

引用格式: DU Xiaorui, XU Huangrong, LI Wenlong, et al. Multi-aperture High Resolution Imaging Technology Based on Plastic Imaging Fiber Array[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0906003

杜晓瑞,许黄蓉,李文龙,等.基于塑料传像光纤阵列的多孔径高分辨成像技术[J].光子学报,2022,51(9):0906003

# 基于塑料传像光纤阵列的多孔径高分辨成像技术

杜晓瑞<sup>1,2</sup>,许黄蓉<sup>2,3</sup>,李文龙<sup>1,2</sup>,贺正权<sup>1</sup>,孔德鹏<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710072)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室,西安 710072)

**摘 要:**为解决传统光纤传像系统中分辨率受传像光纤像素数量制约而导致系统整体分辨率提升困难的问题,提出一种基于塑料传像光纤阵列的多孔径高分辨成像技术,利用传像光纤阵列及图像拼接技术突破像素数难以提升的瓶颈。通过高分辨、小截面的传像光纤组合阵列提升像素,结合微透镜阵列重叠成像的效果,实现光纤阵列成像的完整性,有望使光纤传像系统像素数达到百万数量级。通过建立光纤传像系统性能指标与光学参数之间的关系,仿真设计一款室内监控远心镜头作为传像系统的主镜头,并设计微透镜阵列作为主镜头与传像光纤阵列之间的中继镜头。仿真结果表明,主镜头与微透镜阵列均满足传像光纤性能需求。实验测试结果表明,系统含有 40 万有效像素,分辨率为 40 lp/mm,图像输出完整,该成像系统设计具有良好的可行性,对光纤传像系统的分辨率提升具有重要的实际参考意义。

**关键词:**高分辨成像;多孔径成像;传像光纤阵列;微透镜阵列;监控镜头

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225109.0906003

## 0 引言

塑料传像光纤作为一种由若干光纤均匀分布、规则排列的无源传像器件,因具有柔性好、易弯曲、成本低、耐腐蚀、抗电磁等特点<sup>[1]</sup>,被广泛应用于医学、军事、航空、光电等领域,如医用内窥镜成像和军用潜望式瞄准系统就利用了塑料传像光纤任意弯曲的特性。目前,在光纤传像系统中,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)或互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, COMS)图像传感器的像素数已达到百万甚至千万量级,而传像光纤作为关键的无源图像传输器件,像素数的提升空间非常有限,极大地限制了光纤传像系统的分辨率。已报道的关于传像光纤(或光纤传像束)的研究多数是对其制作工艺进行改善提升,如长春理工大学周德春等<sup>[2]</sup>在 2010 年通过引入 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等材料制备出了数值孔径高达 0.82 的传像光纤,提高了其收光能力。同年,南京春辉科技实业有限公司通过复丝法与层叠法的有机结合生产了单丝数为 120 万、分辨率大于 50 lp/mm 的“大截面高分辨传像束”<sup>[3]</sup>。国外目前对光纤成像的研究更多的是通过后期算法提升获取图像的质量,如美国的亚利桑那大学<sup>[4]</sup>提出一种基于深度学习的方法,建立传像光纤输出图像与真实图像之间的映射,通过不断的学习和评估,提高光纤传像系统的空间分辨率,但该方法目前只对简单图样有效,对复杂内容的图像提升有限。目前商用的传像光纤分辨率最高的是日本的藤仓公司制作的石英传像光纤,外径为 0.65 mm,含有 3 万像素,但是截面很小,对系统的像素提升有限。

**基金项目:**国家自然科学基金(No.62071465),陕西省重点研发计划(Nos.2021GY-048,2020GY-266),西安市科协青年人才托举计划(No.095920201317),中国科学院“西部之光”人才培养计划(No.XAB2021YN11)

**第一作者:**杜晓瑞(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光学设计及光纤传像。Email: duxiaorui@opt.cn

**导师(通讯作者):**孔德鹏(1982—),男,副研究员,博士,主要研究方向为特种塑料光纤及器件。Email: kongdp@opt.ac.cn

**收稿日期:**2021-12-28; **录用日期:**2022-04-02

<http://www.photon.ac.cn>

本文基于塑料传像光纤成本低、柔性好、单丝直径小的特点,提出了一种利用塑料传像光纤阵列有效提升光纤传像系统分辨率的成像技术,在降低成本和制作难度的同时解决了现有光纤传像系统中分辨率受传像光纤像素数制约的瓶颈。同时在传像光纤阵列前端引入微透镜阵列,利用其部分重叠成像的特点,解决传像光纤阵列因光纤束间隙造成的图像缺失的问题。

## 1 系统设计与成像原理

传像光纤阵列多孔径成像系统光路如图1,主要由主镜头、微透镜阵列、塑料传像光纤阵列、CCD相机以及计算机组成。主镜头接收物体信息汇聚成一次像,一次像再经过微透镜阵列汇聚到传像光纤中,耦合镜头接收传像光纤出来的光束再传递到CCD感光面实时成像并在计算机中显示。

