

恒等探测距离折反射式周视红外成像系统设计及分析

贺 宇¹, 王岭雪¹, 蔡 毅^{1,2}, 周星光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, 昆明 650217

摘要 折反射式周视红外成像系统在安全监视领域有着独特的大视场优势,但是目前常见的圆锥曲面反射镜折反射式周视系统存在不同俯仰角下探测距离差异大的问题。折反射式周视红外成像系统的探测距离与目标尺度、任务准则、俯仰角和方位角分辨力有关。将俯仰角分辨力和方位角分辨力的几何平均数设为常数,以此作为恒等探测距离折反射式周视系统的条件,并推导了相应的系统设计方法。数据仿真结果验证了恒等探测距离系统的可实现性,另外,也表明了所提方法不仅可以实现不同俯仰角下的相同探测距离,还可以通过合理的参数调节使得大部分视场范围内的探测距离优于传统圆锥曲面型折反射式周视系统的探测距离。

关键词 成像系统; 红外; 恒等探测距离; 几何平均数; 折反射式周视成像系统

中图分类号 TH703 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0422002

Design and Analysis for Catadioptric Omnidirectional View Infrared Imaging System with Constant Detection Range

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

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, 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 Limited Company, Kunming, Yunnan 650217, China

Abstract Catadioptric omnidirectional view infrared imaging system has the advantage of large field of view in the field of safety monitoring. But current usual catadioptric omnidirectional view system with a conical surface mirror have the problem that the detection ranges under different vertical pitch angles are greatly different. The detection range of catadioptric omnidirectional view infrared imaging system is related with the target dimension, task criteria, and resolutions of azimuth and pitch angles. In this paper, the geometric mean of the resolutions of pitch and azimuth angles is set as a constant, which is considered as the condition of the constant detection range in the catadioptric omnidirectional view system. Then, the corresponding system design method is deduced. The data simulation results verify the realizability of the constant detection range system. What's more, the results show that the proposed method not only obtains the same detection range under different vertical pitch angles, but also makes the detection ranges in most of the field of view range better than those in the traditional catadioptric omnidirectional view systems

收稿日期: 2016-09-08; 收到修改稿日期: 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61471044)、预研基金重点项目资助课题(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、图像处理和红外光谱方面的研究。
E-mail: neobull@bit.edu.cn(通信联系人)

with conical surface mirror by reasonable parameter adjustment.

Key words imaging systems; infrared; constant detection range; geometric mean; catadioptric omnidirectional view imaging system

OCIS codes 110.3080; 150.0155; 220.4830

1 引 言

由曲面反射镜和折射光学元件组成的折反射式周视成像系统是一种凝视型的大视场获取系统。不同于多视图拼接的多相机周视系统,折反射式周视成像系统与鱼眼相机都属于单视图系统。不过鱼眼镜头的视场一般很难超过 180° ,而折反射式周视成像系统的视场可以轻易超过 180° 。另外,由于鱼镜头对大视场光线的弯折主要发生在第一面透镜处,会带来严重的色散,而折反射式周视成像系统的大视场光线弯折主要发生在曲面反射镜处,不会带来色散,这是折反射式周视成像系统能以简单结构实现更大视场的一个重要原因,在最近的十几年已被广泛应用于街景拍摄^[1-2]、视频监控^[3-4]、计算机视觉^[5-10]等领域。

相比可见光波段,红外波段的折反射式周视成像系统的研究起步较晚,从 2005 年 Applied Science Innovations 公司的 ViperView 折反射式周视红外成像仪才开始有所报道^[11-14]。目前折反射式周视红外成像系统主要应用于周视成像探测与跟踪、周边态势感知等。当前局部战争中的威胁源种类多样化,如地面枪械/火箭弹、防空导弹、空中有人或无人飞行平台的导弹等,并且这些威胁通常来自不同的方向和位置。折反射式周视红外成像系统不需要运动扫描机构,仅使用单个面阵焦平面探测器即可实现 360° (水平环绕的角度)方位视场、大俯仰角视场的成像,在时间上实时地,在空间上无缝地探测、搜索和分析周视视场内的目标,对于信息化程度越来越高的现代战争尤为重要。信息化战争要求作战平台具备广域态势信息获取能力,而且每个作战平台作为信息节点,与其他作战平台一起形成综合评价威胁源信息和战场态势的信息网络。结构简单、成本低、小型化的优势使折反射式周视红外成像系统适合于不同的作战平台,因此,无论从广域实时探测的角度,还是从信息化战争的角度,折反射式周视红外成像系统均具有很大的应用价值。

