

## 基于 Zemax 仿真的红外光场成像技术

朱斐越, 李艳红, 杨 扬  
(上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:**光场成像作为计算摄影学的研究方向之一,可以通过单次拍摄得到目标的四维全光信息,包括空间二维以及角度二维信息,由此可以通过多视角立体匹配原理实现三维成像。目前光场成像集中应用于可见光领域,用于其他光学成像波段的情况较为少见。本文提出基于 Zemax 仿真的红外光场成像技术,将光场成像系统与长波红外成像系统相结合,从光场成像原理以及长波红外成像特性出发,对长波红外光场成像系统结构设计进行了深入研究,同时为了提升三维成像的效果,分析了红外光场成像系统光学参数对深度分辨率的影响,得出深度分辨率主要由微透镜成像关系、微透镜工作 F 数、主透镜焦距、物距以及探测器像素尺寸确定。针对长波红外探测器像素数较少的情况选择了聚焦型光场成像系统,根据设计结果,使用 Zemax 仿真验证了长波红外系统与光场成像系统相结合的可行性以及理论设计的正确性。

**关键词:**聚焦型光场相机;长波红外成像系统;深度分辨率;Zemax 仿真

**中图分类号:**TN216;TB8 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.021

## Design of LWIR light field imaging system based on Zemax simulation

ZHU Fei-yue, LI Yan-hong, YANG Yang  
(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:**As one of the research directions of computational photography, light field imaging can be used to obtain four-dimensional plenoptic information of a target in a single shot, including spatial two-dimensional and angular two-dimensional information, which can realize three-dimensional imaging through the principle of multi-view stereo matching. At present, light field imaging is concentrated in the field of visible light, and applications in other wavelength bands are less common. In this paper, an infrared light field imaging system based on Zemax simulation combining the light field imaging system with the long wave infrared imaging system is proposed. Starting from the principle of light field imaging and the characteristics of infrared imaging, the structural design of the long wave infrared light field imaging system is studied in depth. At the same time, in order to enhance the effect of three-dimensional imaging, the influence of optical parameters on depth resolution of the infrared light field imaging system is analyzed, and the depth resolution is mainly determined by microlens imaging relationship, the microlens working F-number, the focal length of the main lens, the object distance and the detector pixel size. A focused light field imaging system is chosen for few pixels in the LWIR detector. According to the design result, Zemax simulation is used to verify the feasibility of the combination of two systems and the validity of the theoretical design.

**Keywords:** focused light field camera; LWIR imaging system; depth resolution; Zemax simulation

## 1 引言

光场成像隶属于计算摄影学<sup>[1]</sup>的一个分支,近年来通过光场成像的方式获得三维信息受到一定的关注<sup>[2]</sup>。光在空间中辐射的场分布是一个高维数据,因此采集到光场数据后,可以从中提取出我们需要的信息,例如空间中的三维信息。

目前,光场成像主要研究和应用于可见光波段。但可见光成像受到了光源的限制,在光照条件不佳的情形下无法正常工作。随着工业制造技术水平的提高,红外探测器分辨率越来越大,成像质量越来越好,因此通过光场成像的方式将红外场景的三维信息<sup>[3]</sup>提取出来也逐渐成为可能。

红外光场成像结合了红外成像和光场成像的优点,能够不受环境的影响,实现全时段的光场成像。对红外光场成像进行灵活的后处理,就可以实现夜间立体视觉,夜间场景重聚焦等应用。夏朝阳等人<sup>[4-5]</sup>使用模拟相机阵列的方法,实现了红外光场成像及三维场景重建工作。他们提出,红外光场成像可以有效提高图像信噪比、穿透障碍物成像和实现数字重聚焦的功能,提高了红外图像质量,丰富了红外成像的应用。不过由于使用单台相机,因此只能针对静态红外场景。王腾飞等人<sup>[6-8]</sup>使用红外中继镜组实现了红外光场中继成像系统,避免了微透镜阵列的装配难题,并借助黑体完成了辐射定标与非均匀性校正。吕南方等人<sup>[9]</sup>同样使用单台相机和平移台,实现了红外场景的光场采集。他们主要分析了红外光场图像相比传统红外图像的优点,提高了红外图像的信噪比。Cossu 等人<sup>[10]</sup>提出了制冷型中波红外光场相机,将微透镜阵列集成在杜瓦瓶内,获得了红外光场图像,并实现了红外场景的深度估计。我们提出的长波红外光场成像技术将波段改到了更具应用前景的长波红外波段,并且使用非制冷焦平面探测器,相比其采用的制冷型探测器更加便携灵活。

本文以长波红外光场成像系统的结构设计为主题,通过技术调研了解到红外成像的需求,从而以聚焦型光场相机的结构为基础,从系统结构设计着手,分析了系统参数对成像效果的影响,提出了结合深度分辨率的需求,按需进行设计,从而使得在满足需求的同时实现聚焦型光场相机空间分辨率的最大化,提升相机的成像质量。通过 Zemax 仿真的形式,验证了设计的有效性。