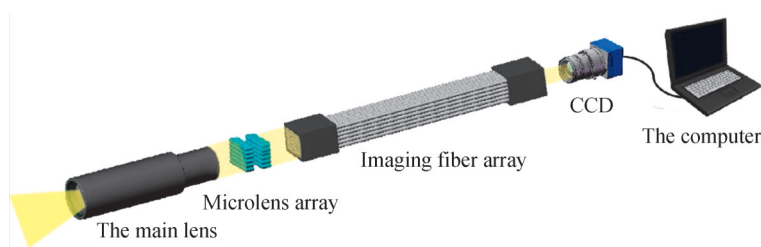


图1 传像光纤阵列成像系统示意  
Fig. 1 Schematic of imaging fiber array image transmission system

由图1可见,整个传像系统可分为三部分:镜头成像、光纤束阵列传像及CCD接收图像。镜头的分辨率、光纤束阵列的分辨率以及CCD的分辨率共同影响着系统传像效果,其中分辨率最低的一部分会决定传像系统最终分辨率。目前镜头与CCD可达到几百至上千万像素,而传像光纤束通常只有几万至几十万像素,且单丝直径最细只能做到十几微米。因此在外形尺寸不变的前提下,传像光纤的单丝直径越小、像素数越多,则整个传像系统的分辨率越高。

分辨率通常分为物方分辨率与像方分辨率,其关系为

$$P_u(\text{lp/mm}) = P_v(\text{lp/mm}) \times X \quad (1)$$

式中, $P_u$ 为物方分辨率,表示物空间中描述物体细节的能力, $P_v$ 为像方分辨率, $X$ 是光学元件的放大率(通常指镜头)。在该系统中,镜头的像方即是传像光纤的物方,传像光纤的像方即是CCD的物方,根据式(1)可得理论上的系统分辨率为

$$P_{v3} \cdot X_3 = \frac{P_{v1}}{X_2} \quad (2)$$

式中, $P_{v1}$ 是镜头像方分辨率, $P_{v3}$ 是CCD输出图像分辨率, $X_2$ 和 $X_3$ 分别是传像光纤和CCD的放大率。由式(2)可知理想状态下系统获取图像的分辨率取决于镜头的分辨率,但实际情况中传像光纤的分辨率小于镜头分辨率和CCD分辨率,由此导致最终图像的分辨率 $P_{v3} = P_{v2} < P_{v1}$ , $P_{v2}$ 是传像光纤分辨率。传像光纤由成千上万根光纤单丝构成,其分辨率取决于单丝直径大小即固定尺寸内含有的像素数量,分辨率与像素的关系为

$$P(\text{lp/mm}) = \frac{1}{2d} = \frac{\sqrt{N \cdot \pi}}{4\sqrt{S}} \quad (3)$$

式中, $d$ 是光纤单丝直径, $N$ 是传像光纤像素总数, $S$ 是传像光纤的截面积。在一定截面积 $S$ 内,分辨率 $P$ 决于含有的像素数量 $N$ 。镜头成像尺寸是一定的,故传像光纤的截面尺寸也是一定的,此时传像光纤分辨率由其含有的像素数决定,像素数越多、像元直径越小,系统分辨率越高。本文旨在提高传像光纤的像素数量,从而使光学系统分辨率得到提升。

### 1.1 系统成像原理

系统成像部分由主镜头与微透镜阵列承担,其成像原理如图2。图2(a)为物点经过主镜头后形成的一次像再次经过轴上子透镜汇聚到像面,图2(b)为同一物点经过主镜头后分别经过离轴的两个子透镜汇聚到

