

远心补偿像面稳定的共心多尺度系统设计

李京宸^{1,2}, 张坤¹, 王思沫^{1,2}, 刘吉潇^{1,2}, 杨聚圃^{1,2}, 严伟^{1*}¹中国科学院光电技术研究所环境光学研究院, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 目前的共心多尺度系统普遍存在子相机像面不稳定的问题, 这一问题直接导致了在后续的图像拼接中易于出现图像拼接错位, 严重影响系统成像质量。针对这一问题, 提出了一种基于像方远心光路的方法, 该方法提高了子相机像面的稳定性, 为后续的图像拼接减轻了压力。首先对错位现象出现的原因进行了理论分析, 从理论层面分析了引入像方远心光路对改善成像系统的作用, 最终设计了成像性能优异的基于像方远心光路的共心多尺度成像系统, 其焦距为 60 mm, F 数为 3, 远心度小于 0.2 mrad, 总视场为 70° , 各视场弥散斑半径小于所选探测器的像元尺寸, 在奈奎斯特频率为 108 lp/mm 处各视场的调制传递函数均大于 0.6。像方远心结构的共心多尺度成像系统可以从光学结构部分改善子相机像面不稳定的问题, 从而提高后端图像拼接的拼接质量和拼接效率, 为后续的共心多尺度系统设计提供了更多的思路和技术途径, 具有重要的理论和实践意义。

关键词 光学设计; 像面稳定补偿; 像方远心光路; 共心多尺度成像系统

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1422001

Design of Concentric Multi-Scale System with Telecentricity Compensation for Image Plane Stability

Li Jingchen^{1,2}, Zhang Kun¹, Wang Simo^{1,2}, Liu Jixiao^{1,2}, Yang Jupu^{1,2}, Yan Wei^{1*}¹*Institute of Environmental Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;*²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract At present, concentric multi-scale systems generally suffer from an unstable image plane of the sub-camera. This problem directly leads to image misalignment in subsequent image stitching, which seriously affects the imaging quality of systems. In response to this problem, this paper proposes a method based on the image-side telecentric optical path to improve the image plane stability of the sub-camera and reduce the pressure from the subsequent image stitching. The paper firstly explores the reason for misalignment and then analyzes the benefits of using the image-side telecentric optical path in the concentric multi-scale systems. Finally, it designs a concentric multi-scale imaging system based on the image-side telecentric optical path with good imaging performance. The imaging system has a focal length of 60 mm, an F number of 3, a telecentricity of less than 0.2 mrad, and the total field of view of 70° . The defocused spot radius in each field of view is smaller than the pixel size of the selected detector, and the modulation transfer function (MTF) of each field of view is greater than 0.6 at the Nyquist frequency of 108 lp/mm. The concentric multi-scale imaging system with the image-side telecentric structure can improve the image plane stability of the sub-camera from the aspect of optical structure, thereby improving the quality and efficiency of subsequent image stitching. This paper also provides more ideas and technical approaches for the future design of concentric multi-scale systems, having important theoretical and practical significance.

Key words optical design; compensation for image plane stability; image-side telecentric optical path; concentric multi-scale imaging system

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-01-03; 录用日期: 2022-01-24

基金项目: 中国科学院光电技术研究所前沿基础项目(C21K003)、四川省苗子工程(A21S003)

通信作者: *yanwei@ioe.ac.cn

1 引言

图像的视场(FOV)和分辨率是衡量成像系统性能的两个重要指标,随着当今光学成像系统的不断发展,同时具有广域视场和高分辨率的光学成像系统成为当前科研人员研究的重点,它在目标定位、天文摄影、安保监测等技术领域具有广泛的应用。在 2009 年,由杜克大学的 Brady 团队提出的共心多尺度成像系统同时具备高分辨率和广域视场^[1-6],这种成像系统包含一个前置球形物镜和一个由小光学元件组成的多孔径阵列结构,集成了物镜的大视场收集能力和后端小型光学系统的局部视场校正能力,成像性能优异。共心多尺度成像系统概念一经提出,立刻引起了国内外科研人员的关注。

共心多尺度成像系统可以实现很高的成像分辨率,然而其需要经过图像拼接处理的成像方式大大影响了成像帧率,这为后续的图像处理带来了很大的压力。当前对于共心多尺度成像系统的研究重心大多可归类为对其光学系统结构的研究和对其后端图像拼接算法的研究两类。对其光学系统结构的研究主要集中在优化其体积容量和优化其次级阵列相机的排布方式,研究目的是提高利用率,此类研究以西安电子科技大学的邵晓鹏团队^[7-12]为代表,他们将伽利略型结构引入成像系统中,实现了小型化、轻量化的共心多尺度成像系统;而对其后端图像拼接算法的研究主要集中在提升拼接效率和拼接质量方面,以哥伦比亚大学的

Cossairt 团队^[13]为代表,该团队将整个共心多尺度成像系统的大部分成像压力向算法部分倾斜,利用计算机图像处理校正像差。本文的研究从共心多尺度成像系统整体设计出发,通过优化前端光学结构来补偿后端图像拼接缺陷,实现系统成像质量的提升。

基于此,本文首先对后端图像拼接时发生的错位现象进行了理论分析,之后从前端光学系统设计角度提出了一种可以改善子图成像效果的像方远心共心多尺度光学成像系统结构设计,以减轻后端图像拼接时的处理压力,提高拼接效率和拼接质量,从而提高成像系统的整体性能。

2 共心多尺度成像系统基本原理和拼接错位分析

共心多尺度成像系统的工作原理如图 1 所示,该成像装置由一个同心球主透镜加一组微型次级相机阵列构成,前置球形主透镜对场景进行成像,生成弯曲的一级像面,后方微型次级相机对一级像面进行分割,在各自的子视场内独立成像,最后利用计算机将各个子相机生成的图像进行拼接,从而生成广域图像。然而,传统的图像拼接算法应用于共心多尺度系统时存在一系列的问题,其中拼接错位就是一个亟待解决的且影响共心多尺度系统整体成像效果的问题。针对这一问题,分别从图像拼接错位数据的归纳、理论分析和补偿方法方面进行了详细的阐述。

