

## 超大视场变焦仿生眼光学系统设计

程洪涛<sup>1</sup>, 吴勇翀<sup>2</sup>, 吕杰<sup>1</sup>, 张培茗<sup>1</sup>, 郭世俊<sup>1</sup>, 李恒宇<sup>3</sup>

(1. 上海健康医学院 医疗器械学院, 上海 200093; 2. 江西科技学院 继续教育学院, 江西 南昌 330098;  
3. 上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

**摘要:** 提出了一种新的基于仿生鱼镜头模型的超大视场变焦仿生眼光学系统。该仿生眼应用可调光焦度器件能使光学系统更紧凑和不需要移动。鉴于鱼眼系统可以简化成反远物镜的原理, 利用矩阵理论和变焦准则, 研究了基于可调光焦度器件鱼镜头设计的一阶几何光学理论, 得到了鱼眼前组和后组的光焦度控制方程; 进一步讨论了其光焦度的边界方程; 最后提供的仿生变焦鱼眼的视场角最大为  $164^\circ$ , 焦距从 5~15 mm 变化, 成像质量达到系统要求。设计实例为其在智能监控、航天军工、机器人系统等领域的应用提供了有益的探索。

**关键词:** 可调光焦度器件; 鱼镜头; 变焦系统; 仿生眼

**中图分类号:** TB133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0818004

## Design of hyper-field zoom bionic eye optical system

Cheng Hongtao<sup>1</sup>, Wu Yongchong<sup>2</sup>, Lv Jie<sup>1</sup>, Zhang Peiming<sup>1</sup>, Guo Shijun<sup>1</sup>, Li Hengyu<sup>3</sup>

(1. Department of Medical Engineering, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 200093, China;  
2. College of Continuing Education, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China;  
3. Department of Precise Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A new hyper-field zoom bionic eye optical system based on the model of bionic fisheye was presented. The variable focal power lens was employed to design the bionic eye with zoom system more compact and no move lens. The fisheye lens is a kind of retro-focus lens system. Fisheye zoom first-order geometric optics theory based on matrix theory and zoom principle were established. The former group and the latter group focusing optical power equation were deduced. Furthermore, the boundary equation of optical power in the zoom system was discussed. Finally, the bionic fisheye field can be acquire to  $164^\circ$ . The focal lengths was from 5 mm to 15 mm. The design example can be applied in intelligent control, aerospace industry, robotics systems which provide a useful exploration.

**Key words:** variable-focus lens; fisheye lens; zoom system; bionic eye

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61305106); 上海市自然科学基金(13ZR1454200);

浙江大学工业控制技术国家重点实验室开放课题(ICT1531); 2016 年“上海高校青年教师培养资助计划”

作者简介: 程洪涛(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: poyanglao@126.com

通讯作者: 李恒宇(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事仿生眼方面的研究。Email: lihengyu@i.shu.edu.cn

## 0 引言

仿生眼是模拟生物眼的视觉获得系统。为了扩大仿生眼观测范围,需要转动“眼球”才能在前向约更大范围内获取视觉信息,如想获得进一步的视觉信息,就必须摆头或转动仿生眼装置云台,以获得更大的视场<sup>[1-2]</sup>。然而这需要相应的机械云台装置与伺服控制系统,成本较高,整个系统具有较大体积及重量,同时会降低系统视觉信息的实时性。随着课题的研究深入,文中提出了基于鱼眼的大视场的仿生眼,应用鱼类仿生眼能够获得更大的视场信息,其不需要复杂的机械云台。

