

文章编号 2095-1531(2014)06-0936-06

基于同心球透镜的四镜头探测器阵列拼接成像系统

徐明飞^{1,2}, 黄 玮^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了同时实现成像系统的大视场、长焦距和高分辨率,设计了基于同心球透镜的四镜头探测器阵列拼接成像系统。首先,阐述了四镜头探测器阵列拼接方案的原理;介绍了同心球透镜的结构特点,阐述了其成像优点。然后,完成了满足实际拼接应用的同心球广角、长焦成像系统(拼接子系统)的光学设计。最后,给出了拼接子系统的像质评价并对其进行公差分析。结果表明:拼接后的系统可实现100 mm焦距和120°视场成像。该系统解决了大视场和长焦距之间的矛盾,可实现超高像素成像,相对于传统光电成像系统具有巨大的优势。

关键词:同心球透镜;探测器阵列;超高像素成像

中图分类号:V245.6; O439 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140706.0936

Detectors arrays mosaic imaging system based on four sets of monocentric lens

XU Ming-fei^{1,2}, HUANG Wei^{1*}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: huangw@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to achieve both wide field of angle and high resolution in one imaging device, we propose a method which combines detectors arrays mosaic technique and monocentric imaging lens. This paper first introduces the scheme of detectors mosaic of four lens systems, and next there is a thorough discussion of advantages by adopting monocentric objective lens. After that, a completed lens design prescription is presented as well as the related specifications. In the final part, evaluation of the imaging quality is discussed along with the tolerance sensitivity analysis. The finished system has 120° FOV and 100 mm focal length. As depicted, the contradiction between wide field of angle and long-focus has been figured out excellently by the monocentric mosaic imaging system which can complete ultra-high resolution imaging and has great advantage compared with other imaging devices.

Key words: monocentric lens; sensors arrays; ultra-high resolution imaging

1 引言

收集尽可能多的信息和记录尽可能详细的细节是光电成像系统从诞生以来一直追求的目标。然而在传统光学系统中,大视场和长焦距是一对矛盾参数,二者相互制约。例如,鱼镜头可实现超大视场的成像,但它的焦距仅有几毫米^[1];离轴三反系统焦距可超过1 m,但它的视场仅有几度^[2-3]。此外,由于受到良率和成本的限制,绝大部分的商用探测器只能停留在几百万像素到几千万像素的量级。为了实现几亿甚至几十亿像素成像,需要通过拼接成像的方法。实现更高像素以期在更大视场获得更高分辨能力的探测成像技术已成为国内外近年来研究的热点。

在美国国防部先进项目研究局(DARPA)的资助下,DUKE大学David Brady教授领导团队成功研制了AWARE-2超高像素瞬态成像系统。该成像系统由一个同心球透镜和98个微相机组成,系统每秒可以获得10帧十亿像素的图像;系统水平视场为120°,垂直视场为50°,焦距为35 mm,可以清晰分辨1 km外的人脸。2012年6月,《Nature》报道了该项目的相关成果。同时,该项目组成员发表了相关文章详述了该技术的实现^[4-6]。史光辉等人对该技术进行了进一步研究,将其用于电视摄像光学系统^[7]。

ARGUS-IS(Autonomous Real-time Ground Ubiquitous Surveillance-Imaging System)是DARPA主持研发的另一个高像素成像系统^[8]。该系统主要应用于航空侦察,视场角为60°,在6 000 m高空可对地面40 km²的面积进行监测,地面像元分辨率(GSD)为15 cm。该系统使用的拼接方式是基于4个相同成像系统的探测器阵列拼接法。事实上,早在2007年浙江大学就该拼接方案进行过研究并获得了国家发明专利^[9]。

综合前人所做的研究成果并对其改进,本文提出了基于同心球透镜的四镜头探测器阵列拼接成像系统设计方案。文献[6]所提出的拼接方案是所有探测器都处于同一平面,在此条件下,若想同时实现大视场和长焦距,则拼接子系统的光学设计具有极大的难度。因此,将拼接方案改进为

所有探测器位于球面像面上,即拼接子系统像面为球面。同时,借鉴AWARE-2中同心球透镜无轴外像差的优点,并对其做出一些改进,单独使用同心球透镜作为拼接子系统,极大降低了光学系统的复杂度。

2 四镜头探测器阵列图像拼接原理

整个系统由4个完全相同的子成像系统以光轴平行的方式并列组成,每个子成像系统都将无穷远目标成像于曲面像面上,4个拼接子系统所获得的像面完全一致;然后每个拼接子系统的像面上都对应一组以近似棋盘状分布的探测器阵列,4组探测器阵列位置互补且所成图像有一定的重叠区域;通过后续图像处理,将4组位置互补的图像阵列进行拼接合成,可以获得大视场的无缝图像,拼接原理图见图1。该拼接方案可实现几十个甚至几百个探测器拼接,实现超高分辨率成像。

