

单视点红外折反射全向成像系统参数设计

贺 宇¹ 王岭雪^{1*} 周星光¹ 蔡毅^{1,2} 魏圣毅¹ 薛唯¹ 刘福平³ 李茂忠³ 陈 骥³

¹北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室,
北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

²中国兵器科学研究院, 北京 100089

³云南北方驰宏光电有限公司, 云南昆明 650000

摘要 提出了单视点约束红外折反射全向成像系统单次成像实现全视场(FOV)清晰的一种参数设计优化方法。根据应用需求设计出符合单视点约束的初始系统参数;提出镜面虚景深的概念优化折射光学组参数。利用ZEMAX软件的理想系统仿真验证了所提出的设计方法实现系统全视场清晰成像的可行性,并且该方法能同时满足视场范围和轴向尺寸等方面的要求。从仿真结果还可知,大口径反射镜镜面有利于提高光学系统成像质量,而增大曲面离心率有利于减小系统轴向尺寸。

关键词 成像系统; 红外折反射全向成像; 单视点约束; 参数设计; 镜面虚景深

中图分类号 TN21

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0111002

Parameters Design for Single Viewpoint Infrared Omnidirectional View Sensors

He Yu¹ Wang Lingxue¹ Zhou Xingguang¹ Cai Yi^{1,2} Wei Shengyi¹
Xue Wei¹ Liu Fuping³ Li Maozhong³ Chen Ji³

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China

³Yunnan KIRO-CH Photonics Co.Ltd, Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract A method of parameters design and optimization for single viewpoint infrared catadioptric omnidirectional imaging system to obtain sharp image for the whole field of view (FOV) by single shot is proposed. The initial system parameters are designed to meet single viewpoint constraint according to the application requirements. A concept of virtual depth of field in mirror is proposed to optimize refracted optical group parameters. The proposed method is verified by simulation results using the ideal system of software ZEMAX. Using the method can not only obtain sharp image for the whole FOV, but also meet the requirements like FOV and axial dimension. The simulation results also show that large diameter mirror helps to improve the quality of the image and large surface eccentricity helps to reduce the axial dimension.

Key words imaging systems; infrared omnidirectional view sensors; single viewpoint constraint; parameters design; virtual depth of view in mirror

OCIS codes 110.3080; 150.0155; 220.4830

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61471044)、预研基金重点项目(9140A02010114BQ01)、高等学校博士学科点专项科研基金(20131101110024)、

作者简介: 贺宇(1988—),男,博士研究生,主要从事红外成像、红外成像系统性能建模和折反射全向成像系统方面的研究。

E-mail: hy070609@163.com

导师简介: 王岭雪(1973—),女,博士,副教授,主要从事红外成像、图像处理 and 红外光谱等方面的研究。

E-mail: neobull@bit.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

折反射全向成像系统利用曲面反射镜与折射光学元件的特殊组合,在一次拍摄中实现方位角 360° 范围和俯仰大视场的无缝成像,实时性优于旋转扫描的全景成像系统,体积重量功耗优于拼接式全景成像系统,并可避免多成像器件带来的响应不均匀问题,同时也降低根据图像特征进行全景拼接的处理要求,还具有结构简单的特点。最近十几年这种系统广泛应用于街景拍摄^[1-2]、视频监控^[3]、机器人视觉导航^[4-6]和自动驾驶^[7]等领域。折反射全向成像系统分为单视点约束和非单视点约束两大类,单视点约束是比较严格的结构约束,目的是使折反射全向成像系统具有近似透视成像的特点^[8]。

折反射全向成像的研究可以归纳为四类:1) 成像模型的研究,其中具有代表性的是美国哥伦比亚大学的 Baker 等^[9]单视点约束折反射全向成像系统的理论研究和美国宾夕法尼亚大学的 Geyer^[10]的球面统一模型研究。2) 以标定为主的空间变换研究,近几年涌现了很多优秀成果^[11-15]。3) 折反射全向成像系统畸变校正的研究^[16-17],如中国科学院自动化研究所 Wu 等^[18-19]研究的空间点几何不变性并成功用于折反射全向系统畸变的校正。4) 全视场清晰成像问题的研究最近才开始引起人们的重视。2007年, Swaminathan^[20]利用焦散理论求得场景经镜面压缩后的虚像,将其重心设置为相机对焦点来改善成像清晰度,但并没有评价这种方法对全视场成像清晰度的改善程度。并且这种对焦位置的设定与系统其他结构参数如视场大小的联系也没有说明。另外, Swaminathan 认为单视点的结构约束导致了成像的清晰范围有限,所以其在讨论中只涉及非单视点结构。Li 等^[21]则利用不同对焦位置拍摄的多张图片拼接出了一幅全视场清晰全向图像。但由于需要多次成像并进行图像拼接,实现起来比较复杂,并且无法对动态物体成像。

