

## 非全对称五面镜单视点折反射红外周视系统

周云扬<sup>1</sup>, 吴昱臻<sup>1</sup>, 王岭雪<sup>1\*</sup>, 戎宁涛<sup>1</sup>, 李洪兵<sup>2</sup>, 顾溢汀<sup>1</sup>, 曹峰梅<sup>1</sup>, 蔡毅<sup>1</sup>

(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 100081;  
2. 云南北方光学科技有限公司, 云南昆明 650217)

**摘要:** 综合多视点周视系统和单视点折反射周视系统的优势, 充分利用前者空间分辨力高和后者无需拼接直接成像的优点, 提出了一种分孔径、单视点的非全对称五面镜折反射红外周视系统方案, 构建了单视点约束的非全对称五面镜结构设计流程。针对车辆驾驶应用中前方/左右侧、后方对行人探测距离要求的不同 (分别为 200 m 和 145 m), 使用三套焦距 5.8 mm 和两套焦距 4.1 mm 的红外成像组件, 构成前方、左、右侧均为 64°视场、后方为两个 84°视场的非全对称五面镜折反射红外周视原型系统, 实现对水平 360°、俯仰±29°视场的无遮挡、无缝、无盲区红外成像, 提供全方位、大俯仰的车载实时周视红外图像, 可用于智能交通、自动驾驶、军事侦察等军民领域。

**关键词:** 折反射光学; 周视成像; 红外成像; 非全对称五面镜; 单视点约束

**中图分类号:** TN216      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20230266

### 0 引言

红外成像不受环境光照变化、炫光、逆光、烟尘等影响, 具备一定抗小雨雪、薄雾、雾霾的能力, 是夜间、低能见度条件下全天时感知场景的主要技术手段, 可显著增强车辆安全驾驶能力。近年来, 我国红外焦平面探测器得到长足发展, 像元规模、尺寸、热灵敏度等性能已跻身国际先进水平, 已在国际市场份额中占有重要地位, 低成本红外焦平面探测器在车辆驾驶中的规模应用也指日可待。红外周视系统能够提供周围 360°场景红外图像, 消除车辆驾驶视觉盲区, 能借助算法实现定位、建图、避障、路径规划、导航等功能<sup>[1-3]</sup>, 满足智能驾驶和自动驾驶的迫切需求。

按照技术路线, 可将红外周视系统分为三类: 1) 分时多视点红外周视系统<sup>[4]</sup>。红外光学系统和红外焦平面探测器 (文中将二者称为红外成像组件) 绕与光轴垂直的固定轴 360°旋转, 或光学扫描器 360°旋转, 将入射辐射反射至红外成像组件, 再将具有部分重叠内容的视频序列进行拼接得到周视图像, 其特点是成本低、成像质量好, 但时间分辨力低。典型范例

为红外搜索跟踪系统 (InfraRed Search and Track system, IRST), 如法国的 VAMPIR 系统、以色列的 SPIRITAS 系统、荷兰的 SIRIUS 系统等<sup>[5]</sup>; 2) 分孔径多视点红外周视系统。集成或分布式布置多个红外成像组件覆盖 360°方位视场, 将这些成像组件输出的视频图像进行拼接, 其特点是空间分辨力高, 但近距离目标存在视差, 拼接时有重影。典型范例为车载全景态势感知系统, 如美国 Leonardo DRS 公司的 DVE WIDE 将三个红外成像组件紧凑集成在一起, 获得 321°(107°×3)×30°的大视场<sup>[6]</sup>; 3) 单视点折反射红外周视系统<sup>[7]</sup>。将二次曲面反射镜与常规折射红外光学系统以及红外焦平面探测器结合起来, 不需要运动扫描机构, 仅使用单个面阵探测器即可实现 360°方位视场的凝视成像, 特点是单视点结构约束, 周视视场内的物-像映射关系简单, 能对目标进行精确测向。典型范例为红外周视潜望镜, 如美国海军实验室使用单个 2 048×2 048 中波红外焦平面探测器, 研制出能提供 360°水平视场、-10°~+30°俯仰视场的红外折反射周视潜望镜<sup>[8]</sup>。然而, 由于二次曲面镜的非线性, 该类系统的探

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2241226)

作者简介: 周云扬, 女, 硕士生, 主要从事光学系统设计、计算机视觉方面的研究。

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

测距离会随着俯仰角的不同而改变,且探测距离与单个焦平面探测器的规模密切相关。

文中面向车载周视红外成像应用,综合分孔径多视点周视和单视点折反射周视的优势,根据车载应用中对前方探测距离要求高、对后方探测距离要求较低的实际情况,提出一种分孔径、单视点非全对称五面镜折反射红外周视系统设计方案,前方、左右侧视场均为  $64^\circ$ ,后方则是两个  $84^\circ$  视场,共同组成水平  $360^\circ$ 、俯仰  $\pm 29^\circ$  的周视视场。针对不同焦距的非制冷红外成像组件,完成非全对称五面镜的结构设计,建立了满足单视点约束的非全对称折反射周视结构理论模型;设计出可调整、对准视点的系统机械结构,分析了系统投影转换、图像处理要素,提高其全面性、真实性和可信度。

## 1 全对称多面镜单视点折反射周视系统概述

目前国外研究者已开发出工作在可见光波段的四面镜、五面镜、十面镜单视点约束折反射周视系统<sup>[9]</sup>,如图 1 所示,其共同特点为:多面镜构成对称结构的、底角 ( $\alpha$ ) 为  $45^\circ$  的正多面体;每个镜面对应的摄像机镜头焦距 ( $f$ ) 相同 (即视场角  $\omega$  相等);每个摄像机视点与底面之间的垂直距离 ( $h$ )、到中心轴线的水平距离 ( $l$ ) 相同,摄像机视点是透镜中心 (镜头为薄透镜时) 或透镜物方主点 (镜头为透镜组时)。对称多面镜单视点约束折反射结构的本质是利用正多面体反射镜将多个焦距相同摄像机视点所成的虚像重合于同一点。

