

基于随机遮挡孔径的光场图像混叠检测方法

肖照林¹ 王庆¹ 杨恒¹ 周果清¹

摘 要 现有光场采集系统存在角度信息欠采样的问题,由此引起的图像混叠效应降低了光场图像质量.本文在 2D 光场框架下分析了光场图像混叠的空域模型,并且提出一种变换离散孔径采样密度的混叠检测方法.该方法通过计算随机遮挡孔径(Random masked aperture, RMA)成像点集的变异系数进行混叠检测,特点在于无需已知场景深度和纹理的先验信息.以平面相机阵列为采集平台,本文在多组真实光场数据集上进行了方法的验证,并且在检测结果基础上对混叠效应进行了修正.

关键词 光场成像,混叠检测,相机阵列,随机遮挡孔径

引用格式 肖照林,王庆,杨恒,周果清.基于随机遮挡孔径的光场图像混叠检测方法,2014,40(2):247–254

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00247

Aliasing Detecting of Light Field Images Based on Random Masked Aperture

XIAO Zhao-Lin¹ WANG Qing¹ YANG Heng¹ ZHOU Guo-Qing¹

Abstract In a light field imaging system, the angular down-sampling problem will lead to severe aliasing effects, which can significantly deteriorate the quality of a light field image. To address this problem, first we model the causes of aliasing effects in a 2D light field framework. Then, we propose a random masked aperture (RMA) based aliasing detecting algorithm. We use the coefficient of variations of imaging set derived from random masked aperture as an aliasing metric. Most importantly, the proposed algorithm is free of depth estimation and texture independent. We have validated the proposed algorithm on several groups of real light field datasets, which are acquired by using a planar camera array system. Finally, we alleviate the aliasing artifacts by employing the detecting results.

Key words Light field imaging, aliasing detecting, camera array, random masked aperture (RMA)

Citation Xiao Zhao-Lin, Wang Qing, Yang Heng, Zhou Guo-Qing. Aliasing detecting of light field images based on random masked aperture. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(2): 247–254

近年来,以 4 维光场获取为基础的光场成像技术得到研究人员的广泛关注.光场理论与计算机视觉、计算机图形学相结合,形成了一系列新的数字化成像方法.目前,用于获取光场数据的设备主要有光场相机^[1–2]、相机阵列^[3–4]、可编程孔径光场相机^[5–6]等.由于光场数据集具有更高的信号维度,因此,光场成像能够获得传统成像方法无法实现的效果,如聚焦点变换、视点转换、景深调整^[7–10].然而,现有系统获取的光场数据角度采样率不足,由此引起的混叠效应严重降低光场图像质量,如图 1 所示.因此,光场图像混叠的检测和去除,成为该领域

的一个热点问题.造成光场图像混叠的本质原因是光场角度信号的采样不足. Chai 等在频域分析了光场采样特性,指出影响光场图像混叠的因素包括场景深度、场景纹理分布、光场图像渲染分辨率以及光场角度采样率^[11]. Isaksen 等提出一种光场动态重参数化方法用于渲染场景不同焦深的效果,他们采用增大采集设备孔径的方法分离图像混叠成分^[12]. Stewart 等提出一种二次滤波方法来渲染光场图像,其原理是将大孔径高频重建结果与相应低频模板叠加以分离和缓解图像混叠^[13].在通常情况下,增大孔径会引起光场角度采样密度的降低,从而使图像混叠现象更加明显.假设在不改变采样密度的前提下增大孔径尺寸,又将导致采集设备成本与系统设计难度的提升,限制了上述方法的应用. Levin 等通过分析不同光场获取设备的特性,提出了光场采集分辨率与图像质量的折衷问题^[14].在不改变孔径大小的情况下, Gortler 等利用场景深度估计点扩散函数,通过光场重渲染避免图像混叠^[15].针对聚焦型光场相机, Georgiev 提出一种基于深度的光场渲染方法^[16]. Bishop 等提出一种基于深度估计的贝叶斯迭代抗混叠算法^[10,17],其中,混叠成分检测和剔除仍需估计场景深度.上述方法虽然能够降低光场图

收稿日期 2013-05-07 录用日期 2013-10-08

Manuscript received May 7, 2013; accepted October 8, 2013

国家自然科学基金(61103060, 61272287),教育部博士点基金(20116102110031),虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金(BUAA-VR-12KF-02)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61103060, 61272287), Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20116102110031), and Open Fund of the State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and System (BUAA-VR-12KF-02)

本文责任编辑 章毓晋

Recommended by Associate Editor ZHANG Yu-Jin

1. 西北工业大学计算机学院 西安 710072

1. School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

像混叠效应,但是都要求解或已知场景深度,因此,在实际应用中受制于深度估计的精度.由于相机阵列式光场成像系统角度采样稀疏性较强,因此,其成像混叠现象更为严重.而现有减缓混叠现象的方法大多依赖于场景深度信息作为先验,尚无有效的空域混叠检测方法.因此,本文首先在光场双平面模型基础上建立了空域光场图像混叠模型,并分析了影响混叠的各种因素.随后,本文提出一种基于随机遮挡孔径(Random masked aperture, RMA)的光场图像混叠检测方法.该方法以 RMA 成像点集变异系数为混叠测度,特点在于无需求解场景深度信息.最后,本文在相机阵列成像数据集上进行了图像混叠的检测,并利用检测结果进行了光场图像重渲染,渲染结果反映了本文提出的方法对混叠区域检测的可行性与有效性.