红外波段的折反射全向成像系统从2010年开始有公开报道^[22-25]。由于红外系统的折射光学组的 $F/\#$ 受红外焦平面探测器较低的灵敏度和封装杜瓦内冷屏(制冷型系统) $F/\#$ 的限制,通常的非制冷型系统 $F/\#$ 为 1, 制冷型系统的 $F/\#$ 一般为 2~4。而可见光系统的 $F/\#$ 通常可以达到 20 以上。众所周知, $F/\#$ 数值越大景深越大,全视场清晰则需要折射光学组能提供足够大的景深。而小 $F/\#$ 数值的限制使红外折反射全向成像系统全视场清晰成像问题比较突出,如果需要同时满足单视点约束,对于设计是一个挑战,目前的红外折反射全向成像系统都属于非单视点约束。

为了实现全视场清晰的单视点约束红外折反射全向成像系统设计,本文提出一种系统参数设计优化方法,在实现全视场清晰的同时满足不同视场范围和系统轴向尺寸等要求,为使用光学设计软件对系统进行设计优化提供指导。参数设计分两步进行:1) 根据应用需求设计出符合单视点约束的初始系统参数;2) 提出镜面虚景深的概念来优化系统折射光学组参数以达到全视场清晰成像的目的。

2 单视点红外折反射全向成像系统参数设计

在红外折反射全向成像系统参数设计时遵循单视点约束结构。符合这种结构约束的系统反射镜都具有两个数学上的焦点(与光学焦点不同)。图1以双曲面反射镜为例,其两个数学焦点一个位于镜面内的 F_1 处,一个则在镜面外 F_2 处。这两个数学焦点的光学性质是轴外物点光线对着其中一个焦点入射,经过反射后,从另外一个焦点出射。而这时如果折射光学组(图1中以一个理想透镜表示)的物方节点(图1中 C 点,当

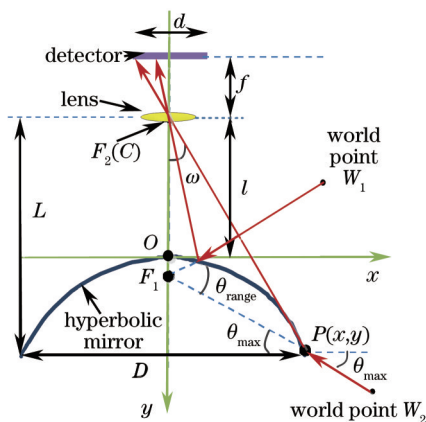


图1 单视点红外折反射全向成像系统结构图

Fig.1 Structure chart of single viewpoint infrared catadioptric omnidirectional imaging system

系统位于空气中等同物方主点)与镜面外的数学焦点 F_2 重合,则该光线不会改变方向穿过 C 点,投影在探测器上。传统成像系统的物像透视投影模型中轴外物点出射光线必须通过透视中心这个点,而对于单视点折反射全向系统有两个点来共同约束光线,一个是 C 点,另一个就是有效视点 F_1 。因此在单视点约束条件下,可以建立类似传统成像系统一样简洁的透视投影模型,从而有利于视觉图像领域相关算法在折反射全向成像系统中的应用。这种约束使得红外折反射全向成像系统在目标的监视、跟踪或红外视觉领域中更具有可行性。另外,只有在满足单视点约束时,才能更加准确快速地完成红外折反射全向成像系统的标定工作。

2.1 符合单视点约束的初始系统参数设计

在结构参数设计中,保证系统满足如图 1 所示的单视点约束结构。结构参数设计包括表 1 中参数。

表 1 系统结构设计参数

Table 1 Parameters of the system structure design

Parameter	
field of view θ_{range}	detector size d
maximum depression θ_{max}	focal length of the lens f
mirror caliber D	distance constraint between reflector and lens l
mirror eccentricity e	