## 2 光场相机成像原理

### 2.1 非聚焦型光场相机(一型光场相机)

Ren Ng 提出的全光相机<sup>[11]</sup>是在传统相机的基

础上,在主透镜和探测器面之间插入一片微透镜阵列,使得场景物体通过主透镜聚焦到了微透镜阵列面处,而在距离微透镜阵列一倍焦距位置处放置探测器面,如图 1 所示。这样一来探测器便能捕获到场景的一些不同视角,其中每一个微透镜在探测器上的投影称为一个微图像(也称宏像素),那么所有的微图像组合起来就称为原始光场图像,或者称微透镜阵列图像。

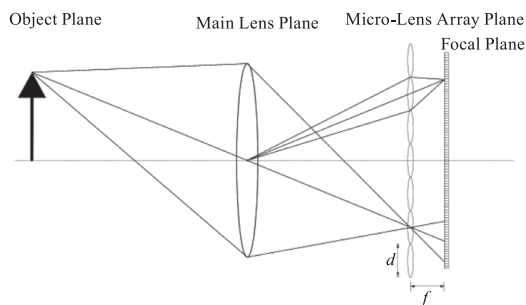


图 1 非聚焦型光场相机成像光路图

Fig. 1 Optical transmission diagram of unfocused light field camera

我们使用光学元件的光线传输矩阵来表达光线在光场相机中的传输过程。经过自由空间中大小为  $l$  的距离,光线引起的坐标变化为:

$$T_l = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

光线在自由空间中经过焦距为  $f$  的薄透镜时,引起的坐标变化为:

$$L_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于光场,我们一般用一个密度函数  $r(q,p)$  表示<sup>[12]</sup>,其中  $(q,p)$  为向量,分别代表了光线与光轴横向交平面的位置和方向,为了方便描述,这对向量也可以用单个向量  $x$  表示。在三维空间中,向量  $(q,p)$  均为二维向量,因此  $x$  为四维向量。在不失一般性的前提下,为了更好地理解,我们采用惯例的  $q-p$  二维平面,也即在这种情况下  $q,p$  是一维的,  $x$  是二维的。因此,根据光线传输矩阵,当光线在空间中进行  $l$  时,以及经过焦距为  $f$  的薄透镜时,分别可以用线性变换的表示方法,即:

$$y = T_l x \quad (3)$$

$$y = L_f x \quad (4)$$

我们知道,在自由空间下(假设没有吸收介质)光线的辐射度守恒,也即对于密度函数有:

$$r'(y) = r(x) \quad (5)$$

而光线传输矩阵可以统一用  $A$  代替,因此有  $y = Ax$ , 或者  $x = A^{-1}y$ , 因此对于光线密度函数有:

$$r'(y) = r(A^{-1}y) \quad (6)$$

那么对于非聚焦型光场相机中的一个微透镜成像,我们定义微透镜平面处的密度函数为  $r(q,p)$ , 探测器平面处的密度函数为  $r_f(q,p)$ , 那么光线通过微透镜并成像到探测器上的光线传输矩阵为:

$$A_f = T_f L_f = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此有:

$$A_f^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -f \\ \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

所以,图中探测器平面位置  $q$  处的光线密度函数为:

$$r_f(x) = r(A_f^{-1}x) = r\left(q - pf, \frac{q}{f}\right) \quad (9)$$

那么探测器位置  $q$  处的光强,也即此位置处的图像为:

$$I_f(q) = \int_p r_f(q,p) dp = \int_p r\left(q - pf, \frac{q}{f}\right) dp \quad (10)$$

对于这一积分式,由  $p$  的范围  $[0, d/f]$ , 假设微透镜成像时每一角度的密度函数都相同,那么当选择一个便于计算的角度时,即令  $p = q/f$  时,有:

$$I_f(q) = \frac{d}{f} r\left(0, \frac{q}{f}\right) \quad (11)$$

从上式中可以看到,微图像中每一不同点对应了微透镜上位置  $0$  处点的不同方向。

根据非聚焦型光场相机的采集和渲染方式可知,非聚焦型光场相机在渲染子孔径图像时,获得的空间分辨率等于微透镜阵列数,得到的角度分辨率等于每个微图像下包含的像素数。这样会导致子孔径图像空间分辨率不足,一般远低于探测器分辨率。因此,后来提出的聚焦型光场相机针对这一问题,对系统结构进行了改进。

### 2.2 聚焦型光场相机(二型光场相机)

聚焦型光场相机是 Lumsdaine 和 Georgiev 在 2008 年提出的<sup>[13]</sup>, 首先将其称作全光相机 2.0 (Plenoptic Camera 2.0)。考虑到为了使微透镜成像最清晰,不应使微透镜把主透镜的光瞳清晰成像到探测器面上,而应该使主透镜对场景成的像被清晰成像到探测器面上。那么,探测器相对于微透镜阵列的距离也就从原先的一倍微透镜焦距处,变成了随主透镜成像(中间像)位置的改变而改变,以便使得微透镜对中间像成像满足物像共轭关系,如图 2 所示。由于当微透镜到探测器的距离不再是一倍焦