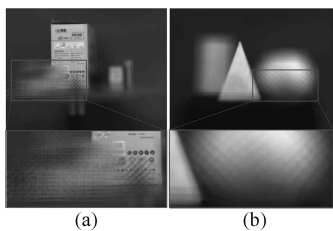


图 1 光场图像的混叠效应

Fig. 1 Aliasing artifacts of light field imaging

1 光场成像原理与图像混叠模型分析

光线传输信号可以用一个 7 维的全光函数 $f(v_x, v_y, v_z, \theta, \phi, \lambda, t)$ 表示^[18],任何成像过程都可以看作对空间中光线传输信号的采样过程.其中, (v_x, v_y, v_z) 代表三维空间点, (θ, ϕ) 代表光线入射角, λ 代表波长, t 代表时间维度.不考虑光线时变特性以及直线传输变化,Levoy 等^[9]和 Gortler 等^[15]提出空间中任意光线可以由 4 维的双平面模型唯一确定.如图 2(a) 所示,图像平面用 UV 平面表示,相机平面用 ST 平面表示,则任意光线 r 可以用 $r(u, v, s, t)$ 进行参数化,因此,光场成像过程是对双平面光场数据的一次采样过程.如图 2(b) 所示,对点 P 成像需要索引并累加双平面内穿过该点的所有光线.如果成像点的位置发生变化,则光线索引结果不同,如点 O 在 UV 平面索引结果与点 P 有明显差异.这一光线索引过程又称为光场重聚焦^[1, 4].由于光场重聚焦是一个计算过程,因而在光场获取后通过变换聚焦平面能够实现不同焦深的聚焦效果,这也是光场相机先拍摄后聚焦的原理所在.

最早提出利用相机阵列实现光场成像的是 Stanford 大学的研究人员,他们称之为合成孔径成像(Synthetic aperture photography, SAP)^[1].假设相机阵列中每台相机符合针孔成像模型,相机数

量即为光场角度采样数.与真实孔径对角度信号的连续采样不同,虚拟孔径相机的角度采样信号是离散的,如图 3 所示.

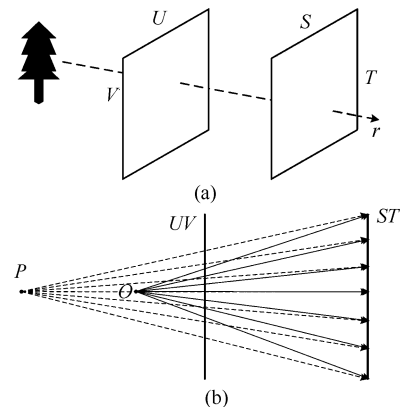


图 2 光场重聚焦原理示意

Fig. 2 An illustration of of light field refocus

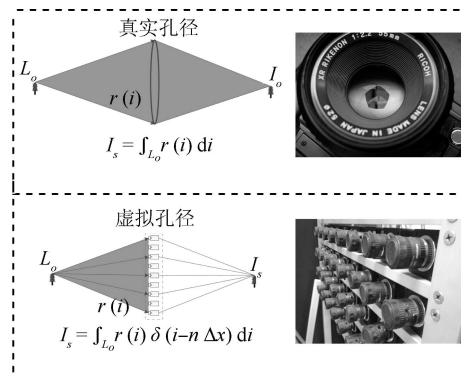


图 3 虚拟孔径与真实孔径对比

Fig. 3 The comparison between synthetic aperture and real aperture

假设入射光线集用 L_o 表示,则真实孔径的成像点 I_o 可以用 L_o 的累加表示, $I_o = \int_{L_o} r(i) di$, 其中, $r(i)$ 表示一条入射光线, i 是表示光线索引的连续变量.相应的,虚拟孔径的成像模式可以表示为

$$I_s = \int_{L_o} r(i) \delta(i - n\Delta x) di \quad (1)$$

其中, I_s 表示光场成像点, $\delta(\cdot)$ 是 Dirac's delta 函数, Δx 表示采样间隔.针对相机阵列采样的特点,本文用 Kronecker delta 函数替换式 (1) 中的 $\delta(\cdot)$, 这并不改变相机阵列采样本质.因此,相机阵列光场成像点可以表示为以下离散形式.

$$I_s = \sum_{r(i) \in L_o} r(i) \delta_k(i - n\Delta x) = \sum_{r(i) \in L_o} r(i) - \sum_{r(i) \in L_o} r(i) \bar{\delta}_k(i - n\Delta x) \quad (2)$$

其中, 角度降采样函数定义为

$$\delta_k(i - n\Delta x) = \begin{cases} 1, & i - n\Delta x = 0 \\ 0, & i - n\Delta x \neq 0 \end{cases}$$

$$\bar{\delta}_k(i - n\Delta x) = \begin{cases} 0, & i - n\Delta x = 0 \\ 1, & i - n\Delta x \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

因此, 离散光场成像是原始光场角度信号的降采样过程, 降采样后的成像点与原始光场成像点满足下列关系:

$$I_s = I_o - I_o \bar{\delta}_k(\cdot) + \varepsilon \quad (4)$$

其中, ε 是成像系统的噪声. 由式 (4) 可以看出 $\bar{\delta}_k$ 是导致光场成像 I_s 与传统光学孔径成像 I_o 差异的关键. 由于角度降采样对成像的影响远大于成像噪声, 因此, 本文暂不考虑成像噪声的影响. 为了简便起见, 本文采用 2D 光场框架分析角度降采样模型^[19], 分析结果容易推广至 4D 光场.