如图 1 所示,对于特定的应用需求,系统俯仰视场范围 θ_{range} 、最大俯角 θ_{max} 和探测器尺寸 d 已知。其中最大俯角对应镜面边缘入射,而这个边缘镜面口径为反射镜口径。最大仰角不考虑折射光学组遮挡可以接近 90° 。反射镜与透镜组距离约束定义为反射镜顶点 O 与折射光学组物方节点 C 之间的距离 l 。

使用距离约束 l 和圆锥曲线离心率 e 来表示图 1 坐标系下的双曲线型

$$x^2 = 2l(e - 1)y - (1 - e^2)y^2. \quad (1)$$

由三角相似关系可以表示出 L

$$L = Df/d. \quad (2)$$

最大俯角 θ_{max} 的正切为

$$\tan \theta_{\text{max}} = \frac{2L - \frac{4e}{e+1}l}{D}. \quad (3)$$

由于点 $P(D/2, L - l)$ 在双曲线上满足 (1) 式,所以 (1)~(3) 式拥有 l 、 L 、 D 、 e 和 f 五个未知量。假设 D 与 f 两个量的值,解出对应的 l 、 L 和 e ,其中 L 直接由 (2) 式解出, l 和 e 可由 (2)、(3) 式得到的 (4) 式与 (1) 式联立解出。

$$l = \left(\frac{Df}{d} - \frac{D}{2} \tan \theta \right) \frac{e+1}{2e}. \quad (4)$$

利用结构参数设计在满足特定的焦平面尺寸和视场选择下得到了单视点约束的结构。

2.2 全视场清晰成像参数优化

在单视点约束的结构下通过优化折射光学组参数来实现全视场清晰成像。目前折反射全向成像系统存在的无法全视场清晰成像的原因在于当考虑系统搭建时,参考远景成像系统使折射光学组的焦距近似等于像距,导致部分视场模糊。对于折反射全向成像系统,虽然整个系统仍然是对远景成像,但反射镜组已经将远景压缩在虚像面上,折射光学组可以当作对虚像面成像,这样对于折射光学组就是有限远成像,折射光学组的焦距不再约等于像距。结构参数设计中假设折射光学组的焦距近似等于像距从而将与单视点约束相关的结构参数确定,在此基础上需要优化与全视场清晰成像有关的参数,如折射光学组焦距和像面位置等。为此需要借助突变光学的焦散理论来获得景物经过镜面压缩后的虚像点深度位置^[20],从而得到镜面虚景深,进一步分析实现全视场成像清晰的条件。镜面虚景深的概念与传统的景深有所不同,传统景深表示取得规定弥散大小图像所对应的被摄物体前后距离范围。而对于红外折反射全向成像系统这种实际景深会随着俯仰视场的改变而非线性改变,为了简化研究将系统的成像过程视作两步完成:1) 镜面将实际场景压缩到虚像空间;2) 透镜组再对虚像空间成像。实际上远处场景会被压缩到虚像空间的一个曲面上,这个虚像面上的每个点代表着不同俯仰和水平视场的场景物点所对应的镜面内虚像点。而系统一定视场范围

所对应的虚像面区域的前后深度就是镜面虚景深。这样,为了实现理论上的全视场清晰成像,只需要镜面虚景深包含在系统折射光学组所能提供的景深内。

图2表示在折反射全向成像中,曲面镜能将周围景物压缩到镜面下一定深度的一个虚像面上,不同物点对应虚像面上唯一点。

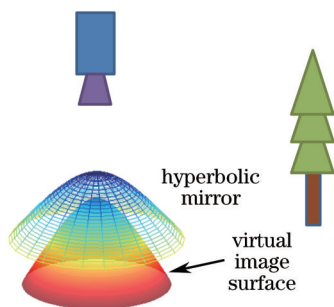


图2 曲面镜对景物压缩效应示意图

Fig.2 Schematic of compression effect of curved mirror on the scene

利用Swaminathan^[20]介绍的方法,推导了如图3所示坐标系下的反射点 $P(x,y)$ 与虚像点 $P_c(x_c,y_c)$ 沿反射光线方向长度的公式

$$d_c = \frac{(l+ey)(el-l+ey+e^2y)(2el-y-l+e^2l+2e^2y+e^3y)}{2l\sqrt{e^6y^2+2e^5ly+2e^5y^2+e^4l^2+4e^4ly+e^4y^2+4e^3l^2+4e^3ly+2e^2l^2-4el^2-2ely+l^2}} \quad (5)$$

