

## 无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统设计

李加慧<sup>1,2,3</sup>, 谭奋利<sup>1,2,3</sup>, 曾晨欣<sup>1,2,3</sup>, 季轶群<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;<sup>2</sup>苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;<sup>3</sup>苏州大学教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 基于对称前置同心物镜和中继转像透镜阵列设计的新型级联光学成像系统,是同时实现宽覆盖和高分辨率航拍作业的有效途径。针对超低空精准农情监测和精准施药需求,通过研究新型级联光学成像系统在超低空飞行高度下获取的最佳中间曲面像面面型及位置,研究并设计适用于超低空飞行高度的新型级联光学成像系统。在设计时,针对无人机(UAV)轻小型载荷需求,在系统中通过引入非球面来平衡轴外像差、减少镜片数量、缩短光学系统筒长。基于此,优化设计了飞行高度为 20~80 m、焦距为 60 mm、F 数为 3.4 的无人机载宽覆盖遥感相机光学系统,其视场角高达 132°,实现了地面宽覆盖,且成像性能优,为农用无人机精准高效农情监测提供了重要参考途径。

**关键词** 光学设计; 级联光学成像结构; 中间曲面像面; 宽覆盖; 超低空

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1422001

## Design of Optical System for UAV-Borne Ultralow-Altitude Wide-Coverage Remote Sensing Camera

Li Jiahui<sup>1,2,3</sup>, Tan Fenli<sup>1,2,3</sup>, Zeng Chenxin<sup>1,2,3</sup>, Ji Yiqun<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Optical Manufacture Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** The novel cascaded optical imaging system designed herein is based on a fore monocentric symmetric objective and a relay lens array, enabling wide-coverage high-resolution aerial imaging. To satisfy ultralow-altitude requirements for precision agriculture monitoring and pesticide application, we propose a cascaded optical imaging system for ultralow-altitude flight focusing on the optimal mid-curved surface shape and location. Considering the light and small load capabilities of unmanned aerial vehicles (UAV), an aspheric surface is integrated into the system to balance the off-axis aberration, reduce the number of required lenses, and shorten the tube length. The designed optical system comprising a UAV-borne ultralow-altitude wide-coverage camera adopting the proposed cascaded optical structure requires a low altitude of 20–80 m, a focal length of 60 mm, an F-number of 3.4, and a field-of-view of 132°. As expected, the proposed system provides a wide ground coverage and excellent imaging performance under ultralow-altitude flight, thus demonstrating its potential for accurate and efficient agricultural situation monitoring of agricultural UAV.

**Key words** optical design; cascaded optical imaging system; intermediate image surface; wide-coverage; ultralow-altitude

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-02-03; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61405134, 61340007)、国防基础科研计划(JCKY2018414C013)、江苏省自然科学基金(BK20161512)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: \*jiyiqun@suda.edu.cn

## 1 引言

在现代农业生产中,超低空施药无人机一般按规划航线全程喷施,难以实现按需施药,造成了较为严重的耕地农药污染问题<sup>[1]</sup>。无人机遥感技术可以快速获取区域的遥感图像及农情信息,用于超低空施药时,可对作物进行精准施药,减少化肥与农药的使用,大力推动精准化、智能化农业发展,已成为精准农业不可或缺的手段<sup>[2-3]</sup>,为无人机精准农业研究提供了新途径。

传统超低空无人机遥感相机摄取地面影像幅面小,且无人机续航里程有限,有效作业时间和飞行高度受限,难以实现高遥感作业效率<sup>[4]</sup>,因此针对高效遥感作业需求,研究设计一种地面宽覆盖、超低空无人机遥感相机光学系统具有重要意义。李加慧<sup>[5]</sup>等采用新型级联光学成像结构和全球面光学面型设计了宽覆盖高分辨率机载相机光学系统,该系统有效实现了在大于 100 m 的低空、中空、高空飞行高度广域高效航拍作业。若将该系统直接应用在飞行高度小于 100 m 的超低空施药无人机,发现在球面面型宽视场中间曲面像面上无法获得均匀像质,中继转像透镜阵列各通道的结构复杂度和设计难度增加。因此,本文主要针对无人机超低空精准农情监测和施药需求,研究适用于超低空飞行高度的新型级联光学成像系统,重点研究在超低空飞行高度时,新型级联光学成像系统获取的最佳宽视场中间曲面像面型;同时针对无人机轻小型载荷需求,在系统设计时引入非球面,进一步平衡轴外像差的同时,减少镜片数量和缩短光学系统的筒长。

