

同心结构的小型化超广角监控镜头设计

孟祥月¹, 王 洋^{1*}, 张 磊¹, 付跃刚¹, 顾志远², 吕耀文¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了满足监控镜头的小型化、高像质以及大视场的需求, 利用同心结构的同心透镜, 并依据曲面传感器的发展现状及趋势, 设计了一款同心结构的曲面像面监控镜头光学系统。该监控系统的全视场角可达到 140° , 有效焦距为 7.88 mm, F 数为 1.5, 系统总长 15.12 mm, 像素可达 1 100 万。设计结果表明, MTF 值在中心视场和 0.7 视场处均接近衍射极限, 在全视场处均大于 0.59; 各个视场的弥散斑半径均小于 $0.6\ \mu\text{m}$ 。相比于已有的监控镜头光学系统, 该设计在大视场范围内保证了优良的像质, 并且实现了小型化。

关键词: 光学设计; 监控镜头; 同心结构; 小型化; 超广角

中图分类号: TB811 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1218002

Design of miniaturization and super wide angle monitor lens based on monocentric lens

Meng Xiangyue¹, Wang Yang^{1*}, Zhang Lei¹, Fu Yuegang¹, Gu Zhiyuan², Lv Yaowen¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the requirement of miniaturization, high image quality and large field of view of monitor lens, based on the monocentric structure lens and the development of curved sensor, a curved surface image monitoring lens optical system was designed. The FOV of the monitoring optical system is 140° , the focal length is 7.88 mm, the F -number is 1.5, the total length is 15.12 mm, and the monitoring lens is up to 11-megapixel. The final design shows that the MTF value is closed to the diffraction limit in the central field of view and the 0.7 field of view, and is greater than 0.59 at the full field of view. The RMS radius of all fields of view are less than $0.6\ \mu\text{m}$. Compared with the existing monitoring lens optical system, this design achieves excellent image quality in a large field of view with a miniaturization structure.

Key words: optical design; monitor lens; monocentric structure; miniaturization; super wide angle

收稿日期: 2018-07-22; 修订日期: 2018-08-24

基金项目: 吉林省科学技术厅大型科学仪器共享共用(20150623024TC); 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20181113KJ, JJKH20181134KJ)

作者简介: 孟祥月(1990-), 女, 硕士生, 主要从事光学设计和光学装调方面的研究。Email: mengxiangyue1314@163.com

导师简介(通讯作者): 王洋(1986-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光学设计和光机结构设计等方面的研究。

Email: wangyang11.17@163.com

0 引言

随着信息技术的迅速发展,监控系统被广泛应用于军事以及民用领域,为保护国家及个人财产安全发挥着重要的作用^[1]。监控镜头是监控系统的重要组成部分,它将所拍摄的图像传输到图像传感器,再由图像传感器接收、处理。随着技术的发展,人们对监控系统技术不断探索的同时,对监控镜头的各方面性能的要求也在不断提高。参考文献[1]中,光学系统 F 数为 2.8,有效焦距为 5 mm,系统总长 13.16 mm,但全视场角只有 70° 。参考文献[2]中,系统焦距为 1.3 mm, F 数为 2,垂直全视场角为 185° ,系统总长为 17 mm,整个系统采用 7 组 8 片式结构,该设计的透镜片数较多,在导致成本较高的同时也不利于系统的装调。

同心透镜采用同心结构,不存在彗差等轴外像差,可应用于小型化、高像质以及大视场的光学系统,但是同心透镜的像面是曲面,在很大程度上限制了这一结构的应用^[3]。随着现代 CMOS 技术的迅速发展,曲面传感器成为目前的研究热点^[4]。佳能公司在 2016 年公开了一款全曲面传感器和一款边缘弯曲传感器^[5];2017 年索尼在日本公布了世界首款基于中画幅曲面传感器设计的镜头专利技术^[6]。随着曲面传感器技术的迅速发展,将其作为光学系统的探测器,可有效改善大视场光学系统的成像质量,降低光学镜头设计和制造的难度,有利于实现光学系统的小型化。

文中基于已有监控镜头的设计经验和应用需求,结合同心透镜的特点与曲面传感器的发展趋势,设计了一款小型化、高分辨率、 140° 大视场的曲面像面监控镜头。相比于目前已有的监控镜头,它的设计简单,像质优良,随着曲面传感器的发展与应用,该设计可满足监控领域对于大视场、高像质监控镜头的需求。

1 同心透镜

如果所有透镜折射面及像面具有相同的球心,并将孔径光阑设置在球心处,该系统即为同心结构,称之为同心透镜。由于近轴区的蓝光和红光焦点的离焦,同心透镜主要存在球差和轴向色差。同心透镜