首先, 我们定义光场角度采样倍率 $R = S_a/S_e$, 其中, S_e 为预期角度采样密度, S_a 为实际角度采样密度, 即相机平面采样密度. 如图 4 所示, t 平面表示相机平面, v 平面表示图像平面. 假设 t_0 表示相机阵列的参考相机, 其主轴为虚拟孔径的主轴. 多台相机 t_x 均匀分布于相机 t_0 和 t_a 之间, A 表示虚拟孔径大小.

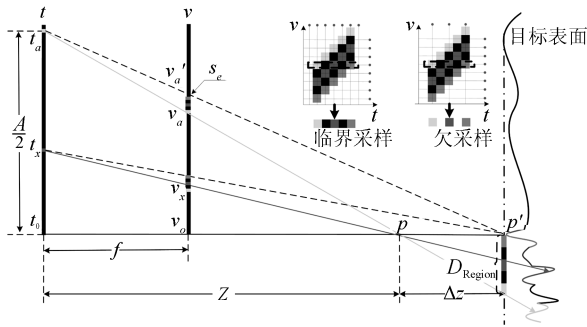


图 4 光场角度采样分析

Fig. 4 Angular sampling analysis in 2D light field

现将虚拟孔径聚焦于空间点 p , 点 p 至参考相机的距离为 Z , 成像平面与相机平面距离为 f , 即成像焦距. 如果点 p 不是一个实际物点, 则聚焦于 p 点的光线将来自于其后 ΔZ 位置的任意目标表面区域 D_{Region} , 如图 4 中表面区域所示. 该区域边界由相机 t_0 和 t_a 与点 p 的延长线 $\overline{t_0 p}$ 和 $\overline{t_a p}$ 所决定. 在双平面模型中区域 D_{Region} 在相机 t_a 图像平面的覆盖区域为 $|v_a - v'_a|$. 根据光场成像理论, 点 p 在 t_a 中的像点坐标为

$$v_a = v_0 - \frac{f}{Z}(t_a - t_0) = v_0 - \frac{fA}{Z} \quad (5)$$

进而推导出

$$|v_a - v'_a| = fA \frac{\Delta Z}{Z^2 + Z\Delta Z} \quad (6)$$

若目标平面符合朗伯体假设, 在相机平面任取 $t_x \in [t_0, t_a]$, 则点 p 在 t_x 上的像点相当于在 v_a 与 v'_a 之间进行区域采样. 当采样相机数大于 $|v_a - v'_a|$ 所含像素数时, 合成图像点 I_s 与散焦点 p 在相机 t_a 中所成的像相同, 即扩散效应与在 t_a 上低通滤波的结果相等. 这种临界情况下, 不存在角度降采样引起的光场图像混叠, 如图 4 右上子图像所示. 此时的采样密度为 $|v_a - v'_a|/A$, 即 $S_e = |v_a - v'_a|/A$. 注意到, 上述推导并未考虑场景中纹理对预期采样密度造成的影响, 为了确保公式的完整性, 还应该在预期采样密度中加入纹理因子 α_t , 则最终预期角度采样密度 $S_e = \frac{|v_a - v'_a|}{A} \alpha_t$. 由此, 角度采样倍率 R 可以改写为

$$R = S_a \frac{1}{f} \frac{Z^2 + Z\Delta Z}{\Delta Z} \frac{1}{\alpha_t} \quad (7)$$

进一步分析式 (7), 我们认为光场角度采样倍率 R 由采样系统特性 S_a/f 以及场景特性 $\frac{Z^2 + Z\Delta Z}{\Delta Z} \frac{1}{\alpha_t}$ 共同作用决定. 显然, 光场图像混叠发生的条件为

$$R = \begin{cases} \frac{S_a}{S_e} < 1, & \text{混叠} \\ \frac{S_a}{S_e} \geq 1, & \text{非混叠} \end{cases} \quad (8)$$

由于 R 与式 (4) 采样条件 $(i - n\Delta x)/i$ 具有相同含义, 当且仅当 $\Delta x = 0$ 即 $(i - n\Delta x)/i = 1$ 时, 不存在混叠. 因此, 式 (4) 的另一种形式可以表示为

$$I_s = I_o - I_o \varphi(R) + \varepsilon \quad (9)$$

其中, $\varphi(R)$ 是依据 R 的降采样函数. 上述光场成像的空域分析与文献 [11] 中频域分析得出的结论一致, 光场角度降采样的决定因素包括图像平面分辨率 (由 f 决定)、相机平面的采样密度 S_a 、场景深度信息 $(Z^2 + Z\Delta Z)/\Delta Z$ 和场景纹理因素 $1/\alpha_t$. 以下几点从空域解释了满足 $R \geq 1$ 的条件, 即避免光场图像混叠的几种可能情况.

