用于物证搜寻的大视场变焦偏振成像光学系统设计

尹 骁[1,2],李英超[1],史浩东[1],江 伦[1],王 超[1],刘 壮[1],李冠霖[1]

(1. 长春理工大学 空间光电技术研究所,吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要:针对传统无人机载相机在复杂环境下物证搜寻成像对比度低、证物识别难度大等问题,提出利用偏振成像技术,进行物证搜寻识别。为保证搜寻效率、识别概率和低照条件下成像效果,设计了大视场大相对孔径两档变焦偏振成像光学系统。系统焦距分别为 11 mm 和 22 mm,F 数分别为 1.8 和 2.7,视场角 60°和 34°,并给出了合理的调焦方式,可实现在 3 m 和 10 m 飞行高度下清晰成像。经过仿真分析,调制传递函数在奈奎斯特频率 91 lp/mm 处优于 0.45,满足成像质量要求,公差分析显示,在满足成像质量条件下,公差范围合理。将系统与微偏振片阵列探测器集成,搭载无人机平台,可在复杂环境中对案发现场进行实时高效物证搜寻,大幅提升案事件破获能力。

关键词:物证搜寻; 变焦镜头; 光学设计; 偏振
中图分类号:O439 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0418006

Wide-angle zoom polarization imaging optical system design for physical evidence search

Yin Xiao[1,2], Li Yingchao[1], Shi Haodong[1], Jiang Lun[1], Wang Chao[1], Liu Zhuang[1], Li Guanlin[1]

(1. Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of searching for physical evidence in complex environments by ordinary unmanned airborne cameras, a method using polarization imaging technology was proposed to conduct physical evidence detection and search. In order to ensure search efficiency and work under low illumination conditions, a large field-of-view and large relative aperture two-speed zoom polarization imaging optical system was designed. The system had a focal length of 11 mm and 22 mm, the F-number of 1.8 and 2.7, an angle of view of 60° and 34°, and a reasonable focusing method was given, which can achieve clear imaging at 3 m and 10 m flying height. After simulation analysis, the design results show that the modulation transfers function (MTF) of short focus and long focus is better than 0.45 at 91 lp/mm, and the imaging quality is better. Tolerance analysis shows that tolerances are well designed to meet imaging quality. The system is integrated with the micro-polarizer array detector and equipped with a drone platform, which can perform real-time and efficient physical evidence search on the crime scene in a complex environment, and greatly enhance the ability of cases to crack.

Key words: physical evidence search; zoom lens; optical design; polarization

收稿日期:2018-12-08; **修订日期**:2018-12-22
基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0803806);吉林省科技厅项目(20160204066GX)
作者简介:尹骁(1993-),男,硕士生,主要从事光学设计、偏振成像等方面的研究。Email:363279468@qq.com
导师简介:李英超(1966-),男,研究员,博士,主要从事光电仪器应用方面的研究。Email:hsjlyc@126.com

0 引 言

现代案件侦破过程中,特别是爆炸案件,具有范围大、环境复杂的特点,使用无人机对现场进行物证搜寻,可以大幅度提升搜寻效率、节省人力,已经成为主要手段之一。但现有的搜寻系统采用的是传统强度成像,图像对比度很低,易受林地、雾霾和复杂地形等环境条件影响,难以对目标进行精准识别,无法满足案事件现场物证搜寻目标小、品种多、环境复杂的特殊需求。

偏振作为光横波性质的外在表现,其偏振信息不仅包含目标的光强信息,同时包含目标材料、粗糙度、几何特征等物理特性。因此在复杂背景中,偏振探测具有提高对比度,凸显目标等优势。而子弹、凶器、爆炸物等人造目标,其偏振特性与自然背景偏振特性差异明显,利用这一特性,可以在证物搜寻过程中发现辨别目标[1-2]。另外,在烟尘雾霾环境中,偏振光穿透能力优于自然光, 可有效增加烟尘雾霾中成像作用距离[3],提高成像质量,对在烟尘中的爆炸现场探测十分有利。因此,将偏振成像技术应用到案事件现场物证搜寻中,将显著提高搜寻识别物证的能力。