的结构对称,不存在彗差等轴外像差,其成像视场仅受中央孔径光阑渐晕限制。同心透镜在增大视场的同时缩小了光学系统的结构尺寸,即保持高像质的同时实现了大视场和小型化。图 1 所示为一种典型的同心透镜。

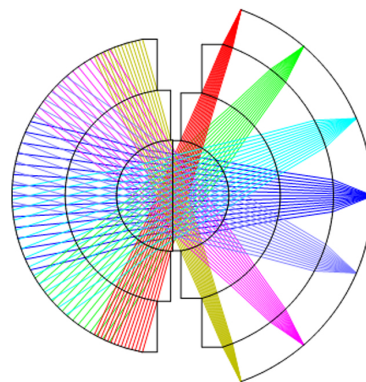


图 1 同心透镜

Fig.1 Monocentric lenses

为了解决同心透镜曲面像面的问题,2009 年,Krishnan 和 Nayar 设计了球形摄像机,提出了利用球透镜和球形传感器接收图像的无方向成像接收器的方案^[7];2010 年,Ford 和 Tremblay 提出了使用同心透镜作为目标多尺度成像系统,利用光纤束,采用拼接成像技术进行数字处理,形成最后的图像^[3]。图 2 为光纤束拼接成像示意图。

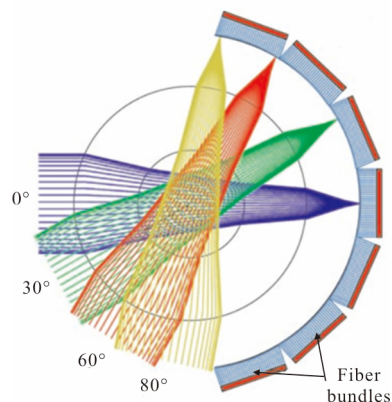


图 2 光纤束拼接成像

Fig.2 Imaging with optical fiber bundle

利用像面的拼接技术实现了曲面像面到平面像面的转变,但是也存在一定的弊端,比如光纤束拼接方案中光纤之间存在窜光现象,并且由于其拼接的复杂性,组装有一定难度。所以,如果能直接将曲面传感器应用于同心透镜系统,可有效提升大视

场光学系统的成像质量,并简化光学系统结构^[8]。

2 光学设计

2.1 监控镜头设计参数

结合同心透镜的特点及目前监控镜头的市场需求^[9-11],文中设计的曲面像面的监控镜头光学系统指标参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

Waveband/nm	Relative aperture	FOV/(°)	Focal length/mm	Total length/mm
486~656 (visible light)	1/1.5	140	<8	<15.5

该设计选用曲面传感器,目前平面 CMOS 的像元尺寸可达到 1.1 μm ,已有的曲面传感器像元大小和间距可达到 1.25 μm ^[12]。该设计的传感器的像元大小选取 4 μm ,根据参数要求及像元大小设计一款 1 100 万像素的监控镜头光学系统。

2.2 设计过程

2.2.1 初始结构

初始结构的合理选取有利于光学系统的后续优化设计。参考文献[7]中提到一款基于同心透镜的微型相机,设计波长为 480~1 000 nm, F 数为 1.7,焦距为 12 mm,系统总长小于 20 mm,将其作为该设计的初始结构,具体参数如表 2 所示。

表 2 初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters

Surface type	Radius	Thickness	Glass
OBJ	∞	∞	—
1	7.059 18	4.103 37	P-LASF547
2	2.955 81	2.955 81	K-GFK68
STO	∞	2.955 81	K-GFK68
4	-2.955 81	1.264 26	K-LASFN6
5	-4.220 07	0.335 76	—
6	-4.575 83	3.270 37	N-KZFS11
7	-7.846 20	4.145 01	—
IMA	-11.991 3	—	—

2.2.2 优化

在初始结构的基础上,利用 Zemax 软件进行优

化。优化过程如下:

(1) 设置同心透镜及变量。

(2) 限制透镜的厚度、焦距、系统总长、后截距、 F 数、波长范围等。

由于实际光学加工技术的限制,监控镜头透镜的材料厚度均设置为大于 1.5 mm。同心透镜的最后一个面的曲率半径即为整个系统的焦距。

(3) 在球心处设置孔径光阑。

中心球透镜可直接切出环形槽,槽内涂消光漆或置挡片,作为该系统的孔径光阑。

(4) 系统后接曲面传感器,后截距设置大于 1.3 mm。

(5) 在传感器附近加滤光片。

2.2.3 材料选取

对于材料的选取,首先尽量选用常用玻璃材料,便于加工,降低成本。其次,选用阿贝数相差较大的玻璃材料,以降低色散的影响。间隔较小的透镜之间采用光敏胶粘接的胶合面,便于加工生产。