像面,由此,同一物点可以在多个微透镜后聚焦成像,通过合理的光学设计,最终能够实现相邻子透镜成部分重叠的像<sup>[5]</sup>。

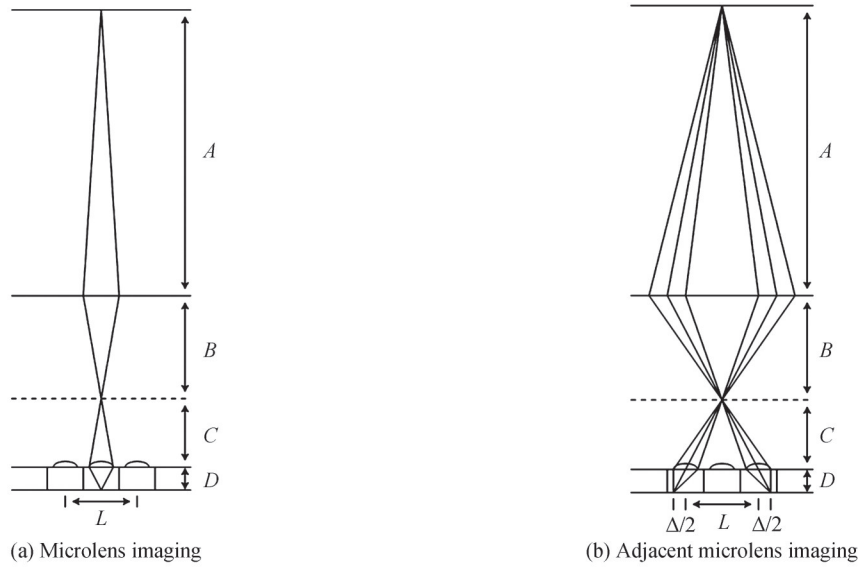


图2 系统成像原理

Fig. 2 Principle of system imaging

设物体高度为  $Y$ , 物体经过主镜头成的像高为  $Y'$ , 经微透镜二次成像后像高为  $L/2$ , 其关系为<sup>[6]</sup>

$$\frac{Y'}{Y} = \frac{B}{A} \quad (4)$$

$$\frac{L/2}{Y'} = \frac{D}{C} \quad (5)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别为主镜头成像的物距和像距以及微透镜成像的物距和像距, 设  $\Delta/2$  为同一物点在相邻微透镜成像位置变化, 微透镜与其相邻透镜成像差异率为  $K$ , 则

$$K = \frac{\Delta/2}{L/2} = \frac{D}{C} \quad (6)$$

由式(6)可得, 微透镜阵列成像的差异率与其物距  $C$  有关, 微透镜成像的物距  $C$  越大, 其与相邻图像差异率越小, 重叠率越高。当物距  $C$  远大于微透镜像距  $D$  时(本文微透镜像距小于 1 mm), 差异率接近于 0, 造成相邻微透镜成像高度重叠的现象, 通常物体离镜头的距离远高于微透镜阵列成像的后截距。为保证微透镜阵列的每个子透镜成像质量良好, 二次像入射到微透镜表面时需为远心光路, 使全视场成像效果与主光轴一致, 避免轴外光线经过离轴的子透镜时成像不清晰。因此, 搭配一个像方远心的主镜头对物体成一次像, 然后用微透镜阵列成二次像, 通过调节一次像到微透镜阵列的距离来控制相邻子图像的重叠比例。合适的子图像重叠率, 可以有效解决传像光纤阵列中的图像空缺问题。

## 1.2 设计参数

### 1.2.1 镜头设计

选择常用的室内监控作为应用场景, 设计一款监控镜头作为主镜头, 用于对目标物体成像。室内监控镜头的主要参数为视场角与景深, 以常见的单间办公室为目标场景, 长、宽、高分别为 6 m、3.7 m、3.7 m。监视镜头安装于顶部角落, 则需要设计的视场角约为  $88^\circ$ , 景深为 5 m 以上。系统的景深与焦距、光圈等参数的关系可表示为<sup>[7]</sup>

$$w = w_1 + w_2 = \frac{2FRI^2}{f^2 + 2FRI} + \frac{2FRI^2}{f^2 - 2FRI} \quad (7)$$

式中,  $F$  为光圈大小,  $I$  为对焦距离,  $R$  是弥散圆半径,  $f$  为焦距(物理焦距而非等效焦距),  $w_1$  和  $w_2$  分别代表前景深和背景深。根据式(7)可看出光圈对景深的影响最小, 对对焦距离对景深的影响最大, 其次是焦距。因此

主要考虑缩小焦距和增大对焦距离来达到景深要求<sup>[8]</sup>,具体设计参数如表1。

表1 监控镜头参数设计  
Table 1 Design parameters of surveillance lens

Parameter	Value
Focal length/mm	10.0~10.5
$F$ number	6.4
Central wavelength/nm	550
Field of view angle/(°)	88
Back focal length/mm	>5
Total length of optical system/mm	<170

由于微透镜阵列要与传像光纤阵列对接,传像光纤直径为1.5 mm,传感器长宽比为4:3,因此微透镜阵列设计为6×8阵列,子透镜直径为1.5 mm。控制微透镜阵列成像的物距,使其达到合适的图像重叠率。考虑图像处理需裁切出传像光纤内接正方形图像,经计算,设计20%的图像重复率可使图像拼接完整且不浪费像素。另外,因非球面透镜具有更好的聚焦效果,故使用非球面设计,微透镜设计参数如表2,结构参数如表3。

表2 微透镜参数设计  
Table 2 Design parameters of micro lens

Parameter	Value
Focal length/mm	5.2~5.8
$F$ number	5.6
Central wavelength/nm	550
Field of view angle/(°)	38
Back focal length/mm	>0.5
Total length of optical system/mm	<15

表3 微透镜结构参数  
Table 3 Structural parameters of microlens

Surf	Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	$k$	$A_2$	$A_4$	$A_6$
OJB			2.7					
1	Even asphere	2.047	3	PMMA	-4.226	0.041	0.017	-0.003 578
2			2.5					
3	Even asphere	3.322	3.5	PMMA	-80.856	0.22	0.193	-0.308
4			1					
IMA			-					

