

doi:10.3788/gzxb20134212.1528

X 射线成像闪烁体的光场渲染

王小龙, 罗守华, 李光, 杨晶

(东南大学 生物科学与医学工程学院, 南京 210096)

摘要:提出了一种将数字光场成像技术应用到 X 射线闪烁体成像系统的方法. 分析了闪烁体的发光原理和光强分布, 设计了基于相机阵列的 X 射线光场成像系统, 并用计算机模拟了闪烁体发光模型并进行了仿真. 在 3ds Max 中采用相机阵列捕捉闪烁体发出的光线, 获取不同视角的图像, 合成了模拟微透镜阵列成像的光场数据, 通过数字重聚焦方法得到闪烁体不同发光平面的图像序列. 实验结果表明: 未采用光场成像技术的 X 射线光学成像系统, 景深较小, 只能使闪烁体的一部分聚焦, 其余部分会降低图像分辨率; 而利用光场成像技术, 在不改变光学系统基本结构的基础上, 扩大了光学系统的景深, 使整个闪烁体都在聚焦范围内, 可以减小对闪烁体厚度的要求, 获得比较好的图像质量, 为实际模型的建立提供理论依据.

关键词: 相机阵列; X 射线闪烁体; 3ds Max; 数字重聚焦; 光场成像

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1528-6

Light Field Rendering of Scintillator for X-Ray Imaging

WANG Xiao-long, LUO Shou-hua, LI Guang, YANG Jing

(School of Biological Science & Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A new method that combining digital light field photography technology with the X-Ray scintillator imaging system is proposed. The scintillation luminescence principle and light intensity distribution are analyzed, a X-Ray light field imaging system is designed based on camera arrays, and the scintillation luminescence model is simulated. Camera arrays in 3ds Max is used to capture the light from scintillator and get the images from different viewpoints. The light field data is generated that is similar to the data from microlens based system and get the images of arbitrary planes in the scintillator using the digital refocus algorithm. The simulation experiments show that X-Ray imaging system without using light field photography has a small depth of field; only a part of the scintillators are focused by optics and the defocused rest will decrease the image resolution; on the contrary, system with light field photography can extend the depth of field of the optical system to reduce the requirement of the scintillator thickness without changing the basic structure of the optical system; it can also get the image of the same resolution. The simulation provides theoretical basis for the establishment of real model.

Key words: Camera array; Scintillator for X-ray imaging; 3ds Max; Digital refocus; Light field Photography

0 引言

高分辨率 X 射线成像是一种无损检测方法, 近

年来被广泛的研究. 在 X 射线闪烁体光学成像系统中^[1], X 射线穿过物体, 由高分辨率探测器接收, 该探测器由闪烁体和光学系统构成. 通过闪烁体和显

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61127002, 61179035)和苏州市 2009 年科技计划工业专项项目(No. ZXG0918)资助

第一作者: 王小龙(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字光场成像技术. Email: mcgradycom@vip.qq.com

导师(通讯作者): 罗守华(1967-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为 Micro-CT 成像和数字图像处理. Email: luoshouhua@seu.edu.cn

收稿日期: 2013-05-02; 录用日期: 2013-06-05

微物镜的组合,大大提高了分辨率,可以达到 $1\ \mu\text{m}$ 以上,应用于 Micro-CT, Nano-CT 等. Crytur 公司研发了基于高分辨率薄闪烁体成像设备^[2],对要求闪烁体厚度在 $20\ \mu\text{m}$ 以下. 较厚的闪烁体可以对高能 X 射线有较高的吸收效率,但会造成图像模糊;较薄的闪烁体可以提高分辨率,却需要更长的照射时间. 市面上可以买到的闪烁体厚度一般在 $0.5\ \text{mm}$ 以上,如果要应用到高分辨率成像中,需要进行打磨,这对加工工艺要求很高.

