

单传感器全景与长焦组合光学系统设计

黄 治 白 剑 侯西云

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种基于全景环带透镜(PAL)的全景与长焦组合成像系统设计方法。该系统由沿光轴放置的反光镜单元、长焦单元与 PAL 单元组成。长焦单元通过二次成像的方式与 PAL 单元成像于同一传感器上,其像面利用了 PAL 单元中央的盲区。反光镜单元可绕光轴旋转与俯仰摆动,能将全景环带像面上的任意物点放大 10 倍。该系统在实现 360°全景探测的同时还能将重点区域实时放大,且只使用单一光学系统与传感器,弥补了 PAL 单元的盲区。此外该系统还可计算环带视场中物点与光学系统的距离。系统总长约 300 mm,最大口径为 160 mm, PAL 单元视场角为 $360^\circ \times (30^\circ \sim 100^\circ)$,长焦单元视场角为 $\pm 3^\circ$,两单元全视场在 100 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)值均高于 0.55。

关键词 几何光学;全景环带透镜;二次成像;无盲区;测距

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422006

Design of Combination of Panoramic and Long Focal Length Optical System with Single Sensor

Huang Zhi Bai Jian Hou Xiyun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel combination of panoramic and long focal length optical system with single sensor based on panoramic annular lens (PAL) is introduced. The proposed system consists of rotating mirror unit, coaxial long focal length unit and PAL unit. The long focal length unit images on the imaging plane of PAL unit by secondary imaging using the blind area of PAL unit's imaging plane. A mirror is above the long focal length unit which can rotate round about the optical axis and horizontal axis. The object in the ring imaging plane can be amplified 10 times. This system can get panoramic image and amplify image at the same time with the same sensor. The pixels in the inevitable blind area are used. Besides, the distance of the object in the ring imaging can be calculated. The system's length is about 300 mm and diameter is 160 mm. The field of PAL unit is $360^\circ \times (30^\circ \sim 100^\circ)$. The field of the long focal length unit is $\pm 3^\circ$. The modulation transfer function (MTF) of both units is higher than 0.55 at 100 lp/mm in all fields.

Key words geometric optics; panoramic annular lens; secondary imaging; no blind area; ranging finder

OCIS codes 080.3620; 110.2970; 220.3620

1 引 言

全景光学系统能获得超过 180°的宽阔视场,已被广泛应用于安防、机器人视觉、智能导航和军事等方面^[1~5]。目前报道的实现全景观测的光学系统方案较多,如鱼镜头就是一种纯折射式的全景光学系统^[6],其优点在于视场无盲区且设计方法简单,缺点

是边缘视场存在极大的正畸变,位于此区域的物体分辨率较低,且其第一片弯月形镜片的体积和重量会随着视场的增大而急剧增加。折反射环带成像系统是另一种能实现全景观测的光学系统,它采用反射镜与普通镜头组合的结构^[7],其优点在于结构形式简单,缺点是存在中央盲区,反射镜体积较大、面形复杂,装

收稿日期: 2012-11-28; **收到修改稿日期**: 2012-12-21

作者简介: 黄 治(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计与照明系统设计等方面的研究。

E-mail: jhhz2314@zju.edu.cn

导师简介: 白 剑(1967—),男,博士,教授,主要从事光学相位检测方面的研究。E-mail: bai@zju.edu.cn(通信联系人)

配公差严格。全景环带透镜(PAL)也是一种能实现全景观测的光学系统,其优点在于在保持较小体积的情况下能获得极大视场角^[8~10], $f-\theta$ 畸变很小,不需要复杂面形,缺点是存在中央盲区。由于其特殊的成像光路限制,盲区无法消除而只能相对缩小。

从几何光学原理可知,一般光学系统的半像高是视场角的正切值与焦距的乘积,因此在传感器尺寸固定的情况下,焦距越短视场角越大,焦距越长则视场角越小。全景光学系统的焦距很短,可实现大范围的全局观测;长焦光学系统焦距较长,可实现重点目标的局部观测。非变焦的光学系统只能实现大视场总体观测与小视场细节观测中的一种功能。若要同时实现这两个目标,传统的实现方法之一是同时使用全景与长焦两套光学系统,在全景光学系统中发现重要目标后控制长焦光学系统转向目标所对应的区域,其缺点是会导致系统总体积的增加与控制系统的复杂化;另一种方式是取消长焦系统,而是使用更复杂的全景光学系统与尺寸更大或像元更小的传感器,借助高分辨率获得环带上物体的细节,缺点是对全景光学系统的设计要求更高,系统的体积与重量也会更大,且放大率有限。此外获取数据量的急剧增大导致显示的帧频难以提高。