当前鱼眼光学系统研究大部分集中在定焦上<sup>[3-5]</sup>,另一方面为了实现仿生眼变焦的目的,无论是奥林巴斯公布鱼眼变焦镜头专利<sup>[6]</sup>,或是宾得公司发布了首款变焦鱼眼 DA 镜头,以及国内研究所提出的球幕投影通用型变焦鱼镜头设计结构<sup>[7]</sup>,变焦主要是依靠移动透镜组元来达到光学变焦,然而在特定场合下(如蟑螂机器人)机器视觉仿生眼中并没有太多空间来允许光学器件移动达到变焦的条件,因此传统的变焦仿生原理在仿生眼变焦设计中有着明显的不适。尽管国内外仿生鱼眼变焦成像技术的研究在不断深入,但研究工作大多停留在移动透镜组元。文中仿生眼的变焦主要是应用可调光焦度器件<sup>[8-9]</sup>,它可以改变透镜的形状来取得变焦效果,如人眼的晶状体一样,通过改变形状来变化能够完成其变焦的需求。相对于透镜位置的移动来获得变焦,围绕可调光焦度器件应用在机器视觉系统中的仿生眼中的鱼眼变焦系统展开讨论。这种变焦原理是基于可调光焦度器件的,其最大优点是能够提供额外的自由度给光学设计者,另外变焦光学系统能够更紧凑,使用不需要移动的光学器件。这就意味着不用昂贵的精密机械执行机构,导致光学系统设计的强鲁棒性,使机器人系统具有积极的视觉跟踪能力。

文中针对机器人仿生眼超大视场变焦仿生眼光学系统,讨论了不适合光学器件移动情况下达到变焦的设计理论问题。阐述了鱼镜头的光学原理,提出了基于可调光焦度器件设计鱼镜头变焦光学系统,并进行了一阶光学研究,最后根据得到的理论公

式并结合 CODV 软件优化出一组成像质量较为理想的超大视场变焦仿生眼光学系统设计实例。

## 1 超大视场变焦仿生眼机理

基于对图像信息量获取实时性的考虑,机器视觉系统中的光学系统要求有:(1)视场范围达到广角;(2)仿生眼能够实时、快速变焦。针对这两种需求,鱼眼变焦系统能够安全、无盲区地实施摄像、实时变焦记录。顾名思义,鱼镜头是仿造鱼眼的特点而来的仿生眼,似鱼眼向外凸出,所接收的景物像鱼由水中看水面的效果,其是一种具有大相对孔径、大视场和较长的后工作距离的反远物镜,它的视场角可以达到甚至超过 180°,这种镜头具有较大的视场范围,能够克服一般的仿生眼视场较小的弱点,增加视觉信息的获取范围,因此其在机器视觉仿生眼中有着广泛的应用前景。由鱼眼所呈现的特点,可以从反远物镜着手来分析鱼镜头的光学结构原理。反摄远物镜的结构形式与摄远物镜相反,可以看成前组为凹透镜、后组为凸透镜组成的光学系统,前组  $a$  和后组  $b$  为可调焦器件组的模型,等效为如图 1 所示的形式。

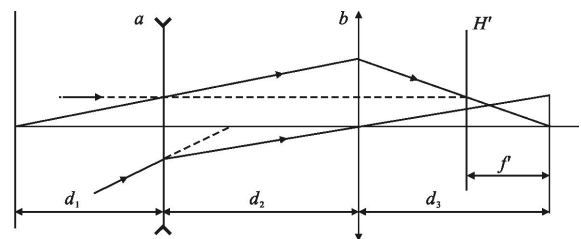


图 1 反远物镜光路图

Fig.1 Light-path diagram of retro-focus lens

物面到前组  $a$  的距离为  $d_1$ , 前组  $a$  到后组  $b$  的距离为  $d_2$ , 后组  $b$  到像面的距离为  $d_3$ 。根据鱼镜头等效光组是由前组和后组组成,把它进一步等效成由两个可调焦器件双组元组成的变焦系统,系统放大率为  $m$ 。 $d_1, d_2, d_3, m$  为已知。

