

基于计算成像的宽视场高分辨相机研究进展

孙崇尚^{1,2} 丁亚林¹ 王德江¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 宽视场高分辨成像在航空侦察、地形测绘和安全监控等领域有广泛的应用。主要从光学设计角度归纳总结了实现宽视场高分辨成像的技术难点,阐述了透镜系统的比例法则。将比例法则推广到计算成像领域,证明计算成像的方法可以在更小的相机尺寸时获得更高的分辨率。在此基础上,重点阐述了一种可行的宽视场高分辨成像的实现途径;同心多尺度光学系统的设计方法。介绍了当前研制成功的基于同心多尺度理论的宽幅相机,并对它们的性能进行了分析比较,讨论了同心多尺度相机面临的技术挑战。

关键词 成像系统;计算成像;宽视场高分辨;同心多尺度;像差;空间带宽积

中图分类号 TB879

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.030006

Advances in Studies of Wide-Field High-Resolution Camera Based on Computational Imaging

Sun Chongshang^{1,2} Ding Yalin¹ Wang Dejiang¹

(¹Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

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

Abstract Wide-field high-resolution imaging is widely used in aerial surveillance, topographic mapping and safety monitoring. A summary is made for wide-field high-resolution imaging mainly in terms of optical design, and a scaling law that determines how resolution increases as a function of lens size is stated. The generalized scaling law shows that, by using computation to correct aberrations, a greater resolution can be achieved with a smaller camera size. Monocentric multiscale design, which is a good way to achieve wide-field high-resolution photographs, is emphatically described. Finally, an introduction to wide-field cameras based on monocentric multiscale theory is given, a comparison is made on their performances, and existing issues of monocentric multiscale camera are discussed.

Key words imaging systems; computational imaging; wide-field high-resolution; monocentric multiscale; aberration; space bandwidth product

OCIS codes 110.1758; 220.1000; 220.3620

1 引言

宽视场高分辨成像广泛应用于航空侦察、地形测绘和安全监控等领域,但由于视场与分辨率之间存在相互制约的关系,一般不能仅通过一次曝光获得宽幅高分辨图像。高分辨成像时如果要增大幅宽,一般采用机械扫描的方法。然而,扫描获取宽幅图像需要的时间长,而且帧与帧之间存在时间间隔,因此这种方法仅对静态场景有效。对于一些应用,比如大范围持续监视,在获得大视场的同时还要保证不能丢失目标的细节信息,且必须在单次曝光的时间范围内完成,只能采用面阵凝视成像。面阵凝视成像时若要同时获得大视场和高分辨率,像平面上的像元数目必须达到10亿级别。而当前在单片探测器上像元数目远远不能达到这个水

收稿日期: 2012-11-06; 收到修改稿日期: 2012-12-25; 网络出版日期: 2013-02-05

基金项目: 国家973计划(2009CB724001)资助课题。

作者简介: 孙崇尚(1989—),男,硕士研究生,主要从事航空相机像移补偿方面的研究。E-mail: sun2007cn@163.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl_1964@126.com(通信联系人)

平,必须进行拼接。探测器拼接技术难度大,并直接增大了温控难度和相机研制难度。此外,从光学设计角度考虑,透镜的分辨力要与 10 亿像元探测器的分辨率相匹配,在现有的技术水平条件下,设计和加工这种透镜仍然是巨大的技术挑战。

本文归纳总结了宽视场高分辨成像面临的技术挑战,阐述了光学系统分辨率与透镜尺寸之间关系的比例法则,从原理上解释了限制光学系统分辨率提高的内在因素,并将比例法则推广到了计算成像领域。在此基础上,重点阐述了提高光学系统分辨率的一种新颖的光学设计方法,即同心多尺度理论,并综述了基于同心多尺度理论的宽幅相机研究现状。最后,对同心多尺度相机面临的技术挑战进行了讨论。