## 2 适用于超低空的新型级联光学系统中间像面面型

新型级联光学成像系统由对称前置同心物镜和中继转像透镜阵列组成,对称前置同心物镜获取的宽视场中间曲面像作为中继转像透镜阵列的物,其像质均匀性决定着中继转像透镜阵列各通道的结构复杂度和设计难度<sup>[5]</sup>。

对称前置同心物镜成像光路如图 1 所示,其中  $f'$  为对称前置同心物镜的焦距; $d$  为飞行高度;为了便于计算在超低空飞行高度的新型级联光学系统最佳中间像面面型及位置,引入无穷远场景经对称同心物镜成像所在的像面  $I_H$  作为参考像面; $H'_1$  和  $H'_2$  分别为无穷远处轴上物点和轴外物点经对称同心物镜成像的像点,位于参考像面  $I_H$  上; $M_1$  和  $M_2$

为系统工作于飞行高度  $d$  进行对地观测时轴上物点和视场角为  $\beta$  的轴外物点,对应像点  $M'_1$  和  $M'_2$ ,均位于最佳中间像面  $I_M$  上; $\Delta z(\beta)$  是参考像面  $I_H$  与最佳像面  $I_M$  的径向位移量; $\Delta z'(\beta)$  是参考像面  $I_H$  与最佳像面  $I_M$  的轴向位移量。

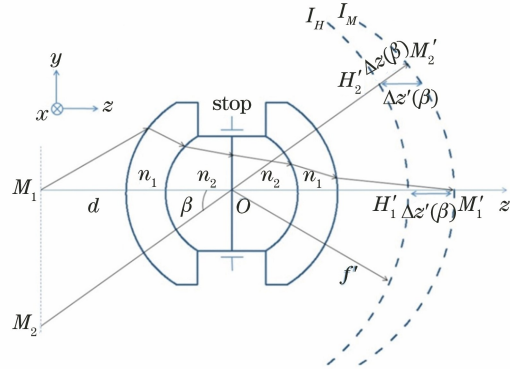


图 1 对称同心物镜成像光路图

Fig. 1 Optical imaging diagram of monocentric symmetric objective

根据像差理论和高斯公式<sup>[6-8]</sup>,计算得到参考像面  $I_H$  是一个与同心物镜同心、曲率半径等于同心物镜焦距的标准球面。新型级联成像系统在飞行高度  $d$  进行对地观测时,最佳中间像面  $I_M$  与参考像面  $I_H$  之间的径向位移量  $\Delta z(\beta)$  为

$$\Delta z(\beta) = \frac{f'^2 \cos \beta}{d - f' \cos \beta} = \frac{f'^2}{\frac{d}{\cos \beta} - f'} \quad (1)$$

可见,径向位移量  $\Delta z(\beta)$  随着视场角  $\beta$  的变化而变化,进而可求得轴向位移量  $\Delta z'(\beta)$ :

$$\Delta z'(\beta) = H'_1 M'_1 = \frac{\Delta z(\beta)}{\cos \beta} = \frac{f'^2}{d - f' \cos \beta} \quad (2)$$

由(2)式可知:当系统工作于低、中、高空飞行高度  $d$  ( $d \geq 100$  m),由于系统焦距一般为毫米量级,因此  $d \gg f'$ ,  $\Delta z'(\beta) = \frac{f'^2}{d}$  为定值,最佳中间曲面像

面为球面;当系统工作在超低空飞行高度  $d$  ( $d < 100$  m),轴向位移量  $\Delta z'(\beta)$  随视场角  $\beta$  呈非线性变化,最佳像面  $I_M$  为关于光轴旋转对称的非球面。将参考像面  $I_H$  上过光轴的子午球基线上各点  $z$  坐标增加  $\Delta z'(\beta)$ ,得到系统工作在超低空时的最佳像面  $I_M$  上对应非球基线上每个点的空间坐标;再借助 MATLAB 和 ORIGIN 软件进行数据拟合,拟合精度约  $10^{-5}$ ,得到该非球基线曲线方程;最后将曲线绕光轴旋转一周,即可得到此时的最佳中间像面  $I_M$  的面型方程<sup>[9]</sup>。

面型方程的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16}, \quad (3)$$

式中： $r$  为关于  $x, y$  的位置函数； $k$  为二次曲线系数； $c$  为顶点曲率。

### 3 光学系统优化设计及像质评价

根据农用无人机超低空精准高效农情监测与精准施药的应用需求,所设计的超低空宽覆盖遥感相机光学系统的飞行高度为 20~80 m,成像波段范围为可见光波段,焦距为 60 mm,F 数为 3.4,在飞行高度范围内可采集到近 132°视场的农情信息。