### 1.2.2 传像光纤阵列

基于目前市场上商用高分辨大截面传像光纤通常为几十万像素,为验证本文成像系统,传像光纤选用实验室已有的外径为1.5 mm的塑料光纤,内含六边形排列的1.3万个像素,像元大小约为12  $\mu\text{m}$ ,理论分辨率为42 lp/mm。传像光纤设计为6×8的矩形阵列,如图3所示,长宽比与CCD相机的图像传感器匹配。传像光纤阵列像素总数为62.4万,经图像处理有效像素数约为40万。

图中红框部分为光纤阵列的间隙,其占空比为22%。若直接采用传像光纤阵列成像,则会因其排列间隙造成22%的信息缺失。因此结合设计的微透镜阵列,可利用多孔径成像的特点有效解决传像光纤阵列中的图像空缺问题。

按照设计,在不改变光纤阵列截面尺寸的情况下,所采用传像光纤的单丝越细,传像光纤阵列像素数越多,系统分辨率越高。据调研发现目前市场上存在一种外径为0.5 mm,像素数为7 400的传像光纤,单丝直

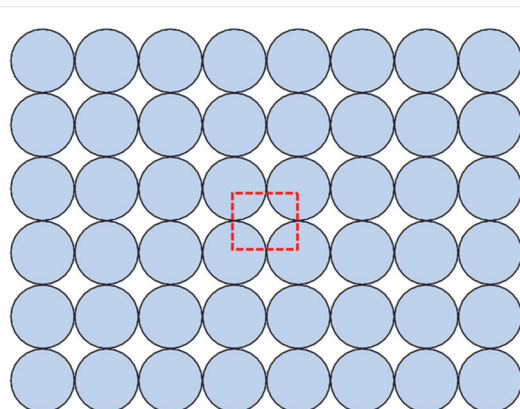


图3 传像光纤阵列  
Fig. 3 Imaging fiber array

径为  $5\ \mu\text{m}$ ,若采用该传像光纤,可使系统有效像素数达到200万以上,提升至百万数量级,使系统分辨率得到较大提升。

### 1.3 结构设计及优化

对于光学系统初始的结构设计一般有经验法、资料法以及初级像差理论计算法<sup>[9]</sup>。由于初级像差理论计算复杂且不灵活,而本文系统光学设计目标参数明确,因此利用经验选取一种双高斯结构镜头作为主镜头的初始结构。

双高斯镜头的结构特性可以有效减少一部分像差,由于视场、景深、像面大小等要求,在选定的双高斯结构基础上增加了一组位于右端的镜片形成非对称的双高斯镜头,用于扩大光圈和进一步纠正像差,便于后续远心光路的设计。但该结构在  $88^\circ$ 左右的视场较难达到所需像高,因此在最左端放置一片凹透镜,配合后面的凸透镜组形成反望远镜结构。在反望远镜修正下的双高斯结构可以增加后截距便于后面的传感器或镜头连接,在不过分增长焦距和后截距的情况下获取更大的像<sup>[10]</sup>,镜头最终结构参数如表4。

表4 镜头结构参数  
Table 4 Structural parameters of lens

Surf	Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
OJB	Standard	Infinity	1 300	
1	Standard	93.17	4	H-LAK2
2	Standard	17.947	9	
3	Standard	-276	8.5	H-ZF3
4	Standard	-21.59	3	H-LAK2
5	Standard	31.5	63	
6	Standard	21	9.5	H-LAK2
7	Standard	11.5	9.5	H-BAK4
8	Standard	-17.73	1.5	
9	Standard	-14.454	1.5	H-ZF3
10	Standard	-37.1	1	
STO	Standard	Infinity	35	
12	Standard	39.036	5.5	H-BAK4
13	Standard	-16	1.7	
14	Standard	-13.5	10	H-ZF3
15	Standard	-27.2	5.755	
IMA	Standard	Infinity	—	

## 2 设计结果与公差分析

### 2.1 设计结果

最终的镜头组结构如图4。物镜系统焦距为10.1 mm,光圈系数为6.3,光学总长为168 mm,符合常见的监控镜头设计规格<sup>[11]</sup>。系统工作距离为1 300 mm,视场角为88°,系统前景深为630 mm,后景深为4 200 mm,满足实验环境需求。