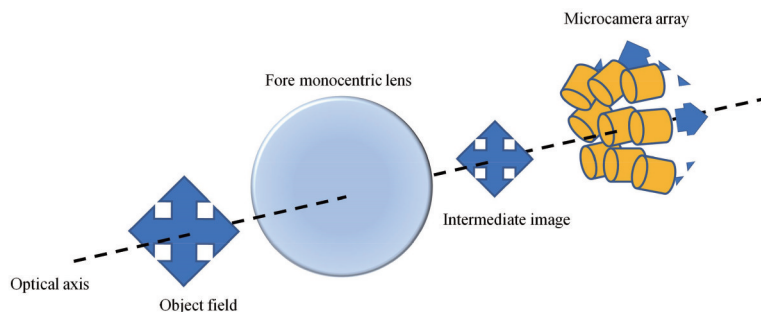


图 1 共心多尺度成像系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concentric multi-scale imaging system

2.1 图像拼接错位数据归纳

目前的共心多尺度成像系统在经计算机拼接后的图像中存在严重的错位感,严重影响了成像效果,正如图 2(a)中方框和图 2(b)中矩形框所示,它们是图 2(c)成像效果图对应区域的放大。

错位感广泛存在于微型次级相机的视场重叠部分,根据微型次级相机的位置可分为上下接缝和左右接缝,本文基于现有共心多尺度成像系统设备进行了图像采集和数据分析,现有共心多尺度成像系统的视场为 $70^\circ \times 40^\circ$,子相机数目为 38,其排列方式如图 3 所示,每一个子相机的位置与图 2(c)的拼接效果图一一对应。由于成像视场较大,需要对不同子相机的成像范围进行分割,根据其排列方式可将次级相机的成像

深度范围分为 $0 \sim 100 \text{ m}$, $100 \sim 300 \text{ m}$, $300 \sim 800 \text{ m}$, 800 m 至无穷 4 个等级,对应的相机标号分别为 28~37, 19~27, 9~18, 0~8。

实验共采集了 10 幅图进行数据收集,采集图实例由图 2(c)给出,并利用基于最佳缝合线的图像拼接方法进行了数据处理^[14-15],即将每一接缝处当前缝合位置与最佳缝合位置的错位像素数作为该处的错位度,因第 4 个成像深度范围(800 m 至无穷)的物面为天空,接缝处不存在明显的细节特征,故舍弃该层数据。由于每一层均存在难以判别最佳缝合线的成像区域,即不存在明显特征的目标物,故需要对数据进行加权平均处理,其公式为

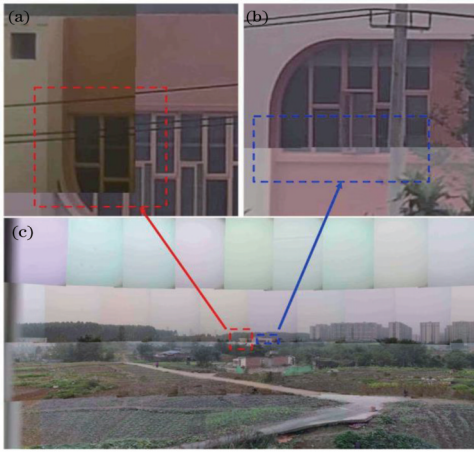


图 2 图像拼接错位示例。(a)(b)拼接错位放大示意图;(c)共心多尺度相机成像效果图

Fig. 2 Examples of image stitching misalignment. (a)(b) Enlarged schematic diagrams of splicing dislocation; (c) imaging result of monocentric multi-scale camera

$$N_i = \frac{M_i}{n(1 - \eta_i)}, \quad (1)$$

式中： N_i 为对应成像深度范围内的加权平均有效错位度； M_i 为对应成像深度范围内的统计总错位度； n 为对应成像深度范围内的总缝合线数； η_i 为对应成像深度范围内的难以判别最佳缝合线的区域占该层总缝合线数的比例。

图 3 为次级相机阵列排布方式示意图。将最终的统计结果通过 MATLAB 绘制散点图,如图 4 所示。

图 4 中舍弃第 4 个成像深度范围的数据,只保留了前 3 个成像深度范围的数据以确保分析的准确性,图 4 中的圆圈点反映的是处于上下接缝处的有效错位度,三角点反映的是处于左右接缝处的有效错位度。分析图 4 可以发现,存在一个最佳成像深度范围,反映在曲线中则是处于第二成像深度(100~300 m)的加权平均错位度最低;并且处于上下接缝处的有效错位度总体上要大于处于左右接缝处的有效错位度。

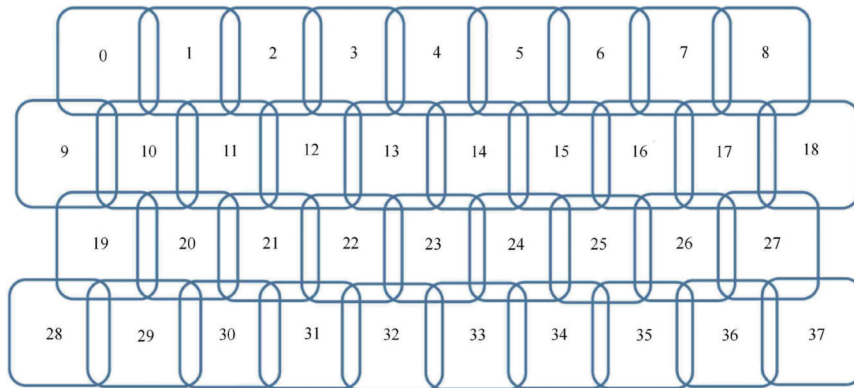


图 3 次级相机阵列排布方式示意图

Fig. 3 Secondary camera array arrangement

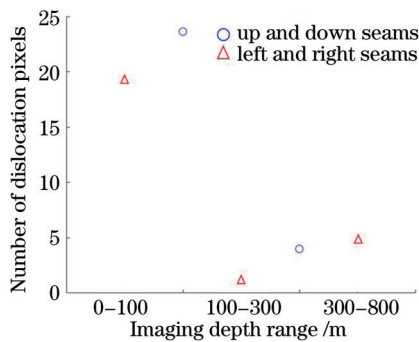


图 4 错位感随成像深度范围的变化散点图

Fig. 4 Scatter plot of image stitching misalignment changing with imaging depth range