但是,由于折反射式周视红外成像系统使用了曲面反射镜,俯仰角和方位角的空间分辨力会随着俯仰角的变化而变化,相应地,探测距离一般也随着俯仰角的变化而变化。因此,相同目标以不同俯仰角进入成像系统时其所成像的大小是不同的,探测距离也不同。而折反射式周视红外成像系统在战场中的意义在于广域信息获取潜力,目前的系统基本没有将这种潜力发挥出来,实际适合探测目标的视场只占系统获得视场的一部分。如果需将潜力变为能力,还需要系统在可以获得的周视视场内均具有恒定并且优异的探测距离。为此本文提出一种恒等探测距离的折反射式周视红外成像系统的设计方法,并且通过合理的设计调节,使得大部分视场的探测距离优于传统圆锥曲面型折反射式周视系统的探测距离。

2 折反射式周视红外成像系统参数与性能参数

折反射式周视系统模型可以分为单视点和非单视点两类^[15-16]。单视点架构中,所有主光线的入射方向均相交于曲面反射镜内的同一点,如图 1(a)中的 F_1 点,入射光线在镜面发生反射后又相交于另一点,如图 1(a)中的 F_2 点,而且 F_2 点一般与折射光学元件的物方节点重合。通常只有具有两个数学焦点(F_1 和 F_2)的双曲面、抛物面和椭圆等圆锥曲面才可以满足要求,并且对反射镜与折射光学元件(相机镜头)之间的距离、折射光学元件设计也有约束。与此相反地,非单视点架构对反射镜面型、反射镜与折射光学元件之间的距离、折射光学元件设计均没有特殊限制,这给周视成像系统的设计带来了灵活性[图 1(b)],可以根据实际射影要求设计系统^[17]。接下来的分析讨论将会在非单视点架构下,虽然部分讨论会涉及圆锥曲面镜,但是由于对反射镜与折射光学元件之间的距离不作限制,因此依然是非单视点情况。

2.1 圆锥曲面镜折反射式周视系统参数

折反射式周视红外成像系统涉及多个参数,可分为 4 类(见表 1):与透镜组相关的参数、探测器相关的参数、反射镜相关的参数、整体结构尺寸相关的参数。需要说明的是,表 1 中的反射镜面型参数适用于常见的圆锥曲面镜折反射式周视系统。

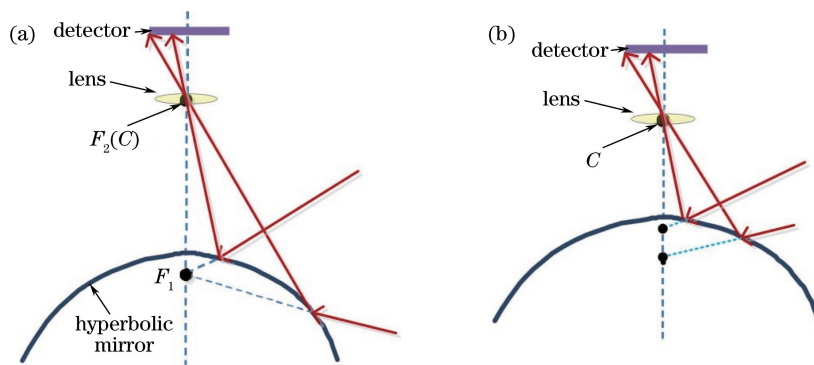


图 1 单视点与非单视点约束示意图。(a) 单视点；(b) 非单视点

Fig. 1 Schematic diagram of restraint with single viewpoint and non-single viewpoint. (a) Single viewpoint; (b) non-single viewpoint

表 1 圆锥曲面镜折反射式周视红外成像系统参数分类

Table 1 Parameters classification of the catadioptric omnidirectional view infrared imaging system with a conical surface mirror

Parameter category	Parameter
Lens group	Lens focal length f
Detector	Detector size d , pixel size d_{pixel}
Structure	Distance between mirror vertex and optical center l , distance between origin and optical center h , system lateral size D
Mirror type	Eccentricity e , distance between origin and mathematic focus p

折反射式周视红外成像系统是沿主轴旋转对称的,所以在二维横截面结构下讨论性能模型,如图 2 所示。 α 是光线入射角,以系统的光轴,即垂直轴作为角度的起始,也将其定义为系统的俯仰角。 d 为探测器尺寸, d_{pixel} 为像元中心距, f 为透镜焦距。 h 为坐标原点到光心 C 的距离, l 为反射镜顶点 V_{ver} 到光心 C 的距离, D 为反射镜口径(通常也是系统横向的尺寸)。反射镜面型设置为圆锥曲面,以两个参数 e 和 p 作为其面型参数,其中 e 为离心率, p 为坐标原点 O 到数学焦点 F 的距离。 s 为反射镜厚度, V_i 和 V_r 分别为入射和反射向量, $n = (n_1, n_2)$ 为反射点处的法向量。