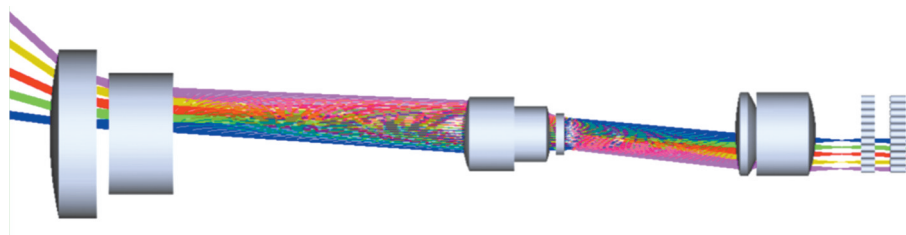
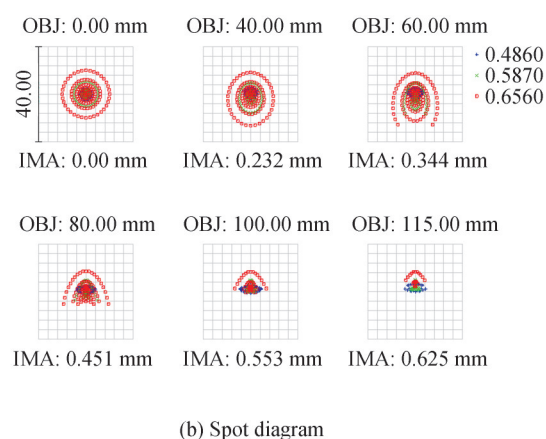
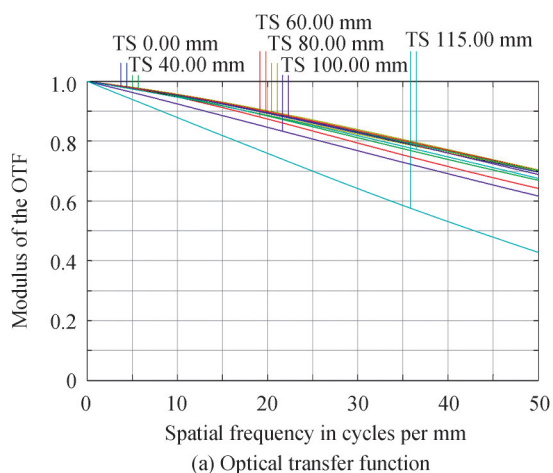


图4 监控镜头及微透镜阵列结构  
Fig. 4 Structure of the monitoring lens and microlens array

### 2.2 像质分析

在经过光学仿真软件对系统的优化后,一般采用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)、点列图、横向色差等对系统的成像质量进行分析。MTF曲线图是对镜头成像清晰程度的一个定量的描述,包含分辨率和对比度两个参数,是国际上广泛认可的对成像质量最客观最权威的评价<sup>[12]</sup>。点列图是描述物点经过镜头汇聚后最终呈现的弥散斑大小以及能量分布,主要用于描述系统球差以及判断能否匹配传感器像素大小。结合MTF曲线图和点列图再辅以场曲、色差等就可以对系统作出一个较为全面的像质分析。

图5为主镜头加一组同轴微透镜所组成系统的像质评价指标,代表每组微透镜后的成像效果。主镜头观测物高为1 221 mm,微透镜尺寸为主镜头所成像高的十分之一,再结合仿真软件的光线追迹效果,将视场设置为物高0~115 mm。由图5可以看出系统拥有较高的分辨率,其MTF值在50 lp/mm处可达0.4以上,且90%的视场内MTF值在0.6以上。整体视场的曲线较为集中且平滑,尤其是0.7视场以内的曲线,边缘视场对系统成像质量影响不大且像质较难提升,因此可以认为该系统成像质量良好,满足后接传像光纤的分辨率需求以及CCD匹配。各视场的点列图RMS半径均在衍射极限附近,且都小于传像光纤单丝半径,满足传像需求。横向色差基本在艾里斑之内,对像质影响可忽略。



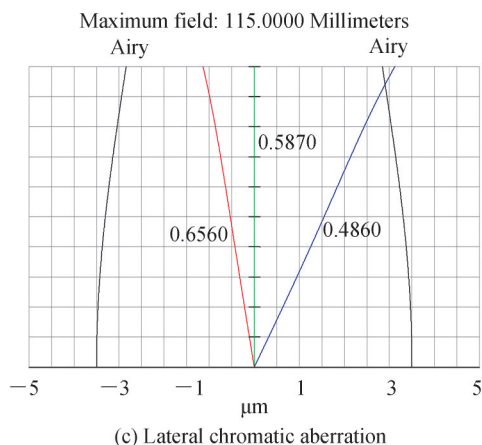


图5 系统评价指标

Fig. 5 System evaluation index

### 2.3 公差分析

由于透镜在加工的时候很难做到完全精准,因此在光学设计的时候要对透镜的制造公差进行分析,在保证高质量成像的前提下最大程度容忍一定量的系统公差。因此使用光学设计软件以衍射MTF平均值作为评价标准,分析该系统在50 lp/mm处的MTF变化情况。设定表面半径公差为4个条纹,表面偏心公差为0.02 mm,表面倾斜及元件倾斜公差均为 $0.03^\circ$ ,元件偏心公差为0.03 mm,表面厚度公差为0.03 mm,选择S+A不规则度,光圈值为0.3,进行1000次蒙特卡洛分析。分析结果如表5,表明在公差允许范围内可获取较高成像质量。