Adelson 和 Wang 在全光相机单目立体视觉^[3]中介绍了基于针孔相机的单目立体视觉相机的原理,提出了全光理论(Plenoptic Thoery). 对光场的进一步参量化和光场渲染是 Marc Levoy^[4] 提出, Ren Ng 实现了基于微透镜阵列的手持光场相机^[5],原理简单,携带方便. Levoy 等搭建了光场显微镜捕捉微观物体的光场信息,可以进行三维重建^[6]. 袁艳等利用 Matlab 对基于掩膜的光场成像系统进行仿真^[7],研究了光场相机成像清晰度的评价方法^[8],并且对微透镜和探测器配准误差进行了分析^[9],这些工作对光场成像技术在国内的发展起到了巨大的作用.

本文提出了一种将光场成像技术应用到该系统的改进方法,捕捉闪烁体的光场信息,通过后处理还原图像,从而获取同样的 X 射线图像,大大减少对闪烁体厚度的要求. 建立了基于相机阵列的 X 射线闪烁体成像系统的光场成像模型. 在 3 ds Max 中模拟一个闪烁体发光场景,用相机阵列捕捉光场数据. 并通过计算机编程对光场数据进行了后处理.

1 X 射线闪烁体光场分析

基于光场成像的 X 射线闪烁体光学成像系统可分为两部分:X 射线闪烁体发光系统和基于相机阵列的光场成像系统.

1.1 X 射线闪烁体发光原理

1.1.1 可见光产生机制

闪烁体对 X 射线的吸收符合 X 射线和物质作用的过程:能量衰减、光电效应、康普顿效应、电子对效应等.

考虑一个 X 射线光子,入射到闪烁体中(图 1),

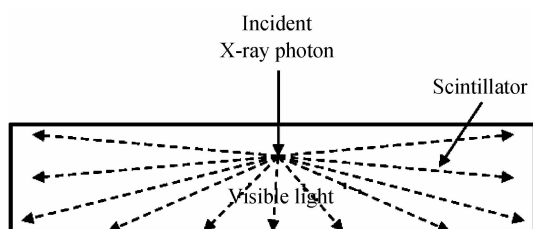


图 1 X 射线光子在闪烁体中产生可见光
Fig. 1 X-Ray photon converts to visible light

与闪烁体原子的轨道电子发生相互作用,把全部能量传递给了电子,光子消失,电子变成自由电子;原子轨道产生一个空位处于激发态,其通过发射标识 X 射线 (Characteristic X Rays) 或者俄歇电子 (Auger electrons) 的形式回到基态,就是光电效应.

就 CsI:Tl 而言,在室温条件下,吸收 $1\ \text{MeV}$ 的 X 射线光子,大约产生 $65\ 900$ 个可见光光子(波长接近 $560\ \text{nm}$)^[10]. 也就是说,每个 $1\ \text{MeV}$ 的光子,可以产生随机个数的可见光光子,他们的平均值为 $65\ 900$.

1.1.2 X 射线吸收剂量分布

文献[11]用蒙特卡洛仿真模拟了 X 射线在闪烁体中的吸收剂量分布,闪烁体中任意平面的光强度分布可以被看成是相同的,除了 X 射线衰减引起的幅度变化.

闪烁体的空间分辨率由沉积的 X 射线能量的空间分布决定. 次级过程也就是标识 X 射线和刺激电子,会在光子远离作用点的地方沉积能量,导致了分辨率的降低. Koch^[10]用笔形 X 射线束照射圆盘型 $100\ \mu\text{m}$ YAG 单晶. 结果表明,在圆形的击中区域,中心部分有较高的吸收剂量,随着距离的增加剂量降低. 半高宽显示主要的能量分布在 $100\ \text{nm}$ 以内,低于任何可见光光学系统的衍射极限,即不影响空间分辨率.

1.2 光场成像系统

图 2 是光场的 4D 参量化,从场景发出的一条光线相交于两个相互平行的平面, u, v 表示光线的方向信息, s, t 表示光线的位置信息.