2 宽视场高分辨成像技术分析

设计传统相机时,宽视场与高分辨率不可兼得,只能折中。例如,望远镜以牺牲宽视场来获得大的角分辨率;大视场成像仪以牺牲角分辨率来获得大的视场角^[1]。总体来说,在当前的技术条件下,宽视场高分辨成像主要有三大技术难点:1) 当前单片探测器上的像元数目远远不能达到宽视场高分辨成像要求的 10 亿数量级;2) 从光学设计角度,由于像差的存在,设计和加工与 10 亿像元探测器的分辨力相匹配的透镜系统是非常困难的;3) 由于宽视场高分辨成像获得的照片的信息量巨大,对图像传输和图像处理都提出了非常高的实时性要求,对当前的技术水平来说,仍然是一大技术难题。下面对这 3 个技术挑战进行具体论述。

2.1 探测器技术

面阵凝视成像时若要同时获得大视场和高分辨率,像平面探测器上的像元数目必须达到 10 亿数量级。现有的单片探测器所成的像已不能满足要求,多探测器拼接成为必需。多探测器的拼接方案有多种,如机械拼接、光学拼接等。机械拼接通常在拼接过程中要舍弃一些边界上的像元,造成图像产生较大拼接缝隙,图像内存在盲区,降低图像质量。光学拼接是利用拼接棱镜的分光原理,将成像平面分割成空间分离的两个像面,用以安置多个 CCD,并使每相邻两片 CCD 首尾像元重叠,在像方空间内形成大视场的探测器阵列。光学拼接方法的精度较高,目前的光学拼接方法多采用棱镜分光方式,一方面会造成体积和重量的增大,另一方面由于棱镜的存在会产生一些色差,另外这种方法还受拼接棱镜的材料、加工工艺等的限制,拼接长度不宜超过 220 mm,限制了该种拼接方法在大视场相机上的应用^[2]。

2.2 光学设计和加工

空间带宽积(SBP),即透镜能够分辨的像点的数目,决定了像面上可分辨像元的数目,也就是说 SBP 决定了光学系统的分辨率。在理想条件下,也就是没有像差存在时,光学系统的分辨率是由衍射决定的,因此当保持视场大小不变时,衍射斑大小保持不变,增大透镜尺寸,SBP 也应当相应增加。但是,由于像差的存在,SBP 会达到一个极限,也就是说 SBP 是受几何像差限制的^[3],具体分析见下文。

实际情况下,当透镜尺寸增大时,SBP 由于像差的存在会达到一个极限,此时再增大 SBP 通常采用两种方法:1) 增大像元尺寸,这样会导致相机的分辨率下降;2) 用增加透镜复杂度的方法来消除像差,这种方法成本太高。

2.3 图像传输与图像处理

宽视场高分辨成像获得的照片首先要传输到控制和图像处理模块进行处理加工,而由于其照片信息量巨大,在目前的技术水平下,一般要传输数十秒,极大地限制了相机拍照的帧频。对图像处理来说,获得的原始图像要进行配准、融合、复原和增强等实时处理,对处理器的运算速度提出了非常高的要求,当前的处理器远远不能达到实时性的要求。

3 透镜系统的比例法则

3.1 透镜系统的比例法则

Lohmann^[4]提出了描述透镜的分辨率与透镜尺寸之间关系的比例法则,从光学系统原理上解释了宽视场高分辨成像的内在制约因素。对于任意一个透镜系统,其所成的像的大小为 $\Delta x, \Delta y$ (Δx 为长度, Δy 为宽度)。当将此透镜系统成比例增大 M 倍时,则该系统的焦距、直径和图像大小都成比例增大 M 倍,而 F 数和

视场大小保持不变。如果在成比例增大透镜系统时,系统可以分辨的最小光斑尺寸没有成比例增大 M 倍,那么透镜可以分辨的像点数目就会相应增加。透镜可以分辨的像点数目是用 SBP 来表示的,SBP 是表征一个给定的视场可以清晰分辨的像点数目无量纲量。

