

文章编号:1004-4213(2010)01-0123-4

光场相机中微透镜阵列与探测器配准误差分析*

袁艳,周宇,胡煌华

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京 100191)

摘 要:为了减少光场相机结构对光场图像数字对焦结果的影响,针对微透镜阵列为矩阵式排列的光场相机结构,定性分析了微透镜阵列与成像探测器之间的耦合距离误差、旋转角度误差和倾角误差这三个主要配准误差来源,分别提出了配准条件,并通过仿真实验加以验证.实验结果表明,当配准超出限制条件时,会导致对焦重构图像出现模糊、混叠等失真,缩小精确对焦的深度范围.

关键词:光场成像;数字对焦;微透镜阵列;配准误差

中图分类号:T852.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103901.0123

0 引言

数字对焦光场相机是一种不同于传统成像系统的新型成像装置.由于采用了特殊结构,光场相机能够获得成像目标辐射的四维光场^[1-2]分布,经过对光场数据进行处理可以实现数字对焦.利用微透镜阵列进行孔径分割实现光场获取的光场相机结构最早由 Aderson 和 Wang 提出^[3],Ng 在其基础上进行改进并研制成功了手持式相机^[4].然而要想从获得的光场图像中准确地解析出四维光场分布,就需要成像器件之间装配精密.Ng 在介绍光场相机结构中提到了微透镜阵列与探测器的配准但并没有具体全面的阐释.微透镜阵列是一种重要的光学元件,在生物复眼光学系统、多孔径光学系统等有大量应用.近年来,国内在微透镜阵列的制造工艺水平上有了很大提高,使得微透镜阵列的光信息传递损耗进一步降低^[5-7].

本文提出了光场相机中微透镜阵列与探测器装配位置配准误差的三种主要来源,分析了其各自对光场数据数字对焦结果的影响,并进行了仿真实验验证.

1 光场相机基本结构

图 1 是利用孔径分割原理而设计的光场相机基本结构,主要由主光学系统(Main lens)、微透镜阵列(Microlens array)与探测器(Photosensor)三部分组成.微透镜的作用是将主镜的光瞳成像在探测器上并覆盖若干个探测器单元,相当于将整个光瞳分割成若干个子孔径.成像系统内的光场分布由于微

透镜的作用而转化为探测器单元的输出信号,且与微透镜位置反映的两维空间位置信息和微透镜覆盖的探测器像元位置反映的两维方向信息分别相对应,实现了四维光场的解析.在光场相机中,微透镜阵列与主光学系统、成像探测器之间有严格的位置和方位关系,为了保证这些位置关系的稳定、可靠,一般来说微透镜阵列与成像探测器安装固化为一体.

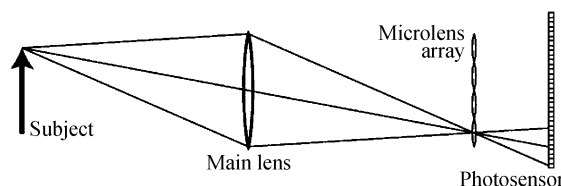


图 1 光场相机原理结构

Fig. 1 Conceptual schematic of light field camera

在安装调试中,微透镜阵列与成像探测器的配准误差主要有微透镜阵列与成像探测器的耦合距离误差、旋转角度误差和倾角误差.

2 微透镜阵列与成像探测器的耦合距离误差

在分割主光学系统孔径时,利用微透镜的成像功能,通过对主光学系统光瞳形成子像(Sub-image),每个子像具有一定的空间分布(分辨率由微透镜单元覆盖的探测器像元数决定),决定了光场的角分辨率.为了充分利用微透镜的成像能力,获得最大的角分辨率,要求主光学系统光瞳与成像探测器关于微透镜严格共轭,即满足高斯成像公式.

对于利用微透镜单元分割光学系统孔径的光场相机,由于主光学系统光瞳作为微透镜成像的物可以看作位于无穷远处,成像探测器必须放置在微透镜的后焦面上.如果微透镜阵列与成像探测器的物理距离不能满足高斯成像要求,会导致光场方向信息的混叠和成像目标空间分布的混叠,降低光场相

*国家自然科学基金(60972088)和长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助

Tel:010-82339421

Email:zhouyu0408@hotmail.com

收稿日期:2008-09-27

修回日期:2008-12-23

机的空间分辨率和对焦准确度.