根据高斯光学和矩阵光学理论<sup>[10]</sup>,图 1 的系统矩阵可以写成:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_b & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_a & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵相乘展开得到:

$$S = \begin{bmatrix} 1-d_2\phi_a & d_2 \\ d_2\phi_a\phi_b-\phi_a-\phi_b & 1-d_2\phi_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据系统矩阵的特点,可以得到系统的光焦度:

$$\phi = -S[2, 1] = \phi_a + \phi_b - d_2\phi_a\phi_b \quad (3)$$

考虑到有限物像距,由公式(2)和(3)可知:

$$m = [(d_2\phi_a\phi_b - \phi_a - \phi_b) \times d_1 + 1 - d_2\phi_b]^{-1} \quad (4)$$

$$d_3 = \frac{[m - (1 - d_2\phi_a)]}{d_2\phi_a\phi_b - \phi_a - \phi_b} \quad (5)$$

依据公式(4)、(5),有:

$$\phi_a = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + (d_1 + d_2)(m - 1)}{m d_1 d_2} \quad (6)$$

$$\phi_b = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_1(m - 1)}{d_2 d_3} \quad (7)$$

公式(6)和(7)可以写成:

$$\phi_a = \alpha + \beta \times \frac{1}{m} \quad (8)$$

$$\phi_b = \chi + \eta m \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}, \beta = \frac{d_3}{d_1 d_2} \\ \chi = \frac{d_2 + d_3}{d_2 d_3}, \eta = \frac{d_1}{d_2 d_3} \end{cases}$$

当  $m$  均匀改变时,  $\phi_a$  为  $\frac{1}{m}$  的一次函数,  $\phi_b$  为  $m$  的一次函数,公式(8)、(9)称为可调器件光焦度调焦方程。当  $m$  确定时,依据公式(8)和(9)的调焦方程就可以在规定的技术条件下计算  $\phi_a$ 、 $\phi_b$ 。公式(8)、(9)分别对  $m$  微分有:

$$\frac{d\phi_a}{dm} = -\frac{\beta}{m^2} \quad (10)$$

$$\frac{d\phi_b}{dm} = \eta \quad (11)$$

在光学系统变焦过程中,由公式(8)可知透镜  $a$  的光焦度是随着放大率曲线变化,由公式(9)可知透镜  $b$  的光焦度变化率为恒定值,公式(10)、(11)表明透镜  $a$ 、 $b$  光焦度的变化方向,其应用于控制方程光焦度变化要求,称为可调焦器件光焦度梯度变化控制方程,以上两式为设计变化的可调光焦度器件提供研究理论基础。考虑到系统中的光焦度变化梯度问题,联合公式(8)、(9)代入公式(3)并对其求导:

$$\frac{d\phi}{dm} = \frac{\beta(d_2\chi - 1)}{m^2} + \eta(1 - d_2\alpha) \quad (12)$$

由公式(12)可知系统中总的光焦度式变化梯度是  $1/m^2$  的函数,符合变焦距系统条件均匀改变系统的光焦度,公式(12)表示系统的光焦度和总的放大率变化过程。

对所有二组元系统都需要满足的条件是像面为实像,即光学系统总的光焦度大于零(即可以等效成凸透镜),成倒立的像,则有:

$$\begin{cases} \phi_{ob} > 0 \\ m < 0 \end{cases} \quad (13)$$

一般地,定义光学系统是自左向右,物面在左面,因此  $d_1 > 0$ ,同时代入公式(3)、(4),对公式(13)再进一步简化,有:

$$\begin{cases} \text{当 } d_2 = \frac{1}{\phi_b}, \phi_b > 0 \\ \text{当 } d_2\phi_b - 1 > 0, \phi_a < \min\left\{\frac{\phi_b}{d_2\phi_b - 1}, \frac{(d_1 + d_2)\phi_b - 1}{d_1(d_2\phi_b - 1)}\right\} \\ \text{当 } d_2\phi_b - 1 < 0, \phi_a > \max\left\{\frac{\phi_b}{d_2\phi_b - 1}, \frac{(d_1 + d_2)\phi_b - 1}{d_1(d_2\phi_b - 1)}\right\} \end{cases} \quad (14)$$