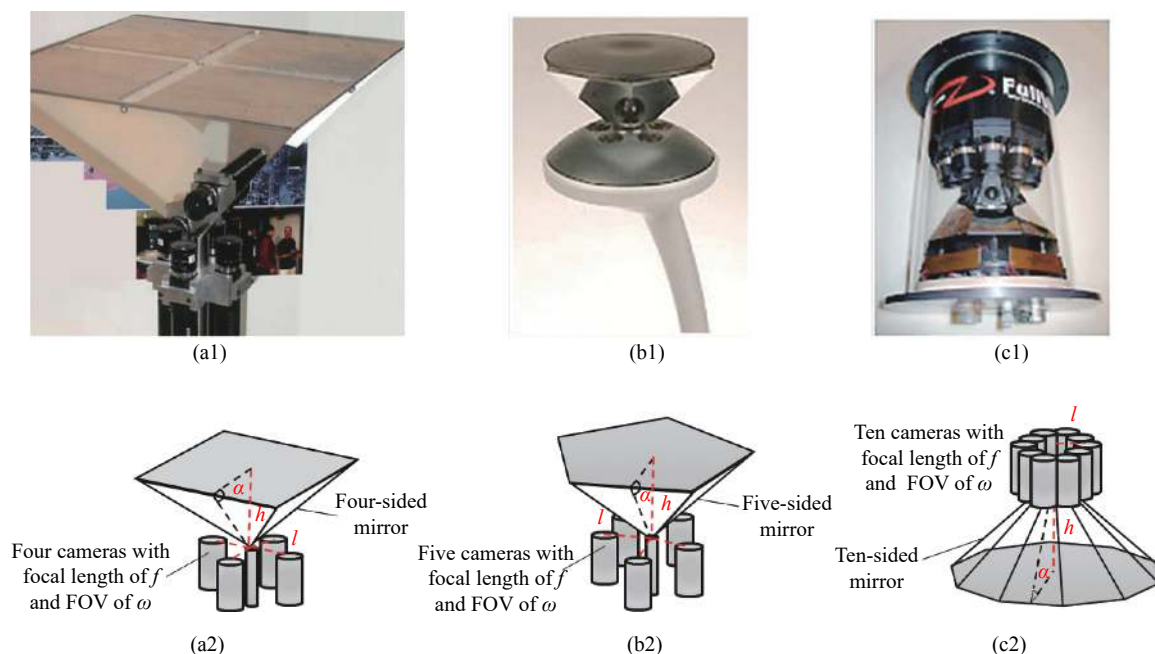


图 1 全对称多面镜单视点约束折反射周视样机及其结构示意图<sup>[9]</sup>

Fig.1 Prototypes and structural diagrams of single-viewpoint constraint catadioptric omnidirectional imaging systems based on symmetrical multi-sided mirrors<sup>[9]</sup>

以全对称五面镜为例,如图 2(a) 所示,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  是采用针孔成像模型简化后的摄像机视点,视点方向垂直向下。视点所对应的每一个棱面都是一块镜面朝外的平面反射镜,与水平面成  $45^\circ$  夹角。所有视点位于棱锥顶点所在的水平面与相应棱面角平分线所在垂直平面的交线上,不同方向上的视点经平面反射镜成像后得到的虚视点重合为同一点,  $P'$  点

成为系统的唯一视点。假设观察者位于  $P'$  点,就能从该点通过不同成像方向的多个摄像机观察到周围无缝的周视图像。图 2(b) 是图 2(a) 中相邻两块平面镜的正面投影图,  $P_1$  和  $P_2$  两个视点关于镜面轴对称的虚像点位于顶点  $O'$  与底面的垂直线  $OO'$  上,并在点  $P'$  重合,通过构建平面镜与摄像机之间的约束关系即可实现单视点约束。

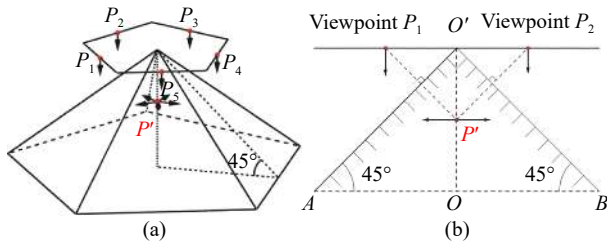


图 2 全对称五面镜单视点约束。(a) 全对称五面镜; (b) 相邻平面镜的正面投影图

Fig.2 Single-viewpoint constraint with symmetrical five-sided mirrors. (a) Symmetrical five-sided mirrors; (b) Orthograph of adjacent mirrors

图 3 是美国 Tonbo Imaging 公司分别使用九套低照度 CMOS 组件和非制冷红外成像组件研制的双波段分孔径多视点周视系统 WolfPack<sup>[10]</sup>。与图 3 中的分孔径、多视点周视系统相比,引入反射面构建的分孔径、单视点周视系统具有的优势有:

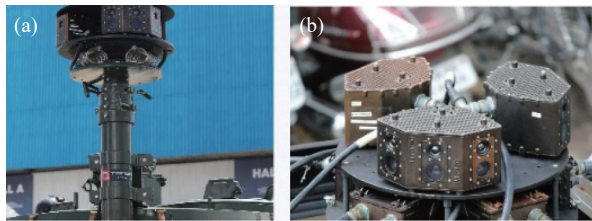


图 3 分孔径多视点周视系统<sup>[10]</sup>

Fig.3 Aperture-divided and multi-viewpoint omnidirectional imaging system<sup>[10]</sup>