微偏振片阵列(Micro-polarizer array,MPA)成像系统,又称分焦平面偏振计、像素偏振片阵列[4]等。其利用纳米级图案化技术, 在玻璃基底上形成具有亚波长间隔的金属光栅, 每 2×2 单元组成一个超像素单元,并分别对应 0°,45°,90°和 135°透偏振方向,可同时获取四个对应偏振方向的强度信息, 具有实时成像、高透过率、高消光比以及宽光谱等特点,更加适用于机载偏振成像探测。目前,4D Technology 公司已研制出的像素化偏振相机 PolarCam, 像素可达 380 万,帧频高达 164 fps,透过率 80%,消光比 50:1[5],已成功运用于航空遥感、天文观测等领域[6]。但目前对于轻小型的无人机载探测成像系统, 其大多仍为强度成像,其代表产品如:2016 年,大疆推出首款变焦云台相机禅思 Z3[7], 焦距 22~77 mm,F2.8~F5.2,视场 92°~35°;2018 年, 法国 Parrot 公司发布的新款无人机 ANAFI[8],焦距 35 mm,F/2.4,视场 84°等。这些无人机载成像系统虽然性能优越, 但仍为强度成像系统、且其 F 值偏大,并不适合于偏振成像,相关偏振成像系统的研究也甚少。因此,研制适用于偏振成像的轻小型大视场变焦镜头, 对于无人机载物证探测具有十分重要的意义。

针对上述问题,文中基于微偏振片成像技术,设计了一款适用于无人机载的大视场、大相对孔径的两档变焦偏振成像光学系统,以提高物证搜寻效率。

1 理论分析

所设计系统的使用需求为, 无人机系统飞行高度为 3~10 m,需要分辨的目标最小为 15 mm×5 mm,收容宽度 8 m 以上。实现途径如下。

1.1 两档变焦系统结构及光焦度分配

目前变焦系统常采用机械补偿的变焦方式,通过改变补偿组位置, 补偿变倍组移动时产生的像面偏移,从而实现变焦。这种变焦方式往往需要设计复杂的机械凸轮系统,不仅体积庞大,而且会消耗过多的能量,不太适用于轻小型无人机探测。因此文中采用两档变焦的结构方式, 有利于简化系统机械结构,缩小系统体积,提高变焦速度,适用于无人机载探测。

广角变焦镜头前组透镜,需收集大视场的光线,光焦度一般为负值;变倍组通常至于中间,用来改变系统光焦度; 后组镜头用来汇聚光线光焦度一般为正值。光学系统基本结构如图 1 所示。系统由前固定组 G1、变倍组 G2、后固定组 G3、微偏振片与探测器组成,光线经前固定组、变倍组、后固定组与微偏振片后,到达探测器,其中微偏振片相机可同时获取 4 个方向的偏振信息,然后对偏振信息进行处理,即可获得偏振图像。

根据上述基本结构,计算变焦系统光焦度分配,有助于解算出变焦系统结构。如图 1 所示,令 Φ,Φ' 分别为短焦与长焦时组元的光焦度;u,u' 分别为短

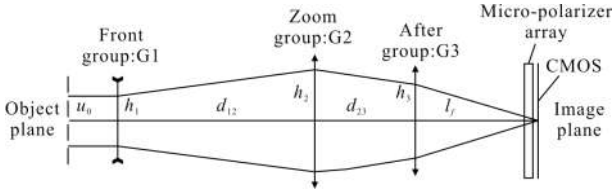


图 1 系统基本结构图

Fig.1 Basic structure of the system

焦与长焦时组元的光线入射角;h,h' 分别为短焦与长焦时组元的光线入射高度;d,d' 分别为短焦与长焦时组元的主面间隔;l_f,l_f' 分别为短焦与长焦时系

统后工作距离。对于三组式两档变焦系统,由高斯光学可得如下公式:

$$\begin{cases} u_1=u_0 \\ h_1=h_0-u_1d_{01} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} u_2=h_1\Phi_1+u_1 \\ h_2=h_1-u_2d_{12} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} u_3=h_2\Phi_2+u_2 \\ h_3=h_2-u_3d_{23} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} u_4=h_3\Phi_3+u_3 \\ h_4=h_3-u_4l_f \end{cases} \tag{4}$$