公式(14)表明,由可变光焦度器件组成二组元变焦距系统中透镜  $a$  的光焦度与透镜  $b$  的光焦度在满足公式(8)、(9)的等式下取值大小所要满足的约束条件,称为等效的双组元变焦距系统光焦度组元间控制方程的边界方程;其进一步明确了透镜  $a$  的光焦度与透镜  $b$  的光焦度取值边界关系,公式(14)是为了保证变焦距能成实像的约束不等式。以上部分依据变焦基本准则完成了基于可调焦器件的鱼眼变焦系统的一阶几何光学讨论,下文根据上述设计理论提出了基于可调焦器件的变焦鱼眼的仿生光学系统设计模型。给出了薄透镜理论下可调光焦度器件的变焦系统一阶几何光学预先设计计算过程,其可以提供给光学追迹程序 CODEV 来进行优化、变量选择、评价函数的发展和设计分析。该设计思想包括理解技术要求、选择合适的起点,阐述了仿生鱼眼变焦的一阶几何计算理论过程。

## 2 仿生变焦鱼眼的设计

### 2.1 初始结构选择

通过查阅镜头专利数据库 Lensview,仿生变焦鱼眼初始结构选择日本专利 JP47-42169,其镜头参数如表 1 所示,结构如图 2 所示。其有效焦距为 8.549 8 mm,视场角为 164°。

表 1 仿生变焦鱼眼初始结构镜头参数  
(专利 JP47-42169)

Tab.1 System parameters of bionic fisheye zoom primary structure (Patent JP47-42169)

Surface #	Surface type	Radius/mm	Thickness /mm	Glass
Object	Sphere	Infinity	Infinity	
1	Sphere	70.83	5.47	620 410.603 300
2	Sphere	27.35	25.24	
3	Sphere	91.43	3.42	620 410.603 300
4	Sphere	19.53	15.63	
5	Sphere	-56.37	1.95	620 140.635 200
6	Sphere	28.29	0.98	
7	Sphere	32.12	9.77	749 500.349 500
8	Sphere	-65.94	32.35	
Stop	Sphere	Infinity	0	
10	Sphere	39.07	8.79	487 490.704 100
11	Sphere	-39.07	3.91	
12	Sphere	86.63	4.88	788 470.504 800
13	Sphere	-86.63	26.7658	
Image	Sphere	Infinity	-1.9171	

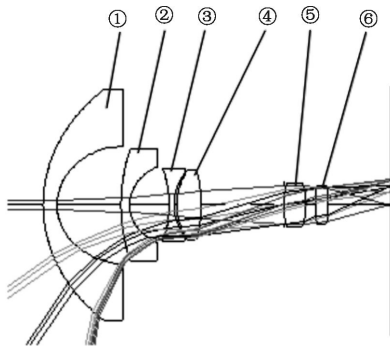


图 2 专利 JP47-42169 的结构图  
Fig.2 Structure diagram of patent JP47-42169

2.2 可调光焦度透镜的选择和控制方程

透镜单元①和②构成鱼眼镜头的前组，透镜单元③、④、⑤和⑥构成鱼眼镜头的后组；其中透镜②、⑤和⑥为可调焦透镜，透镜①、②、③、④、⑤和⑥的间隔分别为  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ ，光焦度分别为  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6$ 。则透镜①和②构成的前组等效光焦度方程为：

$$\phi_a = \phi_1 + \phi_2 - d_1 \phi_1 \phi_2 \quad (15)$$

透镜单元③、④、⑤和⑥构成鱼眼镜头后组，其系统矩阵为：

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_6 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据系统矩阵的性质和公式(16)，则鱼眼镜头后组等效光焦度方程为：

$$\phi_b = -S_2[2, 1] \quad (17)$$

因此，根据第 2 节得到的前组和后组光焦度控制理论方程(公式(15)、(17))并结合计算机编程得到光学系统结构的初始结果。

2.3 设计实例

该例初始结构设计是基于日本专利 JP47-42169 展开的，同时是根据已得到的前组和后组光焦度控制理论方程并结合光学系统优化技术得到的结果。应用 CodeV 对该系统优化，通过优化出二次曲面参数使物镜具有良好的像差校正。图 3 为仿生鱼眼系统光线近焦、中焦、远焦追迹图，系统波长选择为