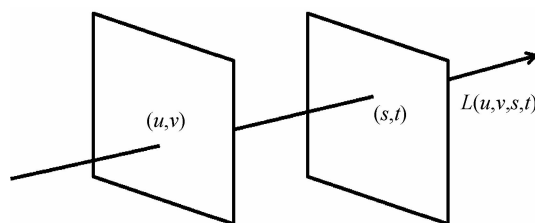


图 2 光场的 4D 参量

Fig. 2 4D parameterization of light field

图 3 是基于微透镜阵列的光场成像系统的原理

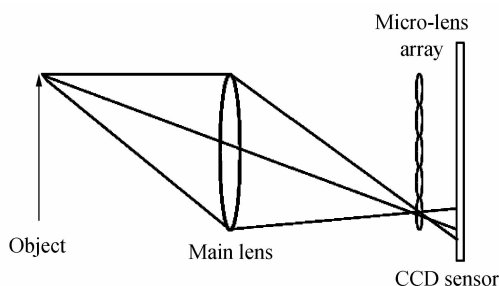


图 3 基于微透镜阵列的光场成像系统

Fig. 3 Light field system based on micro-lens array

图,由主透镜,微透镜阵列,图像传感器组成.主透镜将物体聚焦到微透镜阵列上,微透镜阵列将会聚的光线散射到后面的图像传感器上.每个微透镜下的图像描述了该位置的方向分辨率,为了最大化方向信息,需要更清晰的微透镜图像,所以将微透镜阵列放置在主透镜的焦平面,图像传感器放置在微透镜的焦平面上.

主透镜为 u, v 平面,微透镜阵列为 s, t 平面,每个微透镜下覆盖的像元可以看成是对主透镜孔径的采样.所以在本文中用相机阵列来模拟对主透镜的采样,捕捉闪烁体的光场数据.

1.3 X射线光场成像系统

图4是基于相机阵列的X射线光场成像系统模型,在光学系统的成像平面添加微透镜阵列,并且把图像传感器后移到微透镜的成像面上.X射线经过物体后产生衰减,照射到闪烁体上产生可见光,经过光学系统,最后成像在光场CCD(微透镜和CCD)上.由于闪烁体具有一定的厚度,故可以将其看做有一定景深的三维发光体.如图5中两点A,B分别来自闪烁体中不同深度的发光点.假设A点发出3条光线穿过主透镜上不同的位置最终会聚到微透镜平面,再由微透镜散焦,最后CCD接收到图像,容易得知,微透镜下每个像素点对应了主透镜上不同位置的光线.根据光学成像原理,经过主透镜上一个点,就可以在成像面得到一个清晰的像,但在透镜上不同的点成的像会存在视差.根据光学结构和视差,可以计算出A,B两点的深度信息^[12].

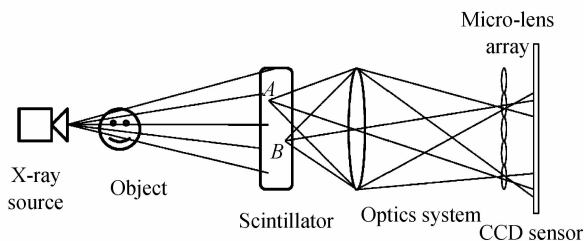


图4 X射线光场成像系统
Fig. 4 X-Ray light field image system

2 仿真模型设计

2.1 模型建立

基于微透镜的X射线光场成像系统是通过微透镜阵列记录了通过主透镜不同采样位置的图像信息,可以等效地看成是在光学系统的平面放置一个针孔相机阵列(图5).这样相机阵列平面为 u, v 平面,相机中每张图像对应了目标物体的 s, t 平面.每张图像是确定的 u, v 位置的主透镜的采样图像.唯一的问题就是每个相机拍摄的图像的 xy 采样必须

严格和 s, t 平面采样匹配,这个部分可通过软件的方式进行匹配.由于前端X射线穿透物体照射到闪烁体发出可见光,闪烁体可以看作一个具有一定厚度的发光体,该物体每个截面是相同的图像.