2.2 图像拼接错位理论分析

这种错位感的出现是由于多尺度成像系统的次级相机在标定时是以一个固定物面为基准统一进行标定的。然而,在实际使用时,根据它们放置位置的不同,各自所对应的成像深度范围存在差异,而这种差异会造成像面位置的改变,并且使得像面大小的稳定性下

降,图 5(a)所示为阵列相机成像示意图,左侧物空间依次为物面 O_1 、物面 O_0 、物面 O_2 ,其经右侧光学系统后的最佳像面位置依次为 O'_1 、 O'_0 、 O'_2 。相机 1 和相机 2 拥有相同的视场角 α ,且其视场存在一定的重叠度,但其对应的成像深度不同。相机 1 和相机 2 的成像深度分别对应于物面 O_1 和物面 O_2 ,其位置差异为 ΔL ;相对应地,在像空间,经调焦寻找到的最佳像面位置存在 $\Delta L'$ 的位置差异,而对于包含在两相机的视场重叠范围内、位于物面 O_0 处的物体 AB,其通过相机 1 的主光线与物面 O_1 对应的最佳像面 O'_1 交于 A1、B1 处,而通过相机 2 的主光线与物面 O_2 对应的最佳像面 O'_2 交于 A2、B2 处。物体 AB 对两个不同位置相机在各自物面对应的最佳像面处所成的像存在明显的差异。图 5(b)则展示了单一相机单元在对不同位置物面进行调焦并寻找最佳像面后,处于某一位置的物体 AB 所成的像随像平面的变化而变化的情况。尽管像面的大小和位置随物面的大小和位置变化的原理在阵列相机和单一相机中均是相同的,然而,对应于不同的应用场景时,这种像面稳定性的变化所带来的后果是有区别的。对于单一相机单元的应用场景,一般只关注相机是否

对某一特定位置的物面清晰成像,这种调焦带来的像面稳定性下降所造成的影响往往可以忽略;然而,对于一个具有大量子相机单元的共心多尺度成像系统,这种位于重叠视场处的像面差异会导致不同位置相机分别成像后的图像在进行拼接时产生的误差及消耗的时间大大增加。

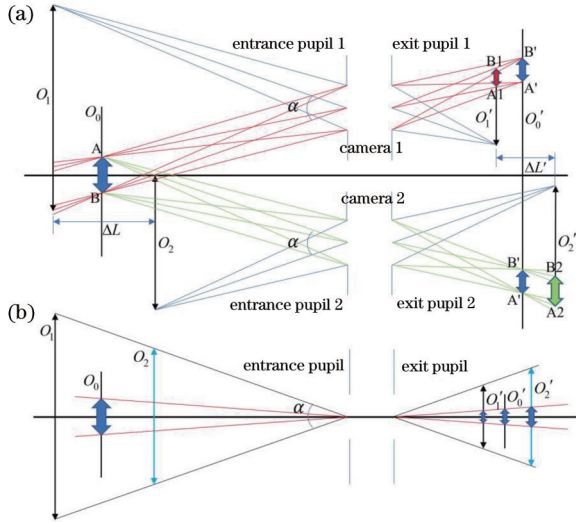


图 5 图像拼接错误理论分析示意图。(a)阵列相机成像示意图;(b)单相机成像示意图
Fig. 5 Diagrams of theoretical analysis of image stitching misalignment. (a) Diagram of array camera imaging; (b) diagram of single camera imaging

对于相机生成的图像手动进行拼接,拼接后的效果图如图 6 所示。可以看出,手动拼接出的图像中消除了大部分错位感,但存在如方框内所示的重影现象,这源于子相机成像深度范围的差异导致像面位置的改变,致使像面的稳定性下降。一般来说,处于上下接缝处的子相机的成像深度范围的差异要远比处于左右接缝处的子相机的成像深度范围差异大,反映在上文图 4 中,便是总体上圆圈点的有效错位度位于三角点之上。并且,对于在实际成像深度范围与统一标定时所对应的成像深度范围一致的次级阵列相机,它们在彼此拼接时产生的错位度会大大减小,反映在图 4 中便

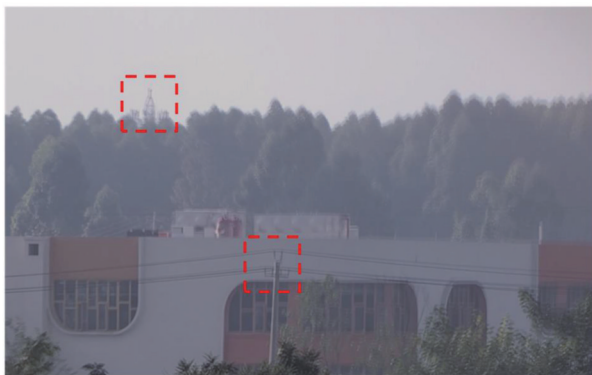


图 6 手动拼接效果示意图
Fig. 6 Schematic diagram of manual stitching effect

是存在一个错位度最小的成像深度范围——第二深度范围(100~300 m)。因此,要想使得拼接时产生的错位度减小,就要设法解决不同子相机成像深度范围的差异导致的像面稳定性下降这一问题。

2.3 图像拼接错位光学结构补偿方法

当前的共心多尺度成像系统在修复子相机的像面位置差异导致的错位现象时,大多是对后续图像拼接算法部分进行改进,通过改进算法的结构来提高拼接质量和效率,这种方法会给后端的图像处理系统带来更大的压力并且对计算机的处理能力提出了更高的要求。因此,本文从前端光学设计层面改善这一问题,即在共心多尺度成像系统中引入像方远心光路结构。如图 7 所示,两个相邻摆放的子相机尽管存在成像深度范围差异 ΔL ,相对应地,在各自调焦寻找最佳像面时存在一个像面位置差异 $\Delta L'$ 。然而,像方远心光路的特殊性使得像面维持稳定,消除差异带来的像面变化。这种从前端光学系统对像面稳定性予以补偿的优化设计方法可以改善成像质量,减轻图像拼接算法在消除像面差异方面的压力,从而减少错位等拼接缺陷的出现,提高了拼接质量和效率。下文中将对引入像方远心结构的共心多尺度成像系统设计进行详细的介绍。

