

宽光谱日夜两用鱼眼监控镜头的设计

张继艳^{1,2}, 黄元庆², 熊飞兵¹, 孟宪国¹

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院 福建 厦门 361024; 2. 厦门大学物理与机电工程学院 福建 厦门 361000)

摘要: 设计了一款宽光谱日夜两用鱼眼监控镜头, 使用近红外 LED 光源照明及 IR-CUT 双滤光片, 近红外波长为 850 nm, 采用 Zemax 软件的多重配置结构设计, 使用固定焦距, 实现可见光和近红外光的共焦。对设计的光学系统结构和像差曲线进行分析, 设计全视场角和相对孔径分别为 175°和 1/1.8, 使用 1/3 in CCD 成像接收器件, 全视场 MTF 值在空间频率 100 lp/mm 处达到 0.3。

关键词: 光学设计; 超广角; 宽光谱; 鱼眼镜头

中图分类号: O439; TH74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.16

Design of a wide spectrum day and night fisheye CCTV lens

ZHANG Ji-yan^{1,2}, HUANG Yuan-qing², XIONG Fei-bing¹, MENG Xian-guo¹

(1. Ptoelectronics and Communication Engineering Institute of Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Physics and Mechanical and Electrical Engineering Institute of Xiamen University, Xiamen 361000, China)

Abstract: A day and night fisheye CCTV lens with wide spectrum is designed. The near-infrared LED light source is used to illuminate and the IR-CUT double filter is adopted. The near infrared wavelength is 850 nm. Using multi-configuration design of Zemax software, the confocal visible light and near-infrared light can be realized with a fixed focal length. The designed optical system structure and aberration curve are analyzed. The full field of view and relative aperture are 175° and 1/1.8 respectively, using 1/3 in CCD as image device. Full field of MTF value reached 0.3 in the spatial frequency of 100 lp/mm.

Key words: optical design; ultra-wide field of view; wide spectral; fisheye lens

1 引言

随着人们对安防领域的日渐重视, 人们不满足于只在白天进行监控, 而是希望实现 24 小时全天监控, 日夜两用一体化摄像机所扮演的角色日益突出^[1]。不仅监狱、银行、金库、油库、军械库、档案馆、文物部门等重要部门采用, 而且也在民用监控系统中都被采用。居民小区、商用大楼等民用监控工程中也大量应用了日夜两用一体化摄像机。

随着传感器技术的不断发展, 市场上越来越追求使用 CCD(电荷耦合组件), CMOS(附加金属氧化物半导体组件) 作为图像传感器件。大角域范围覆盖、高信息量获取也一直是光学传感器研制不断追求的方向之一。由于耦合器件的尺寸受技术与工艺水平的限制, 器件尺寸大小是有限的, 所以只有让镜头的焦距很短才能够得到超广角半球空域的景象。

短焦距超广角镜头的光学设计是目前工业镜头设计的热点之一。短焦距超广角镜头广泛应用于自动化检测、高清安全监控等领域。鉴于日夜成像的监控需求, 需要短焦距超广角镜头带红外功能。

2 设计指标分析

目前超广角短焦距成像透镜的发展已相对成熟, 超广角短焦距成像物镜多采用鱼眼透镜成像, 鱼眼透镜是反远距结构形式, 前组是负透镜光组, 后组是正透镜光组结构^[2]。反远距结构的光路图如图 1

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11104234); 校级教改项目(No. JGZY201223) 资助。

作者简介: 张继艳(1977-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光学系统设计、大屏幕投影显示和颜色光学的研究。E-mail: yanjizhang@126.com