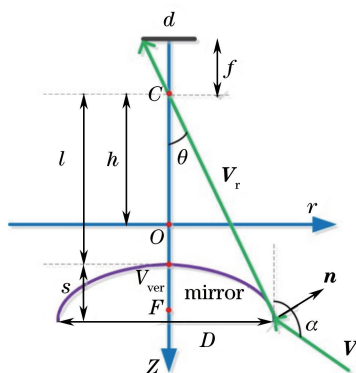


图 2 圆锥曲面镜折反射式周视系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the catadioptric omnidirectional view system with a conical surface mirror

圆锥曲面面型以参数方程形式统一表示如下

$$\begin{cases} z(t) = t \\ r(t) = \sqrt{(e^2 - 1)t^2 + 2pt - p^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中双曲面 $e > 1$, 椭圆面 $0 < e < 1$, 抛物面 $e = 1$ 。

2.2 一般反射镜面型折反射式周视系统的空间分辨力

空间分辨力是影响探测距离的重要因素之一。普通成像系统的空间分辨力取决于镜头焦距和探测器参

数,而折反射式周视红外成像系统涉及的参数较多,因此影响空间分辨力的因素也很多。为简单起见,将折反射式周视系统的空间分辨力分为方位角分辨力和俯仰角分辨力进行讨论。

为配合恒等探测距离的讨论,本小节推导基于更一般的不局限于圆锥曲面的反射镜面型(只需满足平滑并且旋转对称的条件)的折反射式周视系统的通用角分辨力数学表达式,如图3所示,设 θ 是反射光线与光轴夹角, β 是反射点处切线与光轴夹角。

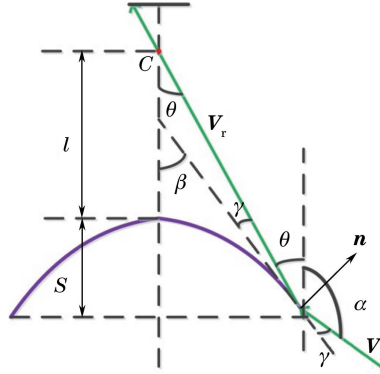


图3 一般反射镜面型折反射式周视系统结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the catadioptric omnidirectional view system with a general surface mirror

根据几何关系得

$$\beta = \gamma + \theta, \quad (2)$$

$$2\gamma + \theta + \alpha = \pi, \quad (3)$$

联立(2)~(3)式

$$\theta = 2\beta + \alpha - \pi, \quad (4)$$

两边取正切

$$\tan \theta = \frac{2 \tan \beta + \tan \alpha (1 - \tan^2 \beta)}{1 - \tan^2 \beta - 2 \tan \beta \tan \alpha}. \quad (5)$$

设光束在探测器上的投影极径为 R ,而 $\tan \theta = R/f$,所以(5)式写为

$$R = f \cdot \frac{2 \tan \beta + \tan \alpha (1 - \tan^2 \beta)}{1 - \tan^2 \beta - 2 \tan \beta \tan \alpha}, \quad (6)$$

$\tan \beta$ 根据切线的特点,可以表示为

$$\tan \beta = \frac{-n_2}{n_1}, \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_r - 2 \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} \left(\frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} \cdot \mathbf{V}_r \right), \quad (8)$$

(8)式可以被进一步解算为

$$\mathbf{V}_i = \left[\frac{2n_1^3 + n_1 n_2 (l + s) - n_1 \|\mathbf{n}\|^2}{\|\mathbf{n}\|^2}, \frac{2n_1^2 n_2 + 2n_2^2 (l + s) - (l + s) \|\mathbf{n}\|^2}{\|\mathbf{n}\|^2} \right]. \quad (9)$$

$\tan \alpha$ 可以表示为

$$\tan \alpha = \frac{n_1 \|\mathbf{n}\|^2 - 2n_1^3 - n_1 n_2 (l + s)}{2n_1^2 n_2 + 2n_2^2 (l + s) - (l + s) \|\mathbf{n}\|^2}. \quad (10)$$

\mathbf{n} 以 t 为参数,所以 $\tan \alpha$ 和 $\tan \beta$ 均以 t 为参数。对于俯仰角分辨力有

$$V_{\text{IFOVV}} = \frac{\partial \alpha}{\partial R} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial R} = \frac{\frac{\partial \alpha}{\partial n_1} \cdot \frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial \alpha}{\partial n_2} \cdot \frac{\partial n_2}{\partial t}}{\frac{\partial R}{\partial t}}, \quad (11)$$