#### 3.1 对称前置同心物镜设计

对称前置同心物镜具有对称和同心特点,球差和色差是系统设计时主要考虑的几何像差<sup>[10]</sup>,根据一阶理论和消像差条件<sup>[11-13]</sup>可确定其初始结构,借助 ZEMAX 光学设计软件,建立合理的优化函数<sup>[14-15]</sup>,优化设计后的对称同心物镜如图 2 所示,焦距为 100 mm,视场角为 132°。

基于最佳中间像面研究,当飞行高度为 50 m 时,理论计算得到的最佳中间像面为旋转对称的非

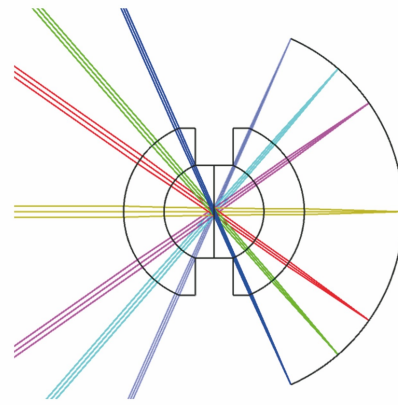


图 2 对称同心物镜光路结构

Fig. 2 Optical layout of monocentric symmetric objective

球面,轴向位移量  $\Delta z'(\beta)$  为  $\frac{10000}{50000 - 100\cos\beta}$  mm,

将  $-66^\circ \leq \beta \leq 66^\circ$  代入,得到各点的轴向位移量,再对这些点进行拟合,得到最佳像面的非球面方程。(3)式中各项系数如表 1 所示,然后在此非球面上进行像质评价,得到如图 3 所示的光线追迹点列图和光线像差图。受孔径光阑限制,随着视场角的增加,轴外视场相对孔径呈余弦下降,即导致图 3 中轴外视场艾里斑呈椭圆状,可见在各视场成像性能均匀且成像质量达到衍射极限。

表 1 飞行高度为 50 m 时中间像面表达式中的各项系数

Table 1 Parameters in the intermediate image surface equation when the flight altitude is 50 m

Parameter	$c$	$k$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	...	$\alpha_8$
Value	-0.01	$-8.043 \times 10^{-5}$	0	$1.403 \times 10^{-10}$	0	0	...	0

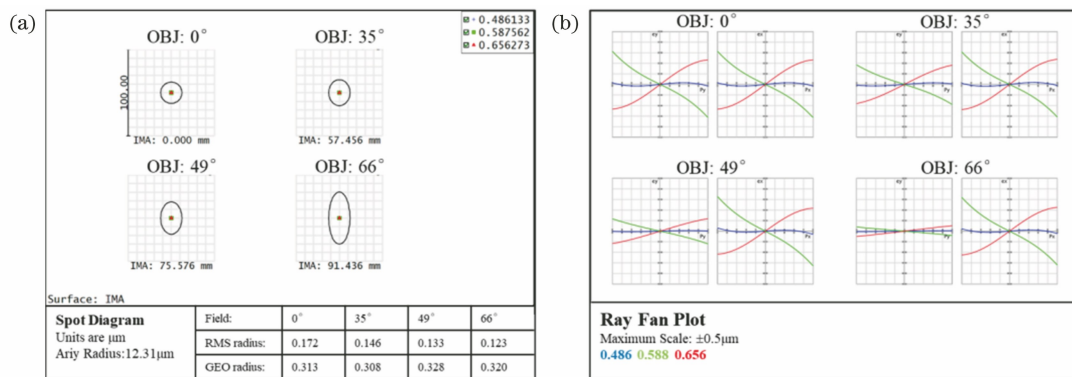


图 3 飞行高度为 50 m 时,对称同心物镜在最佳像面处的像质评价曲线。(a)点列图;(b)光线像差图

Fig. 3 Imaging performance of monocentric symmetric objective at the optimal image surface when the flight altitude is 50 m. (a) Spot diagram; (b) ray fan