1) 当 $\Delta Z = 0$ 时, 角度采样倍率将总是满足无混叠的条件. 当 $\Delta Z = 0$, 意味着目标场景距离虚拟聚焦平面的距离为 0. 因此, 光场角度混叠效应只可能存在于图像的散焦区域, 聚焦区域不存在角度混叠效应.

2) 当光场角度采样数足够大 (真实孔径), 或者孔径 A 足够小 (针孔模型) 时, 则有 $S_a \rightarrow +\infty$, 进而可以满足非混叠条件.

3) 当相机平面与图像平面足够接近, 即 $f \rightarrow 0$ 时, 可以避免混叠效应. 显而易见, 当 $f \rightarrow 0$ 时, 光场图像分辨率很低, 接近相机数量.

4) 当 $\alpha_t \rightarrow 0$ 时, 由于场景纹理平滑, 因此, 可以避免图像混叠. 假设有一面缺乏纹理特征的墙面, 即使合成孔径聚焦面不在墙面, 也不会发生图 1 所示的混叠现象.

然而在真实光场成像过程中, 上述 4 种因素是综合对图像混叠产生影响的. 现有依赖于先验深度信息的方法都假设式 (7) 中的场景信息 $\frac{Z^2 + Z\Delta Z}{\Delta Z} \frac{1}{\alpha_t}$ 已知, 因此, 可以通过调整聚焦面使所有像素点的聚焦位置满足 $\Delta Z = 0$, 产生全景深清晰 (All-in-focus) 的光场图像, 并且渲染不同焦深和景深的图像效果. 不同于基于场景先验信息的方法, 本文提出一种基于随机遮挡孔径的图像混叠检测方法.

2 光场图像混叠检测方法

在相机阵列成像焦距、孔径直径固定的情况下, 对于纹理、深度已经确定的特定场景, 我们可以假设预期角度采样密度 S_e 是确定常量. 因此, 角度采样倍率 R 将随实际角度采样密度 S_a 不同而改变, 进而引起光场成像点变化. 在深度、纹理等信息未知且无法准确估计角度采样倍率 R 的情况下, 本文提出以成像点变化作为预测 R 的线索, 避免 S_e 求取过程依赖场景深度的问题. 这是因为判断图像混叠只需探寻 S_a 与 S_e 的相对关系, 即 R 是否大于 1, 无需求取 S_e 和 R 的准确值.

针对相机阵列系统, 不同离散采样模式的采样密度不同. K 台相机所有可能的组合方式有 2^K 种, 其所在的离散采样密度空间定义为 S . 任取一种采样密度 $s_x \in S$, 如果 $s_x < S_e$ 则 $R < 1$, 存在角度混叠效应, 反之则不存在混叠, 如图 5 所示. 稀疏斜线区域 A_u 代表图像混叠欠采样区域 ($R < 1$), 密集斜线区域 A_o 代表非混叠过采样区域 ($R \geq 1$). 在式 (9) 中, 当 $R < 1$ 欠采样条件下, R 的变化将引起混叠项 $I_o\varphi(R)$ 的改变. 在过采样 $R \geq 1$ 的条件下, 降采样函数 $\varphi(R)$ 趋近于 0, 进而 $I_o\varphi(R)$ 趋近于 0. 在噪声影响不显著的条件下, 依据式 (9) 有 $I_s \approx I_o$. 由此, 可以得出以下推论.

推论 1. $\forall s_{x_1}, s_{x_2} \in A_o$, 如果 $I_s(s_{x_1})$ 和 $I_s(s_{x_2})$ 代表同一位置在采样密度 s_{x_1} 和 s_{x_2} 下的光场成像点, 则 $|I_s(s_{x_1}) - I_s(s_{x_2})| \leq 2\varepsilon$.

当 $s_{x_1} = s_{x_2}$ 且 $s_{x_1} \in A_o$ 时, 上述推论同样成立, 即当采样密度相同而相机空间分布不同时, 光场成像点也近似相同. 由此, 我们定义光场图像混叠检测模型如下.

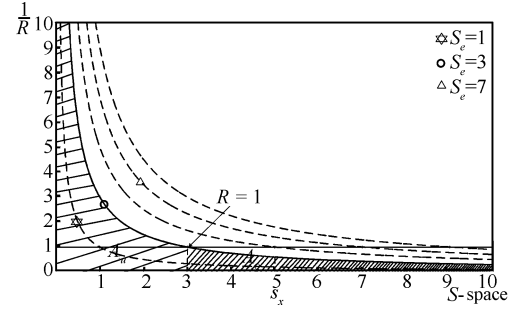


图 5 相机阵列采样密度空间示意

Fig. 5 An illustration of sampling-density-space of an camera array system

定义 1 (混叠检测模型). 对于给定的采样密度 s_{x_0} , 如果 $\exists I_s^i(s_{x_0}), I_s^j(s_{x_0})$, 使得 $|I_s^i(s_{x_0}) - I_s^j(s_{x_0})| > 2\varepsilon$ 则 $s_{x_0} \in A_u$. 其中, $I_s^i(s_{x_0})$ 表示在采样密度 s_{x_0} 下的一个光场成像观测量, i, j 表示不同的孔径分布方式.