2.3 设计结果分析

优化之后的结构如图 3 所示,系统由 6 片同心透镜组成,单个透镜的中心和边缘厚度均大于 1.5 mm,满足实际加工技术的要求。优化后的光学系统的详细结构参数如表 3 所示。

光学传递函数可用来评价光学系统的成像质量^[13]。根据奈奎斯特频率公式 $N = \frac{1}{2 \times \alpha}$ (α 为像元尺寸,该设计选取 4 μm),该监控镜头的奈奎斯特频率为 125 lp/mm,图 4 为该系统的 MTF 曲线图。由于轴

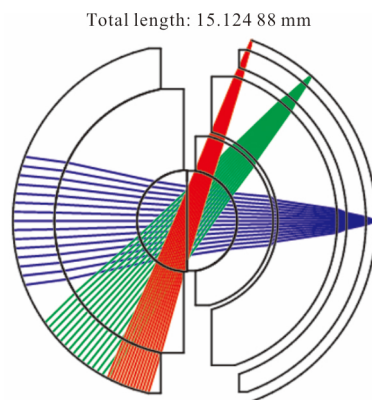


图 3 优化后的监控镜头结构

Fig.3 Monitor lens structure after optimization

表 3 优化后结构参数

Tab.3 Structural parameters after optimization

Surface type	Radius	Thickness	Glass
OBJ	∞	∞	—
1	7.247 963	1.725 487	H-QF8
2	5.522 477	0.005 000	1.59, 35.0
3	5.517 477	3.432 625	LASF35
4	2.084 851	0.005 000	1.59, 35.0
5	2.079 851	2.079 851	H-ZLAF68N
STO	∞	2.079 851	H-ZLAF68N
7	-2.079 851	0.005 000	1.59, 35.0
8	-2.084 851	1.500 175	LASF35
9	-3.585 026	0.190 042	—
10	-3.775 068	2.568 718	H-ZF72A
11	-6.243 786	0.400 000	—
12	-6.643 786	0.800 000	K9
13	-7.443 786	0.433 125	—
IMA	-7.876 912	—	—

外视场存在渐晕, 导致轴外视场的点扩散函数与轴上点不同, 进而引起轴外和轴上的 MTF 也不相同。设计结果表明, MTF 在中心视场和 0.7 视场接近衍射极限; 在全视场处均大于 0.59。

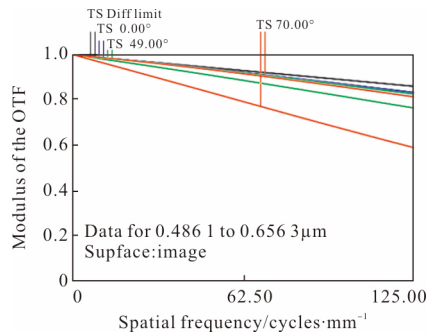
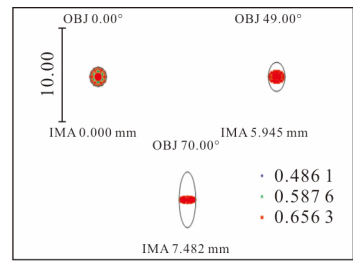


图 4 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves

图 5 为该设计的点列图, 由于同心透镜系统存在渐晕, 会导致艾里斑在渐晕方向拉长。从图 5 中可以看出, 各个视场的弥散斑半径均小于 0.6 μm , 满足设计要求。

如图 6 所示, 利用光线扇形图定量分析光线像差, 可以看出各个视场的像差都得到了很好的控制。



Spot diagram

Units are μm

Field: 1 2 3
 RMS radius: 0.571 0.454 0.464
 GEO radius: 1.027 1.027 1.024
 Airy diam: 2.148 Reference: chief ray

图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

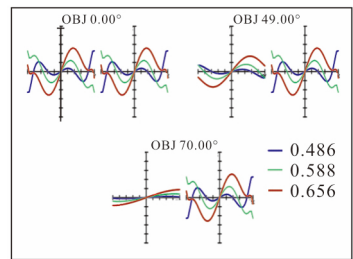
Maximum scale: $\pm 2.000 \mu\text{m}$

图 6 光线扇形图

Fig.6 Transverse ray fan plot

光学系统的渐晕主要是由于孔径光阑拦截轴外光束所产生。人像镜头在全视场 80% 处的渐晕系数应在 40% 以上^[14]。相对照度曲线图作为光学系统对渐晕的评判标准, 如图 7 所示, 在 56° 视场的相对照度为 56%, 在 70° 全视场的相对照度为 34%, 满足要求。