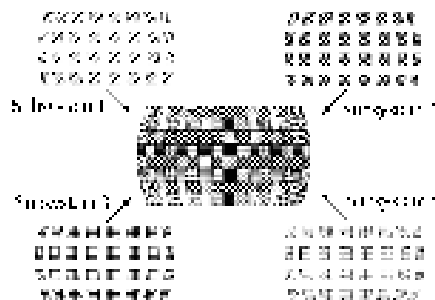


图1 图像拼接原理图

Fig. 1 Principle of the image mosaic

该拼接方案的原理是基于4个拼接子系统的像面完全一致,因此拼接系统仅适用于对无穷远目标或近似无穷远目标成像,否则不利于后续图像拼接处理。

3 拼接子系统的光学设计

3.1 同心球透镜

同心球透镜是由多个球壳状透镜组成,球透镜的每个球面的球心都互相重合;其像面也是球面且与球透镜同心;光阑设置在通过球心的平面

上,如图2所示。该条件下,透镜就可以被看成为一个无光轴系统,即每一条通过球心的直线皆可看作是透镜的光轴。同心球透镜的主要优点是,球面像面上仅有球差和轴向色差以及它们的组合像差(如色球差),无任何轴外像差。因此,在光学设计过程中球透镜容易实现较高的成像质量。此外,该系统不同视场的子午方向相对孔径不同,其分布和视场角的余弦成正比关系。



图2 同心球透镜二维图

Fig.2 Layout of the monocentric lens

3.2 拼接子系统的优化设计

现阶段商业探测器均是平面探测器,若想在球面像面上拼接平面探测器则必须在单个探测器所承担的视场内校正场曲。根据初级像差理论,系统的赛德尔和如式(1)所示,分别表征系统的初级球差、初级慧差、初级像散、匹兹凡场曲和初级畸变^[10]。

在薄透镜系统中,其中匹兹凡和可变换为以光焦度表示的简单形式,见式(2)。

故对于 $\varphi_{total} \neq 0$ 的密接薄透镜组的匹兹凡和

总不为零,只有采用正负透镜分离的方式才能校正场曲。在本设计中,在像面附近设置一片弯月厚透镜来校正场曲(弯月厚透镜可看作是一片正透镜、一片负透镜和一片平板玻璃)。在系统中增加一片弯月透镜作为场镜会增加系统的其他轴外像差,其中倍率色差最难以校正。式(3)给出了密接薄透镜系统的初级倍率色差系数。

$$\begin{cases} \sum S_I = \sum lumi(i - i')(i' - u) \\ \sum S_{II} = \sum S_I \frac{i_p}{i} \\ \sum S_{III} = \sum S_{II} \frac{i_p}{i} = \sum S_I \left(\frac{i_p}{i}\right)^2, (1) \\ \sum S_{IV} = J^2 \sum \frac{n' - n}{n'nr} \\ \sum S_V = \sum (S_{III} + S_{IV}) \frac{i_p}{i} \end{cases}$$

$$\sum S_{IV} = J^2 \sum \frac{n - 1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = J^2 \sum \frac{\varphi}{n}, (2)$$

$$\sum C_\omega = hh_p \sum \frac{\varphi}{v}. (3)$$

根据式(3),为了消除色差,可在弯月透镜中增加一个等折射率,不等阿贝数的胶合面,而该胶合面几乎不会增加其他单色像差。

此外,根据式(1)中第一赛德尔和数,为了尽可能减小系统球差,在第一片透镜和第二片透镜之间保留一个较小的空气间隔来改变这两个表面光线的入射角。

根据上述对拼接子系统结构的分析,应用Code V光学设计软件完成了系统的光学设计。

表1 拼接子系统的结构参数

Tab.1 Lens data of the subsystem

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Aperture/mm	Comments
Object	Infinity	Infinity	Air	—	Object position
1	41.894 0	17.222 6	HAK7 ($n = 1.713, v = 53.8$)	80.1	
2	24.671 4	0.206 3	Air	48.1	
3	24.465 0	24.465 0	HFK61 ($n = 1.497, v = 81.6$)	47.8	Internal sphere
Stop	Infinity	24.465 0	HFK61 ($n = 1.497, v = 81.6$)	24.8	Stop position
5	-24.465 0	18.143 4	HAK7 ($n = 1.713, v = 53.8$)	46.8	
6	-42.608 4	26.683 9	HAF4 ($n = 1.750, v = 35.0$)	78.9	
7	-69.292 3	33.442 5	Air	125.7	
8	22.929 0	4.720 5	HAF3 ($n = 1.744, v = 44.9$)	10.4	Field Lens
9	-26.720 0	1.676 9	HAF4 ($n = 1.750, v = 35.0$)	9.2	Field Lens
10	15.251 3	2.500 0	Air	8.3	
Image	Infinity	—	—	8.0	Image position

