

doi: 10.3788/gzxb20124111.1317

Q-type 非球面技术在超短焦全景镜头设计中的应用

郑 玮, 林 峰

(福建师范大学 物理与光电信息科技学院; 医学光电科技与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

摘 要:介绍了 Q-type 新型非球面多项式算法及其相比于传统非球面多项式在加工、制造方面的优势, 引入超短焦全景镜头焦距与分辨率的关系, 利用 Q-type 非球面技术, 设计了一款焦距 0.657 mm, 焦距像高比 ≤ 0.184 的全景镜头. 该镜头由 7 组 8 片透镜组成, 包含 4 面非球面透镜. 设计结果表明: 在空间频率为 227 lp/mm 处, 调制传递函数值大于 0.3, 接近衍射极限; 在垂直半视场角 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的环景边缘区域, 图像角分辨率达到了 1.163 7 mm/°, 使得环景展开后有较高分辨率, 表明 Q-type 非球面技术在超短焦全景镜头设计中有一定优越性.

关键词:光学设计; 全景镜头; Q-type 非球面; 分辨率

中图分类号: O439; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1317-4

0 引言

利用非球面代替球面折射是当前镜头发展的主要方向之一, 它可使镜头结构简化, 更好地校正镜头像差^[1-3]. G. W. Forbes 博士在 2007 年提出了一种新型 Q-type 非球面算法, 改善了传统非球面多项式在加工、制造上困难的问题^[4], 是一种具备创新性和实用性的算法.

鱼眼透镜和折反射透镜是实现全景成像技术的主要方法, 但折反射透镜系统存在折反射面的设计制作、加工、装配对心困难, 抗震性差等缺点^[5], 故鱼眼透镜系统在全景成像中仍具有广泛应用. 目前市面上焦距最短的全景鱼眼镜头是富士能研发的世界第一台用于 5 百万像素的 CCD 摄像机全景鱼眼镜头, 其焦距为 1.4 mm, F1.4, 1/2 寸 CCD, 焦距像高比为 0.357 5.

本文利用 Q-type 非球面, 设计了一款焦距 0.657 mm, 焦距像高比 0.184 (0.657/3.57=0.184) 的全景镜头, 并与同像面尺寸、F 数的球面全景镜头进行了比较. 该系统由 8 片透镜组成, 包含 4 个非球面. 设计结果表明, 其环景展开后图像边缘角分辨率达到了 1.163 7 mm/°, 远远高于原结构的 0.021 8 mm/°, 实现高边缘分辨率全景摄像, 证明非球面技术在超短焦全景镜头设计中有一定优势.

1 鱼眼镜头焦距与边缘角分辨率的关系

全景鱼眼镜头的成像存在较大桶形畸变: 中心

图像疏而大、外圈图像密而小, 造成环景展开边缘图像成像不高, 于是提高鱼眼镜头边缘图像的成像质量有一定的必要性. 鱼眼镜头“非相似”成像原理包括“等距投影”成像、“等立体角投影”成像、“等体视投影”成像、“正交投影”成像四种^[6], 本文主要采用的是“等距投影”成像公式.

假设一鱼眼成像系统的像面尺寸为 $\phi 2h$, 视场角 180° , 像素间距为 p_s . 采用“等距投影”成像: $y' = f'\omega$, 则鱼眼镜头环景边缘角分辨率可以表示为^[7]

$$\varphi_s = \frac{2p_s}{\Delta\omega} = \frac{2p_s}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{4p_s f' k_2}{\pi f' (k_2 - k_1) + 4p_s} \quad (1)$$

将式(1)对 f' 求微分得

$$d\varphi_s = \frac{16p_s^2 k_2}{[\pi f' (k_2 - k_1) + 4p_s]^2} df' \quad (2)$$

从式(2)可看出, 当 f' 减小时, 鱼眼镜头环景边缘角分辨率增大. 即: 对于固定靶面的 CCD, 当鱼眼镜头的焦距越小, 其在图像中心区域 (半视场角 $\leq 45^\circ$) 占据的像素空间越小, 从而被高度压缩的边缘图像区域具有较大的像素空间, 使得其在环景展开后有较高的分辨率. 故较小的焦距像高比 (焦距/半像高) 对于边缘图像的分辨率是有利的.