距后,会存在两种可能的结构。当微透镜到探测器的距离  $b > f$  时,根据理想透镜成像公式  $1/a + 1/b = 1/f$ , 有  $a > 0$ , 即微透镜成像物面在微透镜前方,我们称这个面为主透镜成像的中间实像面,因为此种结构类似于开普勒望远镜,因此也被称为开普勒型聚焦光场相机;而当  $b < f$  时,有  $a < 0$ , 微透镜成像物面在微透镜后方,这个面被称为主透镜成像的中间虚像面,因为此种结构类似于伽利略望远镜,因此也被称为伽利略型聚焦光场相机。因为这两种光场相机原理类似,为了更清晰的说明其成像原理,下文主要按照开普勒型聚焦光场相机的结构进行介绍。我们也应注意到,开普勒型结构每个微透镜在探测器上成倒像,在后续图像渲染过程中需要对每一微图像进行翻转操作后再进行拼接。

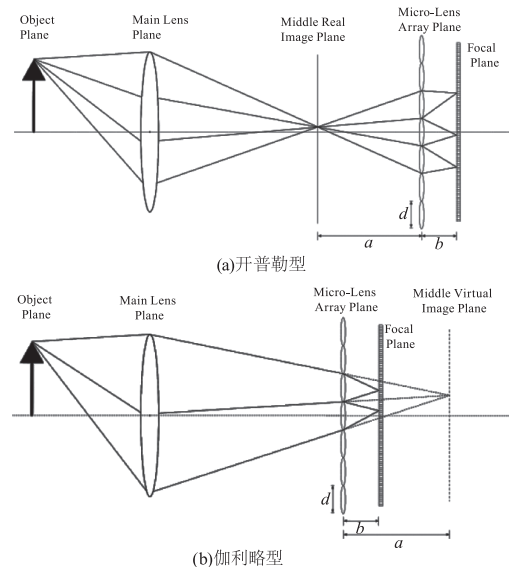


图 2 聚焦型光场相机成像光路图

Fig. 2 Optical transmission diagram of focused light field camera

类似上小节中的方法,同样使用光线传输矩阵表达光线在聚焦型光场相机中的传输过程。那么对于聚焦型光场相机中的一个微透镜成像,定义微透镜平面处的密度函数为  $r(q,p)$ , 探测器平面处的密度函数为  $r_b(q,p)$ , 中间实像面处的密度函数为  $r_a(q,p)$ , 那么光线从中间实像面上发出通过微透镜并成像到探测器上的光线传输矩阵为:

$$A_{ba} = T_b L_f T_a = \begin{bmatrix} -\frac{b}{a} & 0 \\ -\frac{1}{f} & -\frac{a}{b} \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此有:

$$A_{ba}^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{b} & 0 \\ \frac{1}{f} & -\frac{b}{a} \end{bmatrix} \quad (13)$$

所以,图中探测器平面位置  $q$  处的光线密度函数为:

$$r_b(x) = r_a(A_{ba}^{-1}x) = r_a\left(-\frac{a}{b}q, \frac{q}{f} - \frac{b}{a}p\right) \quad (14)$$

那么探测器位置  $q$  处的图像可以用中间实像面处光线  $r_a$  来表达为:

$$\begin{aligned} I_b(q) &= \int_p r_b(q,p) dp \\ &= \int_p r_a\left(-\frac{a}{b}q, \frac{q}{f} - \frac{b}{a}p\right) dp \end{aligned} \quad (15)$$

对于这一积分式,由  $p$  的范围  $[0, d/b]$ ,假设微透镜成像时每一角度的密度函数都相同,那么当我们选择一个便于计算的角度时,即令  $p = q/b$  时,使得密度函数  $r_a$  为一定值,则有:

$$I_b(q) = \frac{d}{b} r_a\left(-\frac{a}{b}q, \frac{q}{b}\right) \quad (16)$$

上式中可以看到,微透镜对中间像面成像,导致了探测器面上图像位置相对于中间像面产生了  $b/a$  的缩放因子,也即聚焦型光场相机的空间分辨率为探测器图像分辨率乘以  $b/a$ 。

与非聚焦光场相机相同,我们通过在一空间点上对角度信息进行积分来渲染二维子孔径图。但是考虑到这样的光场采集方式,我们不能像非聚焦光场相机一样在一个微透镜上获取角度采样,而是在不同的微透镜上选择角度采样,也即角度信息的积分不是在一个微透镜内,而是应该横跨多个微透镜来完成,这样一来,为了保证每个微透镜选取图像位置信息的连续性,应该选取一定大小的图像块来完成二维子孔径图的渲染<sup>[14]</sup>,因此,相比于非聚焦光场相机在每个微图像中选取一个像素构成二维子孔径图,聚焦型光场相机二维子孔径渲染图的分辨率将远远超过非聚焦光场相机。在这里,选取的图像块的大小可以由图 3 中的微透镜成像几何关系确定,我们令图像块大小为  $M$ ,则有:

$$M = d \times \frac{b}{a} \quad (17)$$

可见,在实际的三维场景成像时,由于微透镜阵列面到探测器面的距离  $b$  不变,而中间实像面到微透镜阵列面的距离是随着实际场景物体的物距而变化的,因此理想图像块的大小是与中间实像面的位置有关的,也即与场景中物体实际深度相关。这样的情况下,实际场景的二维子孔径渲染图就不能将所有图像块的大小定为相同的,这将会导致伪影的产生。