如果将 s_{x_0} 设定为相机阵列采样密度 S_a , 由于相机阵列结构限制, 无法穷举采样密度 s_{x_0} 的所有可能相机排布. 因此, 本文适当松弛目标采样密度下限至 $(1 - \gamma)s_{x_0} \leq s_x \leq s_{x_0}$, γ 为松弛因子. 松弛后的成像观测量空间可以表示为 $P(s_{x_0}, \gamma) = \{I_s^i(s_x) | (1 - \gamma)s_{x_0} \leq s_x \leq s_{x_0}, i = 1, 2, 3, \dots\}$, 满足 $|P(s_{x_0}, \gamma)| = C_{s_{x_0}}^{(1-\gamma)s_{x_0}}$. 显然, 穷举光场成像观测量的方法计算量过大. 本文随机选取 P 的子集 $M = \{I_s^i(s_x) | I_s^i(s_x) = \text{random}_i(P(s_{x_0}, \gamma)), i = 1, 2, \dots, n\}$, 测量 M 的变化程度作为空间 P 中成像观测量总体变化的估计, 以降低计算代价. 根据韦伯定律 (Weber's law), 人眼对灰度变化感知不仅与灰度变化的强度相关, 还与背景灰度强度相关. 比如, 在黑色背景的图像上, 轻微灰度变化就可以轻易观测到; 而在高亮度图像上, 人眼对同样的灰度变化就不太敏感. 因此, 本文采用变异系数 C_v 度量集合 M 变化的可感知程度.

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_s^i(s_x) - \bar{I}_s(s_x))^2}}{\bar{I}_s(s_x)} \quad (10)$$

其中, $\mu = \bar{I}_s(s_x)$ 代表集合 M 中观测量的均值, σ 代表集合 M 中观测量的标准差. 对于给定的阈值 T , 如果 $C_v > T$, 则认为成像点随采样密度变化明显, 此时, $S_a \in A_u \Leftrightarrow R < 1$, 即成像点存在混叠. 反之, 则 $S_a \in A_o \Leftrightarrow R \geq 1$, 成像点不存在混叠. 对光场图像所有像点应用上述检测方法求取的混叠像素点集合即为光场图像混叠区域, 其求取混叠区域的具体流程如图 6 所示.

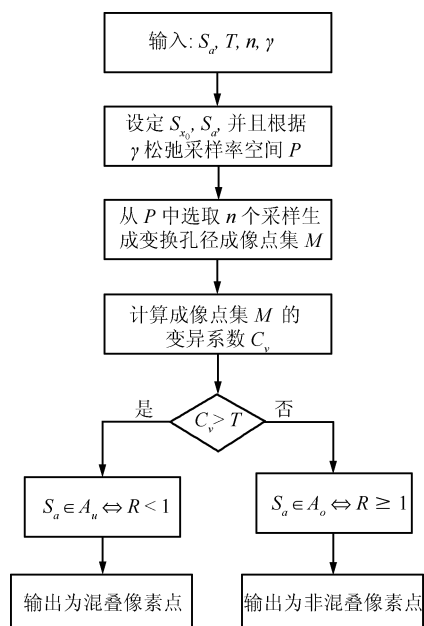


图 6 光场图像混叠检测流程

Fig. 6 A flow chart of light field aliasing detecting

3 混叠检测实验与讨论

为了获取空间中真实的光场数据, 本文搭建了一个 8×8 的平面相机阵列做为光场采集系统. 在进行虚拟孔径聚焦成像之前, 需要首先对相机阵列进行较高精度的参数标定. 由于相机阵列位置固定, 因此, 本文未采用自标定方法^[20] 估计相机参数, 而采用了传统张氏标定法^[21]. 标定后相机阵列的光场采集过程如图 7(a) 和 7(c) 所示, 每幅子图像代表一个角度的采样. 利用虚拟孔径聚焦方法合成光场图像如图 7(b) 和 7(d) 所示.

图 7(b) 的聚焦平面在盒子正面, 而远离该平面的目标变得模糊, 由于角度欠采样, 模糊区域出现了明显的条纹状混叠现象, 图 7(d) 与之类似. 这符

合之前的分析, 光场图像混叠只出现于散焦区域, 而聚焦区域由于 $\Delta Z = 0$, 因此, 不存在角度欠采样问题. 图 7(e) 给出了随机孔径选取的示意, 白色格子代表选中的有效相机. 图 7(f) 和 7(g) 分别给出了图 7(b) 和 7(d) 中 5 个混叠点与 5 个非混叠点的 100 组随机孔径成像结果 (圆框代表混叠点, 方框代表非混叠点), 可以看出混叠点的随机孔径成像具有明显的变化.