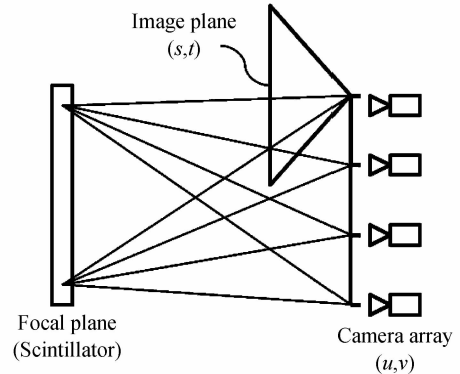
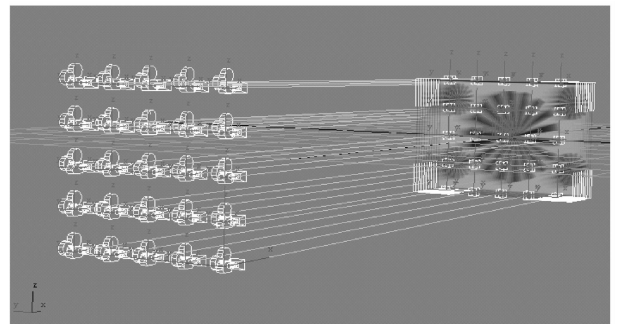


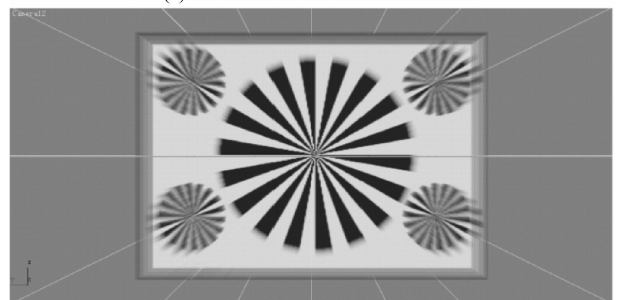
图5 相机阵列成像模型
Fig. 5 Imaging module based on camera array

2.2 参量设置

3ds Max 软件是一款用于三维动画场景制作的软件,我们在 3 ds Max 中创建了一个三维模型(图6(a)),该模型由 10 个包含图像的平面构成,用来模拟闪烁体发出的光,在光学系统的主镜头平面上设置了“目标摄影机”阵列^[13],模拟主镜头的采样成像,即微透镜下对应的方向信息.



(a) 3D model in 3ds Max simulation



(b) The simulated scintillator model

图6 3ds Max 模拟的三维闪烁体模型

Fig. 6 The scintillator model in 3ds Max simulation

在世界坐标系的原点,沿 X 轴方向放置了 10 个长为 20 mm,宽度为 20 mm 的平面,两个平面间隔 1 mm,平面设置贴图测试分辨率图片(图6(b)).为了体现闪烁体三维发光效果,每个平面设

置透明度为 10%，在本模型中不考虑 X 射线在闪烁体中衰减引起的图像幅度变化. 在平行于 Y 轴方向放置了 5×5 的相机阵列, 每两个相机之间偏移量为 5 mm, 中心相机坐标为 $(-100, 223, -0.226, 12.782)$. 设置相机基本参量: 焦距 72 mm, 视野 28.072° , 目标距离 100 mm.

利用 3 ds Max 的批渲染功能, 用相机同时捕捉目标场景的图像, 设置目标图像的比例为 1 : 1, 大小为 512×512 . 图 7 是相机阵列中两幅图像, 左图为右下角角摄像机捕捉, 右图为左上角摄像机捕捉, 明显看到图像存在偏移和视差, 为了使捕捉到的图像和目标场景采样匹配, 需要对采集到的图像进行校正和裁剪.