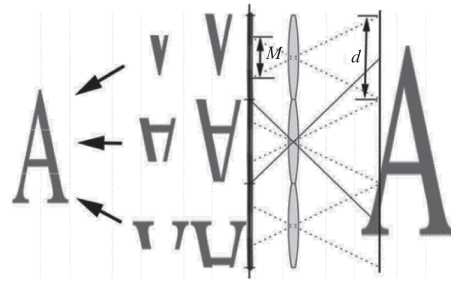


图 3 图像块大小的选取方法

Fig. 3 Selecting method of image bulk size

### 3 长波红外聚焦型光场成像系统设计

基于微透镜阵列的光场相机主体结构包括主透镜、微透镜阵列以及探测器。那么系统中的主要参数便是主透镜参数、微透镜阵列参数、探测器参数、理想成像物距,以及主透镜出瞳面到微透镜阵列面的距离、微透镜成像的物像距离<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 F 数 (F-number) 匹配

所有微透镜成像后产生的微图像阵列应该最大化的利用到探测器像素,并且不应产生串扰。由图 4 可知,为了达到这样的要求,可以认为每一个微透镜将主透镜出瞳面成像到探测器上,并且要求各个微透镜成像得到的微图像相切,从而最大化利用探测器的同时不产生串扰,也即有以下的几何关系:

$$\frac{B}{D} = \frac{B_L}{D_L} \quad (18)$$

其中,  $B$  为微透镜阵列面到探测器面的距离;  $D$  为微透镜的孔径;  $B_L$  为主透镜出瞳面到探测器面的距离;  $D_L$  为主透镜出瞳大小。

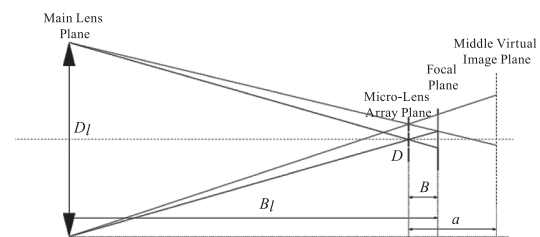


图 4 聚焦型光场相机 F 数匹配

Fig. 4 F-number matching of focused light field camera

可以看到,光场相机对于探测器面有效利用的问题实际上是要求主透镜和微透镜进行近似的 F 数匹配,这是设计光场相机的一个重要条件。但我们应该注意到,这里的 F 数匹配条件实际上是针对于非聚焦型光场相机的,因为只有非聚焦型光场相机的结构是微透镜将主透镜光瞳成像到探测器面上。对于聚焦型光场相机,微透镜是将中间像面成像到探测器面上,这其中存在着一定的误差。这个误差造成的结果是微图像边缘在探测器面处成像不



再清晰,导致了微图像边缘信息不准确,在之后的深度估计阶段造成误差。因此,在后续的图像处理阶段会对其进行微图像网格化的处理,并尽量选取中心视角子孔径图完成计算。鉴于此我们仍使用此 F 数匹配方式。

### 3.2 虚深度

对于聚焦型光场相机的设计,第二个需要考虑的就是虚深度的设置,虚深度是指图 5 中,场景中一物点经过主透镜成像得到的中间像点在被微透镜二次成像时,微透镜的成像物像距之比,也即图中  $a/B$  的大小,用  $M$  表示。作为聚焦型光场相机的重要参数,虚深度的大小代表了角度分辨率的大小,这是因为图 5 中的几何关系:

$$\frac{D_L}{B_L - B + a} = \frac{D'}{a} \quad (19)$$

再结合之前提出的 F 数匹配,有:

$$\frac{D'}{D} = \frac{a}{B} = M \quad (20)$$

公式(20)说明了,在满足 F 数匹配的条件下,虚深度的值就等于一个物点可以被多少个不同的微透镜成像,每一个微透镜成的像都代表了一个独立的方向信息,因此虚深度的大小表示了光场图像中角度分辨率的大小。那么为了能够实现三维成像,场景中每一物点应至少被两个微透镜成像,这样才可以通过立体匹配的原理计算出深度,即满足:

$$M > 2 \quad (21)$$

由此,根据微透镜物像成像关系:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{B} = \frac{1}{f} \quad (22)$$

其中,  $a$  的正负决定了采用哪种类型的聚焦型光场相机,如图 5 中  $a < 0$  为伽利略型,则有:

$$M = \frac{f}{f - B} \quad (23)$$

经过变换,并结合实际系统:

$$\frac{f}{2} < B < f \quad (24)$$

同理,当  $a > 0$  时为开普勒型,则有:

$$M = \frac{f}{B - f} \quad (25)$$

$$f < B < \frac{3f}{2} \quad (26)$$

应注意,当  $B = f$  时,系统结构转变为非聚焦型光场相机。由此,我们利用虚深度的定义,并结合立体匹配的需求,得到了微透镜阵列面到探测器面距离的选取范围。