在没有像差存在的理想条件下,也就是透镜仅受衍射限制时,可分辨的最小光斑尺寸仅由衍射决定,即 $\delta_d \approx \lambda F$, λ 为波长, F 为透镜 F 数。当透镜系统增大 M 倍时,衍射斑大小保持不变,SBP 可以表示为

$$R_d = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{(\lambda F)^2}, \quad (1)$$

可知 SBP 随 M^2 增大,如图 1 中曲线 R_d 所示。

然而一个透镜系统的 SBP 也受几何像差的影响,设几何像差导致的弥散斑的直径为 δ_g , δ_g 随比例因子 M 线性增大。因此,考虑像差后,SBP 变为

$$R_g = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{(\lambda F)^2 + M^2 \delta_g^2}. \quad (2)$$

当 $M\delta_g \gg \lambda F$ 时,SBP 会达到一个极限 $\Delta x \Delta y / \delta_g^2$,如图 1 中曲线 R_g 所示。

透镜设计者通常在透镜成比例增大时也将其 F 数增大,这样可以减少几何像差的影响而使衍射斑尺寸增大,因此 SBP 随 M 增大的速度更快。根据经验,设计者通常使 F 数按照与 $M^{1/3}$ 成正比增大,从而可以得到 F 数随透镜尺寸增大时系统的 SBP

$$R_f = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{\lambda^2 M^{2/3} + \delta_g^2}, \quad (3)$$

如图 1 中 R_f 曲线所示。

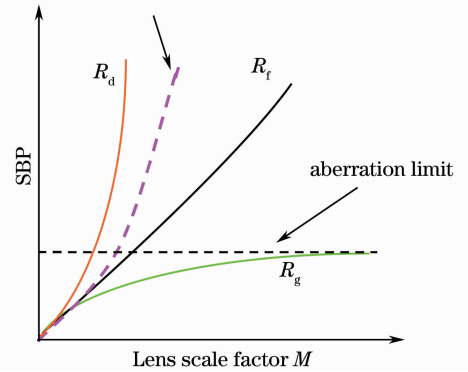


图 1 SBP 随透镜比例 M 变化的曲线
Fig. 1 A plot showing how SBP increases as a function of lens scale factor M

3.2 计算成像系统的透镜比例法则

计算成像是将计算机强大的数据处理能力引入到成像系统的一种新型的成像方式。从狭义上来说,计算成像就是指对传统相机所成的图像进行图像处理,比如去雾处理、去模糊处理和图像拼接等。从广义上来讲,计算成像技术是指采用新颖的光学元件和光学手段对光场进行编码,在探测器上获得光学编码后的图像。编码后的图像无法直接利用,必须进行解码,解码是由计算模块完成的。设计者通过在计算模块中建立光学编码元件的模型,进行相应的数字图像处理,获取最终的可以被视觉系统识别的图像^[5]。

Cossairt 等^[3]将透镜系统比例法则推广到了计算成像领域。在以上的分析中,我们认为透镜能够分辨的最小像斑就是几何像差引起的弥散斑,即 δ_g 。通过计算成像的一些方法可以消除一些像差,如由透镜球差引起的弥散斑可以通过去卷积的计算成像方法消除^[6~8]。因此,对于计算成像系统,分辨率是由像元尺寸 ξ 给定的,并不直接依赖于几何像差弥散斑的直径 δ_g 。此外,信噪比(SNR)是图像质量的另一个重要参数。若不考虑传感器噪声,理论上可以一直减小像元尺寸,直到达到衍射极限,以此来增大 SBP,但此时探测器的 SNR 会大大下降。因此,为了在两个计算成像系统之间进行合理的比较,将系统的 SNR 取一固定值。