本文介绍了一种基于PAL的单传感器全景与长焦组合的光学系统。系统由反光镜单元、长焦单元和PAL单元组成,采用二次成像的方式将PAL单元和长焦单元同时清晰成像于单一传感器上^[11]。长焦单元的像面刚好覆盖PAL单元像面的盲区,利用了原先处于盲区的像素。系统使用时垂直于地面放置,长焦单元上方的反光镜单元可绕光轴作 360° 旋转与俯仰摆动,可将环带中的重点局部区域置于盲区中央,反光镜的二维旋转通过步进电机精确控制。通过单一的光学系统同时实现了原本矛盾的大视场总体观测与小视场细节放大。与采用全景与长焦两套独立光学系统的方式相比,结构更为紧凑,像素利用率更高;与采用复杂全景系统与高像素传感器的方式相比,该系统体积与重量更小,放大率更高,且不需采用过高像素传感器,观测的实时性更好。除上述功能以外,本系统还可使用三角测量法实时地估算出目标相对于光学系统的距离,以及用于同时需要大范围观测与重点细节放大两种需求的领域,例如三维导航、全景监控和机器人视觉等。

2 系统成像原理与像面分布

单传感器全景与长焦组合光学系统的成像原理

图如图1所示。最上方的反光镜单元可绕光轴自由旋转,也可绕通过A点并垂直于纸面的轴作俯仰摆动;其下方是长焦单元与其附加镜组,它将远处物体成像于中间像面上,并起连接前后单元的作用;最下方的PAL单元可实现 360° 全景观测。与一般PAL透镜不同的是该方案采用的PAL透镜的前方反射面为环状镀反射膜,中央区域镀透射膜。物方一点P发出两条光线,一条光线沿路径1从PAL折射面1折射进入PAL单元,与光轴交于B点,随后经PAL的反射面2与反射面1依次反射后离开PAL单元,进入PAL的后继转向透镜,最终成像在像面上的 P_1 位置;另一条光线沿路径2入射,与反射镜单元交于A点后,反射并向下依次通过长焦单元与附加镜组,成像于虚拟中间像面上的 P' 位置,然后从PAL的中央折射面折射进入PAL单元,并从PAL的折射面2离开PAL单元,不接触PAL单元的反射面1和2,最后经过PAL后继转向透镜成像于同一像面上的 P_2 位置。

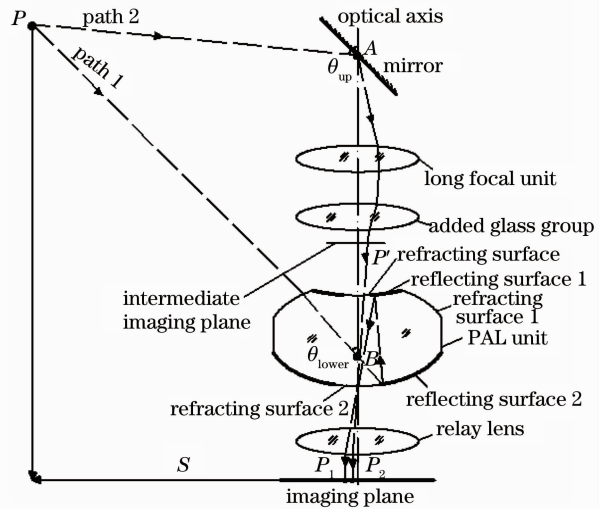


图1 全景长焦组合成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of combination of panoramic and long focal length optical system

图2为本系统环带成像区域与长焦成像区域的关系图。长焦单元的成像区域刚好与PAL单元成像区域的盲区重合。若物点P成像于环带像面的 P_1 位置,则可控制反射镜单元转向P所处的方位,使得在长焦成像区域中找到 P_1 放大的像 P_2 ,通过 P_2 可看清 P_1 的细节。