系统详细结构参数见表1,光学结构二维图见图3。该系统焦距为100 mm,相对孔径为 $F/2.8$,可观测超过 120° 的物方视场,工作波长为450~650 nm。

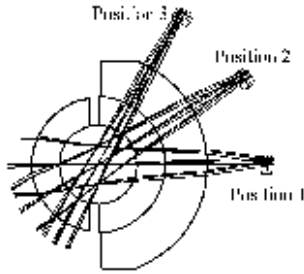


图3 拼接子系统二维图
Fig.3 Layout of the subsystem

系统中心球直径约为50 mm,材料选用HFK61。中心球在系统中承担正光焦度,选用该材料的原因主要有3个:

- (1)该材料的阿贝数较高,有利于校正色差;
- (2)该材料有反常色散,有利于校正二级光谱;
- (3)该材料折射率较低,更有利于降低整个球透镜的体积,进而降低成本、增大透过率。

系统中用于校正场曲的双胶合厚弯月透镜材料采用了HLAF3和HLAF4,二者折射率几乎相等,阿贝数相差约10,可以校正弯月透镜带来的倍率色差。该系统在像面8 mm口径范围内很好地校正了场曲。

系统的成像像素数可由式(4)近似获得。式中 NUM_{pixels} 为系统总像素数; R 为球面像面的半径; FOV 为系统的工作视场角; A_{pixel} 为所采用的探测器像元面积。

$$NUM_{pixels} = \frac{2\pi R^2 (1 - \cos \frac{FOV}{2})}{A_{pixel}} \quad (4)$$

该系统的球面像面半径为111.6 mm,视场角为 120° ,假设像元尺寸为 $2.8 \mu m$,将以上参数代入式(4)可得该系统可实现总像素数约为50亿。

3.3 像质评价

利用光学设计软件对拼接子系统的MTF、场曲、畸变等重要像质评价参数进行分析。图4为

同心球轴上探测器所承担视场的MTF图,图5为同心球轴外 60° 处探测器所承担视场MTF图。由于轴外探测器子午方向相对口径比弧矢方向相对口径小,故子午MTF截止频率比弧矢MTF截止频率低,但MTF均接近衍射极限,可以保证系统的成像质量。图6为系统的场曲、畸变图,从图中可以看出畸变小于1%,在可以接受范围之内。

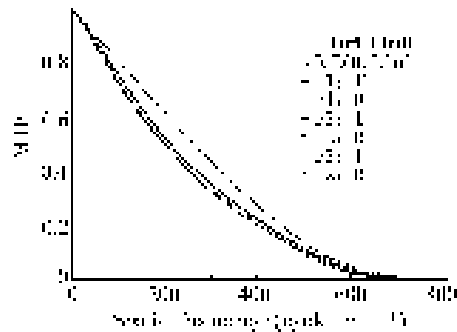


图4 系统处于位置1时的MTF
Fig.4 MTF of the system on position 1



图5 系统处于位置3时的MTF
Fig.5 MTF of the system on position 3

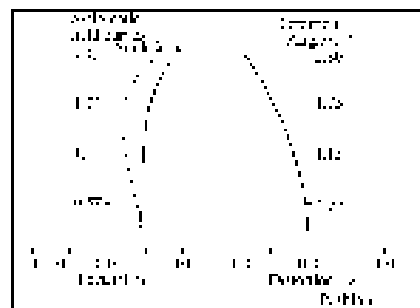


图6 系统的像散、畸变图
Fig.6 Field curve and distortion of the system

3.4 初步公差分析

光学系统的元件加工误差和系统装配误差都会导致像质劣化。在高精度的系统加工装配中,一般除了要保证加工和装调的公差,还要选择补偿器提高系统的工作性能,降低公差要求。系统元件的装调公差和加工公差如表2和表3所示。在本系统中元件1(第一片透镜)和元件2(四胶合元件)之间的空气间隙用来降低系统球差,对

系统成像质量影响较大,该间隔误差需控制在 $5\ \mu\text{m}$ 以内;元件1的偏心误差也应控制在 $5\ \mu\text{m}$ 以内,故在系统装较过程中需要高精度定心,才能保证其精度。在所有元件加工公差中,元件1的加工公差最为严格。图7和图8为该系统公差分析结果。可见按上述公差标准,加工装调后系统成像质量依旧比较理想。