由公式(1)~(4)可得 Φ_2、Φ_3 与 Φ_1 关系如下:

$$\Phi_2=\frac{u_3-u_2}{h_2}=\frac{-\left(\frac{d_{12}}{d_{23}}+1\right)h_1\Phi_1+\frac{h_1-h_4-u_4l_f}{d_{23}}-\left(\frac{d_{12}}{d_{23}}+1\right)u_1}{-h_1d_{12}\Phi_1+h_1-u_1d_{12}} \tag{5}$$

$$\Phi_3=\frac{u_4-u_3}{h_3}=\frac{\frac{d_{12}}{d_{23}}h_1\Phi_1+\frac{h_4-h_1+u_4l_f+d_{12}u_1}{d_{23}}+u_4}{h_4+u_4l_f} \tag{6}$$

同理得长焦时 Φ_2'、Φ_3' 与 Φ_1' 关系如下:

$$\Phi_2'=\frac{u_3'-u_2'}{h_2'}=$$
$$\frac{-\left(\frac{d_{12}'}{d_{23}'}+1\right)h_1'\Phi_1'+\frac{h_1'-h_4'-u_4'l_f'}{d_{23}'}-\left(\frac{d_{12}'}{d_{23}'}+1\right)u_1'}{-h_1'd_{12}'\Phi_1'+h_1'-u_1'd_{12}'} \tag{7}$$

$$\Phi_3'=\frac{u_4'-u_3'}{h_3'}=\frac{\frac{d_{12}'}{d_{23}'}h_1'\Phi_1'+\frac{h_4'-h_1'+u_4'l_f'+d_{12}'u_1'}{d_{23}'}+u_4'}{h_4'+u_4'l_f'} \tag{8}$$

因为在变焦过程中 G2、G3 的光焦度不变,即:

$$\Phi_2=\Phi_2' \tag{9}$$

$$\Phi_3=\Phi_3' \tag{10}$$

联立公式(7)和公式(8)可得到关于组元 G1 光焦度 Φ_1 的一元四次方程[9]:

$$k_4\Phi_1^4+k_3\Phi_1^3+k_2\Phi_1^2+k_1\Phi_1+k_0=0 \tag{11}$$

式中:k 为 Φ_1 的系数,因此可由设计指标确定系统边界条件,代入上述公式即可求出 Φ_1。再通过公式(5)、(6)即可求出系统具体光焦度分配。据此选择与光焦度分配相近的光学系统作为优化设计的初始结构。

1.2 偏振信息获取

由光波电矢量末端轨迹的形状将偏振光分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。其定量化的两种表示方法,分别是 Jones 矢量表示法和 Stokes 矢量表示法。Jones 矢量表示法主要用于表示完全偏振光,而 Stokes 矢量表示法可表示完全偏振光、部分偏振光和非偏振光[10-11]。在对人造目标及金属目标的探测中,目标反射光的全偏振特性包含非常重要的特征信息,因此,系统选择基于全 Stokes 矢量的偏振探测成像技术,可有效获取目标全偏振特性。

Stokes 矢量法用一个矩阵描述一束光的偏振态,具体形式为:

$$S=\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} I_0+I_{90} \\ I_0-I_{90} \\ I_{45}-I_{135} \\ I_{Right}-I_{Left} \end{pmatrix} \tag{12}$$

式中:I 为该入射光的总光强;Q 为 0°和 90°方向上的光强差;U 为 45°和 135°方向上的光强差;V 为右旋圆偏振光与左旋圆偏振光的光强差。

微偏振片阵列(MPA)成像系统如图 2 所示,微偏振片阵列直接集成到探测器的感光芯片上,保证每个单元与感光芯片的像素单元大小一致且逐一对准,当光线通过 MPA 到达探测器后,可同时获得四个对应的线偏振调制方向(0°、45°、90°和 135°)的光强:I_0、I_{45}、I_{90}、I_{135}。再由公式(12)可得光学系统出射光的 Stokes 矢量,通过计算目标到探测器整个过程的总穆勒矩阵可求出目标反射光的 Stokes 矢量,进行偏振信息提取,即可得目标景物的偏振图像。