表5 蒙特卡洛分析结果

Table 5 Results of Monte Carlo tolerance analysis

Percentage of monte Carlo samples	MTF
98%	0.447 705 82
90%	0.523 852 68
80%	0.553 833 89
50%	0.598 167 63
20%	0.628 431 73

## 3 系统搭建与实验结果

根据实验环境,选用了一款型号为SHL-2060的彩色CCD来接收图像信息。系统搭建如图6所示,首先利用主镜头收集目标物体的信息,使光线汇聚到微透镜阵列前端形成一次像。调节两片微透镜阵列的位置使光线进一步聚焦,从而进入传像光纤阵列中,每一根传像光纤对应一个微透镜。由于实验为验证性实验,故传像光纤长度定为20 cm以满足实验需求。为了更好地耦合光线,根据传像光纤的结构特点选取光学放大倍率为0.13~2倍的ML15变焦远心镜头作耦合镜头,以便清晰完整地将经由传像光纤阵列传输来的图像耦合到后端的CCD中。

为测试该系统的图像传输质量,使用ISO 12233标准型分辨率测试卡作为目标物体检测系统分辨率。ISO 12233标准型分辨率测试卡有SFR测试、楔形线测试以及频率线测试三种测试方法,实验采用频率线测试。图7为系统拍摄的分辨率测试卡,从图片上红框部分可知该系统可分辨位置为6~7之间,约为6.5左右,测试卡标度为 $100\times$ ,所以观测结果约为650线对。根据图像高度算出该分辨率约为40 lp/mm,接近所用传像光纤的分辨率42 lp/mm,表明该系统符合设计要求。

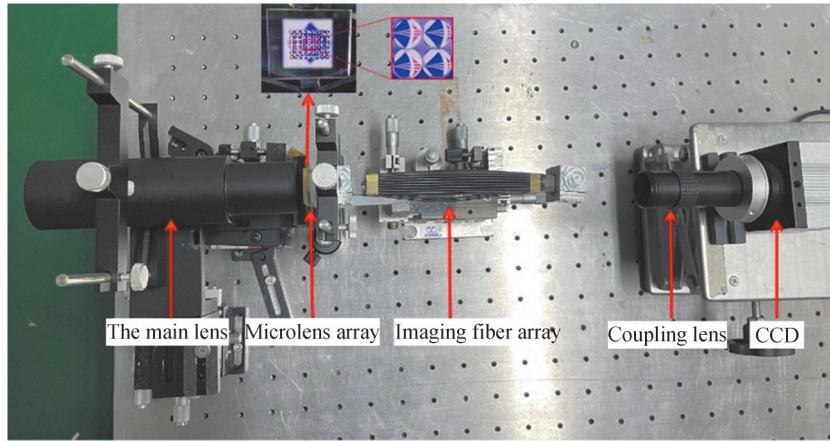


图6 光纤阵列监控系统  
Fig. 6 Optical fiber array monitoring system

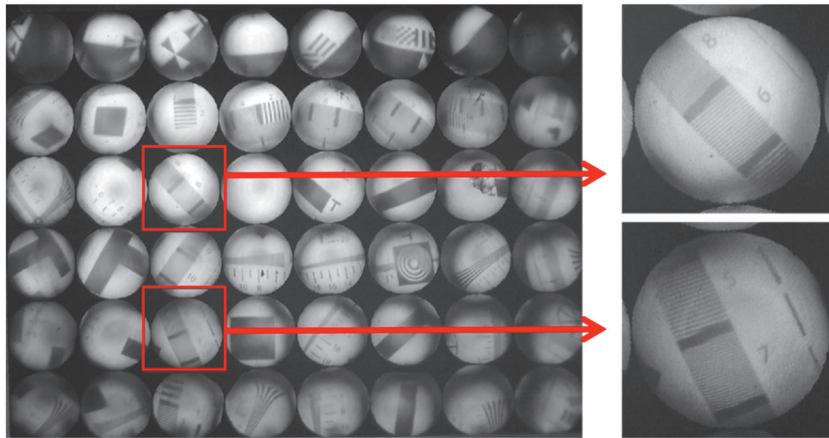


图7 光纤阵列监控系统分辨率测试图  
Fig. 7 Resolution test image of optical fiber array monitoring system

为了验证所设计的传像系统的可行性,将整个系统搭建完成后对实时环境进行拍摄。图8(a)为系统拍摄图片。利用数字图像处理技术对每一个子图进行标定、旋转、裁切和拼接处理。图8(b)为处理后的图像,该图像包含的传像光纤的有效像素数约40万,图片内容表达完整,可以清楚地看出观测内容。若采用单丝直径更小的传像光纤,如日本旭化成公司生产的0.5 mm外径,含7 400像素的传像光纤,采用与本文传像光纤阵列相同的截面尺寸,排列成 $18 \times 24$ 矩形阵列,可使系统有效像素数达200万以上,成像质量更佳。