- 1) 能有效消除不同摄像机之间的视差;
- 2) 能不经图像拼接, 直接获得水平 360° 视场的周视图像;

3) 能保证水平 360° 视场内的物像一一对应, 同一物体成像唯一, 不存在“跨镜追踪”问题, 提高周视图像中目标的可信度, 既有利于对感兴趣目标进行识别和追踪, 又有利于定量测量目标的方向和运动状态。

## 2 非全对称五面镜单视点折反射红外周视系统设计

### 2.1 系统总体设计

驾驶员多数时候通过观察道路前方和左、右侧来保证安全驾驶, 故要求周视系统中的前视和左、右侧摄像机具有较远的作用距离, 以便能尽早感知路面信息, 从而快速进行避障操作, 对后视摄像机的作用距离要求相对较低。因此, 文中提出一种非全对称五面镜单视点折反射红外周视系统方案。首先, 根据车辆驾驶时对行人探测距离选择合适的红外镜头。假设行人尺寸  $0.5 \times 1.7 \text{ m}^2$ 、温度 309 K, 背景温度 298 K, 红外探测器像元规模  $640 \times 512$ 、像元尺寸  $12 \mu\text{m}$ 、噪声等效温差 (NETD) 40 mK, 使用最小可分辨温差 (MRTD) 公式计算, 得到探测概率 50% 时, 行人和背景的等效黑体温差  $\Delta T'$  与距离  $R$  的曲线  $\Delta T'(R)$  与  $MRTD(R)$  如图 4(a) 所示, 此时 4.1、5.8、9.1 mm 焦距红外镜头的探测距离分别为 145、200、320 m, 相应的水平视场角分别为  $86^\circ$ 、 $67^\circ$ 、 $46^\circ$ , 如图 4(b) 所示。

根据计算结果 (图 4), 为使用五块非全对称的反射镜获得 360° 周视视场, 前视、左右侧均为  $64^\circ$  视场 (焦距 5.8 mm), 后视为两个  $84^\circ$  视场 (焦距 4.1 mm), 视场构成如图 5 所示。传统车载视觉存在盲区检测区

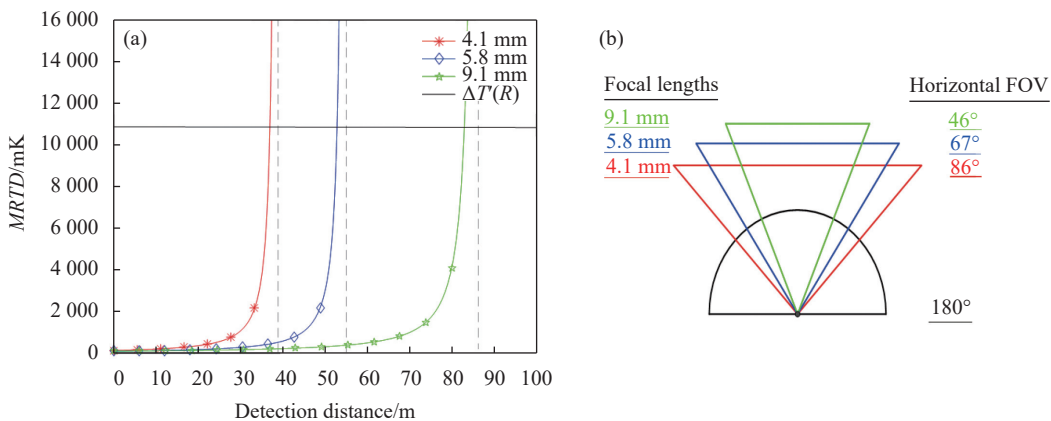


图 4 计算结果。(a) 50% 探测概率时焦距 4.1、5.8、9.1 mm 红外镜头的探测距离; (b) 焦距 4.1、5.8、9.1 mm 红外镜头对应的水平视场角

Fig.4 Calculation results. (a) Detection distance of infrared lenses with focal lengths of 4.1 mm, 5.8 mm and 9.1 mm at 50% detection probability; (b) Horizontal FOV of infrared lenses with focal lengths of 4.1 mm, 5.8 mm and 9.1 mm



域,主要为挡风玻璃两侧倾斜 A 柱遮挡造成的 A 柱盲区(见图 5 中 Blind Spot I)以及后视镜盲区(见图 5 中 Blind spot II),所设计的系统能够有效消除这些盲区。系统选用的红外探测器组件参数见表 1。

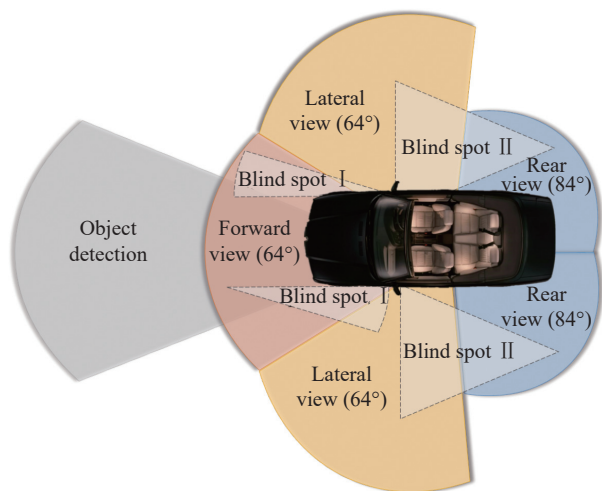


图 5 系统视场构成示意图

Fig.5 FOV composition of the designed system

表 1 系统所用红外成像组件的性能参数

Tab.1 Specifications of infrared imaging modules for the designed system

	Module I ×3	Module II ×2
Spectral range	8-12 μm	
Array format	640×512	
Pixel size	12 μm	
NETD	40 mK @25 °C	
Lens focal length	5.8 mm ( $f_1$ )	4.1 mm ( $f_2$ )
HFOV×VFOV	70°×57.7°	89.8°×75.7°
Lens diameter	55 mm	43 mm
Non-Uniformity Correction (NUC)	Shutterless NUC	