设微透镜大小为 d , 成像探测器像元大小为 s , 微透镜阵列与成像探测器的理论距离为 l' , 其误差为 $\Delta l'$, 则有

$$|\Delta l'| \leqslant sl'/d \quad (1)$$

在仿真实验中, 设微透镜大小 $d = 50 \mu\text{m}$, 成像探测器理想位置放置在微透镜后焦面上, 微透镜焦距 $l' = f_m = 0.2 \text{ mm}$, 成像探测器像元大小 $s = 5 \mu\text{m}$, 根据式(1), 得到使微透镜后子图像清晰的探测器位置允许误差为: $|\Delta l'| \leqslant sl'/d = 20 \mu\text{m}$. 当 $\Delta l'$ 超出 $20 \mu\text{m}$ 的误差范围时, 理想像点的弥散斑直径大小将超出成像探测器像元大小, 造成子像的模糊以及子像间的混叠. 弥散斑的大小利用式(2)计算

$$S = \Delta l' \cdot (d/f_m) \quad (2)$$

实验中设成像探测器由理想像面向后移动了 $\Delta l' = 80 \mu\text{m}$, 则可以计算出弥散圆的直径大小为 $S = 20 \mu\text{m}$, 可见, 相当于覆盖了 4 个探测器像元的宽度.

考虑微透镜的成像功能, 子像的模糊程度利用精确配准时的清晰子像卷积上点扩散函数得到. 点扩散函数模型采用常用的均匀扩散模型, 如式(3)

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/(\pi r^2) & (x^2 + y^2 \leqslant r^2) \\ 0 & (x^2 + y^2 \geqslant r^2) \end{cases} \quad (3)$$

图 2 为成像探测器位于微透镜理想像面上和成像探测器位置偏置 $80 \mu\text{m}$ 时得到的光场图像及其

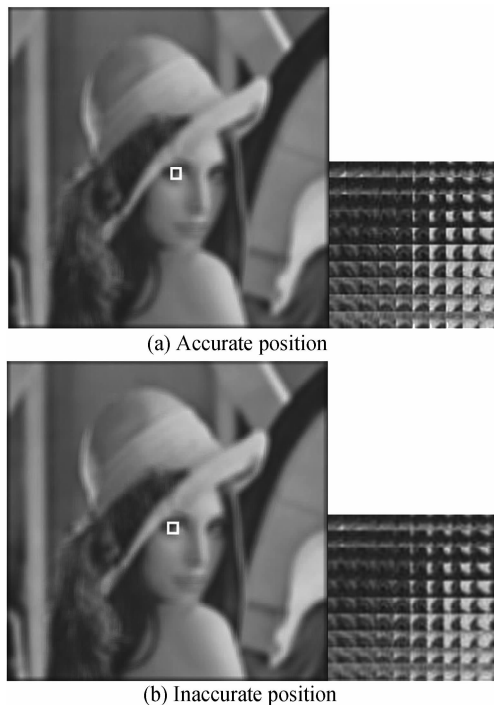


图 2 探测器位于准确和非准确像面光场图像及局部放大比较

Fig. 2 Light field photographs and the close-up when the sensor is accurate(a) and inaccurate

局部细节放大图. 比较两幅细节放大图可以看出, 成像探测器位置偏置后, 子像的模糊程度比较严重.

利用数字对焦图像重构算法^[8]分别对图 2 中(a)和(b)的光场图像进行对焦处理, 结果如图 3, 其中图 3(a)和(b)分别为对应图 2 中(a)和(b)的光场图像的重构图像, 仿真时系统离焦量相等.

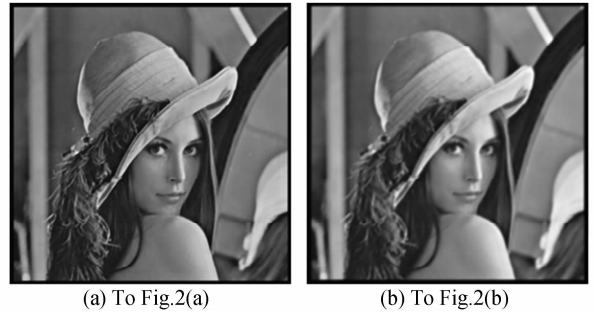


图 3 图 2 中两种光场(a)和(b)的数字对焦重构图像
Fig. 3 Refocused images respectively to (a) and (b) in Fig. 2

从图 3 可见, 当成像探测器的位置超出了允许的误差后, 在正确的离焦位置将无法得到清晰的重构图像. 这是由于此时方向分辨率降低, 导致精确对焦的深度范围下降, 而此时目标的离焦距离已经超出了精确对焦的范围.