若图像去模糊误差为 δ_D ,则对任一计算成像系统,其 SNR 为 $1/\delta_D$ 。而去模糊误差 δ_D 与传感器噪声 δ_N 、透镜比例 M 之间的关系为

$$\delta_D = \delta_N M^{1/3.8}, \quad (4)$$

传感器噪声与像元尺寸之间的关系为

$$\delta_N = \frac{k}{\xi}, \quad (5)$$

式中 k 为常数。由于计算成像系统的 SNR 取一定值(也就是 δ_D 固定),定义一个新的常数 $k_1 = k/\delta_D$,由(4), (5)式,建立探测器尺寸与透镜比例之间的关系:

$$\xi = k_1 M^{1/3.8}. \quad (6)$$

最后,考虑到像元尺寸大于衍射斑直径,因此系统能够分辨的像点数目等于图像大小除以单个像元尺寸,即

$$R_c = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{\xi^2} = \frac{M^2 \Delta x \Delta y}{k_1^2 M^{2/3.8}} \quad (7)$$

(7)式是计算成像系统的比例法则。由(7)式可以知道:与 Lohmann 的传统透镜设计的比例法则相比,计算成像系统的分辨率随 M 增大得更快,如图 1 中曲线 R_c 所示。换句话说,计算成像的方法可以使我们在相机尺寸更小的情况下,获得更大的分辨率。

计算成像能够获得比传统成像系统更高的性能与结构复杂度比,也就是说计算成像系统可以用更简单的相机结构实现更高的成像性能。在传统成像中,高的成像性能是以高的复杂度为代价的,而在计算成像系统中,设计者可以将复杂度从硬件转移到计算上。举个简单的例子:在高分辨率相机中,限制分辨率提高的主要因素是像差,因此在传统相机中高的分辨率是以光学系统的复杂度为代价的,而在计算成像系统中,可以通过图像后处理的一些方法来校正像差,从而提高分辨率,这样大大简化了光学系统的设计和加工难度。

4 同心多尺度理论

4.1 多尺度光学系统

在计算成像理论基础上,Brady 等^[9]提出了一种新的方法来增大 SBP:多尺度光学系统设计。多尺度光学系统包括一个大的物镜和一系列小的光学元件组成的多孔径阵列结构。物镜的尺寸较大,为了设计和加工的方便,其几何形状一般比较简单,因此成像时会带来像差,这个像差由多孔径阵列校正。由于不同视场处的像差是不同的,因而多孔径阵列是由许多不同的光学元件组成的。物镜成的像经多孔径阵列折转后被分割成一系列子图像,子图像通过图像处理拼接成最终的图像。由图 2 可知,多尺度系统由前端的普通镜头和后端的多孔径阵列组成,因而整个系统集成了两端的优势,即普通镜头的光学采集效率和角分辨率、多孔径阵列的光场处理能力。

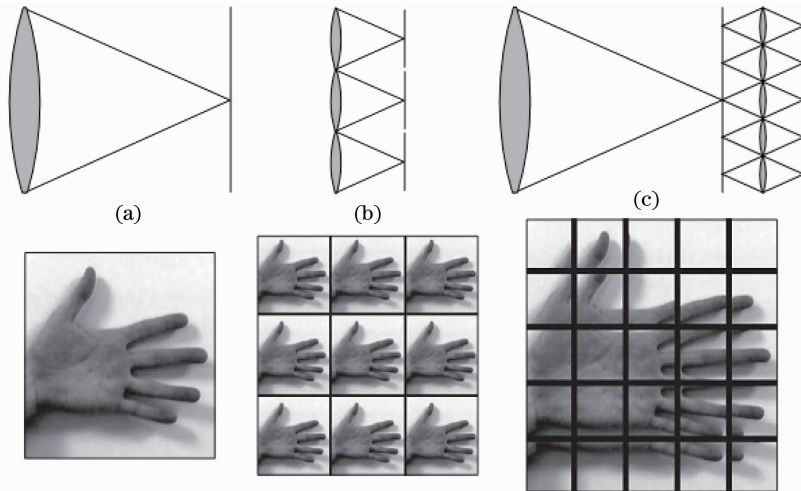


图 2 (a)普通镜头及其所成的像;(b) 3×3 的多孔径阵列及其所成的像(c) 5×5 的多尺度系统及其所成的像

Fig. 2 Basic layout and example of raw measurements from the three imager types: (a) Conventional imager;