### 2.2 非全对称五面镜结构设计

基于 2.1 节选用的红外成像组件,根据单视点约束要求进行非全对称五面镜结构设计。三套焦距  $f_1 = 5.8 \text{ mm}$  的等效视点为  $P_1、P_2、P_3$ ,对应棱面均与水平面成  $\alpha$  的夹角—镜面倾角;两套焦距  $f_2 = 4.1 \text{ mm}$  的等效视点为  $P_4$  和  $P_5$ ,对应棱面与水平面成  $\beta$  的镜面倾角。不同焦距镜头组合使得五面镜结构底部表现为顶点到中心距离相等、边长与内角不完全相等的非全对称五边形,且红外成像组件在垂直方向上处于不

同高度,如图 6 所示。单视点约束非全对称五面镜结构设计要点是调整不同镜面倾角组合 ( $\alpha、\beta$ ) 与红外成像组件的空间位置,使得视点  $P_1、P_2、P_3、P_4、P_5$  所成的虚像重合于  $P'$  点。

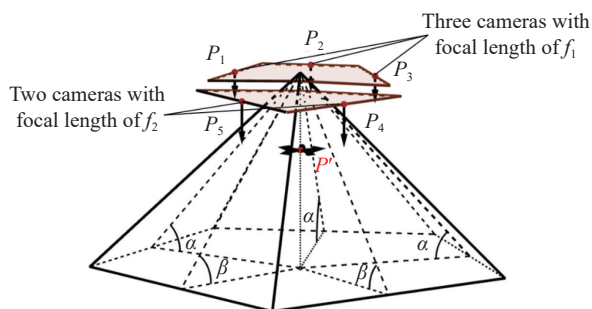


图 6 非全对称五面镜的几何结构示意图

Fig.6 Geometric structure diagram of non-symmetrical five-sided mirrors

为方便计算单视点约束下非全对称五面镜结构参数,选取图 6 中一个方向的红外成像组件进行分析。为不失一般性,令该成像组件的等效视点为  $P$ ,对应的镜面倾角为  $\theta$ ,其他结构参数定义如图 7 所示,并在表 2 中列出,包括:虚视点  $P'$  高度  $m$ 、底面中心点到边长距离  $d$ 、可裁剪镜面高度  $s$ (图 7(b)中红色虚线上方高度)、成像组件等效视点  $P$  的高度  $h$  以及与结构顶点  $O'$  的水平距离  $l$ 、成像组件的垂直视场角  $2\varepsilon$ 、镜头直径  $k$ 。

五面镜结构的整体尺寸由镜面倾角  $\theta$ 、底部中心点到边长的距离  $d$ 、虚视点高度  $m$  决定。假设垂直视场角  $2\varepsilon$  左侧边界光线刚好位于结构底部  $C$  处,视点

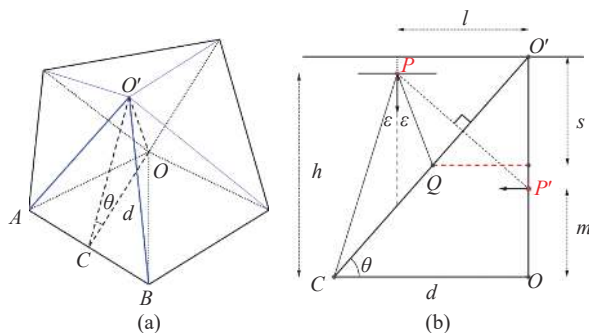


图 7 非全对称五面镜结构的参数定义示意图。(a) 三维图;(b) 侧面投影二维图

Fig.7 Definition of structural parameters for non-symmetrical five-sided mirrors structure. (a) 3D diagram; (b) 2D diagram of side projection

表 2 非全对称五面镜的结构参数

Tab.2 Structural parameters of non-symmetrical five-sided mirrors

Parameters	
Mirror inclination $\theta$	Virtual viewpoint height $m$
Bottom distance $d$	Tailorable mirror height $s$
Viewpoint height $h$	Horizontal distance between the viewpoint and the vertex $l$
Vertical field of view $2\varepsilon$	Lens diameter $k$

$P$  对应的反射镜棱面为图 7(a) 中的平面  $ABO'$ , 该反射面侧面投影为图 7(b) 中的  $CO'$ 。根据不同镜面倾角  $\theta$  和虚视点高度  $m$  组合, 可确定红外成像组件距离中心轴线的水平距离 (近似等于等效视点  $P$  与结构顶点  $O'$  的水平距离  $l$ ) 和距离底面的垂直高度 (近似等于等效视点  $P$  的高度  $h$ ), 表达式为:

$$l = 2(d \tan \theta - m) \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

$$h = 2d \sin \theta \cos \theta + (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) m \quad (2)$$

假设满足公式 (1) 和公式 (2) 时垂直视场角右侧边界光线与反射面相交于  $Q$  点,  $Q$  点所在水平面以上的镜面区域, 即图 7(b) 中红色虚线上方的区域不参与成像, 实际使用时可裁剪, 因此实际可用结构表现为非全对称五棱台, 而平面反射镜表现为等腰梯形, 可裁剪镜面高度  $s$  的表达式为:

$$s = d \tan \theta - \frac{(d \sin \theta - m \cos \theta) \sin 2\varepsilon \sin \theta}{\cos(\theta - \varepsilon) \cos(\theta + \varepsilon)} \quad (3)$$