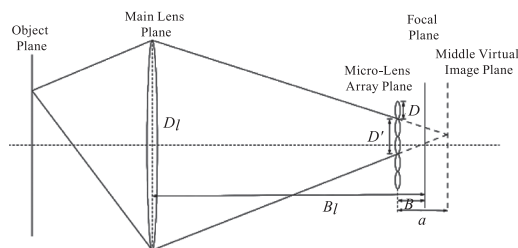


图 5 聚焦型光场相机成像示意图

Fig. 5 Imaging schematic diagram of focused light field camera

### 3.3 景深

传统相机成像时只有一个平面是理论上的最佳物面,满足物像共轭的成像关系,然而在实际拍摄中,我们发现并不是只有一个面而是一定范围内的场景都是清晰的,这是因为相机中有景深的存在。景深是成像系统物空间中的参数,代表了这一范围内都可以认为是清晰成像。这个范围是根据成像透镜参数以及探测器像素大小确定的,我们一般认为物空间中一点不能准确聚焦到探测器上,从而在探测器上形成一个弥散斑,当弥散斑直径小于等于像素大小时,我们认为这一点依然清晰成像。对于聚焦型光场相机,我们希望场景在成像到探测器上要相对清晰,以便后续的图像处理,因此景深的考虑也是非常必要的。

景深一般是物空间的参数,不过由于聚焦型光场相机是一个二次成像系统,因此对最终成像影响最大的是微透镜成像的景深,也对应着主透镜成像的像深(景深在像空间的对应量)。在考虑景深大小时,我们是将弥散斑大小作为决定量的,那么对于波长远超可见光的长波红外波段就必须考虑到衍射效应。因此,最小可分辨尺寸不再直接等于探测器像素大小,而是使用  $s$  表示:

$$s = \max(r_s, p) = \max(1.22\lambda N, p) \quad (27)$$

其中,  $r_s$  为艾里斑半径;  $\lambda$  为波长;  $N$  为微透镜工作 F 数即  $B/d$ ;  $p$  为探测器像素大小。

得到有效最小可分辨尺寸后,根据微透镜成像几何关系可知,微透镜前后景深为:

$$a^+ = \left( \frac{d-s}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \quad (28)$$

$$a^- = \left( \frac{s+d}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \quad (29)$$

因此微透镜景深范围为:

$$RDOF = \left[ \left( \frac{s+d}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1}, \left( \frac{d-s}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \right] \quad (30)$$

景深大小可以近似为:

$$DOF = \left( \frac{d-s}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1} - \left( \frac{s+d}{dB} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \quad (31)$$

$$\approx 2 \frac{B}{d} s \left( \frac{a}{B} + \frac{a^2}{B^2} \right) = 2Ns(M + M^2)$$

### 3.4 深度分辨率

通过以上步骤,可以得到确定成像范围和主透镜焦距下,为了能够清晰成像,微透镜设计应满足的参数要求。而主透镜的参数则是在满足 F 数匹配条件下,根据我们需要的成像距离、成像视场以及成像深度分辨率等要素来确定的。

在允许的深度范围内,可以通过立体匹配的原理实现光场图像的深度估计。那么深度分辨率同样可以由立体匹配原理计算得到。由图 6 中三角关系和薄透镜成像原理,可以得到中间像面到微透镜平面的距离:

$$\frac{a}{B} = \frac{d}{x} \quad (32)$$

也即:

$$a(x) = \frac{1}{x} \cdot B \cdot d \quad (33)$$

将中间像面的深度关系转换到主透镜物空间,即可得到场景的深度信息,设被摄物体到主透镜距离为  $a_L$ ,主透镜焦距为  $f_L$ ,则有:

$$a_L(x) = \left[ \frac{1}{f_L} - \frac{1}{l_0 + a(x)} \right]^{-1} \quad (34)$$

其中,  $l_0$  代表主透镜到微透镜的距离,那么有:

$$\begin{aligned} \partial_x a_L(x) &= \partial_x \left[ \frac{1}{f_L} - \frac{1}{l_0 + a(x)} \right]^{-1} \\ &= \frac{f_L^2 \cdot B \cdot d}{[(l_0 - f_L) \cdot x + B \cdot d]^2} \end{aligned} \quad (35)$$

所以,深度分辨率,也即轴向最小可分辨距离为:

$$\partial_x a_L(x) \cdot \Delta x = \frac{f_L^2 \cdot B \cdot d}{[(l_0 - f_L) \cdot x + B \cdot d]^2} \cdot \Delta x \quad (36)$$

其中,  $\Delta x$  为像素大小,并改写得:

$$\begin{aligned} \partial_x a_L(x) \cdot \Delta x &= \left( \frac{a(x)}{B} \right)^2 \cdot \frac{B}{d} \cdot \frac{(a_L - f_L)^2}{f_L^2} \cdot \Delta x \\ &= [M(x)]^2 \cdot N \cdot \frac{(a_L - f_L)^2}{f_L^2} \cdot \Delta x \end{aligned} \quad (37)$$

可见,深度分辨率主要由微透镜成像关系(也即空间分辨率),微透镜工作 F 数,主透镜焦距,物距以及探测器像素尺寸确定。其中,空间分辨率与

深度分辨率相互约束,而空间分辨率和工作 F 数同时影响了微透镜的景深大小,也造成了对深度分辨率的约束。此外,由于衍射效应,工作 F 数又受到了像素尺寸的制约。

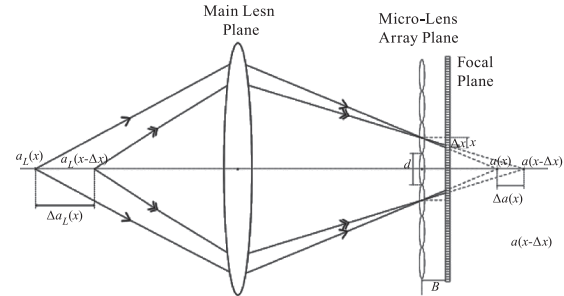


图 6 聚焦型光场相机深度分辨率计算原理图

Fig. 6 Calculation principle diagram of depth resolution of focused light field camera