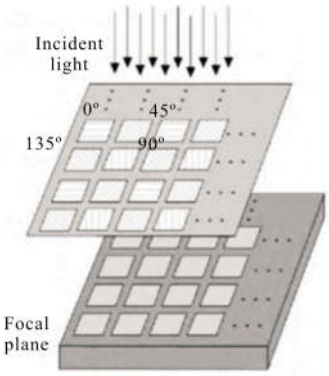


图 2 MPA 示意图

Fig.2 MPA schematic

但像素级偏振成像存在着如下缺点,在采集到的原始图像中,每一个超像素内保留同一中偏振状态下的测量值,而将其他的值清空,这样得到的图像是由清空后的空缺位置和同一种偏振状态下的测量结果组成,如图 3 所示,这降低了系统的空间分辨率,并且由于各相邻像元的瞬时视场不重叠,存在瞬时视场误差 (Instantaneous Field-of-View,IFOV)[12]。Ratliff 等对于减少 IFOV 误差提出了后期有效的插

值算法[13],通过插值算法可补齐图 3 中的空缺位置,有效提高了系统的空间分辨率。

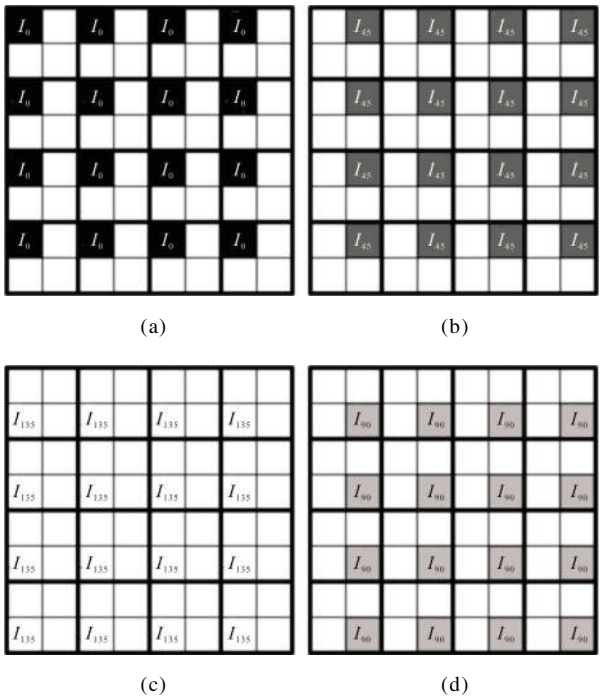


图 3 原始图像抽取的四幅相移干涉图

Fig.3 Four phase shifting interferograms of the original image

4D 公司给出的一种方案原理如图 4 所示。通过在阵列上对 2×2 像素单元进行卷积,可以拟合得到空缺位置的偏振态测量值,提高数据的空间分辨率[14],其已实现,再应用新的处理算法,可以实现等同于传感器自身像素宽度限制下对应的空间分辨率。

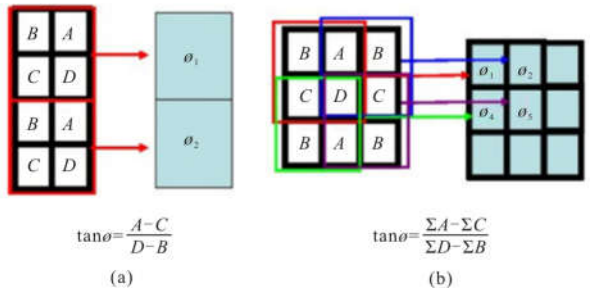


图 4 (a)微偏振片超像素的相位分辨率;(b)2×2 卷积实现的更高分辨率

Fig.4 (a) Diagram of micropolarizer super pixel and corresponding phase resolution; (b) diagram showing how 2×2 convolution kernel achieves higher resolution

综上,像素级偏振成像相对其他偏振成像方式,能够实时成像,无需分光元件,体积小,且具有较高透过率、高消光比、高可靠性、低功耗等特点,更加适用于无人机载探测成像。

根据实际使用需求,主要针对应用于飞行高度在 3~10 m 的无人机载光学系统开展设计,可对地面进行大视场高分辨实时偏振成像,地面目标最小分辨率 1.5 mm,能够实现对弹壳等细小目标识别。由于采用集成了微偏振片阵列的探测器进行成像,因此无需再进行光路分光或分孔径设计,只需设计大视场大相对孔径光学系统即可满足偏振成像使用要求,且系统截止频率可选取与探测器自身像素宽度限制下对应的空间频率。