3 微透镜阵列与成像探测器之间旋转角度误差

在光场相机中, 若选用的微透镜阵列为矩阵式排列方式, 则要求微透镜阵列的行(或列)与成像探测器的行(或列)之间互相平行, 它们之间的不平行度定义为旋转角度误差, 如图 4. 微透镜阵列所在平面与成像探测器所在平面互相平行, 以微透镜阵列为基准, 成像探测器由于安装误差造成绕其中心轴旋转了一个角度 θ .

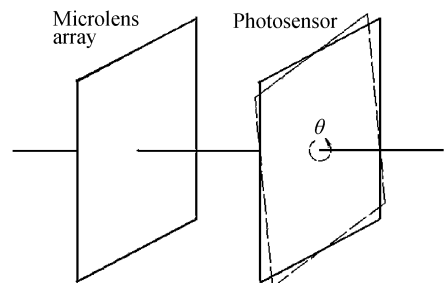


图 4 微透镜阵列与探测器间旋转角度示意图

Fig. 4 Rotation between microlens array and photosensor

微透镜形成的子像对应于光场的方向信息, 而宏观来看各个子像又分别对应光场的空间信息, 与光场相机的空间分辨率相关, 图 4 所示的误差因素导致了子像之间的失配. 特别地, 在利用光场相机获取系统内光场时, 是依照微透镜子像覆盖的探测器像元排列和微透镜子像排列进行组合寻址的, 子像失配将会导致光场的空间信息产生混淆. 在进行数

字对焦图像重构时,使图像混叠失真.

若光场相机获取的二维光场图像的大小为 $N \times N$,根据上述分析,要得到精确光场分布,要求光场图像的边缘由于旋转误差造成的像元偏离量小于 $1/2$ 像元大小,那么图 4 中能够允许的旋转角度应为

$$|\theta| \leq \arctan(1/2N) \quad (4)$$

假若获得的二维光场图像的大小为 $3\,000 \times 3\,000$,则要得到无失真的清晰数字对焦图像,允许成像探测器相对于微透镜阵列的旋转角度为 $|\theta| \leq 34''$.

为了说明微透镜阵列与成像探测器之间的旋转角度误差对数字对焦图像重构的影响,仿真实验中,设定 $\theta = 0.2^\circ$,利用失配的光场图像进行数字对焦图像重构.图 5(a)为微透镜阵列与成像探测器配准时重构的图像,图 5(b)为它们之间存在角度误差时重构的图像.比较两幅图像可以看出,在图像中心位置图像的混叠失真不明显,而在越是靠近边缘的地方图像混叠失真越严重,这是由于在重构图像时设定光场寻址抽取像素的偏移量是随着离中心的距离而线性增加造成的.



图 5 角度旋转误差对数字对焦重构的影响与精确对焦结果的比

Fig. 5 Comparison of Effect on refocusing for the rotation error and the exact refocused image

4 微透镜阵列与成像探测器之间的倾角误差

微透镜阵列与成像探测器的耦合距离误差、旋转角度误差的分析都是基于微透镜阵列所处平面与成像探测器所处平面是互相平行的,实际情况是,在微透镜阵列与成像探测器安装时会产生如图 6 的倾角误差.

微透镜阵列与成像探测器之间的倾角误差(这里主要考虑探测器安装倾斜的情况)对光场相机的影响可以归结为它们之间的距离误差.由于倾角的存在,使得探测器像元到微透镜的耦合距离偏离了标准位置.所不同的是,每个微透镜与其所覆盖的探测器组元的距离误差随着微透镜距离系统中心轴的距离

距离呈线性增加,导致每个微透镜所成的子像受到影响的程度不同.为了获得清晰的数字对焦图像,根据 2.1 节中的分析,对于存在倾角误差,有如下的限制.