利用三角相似关系很容易将虚像点坐标表达成镜面上反射点坐标的函数

$$x_c = \frac{HP \cdot CP_c}{CP} = x + \frac{xd_c}{\sqrt{(l+y)^2+x^2}}, \quad (6)$$

$$y_c = \frac{CH \cdot H_c P_c}{HP} - l = y + \frac{(l+y)d_c}{\sqrt{(l+y)^2+x^2}} \quad (7)$$

单视点约束下 l 取值还需满足约束(4)式。

为了获得镜面虚景深,计算所求俯仰角视场范围内虚像面的区域分布,由于旋转对称性,直接考察二维横截面,如图4所示。定义最大入射俯角和仰角所对应的虚像线上虚像点位置分别为镜面虚景深的远端 P_c 和近端 Q_c 。镜面虚景深的大小和位置已在图中说明。 S_F 为折射光学组对焦面。

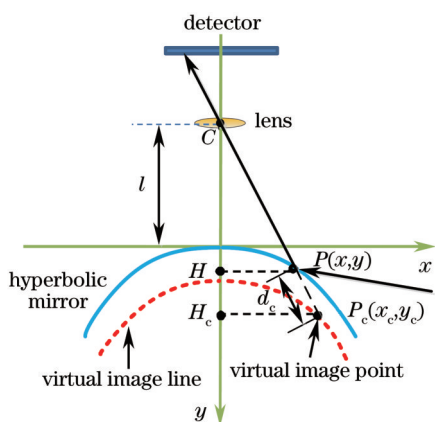


图3 虚像点计算示意图

Fig.3 Diagram of virtual image point calculation

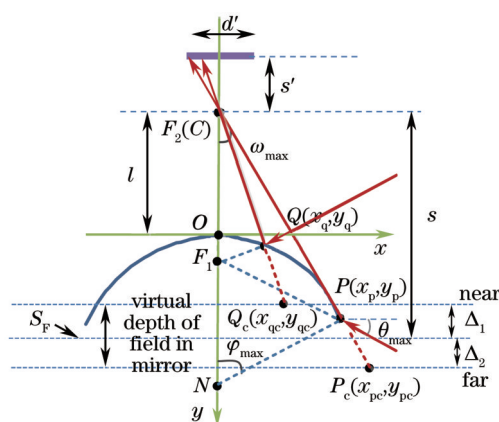


图4 折射光学组参数修正计算

Fig.4 Correction calculation of refracted optical group parameters

全向视场清晰成像参数优化时需计算合适的折射光学组焦距 f_c 和对焦物距 s ,使折射光学组成像的近点与远点分别与镜面虚景深的近端与远端在同一平面,这样使得镜面虚景深能在红外折射光学组的成像景深内。前景深和背景深的常用计算公式可写为 $\Delta_1 = \frac{FZs^2}{f_c^2 + FZs}$ 和 $\Delta_2 = \frac{FZs^2}{f_c^2 - FZs}$,由图4可知, $\Delta_1 = s - y_{qc} - l$,

$\Delta_2 = y_{pc} + l - s$, 所以有

$$\frac{FZs^2}{f_c^2 + FZs} = s - y_{qc} - l, \quad (8)$$

$$\frac{FZs^2}{f_c^2 - FZs} = y_{pc} + l - s. \quad (9)$$

由(8)、(9)式可得:

$$s = \frac{y_{qc}y_{pc} - y_{qc}^2 + ly_{pc} - ly_{qc}}{FZ(y_{qc}y_{pc} + y_{qc}^2 + ly_{pc} + 3ly_{qc} + 2l^2)}, \quad (10)$$

$$f_c = \sqrt{\frac{2FZ(y_{qc}y_{pc} + ly_{qc} + ly_{pc} + l^2)}{y_{pc} - y_{qc}}}, \quad (11)$$