2 设计实例与分析

2.1 设计实例

文中采用集成微偏振片阵列 CMOS 图像传感器,像元数为 1 600×1 600,像素尺寸为 5.5 μm,计算得到光学系统主要指标如表 1 所示。

表 1 光学系统主要指标

Tab.1 Parameters of optical system

Parameters	Value
Wavelength/nm	486-656
Zoom range/mm	11/22
Full field of view/(°)	60/34
F-number	1.8/2.7
Back focal length/mm	>10

根据以上指标要求,以上述光焦度计算作为辅助,选择专利作为镜头初始结构[15],按照设计目标进行优化,优化步骤如图 5 所示。通过不断调整镜头结构参数,最终获得光学系统结构如图 6 所示。优化后的系统前组包括一个双凹透镜和一个双凸透镜;变倍组包括一个双胶合透镜和光阑;后组包括一个非球面透镜和一个双胶合透镜。系统工作波段是 486~656 nm,采用两个双胶合结构,根据镜片的光焦度正负,玻璃材料选用高低阿贝数搭配的方式消除色差,采用 2 片非球面,总长 81 mm。变焦时,光阑大小保持不变,直接移动变倍组即可,使变焦机械结构简单化。

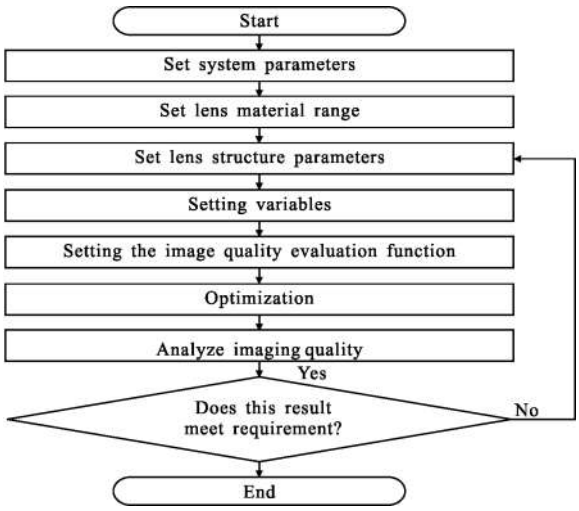


图 5 变焦镜头优化步骤

Fig.5 Zoom lens optimization steps

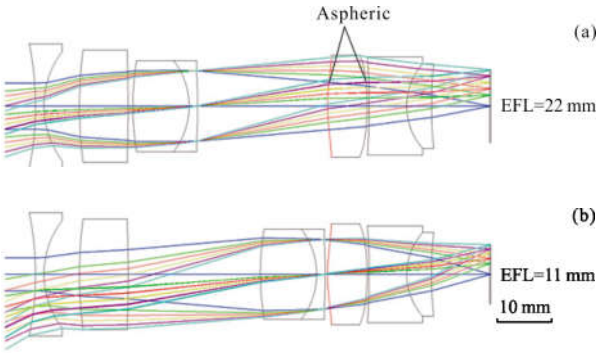


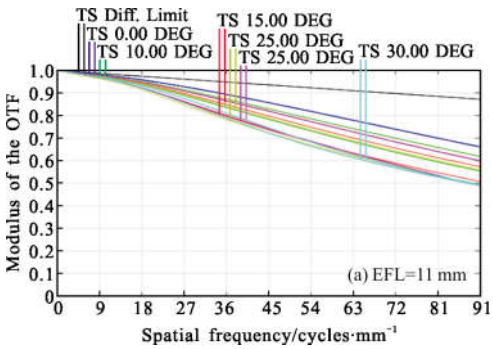
图 6 系统结构图

Fig.6 System structure

取短焦距 f=11 mm，飞行高度 L=10 m，由探测器水平方向尺寸 h=8.8 mm，则地面水平方向扫描宽度 $H=hL/f$=8 m，因此系统最大搜索范围为 8 m×8 m。

取长焦距 f=22 mm，飞行高度 L=3 m，由探测器像元尺寸 d=5.5 μm，则地面目标分辨率 $\sigma=2dL/f$=1.5 mm，因此系统地面目标最小分辨率为 1.5 mm。