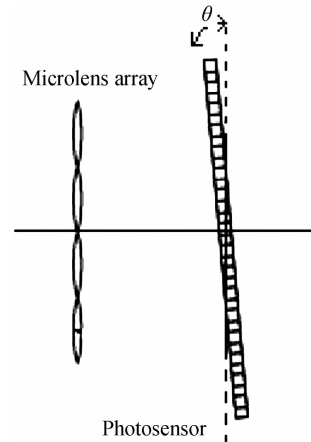


图 6 探测器与微透镜阵列的倾角误差

Fig. 6 Inclination between photo sensor and micro-lens array

若微透镜阵列包含 $M \times M$ 单元,微透镜单元大小为 d ,要求位于探测器边缘的像元与微透镜阵列耦合距离误差为 $\Delta l'$, $\Delta l'$ 取 2.1 节中得到的耦合距离误差的容限.则倾角误差为

$$|\theta| \leq \arctan(2\Delta l' / (Md)) \quad (5)$$

将式(1)代入得

$$|\theta| \leq \arctan(2sl' / (Md^2)) \quad (6)$$

在仿真实验中,设定探测器像元大小 $s = 5 \mu\text{m}$,成像距离 $l' = 200 \mu\text{m}$,微透镜大小为 $d = 50 \mu\text{m}$,微透镜阵列数 $M = 300$,可以得到微透镜阵列与成像探测器的倾角误差容限为 $|\theta| \leq 0.1528^\circ$.

为了表明微透镜阵列与成像探测器之间的倾角误差对数字对焦图像重构的影响,仿真实验中设定倾角误差为 0.6° ,微透镜所成子像模糊程度根据探测器不同位置的弥散圆半径使用 2.1 节中的点扩散函数模型.利用产生变化的光场图像进行图像重构,如图 7.



图 7 倾角误差对数字对焦重构的影响与精确对焦图像的比较

Fig. 7 Comparison of effect on refocusing caused by the inclination error and the exact refocused image

其中图 7(a)为成像探测器位于微透镜理想像面时重构的数字对焦图像,图 7(b)为探测器对微透镜阵列具有倾角误差时重构的对角图像.可以看出,两幅图像在中心区域的清晰度差异不大,随着距离中心区域越远,右图逐渐变得模糊.边缘位置最明显.这区别于耦合距离误差造成的图像模糊程度相同的情况.

5 结论

针对光场相机中微透镜阵列和探测器的装配位置关系对数字对焦结果的影响,提出了微透镜阵列与成像探测器的配准误差主要有微透镜阵列与成像探测器的耦合距离误差、旋转角度误差和倾角误差.根据器件参量给出了三种情况下微透镜阵列与探测器的精确配准条件.仿真实验表明,当配准超出限制条件时,会对后续数字对焦工作带来影响,导致对焦重构图像出现模糊、混叠等失真,从而降低成像空间分辨率,缩小精确对焦的深度范围.

参考文献

- [1] LEVOY, HANRAHAN. Light field rendering [C]. *SIGGRAPH*, 1996: 31-42.
- [2] GORTLER, GRZESZCZUK, SZELISKI. The lumigraph [C]. *SIGGRAPH*, 1996: 43-54.
- [3] ADELSON T, 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] NG, LEVOY, BREDIF. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [R]. *Tech Rep CSTR*: Stanford Computer Science, 2005.
- [5] HAN Yan-ling, LIU De-sen, LI Jing-yan, *et al.* Research on manufacture of square gradient-index lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1301-1304.
韩艳玲, 刘德森, 李景艳, 等. 方形自聚焦透镜的研制 [J]. 光子学报, 2007, **35**(9): 1301-1304.
- [6] HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square self-focusing lens array and its image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 221-223.
韩艳玲, 刘德森, 蒋小平. 方形自聚焦透镜元阵列及其成像 [J]. 光子学报, 2007, **36**(2): 221-223.
- [7] ZHANG Yu, LIU De-sen. Manufacture of hexagon aperture plane micro-lens array and its basic characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1639-1642.
张玉, 刘德森. 六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究 [J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1639-1642.
- [8] NG R. Fourier slice photography [J]. *ACM transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 735-744.

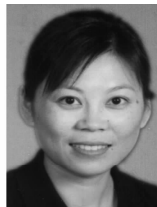
Registration Error Analysis for Microlens Array and Photosenser in Light Field Camera

YUAN Yan, ZHOU Yu, HU Huang-hua

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reduce the influence on the digital refocusing, the structure registration error in the light field camera is discussed. As for the camera in which the microlens array arranged in Matrix-style, the registration error sources are analyzed. The most important registration errors including coupled distance error, rotation error and inclination error are represented. And the registration limit conditions for the three situations respectively are suggested. The simulation experiments show that when the registration limit is exceeded, the reconstructed image will appear blurred, aliasing and other distortion, and the accurate refocusing range will be reduced.

Key words: Light field photography; Digital refocusing; Microlens array; Registration error



YUAN Yan was born in 1967. She received her Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS in 2005. Now, she is a professor at BUAA and her research interests focus on optical remote sensing, spectral imaging system and digital refocusing imaging technology.