收稿日期: 2013-05-03; 修订日期: 2013-06-28

所示,大视场随之而产生的像差是轴外像差,由于视场角和相对口径均较大,所以鱼眼透镜中存在着轴外像差难以消除,边缘视场照度太低、优化中光线频繁溢出等问题。

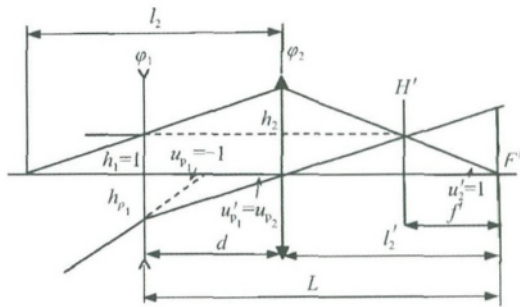


图 1 反远距型光学结构图

Fig. 1 Inverted telephoto optical structure

夜间的视频监控问题,在光线太暗时无法清晰地看清目标^[3-4]。为了解决这个问题,目前应用最广的是利用主动的红外照明光源来实现对监控目标的补光,以便达到摄像机的夜间监控要求。监控系统通过主动发出红外光线照亮物体,红外光的亮度决定了看清物体的程度。目前市面上有两种红外灯照明光源,一种是红外 LED 光照明,一种是红外激光照明。红外灯的光谱线,一种是有轻微红曝,波长是 850 nm,一种是无红曝,波长在 940 nm。在感光方面,同一款摄像机,850 nm 波长的感应度比在 940 nm 波长的感光度好 10 倍,所以 850 nm 这种有轻微红曝的红外灯拥有更高的效率,成为红外夜视监控的首选项。本次设计选用波长是 850 nm 的红外光波。

光学材料对不同波长所产生的光的折射率不同,必然使成像面产生色差,在宽光谱成像中尤其明显,不同波段的光成像在不同的焦面上,使最终的像面画面模糊。如果使用两路光学系统分别成像,势必导致频繁切换的麻烦,如果不手动调焦,又不能保证最佳的成像效果。

目前市面上的日夜两用镜头,不是真正的宽光谱共焦,而是利用短焦镜头,采用小的相对口径产生大的景深,使用时聚焦成像在白天和晚上焦面之间^[5],这样的成像效果不能保证在白天和夜晚都成像清晰。目前市场上监控镜头普通采用的是 F 数在 2.2 ~ 3 的透镜,夜间成像效果一般。小的相对口径也不能提供足够的亮度。普通镜头在夜间用近红外光的情况下,焦点位置会发生变化,使图像变模糊,要调整后看清楚。因为要夜间照明,红外照明光源的消耗功率越低越好,所以通常需要大相对口径的透镜。本次设计中监控镜头的 F 数是 1.8,可以极大地改善夜间成像的效果。

3 设计过程及结果

针对上述问题,采用市面上流行的短焦超广角鱼眼镜头^[6],在它的设计结构上考虑增加 IR 功能,使其在近红外光和可见光谱段焦点重合。设计采用的波段是可见光谱区(486 ~ 656 nm),近红外光谱采用无红曝的 850 nm 光波。照明部分采用欧司朗红外 IR Golden Dragon SFH 4232 光源,发出波长是 850 nm 近红外光。设计使用彩色 1/3 in Sony 低照度 CCD,采用现有专利中的短焦超广角鱼眼镜头结构。由于是日夜两用,需要使用 IR - CUT 双滤光片。光学系统结构参数见下表 1。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 The optical system parameters

Parameter	Value
Wavelength/nm	486 ~ 656 850
Focal length/mm	2
Field of view/(°)	175
Image size/mm	3.6 × 4.8
$F/\#$	1.8
Back focal distance/mm	>4.8
MTF of all fields (100lp/mm)	>0.3