对于方位角分辨力,则可以表示为

$$V_{\text{IFOVH}} = \frac{2\pi}{2\pi R} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1 - \tan^2 \beta - 2 \tan \beta \tan \alpha}{2 \tan \beta + \tan \alpha (1 - \tan^2 \beta)} \quad (12)$$

2.3 一般反射镜面型折反射式周视系统的探测距离

Furxhi O 等^[18]推导了折反射式周视红外成像系统探测距离的通用公式为

$$V_{\text{Range}}(\theta) = \frac{D_{\text{TGT}} (C_{\text{TARGET}})^{\frac{1}{2}}}{V \sqrt{V_{\text{IFOVV}} \times V_{\text{IFOVH}}} \left[1 + k' \left(\frac{V_{\text{NETD}}}{V_{\text{SCN}_{\text{TMP}}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \times \left[-0.0254 \left(\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}} \right)^5 + 0.2686 \left(\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}} \right)^4 - 0.9282 \left(\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}} \right)^3 + 1.1314 \left(\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}} \right)^2 - 1.6296 \left(\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}} \right)^1 + 7.6343 \right], \quad (13)$$

式中: D_{TGT} 为目标尺度(目标长度和宽度的几何均值); V 为任务标准; k' 为系统校正因子, 与具体系统有关; V_{NETD} 为探测器等效噪声温差; $V_{\text{SCN}_{\text{TMP}}}$ 为场景对比度, 通常取为目标背景温差的 3 倍; C_{TARGET} 为表观目标对比度, 与大气透射率和目标背景温差成正比, 与场景对比度成反比。 $\frac{F\lambda}{d_{\text{pixel}}}$ 与光学系统 F 数、探测波长 λ 、探测器像元中心距 d_{pixel} 有关。

对于一般反射镜面型的折反射式周视系统, 将(11)~(12)式的 V_{IFOVV} 和 V_{IFOVH} 代入(13)式即可计算得到探测距离。

3 恒等探测距离的系统设计方法

系统的探测距离主要是由目标尺度、任务准则和系统角分辨力决定的, 而其中系统角分辨力与系统直接关联。圆锥曲面镜折反射式周视红外成像系统的探测距离会随着俯仰角的变化而变化, 其原因是俯仰角和方位角分辨力会随着俯仰角的变化而变化, 并且它们的几何平均数(系统角分辨力, 也即 $\sqrt{V_{\text{IFOVV}} \times V_{\text{IFOVH}}}$) 是变化的^[18]。图 4(a)是根据之前的工作研制的圆锥曲面镜折反射式周视红外成像系统^[19], 采用的是像元规模为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的非制冷红外焦平面探测器。图 4(b)是运动场一角的成像效果, 成像目标是身高基本相同的 3 个人, 1 人立于 $\alpha = 90^\circ$ (α 定义参考图 2) 的位置[图 4(b)红框], 2 人立于 $\alpha = 60^\circ$ 位置[图 4(b)绿框]。可以看出, $\alpha = 60^\circ$ 的人像明显小于 $\alpha = 90^\circ$ 的, 这意味着图 4(a)的周视系统只以少量像元采样了 $\alpha = 60^\circ$ 视场的目标, 空间分辨力低, 因此, $\alpha = 60^\circ$ 的目标的探测距离也小于 $\alpha = 90^\circ$ 的目标的探测距离。

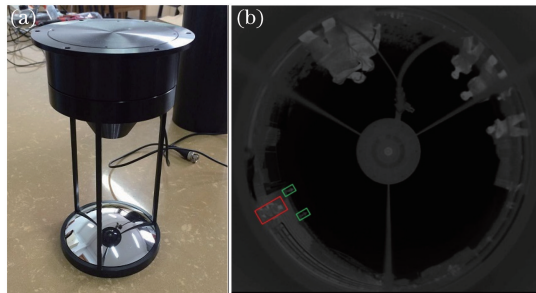


图 4 圆锥曲面镜折反射式周视红外成像系统结构及成像效果。(a) 系统结构; (b) 成像效果

Fig. 4 Structure and imaging effect of the catadioptric omnidirectional view infrared imaging system with a conical surface mirror. (a) System structure; (b) imaging effect

对于不同离心率 e 的圆锥曲面镜折反射式周视系统, 图 5 给出了角分辨力的变化情况, 其中 e 取 0.3、0.5 和 0.7 时表示椭圆面, 取 1 时表示抛物面, 取 1.3、1.4 和 1.5 时表示双曲面。图 5(a)为俯仰角分辨力, 图 5(b)为方位角分辨力[方位角分辨力与投影到探测器上的极径有关, 也就是与俯仰角有关, 所以图 5(b)横坐标为俯仰角]。