本文方法中松弛因子 γ 对混叠检测影响较大, 如图 8 所示, 图 8 中检测结果的亮度代表归一化后的测度 C_v 值. 当 γ 取值较小时, 随机孔径采样密度的变化较小, 此时, 角度采样倍率 R 的波动也较小, 因此, 对混叠区域的区分性能较弱, 如 $\gamma = 0.05$ 时, 两组数据都存在混叠区域的漏检现象; 反之, 当 γ 取值过大又会导致混叠区域错检, 这是因为采样倍率 R 波动过大会引入更低采样倍率的图像混叠, 如 $\gamma = 0.5$. 经过实验, 本文建议 γ 选取在 0.2 左右能够取得较准确的检测结果, 即随机孔径密度变化在 20% 范围内. 同时, 由于随机采样次数的不同, 混叠检测结果也有一定差异. 显然, 随机采样次数越多则检测结果越接近精确, 而其逼近精确解的过程并非线性, 随着采样次数的增加, 检测结果变化明显减弱, 如图 9 所示. 图 10 是 4 组不同数据集中 n 值与邻近 $n - 1$ 值混叠检测结果的差异量化结果, 可以看出超过 100 次随机采样的检测结果差异低于 5%. 因此, 在本文 8×8 相机阵列系统条件下, 随机孔径采样次数 n 应大于 100 次, 不同的光场采集系统由于自身采样密度差异应有一定的区别. 另外, 本文中阈值 T 影响混叠检测算法对于亮度变化的敏感性, T 值越小检测算法越准确, 但是抗噪声的能力越差. 实验过程中, 本文将阈值 T 设定为经验值 0.02, 即当成像点集变化的标准差大于区域平均亮度 2% 则认为变化明显, 任何小于该阈值的变化都假设是由

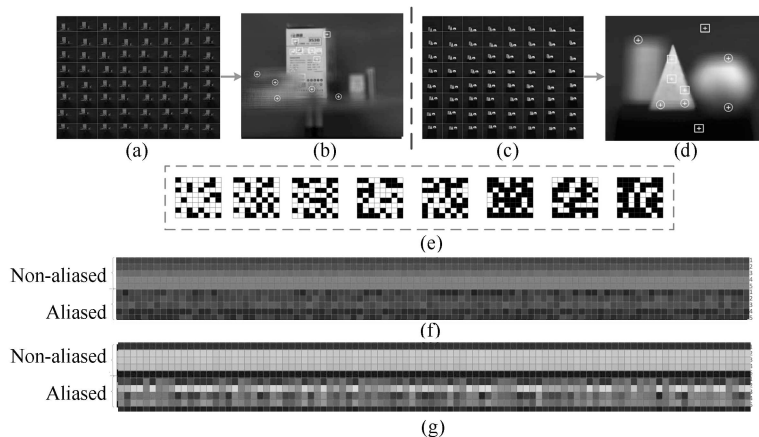


图 7 混叠点与非混叠点变孔径成像对比

Fig. 7 Comparison of random aperture imaging between aliasing and non-aliasing points

系统噪声引起的。

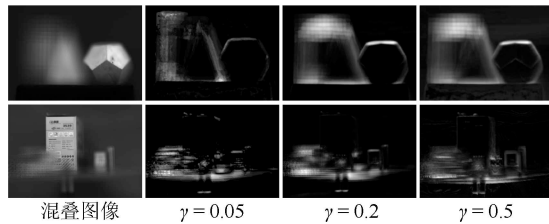


图 8 γ 值选取对混叠检测的影响比较

Fig. 8 The affects of different γ setting in aliasing detecting

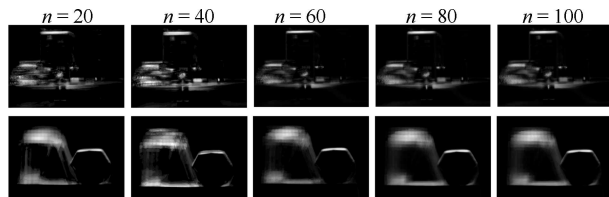


图 9 随机孔径采样数量 n 对检测结果的影响

Fig. 9 The affects of different n setting in aliasing detecting

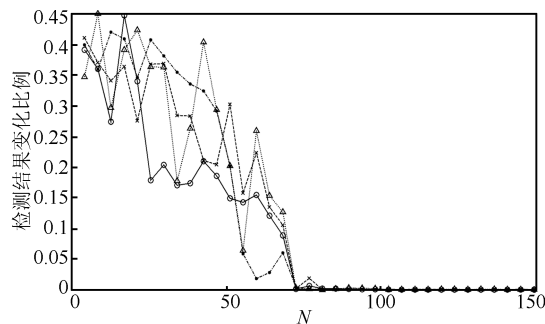


图 10 4 组不同数据集中 n 值与邻近 $n-1$ 值混叠检测结果的差异

Fig. 10 The difference of aliasing detection within n and $n-1$ from four data sets

依据第 2 节中对式 (7) 的分析, 降低光场图像分辨率能够有效降低混叠效应. 因此, 在上述混叠检测结果的基础上, 本文进行抗混叠光场渲染实验. 首先, 本文对光场 UV 平面进行降采样操作以降低其分辨率, 再采用文献 [4] 中的合成孔径成像方法得到大尺度低分辨率光场图像. 进而, 为了用大尺度图像对应区域替换检测到的混叠区域, 本文采用双线性插值法提升大尺度图像分辨率至原始光场分辨率. 由于本文重点在于光场混叠的检测, 而混叠区域替换融合的方法较多, 如文献 [22–23] 中的方法, 故本文不做重点讨论. 最终, 在混叠区域替换过程中, 本文采用文献 [23] 中梯度域泊松融合方法, 以克服不同尺度图像间总体亮度不一致的问题. 在光场 UV 平面降分辨率过程中, 本文实验采用水平和垂直方

向各 4 倍降采样以降低混叠效应, 由于假设深度未知, 因此, 本文方法渲染的模糊与基于深度方法渲染的模糊存在一定差异.