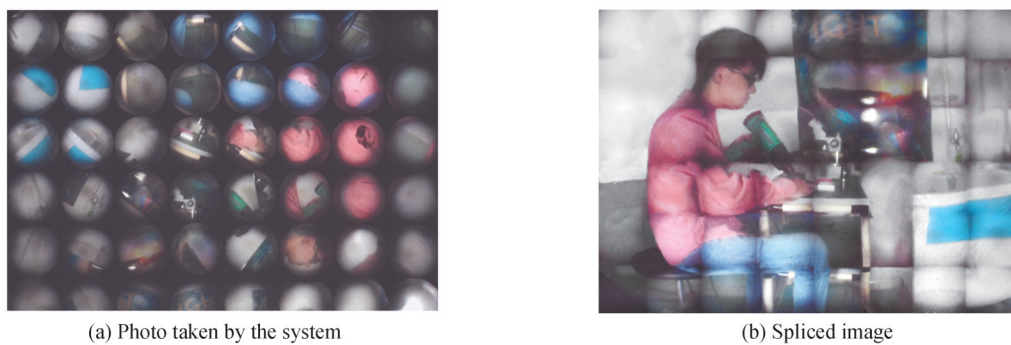


图8 光纤阵列监控系统实验结果  
Fig. 8 Experimental results of optical fiber array monitoring system



如图8所示,图片拼接处过渡不自然,仍有网格效应,且每个子图边缘视场较暗。造成这种现象的原因是传像光纤阵列中光纤束之间存在间隙,而设计的微透镜阵列中相邻子透镜之间都是紧密相接的,这会导导致光纤与子透镜的位置无法完全对应,导致图像丢失部分信息,使得图像拼接处过渡不自然。同时由于加工方式和工艺的原因,微透镜阵列中子透镜边缘彼此重叠(如图9中红色框线中所示),使得该位置的光线经过透镜后无法正常成像,从而引起边缘视场较暗和图像信息缺失。实际应用中,为了解决上述问题,可根据传像光纤阵列中光纤的分布位置重新设计制作微透镜阵列,使每一个子透镜都能与传像光纤阵列中的光纤位置一一对应。同时还可减小子透镜的有效孔径来减少子透镜和光纤位置存在偏差带来的影响。

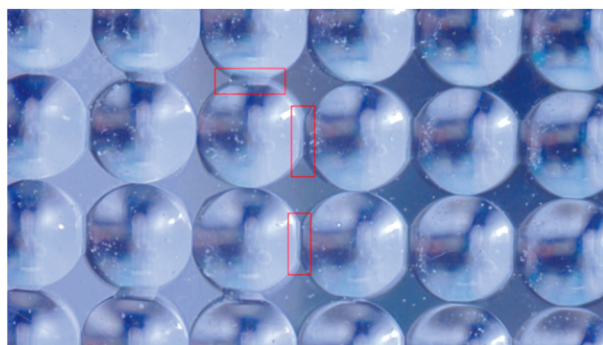


图9 微透镜列表面拍摄图  
Fig.9 Surface image of microlens array

## 4 结论

本文提出了一种基于塑料传像光纤阵列的多孔径高分辨成像技术,解决传统光纤传像系统的分辨率受传像光纤像素数目制约的问题。高分辨、细单丝的传像光纤难以直接做成大截面、高像素数的传像束,而市场上的常规传像束单丝直径最小也是十几微米。本文通过将高分辨、小截面的传像光纤集束成阵列,在不改变传像系统径向尺寸的情况下,解决了像素提升的问题,并且利用微透镜阵列成像的重叠性解决了传统光纤束阵列成像时光纤束间隙造成的信息缺失,使系统获得完整清晰的像。通过构建传像系统性能指标与光学参数之间的关系,仿真设计出主镜头和微透镜阵列与系统搭配,设计结果良好,为该系统提供了理论基础。实验数据表明该传像系统拥有60万总像素数,约40万有效像素,输出图像信息完整,分辨率达到40 lp/mm以上,与采用的传像光纤分辨率很接近。该系统通过提升一定截面尺寸内像素数来提升分辨率,故单丝直径越小系统分辨率越高,采用单丝直径更小、性能更好的传像光纤理论上可使光