## 4 深度分辨率最大化设计

由于深度分辨率极大影响了光场相机的三维成像能力,因此我们在设计聚焦型光场相机结构时应着重考虑深度分辨率的最大化。而深度分辨率的影响因素众多,且许多因素相互矛盾,因此需要在设计过程中进行取舍,以获得最佳的成像条件。

### 4.1 预设系统参数

对于长波红外波段,最需要用到的是其被动式夜间探测能力。因此假设一个夜间车载场景,长波红外光场相机用于被动式的探测其他车辆离本车的距离。对于探测器部分,目前国内企业生产的非制冷长波红外焦平面探测器可以达到  $640 \times 512$  分辨率,  $17 \mu\text{m}$  像元大小;对于主透镜的选取,由于长波红外信号弱、信噪比低等不利因素,一般的主透镜 F 数在 2 以下,为了成像效果良好,大多采用 1 或 1.2 的 F 数,考虑到车道宽度以及对场景视场的要求,主透镜焦距应该在尽量大的同时保证一定的视场大小,因此采用 100 mm 焦距,1.2 F 数的长波红外主镜头。以上便是已经给出的预设参数,以下的结构设计将以预设参数为基本来进行设计,但对于主透镜参数,由于其影响因素较多,因此在后续的设计中也可以进行调整,以解决其他参数设计达到极限时还不能满足需求的情况。

### 4.2 详细设计步骤

步骤一,根据聚焦型光场相机的系统结构,其空间分辨率和角度分辨率与微透镜的成像有着较强的关联,如 3.2 小结所述,使用  $M$  代表微透镜成像空间内的物像距之比,并且为了进行立体匹配,要求  $M > 2$ 。由于微透镜成像空间内的物像距之比决定

了空间、角度分辨率的分配,并且其取值也限制了能否计算光场图像的深度值,因此  $M$  值是系统设计过程中的主要参数之一。

步骤二,考虑到衍射效应,探测器上获得的有效最小分辨率尺寸为  $s$ 。为了使探测器像素得到最有效的利用,有:

$$r_s \leq p \Rightarrow 1.22\lambda N \leq 17 \mu\text{m} \quad (38)$$

所以,  $s = p = 17 \mu\text{m}$ 。

步骤三,由 3.3 小结可知,中间像空间深度范围可以近似为微透镜的景深,因此,中间像空间深度范围由式(31)求出。那么对于我们要求的物空间成像范围,其共轭的像空间成像范围应处于中间像空间深度范围内。由主透镜成像公式,得到主透镜成像的中间虚像面到微透镜阵列距离为:

$$a(x) = \frac{a_L f_L}{a_L - f_L} - l_0 \quad (39)$$

因此为了满足上述关系,结合式(31),需要的中间像空间深度为:

$$DOF = 2Ns(M + M^2) \geq a^+(x) - a^-(x) \quad (40)$$

其中,  $a^+(x), a^-(x)$  为主透镜成像的两个边界位置。

步骤四,进行深度分辨率最大化设计。根据 3.4 小节分析,并且结合式(37)可以看到,为使深度分辨率最大,也即最小可分辨距离最小,应使  $N, M(x)$  的取值最小,此外物面成像距离、主透镜焦距以及探测器像元大小也都是影响深度分辨率的重要因素。

步骤五,综合考虑上述公式及边界条件,并将假设的系统参数代入,解得:

$$\frac{13.4}{M + M^2} \leq N \leq 1.23 \quad (41)$$

由不等式解得  $M \geq 2.9$ ,考虑到空间分辨率的要求,  $M$  应尽量小,取  $M = 3$ ,则  $1.12 \leq N \leq 1.23$ ,为使深度分辨率最大,取  $N = 1.12$ 。除了这些被约束的参数,微透镜的尺寸(或是微透镜到探测器的距离)可以自由取值,考虑到微透镜的制造要求,分别取  $d$  为 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm,将参数带入深度分辨率公式,可得聚焦型光场相机深度分辨率随物距变化的曲线,如图 7 所示。可见在较近距离处,选择大尺寸微透镜可以得到较高的深度分辨率;远距离处,选择小尺寸微透镜可以得到较高的深度分辨率。

此外,同样可以得到在不同虚深度  $M$  下,也即不同的空间分辨率分配下,聚焦型光场相机深度分辨率随物距变化的曲线,如图 8 所示。可见随着虚深度逐

渐变小,也即角度分辨率减小,空间分辨率增大的情况下,聚焦型光场相机的深度分辨率是逐渐提升的。

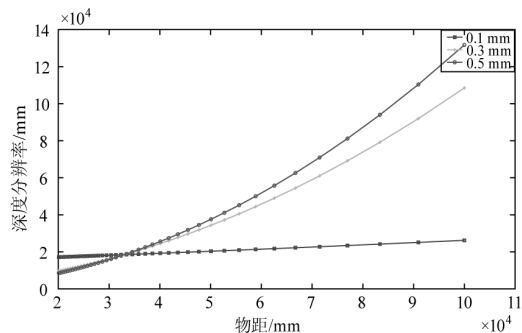


图 7 不同微透镜孔径下深度分辨率随物距变化的曲线图  
Fig. 7 Line diagram of depth resolution versus object distance for different microlens apertures