恒等探测距离的实质是系统角分辨力恒定。参考文献^[20]曾经讨论过俯仰角分辨力相同的折反射式周视系统, 但是其并未考虑方位角分辨力的影响, 无法满足恒等成像探测距离的要求。因此, 提出恒等探测距离的基本条件是方位角分辨力与俯仰角分辨力的乘积为常数:

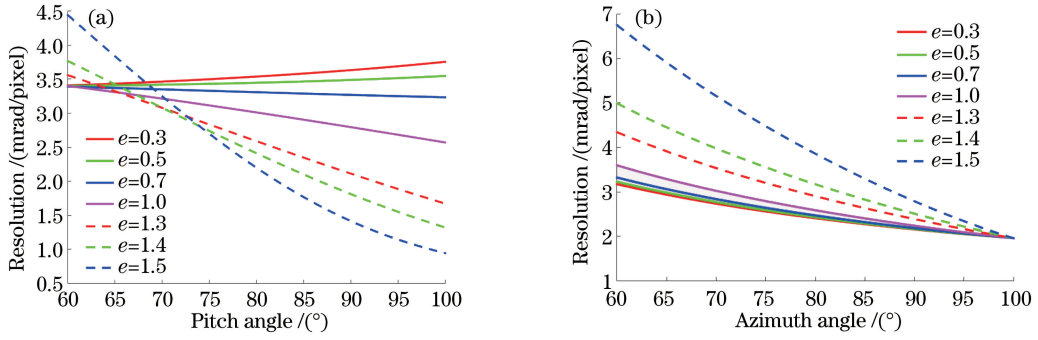


图 5 圆锥曲面镜折反射式周视系统角分辨率。(a) 俯仰角分辨率；(b) 方位角分辨率

Fig. 5 Angular resolutions of the catadioptric omnidirectional view system with a conical surface mirror.

(a) Pitch angle resolution; (b) azimuth angle resolution

$$V_{\text{IFOVH}} \cdot V_{\text{IFOVV}} = \kappa, \quad (14)$$

式中 κ 为常数。

以下讨论满足(14)式恒等探测距离条件时的反射镜面型。根据(11)~(12)式的 V_{IFOVH} 和 V_{IFOVV} 定义, 投影极径与入射角必须满足如下的关系

$$\alpha = \frac{1}{2}\kappa R^2 + C_0, \quad (15)$$

式中 C_0 为常数。设最大的入射角为 α_{max} , 其对应的最大投影半径为 R_{max} 。常数 κ 作为设定值, 可以根据需要的探测距离进行设置。 C_0 可以表示为

$$C_0 = \alpha_{\text{max}} - \frac{1}{2}\kappa R_{\text{max}}^2. \quad (16)$$

对于特定俯仰角视场范围, 设最小的入射角为 α_{min} , 则其对应的投影极径为

$$R_{\text{min}} = \sqrt{2(\alpha_{\text{min}} - C_0) / \kappa}. \quad (17)$$

为计算方便, 将 r 轴下移到与最小俯仰角的镜面反射位置相交, 也即最小俯仰角反射处纵坐标为 0。此时沿 z 轴负方向的镜面不存在, 用虚线表示。图 6 所示为恒等探测距离设计示意图, β 和 θ 按图 3 中定义, 图 6 中不再示意。

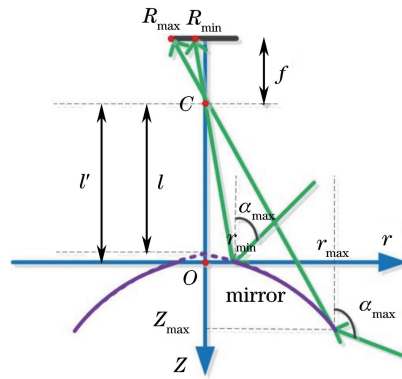


图 6 恒等探测距离设计示意图

Fig. 6 Design sketch of the constant detection range

由(4)式的角度关系可以推得

$$\tan \beta = \frac{1 + \tan \frac{\theta}{2} \tan \frac{\alpha}{2}}{\tan \frac{\alpha}{2} - \tan \frac{\theta}{2}}. \quad (18)$$

而

$$\tan \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{R}{f} \quad (19)$$

联立(15)、(18)、(19)式

$$\tan \beta = \frac{\partial r}{\partial z} = \frac{1 + (\sqrt{f^2/R^2 + 1} - f/R) \tan(\kappa R^2/4 + C_0/4)}{\tan(\kappa R^2/4 + C_0/4) - (\sqrt{f^2/R^2 + 1} - f/R)}, \quad (20)$$