(b) 3×3 multi-aperture array, and (c) 5×5 two-level multiscale system

当前的光学设计都是使光学元件工作在整个光场上,因而导致了视场和 F 数之间的相互制约的关系。像差是依赖于视场存在的,多尺度设计选择在局部视场处理像差,而不是在整个视场处理像差,因而大大减少了光学设计的限制。

4.2 同心物镜系统

虽然多尺度系统的设计有很大的优越性,但由于不同视场位置的像差不同,因此组成多孔径阵列的光学元件各不相同,且数目较多,加工和设计的难度仍然很大。同心透镜系统很好地解决了这个问题。所谓同心透镜系统就是所有透镜的曲面共用一个中心^[10]。

同心物镜系统有两个优点:1) 不同于普通透镜系统,同心物镜系统没有严格定义的光轴,因而没有轴外像差(如横向色差、像散和彗差等)。在同心物镜系统中,存在的像差只有轴向色差、球差和色球差。此外,由

于图像是在与透镜系统同心的曲面上形成的,因此存在场曲。2) 同心物镜系统的像差与视场角无关,即视场中所有点的像差相同。因而,同样的微相机可以校正视场中所有位置的像差,极大地简化了微相机的设计和加工^[11]。

4.3 同心多尺度透镜系统

所谓同心多尺度透镜系统^[12],就是同心物镜系统与多孔径阵列曲面共用一个中心。由于同心物镜系统的像差与视场角无关,因此组成多孔径阵列的微相机是相同的,且具有旋转对称性,相应地多孔径阵列也被称为微相机阵列。微相机阵列将整个视场分割成许多小视场,每个微相机对相应的视场成像,相邻微相机的子图像有重叠,将所有的子图像进行计算处理(包括消除一些像差),最后拼接成一整幅图像。同心多尺度透镜系统的创新之处在于用简单的光学元件和传统的图像传感器获得有重叠的子图像,然后通过图像计算处理,将子图像拼接成最终的图像。同心多尺度透镜系统是实现宽幅高分辨成像的有效途径,成功地避开了光学设计和加工、探测器拼接等一系列技术挑战。

5 基于同心多尺度理论的宽幅相机研究现状

5.1 相机阵列

相机阵列就是上面提到的多孔径阵列的一种,它是指通过相机在空间的一定排布来同时抓取一系列视角略有差别的图像,从而重构出光场数据的方法,最典型的是斯坦福大学的 128 相机阵列^[13~15]。每个相机获取整个视场中的一部分小视场的图像,最后通过拼接实现大视场全景成像。

5.2 基于图像处理消像差的同心多尺度相机

2011 年哥伦比亚大学研制出了基于图像处理消像差的同心多尺度相机^[3],其光机结构如图 3 所示。虽然它的光学系统设计采用了同心多尺度系统,但它并不能算是真正意义上的同心多尺度相机,因为在该相机中像差是通过图像处理的方法来校正的,多孔径阵列仅仅起到折转光线的作用,并没有校正像差的功能。

图 4 为基于图像处理消像差的同心多尺度相机样机,该相机的物镜为球镜,用五个小的平面探测器阵列近似形成一个弯曲的球面探测器,由于相邻探测器之间存在死区,它们的图像不能拼接在一起。解决这个问题的方法是在探测器之前加一些透镜,从而改变放大率,使相邻探测器的视场有重叠。用这个同心多尺度相机,可以实现 $15^\circ \times 2^\circ$ 的视场,像元数目为 1400 万。若要实现更宽的视场,只需在相机中增加探测器和相应的透镜即可。

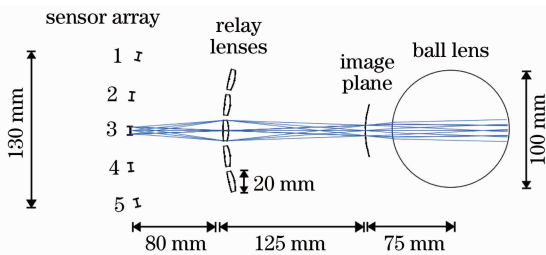


图 3 基于图像处理消像差的同心多尺度相机光机结构示意图

Fig. 3 Optical design of monocentric multiscale camera which corrects aberrations by image processing