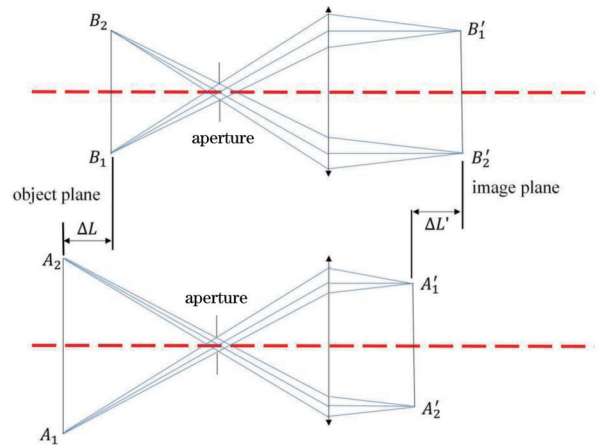


图 7 利用像方远心光路来补偿物面移动带来的拼接错位感示意图
Fig. 7 Diagram of using telecentric optical path to compensate image stitching misalignment caused by movement of object surface

3 像方远心共心多尺度成像系统设计

3.1 系统参数的确定

在设计共心多尺度成像系统时,前后系统参数相互关联,其相关性^[16-17]可表示为

$$F_o = F_1 / |M|, \quad (2)$$

$$F_1 = F_T, \quad (3)$$

$$f'_T = f'_o |M|, \quad (4)$$

式中: F_o 、 F_1 、 F_T 分别为球形主透镜、次级相机和合成系统的 F 数; M 为次级相机的放大率; f'_T 、 f'_o 分别为合成系统和球形主透镜的焦距。

基于后期对图像拼接的要求,需要子相机的视场存在一定的交叠,根据由 Marks 等^[3]提出的可以同时满足图像拼接所需视场重叠度以及后端机械装配的需求,得出了微型次级相机的视场角 ω 与相邻次级相机对球形主透镜中心张角 θ 之间满足如下关系:

$$\omega > 1.4\theta. \quad (5)$$

根据以上关系并对平衡设计难度进行综合考虑后,得到技术指标如表 1 所示。共心多尺度成像系统根据有无中间像面可分为开普勒型和伽利略型,本文

中所设计的像方远心共心多尺度成像系统采用了二次聚焦的开普勒结构,其简化模型可视为由开普勒望远镜和次级成像物镜构成,如图 8 所示,根据式(4)可计算出合成系统的焦距为 60 mm,而在 ZEMAX 光学设计软件中,系统的焦距指的是像方焦距,二次聚焦系统的像方主面位于像方焦点的右侧,因此,软件中的像方焦距应为 -60 mm,在设计时可利用操作数对焦距进行限制以把握合成系统的优化方向。

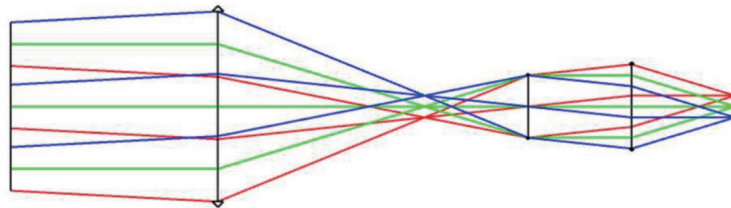


图 8 共心多尺度成像系统简化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of simplified model of concentric multi-scale imaging system

表 1 光学系统设计指标

Table 1 Design parameters of optical system

Parameter	Fore monocentric lens	Microcamera	Synthetic system
Focal length /mm	200	18	60
F number	10	3	3
FOV /($^{\circ}$)	70	6	70
Wavelength	Visible	Visible	Visible
Magnification	—	-0.3	—
θ /($^{\circ}$)	—	—	<4.29
Telecentricity /mrad	—	<0.1	<0.2

本设计所采用的探测器为 SONY ICX204 彩色 CCD,相关参数见表 2。

表 2 SONY ICX204 技术指标

Table 2 Technical specifications of SONY ICX204

Parameter	Value
Diagonal of CCD	6 mm
Number of effective pixels	1032 × 776
Pixel size	4.65 μm × 4.65 μm
Frame rate	31 frame·s ⁻¹

3.2 球形主透镜的结构设计与优化

采用具有高度对称性的球形主透镜在对像差的校正方面有着巨大的优势,经前置球形主镜所成的一级像面中不存在轴外像差,只存在球差、色差以及这两者的组合像差,并且其场曲可通过次级相机阵列的曲面排布方式来进行补偿。考虑到像方远心光路的引入所带来的系统设计压力,采用了 6 层同心球透镜结构^[11],通过 ZEMAX 光学仿真软件优化设计了焦距为 200 mm、 F 数为 10、视场为 70° 的球形主透镜结构,如

图 9 所示,并对该设计的成像性能进行了评价,得到如图 10 所示的点列图和光扇图,各视场点列图弥散斑半径均小于艾里斑半径,且各几何像差均得到了很好的校正,符合设计指标,满足后续系统合成的要求。该共心球透镜的结构参数由表 3 给出。