由于反射镜的旋转角度已知,且PAL单元和长焦单元分别符合 $f-\theta$ (像高为视场角正切值与焦距的乘积)与 $f-\tan \theta$ (像高为弧度制视场角与焦距的乘积)的投影关系,通过 P_1 和 P_2 距圆心的距离 r_1

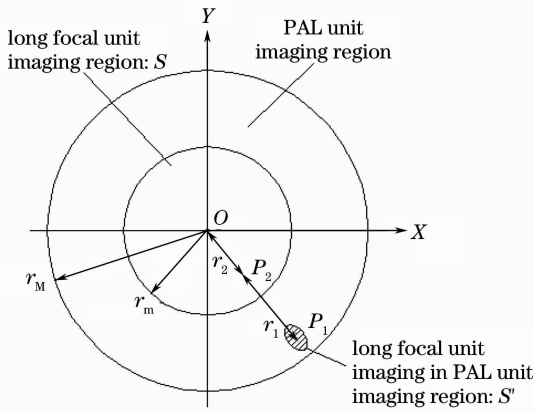


图 2 环带成像区域与长焦成像区域关系图
Fig. 2 Relationship of the panoramic and long focal length imaging planes

和 r_2 可计算出 P 点在长焦单元与全景单元中分别对应的视场角 θ_{up} 和 θ_{lower} 。图 1 中的 A 、 B 和 P 三点组成一个基线长度 AB 固定的三角形 $\triangle PAB$ ，通过简单的三角测量法即可计算 P 点与光轴的距离 S ，实现测距的功能。

3 长焦单元与全景环带透镜单元的连接方法

设计的难点在于将上下两个单元组合到一起后，使它们的像成在同一探测器上且保持清晰并不发生重叠。PAL 系统是一种存在较大入瞳漂移的光学系统^[12]，用光学软件优化单 PAL 系统速度缓慢，若采用多重结构同时设计两个单元则效率更低，且容易出现因入瞳寻找失败而导致优化出错的情况。组合两个独立光学系统一般可采用入瞳匹配和二次成像的方法，由于 PAL 系统的入瞳位于 PAL 透镜内部并且弯曲，无法匹配两个单元的入瞳，最终选择先独立设计全景单元与望远单元，再将两者组合到一起完成优化设计的方式。

图 3 所示的是典型的 PAL 部分结构。由于光线在进入 PAL 后经两次反射，因此 PAL 系统焦距为负。同方向的光束经折射面 1 折射进入 PAL，经反射面 2 反射后在区域 M 会聚，再被反射面 1 反射，最后经折射面 2 折射离开 PAL。 M 为弯曲的 PAL 内部中间像面。若将 M 经 S_2 镜成像到物方，则在区域 N 可获得 M 的虚拟像面，且 N 是环状弯曲的，这是因为大于 0° 的部分视场被 S_2 遮挡，此范围的光线无法经折射面 1 进入 PAL。若将 N 平滑延伸到光轴可获得圆形区域 H ，可推测处于 H 上的物体也可成像在像面上。实际上，只有反射面 1 中

位于 S_2 和 S_1 之间的环状区域用于反射，而 S_1 对光线的反射并无作用。如果 S_2 镀环状反射膜而 S_1 镀透射膜，整个 PAL 系统仍能正常工作，位于 H 上的物体将在 PAL 的盲区中成像。在设计过程中，首先设计 PAL 单元，控制 N 与 H 的位置与尺寸；再设计长焦单元，并使其像面刚好与 H 匹配；最后将前后单元组合优化。

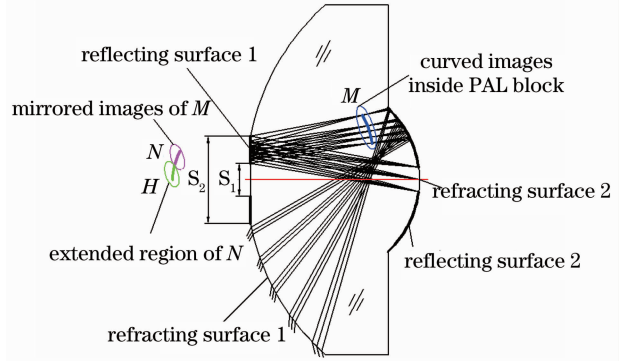


图 3 典型的 PAL 结构与中间成像面的确定方法
Fig. 3 A typical PAL block structure and the method to find the intermediate imaging area