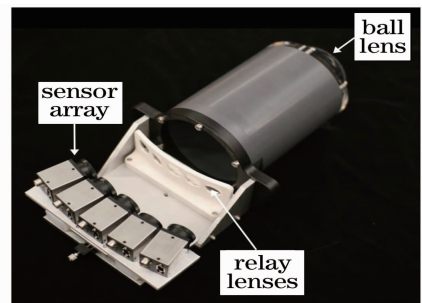


图 4 基于图像处理消像差的同心多尺度相机样机

Fig. 4 Proto type of monocentric multiscale camera which corrects aberrations by image processing

5.3 基于微相机阵列消像差的同心多尺度相机 AWARE-2

2012 年,杜克大学的 Brady 等^[16,17]研制出具有超大视场的同心多尺度相机的样机 AWARE-2,如图 5 所示。相机安装在一个 $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的外框架中,功率为 426 W,重量仅为 93 kg。该相机的原始数据为 14 亿像元,经图像处理后合成像元数约为 9.6 亿,视场为 $120^\circ \times 50^\circ$,角分辨率为 $64 \mu\text{rad}$ 。由于相机的数据量巨大,增大了数据传输和数据处理的难度,因此相机的数据传输时间较长,使用单以太网传输需要 13.5 s,相机的帧频也较低,仅为 10 frame/s。如图 6 所示,这台相机的球形同心物镜被 98 台微相机组成的多孔径阵列环绕,每台微相机装有 1400 万像素的探测器。光学系统的体积占相机总体积的 3% 左右,电

子处理和通讯设备占体积的很大一部分。

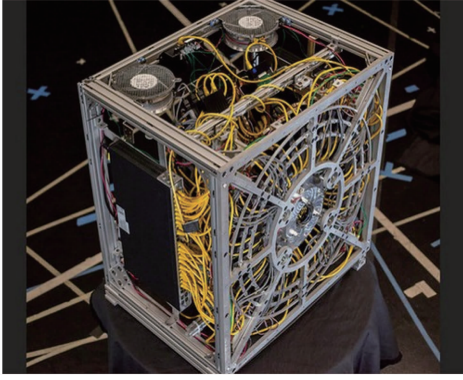


图5 AWARE-2 相机

Fig. 5 A photograph of monocentric multiscale camera AWARE-2

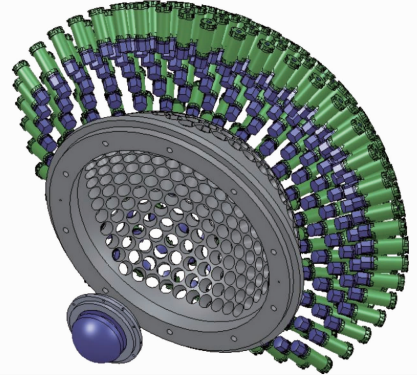


图6 AWARE-2 相机爆炸视图

Fig. 6 An exploded view of AWARE-2 camera

图7为AWARE-2的光学系统示意图,同心物镜系统由位于球心的冕牌玻璃(低折射率,高阿贝常数)构成的球形透镜和包围在外壳的火石玻璃(高折射率,低阿贝常数)构成的弯月形透镜组成,其焦距为70 mm, F 数为 $f/3.5$ 。微相机光学系统的有效焦距为11.7 mm, F 数为 $f/2.17$ 。微相机的孔径尺寸是微相机设计中最重要的参数。当微相机的孔径较大时,由于覆盖整个视场所需的微相机数目较少,因此集成起来较为简单。大孔径的光学系统具有更强的像差校正能力,然而大的孔径也会带来更大的像差,因此透镜复杂度较高,加工和设计难度更大。小孔径的优点是透镜复杂度低,且更易于加工;缺点是需要集成更多的微相机来覆盖整个视场。杜克大学的研究人员发现当微相机集成的探测器像元数在100万~1500万时,微相机的孔径直径选在3~12 mm比较合适^[11,18~21]。这种设计最主要的优点是像素扩展的灵活性,换句话说,对20亿、100亿和400亿的成像系统,只需要改变微相机的数目即可,而不需在同心物镜系统和微相机设计上做改变,极大地减小了设计和加工的难度^[22]。