2 Q-type 非球面

2.1 Q-type 非球面简介

Zernike 多项式, 即传统意义上的非球面多项式是被非球面设计中广泛应用的方法, 但它对非球面面型高级系数准确度要求过高, 在制造和检测方面存在

基金项目: 福建省教育厅高校产学研合作项目 (No. JA10061) 资助

第一作者: 郑玮 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计. Email: zhengw204@sina.com Tel: 15806015977

导师 (通讯作者): 林峰 (1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为光学设计. Email: lfeng127@163.com Tel: 18905007007

收稿日期: 2012-05-31; 修回日期: 2012-07-13

较多不便.2007年,QED技术公司的G.W.Forbes博士提出了一种关于轴对称非球面的新算法,可有效地降低非球面镜片在加工制造上的困难,找出最理想的非球面面型^[8].其包含两种不同的形式:Qcon和Qbfs,业界将其统称为“Q-型非球面”^[9-10].

Qcon多项式定义了一个基于其圆锥截面下陷偏移的非球面表面.其公式为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - \epsilon c^2 r^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{con}}(u^2) \quad (3)$$

式(3)允许设计者在设计过程中通过对比来决定某个具体项是否需要,以此来避免制造和实际检测的复杂性并减小成本.

Qbfs多项式定义了一个非球面表面,其特征量是从最适球面到非球面的RMS斜率偏移量.其公式为

$$z(r) = \frac{c_{\text{bfs}} r^2}{1 + \sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2 r^2}} + \frac{u^2(1 - u^2)}{\sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2 r_a^2 u^2}} + \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bfs}}(u_2) \quad (4)$$

这给表面的可检测性提供了有意义的量化,因为RMS斜率偏移很容易计算,它与平均边缘密度成比^[11].

这两种面形算法被G.W.Forbes博士描述为“一种应用于轴对称的光学非球面,强健的、有效的算法”^[12].

2.2 Q-type 非球面的优点

式(3)~(4)相对于传统的多项式算法有着诸多显著的优点,主要包括^[10]:1)式中各个系数的数量级直接和圆锥截面的下陷偏移或斜率偏差量有关.2)可作为优化的约束,从根本上提高工艺性和降低成本.3)斜率约束的引入使得非球面产品在测试阶段不需要使用昂贵的光学测量工具.4)提供了更低的系数有效准确度,从而极大地降低了光学制造者在数值方面精确度的负担.5)帮助更好地寻找非球面在光学系统中的最佳定位.6)非球面项的归一化半径值是正交的,使得每个项都有独特的和有意义的公差.

Zernike多项式虽然在非球面面型加工方面有较大缺陷,但仍然有重要应用;Q-Type多项式在非

球面设计中提供了独特和创新的方法,并注重制造和检测,具有很大的应用前景.

3 非球面超短焦全景鱼眼镜头的设计

3.1 设计指标

本文根据鱼眼图像全景展开实际应用的成像要求,设计一款焦距0.657 mm,F数2.25的光学系统,具体设计指标见表1.设计使用的sensor是由Micron公司所生产的1/2.5-inch传感器,有效像面尺寸:5.70 mm(H)×4.28 mm(V),有效像素:2 592(H)×1 944(V),像元尺寸:2.2 μm×2.2 μm.

表 1 光学设计参量

Design spectrum	Visible light
Focal length	0.657 mm
Horizontal field	≥360°
Vertical field	≥180°
The ratio of focus and height	≤0.184
F#	2.25
Sensor	Mt9p031

3.2 设计结果

设计结果如图1.系统由7组8片透镜组成,焦距为0.657 mm,总长47.39 mm,玻璃材料均来自成都光明玻璃库.系统第1、2、4、14面采用了非球面玻璃,其均为CDGM2011玻璃库中的低熔点玻璃,表2给出了相应的非球面系数.