图 11 中对两组真实场景分别给出了两种不同焦平面设定的情况及其混叠检测结果. 中间两列对采用本文方法进行混叠修正后的结果与原始结果进行了对比. 混叠修正结果明显缓解了光场成像的混叠效应, 无混叠区域并未改变, 这也说明了检测结果的准确性. 由于真实场景高精度的深度信息获取困难, 因此, 本文在虚拟数据基础上对比了本文方法与现有方法的渲染结果. 如图 12 中所示的虚拟场景 (a1), (b1), 对于给定两个不同的对焦平面 (a2), (b2) 采用本文方法进行检测的结果如 (a3) 和 (b3) 所示. 图 12 中 (c1) 和 (d1), (c2) 和 (d2), (c3) 和 (d3) 分别是采用基于深度的渲染方法, 文献 [9] 中预滤波算法及本文算法的渲染结果. 图 12 中 (a4), (a5) 和 (b4), (b5) 分别为前两种方法渲染结果与本文方法渲染结果的差异图像. 虽然本文方法结果与基于深度方法的结果相比, 在散焦区域存在差异, 但是整体渲染效果明显优于文献 [9] 中的方法, 更重要的是本文方法对原始结果的改变主要集中于图像的模糊部分, 而对于聚焦区域的清晰细节没有影响, 而基于光场预滤波的方法则会使聚焦区域的细节变得模糊. 本文方法同样存在以下局限性: 本文检测算法中对于成像点变化的阈值 T 及 UV 平面降采样倍率的经验性选取; 本文方法需要对相机阵列采样密度检测范围做适当的松弛, 松弛因子选择面临检测精度和鲁棒性的矛盾.

4 结论

针对角度欠采样导致的光场图像混叠问题, 本文首先分析了混叠效应与成像系统、目标场景之间的空域关系. 在此基础上, 本文指出改变孔径采样密度会引起光场成像的变化, 而这种变化表现了光场角度预期采样密度与实际采样密度的关系, 即光场角度采样倍率大小. 由此, 本文提出一种基于随机遮挡孔径的光场图像混叠空域检测方法. 该方法特点在于无需场景深度及纹理作为先验信息. 本文在以相机阵列为采集平台获取真实光场数据的基础上, 利用提出方法对光场图像混叠进行了检测, 实验结果表明了本文提出方法的有效性和准确性. 为了进一步说明该方法对于提高相机阵列光场成像质量的基础作用, 本文利用混叠检测结果进行了光场图像重渲染的初步实验, 并与基于深度的渲染方法及现有光场预滤波方法进行了对比. 未来研究工作中, 作者将继续研究相关参数的自适应选择方法, 并且探寻更优的光场混叠图像重渲染方法.