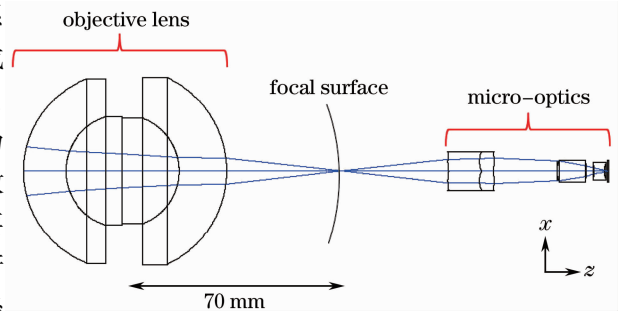


图7 AWARE-2 光机结构示意图

Fig. 7 Optical design of AWARE-2 camera

AWARE-2相机的像元数目为9.6亿,是准10亿像元相机。杜克大学正在研究AWARE-10相机,其设计像元数目为50亿~100亿,是真正意义上的10亿像元相机,准备解决AWARE-2存在的重叠误差、照明不均匀和配准误差等问题,根据计划应在2012年底完成。

5.4 系统性能分析比较

相机阵列优点是可以单独控制每台相机进行曝光,从而可以根据需要控制相机的曝光时间,提高成像质量。其缺点是系统的体积太大,有人做过计算,在像元数目为500亿时,要实现 $120^\circ \times 120^\circ$ 的超大视场,采用相机阵列时,系统直径达到6.2 m,而采用基于微相机阵列消像差的同心多尺度形式,系统的直径仅为1.6 m^[12]。

基于图像处理消像差的同心多尺度相机的优点是体积大大减小,结构更为紧凑,缺点是SNR比较低。整个系统通过计算成像校正像差,而每个计算成像系统都有一个固有的内在矛盾:透镜复杂度与信噪比。通过计算成像的方法校正像差时,减少透镜的复杂度是以牺牲系统的SNR为代价的^[3]。

基于微相机阵列消像差的同心多尺度相机AWARE-2通过大视场硬件分割成小视场、小视场软件拼接成大视场的方法实现了宽幅高分辨成像。该系统的特点是采用软硬件结合的方式来实现系统复杂度的降低,光学系统采用局部校正的方法消像差。与以上两个系统相比,它集成了二者的优点,克服了二者的不足,是实现宽视场高分辨成像的一种有效途径。

5.5 存在的主要问题

同心多尺度相机在现在的技术水平条件下主要有以下几个问题:

1) 同心多尺度光学系统的设计理念独到,与传统光学系统有很大不同,在光学系统的加工和检测中存在一些问题。例如,微相机阵列的装调和光学系统的检测等方面,我们的经验比较欠缺,如何对这样的光学系统进行装调和检测是一大技术难题。

2) 有人指出同心多尺度光学系统不能应用到航空、航天等领域的长焦距光学系统中,原因是同心多尺度光学系统的焦距一般较小,比如 AWARE-2 的焦距只有 70 mm。就航空遥感领域来讲,当前国外先进的航空相机焦距一般在 1 m 以上,甚至近 3 m,例如“全球鹰”相机的焦距为 1750 mm, DB-110 相机的焦距更是达到 2794 mm。因此,同心多尺度光学系统的焦距直接决定了它能否广泛地应用于光学遥感成像领域,这也是当前限制同心多尺度系统广泛应用的一大瓶颈。