镜面倾角  $\theta$  太小或虚视点高度  $m$  太高, 都会导致反射棱面反射成像组件自身图像遮挡对周围场景的成像; 镜面倾角  $\theta$  太大或虚视点高度  $m$  太低时, 则需加大棱台尺寸以保证成像的完整性, 因此需要进行镜头不遮挡成像分析以折中调整  $\theta$  和  $m$  的取值。根据几何光学中光线的反射分析红外成像组件刚好不对自身成像时的视场临界角, 如图 8 所示, 将等效视点  $P$  对应的红外成像组件镜头直径  $k$  令为线段  $MN$ , 临界入射光线 I (图 8 中 Ray I) 刚好经过镜头边界点  $M$ , 在  $Q$  点以入射角  $\phi_1$  发生反射, 反射光线经过镜头边界点  $N$  后进入红外成像组件; 临界入射光线 II (图 8 中 Ray II) 在  $C$  点以入射角  $\phi_2$  发生反射, 反射光线经过镜头边界点  $M$  后进入红外成像组件。在此条件下, 令角度  $\angle MPN = 2\varepsilon'$ 。

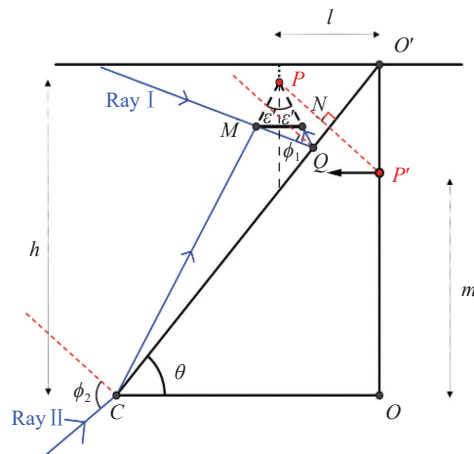


图 8 无遮挡成像分析

Fig.8 Unoccluded imaging analysis

根据几何关系可得  $\phi_1 = \theta - \varepsilon'$ ,  $\phi_2 = \theta + \varepsilon'$ , 此时还满足以下几何关系:

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta + \varepsilon'\right) = \frac{2h - 2m - (k/\tan \varepsilon')}{2l + k} \quad (4)$$

根据公式 (4) 可求解  $\varepsilon'$  的两个值, 分别令为  $\varepsilon_1'$  和  $\varepsilon_2'$ , 得:

$$\begin{cases} \varepsilon_1' = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ \varepsilon_2' = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} a = \tan 2\theta + \frac{2h - 2m}{2l + k} \\ b = \frac{2l - 2 \times (h - m) \tan 2\theta}{2l + k} \\ c = \frac{k \tan 2\theta}{2l + k} \end{cases} \quad (6)$$

根据公式 (5) 和公式 (6) 计算当前参数时, 红外成像组件刚好不对自身成像时的垂直视场角  $\varepsilon_1'$ 、 $\varepsilon_2'$ , 与实际的垂直视场角  $\varepsilon$  (数值见表 1) 做比较, 若  $\varepsilon_1' < \varepsilon < \varepsilon_2'$ , 则该结构下的系统能够实现无遮挡成像。

综上所述, 根据单视点约束设计非全对称五面镜结构的主要步骤如图 9 所示, 包括:

1) 针对特定任务中目标与背景之间的温度差, 根据空间分辨力和作用距离要求选取合适的红外成像组件及其镜头参数, 如表 1 所示;

2) 根据垂直视场角  $2\varepsilon$ 、镜头直径  $k$  等选取合适的视点高度  $m$  与镜面倾角  $\theta$  的组合, 通过求解红外成像组件等效视点  $P$  的高度  $h$  以及与结构顶点  $O'$  的水平

距离  $l$ , 确定红外成像组件的精确位置, 再根据反射视场确定结构底部中心点到边长的距离  $d$ 、可裁剪镜面高度  $s$ , 从而确定非全对称五棱台反射镜的具体尺寸;

3) 根据上一步获得的系统结构参数进行视场有

无遮挡的分析;