式中 F 是折射光学组 $F/\#$, f_c 是其优化后的焦距, Z 为成像景深范围内的场景成像在探测器上的最大允许弥散斑大小。其直接决定像的清晰程度,与系统的焦深有关^[26]

$$Z = \left| \pm \frac{\delta'}{F} \right|. \quad (12)$$

对于四分之一波长波像差的像离焦距,焦深表示为 $\delta' = \pm 2\lambda F^2$ 。于是 $Z = 2\lambda F$ 。将 Z 的表达式代入(10)和(11)式消掉 Z ,由于 λ 、 F 和 l 对于特定系统是已知量,而 y_{pc} 和 y_{qc} 又可以根据(7)式求出,所以可以解算出合适的 f_c 和 s 使得全视场成像清晰。解算出的 f_c 和 s 所对应的像面尺寸不一定等于探测器尺寸,此时的像面尺寸表示为

$$d' = 2s' \tan \omega_{\max}, \quad (13)$$

式中像距 $s' = \frac{f_c \cdot s}{s - f_c}$ 。如图 4 所示, NP 是 P 点的法线,易得 $\omega_{\max} = \theta_{\max} - 2\varphi_{\max}$,而对于二次曲线有

$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{2l(e-1)y + (e^2-1)y^2}}{l(e-1) + (e^2-1)y}$, 所以此时的像面尺寸为

$$d' = 2 \cdot \frac{f_c \cdot s}{s - f_c} \cdot \tan \left[\theta_{\max} - 2 \arctan \frac{\sqrt{2l(e-1)y_p + (e^2-1)y_p^2}}{l(e-1) + (e^2-1)y_p} \right], \quad (14)$$

式中 ω_{\max} 和 φ_{\max} 与最大俯角 θ_{\max} 相对应。在(14)式中, θ_{\max} 、 l 、 e 和 y_p 是在单视点约束结构参数计算中已经确定,其中 y_p 是最大俯角 θ_{\max} 入射光线镜面反射处纵坐标。而优化后的 f_c 和 s 决定像面大小 d' 相对探测器尺寸 d 的变化。

3 参数设计数值仿真与评价

为了验证参数设计方法的合理性,在 ZEMAX 中建立了理想系统,并通过点列图间接评价全视场是否清晰成像。1) 仿真了常用红外物镜直接与反射镜组合的系统;2) 仿真了参数设计方法设计的系统,比较两者点列图的差异。表 2 给出了 2 组使用常用红外物镜直接与反射镜组合的系统的参数,其中物镜像距 s'_0 是在调焦范围下的最优值,计算的红外物镜焦距 25 mm,最近对焦距离 1 m。此时像面尺寸 d'_0 的计算类似(14)式,将 f_c 和 s' 替换为 f 和 s'_0 即可。表 3 给出了 4 组经过设计方法设计出来的红外折反射全向成像系统参数。俯仰视场统一设置为 $-10^\circ \sim 30^\circ$,探测器尺寸为 15.36 mm,像元尺寸 30 μm 。计算时 $F/\# = 2$, $\lambda = 5 \mu\text{m}$ 。另外,假设了表 2 和表 3 中的反射镜口径值, $e = 1.2883$ 和 $e = 1.1369$ 分别在 $f = 25 \text{ mm}$ 和 $f = 50 \text{ mm}$ 时求得。图 5 是参数仿真的点列图,前一行是表 2 的仿真结果,后两行分别是表 3 中 No.3、4 和 NO.4、5 的仿真结果。

表 2 常用红外物镜与双曲面反射镜组合系统参数

Table 2 System parameters of common infrared lens and hyperbolic mirror assembly

No.	Mirror caliber D/mm	Curved mirror eccentricity e	Distance constraint between mirror and lens l/mm	Lens focal length f/mm	Image distance s'_0/mm	Image siz d'_0/mm
1	150	1.2883	205.08	25	25.641	15.30
2	200	1.2883	273.44	25	25.641	15.37

表3 本文方法设计的红外折反射全向成像系统参数

Table 3 Infrared omnidirectional view sensors parameters designed by proposed method

No.	Mirror caliber D /mm	Curved mirror eccentricity e	Distance constraint between mirror and lens l /mm	Correction focal length f_c /mm	Correction image distance s' /mm	Image size d' /mm
3	150	1.1369	446.4537	25.4534	26.7244	8.21
4	200	1.1369	595.2716	25.9208	26.8978	8.26
5	150	1.2883	205.08	13.0259	13.625	8.37
6	200	1.2883	273.44	13.2651	13.726	8.43