4 设计过程

系统采用 SVS-VISTEK 公司生产的 svsl6000 型全幅黑白探测器作为靶面，其分辨率为 $4872 \text{ pixel} \times 3248 \text{ pixel}$ ，像元直径为 $7.4 \mu\text{m}$ ；光谱范围为可见光波段；PAL 单元视场角为 $360^\circ \times (30^\circ \sim 100^\circ)$ ；长焦单元视场角为 $\pm 3^\circ$ ；反光镜可转动的俯仰角度为 $\pm 18^\circ$ ，绕轴旋转角度为 360° 。全景环带像面上所有的像点都能被长焦单元放大并成像于盲区中。

4.1 全景环带透镜单元设计

光学系统中下方的 PAL 单元采用三胶合结构，材料分别为 ZK3、ZF16 和 F1，可较好地校正色差^[10,13]，并简化后继转向透镜的结构。为保证长焦单元的通光量， S_1 区域要尽量扩大。系统焦距为 -8.4 mm ， F 数为 2.78，盲区直径约为 8.6 mm 。图 4(a)为其光学结构，系统总长约为 197 mm ，最大直径为 160 mm ，所有表面均为球面；系统的调制传递函数 (MTF) 如图 4(b) 所示， 100 lp/mm 位置处大部分视场的 MTF 值都高于 0.6。

4.2 全景环带透镜单元反向设计

将 4.1 节中设计的 PAL 单元倒置形成一个物像共轭的光学系统，如图 5 所示。为保证 PAL 单元与长焦单元顺利连接，加入了两个附加镜组，其作用包括使像方保持远心，易于连接前方长焦单元^[14]；

使 H 处的虚拟像面变得平坦,易于连接长焦单元;承担部分像差,使倒置系统的成像光斑不至于过大;缩小倒置系统的放大率(接近于 -1),防止长焦单元体积过大;矫正反向 PAL 单元的畸变,使之尽量符合 $f\text{-tan } \theta$ 投影关系;增加系统基线的长度,提高 P

点距离的提取精度。设计完成的倒置光学系统如图 5 所示,由于最后要组合优化,不需过度优化像质。附加镜组在后续步骤中可被部分移除以简化结构。最重要的是保持远心以及约为 -1 的放大率。

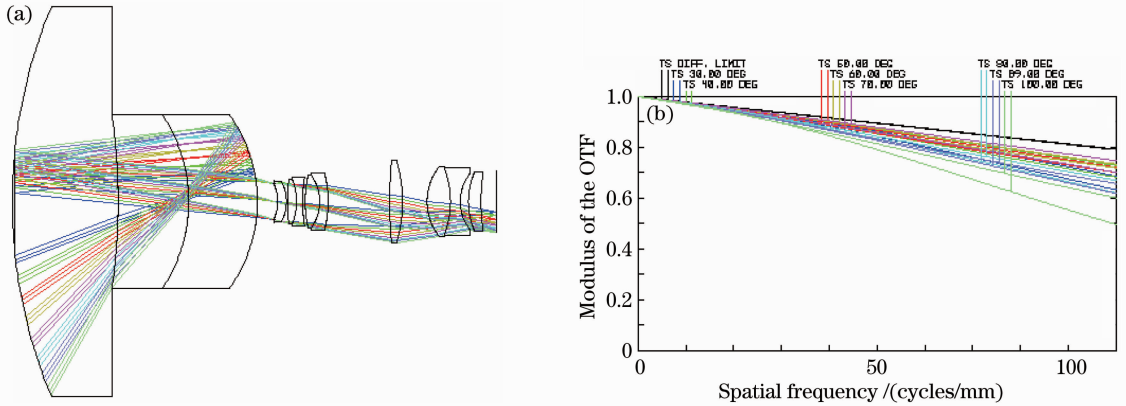


图 4 PAL 单元结构与像质。(a)光学结构;(b)在 100 lp/mm 处以 10° 为间隔的 $30^\circ\sim 100^\circ$ 视场的 MTF 曲线
Fig. 4 Structure and imaging quality of the PAL unit. (a) Optical structure; (b) MTF curves of $30^\circ\sim 100^\circ$ fields with 10° interval at 100 lp/mm