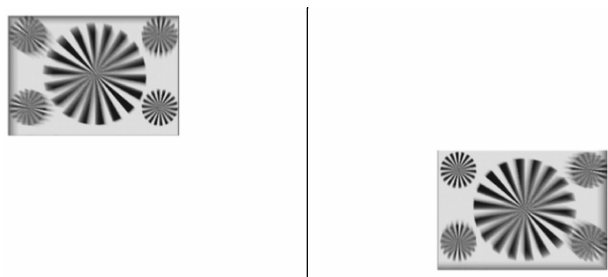
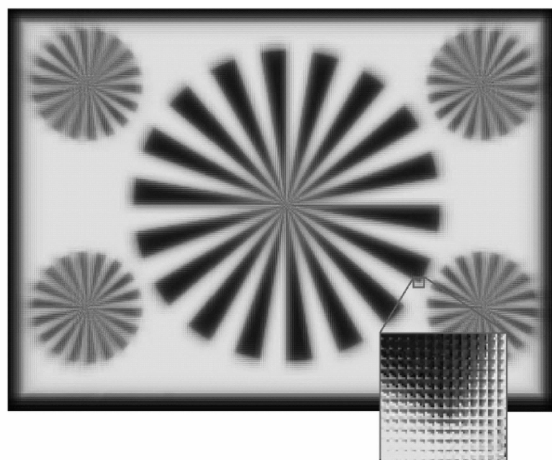


图 7 相机阵列捕捉的图像
Fig. 7 Images captured by camera arrays

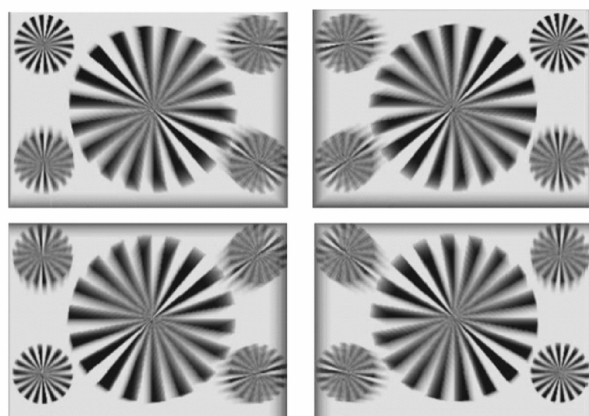
3 仿真结果和后处理

3.1 光场图像生成

通过相机和物体的相关参量, 采用类似于生成立体图像的剪切透视投影, 计算并获取了不同角度拍摄的图像, 图像大小取的 350×350 , 并且采样和物体场景是一致的. 图 8(b) 分别是四个角上摄像机拍摄的场景图像, 左上角相机拍摄的场景图像左上角圆形是比较清晰的, 其他比较模糊; 右下角的图像是右下角圆形比较清晰, 这就是由视差引起的. 图 8 (a) 中图像是合成的光场图像, 该图像尺寸比较大,



(a) Synthesized raw light field image



(b) Four images captured by cameras in the corner

图 8 光场源图像

Fig. 8 Raw light field image

通过局部放大如图中方框部分, 该图像是由方形的像素组成, 每个方形下包含 5×5 的像素, 整个图像类似于光场相机 LYTRO 拍摄的源图像, 只不过我们的图像是模拟方形主透镜成像. 该图像模拟的是闪烁体发光经过光学系统和微透镜阵列在 CCD 上所成的像.

3.2 图像后处理

在 3.1 节, 通过相机阵列的方式模拟了基于微透镜的光场成像系统, 对三维模型拍摄模拟闪烁体发光, 计算得到了模拟光场数据. 本节要完成对源数据的处理, 实现数字重聚焦, 并对结果进行分析的工作.

对图 8(a) 中的光场图像数据进行预处理: 正常情况下微透镜的安装存在一定的误差, 一般需要对旋转误差进行适当的校正, 准确获取每个微透镜的位置, 否则会产生比较严重的噪音.