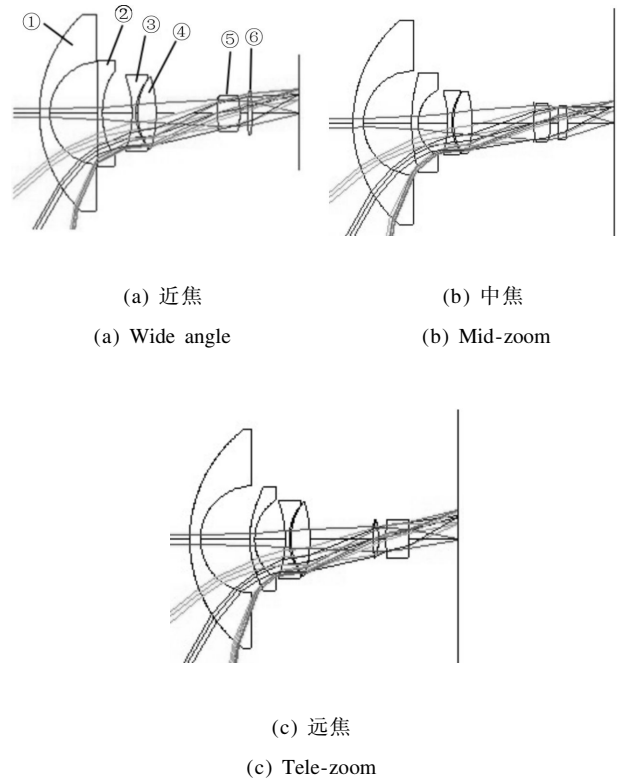


图 3 鱼眼镜头光线追迹图  
Fig.3 Ray tracing of fisheye lens

656 nm、546 nm 和 434 nm，系统焦距从 5~15 mm，仿生变焦鱼眼的视场角为 164°，表 2 为光学系统结构参数图，表 3 为变焦系统的参数，表 4 为设计结果。

最后通过点列图(图 4)评估设计结果,其描述了仿生眼的成像质量,可知设计结果的像质满足指标要求, RMS 在 100  $\mu\text{m}$  左右, 因此该设计实例符合机器视觉光学系统要求。

表 2 光学系统结构参数

Tab.2 Structure parameters of optical lens system

EPD/mm	OAL/mm	IMG DIS/mm
5.591 3	160.517	29.063 5

表 3 变焦系统的参数

Tab.3 Parameters of zoom lens system

$m$	$f'/\text{mm}$
-0.01	5
-0.02	10
-0.03	15

表 4 设计结果总结

Tab.4 Summary of design result

Surface #	Surface type	Radius /mm	$K$	Thick-ness/mm	Glass
Object	Sphere	Infinity		Infinity	
1	Sphere	82.8441		6.3978	620410.603300
2	Sphere	31.9891		29.5212	
		-10.4348	-9.2756e22	3	
3	Conic	106.9383	6.6994	4.001	620410.603300
		48.8332	3.5473	3	
		56.8609	2.4376		
4	Conic	22.8427	-0.2220	18.2812	
		28.7387	0.1603		
5	Sphere	-65.9314		2.2808	620140.635200
6	Sphere	33.0885		1.1462	
7	Sphere	37.5682		11.4272	749500.349500
8	Sphere	-77.1247		37.8372	
Stop	Sphere	Infinity		0	
		45.6992	-15.7287	13.9888	
10	Conic	45.6970	-4.6347	10.2810	487490.704100
		49.1580	-11.2087	3.1016	
		-45.6992	0.4609		
11	Conic	-45.6970	-1.6949	4.5732	
		-49.1580	0		
		99.4557	3.7770	3	
12	Conic	101.3241	15.9256	5.7077	788470.504800
		121.0959	17.8859	13.7872	
		-99.4557	5.5312		
13	Conic	-101.3241	14.4332	31.3058	
		-121.0959	0		
Image	Sphere	Infinity		-2.2423	