通过查找美国专利库,得到一个类似的初始结构,专利号是 3230826,该专利的初始结构参数如表 2 所示,初始结构的 layout 如图 2 所示。

表 2 初始结构数据表

Tab. 2 Lens data of initial structure

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass
0*	Standard		Infinity	Infinity	
1*	Standard		3199.92021606	31.982476908	1.61,58.0
2*	Standard		351.452613383	132.334051933	
3*	Standard		959.990771202	21.286697745	1.61,58.0
4*	Standard		320.034512522	70.361449197	
5*	Standard		479.946860284	117.339889049	1.72,29.3
6*	Standard		-453.352179224	21.286697745	1.61,58.0
7*	Standard		219.29421494	503.435444704	
8*	Standard		Infinity	38.281160828	1.61,38.0
9*	Standard		-405.284045090	0.524302900	
10*	Standard		435.381161147	56.414992054	1.61,58.0
11*	Standard		-281.970129285	20.972116085	1.72,29.3
12*	Standard		Infinity	31.458174098	
13*	Standard		Infinity	178.262860444	
14*	Standard		Infinity	12.478409023	1.72,29.3
15*	Standard		211.398926051	67.844795277	1.61,58.0
16*	Standard		-587.219404548	0.524302900	
17*	Standard		279.663173674	39.427578090	1.61,58.0
18*	Standard		628.219425581	218.749009841	
19*	Standard		Infinity	-	

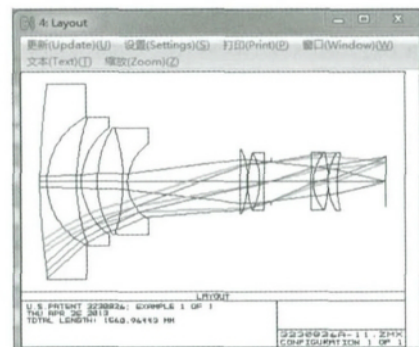


图 2 初始结构的 layout

Fig. 2 layout of initial structure

专利的焦距是 100 mm, F 数是 2, 视场角是 160°。首先把专利的玻璃换成成都光明产的国产玻璃。波长 0.7 ~ 2.5 μm 的近红外光谱区, 可以使用普通玻璃^[7]。接下来将焦距进行缩放, 使 $f' = 2$ mm, 然后在优化中注意控制第一片的口径大小, 使第一片透镜的口径不致过大, 控制像面的半像高是 3 mm, 像面尺寸可以稍微大于半像高, 这样 CCD 就不会出现四角变暗的现象。优化时设置所有的曲率半径和厚度间隔为变量, 首先通过初步优化后得到比较稳定的结构。接下将 F 数减小为 1.8, 视场角逐渐加大到 175°, 控制后截距大于 4.8 mm。

由于专利是白天可见光波段的设计, 为了要实现日夜两用, 要加上 850 nm 近红外光。在设计中使用了 IR-CUT 双滤光片, IR-CUT 双滤光片由一个红外截止滤光片和一个全光谱光学玻璃构成, 当白天的光线充分时红外截止滤光片工作, CCD 还原出真实色彩, 当夜间光线不足时, 红外截止滤光片自动移开, 全光谱光学玻璃开始工作, 使 CCD 充分利用到所有光线, 从而大大提高红外性能。

之所以采用切换滤光片, 是因为白天自然光线中含有较多的红外成分, 当其进入 CCD 后会干扰色彩还原, 使得像面的颜色产生偏差, 色彩还原性较差。当夜间光线不足时, 红外截止滤光片自动移开, 全光谱光学玻璃开始工作, 使 CCD 充分利用到所有光线, 从而大大提高红外性能。这种方案得到的图像质量好。由于白天是可见光成像近红外光截止, 而夜晚是近红外光工作可见光截止, 所以设计的时候可见光和近红外光要分别设计, 使用 Zemax 软件中的多重结构设置就可以实现分别设计。采用定焦距结构, 同样的结构分别适用于可见光和近红外光, 近红外光和可见光的焦点是一致的。

在优化的过程中, 随着视场的增大, 第二个表面极其敏感^[7], 极易出现光线溢出的现象, 不加控制会出现超半球的结果, 所以在软件设计中采用约束条件来限制第二个表现出现超半球。

在原有结构的基础上增加一片 IR-CUT 双滤光片, 滤光片的厚度是 0.35 mm, 最终设计的系统总长是 33 mm, 焦距是 2 mm, 视场角是 175°, 后截距是 5.1 mm, 结构较为紧凑。

最终设计透镜系统的结构图如图 3 所示。

4 像差分析

设计后光学系统的传递函数如图 4、图 5 所示, 如图可知可见光波段轴上点在空间频率 100lp/mm 处的 MTF 达到 0.6, 全视场 100lp/mm 的 MTF 达到