图 7(a)和(b)分别为短焦和长焦镜头的调制传递



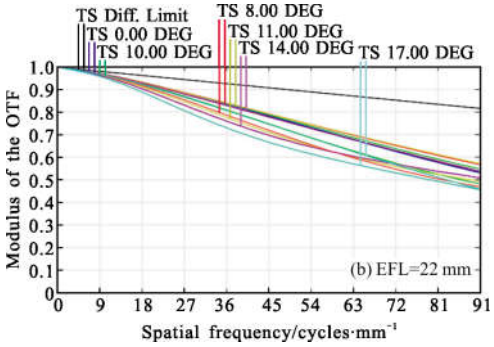


图 7 光学系统 MTF 曲线

Fig.7 Optical system MTF curve

函数(MTF)曲线。长、短焦MTF 值在奎奈斯特频率 91 lp/mm 处均优于 0.45，表明光学镜头成像质量较好，满足设计要求。

图 8(a)和(b)分别为短焦和长焦镜头的网格畸变图。其中短焦时光学畸变最大值约为 16.8%，长焦距时光学畸变的最大值约为 4.7%。对于畸变，可通过图像处理对畸变进行校正，降低其对成像质量的影响。

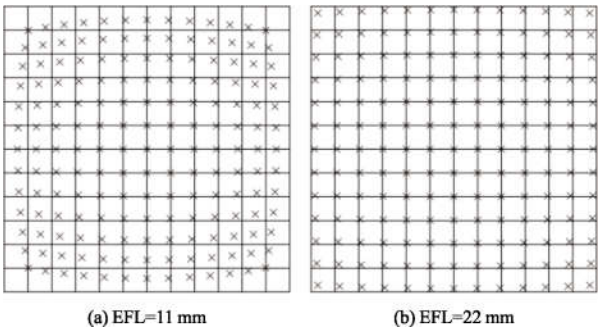


图 8 光学畸变图

Fig.8 Optical distortion curve

2.2 离焦分析

系统工作距离为 3~10 m，工作波段为 486~656 nm，取 λ=550 nm，由光学系统焦深计算公式：

$$\delta=\pm 2F^2\lambda \tag{13}$$

系统以 10 m 工作距离设计，对焦深进行计算得：短焦 F=1.8，则焦深为 0.003 6 mm；长焦 F=2.7，则焦深为 0.008 m。由参考文献[16]可知当像面偏移大于焦深 1/2 的时，就会产生离焦现象，得到模糊的成像结果。因此，有必要对系统进行离焦分析，以确定合理的调焦方式。

系统的距离离焦量见表 2，其最大离焦量达 0.106 mm，离焦现象严重，会对偏振成像造成很大影响，因此必须对系统离焦进行分析，确定合理的调焦方式。

表 2 光学系统的距离离焦量

Tab.2 Defocus value of different object distances

Object distance/m	Short focus defocus /mm	Long focus defocus /mm
3	0.020	0.106
4	0.013	0.068
5	0.008 6	0.045
6	0.005 7	0.030
7	0.003 7	0.020
8	0.002 2	0.011
9	0	0.005 2
10	0	0

目前常用调焦方式有：(1) 镜组调焦；(2) 平面反射镜调焦；(3) 像面移动调焦。镜组调焦通过调节光学系统中某一镜组的位置来调整成像的位置，该方法可通过调节光学系统中原本使用的镜组，也可以附加镜组进行调节；平面反射镜调焦常用于反射式光学系统；像面移动调焦采用通过移动成像平面(一般为 CCD 或胶片)进行调整的工作方式完成调焦。

为确定合理的调焦方式，对系统变倍组的调焦能力做了分析，在保证像面不动的条件下，得到了物距 L 与短焦、长焦时变倍组到后组的间隔 D 之间的变化关系，如图 9 所示。通过对曲线进行拟合，并把拟合后的调焦数据，用 MATLAB 仿真后，重新带入 ZEMAX 进行验证，得到了不同物距下，调焦后长焦、短焦的边缘视场 MTF 变化曲线，如图 10 所示。