3) 当前同心多尺度相机面临的最大问题是如何提高处理器的计算处理性能和减小电子控制系统的体积。由于基于计算成像的宽幅相机数据量巨大,为了提高数据处理速度,必须开展高速并行数据处理技术的研究。在 AWARE-2 相机中,电子控制面板以及热控系统占了很大空间,如何使电子系统更加有效率地工作和更加紧凑成为了亟待解决的问题。

6 结束语

宽视场高分辨成像系统的研制作为光学成像领域的一大技术难题,其难点主要有两点:光学系统的设计和探测器的拼接。计算成像技术在近 10 年内如火如荼地发展,它突破了传统成像技术难以解决的种种难题,为宽视场高分辨成像系统的实现指明了方向。同心多尺度光学系统成功地解决了光学系统的设计和加工问题,避开了探测器的拼接这一技术难点,是实现宽视场高分辨成像的最佳方法。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001
- 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001
- 2 Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 740~745
- 张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 740~745
- 3 O. Cossairt, D. Miao, S. K. Nayar. Gigapixel computational imaging[C]. *IEEE International Conference on Digital Object Identifier*, 2011
- 4 A. W. Lohmann. Scaling laws for lens systems[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(23): 4996~4998
- 5 Shree K. Nayar. Computational Cameras: Approaches, Benefits and Limits [R]. New York: Computer Science Department, Columbia University, 2011
- 6 M. Robinson, V. Bhakta. Experimental validation of extended depth-of-field imaging via spherical coding[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, 2009. CThB4
- 7 M. Robinson, G. Feng, D. Stork. Spherical coded imagers[C]. *SPIE*, 2009, **7429**: 74290M
- 8 M. Robinson, D. G. Stork. Extending depth-of-field: spherical coding versus asymmetric wavefront coding [C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, 2009. CThB3
- 9 D. J. Brady, N. Hagen. Multiscale lens design[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10659~10674
- 10 D. L. Marks, D. J. Brady. Gigagon: a monocentric lens design imaging 40 gigapixels[C]. *Proceedings of Imaging Systems*, 2010. ITuC2
- 11 D. L. Marks, E. J. Tremblay, J. E. Ford *et al.*. Microcamera aperture scale in monocentric gigapixel cameras[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(30): 5824~5833
- 12 E. J. Tremblay, D. L. Marks, D. J. Brady *et al.*. Design and scaling of monocentric multiscale imagers[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(20): 4691~4702
- 13 B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish *et al.*. High performance imaging using large camera arrays[J]. *ACM Trans. Graphics*, 2005, **24**(3): 765~776

- 14 Nie Yunfeng, Xiangli Bin, Zhou Zhiliang. Advances in light field photography technique[J]. *J. Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2011, **28**(5): 563~572
聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, **28**(5): 563~572
- 15 R. Ng, M. Levoy, M. Bredif *et al.*. Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera[R]. Stanford: Stanford Computer Science Department, 2005
- 16 D. J. Brady, M. E. Gehm, R. A. Stack *et al.*. Multiscale gigapixel photography[J]. *Nature*, 2012, **486**(7403): 386~389
- 17 H. Son, D. L. Marks, E. J. Tremblay *et al.*. A multiscale, wide field, gigapixel camera [C]. Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging, 2011. JTuE2
- 18 D. L. Marks, D. J. Brady, E. J. Tremblay *et al.*. Optimizing microcamera aperture in gigapixel monocentric multiscale cameras[C]. Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging, 2011. JTuE3
- 19 Daniel L. Marks, David J. Brady. Close-up imaging using microcamera arrays for focal plane synthesis[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(3): 033205
- 20 D. L. Marks, H. S. Son, E. J. Tremblay *et al.*. Optical testing of the AWARE wide field 2-gigapixel multiscale camera [C]. Frontiers in Optics, 2011. FThR1
- 21 H. S. Son, D. L. Marks, J. Hahn *et al.*. Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(17): 16132~16138
- 22 The Duke Imaging and Spectroscopy Program. AWARE2 Multiscale Gigapixel Camera[EB/OL]. <http://disp.duke.edu/projects/AWARE/>. 2012