4) 根据视场无遮挡分析结果优化系统结构, 直至获得无遮挡、结构尺寸小、易加工的非对称五棱台反射镜。

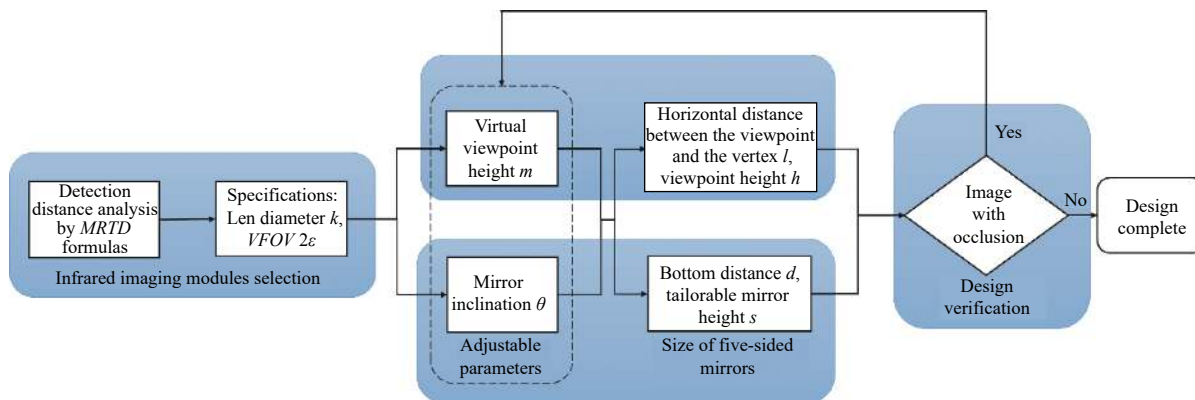


图 9 非全对称五面镜结构的设计流程图

Fig.9 Flowchart of designing non-symmetrical five-sided mirrors structure

### 2.3 五方向平面-柱面投影获得周视图像模型

满足单视点约束的非全对称五面镜和不同焦距红外镜头将五个方向的场景辐射反射并汇聚到五套垂直放置的红外焦平面探测器, 如图 10 所示, 由于虚视点  $P'$  所在轴线可当作旋转轴, 采用柱面投影将图 10(a) 五个方向上的平面图像转换为无缝周视图像, 如图 10(b) 所示。图 10 中红色线、蓝色线分别代表焦距  $f_1 = 5.8 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 4.1 \text{ mm}$  的红外成像组件。另外, 为尽可能保留前方和左、右侧视场信息, 将焦距  $f_1 = 5.8 \text{ mm}$  作为柱面投影半径进行周视图像投影。同时, 三幅焦距  $f_1 = 5.8 \text{ mm}$  和两幅  $f_2 = 4.1 \text{ mm}$  的图像也可以作为大视场图像进行保存和供使用者调用。

为简化描述, 令图 10(a) 中的一幅图像宽为  $W$ , 高

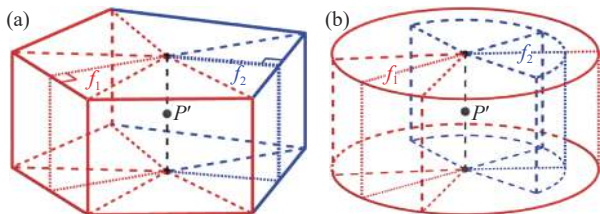


图 10 平面投影到周视图像的转换示意图。(a) 五个方向上的平面图像; (b) 柱面投影后的周视图像

Fig.10 Conversion from planar projection to omnidirectional image. (a) Planar images in five directions; (b) Omnidirectional image after cylindrical projection

为  $H$ , 并令红外镜头光心与红外焦平面探测器中心重合, 则图像中心点  $(C_x, C_y)$  满足:

$$\begin{cases} C_x = \frac{W}{2} \\ C_y = \frac{H}{2} \end{cases} \quad (7)$$

图像坐标  $(x, y)$  投影为图 10(b) 中的柱面时坐标令为  $(x', y')$ , 那么, 坐标  $(x, y)$  至坐标  $(x', y')$  的转换公式需要分两种情况讨论:

1) 前方和左、右侧视场焦距  $f_1 = 5.8 \text{ mm}$  时的转换公式:

$$\begin{cases} x' = f_1 \arctan\left(\frac{C_x}{f_1}\right) + f_1 \arctan\left(\frac{x - C_x}{f_1}\right) \\ y' = \frac{f_1 (y - C_y)}{\sqrt{(x - C_x)^2 + f_1^2}} + C_y \end{cases} \quad (8)$$

2) 左后方、右后方视场焦距  $f_2 = 4.1 \text{ mm}$  时的转换公式:

$$\begin{cases} x' = f_1 \arctan\left(\frac{C_x}{f_2}\right) + f_1 \arctan\left(\frac{x - C_x}{f_2}\right) \\ y' = \frac{f_1 (y - C_y)}{\sqrt{(x - C_x)^2 + f_2^2}} + \frac{C_y f_1}{f_2} \end{cases} \quad (9)$$

### 2.4 系统机械结构设计

利用 ProE 软件对该系统进行仿真设计, 提出可调整、对准视点的机械结构方案, 保证不同焦距红外

成像组件视点能精确重合为同一点,如图 11 所示。该周视系统主要可分为镜面反射区域、红外成像组件、中心柱轴以及相关支架。红外成像组件通过固定在圆盘平台上与中心柱轴保持一定的水平和垂直距离,镜面反射区域主要由反射镜支架与反射镜面组成,水平与垂直方向上增加平面支架保证倾角的稳定性和准确性,支架表面刻制凹槽保证两者的贴合。反射镜面由具有一定厚度、内部均匀、拥有光滑平整前表面的浮法玻璃组成,有利于红外辐射的镜面反射。每个红外成像组件采集对应反射镜面反射的红外辐射,共同构成 360°红外周视图像。

为使多个视点对准于单个虚视点以保证单视点约束,设计了红外成像组件空间位置可调整的机械结构。一方面,在中心柱轴上放置不同数量的调节圈调

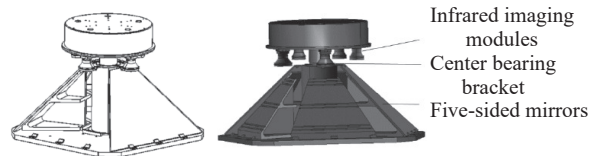


图 11 系统机械结构设计图

Fig.11 Mechanical structure of the designed system

整高度,并通过锁紧圈固定;另一方面,红外成像组件采用固定座组件确定在圆盘上的位置,该组件可在一定范围内移动,用于调节红外成像组件的水平距离,下方放置不同数量的调节圈调整垂直高度。中心柱轴调整机制和固定座调整机制确保可手动调节红外成像组件的空间位置,避免结构加工、人工装调误差造成的视点位置偏移。该系统经过机械设计后的最终结构参数如表 3 所示。