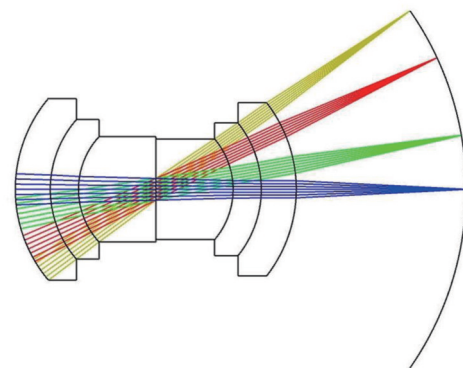


图 9 前置共心球透镜光路结构图

Fig. 9 Optical layout of fore monocentric objective

3.3 像方远心次级相机结构与优化

根据 3.1 节中表 1 所提出的设计参数来对后方次级相机结构进行独立优化设计,最终优化设计出焦距为 18 mm、 F 数为 3、视场为 6°、放大率为 -0.3、远心度控制在 0.1 mrad 以内的次级远心光路结构,如图 11 所示。考虑到像差校正的需求和光学系统对远心度的要求,选择使用 9 片镜的结构,其中采用 3 组双胶合,光阑位于第 2 组和第 3 组双胶合透镜之间。

对该结构的像质进行评价,观察其点列图、波前图、光线像差以及调制传递函数(MTF)曲线。图 12(a)中点列图表明各视场弥散斑半径均小于艾里斑半径,图 12(b)中光扇图表明各种几何像差校正良好,图 12(c)说明了该系统的场曲和畸变均已控制在合理范围

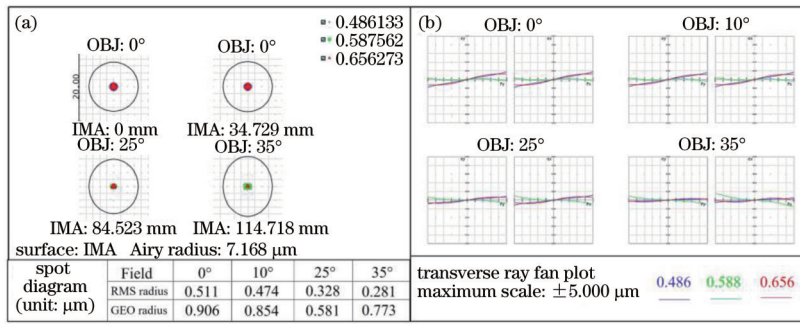


图 10 前置共心球透镜像质评价。(a)点列图;(b)光扇图

Fig. 10 Image quality evaluation of fore monocentric objective system. (a) Spot diagram; (b) ray fan

表 3 共心球透镜的结构参数

Table 3 Structural parameters of concentric spherical lens

Surface	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm
OBJ	Infinity	Infinity	—	Infinity
1	90.549	22.549	H-QK3L	90.549
2	68.000	18.176	H-LAK52	68.000
3	49.824	49.824	H-FK95N	49.824
STO	Infinity	49.824	H-FK95N	49.824
5	-49.824	18.176	H-TF5	49.824
6	-68.000	22.549	D-ZLAF52LA	68.000
7	-90.549	109.443	—	90.549
IMA	-200.062	—	—	114.719

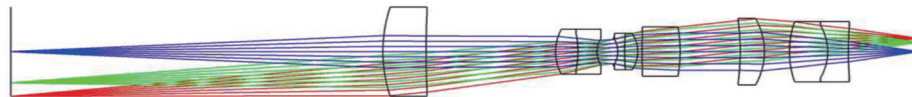


图 11 次级远心透镜系统光路结构图

Fig. 11 Optical layout of secondary telecentric lens system

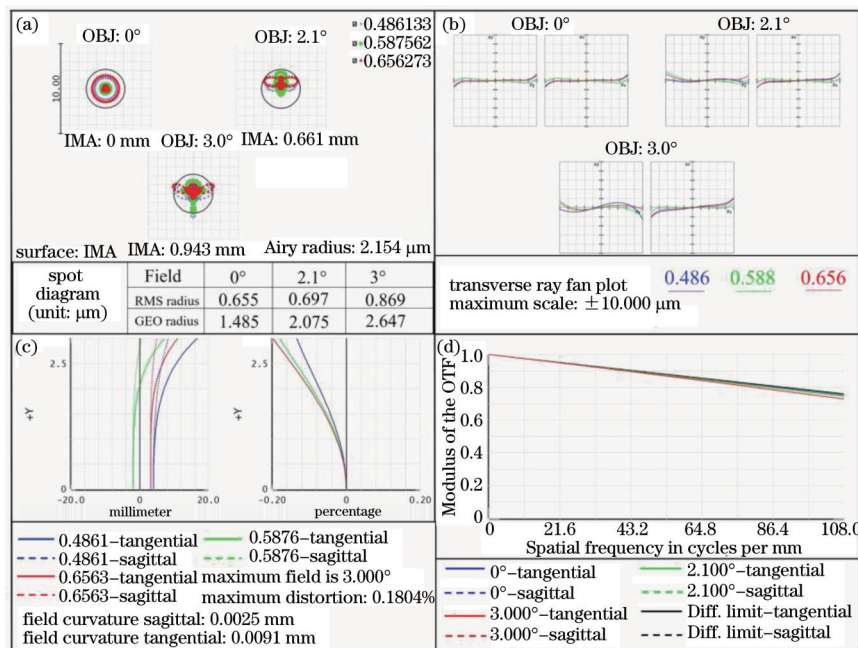


图 12 次级远心透镜系统光路像质评价。(a)点列图;(b)光扇图;(c)场曲/畸变曲线;(d)MTF 曲线

Fig. 12 Image quality evaluation of secondary telecentric lens system. (a) Spot diagram; (b) ray fan; (c) curvature/distortion curves; (d) MTF curves

内,图 12(d)展示了该系统的 MTF 曲线,考察奈奎斯特频率处于 108 lp/mm 的 MTF 曲线,各视场和平面的 MTF 均逼近衍射极限,均保持在 0.7 以上。图 12 中 Diff. 为 diffraction 的缩写,RMS 代表均方根半径,GEO 代表几何半径。

在对像方远心次级光路结构进行优化时,可利用评价函数来限制从最后一个表面的不同高度出射的主光线的角度以实现像方远心设计。考察如表 4 所示的远心度,归一化高度下的不同位置的远心度均控制在 0.1 mrad 以内,远心效果优异,总体可认为该次级远心光路结构的成像质量优异,符合设计指标。该次级光路结构参数由表 5 给出。