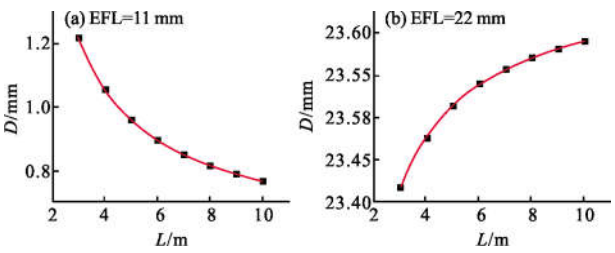


图 9 变倍组调焦曲线

Fig.9 Zoom group adjustment focal curve

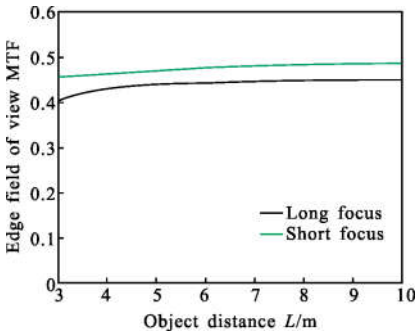


图 10 调焦后物距与边缘视场的 MTF 变化曲线

Fig.10 Curve of edge field of view MTF and object distance after focusing

结果显示当物距改变时，通过调整变倍组位置，可实现短焦时边缘视场的 MTF 均大于 0.45，长焦时边缘视场的 MTF 均大于 0.4，符合成像质量要求，验证了此种调焦方式的可行性。因此系统可选择镜组调焦方式进行调焦，无需移动像面，无需附加镜组，通过调整变倍组的位置即可调焦，这有利于简化系统结构。

2.3 公差分析

为确定系统是否满足加工和装配公差要求，需要对镜头两个焦距位置进行公差分析。公差变化范围如表 3 所示。

表 3 镜头公差范围

Tab.3 Lens tolerance range

Type	Value
TFRN(fringe)	2
TIRR(fringe)	0.2
TTHI/mm	0.02
TEDX/TEDY/mm	0.01
TETX/TETY/arc min	1
TIND	0.000 5
TABB	0.5%

表 4 列出了在此公差范围内，500 次蒙特卡罗采样计算结果，边缘视场 MTF 值与累计概率的关系。图 11 给出了 100 次蒙特卡罗采样计算 MTF 曲线图。结果显示在此公差范围内，短焦、长焦边缘视场的 MTF 值均有 98%的概率大于 0.3，成像质量满足使用要求，且此公差范围满足现有加工制造水平。

表 4 蒙特卡罗采样计算结果

Tab.4 Monte Carlo sampling calculation results

Cumulative probability	Edge field of view MTF at short focus	Edge field of view MTF at long focus
>98%	0.361 572 30	0.332 803 07
>90%	0.433 213 59	0.368 550 75
>80%	0.455 044 85	0.390 594 98
>50%	0.476 762 47	0.434 217 74
>20%	0.493 266 34	0.463 328 81
>10%	0.498 449 85	0.474 254 01
>2%	0.506 908 79	0.488 747 77

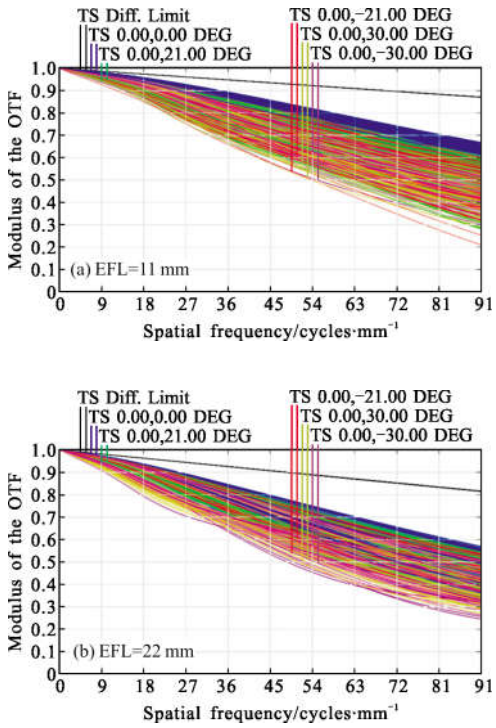


图 11 100 次蒙特卡罗采样计算 MTF 曲线图

Fig.11 MTF curves of 100 Monte Carlo sampling calculations

3 结 论

文中针对目前物证搜寻中，传统轻小型无人机载强度相机无法满足复杂环境下搜寻的难题，开展了无人机载可见光偏振成像光学系统的研究。文中基于微偏振片成像理论,设计了一款大视场、大相对孔径两档变焦成像系统。设计中采用光阑大小固定不变的方案,大幅降低了机械结构设计难度,减小了整机体积。设计完成后,系统总长为 81 m,全视场为 60°/34°,*F* 数达到 1.8/2.7,可通过调整变倍组的位置实现调焦,调焦方式合理易实现,可在 3~10 m 飞行高度条件下清晰成像。