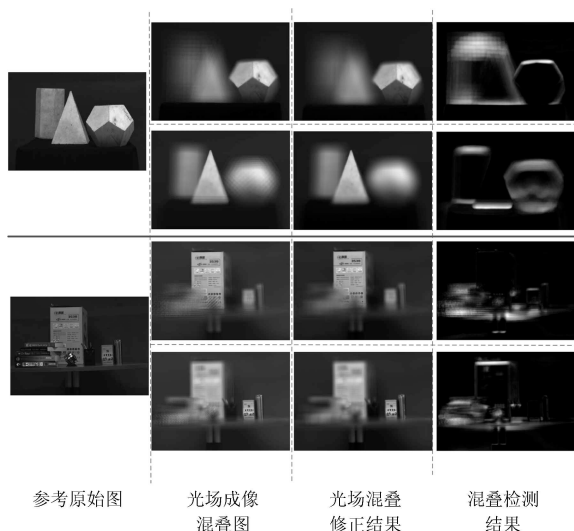


图 11 光场图像抗混叠渲染效果

Fig. 11 The results of light field aliasing reducing

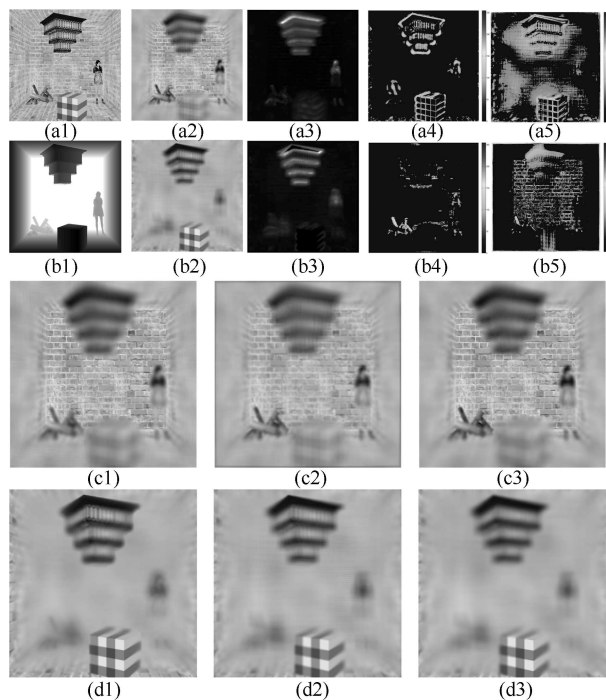


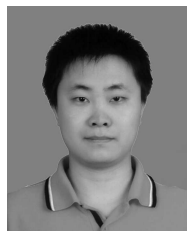
图 12 虚拟场景抗混叠渲染对比实验

Fig. 12 The aliasing reducing experiment on synthetic data sets

References

- 1 Ng R. Fourier slice photography. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH. New York, USA: ACM, 2005. 735–744
- 2 Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computational Photography. San Francisco, CA: IEEE, 2009. 1–8
- 3 Wilburn B, Joshi N, Vaish V, Talvala E, Barth A, Adam A, Horowitz M, Levoy M. High performance imaging using large camera arrays. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 765–776
- 4 Vaish V. Synthetic Aperture Imaging Using Dense Camera Arrays. [Ph.D. dissertation], Stanford University, USA, 2007
- 5 Levin A, Fergus R, Durand F, Freeman W T. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3), doi: 10.1145/1276377.1276464
- 6 Zhou C Y, Lin S, Nayar S K. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring. *International Journal of Computer Vision*, 2011, **93**(1): 53–72
- 7 Levoy M, Chen B, Vaish V, Horowitz M, McDowall I, Bolas M T. Synthetic aperture confocal imaging. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH. New York: ACM, 2004. 825–834
- 8 Liu Y, Dai Q, Xu W. A point-cloud based multi-view stereo algorithm for free-viewpoint video. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 2009, **16**(3): 407–418
- 9 Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering. In: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996. 31–42
- 10 Bishop T, Favaro P. The light field camera: Extended depth of field, aliasing, and superresolution. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(5): 972–986
- 11 Chai J X, Tong X, Chan S C, Shum H Y. Plenoptic sampling. In: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. 307–318
- 12 Isaksen A, McMillan L, Gortler S J. Dynamically reparameterized light fields. In: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press and Addison-Wesley Publishing Co., 2000. 297–306
- 13 Stewart J, Yu J, Gortler S J, McMillan L. A new reconstruction filter for undersampled light fields. In: Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering. Switzerland, Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2003. 150–156
- 14 Levin A, Freeman W T, Durand F. Understanding camera trade-offs through a Bayesian analysis of light field projections. In: Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision: Part IV. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 88–101
- 15 Gortler S, Grzeszczuk R, Szeliski R, Cohen F. The lumigraph. In: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996. 43–54
- 16 Georgiev T, Lumsdaine A. Reducing plenoptic camera artifacts. *Computer Graphics Forum*, 2010 **29**(6): 1955–1968

- 17 Bishop T E, Favaro P. Plenoptic depth estimation from multiple aliased views. In: Proceedings of the 12th of the IEEE International Conference on Computer Vision (Workshops). Kyoto, Japan: IEEE, 2009. 1622–1629
- 18 Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 99–106
- 19 Liang C K, Shih Y C, Chen H H. Light field analysis for modeling image formation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011 **20**(2): 446–460
- 20 Meng Xiao-Qiao, Hu Zhan-Yi. Recent progress in camera self-calibration. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(1): 110–124
(孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展. 自动化学报, 2003, **29**(1): 110–124)
- 21 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330–1334
- 22 Liu Gui-Xi, Yang Wan-Hai. A wavelet-decomposition-based image fusion scheme and its performance evaluation. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(6): 927–934
(刘贵喜, 杨万海. 基于小波分解的图像融合方法及性能评价. 自动化学报, 2002, **28**(6): 927–934)
- 23 Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing. In: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH. New York: ACM, 2003. 313–318



肖照林 西北工业大学计算机学院博士研究生. 主要研究方向为光场理论, 计算摄影学, 三维重建.
E-mail: zlin.xiao@gmail.com
(**XIAO Zhao-Lin** Ph.D. candidate at the School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University. His research interest

covers light field theory, 3D reconstruction, and computational photography.)



王庆 西北工业大学计算机学院教授. 主要研究方向为计算机视觉, 图像与视频处理, 光场成像, 虚拟现实. 本文通信作者. E-mail: qwang@nwpu.edu.cn
(**WANG Qing** Professor at Northwestern Polytechnical University. His research interest covers computer vision, image and video signal processing, light field, and virtual reality. Corresponding author of this paper.)



杨恒 西北工业大学计算机学院博士后. 主要研究方向计算机视觉, 图像分类与图像检索.
E-mail: yh3191@gmail.com
(**YANG Heng** Postdoctor at the School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers computer vision, image classification and retrieval.)



周果清 西北工业大学计算机学院博士研究生. 主要研究方向为三维重建, 全局优化, 计算摄影术.
E-mail: zhouguoqing@nwpu.edu.cn
(**ZHOU Guo-Qing** Ph.D. candidate at the School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers 3D Reconstruction, global optimization, and computational photography.)