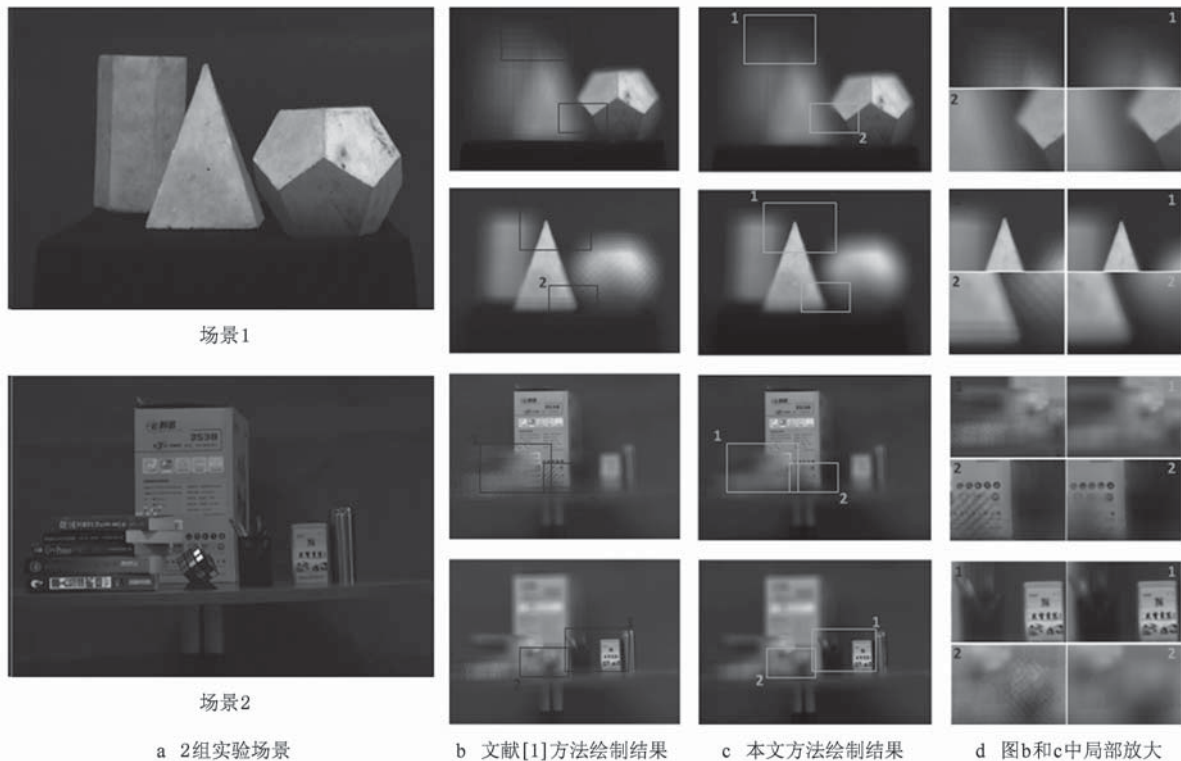


图 10 真实场景光场成像绘制结果对比

5 结 论

针对传统光场聚焦成像方法存在明显的图像混叠问题, 本文在光场采样空间分析了图像分辨率与混叠效应的关系, 并在简化的光场双平面模型框架下给出了光场采样与图像混叠的数学模型. 在此基础上, 本文提出了一种多尺度的抗混叠绘制方法. 该方法在假设无深度先验条件下, 能够有效地减缓光场成像的混叠效应, 绘制结果与已知深度方法^[19]的绘制结果相近, 明显优于文献[1]方法的绘制结果. 但是, 由于混叠检测与多尺度图像融合所需计算量较大, 本文方法目前尚无法满足实时绘制要求.

参考文献 (References):

- [1] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1996: 31-42
- [2] Gortler S J, Grzeszczuk R, Szeliski R, *et al.* The lumigraph [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1996: 43-54
- [3] Ng R. Fourier slice photography [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2005: 735-744
- [4] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C] //Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2009: 1-8
- [5] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, *et al.* High performance imaging using large camera arrays [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2005: 765-776
- [6] Vaish V. Synthetic aperture imaging using dense camera arrays [D]. Stanford: Stanford University, 2007
- [7] Levin A, Fergus R, Durand F, *et al.* Image and depth from a conventional camera with a coded aperture [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2007: Article No. 70

- [8] Zhou C Y, Lin S, Nayar S K. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 93(1): 53-72
- [9] Chang Lei, Yuan Yan, Zhang Xiubao, *et al.* Research on sampling and computer simulation of mask-based light field photography [J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 1104-1110 (in Chinese)
(常 雷, 袁 艳, 张修宝, 等. 基于掩膜的光场成像仿真及采样研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(6): 1104-1110)
- [10] Levoy M. Light fields and computational imaging [J]. *Computer*, 2006, 39(8): 46-55
- [11] Suo J L, Ji X Y, Dai Q H. An overview of computational photography [J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 55(6): 1229-1248
- [12] Liang C K, Liu G, Chen H H. Light field acquisition using programmable aperture camera [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2007: 233-236
- [13] Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, *et al.* Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2007: Article No. 69
- [14] Green P, Sun W Y, Matusik W, *et al.* Multi-aperture photography [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2007: Article No. 68
- [15] Agrawal A, Veeraraghavan A, Raskar R. Reinterpretable imager: towards variable post-capture space angle and time resolution in photography [J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 763-772
- [16] Isaksen A, McMillan L, Gortler S J. Dynamically reparameterized light fields [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2000: 297-306
- [17] Stewart J, Yu J, Gortler S J, *et al.* A new reconstruction filter for undersampled light fields [C] // *Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2003: 150-156
- [18] Bishop T E, Favaro P. The light field camera: extended depth of field, aliasing, and superresolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5): 972-986
- [19] Yu X, Wang R, Yu J Y. Real-time depth of field rendering via dynamic light field generation and filtering [J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(7): 2099-2107
- [20] Vaish V, Levoy M, Szeliski R, *et al.* Reconstructing occluded surfaces using synthetic apertures: stereo, focus and robust measures [C] // *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2006, 2: 2331-2338
- [21] Perez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2003: 313-318