3.2.1 数字重聚焦技术

光场成像技术中记录了物体发出光线的位置和方向信息, 通过光线追踪、反演, 计算出聚焦在不同深度的图像. 图 9 是数字重聚焦原理图, $x-y$ 面为重聚焦目标物所在的空间像平面, 根据相似三角形, 其接收到的光辐射量可表示为

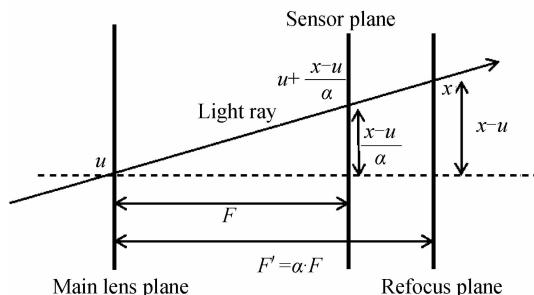


图 9 数字重聚焦原理

Fig. 9 Digital refocus theory

$$L_{\alpha \cdot F}(x, y, u, v) = L_F\left(u + \frac{x-u}{\alpha}, v + \frac{y-v}{\alpha}, u, v\right) = L_F\left(u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x}{\alpha}, v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y}{\alpha}, u, v\right) \quad (1)$$

式中, $\alpha = F'/F$ 为变焦倍率. Ng 采用频域的方法来解决数字重聚焦问题^[14], 提出了傅里叶切片成像理论, 并且验证了频域的方法比空间域方法速度来的更快, 但图像预处理部分的算法复杂度较高.

3.2.2 算法实现和结果分析

首先是模拟普通相机捕捉到的图像, 如图 10(a)所示, 将每个微透镜下的像素值相加, α 是式(1)中的 α . 整体上看, 大圆中每个间隔是清晰的, 但周围四个小圆存在不同程度的模糊, 圆心部分已经无法辨别, 与原图像比较分辨率降低了很多. 这是由于普通相机存在一定的景深, 在景深范围外的产生的图像会降低最终图像的分辨率. 图(b~f)是采用数字重聚焦技术分别聚焦在焦平面之前和之后的图像, 本文使用了空间域的数字重聚焦算法, α 是真实距离和焦距的比值, α 越小物体越靠近主透镜, 反之则远离主透镜, (b)中 $\alpha = 0.8919$, 在聚焦范围之外, 所以重聚焦图像是完全离焦的. 在 α 变大的过程中, 图像逐渐变清晰, 从 $\alpha = 0.97$ 开始到 $\alpha = 0.9887$, 清晰度不再随着 α 发生变化(图d~e), 大于 $\alpha = 0.9887$ 图像又开始模糊. 这符合数字重聚焦的理论, 我们构建的场景是每个层面相同的图像, 所以在重聚焦的过程中可以得到每层清晰的图像.