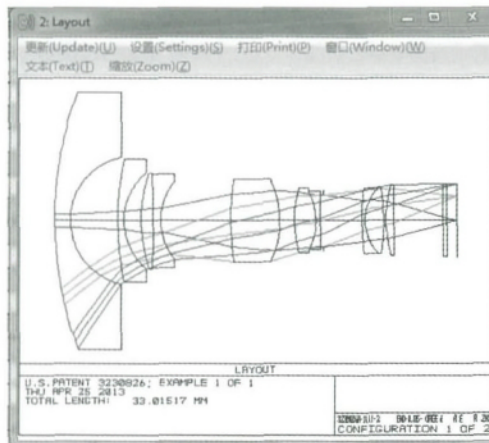


图 3 优化后的 layout

Fig. 3 The optimized layout

0.3 近红外光的轴上点在空间频率 100lp/mm 处的 MTF 达到 0.4, 全视场 100lp/mm 的 MTF 达到 0.25。从点列图中可以看出, 可见光波段各视场弥散圆半径 RMS 最大值是 4.8 μm , 近红外光各视场的弥散圆半径 RMS 最大值是 4.6 μm , 如图 6、图 7 所示, 均小于一个像元的尺寸, 以上指标均达到设计的要求。

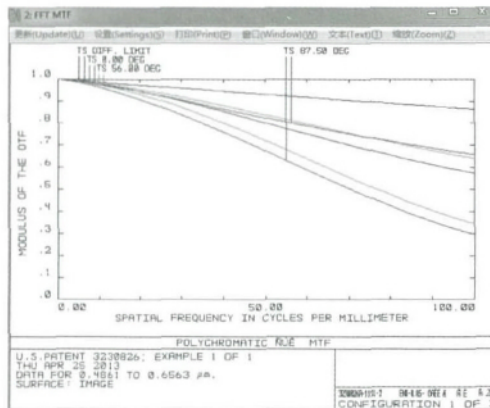


图 4 可见光的传递函数

Fig. 4 MTF of visible wavelength

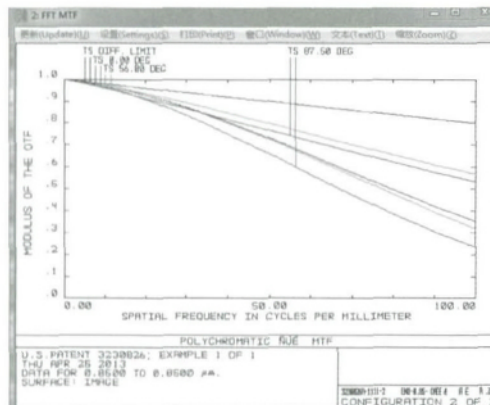


图 5 近红外光波的传递函数

Fig. 5 MTF of near-infrared wavelength

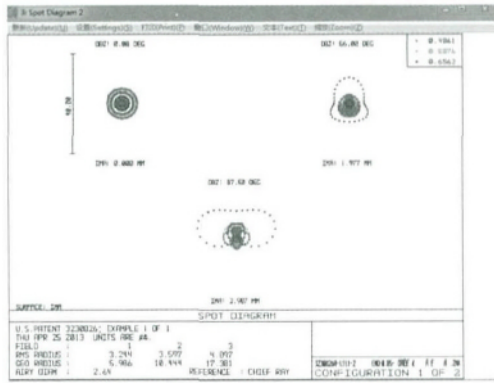


图6 可见光的点列图

Fig. 6 Spot diagram of visible wavelength

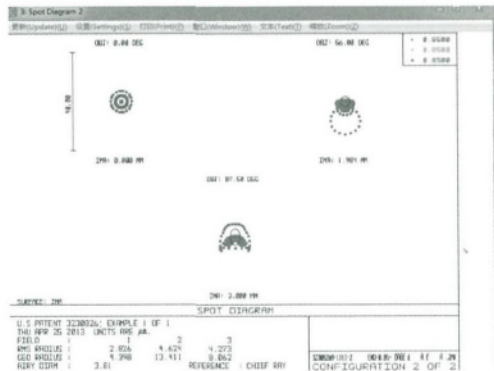


图7 近红外光波的点列图

Fig. 7 Spot diagram of near-infrared wavelength

宽光谱成像对像质色差影响尤其明显,在设计中有三组双胶合结构,双胶合结构可以很好地消除位置色差和球差,第二、四、七面提供了大量的负像散和正的畸变,为了消像散,第八、九片采用鼓形的凸透镜,提供了大量的正像散,和前面几片的负像散部分抵消,双胶合透镜中凸透镜使用低折射率低色散的冕牌玻璃,负透镜使用高折射率高色散的火石玻璃。随着视场的增加,垂轴色差也在增加,但是经过第一片和第二片负透镜后轴外视场的主光线和光轴的夹角明显的减小。系统的垂轴色差是对结构影响较大的一个像差,本设计的垂轴色差全视场最大是 $4.82 \mu\text{m}$,接近一个像元的大小,像质还是完善的。本设计也存在二级光谱由于系统的焦距不大,而二级光谱和焦距成正比 $\Delta L'_{FCD} = 0.00052 f'$,故二级光谱的大小对像质不会有太大的影响。

加入一个 0.35 mm 的滤波片,这个滤波片的作用是用来做 IR-CUT 切换的。平行平板的初级场曲系数为 0,所以不会引入场曲,由于厚度不大,会产生正的初级位置色差,对前面系统所产生的负的位置色差可以部分抵消,平行平板产生的负的垂轴色差量值很小,对结果影响不大。

5 结论

本文设计了一款通用的宽光谱日夜两用的鱼眼监控镜头,该镜头的相对孔径较大,视场角也较大,采用红色 LED 照明光源及 IR-CUT 双滤光片,通过 Zemax 多重配置结构设计,近红外光和可见光实现了共焦,使得系统无论在白天还是在夜间都成像清晰。该系统在全视场空间频率 100 lp/mm 处的 MTF 值达到 0.3,成像质量完全符合标准,该系统结构紧凑,个头较小,可以安装于隐蔽处,实现全天 24 小时监控任务。

参考文献:

- [1] Liu Xingwang. Application of day and night dual-use integrated cameras [J]. China's Public Security (market) 2007 5: 77-79. (in Chinese)
刘兴旺. 日夜两用一体化摄像机的应用 [J]. 中国公共安全(市场版) 2007 5: 77-79.
- [2] 王永仲. 鱼眼镜头光学 [M]. 北京: 科学出版社 2006.
- [3] Lu Ming, Li Liangyu, Wu Jian. A supervisory control device design based on infrared images with longer distance and higher resolving power [J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2005, 31(4): 565-569. (in Chinese)
陆明, 李良玉, 吴健. 一种远距离分辨率的红外成像监控系统的设计 [J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2005 31(4): 565-569.
- [4] Zhang Shanhu, Chen Huifang, Zhang Haiting, et al. Design of optical lens for traffic surveillance system [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2011 48(2): 1-5. (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): 1-5.
- [5] Zhuang Zhenfeng, Wang Min, Chen Rong. Design of a day and night video lens with wide spectral [J]. Optoelectronic Technique 2007 27(3): 171-173. (in Chinese)
庄振锋, 王敏, 陈荣. 宽光谱日夜两用摄像镜头的设计 [J]. 光电子技术 2007 27(3): 171-173.
- [6] Liang Jiawei, Luo Huachun, Yang Ming. Optical design of fish-eye lens used for monitoring system [J]. Optical Technology, 2011 37(6): 691-694. (in Chinese)
梁久伟, 罗春华, 杨铭. 用于监控系统的鱼眼镜头光学设计 [J]. 光学技术 2011 37(6): 691-694.
- [7] Milton Laikin. Lens design [M]. Beijing: China Machine Press 2009. (in Chinese)
Milton Laikin. 光学系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社 2009.