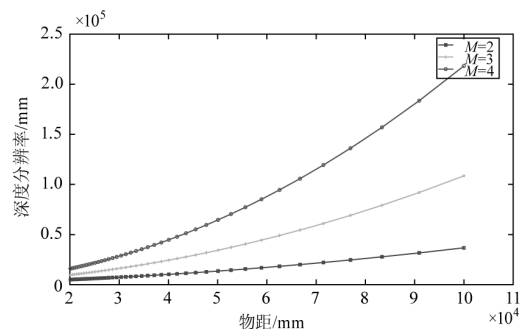


图 8 不同空间分辨率分配下深度分辨率随物距变化的曲线图  
Fig. 8 Line diagram of depth resolution versus object distance for different spatial resolution assignments

最后,如图 9 所示,我们也给出了在不同微透镜孔径的情况下,深度分辨率随虚深度变化的曲线图。可以看到,选择小尺寸孔径微透镜时,深度分辨率随虚深度的改变其变化不明显;选择大尺寸孔径微透镜时,深度分辨率随虚深度的改变其变化较为明显。因此,我们在选择微透镜时,不宜选取孔径过大的微透镜,会造成光场相机在拍摄图像时,对同一场景下不同深度物体的深度分辨率差异过大,进而影响深度估计算法的作用范围。

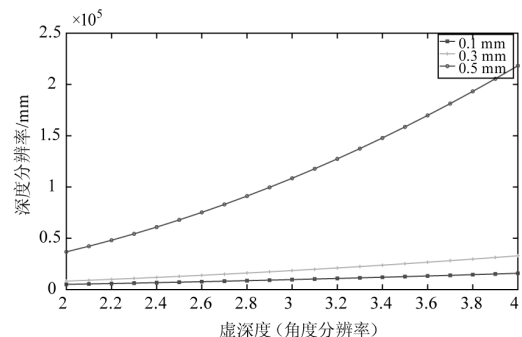


图 9 不同微透镜孔径下深度分辨率随虚深度变化的曲线图  
Fig. 9 Line diagram of depth resolution versus virtual depth for different microlens apertures

## 5 基于 Zemax 的光场相机成像仿真结果

在完成系统的理论设计后,采用 Zemax 软件进行光场相机成像过程的仿真。此处仿真的场景设定为 10 m 左右位置处成像,根据上节的设计步骤,可以得到表 1 所示的系统结构参数,其系统光学结构如图 10 所示,其中主透镜用理想透镜代替。

表 1 聚焦型光场相机系统结构参数

Tab. 1 System structure parameters of focused light field camera

System structure parameter	Value
Main lens focal length/mm	100
Main lens aperture/mm	83
Micro lens focal length/mm	0.4
Micro lens aperture/mm	0.2
$a/b/mm$	0.672/0.224
Focus distance/mm	10000
Detector resolution	640 × 512
Detector pixel size/ $\mu m$	17

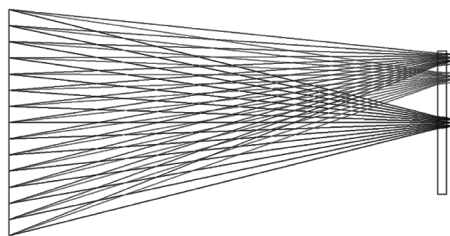


图 10 Zemax 中聚焦型光场相机结构光路图

Fig. 10 Optical path structure diagram of focused light field camera in Zemax

根据表格中的系统参数可以看到,场景中的每个物点可以被 3 个微透镜成像,因此系统的角度分辨率为  $3 \times 3$ ,空间分辨率为  $213 \times 170$ ,这样的设计是最大化深度分辨率的结果。最终,使用 Zemax 中位图图像模拟功能,得到了探测器面上接收到的图像,如图 11 所示。图像中包括了  $54 \times 43$  的微图像阵列,每个微图像中包含了  $10 \times 10$  个像素。根据聚焦型光场相机图像渲染算法,通过选取合适大小的图像块,再将其按顺序拼在一起便可重构二维子孔径图,根据式(17)得到:

$$M = d \times \frac{b}{a} = 0.07 \text{ mm} \quad (42)$$

那么选取 0.07 mm 边长的图像块,也即每个微图像中选取  $3 \times 3$  的像素便可完成二维子孔径图的渲染重构,如图 12 所示,渲染出了所有方向的子孔