式中 R 为 z 的函数,但是可以看到镜面面型的解析表达式是不能获得的,于是求取面型的数值表达式。为了获得足够的精度, R 变化以像元尺寸 d_{pixel} 为步长。则从 R_{min} 到 R_{max} 有 N 个数值点,相应的会有 N 个反射点,这些反射点需要逐点计算。

对 $r/(l' + z) = R/f$ 进行求导得

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{R}{f} + \frac{(l' + z)}{f} \cdot \frac{\partial R}{\partial z} \quad (21)$$

设反射点的纵坐标为 z_i ,横坐标为 r_i ,每个反射点的切向量正切 $\tan \beta_i$,具体的反射镜面型计算步骤如下:

- 1) 初始 $z_0 = 0, r_0 = R_{\text{min}}(l' + z_0)/f, \tan \beta_0$ 为 $R = R_0 = R_{\text{min}}$ 时的取值;
- 2) 根据(21)式, $\Delta z_i = \frac{\Delta R(1 + z_{i-1})}{f(\tan \beta_i - R_i/f)}, z_i = z_{i-1} + \Delta z_i$,其中 $\Delta R = d_{\text{pixel}}$;
- 3) $\Delta r_i \approx \Delta z_i \tan \beta_i, r_i = r_{i-1} + \Delta r_i$ 。

4 仿真与分析

通过数据仿真来对比圆锥曲面镜与恒等探测距离曲面镜折反射式周视红外成像系统的探测距离,假设除了反射镜面型参数不同外,其余系统参数均相同,且是对于相同的探测任务。

令目标尺寸为 $D_{\text{TGT}} = 5 \text{ m}$,系统的探测俯仰角 $\alpha = 60^\circ \sim 100^\circ$,镜面顶点与相机光心间距设置为 200 mm 。探测器尺寸 $d = 15.36 \text{ mm}$,像元中心距 $d_{\text{pixel}} = 15 \mu\text{m}$,镜头焦距 $f = 20 \text{ mm}$ 。(13)式中的其他参数取为 $\lambda = 10 \mu\text{m}, F = 1.4, C_{\text{TARGET}} = 0.1667, k' = 1560, V_{\text{NETD}} = 25 \text{ mK}$ 。根据文献[18]将背景分为三种混杂程度不同的情况,这样探测任务分为三类:1)中度混杂背景下探测静态目标(SMC);2)低混杂背景下探测静态目标或中度混杂背景下探测移动目标(SLC/MMC);3)低混杂背景下探测移动目标。在仿真时将探测任务设定为 SLC,这样 $V = 2.338, V_{\text{SCN_TMP}} = 7.5 \text{ K}$ 。

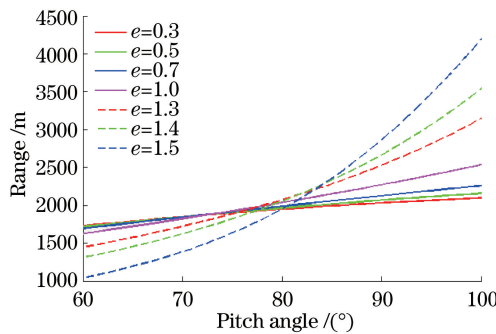


图 7 不同圆锥曲面面型折反射式系统探测距离仿真

Fig. 7 Detection range simulation for different conical surface mirror catadioptric systems

图 7 表示不同圆锥曲面反射镜对应的折反射式周视系统的探测距离仿真结果。离心率 e 取 0.3,0.5 和 0.7 时表示椭圆面,取 1 时表示抛物面,取 1.3,1.4 和 1.5 时表示双曲面。从结果可以看到,探测距离会随着俯仰角视场的增大而变远。不过变化的趋势对于不同的圆锥曲面有所不同。椭圆面($e = 0.3, 0.5, 0.7$)的探测距离增长速度随着俯仰角的增大而不断变缓,并且 e 值越小这种变缓的趋势越明显。抛物面($e = 1$)的变

化则相对均匀,接近一条直线。双曲面($e=1.3, 1.4, 1.5$)的探测距离增长则随着俯仰角的增大而不断加快, e 值越大这种加快的趋势越明显。

从图 7 可知对于圆锥曲面镜所组成的折反射系统,其探测距离对于不同的俯仰角都有着明显的变化。图 8 中仿真了所设计的恒等探测距离模型。其中图 8(a)为 κ 分别取 $6 \times 10^{-6}, 7 \times 10^{-6}$ 和 8×10^{-6} 时设计的面型(κ 的取值主要考虑了镜面的可加工性,并可与圆锥曲面型进行对比),另外图 8(a)中横纵坐标与图 6 中坐标轴对应。图 8(b)表示这三种镜面所组成的系统的探测距离与视场角的关系。从图 8(a)、(b)中可以看到探测距离远的系统的设计镜面会更大更厚。将图 7 和图 8 进行对比可知,所介绍的恒等探测距离参数设计方法可以根据实际需要设计出合理的镜面,以实现不同视场角下的相同探测距离,并且该探测距离可以由 κ 进行调节,甚至可以在大部分视场范围内优于传统圆锥曲面型折反射式周视系统的探测距离。