公差分析表明,系统在满足成像质量条件下,公差范围合理,可批量加工。系统可搭载无人机平台,在照度低、背景复杂环境中工作。可实现飞行高度 10 m 条件下,搜索范围 8 m×8 m;飞行高度 3 m 条件下小视场精确识别,地面目标最小分辨率1.5 mm。大幅提高对案发现场物证的搜寻能力，满足复杂环境条件下对物证搜寻的需求。

参考文献：

[1] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. ***Chinese Optics***, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.

[2] Wang Linmei, Gao Jun, Xie Zhao. Analysis on polarized lights by ground-reflection with calculating its spatial patterns [J]. ***Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica***, 2013, 43(7): 833-843. (in Chinese)
王玲妹, 高隽, 谢昭. 光的地表反射偏振特性分析及空间偏振模式计算方法 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2013, 43(7): 833-843.

[3] Liang Jian, Ju Haijuan, Zhang Wenfei, et al. Review of optical polarimetricdehazing technique [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2017, 37(4): 0400001. (in Chinese)
梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0400001.

[4] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, et al. Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2014, 63(18): 232-241. (in Chinese)
张志刚, 董凤良, 张青川, 等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 232-241.

[5] Brock N J, Crandall C, Millerd J E. Snap-shot imaging polarimeter: performance and applications [J]. ***P Soc Photo-Opt***, 2014, Ins9099: 909903.

[6] Anonymous. The polarmcamera [EB/OL]. [2018-08-29] https://www.4dtechnology.com/products/polarimeters/polarcam/.

[7] Anonymous. DJI first zoom aerial camera Yuntai Zen Z3 out of the box evaluation [EB/OL]. (2016-08-22)[2018-08-29]http://www.5imx.com/portal.php?mod =view&aid =734.

(in Chinese)
匿名. 大疆首款变焦航拍云台禅思 Z3 开箱评测[EB/OL]. (2016-08-22) [2018-08-29]. http://www.5imx.com/portal.php?mod=view&aid=734.

[8] Anonymous. Parrot launches ANAFI sword to DJI Mavic AIR [EB/OL]. (2018-06-07) [2018-08-29]. http://www.5imx.com/portal.php?mod=view&aid=1795. (in Chinese)
匿名. Parrot 派诺特放大招, ANAFI 剑指大疆 Mavic AIR [EB/OL]. (2018-06-07) [2018-08-29]. http://www.5imx.com/portal.php?mod=view&aid=1795.

[9] Cai Wei, Zhang Ying, Zhang Xin, et al. New method for all movable zoom lens design [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32 (3): 249-253. (in Chinese)
蔡伟, 张鹰, 张新, 等. 多组全动型变焦系统新型设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 249-253.

[10] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, et al. Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters[J]. ***Optics Express***, 2015, 23(8): 10822-10835.

[11] Mu T K, Zhang C M, Jia C L, et al. Static hyperspectral imaging for full linear Stokes parameters[J]. ***Optics Express***, 2012, 20(16): 18194-18201.

[12] Zhang Tao, Xu Wenchang, Wang Dejiang, et al. Super-pixel calibration method of pixelated polarization camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25 (12): 3179-3186. (in Chinese)
张涛, 徐文畅, 王德江, 等. 基于像素级偏振相机的超像素校正[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(12): 3179-3186.

[13] Ratliff B M, Lacasse C F, Tyo J S. Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgridpolarimeter[J]. ***Optics Express***, 2009, 17(11): 9112-9125.

[14] Neal J Brock, Bradley T Kimbrough, James E Millerd. A pixelated micropolarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements [J]. ***Polarization Science & Remote Sensing V***, 2011, 8160(20): 81600W.

[15] Huang Haijo. Wide angle zoom lens system: U. S. patent 8, 520, 316[P]. 2013-08-27.

[16] Shi Lei, Jin Guang, Tian Haiying, et al.Autofocusing method with automatic calibration for aerial camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 16(12): 2460-2464. (in Chinese)
史磊, 金光, 田海英, 等. 航空相机的自准直自动检焦方法研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2460-2464.