表 3 系统结构参数的理论设计值与实际值

Tab.3 Theoretical and practical values of structure parameters in the proposed system

		Theoretical values	Actual values
Forward and lateral view	Mirror inclination $\theta$	48.15°	
	Bottom distance $d$	26.23 cm	
	Vertical field of view $2\epsilon$	60°	57.7°
	Horizontal distance between the viewpoint and the vertex $l$	9.95 cm	11.62 cm
	Viewpoint height $h$	1.1 cm	1.28 cm
Rear view	Mirror inclination $\theta$	51.9°	
	Bottom distance $d$	22.97 cm	
	Vertical field of view $2\epsilon$	76°	62.36°
	Horizontal distance between the viewpoint and the vertex $l$	9.73 cm	11.29 cm
	Viewpoint height $h$	2.39 cm	2.77 cm
	Virtual viewpoint height $m$	19.27 cm	17.6 cm
	Tailorable mirror height $s$	7.19 cm	9.22 cm

### 3 原型系统实物与周视图像处理

加工、组装和调试后的原型系统实物照片如图 12 所示。当系统工作时,五个红外成像组件根据外同步信号同时采集视频图像,一帧图像的大小为 640 pixel×480 pixel。

由于使用两种焦距的红外镜头 ( $f_1 = 5.8$  mm和  $f_2 = 4.1$  mm),首先需要对其一种焦距的图像进行缩放。为尽可能保留前方和左、右侧视场信息,经过柱

面投影后,对  $f_2 = 4.1$  mm的图像进行放大和上采样处理,放大因子  $\gamma$  由焦距  $f_1 = 5.8$  mm和  $f_2 = 4.1$  mm对应的红外成像组件垂直视场角  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  决定,公式为:

$$\gamma = \frac{\tan(\epsilon_2/2)}{\tan(\epsilon_1/2)} \quad (10)$$

由公式 (10) 可得,放大因子  $\gamma = 1.41$ 。

为获得无缝的红外周视图像,焦距  $f_1 = 5.8$  mm、 $f_2 = 4.1$  mm 的视频图像在水平方向上的冗余视场分



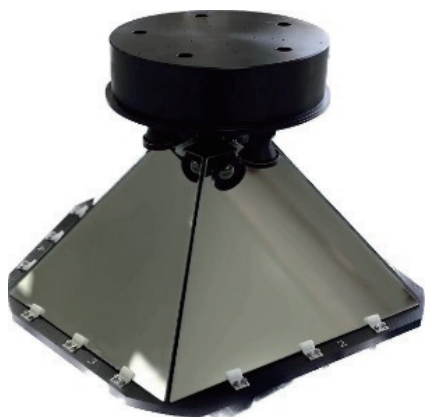


图 12 文中原型系统的实物照片

Fig.12 Picture of the designed system

别为 6.5% ( $640 \times 6.5\% \approx 42$  pixel) 和 8.6% ( $640 \times 8.6\% \approx 55$  pixel), 因此,  $f_2 = 4.1$  mm 的图像放大后与  $f_1 = 5.8$  mm 的图像进行中心对齐, 再匹配和切割冗余视场, 即可获得无缝周视红外图像。目前, 一幅完整的周视图像的大小为 3 440 pixel $\times$ 480 pixel。

因曝光情况与自动增益的不同, 需对周视红外图

像进行统一的灰度平衡。取五个方向上同时采集的红外图像, 分别计算其均值  $\mu_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  与方差  $\sigma_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ , 得到这五帧红外图像的平均均值  $\mu_{\text{average}}$ 、平均方差  $\sigma_{\text{average}}$ , 表达式如下:

$$\begin{cases} \mu_{\text{average}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \mu_i \\ \sigma_{\text{average}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sigma_i \end{cases} \quad (11)$$

以此为参考分别对五帧图像  $I_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  进行灰度平衡, 输出结果为  $O_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ , 表达式为:

$$O_i = \frac{\sigma_{\text{average}}}{\sigma_i} (I_i - \mu_i) + \mu_{\text{average}} \quad (12)$$

综上所述, 该系统红外周视图像的获取需要进行的图像处理步骤主要包括: 柱面投影、缩放、中心对齐、冗余部分切割、灰度平衡, 最终获得完整且无缝的红外周视图像, 如图 13 所示, 前方和左、右侧红外成像组件作用距离较远, 扩大驾驶员视野, 满足全天候、无盲区的观察需要。



图 13 系统成像结果

Fig.13 Imaging result of the designed system

## 4 结 论

文中针对车辆驾驶应用中前方和左、右侧、后方向行人探测距离要求的不同 (分别为 200 m 和 145 m), 提出并实现了前方和左、右侧均为 64°视场、后视为两个 84°视场的非全对称五面镜单视点折反射红外周视系统, 利用非全对称五面镜将三套焦距  $f_1 = 5.8$  mm 和两套  $f_2 = 4.1$  mm 的红外成像组件的虚视点重合为同一点, 建立了单视点约束非全对称五面镜结构的设计流程, 即根据空间分辨力和作用距离要求选取合适的红外成像组件及其镜头参数后, 再根据单视点结构

约束条件确定非全对称五棱台反射镜的具体尺寸, 并根据系统结构参数进行视场遮挡分析后进一步优化系统结构, 直至获得无遮挡、结构尺寸小、易加工的非对称五棱台反射镜。完成加工、装调非全对称五面镜折反射红外周视原型系统后, 提出了包含柱面投影、缩放、中心对齐、冗余部分切割、灰度平衡等步骤的周视红外图像处理流程, 最终实现对水平 360°、俯仰 $\pm 29^\circ$ 视场的无遮挡、无缝、无盲区红外成像。该系统获取场景的红外图像全面、真实和可信, 有助于消除车辆驾驶观察盲区, 提升智能驾驶能力, 在民用和军用领域都有广阔的应用前景。未来将开展系统