表 4 归一化高度下的远心度
Table 4 Telecentricity at normalized height

Normalized height	Telecentricity /mrad
1.0	0.100
0.7	0.068
0.4	0.097
0.1	0.031
0	0

3.4 合成系统的优化设计

前置共心球透镜具有高度对称性,对应于不同视场的后组结构完全一致,整个合成系统以球形透镜中心为基点呈旋转对称,因此只需设计一组前置球形主镜和后方次级相机的合成系统即可。在对合成系统进行优化设计时,除了关注像质的优化,还要重点关注对次级远心光路结构整体口径的限制,即在保证视场重叠度满足需要的同时,保证后期机械装调相机阵列时的可行性,严格遵循 3.1 节所提及的式(5)来进行优化。最终优化设计的结构图如图 13 所示,系统焦距为 60 mm,视场为 6°,F 数为 3,整体筒长小于 400 mm。

对该合成系统的成像性能进行评价,观察如

表 5 次级远心透镜系统光路的结构参数

Table 5 Structural parameters of secondary telecentricity lens system

Surface	Radius of curvature / mm	Thickness / mm	Glass	Radius / mm
OBJ	Infinity	22.578	—	3.150
1	11.431	2.618	SF9	3.144
2	66.111	7.852	—	2.890
3	3.769	1.358	N-SK18	1.579
4	-7.195	1.157	N-SF19	1.336
5	2.006	0.991	—	0.936
STO	Infinity	0.265	—	0.863
7	-2.019	0.418	SF15	0.881
8	19.398	0.796	N-BAF10	1.124
9	-2.558	0.266	—	1.283
10	152.229	2.300	LAF22A	1.443
11	-12.036	3.647	—	1.739
12	-19.079	1.469	LF5G19	2.210
13	-5.361	1.512	—	2.342
14	7.258	2.324	SK7	2.122
15	-4.128	1.252	KZFS8	1.851
16	27.373	4.254	—	1.641
IMA	Infinity	—	—	0.945

图 14(a)所示的点列图,可以发现各视场弥散斑形状相似,且其半径均小于所选探测器的像元尺寸,图 14(b)、(c)反映了该系统的像差校正情况,可见该系统的像差校正效果良好,且场曲和畸变均得到了良好的控制。图 14(d)为该系统的 MTF,考察奈奎斯特频率为 108 lp/mm 的 MTF 值,各视场 MTF 值达 0.6 及以上,且子午和弧矢平面的 MTF 曲线基本一致,说明该系统的成像性能优异且全视场成像均匀。

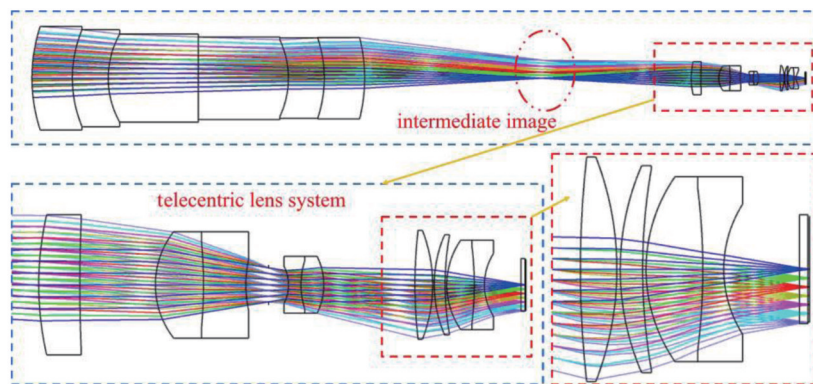


图 13 合成系统光路结构图

Fig. 13 Optical layout of synthetic system

除了通过考察以上结果参数来评价所设计光学系统的成像性能以外,对于本文所设计的像方远心共心多尺度成像系统,还需考察远心度是否符合设计要求,

合成系统的远心度由表 6 给出。从表中可以看出,合成系统的远心度控制在 0.2 mrad 以内,远心效果优异,满足设计要求。该合成系统的结构参数由表 7 给出。

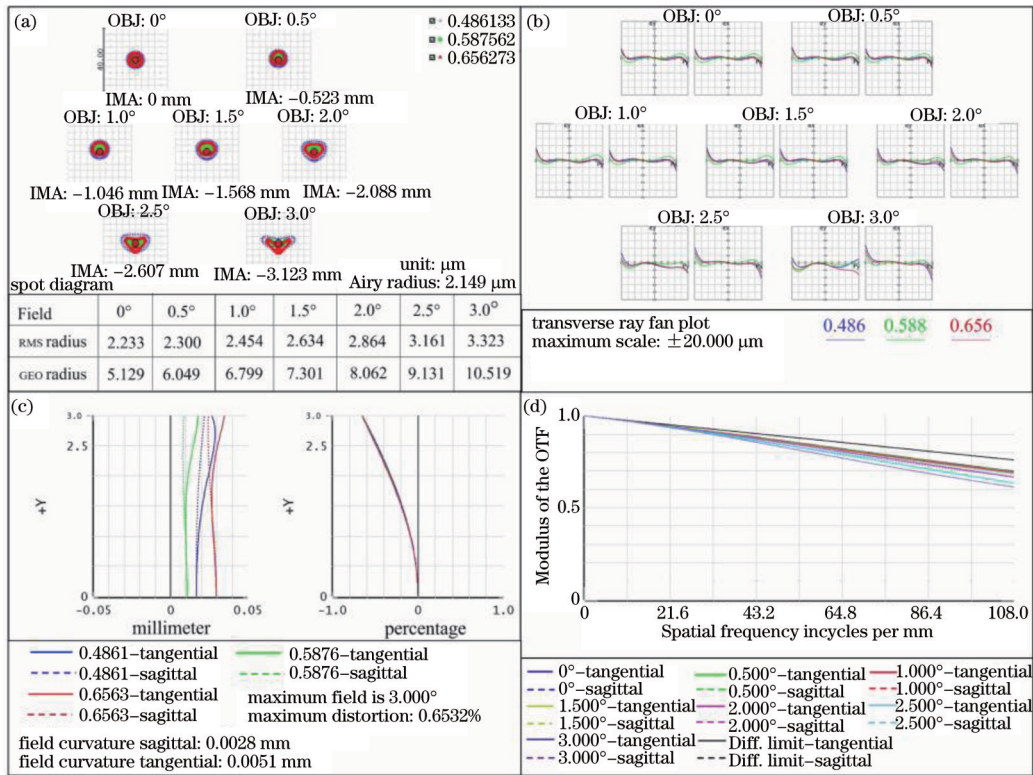


图 14 合成系统光路像质评价。(a)点列图;(b)光扇图;(c)场曲/畸变曲线;(d) MTF 曲线

Fig. 14 Image quality evaluation of synthetic system. (a) Spot diagram; (b) ray fan; (c) curvature/distortion curves; (d) MTF curves