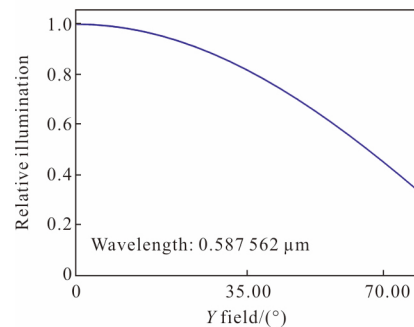


图 7 相对照度曲线

Fig.7 Relative illumination

3 公差分析

光学系统的设计需要满足实际的制造技术要求。利用 Zemax 软件做公差分析, 经过 MTF 值公差敏感度分析, 得到镜头各表面的曲率半径公差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$;

各表面的厚度公差为 ± 0.02 mm; 各表面的偏心公差为 ± 0.02 mm; 各表面的倾斜公差为 $\pm 0.1^\circ$; 元件的偏心公差为 ± 0.02 mm; 元件的倾斜公差为 $\pm 0.3^\circ$ 。该设计合理, 满足现有的实际加工水平。

4 结 论

文中通过对同心透镜的结构特性的分析, 结合曲面传感器发展现状及趋势, 设计了一款小型化、1 100 万像素、 140° 大视场的监控镜头。该监控镜头光学系统的具体设计参数: 有效焦距为 7.88 mm, F 数为 1.5, 系统总长为 15.12 mm。相比于现有的监控镜头光学系统, 该系统的结构紧凑, 设计简单, 并且透镜均为球面和平面设计, 在降低成本的同时便于制造加工及装调。利用 MTF、点列图、光线扇形图、相对照度图等常用的光学评价函数分析该监控镜头光学系统的成像质量, 各个指标实现良好。

随着曲面传感器技术的飞速发展与广泛应用, 该款同心结构的小型化、超广角监控镜头可直接应用于监控领域, 具有很大的行业发展前景。

参考文献:

- [1] Li Lijuan, Gao Yuhua, Lin Xuezhong, et al. Optical designing and optimizing technique on CCTV monitor lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 87-90. (in Chinese)
李丽娟, 高琨含, 林雪竹, 等. 闭路电视监控镜头光学设计及优化技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(4): 87-90.
- [2] Wang Bo. An optical design of 10 million pixel panoramic monitor lens[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(5): 434-440. (in Chinese)
王波. 1 000 万像素全景监控镜头的光学设计 [J]. 光学仪器, 2016, 38(5): 434-440.
- [3] Igor S, Ilya P A, Joseph E F. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7648-7661.
- [4] Delphine D, Manuel F, Nicolas B, et al. Curved focal plane detector array for wide field cameras [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5419-5424.
- [5] 新摄影. 佳能公布两款曲面传感器专利技术 [EB/OL]. (2016-11-30) [2018-07-22]. <http://www.nphoto.net/news/2016-11/30/716822455a505139.shtml>.
- [6] 新摄影. 索尼公布首款基于中画幅曲面传感器设计的镜头专利 [EB/OL]. (2017-07-21) [2018-07-22]. <http://digi.163.com/17/0721/22/CPTBJ9T8001680NE.html>.
- [7] Gurunandan K, Shree K N. Towards a true spherical camera [C]//SPIE, 2009, 7240: 724002.
- [8] Igor S, Ilya P A, Joseph E F. Optimization of high-performance monocentric lenses [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(34): 8287-8304.
- [9] Zhao Yingming, Yang Chunping, Yang Ruofu, et al. Design of CCTV lens with wide FOV and high resolution [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 168-171. (in Chinese)
赵英明, 杨春平, 杨若夫, 等. 宽视场高分辨率闭路监控系统监控镜头设计 [J]. 应用光学, 2016, 37(2): 168-171.
- [10] Lei Li, Zhang Chenzhong, Meng Junhe. Imaging optical system with wide field of view, fast aperture and large surface array CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 12-15. (in Chinese)
雷丽, 张晨钟, 孟军和. 大视场大相对孔径大面阵 CCD 成像光学系统设计研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 12-15.
- [11] Zhang Shanhua, Chen Huifang, Zhang Haiting, et al. Design of optical lens for traffic surveillance system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 87-90. (in Chinese)
张善华, 陈慧芳, 张海艇, 等. 用于交通监控系统的光学成像镜头的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 68-72.
- [12] Brian G, Neel J, Richard S, et al. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13010-13023.
- [13] Cong Haifang. Camera design of 4P slim 8 megapixel lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3993-3997. (in Chinese)
丛海芳. 4P 超薄 800 万像素镜头设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3993-3997.
- [14] 李士贤, 郑乐年. 光学设计手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 284.