径图像。同时可以看到,由于我们采用了伽利略型光场相机的结构,探测器上的图像直接呈现正像,不需要做翻转图像的处理。

## 6 结论

本文将长波红外成像与光场成像相结合,提出了长波红外光场成像技术,可以在夜间或其他恶劣条件下实现三维成像,扩展了光场成像的应用场景。通过基于微透镜阵列的聚焦型光场相机的系统结构,分析了不同的系统结构参数对光场相机成像的影响,尤其是对深度分辨率的影响。设计系统时,在考虑系统关键参数的基础上提前计算深度分辨率的思路,通过对深度分辨率的预估设计,获得满足实际应用需求的光场相机。完成设计后使用 Zemax 光学仿真软件完成了长波红外光场成像系统的仿真建模,并通过位图图像模拟功能获得了模拟的光场图像。仿真结果表明,本文提出的设计方法正确有效,可以得到满足使用要求的红外光场相机,红外为光场相机的应用奠定了良好的基础。



图 11 使用 Zemax 位图图像模拟功能得到的仿真光场图像

Fig. 11 Simulation light field image using bitmap image analysis in Zemax

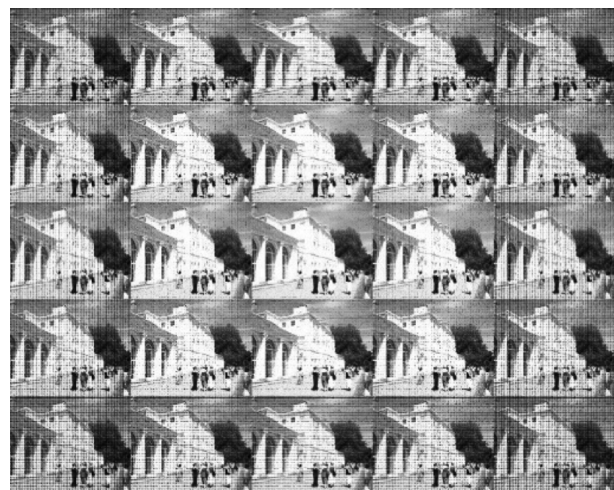


图 12 渲染得到所有方向的二维子孔径图像

Fig. 12 Two-dimensional sub-aperture image through rendering



## 参考文献:

- [1] Zuo Chao, Chen Qian. Computational optical imaging: an overview[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2):158-338. (in Chinese)  
左超,陈钱. 计算光学成像: 何来, 何处, 何去, 何从?[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2):158-338.
- [2] Liu Yuxuan, Zhang Li, Ai Haibin, et al. Progress and prospect of 3D reconstruction based on light field cameras[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(7):1774-1792. (in Chinese)  
刘玉轩, 张力, 艾海滨, 等. 光场相机三维重建研究进展与展望[J]. *电子学报*, 2022, 50(7):1774-1792.
- [3] Chen Jichi, Wei Guohua, Guo Conglong, et al. Preliminary study on a deep learning 3D reconstruction simulation method based on infrared image sequence[J]. *Air & SPACE Defense*, 2020, 3(4):21-29. (in Chinese)  
陈寂驰, 魏国华, 郭聪隆, 等. 一种基于红外图像序列的深度学习的三维重建仿真方法初探[J]. *空天防御*, 2020, 3(4):21-29.
- [4] Xia Chaoyang, Tian Yongzhi, Liang Erjun, et al. Infrared light field imaging based on camera array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9):911002. (in Chinese)  
夏朝阳, 田勇志, 梁二军, 等. 基于相机阵列的红外光场成像[J]. *光学学报*, 2017, 37(9):911002.
- [5] 夏朝阳, 牧凯军, 梁二军. 基于红外光场数字重聚焦的三维场景重建[C]//第十九届全国光散射学术会议摘要集, 2017:283.
- [6] Wang Tengfei, Fu Yutian. Radiation calibration and correction in infrared light field imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7):99-105. (in Chinese)  
王腾飞, 傅雨田. 红外光场成像中的辐射定标与校正[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7):99-105.
- [7] 王腾飞, 傅雨田. 非制冷长波红外光场相机成像系统设计[C]//2019年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛论文集, 2019:111-122.
- [8] Wang Tengfei, Chen Yonghe, Fu Yutian. Infrared light field relay imaging system based on micro field lens array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7):91-96. (in Chinese)  
王腾飞, 陈永和, 傅雨田. 基于微场镜阵列的红外光场中继成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7):91-96.
- [9] Lü Nanfang, Zhang Cunlin, Xie Yuan, et al. Passive light field imaging based on far infrared camera[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2018, (4):16. (in Chinese)  
吕南方, 张存林, 谢缘, 等. 基于远红外相机的被动式光场成像[J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2018, (4):16.
- [10] Cossu K, Druart G, Belhaire E, et al. Design, implementation and performance analysis of cooled infrared cameras with single FPA depth estimation capabilities[C]//Novel Optical Systems Design and Optimization XIX. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9948:99480B.
- [11] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[D]. Stanford University, 2005.
- [12] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera[C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography. IEEE, 2009:1-8.
- [13] Lumsdaine A, Georgiev T. Full resolution lightfield rendering[J]. Indiana University and Adobe Systems, Tech. Rep, 2008, 91:92.
- [14] Georgiev T, Lumsdaine A. Reducing plenoptic camera artifacts[C]//Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2010, 29(6):1955-1968.
- [15] Yuan Suochao, Li Ming, Da Zhengshang. Calibration method for structural parameters and assembly error of light field camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20):61-68. (in Chinese)  
袁索超, 李铭, 达争尚. 光场相机结构参数及装配误差标定方法[J]. *中国激光*, 2021, 48(20):61-68.