表 6 归一化高度下的远心度

Table 6 Telecentricity at normalized height

Normalized height	Telecentricity /mrad
1.0	0.187
0.7	0.003
0.4	0.200
0.1	0.081
0	0

对像方远心共心多尺度成像系统的微型次级相机的视场角 ω 与相邻次级相机对球形主透镜中心张角 θ 之间的关系进行考察,如图 15 所示,此时相邻次级相机对球形主透镜的中心张角 θ 为 4.138° ,视场角 ω 为 6° 的次级相机结构满足上述 3.1 节所提出的式(5),且

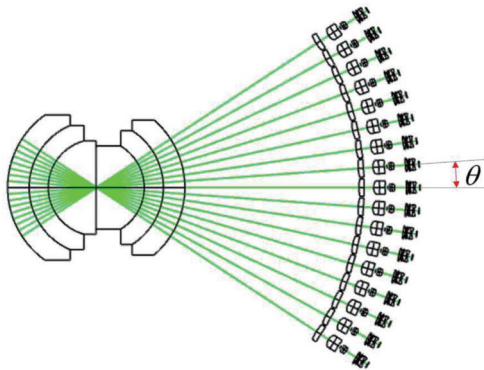


图 15 相邻次级相机排布角度

Fig. 15 Orientation of adjacent secondary camera

留下了相当的机械装调空间,此时相邻次级相机的视场重叠度为 31.03% ,满足图像拼接对视场重叠程度的要求^[18]。采用如图 15 所示的排布方式,即可实现总视场为 70° 的像方远心共心多尺度成像系统。从像面大小的角度对该系统进行评价,该合成系统中单个子相机成像单元的像面尺寸为 6.26 mm ,满足设计指标中提出的探测器 CCD 的尺寸匹配需求。

利用 ZEMAX 的多重组态功能展示利用多通道单元实现 70° 视场的共心多尺度成像系统,如图 16 所示。共心多尺度成像系统具有高度的旋转对称性,在不考虑机械装调和制造误差的情况下,各个通道的成像质量应是一致的。选取中心视场为 $0^\circ, 16.55^\circ, 33.10^\circ$ 的

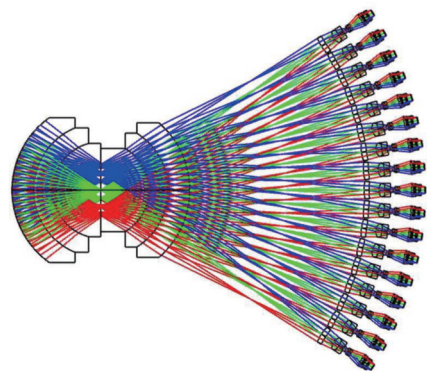


图 16 多通道共心多尺度成像系统示意图

Fig. 16 Schematic diagram of multi-channel concentric multi-scale imaging system

表 7 合成系统的结构参数
Table 7 Structural parameters of synthetic system

Surface	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm
OBJ	Infinity	Infinity	—	Infinity
1	85.886	20.853	H-K12	26.735
2	65.033	0	—	25.031
3	65.033	18.521	H-LAK3	25.031
4	46.511	0	—	22.721
5	46.511	46.511	H-FK71A	22.721
6	Infinity	0	—	21.299
7	Infinity	46.511	H-FK71A	21.299
8	-46.511	0	—	19.825
9	-46.511	18.521	H-LAK3	19.825
10	-65.033	0.000	—	20.768
11	-65.033	20.853	H-K12	20.768
12	-85.886	0	—	20.956
13	-85.886	168.622	—	20.956
14	38.290	5.000	H-ZBAF21	8.506
15	177.987	9.209	—	8.077
16	10.537	5.858	H-ZPK1A	6.465
17	-56.897	5.168	H-F51	5.221
18	14.643	2.780	—	3.168
STO	Infinity	2.406	—	2.066
20	-5.050	1.515	H-ZF12	2.263
21	9.251	2.788	H-ZK20	2.945
22	-7.771	11.110	—	3.458
23	58.783	2.152	H-ZLAF55C	6.566
24	-18.191	0.200	—	6.609
25	15.324	1.322	F3	6.090
26	34.210	0.200	—	5.927
27	9.524	3.350	H-BAK7A	5.438
28	-38.168	1.238	H-LAF54	4.810
29	7.142	4.462	—	3.820
30	Infinity	0.500	H-K9L	3.204
31	Infinity	0.100	—	3.147
IMA	Infinity	—	—	3.130

通道单元,对其成像质量进行考察,如图 17 所示,可知各个通道的成像质量一致。

综上所述,本文所提出的像方远心共心多尺度成像系统的成像性能优异,满足设计指标要求。与传统共心多尺度成像系统结构相比,本文提出的基于像方远心光路结构的共心多尺度成像系统可以从光学设计部分来降低像面的不稳定,减轻后端图像拼接的压力,提高拼接质量和效率。

4 结 论

针对共心多尺度系统中普遍存在的拼接错位问

题,收集归纳了错位数据,从理论上分析了出现拼接错位的原因。为了改善这一问题,从前端光学系统结构的优化入手,在共心多尺度成像系统中引入像方远心光路,实现了一种 F 数为 3、焦距为 60 mm、远心度小于 0.2 mrad、单个子相机视场为 6° 且满足机械装调角度限制和视场重叠度要求的共心多尺度系统,该系统成像性能优异,对像面的稳定性予以了补偿,减轻了后端图像拼接的压力,提高了成像系统的整体性能。该研究为共心多尺度系统整体设计提供了新的思路和技术途径,具有重要的理论和实践意义。