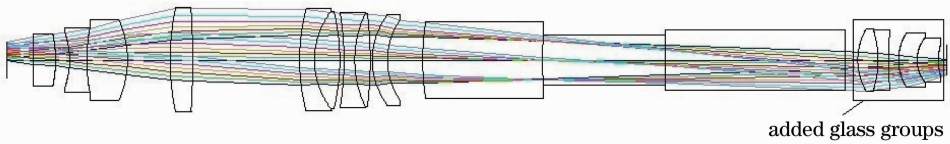


图 5 PAL 单元反向结构与附加镜组
Fig. 5 Reversing structure of PAL unit and the added glass groups

4.3 长焦单元设计

长焦单元的设计相对简单,主要目标是控制像高与区域 H 的尺寸匹配,同时保持物方远心,此外系统结构应尽量简单。由于需要和 PAL 单元组合优化,也不需要过度优化像质。其光学结构如图 6 所示,系统焦距为 80 mm, F 数约为 4,总长约为 80 mm,最大口径为 23 mm。系统的 MTF 曲线如图 6(b)所示,在

100 lp/mm 位置处大部分视场的 MTF 值都高于 0.6。

4.4 组合长焦单元与全景环带透镜单元

可先保持 PAL 单元结构不变而只优化长焦 PAL 单元与附加镜组,优化时可去掉中间像高与远心约束,此时需保持系统紧凑并适当减少长焦单元与附加镜组的镜片数量。由于中间像面依旧存在,为避免玻璃中的杂质成像于传感器上,应保持此位

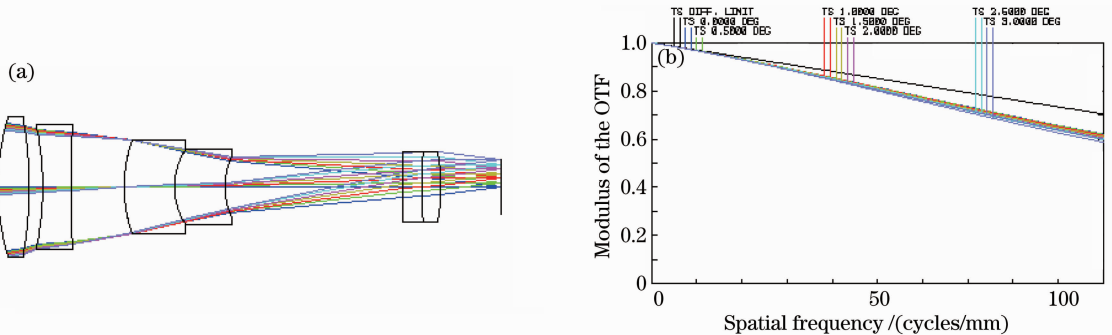


图 6 长焦单元结构与像质。(a)光学结构;(b)在 100 lp/mm 处以 0.5° 为间隔的 $0^\circ\sim 3^\circ$ 视场的 MTF 曲线
Fig. 6 Structure and imaging quality of the long focal length unit. (a) Optical structure; (b) MTF curves of $0^\circ\sim 3^\circ$ fields with 0.5° interval at 100 lp/mm

置在空气中,另一方面,为防止像面边界重叠,还应在此处加入视场光阑。完成这两个单元镜组优化后,再解除 PAL 单元的约束,进一步优化组合系统,最终的组合结构如图 7(a)所示,系统总长约为

305 mm,组合的长焦系统焦距为 80 mm, F 数约为 4,图 7(b)为组合后长焦系统的 MTF 曲线图,所有视场系统在 100 lp/mm 位置处的 MTF 值都在 0.55 以上。