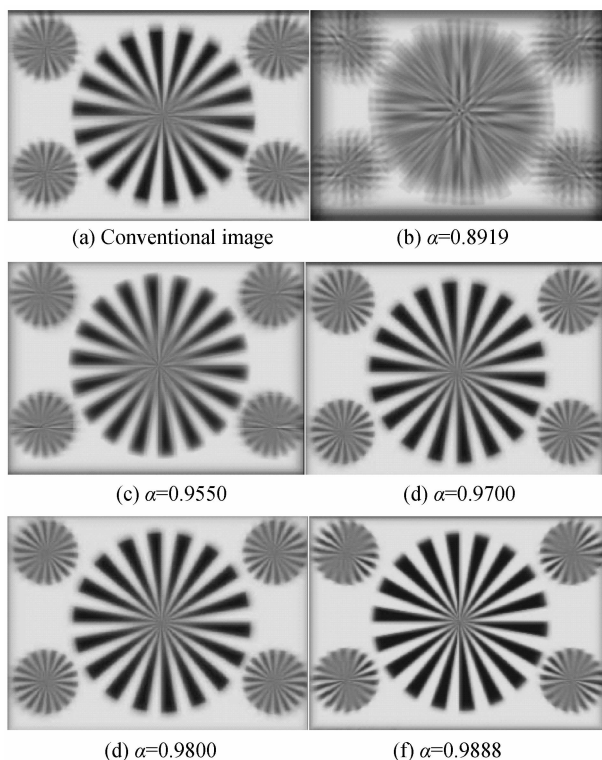


图 10 数字重聚焦结果

Fig. 10 Results of digital refocus

通过以上仿真实验可知, 未采用光场成像技术的 X 射线光学成像系统, 景深较小, 只能使闪烁体的一部分聚焦, 其余部分会降低图像分辨率; 采用了基于微透镜阵列的光场成像系统, 在不改变原有的光学系统的基础上, 扩大了景深, 使整个闪烁体都在聚焦范围内. 解决了 X 射线光学成像系统的景深过小的问题, 使用市面上可以买到的闪烁体材料就可以达到要求.

4 结论

本文通过对 X 射线闪烁体成像系统和光场成像系统的分析, 设计了基于相机阵列的 X 射线光场成像系统. 通过计算机技术, 模拟了该系统的成像模型, 并进行了仿真. 在 3ds Max 中采用相机阵列捕捉三维场景, 获取不同视角的图像, 合成了模拟微透镜阵列成像的光场数据. 对光场数据进行后处理, 采用数字重聚焦技术获取不同对焦平面的图像, 通过软件技术拓展了成像系统的景深. 通过对该系统的仿真, 为实际模型的建立提供了理论依据, 也验证了后期软件处理的正确性.

参考文献

- [1] 顾宁, 李光, 罗守华. X 射线闪烁体光学成像系统: 中国, 201110103253.8[P]. 2011-04-25.
- [2] JAN T, PETR H, KAREL B, *et al.* High resolution thin scintillator imaging plates used for X-Ray NDT application[C/OL]. [2013-05-02]. <http://www.ndt.net/article/aero2010/papers/p4.pdf>.
- [3] ADELSON E H, WANG J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 99-106.
- [4] LEVOY M, HANRAHAN. Light field rendering [C]. Proceeding SLGGRAPH 96 Proceeding of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996. **96**: 31-42.
- [5] NG R, LEVOY M, BREDIF, DUVAL, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[R]. 2005, *Stanford Tech Report CTSR*, 2005-02.
- [6] LEVOY M, NG R, ADAMS A, *et al.* Light field microscopy [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, **25**(3): 924-934.
- [7] CHANG Lei, YUAN Yan, ZHANG Xiu-bao, *et al.* Research on sampling and computer simulation of mask-based light field photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1104-1110.
常雷, 袁艳, 张修宝, 周志良. 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.
- [8] YANG Fan, YUAN Yan, ZHOU Zhi-liang. Study on imaging quality evaluation of light field camera[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, **34**(6): 4-6.
杨凡, 袁艳, 周志良. 光场相机成像质量评价方法研究[J]. *现代电子技术*, 2011, **34**(6): 4-6.
- [9] YUAN Yan, ZHOU Yu, HU Huang-hua. Rsgistration error analysis for microlens array and photosensor light field camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 123-126.
袁艳, 周宇, 胡煌华. 光场相机中微透镜阵列与探测器配准误差分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 123-126.

- [10] JOSE G, ROCHA, *et al.* Review on X-ray detectors based on scintillators and CMOS technology[J]. *Recent Patents on Electrical Engineering*, 2011, **4**(1): 16-41.
- [11] KOCH A, RAVEN C, SPANNE P, *et al.* X-ray imaging with submicrometer resolution employing transparent luminescent screens [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1998, **15**(7): 1940-1951.
- [12] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[J]. *Proceeding DARPA Image Understanding Workshop*, 1981, **4**: 121-130.
- [13] YUAN Xiao-cong, XU Yu-ping, YANG Yong, *et al.* Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2050-2056.
袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参量设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2050-2056.
- [14] NG R. Fourier slice photography[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 735-744.