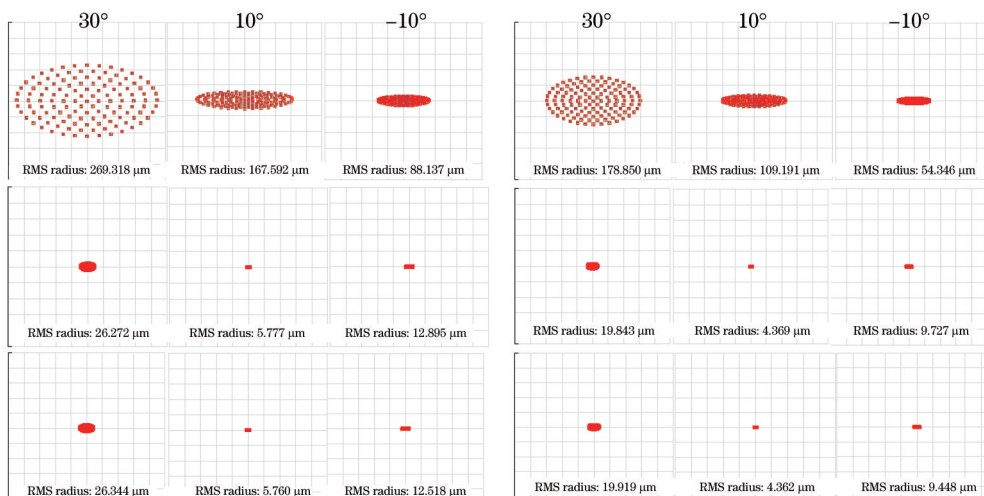


图5 参数的仿真系统点列图

Fig.5 Simulation system spot diagram of parameters

图5给出了仿真理想系统的点列图,取 -10° 、 10° 和 30° 三个俯仰角。第一行仿真了常用红外物镜直接与反射镜的组合,组合时在结构上保证单视点和俯仰视场等要求,另外在调焦范围下将物镜像距取最优值。后两行仿真了使用提出的参数设计方法设计的理想系统的点列图,提出的参数设计方法在满足单视点结构和视场范围等要求的基础上,设计镜面参数、距离约束和折射透镜组的焦距和像距。从仿真结果可以看出,经过对系统参数进行优化设计,点列图中不同俯仰角的均方根(RMS)半径有了很大程度的减小,甚至已经接近或小于常规红外探测器 $30\ \mu\text{m}$ 左右的像元尺寸,使得光学系统分辨力和探测器分辨力实现了匹配。只是在 30° 时,RMS尺寸略大于最大允许弥散斑大小 Z ,原因可能是上文所使用公式如高斯公式和景深公式等都是近轴假设下才精确成立,而所讨论的系统光路已经不处于近轴区域,而光学设计软件是通过光线追迹得到的点列图,所以与近轴假设下的计算结果会有一些误差。不过这些小误差可以在光学设计过程中进一步优化。作为对比的常用红外物镜直接与反射镜组合的结果表明其无法实现全视场清晰成像。另外,从表3的计算结果可以看出,优化后像面尺寸会小于探测器尺寸。从计算和仿真的结果还可以看出大的镜面口径对应的RMS值会小一些,说明成像质量会更好,而越大的离心率越有利于减小距离约束,从而减小系统长度。

4 结 论

为了实现全视场清晰的单视点约束红外折反射全向成像系统设计,从理论上提出一种系统参数设计优化方法,在实现全视场清晰的同时满足不同视场范围和系统轴向尺寸等要求。根据应用需求设计出符合单视点约束的初始系统参数,提出了镜面虚景深的概念来优化系统折射光学组参数以达到全视场清晰成像的目的。仿真结果表明按照该方法设计的参数所建立的理想系统仿真点列图的RMS半径要远小于使用常用红外物镜直接与反射镜组合系统的结果,前者成像质量要远好于后者,并且从不同视场的RMS半径的具体数值可知只有前者才能使得光学系统的分辨力和探测器分辨力基本匹配。说明只要通过合理的参数设计,符合单视点约束的红外折反射全向成像系统是可以实现单次拍摄全视场清晰成像的。另外,通过仿真还发现大口径反射镜镜面有利于提高光学系统成像质量,而增大曲面离心率有利于减小系统轴向尺寸全视场清晰成像,所以在设计参数时,这两个参数应该在加工条件允许的情况下尽量取更大的值。