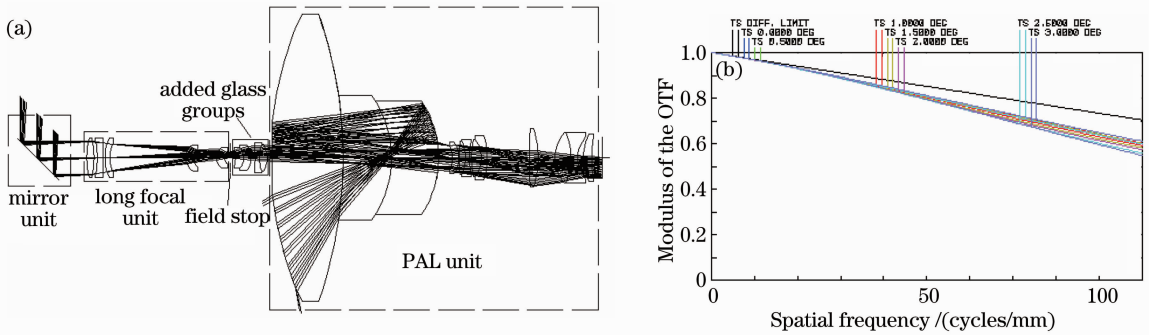


图 7 长焦单元与 PAL 单元组合结构。(a)光学结构;(b)在 100 lp/mm 处以 0.5° 为间隔的 $0^\circ\sim 3^\circ$ 视场的 MTF 曲线
Fig. 7 structure of combination system. (a) Optical structure, (b) MTF curves of $0^\circ\sim 3^\circ$ fields with 0.5° interval at 100 lp/mm

5 机械结构与控制

反光镜单元与长焦单元之间用 3 根强度较好的细支撑柱,长焦单元通过细支撑柱固定于 PAL 单元边缘,均会对环带视场有略微遮挡。反光镜通过两组步进电机分别控制绕轴转动与俯仰摆动,后续的单片软件编写将设计反馈控制,使两组电机能够迅速转到环带中点所在的区域。系统样机目前处于制作过程中。

6 结 论

提出了一种新型的基于 PAL 透镜的单传感器全景与长焦组合成像装置的设计方法。系统在普通 PAL 单元上方设置了长焦单元,并将 PAL 单元前部反光面环状区域镀反射膜,中间区域镀透射膜,使进入长焦单元的光线可穿过 PAL 单元成像于 PAL 环带像面无法避免的盲区中,能实时获取 PAL 环带像面上任意一点放大 10 倍的像。光学系统使用单一传感器即实现了全景观测和重要目标放大的双重功能,并提高了传感器的利用率,还可计算环带视场中物体与系统间的距离,并且较适用于全景监控、潜望镜系统等需要同时获取大视场与高分辨率的场合。此设计方法也可用于其他的 PAL 系统设计中,例如无盲区的 PAL 光学系统等。

参 考 文 献

1 M. A. Stedham, P. P. Banarjee. Panoramic annular lens attitude determination system (PALADS) [C]. *SPIE*, 1995, **2466**: 108~117

2 Cheryl D. Bankston. SEDS, earth, atmosphere, and space imaging system (SEASIS) [C]. *SPIE*, 1994, **2214**: 257~268

3 I. Kopilović, B. Vágvolgyi, T. Szirányi. Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks; surveillance and smoke detection [C]. 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000, **4**: 4714~4717

4 John A. Gibert, Donald R. Matthys, C. M. Lindner. Endoscopic inspection and measurement [C]. *SPIE*, 1992, **1771**: 106~112

5 Li Gang, Yan Zongqun, He Yongqiang *et al.*. Omnidirectional infrared multiple target processing system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 062201
李 刚, 闫宗群, 何永强 等. 全向凝视红外多目标处理系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 062201

6 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong *et al.*. Optical system design of space fisheye camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022004
闫阿奇, 杨建峰, 操剑中等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1022004

7 Xiang Zhiyu, Sun Bo. Mirror pose self-calibration method for catadioptric camera system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0415001
项志宇, 孙 波. 折反射全向相机镜面位姿的自标定方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0415001

8 V. A. Solomatin. A panoramic video camera [J]. *J. Opt. Technol.*, 2007, **74**(12): 106~112

9 Pal Greguss. Panoramic security [C]. *SPIE*, 1991, **1509**: 55~66

10 Bai Jian, Niu Shuang, Yang Guoguang *et al.*. Panoramic optical annular staring imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 331~335
白 剑, 牛 爽, 杨国光 等. 全景光学环带凝视成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(3): 331~335

11 Z. Huang, J. Bai, X. Y. Hou. Design of panoramic stereo imaging with single optical system [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(6): 6085~6096

12 H. R. Fallah, J. Maxwell. Higher order pupil aberrations in wide angle and panoramic optical systems [C]. *SPIE*, 1996, **2774**: 342~351

13 S. Niu, J. Bai, X. Y. Hou *et al.*. Design of a panoramic annular lens with a long focal length [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7850~7857

14 I. Powell. Design study of an infrared panoramic optical system [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(31): 6190~6194