对飞行高度为 50 m 时计算所得最佳中间像面进行轴向位移,轴向位移量遵循<sup>[5]</sup>

$$\Delta = \frac{f'^2}{d} - \frac{f'^2}{50 \text{ m}}. \quad (4)$$

可得到 20,30,40,60,70,80 m 飞行高度宽覆

盖遥感相机光学系统的最佳中间像面,表 2 给出了具体轴向位移量数值。在位移后得到的各飞行高度最佳中间像面上进行像质评价,20~80 m 各飞行高度处,系统的点列图评价结果如表 2 所示。从点列图几何(GEO)半径看出,聚焦光斑大小一

致,相对于 50 m 飞行高度时系统的点列图几何半径值,均方根误差值(RMSE)均小于 0.02,因此最佳中间像面面型均可用 50 m 飞行高度时获得的

最佳中间像面面型来表示。实际应用中,只需对中间像面进行轴向位移,便可准确对焦不同飞行高度。

表 2 不同飞行高度相对 50 m 飞行高度最佳中间像面的轴向位移量及点列图评价结果

Table 2 Axial displacement of the optimal intermediate image surface at different flight altitudes relative to 50 m and evaluation results of the spot diagram

Altitude /m	Axial displacement relative to the optimal intermediate image surface of 50 m / $\mu\text{m}$	GEO radius of spot diagram / $\mu\text{m}$				RMSE (relative to 50 m)
		0°	35°	49°	66°	
20	+0.301	0.325	0.317	0.332	0.314	0.0096
30	+0.133	0.306	0.302	0.322	0.313	0.0047
40	+0.050	0.322	0.315	0.333	0.322	0.0086
60	-0.033	0.336	0.327	0.343	0.330	0.0188
70	-0.057	0.331	0.323	0.340	0.329	0.0154
80	-0.075	0.328	0.320	0.338	0.327	0.0132

### 3.2 中继转像透镜

在保证安全的前提下,要求低空无人机载荷性能高、质量轻、体积小<sup>[16]</sup>,因此在设计中继转像透镜系统时,通过分析系统中各光学面的波像差贡献,将波像差贡献突出的光学面作为非球面<sup>[17]</sup>,在进一步平衡轴外像差、提高成像质量的同时,可减少镜片数量和降低光学系统的筒长。中继转像透镜系统采用

改进型 Petzval 结构,通过借助 ZEMAX 软件建立合理的评价函数,得到如图 4 所示的中继转像透镜系统。该系统由 7 片透镜组成,系统筒长为 89 mm,其中有两组双胶合透镜组,光阑位于第 3 片透镜后,第 3 片透镜的后表面为非球面,其面型参数如表 3 所示。系统的焦距为 16.8 mm,物高为 10.34 mm,放大率为 0.6 $\times$ 。

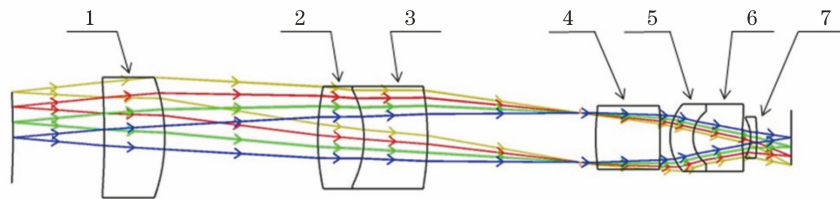


图 4 中继转像透镜系统光路结构图

Fig. 4 Optical layout of relay lens system

表 3 非球面表面参数

Table 3 Aspheric surface parameters

Serial No.	Radius /mm	Conic	Semi-diameter /mm
3	-32.126292	1.53	5.4

### 3.3 整体系统优化设计

基于光瞳匹配原则,对对称前置同心物镜和中继转像透镜进行联合优化设计,单通道设计结果如图 5 所示,系统焦距为 60 mm,视场为 5.92°,F 数为 3.4,筒长小于 238 mm。图 6~8 分别为在

20,50,80 m 飞行高度时宽覆盖遥感相机光学系统的调制传递函数(MTF)曲线、光线追迹点列图、场曲和畸变曲线。可见,点列图聚焦光斑均方根半径均小于 2.3  $\mu\text{m}$ ,在奈奎斯特频率 230 lp/mm 处,全视场 MTF 值达 0.39,系统场曲小于 0.025 mm,畸变小于 0.1%;与使用球面透镜设计的结果<sup>[5]</sup>相比较,在保证像质的基础上,引入非球面透镜后的光学系统镜片数减少 2,总长减小 7 mm。