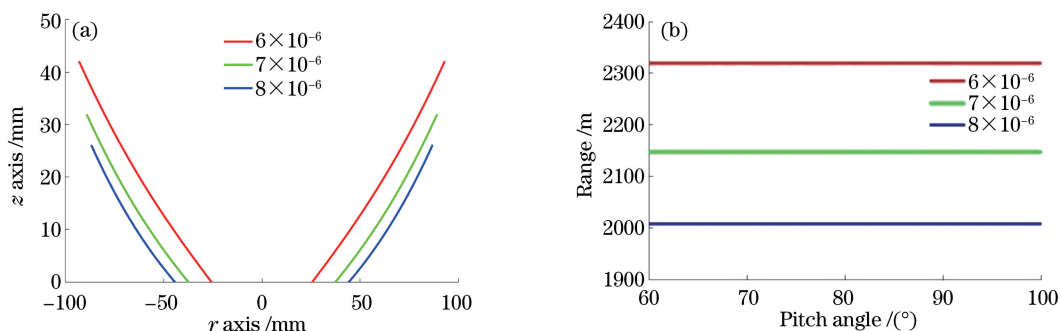


图 8 恒等探测距离设计时的面型和探测距离。(a) 恒等探测距离的反射镜面型;(b) 不同 κ 时的探测距离

Fig. 8 Surface type and detection range of the constant detection range designs. (a) Mirror surface type for constant detection range; (b) detection range for different κ

另外,同已有的折反射式周视红外成像系统进行性能对比。对比对象为 Furxhi O 等^[18]设计的系统,该系统同时也是 IRCameras 公司的周视热像产品^[21],其公开的性能参数为:探测器像元规模 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,像元中心距 $d_{\text{pixel}} = 17 \mu\text{m}$, $V_{\text{NETD}} = 50 \text{ mK}$,俯仰角范围 $32^\circ \sim 100^\circ$ 。当探测目标尺寸 $D_{\text{TGT}} = 2.2 \text{ m}$,在低混杂背景下静态探测时不同俯仰角的探测距离如表 2 第 2 行所示。

表 2 探测距离对比

Table 2 Comparison of detection ranges

Pitch angle $\alpha / (^\circ)$	32	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Furxhi O's data /m	167	192	226	263	283	306	331	358	389	424	463	509
Design 1 /m	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457	457
Design 2 /m	—	—	—	598	598	598	598	598	598	598	598	598

使用相同的像元规模、像元中心距、探测器等效噪声温差和俯仰角范围设计了恒等探测距离的折反射式周视红外成像系统, κ 优化后的取值为 3×10^{-5} ,反射镜面型如图 9 的红线所示。对于探测目标尺寸 $D_{\text{TGT}} = 2.2 \text{ m}$ 时的探测距离如表 2 第 3 行(Design 1)所示。如果减小俯仰角范围,那么还能进一步提高探测距离。表 2

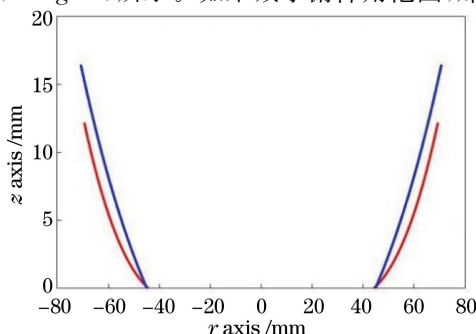


图 9 用于性能对比的反射镜面型

Fig. 9 Mirror surface types for performance comparison

第4行(Design 2)给出了俯仰角范围为 $\alpha=60^\circ\sim 100^\circ$ 时的探测距离, κ 取值为 1.8×10^{-5} ,反射镜面型如图9的蓝线所示。

表2说明所设计的系统在整体探测距离方面要优于Furxhi O的系统。其主要原因是所设计系统的镜面为自由曲面,相较于对比系统的抛物面镜,能灵活控制不同视场光线的投影轨迹,从而根据需要改变不同视场的角分辨力,最终使得探测距离满足恒定的条件。另外,参考图6,所设计的镜面不是连续的,可以重点优化 α_{\min} 到 α_{\max} 的视场范围的探测距离,而小于 α_{\min} 的视场不会产生连带效应,可以实现比较好的探测距离。而抛物面则是一个连续曲面,其俯仰角视场范围在不考虑相机遮挡的情况下是从0到 α_{\max} 连续的,所以优化其中一段俯仰角视场的探测距离会产生连带效应,效果就不会很好。