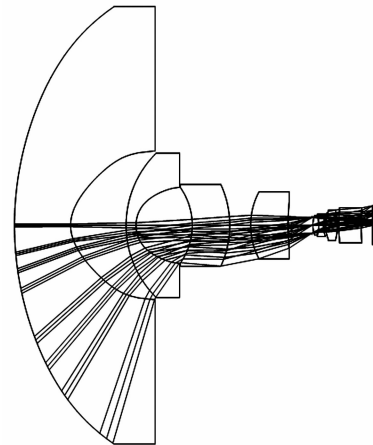


图 1 系统外形结构图

Fig. 1 The schematic of optical system structure

表 2 非球面系数

Table 2 Aspherical coefficients

	1	2	4	14
K	1.258 94	-0.804 54	2.540 78	-6.246 70
4 th	-7.209 038E-01	-4.77 5254E-01	-8.547 102E-02	-9.831 495E-02
6 th	-1.517 813E-01	-5.739 442E-01	-9.000 303E-02	2.142 259E-02
8 th	-3.861 817E-02	-3.786 726E-01	1.995 191E-03	1.990 465E-03
10 th	-9.514 157E-03	-5.208 863E-02	-9.353 171E-04	-2.726 080E-04

3.3 像质评价

图 2 为系统的 MTF 曲线. 曲线表明,在空间频率为 227 lp/mm 处,MTF 值大于 0.3,接近衍射极限,说明该全景鱼镜头在全视场范围内已具有较好的成像质量.

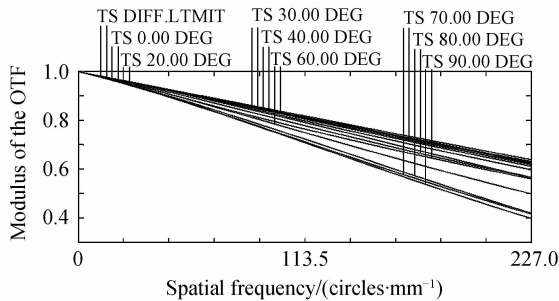


图 2 系统 MTF 曲线
Fig.2 The MTF curves of the system

图 3 为系统的相对照度曲线. 由图可知,像面边缘处照度为中心照度 80% 以上,系统像面照度均匀性良好.

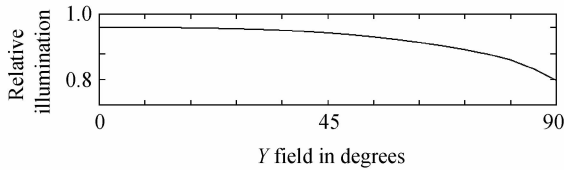


图 3 系统相对照度曲线
Fig.3 Relative illumination

图 4 为系统的场曲和 F-theta 畸变曲线. F-theta 畸变曲线横坐标为畸变量,纵坐标为视场角,当曲线处于纵坐标右边时,代表着正畸变.从图 4 可以看到,在 45°~90° 的环景边缘区域内,有着较大的正畸变量.这说明本光学系统的环景边缘区域占据着较高的像素空间,有利于全景展开.

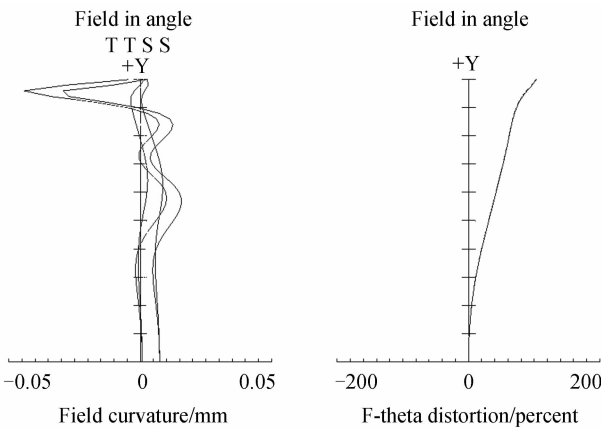


图 4 系统场曲和 F-theta 畸变曲线
Fig.4 Field curvature and F-theta distortion

表 3 为设计结果与原球面全景镜头的比较. 比较结果表明:在像质评价相同的前提下,采用 Q-type 非球面多项式可不改变像面高度而将原结构的焦距缩短一倍. 环景边缘区域空间角分辨率达到

1.163 7 mm/(°),远远高于原结构.