小型化方面的工作。

### 参考文献:

- [1] Ying X, Liu L, Wang Y, et al. Mapping degeneration meets label evolution: learning infrared small target detection with single point supervision [DB/OL]. (2023-04-04) [2023-05-20]. <https://arxiv.org/abs/2304.01484>.
- [2] Xu Z, Zhuang J, Liu Q, et al. Nighttime FIR pedestrian detection benchmark dataset for ADAS [C]//Pattern Recognition and Computer Vision, Part IV, First Chinese Conference, PRCV 2018, 2018: 322-333.
- [3] Qi Nannan, Jiang Pengfei, Li Yansheng, et al. Infrared vehicle detection based on visual saliency and target confidence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0604005. (in Chinese)
- [4] Vincent Leboucher, Gilles Aubry. High-resolution panoramic images with megapixel MWIR FPA [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9070: 90700F.
- [5] Liu Zhongling, Yu Zhenhong, Li Liren, et al. Status and development trend of infrared search and track system [J]. *Modern Defence Technology*, 2014, 42(2): 95-101. (in Chinese)
- [6] LEONARDO DRS. Enhanced Situational Awareness (ESA) system [EB/OL]. [2023-05-20]. <https://www.leonardodrs.com/what-we-do/products-and-services/enhanced-situational-awareness-esa-system/>.
- [7] Zhou Xingguang, He Yu, Wang Lingxue, et al. Design and performance analysis of single-viewpoint hyperbolic catadioptric infrared panoramic imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0918004. (in Chinese)
- [8] Nichols J M, Waterman J R, Menon R, et al. Performance characteristics of a submarine panoramic infrared imaging sensor [C]//Infrared Technology and Applications XXXVI, SPIE, 2010, 7660: 54-62.
- [9] Nalwa V. Outwardly pointing cameras [EB/OL]. [2023-05-20]. [http://www.fullview.com/Outwardly\\_Pointing\\_Cameras.pdf](http://www.fullview.com/Outwardly_Pointing_Cameras.pdf).
- [10] WOLFPACK. Multi aperture staring array panoramic imaging [EB/OL]. [2023-05-20]. <https://tonboimaging.com/defense/products/land/sa/wolfpack/>.

## Non-symmetrical five-sided mirrors based single viewpoint catadioptric infrared omnidirectional imaging system

Zhou Yunyang<sup>1</sup>, Wu Yuzhen<sup>1</sup>, Wang Lingxue<sup>1\*</sup>, Rong Ningtao<sup>1</sup>, Li Hongbing<sup>2</sup>,  
Gu Yiting<sup>1</sup>, Cao Fengmei<sup>1</sup>, Cai Yi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Yunnan KIRO Photonics Co., Ltd., Kunming 650217, China)

### Abstract:

**Objective** Infrared omnidirectional imaging system can provide 360° image of the surrounding environment, enhancing vehicle safety and autonomous driving ability in low visibility and nighttime conditions. Recent developments in uncooled infrared focal plane detectors have paved the way for large-scale application of low-cost infrared imaging modules in vehicles. Therefore, an aperture-divided non-symmetrical five-sided mirrors based single viewpoint constraint catadioptric omnidirectional infrared imaging system is proposed, which combines the strengths of both multi-viewpoint omnidirectional imaging system and single-viewpoint catadioptric omnidirectional imaging system, taking advantages of the high spatial resolution of the former and the direct imaging without splicing of the latter.

**Methods** To solve the problem that the requirement for detection distances of pedestrian in the front and lateral view, such as 200 m, is generally higher than that in the rear view, such as 145 m (Fig.4). Three sets of infrared imaging modules with focal length of 5.8 mm, two sets with focal length of 4.1 mm (Tab.1), and structure based on stitching multi-mirror are used to construct prototype. The structure of the non-symmetrical five-sided mirrors

and the spatial position of the infrared imaging modules (Fig.7) are adjusted so that the virtual viewpoints formed by multiple infrared imaging modules with different focal lengths are overlapped at the same point (Fig.6).

**Results and Discussions** The design process of single viewpoint constraint non-symmetrical five-sided mirror structure is established (Fig.9). The imaging model of the planar projection converted into omnidirectional image by cylindrical projection is analyzed (Fig.10). A mechanical structure scheme that can be adjusted and aligned with the viewpoint is proposed (Fig.11). The prototype system is processed and assembled (Fig.12), which can provide 360° horizontal azimuth and  $\pm 29^\circ$  elevation field of view (Fig.13).

**Conclusion** To address the different requirements for pedestrian detection distances in different direction, a non-symmetrical five-sided mirrors based single viewpoint constraint catadioptric omnidirectional infrared imaging system which has 64° FOV for the front view, left and right lateral view respectively and two 84° FOV for the rear view is proposed. According to the spatial resolution and distance, the appropriate infrared imaging modules are selected, and the specific size of the non-symmetric mirror is determined with the constraint of the single viewpoint. Then the system structure is further optimized with the imaging analysis until the system has small structure size and can image without occlusion. After successfully processing and installing the system, a series of omnidirectional image processing steps including cylindrical projection, scaling, center alignment, redundant part cutting, grayscale balance are also proposed. This system has the potential to serve all-round, large-pitch vehicle-mounted infrared imaging information, which can provide theoretical basis and technical support for applications in military and civilian fields such as intelligent transportation, automatic driving, and military reconnaissance.

**Key words:** catadioptric optics; omnidirectional imaging; infrared imaging; non-symmetrical five-sided mirrors; single viewpoint constraint

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (U2241226)