5 结 论

提出了恒等探测距离折反射式红外成像系统所需满足的条件,推导了满足该条件的反射镜面型,并针对特定系统参数和探测任务进行了反射镜面型和探测距离的仿真,仿真结果显示满足恒等探测距离的反射镜面型是具有可加工性的,探测距离越远所需要的反射镜会越大越厚,而且锥度越大。另外,恒等探测距离的折反射式周视系统在大部分视场角的探测距离优于传统圆锥曲面型的探测距离。除此之外,所设计方法还与已有系统进行了性能对比,结果也说明了所设计方法的有效性。最后,所探讨的结果反映出折反射式周视系统的一个发展方向是基于特定探测任务的自由曲面反射镜面型设计,未来拟在该方面进一步开展工作。

参 考 文 献

- [1] Kato K, Ishiguro H, Barth M. Town digitizing: recording of street views by using omnidirectional vision sensors[C]. 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2000, 4: 2571-2576.
- [2] Bazin J C, Démonceaux C, Vasseur P, *et al.* Rotation estimation and vanishing point extraction by omnidirectional vision in urban environment[J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(1): 63-81.
- [3] Chen C H, Yao Y, Page D, *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] Lou Jingtao, Li Yongle, Xiong Lifu. Catadioptric omnidirectional compressive imaging based on coded aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0411004.
娄静涛, 李永乐, 熊立夫. 基于编码孔径的折反射全向压缩成像技术[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0411004.
- [5] Winters N, Gaspar J, Lacey G, *et al.* Omni-directional vision for robot navigation[C]. Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, 2000: 21-28.
- [6] Murillo A C, Campos P, Kosecka J, *et al.* Gist vocabularies in omnidirectional images for appearance based mapping and localization[C]. 10th OMNIVIS, held with Robotics: Science and Systems, 2010.
- [7] Goedemé T, Nuttin M, Tuytelaars T, *et al.* Omnidirectional vision based topological navigation[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(3): 219-236.
- [8] Scaramuzza D, Siegwart R. Appearance-guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(5): 1015-1026.
- [9] Song Ya, Chai Xinghua, Zhou Fuqiang. Structure design of single camera omnidirectional stereo vision sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0615002.
宋 丫, 柴兴华, 周富强. 单摄像机全向立体视觉传感器的结构设计[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0615002.
- [10] Wu Y H, Hu Z Y, Li Y F. Radial distortion invariants and lens evaluation under a single-optical-axis omnidirectional camera[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2014, 126(2): 11-27.
- [11] Gutin M A, Tsui E K, Gutin O N. Automatic panoramic thermal integrated sensor[C]. SPIE, 2005, 5778: 792-799.
- [12] Nichols J M, Waterman J R, Menon R, *et al.* Performance characteristics of a submarine panoramic infrared imaging sensor[C]. SPIE, 2010, 7660: 766005.
- [13] Bjork C, Wan W. Mid-wave infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications[C]. SPIE, 2010, 7660: 76600B.
- [14] Nichols J M, Waterman J R, Menon R H, *et al.* Modeling and analysis of a high-performance midwave infrared panoramic periscope[J]. Optical Engineering, 2010, 49(11): 113202.
- [15] Baker S, Nayar S K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. International Journal of Computer

- Vision, 1999, 35(2): 175-196.
- [16] Swaminathan R, Grossberg M D, Nayar S K. Non-single viewpoint catadioptric cameras: geometry and analysis[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 66(3): 211-229.
- [17] Perdigoto L, Araujo H. Estimation of mirror shape and extrinsic parameters in axial non-central catadioptric systems[J]. Image and Vision Computing, 2016, 54: 45-59.
- [18] Furxhi O, Driggers R G, Holst G, *et al.* Performance analysis of panoramic infrared systems[C]. SPIE, 2014, 9071: 907112.
- [19] He Yu, Wang Lingxue, Zhou Xingguang, *et al.* Parameters design for single viewpoint infrared omnidirectional view sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111002.
贺 宇, 王岭雪, 周星光, 等. 单视点红外折反射全向成像系统参数设计[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111002.
- [20] Conroy T L, Moore J B. Resolution invariant surfaces for panoramic vision systems [C]. 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 2: 392-397.
- [21] Santa Barbara. Mid range 360° panoramic thermal imager[EB/OL]. [2017-01-03]. <http://www.ircameras.com/wp-content/uploads/2016/05/IRC-SJOS-Panoramic-360-2016-03.pdf>.