表 3 非球面全景镜头与球面全景镜头设计结果对比

Table 3 The design result of asphere vs sphere		
Parameters	Asphere	Sphere
F #	2.25	2.25
Sensor	Mt9p031	Mt9p031
Focal length	0.657 mm	1.247 mm
MTF at 227 lp/mm	≥0.3	≥0.3
The ratio of focus and height	≤0.184	≤0.357 5
Resolution	1.163 7 mm/(°)	0.021 8 mm/(°)

4 结论

本文着重介绍了 Q-type 新型非球面多项式算法及其在加工、检测方面的优势. 基于在像面尺寸一定的前提下,焦距越短,全景展开的环景空间角分辨率越高的原理,采用 Q-type 非球面技术,设计了一款焦距 0.657 mm,焦距像高比 ≤0.184,环景边缘区域空间角分辨率达到 1.163 7 mm/degree 的全景镜头. 设计加入了 4 面非球面,材料采用成都光明玻璃库中的低熔点玻璃,适用于压膜成形技术,具有一定的应用价值. 也表明了 Q-type 非球面技术在全景镜头设计中有一定的优越性.

参考文献

- [1] XIE Zheng-mao, DONG Xiao-na, CHENG Lian-yi, et al. Design for special underwater photography objective lens with wide angle and large relative aperture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 891-895.
谢正茂,董晓娜,陈良益,等. 大视场大相对孔径水下专用摄影物镜的设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 891-895.
- [2] MA Zhen, LI Ying-cai, FAN Xue-xu, et al. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1455-1458.
马臻,李英才,樊学武. 非球面干涉定心方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1455-1458.
- [3] WEI Zi-hua, SHEN Wei-xing. A new method for calculating asphericity of optical aspheric surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 730-732.
韦资华,沈卫星. 一种新的光学非球面度计算方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 730-732.
- [4] FORBES G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 5218-5226.
- [5] SU Li, ZHAO Li-na. The summary of panoramic imaging system[J]. *Science & Technology Information*, 2010, **13**(1): 21-22.
苏莉,赵丽娜. 折反射全景成像系统综述[J]. *Science & Technology Information*, 2010, **13**(1): 21-22.
- [6] 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [7] CHEN Sheng-cong, LIN Feng. Research and design of super short-focus panoramic fish-eye lens [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2012, **39**(2): 48-51.
陈圣聪,林峰. 超短焦全景鱼镜头的研究与设计[J]. *光电工程*, 2012, **39**(2): 48-51.
- [8] KUPER T G, ROGERS J R. Automatic determination of optimal aspheric placement[C]//BENTLEY J. International optical design conference. Bellingham: SPIE, 2010, **7652**:

- 76522R(10 pp.).
- [9] Optical Research Associates. Zemax reference manual[M]. United States; Focus software, 2011: 323.
- [10] Optical Research Associates. CODE V 10.3 reference manual [M]. California; Synopsys, 2011: D1-D4.
- [11] MA Bin, LI Lin, THOMPSON K P, *et al.* Applying slope constrained Q-type aspheres to develop higher performance lenses[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21174-21179.
- [12] ROBUST F G W. Efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19700-19712.

Application of Q-type Asphere in the Design of Super Short-focus Panoramic Lens

ZHENG Wei, LIN Feng

(*Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine(Ministry of Education); School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*)

Abstract: The Q-type novel aspherical polynomials and its advantages are introduced in the aspect of algorithm, fabrication and manufacturing relative to the traditional aspherical polynomial-based aspheres. The Q-type formulation is applied to design a panoramic lens based on the relationship of super short-focus panoramic lens' focus and resolution. The designed panoramic lens' focus is 0.657 mm and ratio of focus and image height is less than 0.184, which includes 4 aspheric surface. This result shows that the spatial pixel of scenic circle area with half vertical field $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ is up to 1.163 7 mm/($^{\circ}$), and the modulation transformation function is greater than 0.3 at the spatial frequency of 227 lp/mm. The result demonstrates the Q-type formulations is certain advantages in super short-focus panoramic lens.

Key words: Optical design; Panoramic lens; Q-type asphere; Resolution