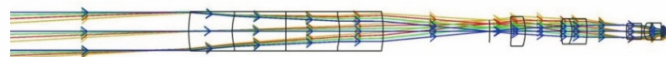


图 5 单通道成像光路图

Fig. 5 Single-channel imaging optical layout

所设计的无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统的成像视场由对称前置物镜视场及中继转像透

镜阵列的成像通道数共同决定。图 9 给出了视场角高达 132°的遥感相机光学系统,该系统由 29 个完全

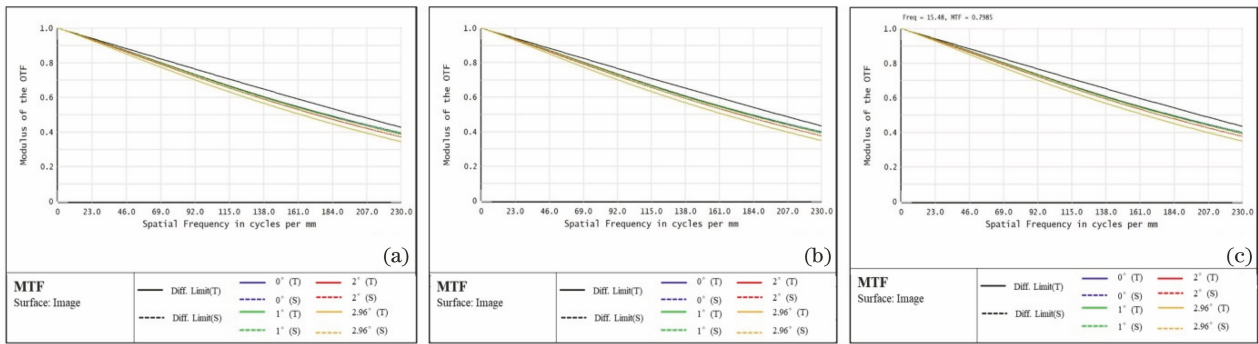


图 6 不同飞行高度时的单通道成像系统 MTF 曲线。(a) 20 m;(b) 50 m;(c) 80 m

Fig. 6 MTF of single-channel imaging optical system at different flight altitudes.

(a) 20 m; (b) 50 m; (c) 80 m

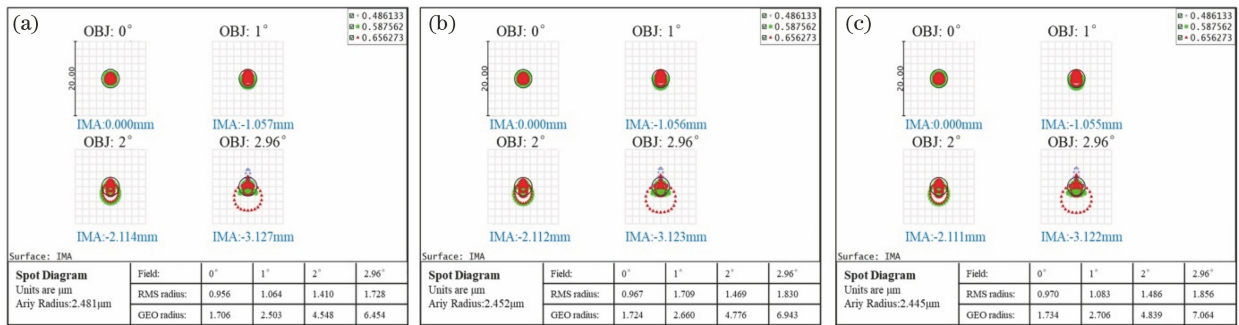


图 7 不同飞行高度时的单通道成像系统点列图。(a) 20 m;(b) 50 m;(c) 80 m

Fig. 7 Spot diagram of single-channel imaging optical system at different flight altitudes.