- 1 K Kato, H Ishiguro, M Barth. Town digitizing: Recording of street views by using omnidirectional vision sensors[C]. 26th Annual Conference of the IEEE, 2000, 4: 2571–2576.
- 2 J C Bazin, C Demonceaux, P Vasseur, *et al.*. Rotation estimation and vanishing point extraction by omnidirectional vision in urban environment[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 31(1): 63–81.
- 3 C H Chen, Y Yao, D Page, *et al.*. Heterogeneous fusion of omnidirectional and PTZ cameras for multiple object tracking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(8): 1052–1063.
- 4 N Winters, J Gaspar, G Lacey, *et al.*. Omnidirectional vision for robot navigation[C]. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, 2000: 21–28.
- 5 A C Murillo, P Campos, J Kosecka, *et al.*. Gist vocabularies in omnidirectional images for appearance based[C]. 10th OMNIVIS Held with RSS, 2010.
- 6 T Goedeme, M Nuttin, T Tuytelaars, *et al.*. Omnidirectional vision based topological navigation[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(3): 219–236.
- 7 D Scaramuzza, R Siegwart. Appearance-guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(5): 1015–1026.
- 8 S Baker, S K Nayar. A theory of catadioptric image formation[C]. International Conference on Computer Vision, 1998: 35–42.
- 9 S Baker, S K Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(2): 175–196.
- 10 C M Geyer. Catadioptric Projective Geometry: Theory and Applications[D]. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2003.
- 11 L Puig, Y Bastanlar, P Sturm, *et al.*. Calibration of central catadioptric cameras using a DLT-like approach[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 93(1): 101–114.
- 12 X Ying, H Zha. Identical projective geometric properties of central catadioptric line images and sphere images with applications to calibration[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 78(1): 89–105.
- 13 J P Barreto, H Araujo. Geometric properties of central catadioptric line images and their application in calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1327–1333.
- 14 X Ying, Z Hu. Catadioptric camera calibration using geometric invariants[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(10): 1260–1271.
- 15 S J Maybank, S Leng, R Benosman. A fisher-rao metric for paracatadioptric images of lines[J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 99(2): 147–165.
- 16 Xiao Xiao, Yang Guoguang, Bai Jian. Panoramic-annular-lens distortion correction based on spherical perspective projection constraint [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 675–680.
肖 潇, 杨国光, 白 剑. 基于球面透视投影约束的全景环形透镜畸变校正[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 675–680.
- 17 Zeng Jiyong, Su Xianyu. Elimination of the lens distortion in catadioptric omnidirectional distortionless imaging system for horizontal scene[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 730–734.
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变折反射全景成像系统透镜畸变的消除[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 730–734.
- 18 Y Wu, Z Hu. Geometric invariants and applications under catadioptric camera model[C]. ICCV, 2005, 2: 1547–1554.
- 19 Y Wu, Z Hu, Y Li. Radial distortion invariants and lens evaluation under a single-optical-axis omnidirectional camera[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2014, 126: 11–27.
- 20 R Swaminathan. Focus in catadioptric imaging systems[C]. ICCV, 2007: 1–7.
- 21 W Li, Y Li. Overall well-focused catadioptric image acquisition with multifocal images: A model-based method[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3697–3706.
- 22 C Bjork, W Wan. Mid-wave infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications[C]. Proc SPIE, 2010, 7660: 76600B.
- 23 J M Nichols, J R Waterman, R Menon, *et al.*. Modeling and analysis of a high-performance midwave infrared panoramic periscope[J]. Opt Eng, 2010, 49(11): 113202.
- 24 Y Tang, Y Li. Contour coding based rotating adaptive model for human detection and tracking in thermal catadioptric omnidirectional vision[J]. Appl Opt, 2012, 51(27): 6641–6652.
- 25 W J Smith. Modern Optical Engineering[M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 149–150.
沃伦 J. 史密斯. 现代光学工程[M]. 周海宪, 程云芳译. 北京: 化学工业出版社, 2011: 149–150.
- 26 R E Fischer, B Tadic-Galeb. Optical System Design[M]. Wu Xiaojing, Zhang Zhen, Song Hongjun, *et al.*. Transl. Tianjin: Infrared and Laser Engineering, 2004: 27–28.
罗伯特 E. 菲舍尔, 普拉夫希奇. 塔迪奇. 光学系统设计[M]. 吴晓靖, 张 振, 宋洪君, 等译. 天津: 红外与激光工程, 2004: 27–28.