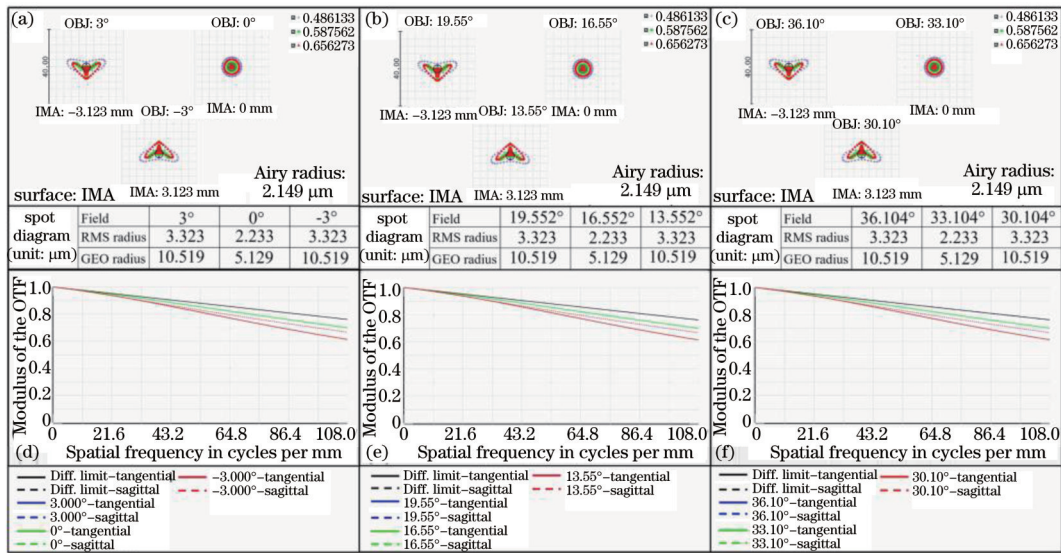


图 17 不同视场通道单元的成像质量评价。(a)中心视场为0°的通道单元点列图;(b)中心视场为16.55°的通道单元点列图;(c)中心视场为33.10°的通道单元点列图;(d)中心视场为0°的通道单元MTF曲线;(e)中心视场为16.55°的通道单元MTF曲线;(f)中心视场为33.10°的通道单元MTF曲线

Fig. 17 Image quality evaluation of different field of view channels. (a) Spot diagram of channel with central field of view of 0°; (b) spot diagram of channel with central field of view of 16.55°; (c) spot diagram of channel with central field of view of 33.10°; (d) MTF curves of channel with central field of view of 0°; (e) MTF curves of channel with central field of view of 16.55°; (f) MTF curves of channel with central field of view of 33.10°

参 考 文 献

[1] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
 [2] Golish D R, Vera E M, Kelly K J, et al. Development of a scalable image formation pipeline for multiscale gigapixel photography[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 22048-22062.
 [3] Marks D L, Son H S, Kim J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera[J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 083202.
 [4] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography[J]. Nature, 2012, 486(7403): 386-389.
 [5] Son H S, Johnson A, Stack R A, et al. Optomechanical design of multiscale gigapixel digital camera[J]. Applied Optics, 2013, 52(8): 1541-1549.
 [6] Youn S H, Son H S, Marks D L, et al. Optical performance test and validation of microcameras in multiscale, gigapixel imagers[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3712-3723.
 [7] 刘飞, 吴晓琴, 赵琳, 等. 广域高分辨率计算光学成像系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811001.
 Liu F, Wu X Q, Zhao L, et al. Research progress of wide-field and high-resolution computational optical imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811001.
 [8] 刘飞, 刘佳维, 邵晓鹏. 高集成度小型化共心多尺度光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1275-1282.
 Liu F, Liu J W, Shao X P. Design of high integration

and miniaturization concentric multiscale optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1275-1282.
 [9] 杨威, 刘佳维, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的大视场高分辨率红外变焦成像系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(6): 805-812.
 Yang W, Liu J W, Han P L, et al. Design of an infrared zoom imaging system based on concentric spherical lens with wide FOV and high resolution[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(6): 805-812.
 [10] 刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084201.
 Liu F, Wei Y Z, Han P L, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.
 [11] 吴腾飞, 杜娟, 邵晓鹏. 一种共心多尺度光学宽视场成像系统设计[C]//第三届高分辨率对地观测学术年会. 北京: 高分辨率对地观测学术年会组委会, 2014.
 Wu T F, Du J, Shao X P. A design of monocentric multiscale and wide field of view imaging system[C]// The 3rd Annual Conference on High Resolution Earth Observation. Beijing: Organizing Committee of China High Resolution Earth Observation Conference, 2014.
 [12] 李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0208002.
 Li J Y, Feng W X, Liu F, et al. Design of airborne multi-scale wide-field-of-view and high-resolution imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208002.

- [13] Cossairt O S, Miao D, Nayar S K. Gigapixel computational imaging[C]//2011 IEEE International Conference on Computational Photography, April 8-10, 2011, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 11962821.
- [14] Zaragoza J, Chin T J, Brown M S, et al. As-projective-as-possible image stitching with moving DLT[C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2013: 2339-2346.
- [15] 蔡梦颖. 仿生复眼视觉系统标定和大视场图像拼接的技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 42-48.
Cai M Y. Research on the technology of calibration of bionic compound eye visual systems and large field of view image mosaic[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 42-48.
- [16] 沈阳. 基于同心球镜的超大视场光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019: 63-91.
Shen Y. Research on super large field of view optical imaging technology based on concentric lens[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 63-91.
- [17] 陈晓祥. 一种稀疏次级相机阵列的共心多尺度成像系统的研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 19-25.
Chen X X. Development of a monocentric multiscale imaging system with sparse subcamera array[D]. Xi'an: Xidian University, 2017: 19-25.
- [18] 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.
Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.