(a) 20 m; (b) 50 m; (c) 80 m

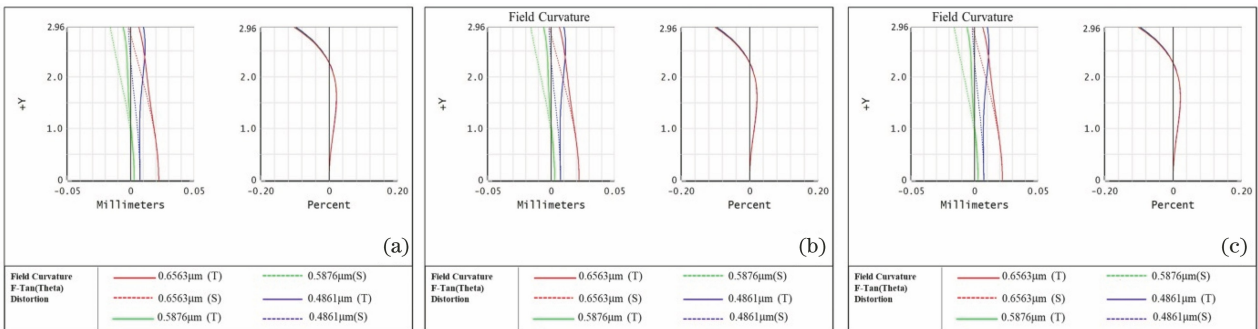


图 8 不同飞行高度时的单通道成像系统场曲/畸变曲线。(a) 20 m;(b) 50 m;(c) 80 m

Fig. 8 Field curvature/distortion curve of single-channel imaging optical system at different flight altitudes.

(a) 20 m; (b) 50 m; (c) 80 m

相同的中继转像透镜阵列成像通道组成。

## 4 结 论

针对超低空精准农情监测和精准施药需求,基于一阶理论,研究适用于超低空飞行高度的新型级联光学成像系统,并借助 ZEMAX 光学设计软件优化设计了一个飞行高度为 20~80 m、视场角高达 132°的无人机载宽覆盖遥感相机光学系统。像质评价结果表明,所设计的系统成像性能优,在无人机精准高效农情监测领域具有广阔的应用前景。

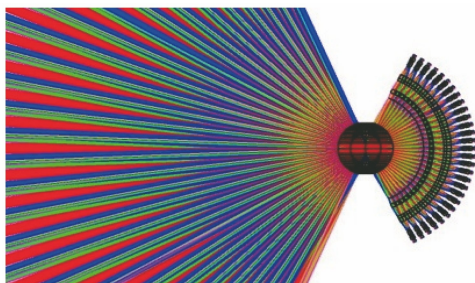


图 9 多通道成像光路图

Fig. 9 Multi-channel imaging optical layout

## 参 考 文 献

- [1] Sun T B. Key technologies and applications of drones in precision agriculture [J]. Hubei Agricultural Mechanization, 2020(1): 51-52.  
孙铁波. 无人机在精准农业中的关键技术及应用[J]. 湖北农机化, 2020(1): 51-52.
- [2] Gao L, Yang G J, Wang B S, et al. Soybean leaf area index retrieval with UAV(unmanned aerial vehicle) remote sensing imagery[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 868-876.  
高林, 杨贵军, 王宝山, 等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 868-876.
- [3] Wang L M, Liu J, Yang L B, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 136-145.  
王利民, 刘佳, 杨玲波, 等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 136-145.
- [4] Lu S S, Wang W. Application and development prospect of unmanned aerial vehicle in maritime search and rescue operation [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2019, 40(2): 94-98.  
卢姗姗, 王伟. 无人机在海上救援行动中的应用现状及发展展望[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(2): 94-98.
- [5] Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical design of an airborne camera with wide coverage and high resolution [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.  
李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0222001.
- [6] Zhang Y M. Applied optics [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2015: 23-33.  
张以谟. 应用光学[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 23-33.
- [7] Sasian J. Introduction to aberrations in optical Imaging systems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [8] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 149-176.
- [9] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 1-8.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 1-8.
- [10] Xu F G. Research on design of wide field of view high resolution imaging optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 69-97.  
徐奉刚. 大视场高分辨率成像光学系统设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 69-97.
- [11] Stamenov I, Agurok I P, Ford J E. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs [J]. Applied Optics, 2013, 52(22): 5348-5349.
- [12] Wang Y, Meng X Y, Zhang L, et al. Design of super-wide-angle mobile phone camera based on concentric lens [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022001.  
王洋, 孟祥月, 张磊, 等. 基于同心透镜的超广角手机镜头设计[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022001.
- [13] Elagha H A. Ray tracing in monocentric and ball lenses by a general exact formula [J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2019, 36(7): 1117-1125.
- [14] Yuan X C. Optical design [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1988: 20-55.  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 20-55.
- [15] Wang W S, Mou D, Chen Y. Contemporary optical system design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 13-48.  
王文生, 牟达, 陈宇. 现代光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 13-48.
- [16] Wang Y, Zhu Y L, Gao W, et al. Research on aerial survey system technology of UAV borne double camera low altitude [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(8): 214-216.  
王妍, 朱岩隆, 高伟, 等. 无人机载双拼相机低空航测系统技术研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(8): 214-216.
- [17] Zhang X, Lü L J. Aspheric optimization design of fisheye lens optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 863-870.  
张潇, 吕丽军. 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 863-870.