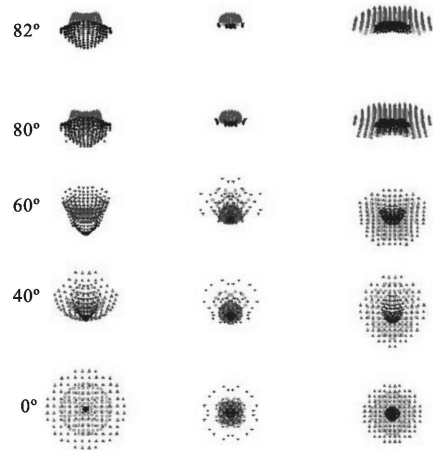


图 4 点列图

Fig.4 Spot diagram

在该节中提出了应用可调焦器件设计鱼眼变焦光学系统并基于 CodeV 进行了光学系统仿真,设计实例达到了鱼眼变焦系统的光学技术要求,其像质质量对于机器视觉仿生眼成像系统是足够的,证明了基于可调焦器件的变焦鱼眼镜头的仿生眼系统是可行的。

### 3 结论

文中设计了超大视场变焦仿生眼光学系统,其在机器人视觉系统领域有着重要的应用。基于矩阵光学理论,采用反远光学结构设计,同时融入可调光焦度器件构成变焦超大视场系统。为了达到变焦目的,选取光学系统的第二片、第五片、第六片透镜为可调光焦度器件,其余为传统透镜,进行了光学系统初始结构的选择和设计实例的优化验证,实验结果表明仿生变焦鱼眼的视场角最大为 164°,焦距从 5~15 mm 变化,成像质量达到系统要求。该结构形式是不需要机械移动的变焦仿生,变焦鱼眼镜头在机器视觉仿生眼系统中有着广泛应用,能够扩大机器视觉的视场大小,变焦能够更好地使仿生眼追踪和定位物体,实例为进一步增加机器视觉仿生眼的敏捷度提供了新的解决思路。

### 参考文献:

[1] Li H, Luo J, Huang C, et al. Design and control of 3-DoF spherical parallel mechanism robot eyes inspired by the binocular vestibule-ocular reflex[J]. *Journal of Intelligent &*

- Robotic Systems*, 2015, 78(3-4): 425-441.
- [2] Kim M D, Ueda J. Dynamics-based motion de-blurring for a PZT -driven, compliant camera orientation mechanism [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2015, 34(4-5): 653-673.
- [3] Yuan P, Hongtao C. Hyper-field of view monitoring optical system [C]//Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), IEEE, 2011, 4: 107-109.
- [4] Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, et al. Optical system design of space fisheye camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1022004. (in Chinese)  
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 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.
- [5] Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, et al. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222001. (in Chinese)  
张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222001.
- [6] Olympus Corporation. Fisheye zoom lens: Japan, 2012 - 194238[P]. 2012-10-11. (in Chinese)  
奥林巴斯株式会社. 鱼眼变焦镜头: 日本, 2012-194238 [P]. 2012-10-11.
- [7] Chen Chen, Hu Chunhai. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 323-335. (in Chinese)  
陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼眼镜头设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 323-335.
- [8] Watson A M, Dease K, Terrab S, et al. Focus-tunable low-power electrowetting lenses with thin parylene films [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6224-6229.
- [9] Zou Y, Zhang W, Chau F S, et al. Miniature adjustable-focus endoscope with a solid electrically tunable lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20582-20592.
- [10] Dittion R. Modern Geometrical Optics [M]. US: Wiley, 1998.