纤传像系统像素数达到百万级别。因此,该成像技术对光纤传像系统的分辨率提升具有重要的实际应用价值。

### 参考文献

- [1] ZHAI Chengcheng, ZHANG Bin, QI Sisheng, et al. Fabrication and properties of flexible chalcogenide fiber image bundles [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806005.  
翟诚诚, 张斌, 祁思胜, 等. 柔性硫系玻璃光纤传像束的制备及性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806005.
- [2] ZHOU Dechun, YU Fengxia, TAN Fang, et al. Preparation and optical performance of large numerical aperture image transfer fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(12): 120605.  
周德春, 于凤霞, 谭芳, 等. 大数值孔径传像光纤的制备及其光学性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(12): 120605.
- [3] DONG Mingming. Research on infrared imaging temperature measurement system based on fiber bundle array[D]. Hefei: Anhui University, 2017.  
董明明. 基于光纤束阵列的红外成像测温系统研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [4] SHAO J, ZHANG J, LIANG R, et al. Fiber bundle imaging resolution enhancement using deep learning [J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15880-15890.
- [5] ARAIJ, KAWAIH, OKANOF. Microlens arrays for integral imaging system[J]. Applied Optics, 2006, 45(36): 9066-9078.
- [6] FIFE K, GAMAL A, WONG H. A 3D multi-aperture image sensor architecture [C]. IEEE Custom Integrated Circuits Conference 2006, 2006: 281-284.
- [7] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2011.
- [8] HE R, ZHANG Y, HIRAKAWA K. Square coded aperture: a large aperture with extended depth of field [J]. Electronic Imaging, 2018, 2018(15): 4711-4718.

- [9] FAN L, LU L. Design of a simple fisheye lens[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(19): 5311-5319.
- [10] LI Songyan, LIANG Xiuling. Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 276-281.  
李松岩, 梁秀玲. 大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(2): 276-281.
- [11] MIAO Zhao. Optical design of large zoom security surveillance lens[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.  
苗兆. 大变倍安防变焦监控镜头的光学设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [12] LUO B, BAI Y, FU X, et al. Analyzing the difference in image quality between different ghost imaging systems using a unified optical transfer function[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 18(6): 065203.

## Multi-aperture High Resolution Imaging Technology Based on Plastic Imaging Fiber Array

DU Xiaorui<sup>1,2</sup>, XU Huangrong<sup>2,3</sup>, LI Wenlong<sup>1,2</sup>, HE Zhengquan<sup>1</sup>, KONG Depeng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Imaging fiber plays an important role in medicine, industry, aerospace and other fields because of its excellent flexibility, especially in the application of optical fiber endoscope in medicine. Optical fiber image transmission system is usually composed of imaging objective, imaging fiber and image sensor. At present, the number of pixels in cameras can reach millions or even tens of millions, but the number of pixels in optical fibers is usually only a few hundred thousand. Therefore, the resolution of the system is limited by the resolution of the imaging fiber itself, and the imaging resolution of the whole system basically depends on the number of pixels that the imaging fiber can transmit. At present, the imaging fiber bundles on the market have either high resolution but small total cross-sectional area, or large cross sectional size but fiber diameter up to ten microns. This phenomenon results in insufficient pixels and small image area of high resolution image fiber, while large cross section can not reach high resolution due to technological limitations. To solve the problems, this paper proposes a multi-aperture high-resolution imaging technology based on imaging fiber array, which uses the imaging fiber array and image Mosaic technology to break through the bottleneck of improving pixel number. The number of pixels in the system can be increased by using high resolution and small cross section imaging fiber arrays. Combined with the characteristics of overlapping imaging of microlens array, the problem of information loss caused by direct imaging of imaging fiber array can be solved and the integrity of optical fiber array imaging can be realized. This method is expected to increase the number of pixels in optical fiber image transmission system to millions of order of magnitude and improve the resolution of the system. The imaging fiber is designed to be arranged  $6 \times 8$ , and the microlens array is designed based on the imaging fiber array. There are two groups of aspherical lenses made of PMMA material, and the imaging fiber array and the two groups of microlens arrays have uniform positions. Add a telecentric objective lens in front of the microlens array as the main lens of the image transmission system to solve the problem of complete overlap of adjacent subgraphs caused by direct imaging of the microlens array. The focal length of the lens is 10.1 mm, the aperture coefficient is 6.3, and the field Angle is  $88^\circ$ . The simulation results show that both the main lens and the microlens array can meet the performance requirements of the imaging fiber, and the object information can be successfully transmitted to the imaging fiber. The modulation transfer function value of the system can reach more than 0.5 at 50 lp/mm, without weakening the quality of the primary image, and meet the resolution requirements of the imaging fiber. Experimental results show that the system contains 400 000 effective pixels and the system resolution is 40 lp/mm. The image is clear and complete, which proves that the design of the imaging system has a good feasibility, and has an important practical reference significance for improving the resolution of the optical fiber image transmission system.

**Key words:** High resolution imaging; Multi-aperture imaging; Imaging fiber array; Microlens array; Surveillance lens

**OCIS Codes:** 060.2350; 110.2350; 220.4830; 080.2740

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No.62071465), Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (Nos.2021GY-048, 2020GY-266), Youth Talent Lift Project of Xi'an Science and Technology Association (No.095920201317), "Light of the West" Talent Training Program of Chinese Academy of Sciences (No.XAB2021YN11)