表2 装调公差

Tab.2 Alignment tolerances

Element	Airspace/mm	Tilt / (")	Decenter/mm
Element 1	0.005	120	0.005
Others	0.02 ~ 0.05	120	0.02 ~ 0.04

表3 加工公差

Tab.3 Manufacturing tolerances

Element	Fringe power/ λ	Surface irregular/ λ	Central thickness/mm	Wedge/mm
Element 1	2 ~ 4	0.5 ~ 1	0.01	0.01
Others	4 ~ 4	2 ~ 2	0.02 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05

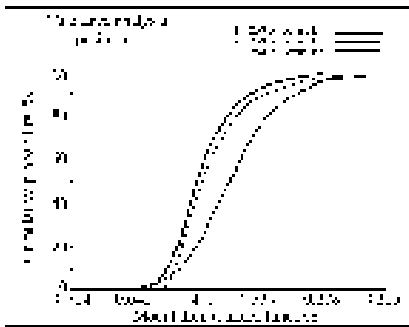


图7 系统处于位置1时的公差分析结果

Fig.7 Tolerance analysis of the system on position 1

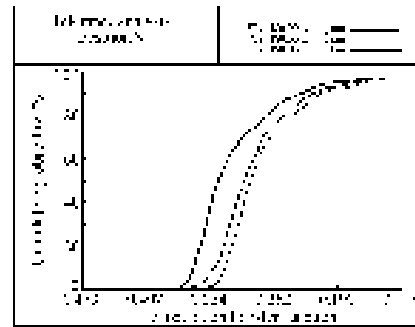


图8 系统处于位置3时的公差分析结果

Fig.8 Tolerance analysis of the system on position 3

4 结论

针对光电成像系统难以同时实现长焦距、大视场和高像素的问题,本文设计了一种基于同心球透镜的四镜头探测器阵列拼接成像系统。拼接

子系统结构简单,成像质量好,较易加工实现。拼接后的系统焦距达 $100\ \text{mm}$,可实现 120° 视场观测,成像像素可达50亿。这一技术在军事侦察、空中预警、航拍摄影等多个领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈琛,胡春海.球幕投影通用型变焦鱼镜头设计[J].光学精密工程,2013,21(2):323-335.
CHEN CH,HU CH H. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(2):323-335. (in Chinese)

- [2] 郭疆,孙继明,邵明东,等. 离轴三反航天测绘相机焦距的计算[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1754-1758.
GUO J,SUN J M,SHAO M D,*et al.*. Calculation of focal length for off-axis TMA aerospace mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(8):1754-1758. (in Chinese)
- [3] 龚大鹏,郭疆,王国良,等. 长焦距离轴三反测绘相机的外场立体成像[J]. 光学精密工程,2013,21(1):137-143.
GONG D P,GUO J,WANG G L,*et al.*. Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long focus off-axis three-mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(1):137-143. (in Chinese)
- [4] DANIEL L M,ERIC J T,JOSEPH E F,*et al.*. Microcamera aperture scale in monocentric gigapixel camera[J]. *Applied Optics*,2011,50(30):5824-5833.
- [5] MARKS D L,SON H S,KIM J,*et al.*. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera[J]. *Optical Engineering*,2012,51(8):1-11.
- [6] TREMBLAY E J,MARKS D L,BRADY D J,*et al.*. Design and scaling of monocentric multiscale imagers[J]. *Applied Optics*,2012,51(20):4691-4702.
- [7] 史光辉,杨威. 用于图像拼接的电视摄像光学系统[J]. 中国光学,2014:2095-1531.
SHI G H,YANG W. Optical system used to compose images in television photograph[J]. *Chinese Optics*,2014:2095-1531. (in Chinese)
- [8] BRIAN L,JONATHAN E,JOHN A,*et al.*. Autonomous real-time ground ubiquitous surveillance-imaging system(ARGUS-IS)[J]. *SPIE*,2008,6981:69810H-1.
- [9] 冯华军,刘旭,刘承,等. 实现多 CCD 无缝拼接的光电系统:中国,200710069052.4[P],2007.
FENG H J,LIU X,LIU CH. A photoelectric system achieved by the stitch of multi-CCDs:China,200710069052.4[P],2007. (in Chinese)
- [10] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[D]. 杭州:浙江大学出版社,2003.
LI X T,CEN ZH F. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University Press,2003. (in Chinese)

作者简介:



徐明飞(1987—),男,吉林磐石人,博士研究生,2010年于天津大学获得学士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: stone870914@163.com



黄玮(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn