

## 基于单红外光与单白光的双光谱测距方法\*

金 阳<sup>1\*\*</sup>, 田军委<sup>1</sup>, 于亚琳<sup>2</sup>, 张 震<sup>1</sup>, 刘雪松<sup>3</sup>

(1. 西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021; 3. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014030)

**摘 要:** 为了克服红外光与白光成像机理不同引起的图像信息无法同步、无法同时使用红白光双光谱系统实现测距的问题, 以待测目标的边界作共性特征, 采用红白光相机对同一目标的共性特征进行采集, 将采集到的图像通过高斯算子进行平滑处理, 再运用 Laplace 扩展算子进行边界特征检测, 将不同距离下目标边界像素位置数据进行线性拟合并建立测距误差模型, 从而生成边界特征匹配算法。研究结果表明边界特征匹配算法可以使红白光双目系统克服成像机理不同这一问题实现测距功能, 测距范围可达到 40 m, 最大相对误差是 0.975%。

**关键词:** 双光谱; 测距功能; 边界特征匹配; 测距误差模型

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0067-07

## Double Spectral Ranging Method Based on Single Infrared Light and Single White Light

JIN Yang, TIAN Junwei, YU Yalin, ZHANG Zhen, LIU Xuesong

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, CHN; 2. School of Opto-electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, CHN; 3. Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co. LTD, Baotou Inner Mongolia 014030, CHN)

**Abstract:** With different imaging mechanisms of infrared light and visible light, the image information could not be synchronized, and the dual spectral system of infrared light and visible light could not be used simultaneously to achieve the ranging function. In this paper, the boundary of the target to be measured was used as a common feature, infrared and visible light cameras were used to collect the common features of the same target, the collected image was smoothed by the Gaussian operator, and then the Laplace expansion operator was used to detect the boundary features, linear fitting was performed on the pixel position data of the target boundary at different distances, and a ranging error model was established, so as the boundary feature matching algorithm was generated. The research results showed that the boundary feature matching algorithm could enable the infrared visible binocular sys-

收稿日期: 2022-07-25

\* 基金项目: 陕西省重点研发计划(2021GY-318); 陕西省重点研发计划(2022GY-068)

作者简介: 金 阳(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事人工智能领域光学及图像处理方面的研究; (E-mail: 1225094185@qq.com)

田军委(1973—), 男, 工学博士, 博导, 主要从事智能制造与人工智能方面研究;

于亚琳(1981—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事计算机软件及应用方面研究。

\*\* 通讯作者

tem to overcome the problem of different imaging mechanisms, and achieve ranging. The ranging range could reach 40 m, and the maximum relative error is 0.975%.

**Key words:** double spectrum; distance function; boundary feature matching; ranging error model

## 引 言

红外技术凭借其可操控性强、响应迅速、无需接触待测目标、安全性强、可通过温度特性区分待测目标与背景环境等优点被工业、医疗、农业、矿业等领域所采用<sup>[1]</sup>。当前市面上普遍使用的三目红外热像仪体积较大,实现测温、测距、图像信息采集等功能时主板运算量大,对主板性能要求较高,因此使用该类三目红外热像系统成本较高。相对于三目红外系统,红白光双目系统可以有效节省空间,减轻主板运行负担,提高系统执行效率,降低成本。但红外光与白光成像机理不同,故无法实现红白光双目测距。因此,针对红白光双目系统在测距领域进行研究具有极强的必要性。

文章针对装备单红外与单白光的双目系统如何实现远距离测距展开研究。以红外光谱的辐射特性以及白光光谱的光学特性作为理论基础,将边界特征作为两者之间共性。采用高斯算子优化双目成像效果,拉普拉斯算子进行边界特征检测,将不同距离下采集的边界像素数据与真实距离数据进行线性拟合并建立数学模型,再结合测距误差模型进行补偿算法研究,最终提出边界特征匹配算法实现距离检测<sup>[1-4]</sup>。

## 1 双光谱测距原理

采用双光谱立体视觉技术可以确定被测物体的三维坐标,图1为双目立体视觉原理图,左右两台相机的焦点分别设定为 $O_L$ 与 $O_R$ ,图中展示了其各自的光轴与成像面。假定左右相机的内外部参数理想同步,焦距是 $f$ ,焦点之间的距离作为基线 $B$ ,两台相机位于同一平面上,投影中心 $Y$ 的坐标相等。则在某一时刻拍摄的空间点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在左右像机上的成像点为 $P_L$ 与 $P_R$ 。视差 $D$ 为 $P_L - P_R$ 的绝对值,空间点 $P$ 与两摄像头之间的距离 $z = Bf/|P_L - P_R|$ 以及横纵坐标 $x = Bx_{\text{left}}/|P_L - P_R|$ 、 $y = By/|P_L - P_R|$ ,图2为基线长度对测距误差造成的影响<sup>[5-8]</sup>。

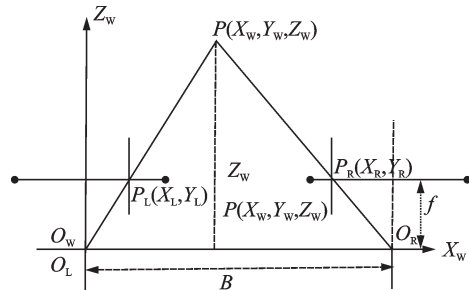


图1 双目立体视觉原理图

Fig.1 Schematic of binocular stereo vision

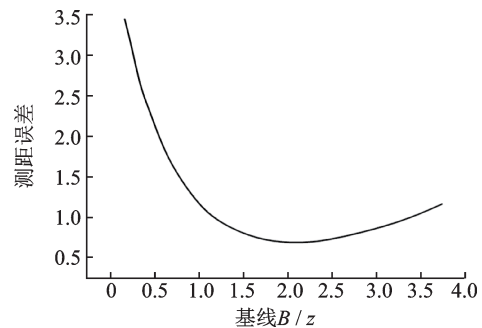


图2 基线B与测距误差的关系

Fig.2 Relationship between baseline B and ranging error

### 1.1 红外成像机理

红外线别名红外辐射,本质是一种电磁波,波长范围在 $0.78 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ ,介于微波与可见光之间。近红外光的波长范围在 $0.78 \sim 2.0 \mu\text{m}$ ,中远红外光的波长范围在 $2.0 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 之间。主动式与被动式红外成像是红外成像系统的两种存在形式。

#### (1) 主动式红外成像机理

系统自带的红外光源照射到目标或者背景后,会通过物体表面反射,由光学系统中物镜接收,为使探测器更好的收集反射回来的红外辐射线,光学系统会对信号进行空间滤波。探测器会将接收的辐射信号转换为电信号,由电信号生成在显示器中供人们观察的图像。

#### (2) 被动式红外成像机理

现实中一切物体,其温度若高于绝对零度,便会向外界不间断辐射出红外线,物体自身温度是红外辐射强弱的关键影响因素,通常辐射强度会伴随物体自身温度的上升而增强。所以运用探测器检测目标与背景间的辐射强度差,能够生成亮度差异明显的红外热像图。热像图同时也是物体间表面

发射率差异的展现形式,被动式红外成像机理普遍应用于热像仪当中。

### 1.2 白光成像机理

白光又称可见光,通常指波长范围为390~780 nm的电磁波。光源为太阳,地物反射可见光,传感器的收集器接受地物反射可见光,由探测器将可见光信号转换为化学信号或者电信号,由处理器对信号进行处理以获取数据,通过输出器输出为需要格式。成像方式常见有推扫式和扫描式。在日照条件好时的成像效果更佳<sup>[9-11]</sup>。

## 2 双光谱目标边界检测方法研究

经过试验发现,当被测目标出现在相同规格相同像素的双光谱红白光相机中时,物体边界特征可以作为共性点在红外与白光相机中捕捉到,所以实验中会根据物体在双光谱中的成像效果选择特征最为明显的一条边界作为红白光光谱中的共性参考目标,并通过边界检测算法分别在双光谱中读出边界像素坐标位置。

### 2.1 边界检测算子研究

不同物体表面空间点的三维坐标数据共同构成空间中离散样点的集合,集合里具有较多可以体现物体原始曲面边界特征的样点,这些样点一起构成了物体表面样本采集的边界特征<sup>[12]</sup>。

检测采集图像中的边缘特征,以灰度图为例,通过边缘两侧灰度值差异来分辨边缘位置,所以在检测灰度图像边缘时,只需寻找灰度差异显著位置,当灰度差异越显著,会使对比度提升,边缘特征会更清晰<sup>[13-14]</sup>。

图像矩阵是离散的,连续函数与离散函数可分别通过导数与差分得到变化率<sup>[15]</sup>,差分是用相近两个数的差表示变化率,向后差分表达式为:

$x$ 方向的差分:

$$G_x(n,y)=G(n,y)-G(n-1,y) \quad (1)$$

$y$ 方向的差分:

$$G_y(x,n)=G(x,n)-G(x,n-1) \quad (2)$$

将原图像与一个算子进行卷积来实现图像导数的计算,一般得到的是图像近似导数。用Prewitt算子计算图像导数是相对较容易的, $x$ 方向Prewitt算子为 $a$ , $y$ 方向Prewitt算子为 $b$ ,初始图像与算子卷积过程如下:若图像矩阵中一块区域为 $c$ ,则 $X_5$ 处的 $x$ 方向导数是将 $x$ 方向算子中心与 $X_5$ 重合,接着

对应元素相乘再求和,则 $X_5$ 处的 $x$ 方向导数为 $x_3+x_6+x_9-x_1-x_4-x_7$ 。

$$a = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} \quad (3)$$

所以,先后将原图像 $x$ 与 $y$ 方向的Prewitt算子进行卷积便能获取图像 $x$ 与 $y$ 的方向导数矩阵 $G_x$ 与 $G_y$ ,再运用公式

$$|G_{xy}| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

便能获取图像梯度矩阵 $G_{xy}$ ,图像 $x$ 与 $y$ 方向边缘信息可由该矩阵表达。

#### 2.1.1 Python实现卷积及Prewitt算子边缘检测

将图像卷积函数封装于imconv函数里,scipy库里signal模块可提供在convolve2d()中实现二维卷积,然后再利用Prewitt算子计算 $x$ 与 $y$ 方向的导数矩阵 $G_x$ 与 $G_y$ ,以及梯度矩阵 $G_{xy}$ 。Prewitt算子的结果如图3所示。

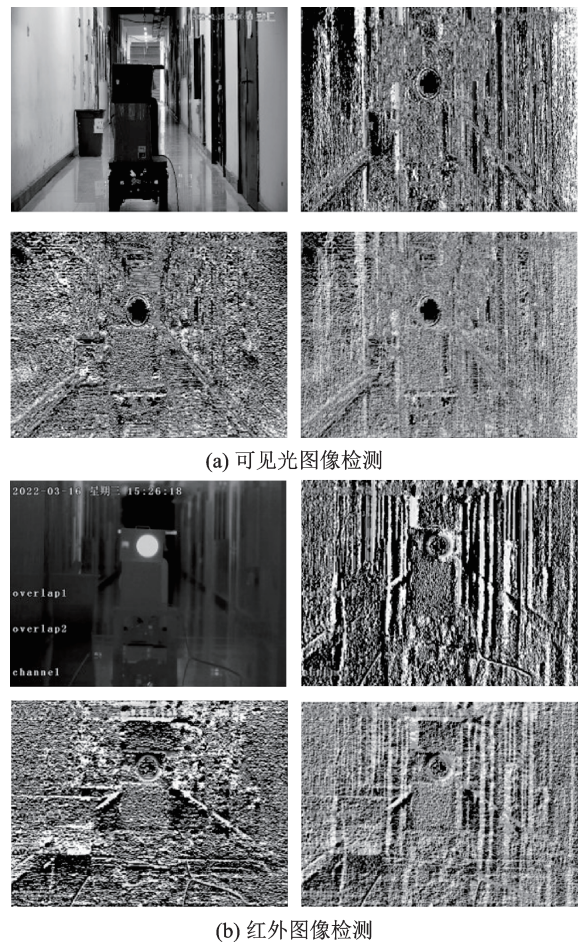


图3 Prewitt算子边缘检测效果图

Fig.3 Edge detection effect diagram of Prewitt operator

左上图为原图,右上图为 $x$ 方向导数图,左下是 $y$ 方向导数图,右下图为梯度图。由图能观察到,Prewitt算子可以检测到图像边缘,但效果不理想,噪声严重。

### 2.1.2 近似导数的Sobel算子

Sobel算子和Prewitt很相似,但检测效果更好些, $x$ 方向的Sobel算子为 $d$ , $y$ 方向的Sobel算子为 $e$ 。

$$d = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, e = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过python实现效果:

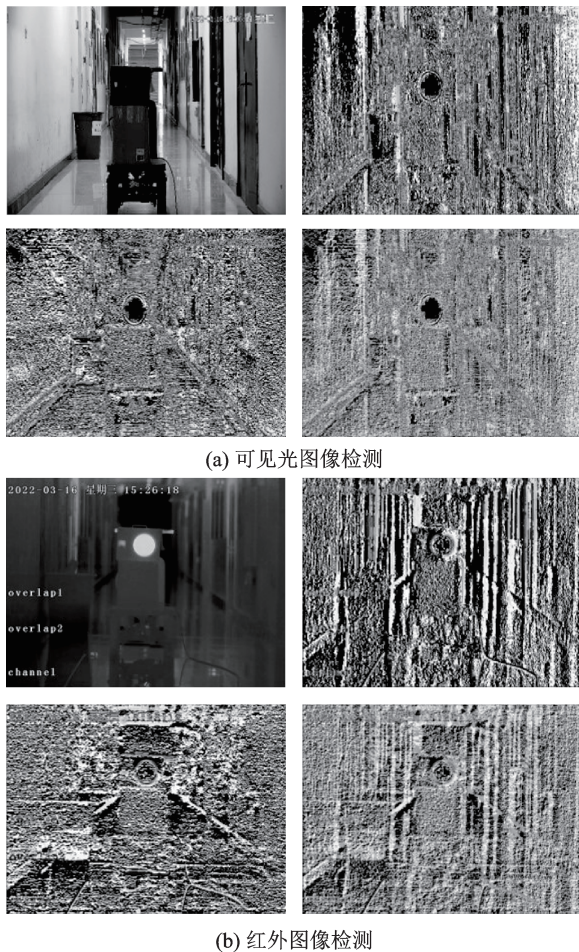


图4 Sobel算子边缘检测效果图

Fig.4 Edge detection effect diagram of Sobel operator

左上图是初始图,右上图是 $x$ 方向导数图,左下图是 $y$ 方向导数图,右下图是梯度图。观察可知,对照Prewitt算子,经过Sobel处理后的图像噪声略有改善,但还无法满足要求。

### 2.1.3 高斯算子与近似二阶导数的Laplace算子

Laplace算子是一个在 $x$ 方向二阶导数和 $y$ 方向二阶导数的和的近似求导算子,是由Sobel算子推

导出来。Laplace算子为 $f$ ,它还有一种扩展算子为 $g$ ,本次运用scipy库中signal模块convolve()方法计算图像卷积。

$$f = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在此之前,先用标准差为5的 $5 \times 5$ 高斯算子对图像进行平滑处理,目的是去除图像中高频噪声,再利用Laplace扩展算子对图像进行边缘检测。最终通过python实现效果,见图5所示。

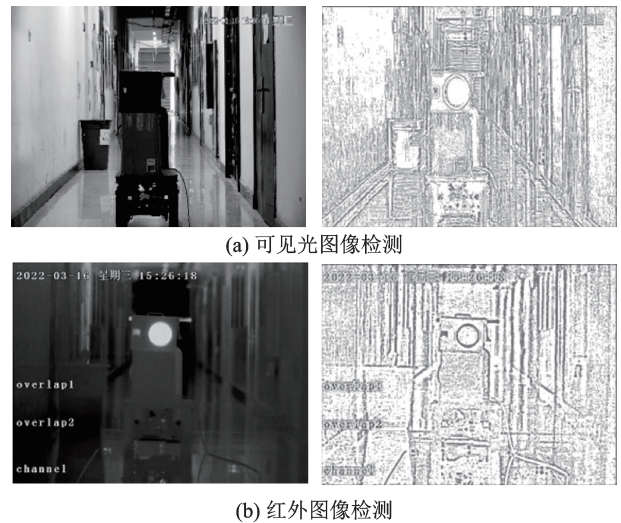


图5 高斯与Laplace算子检测效果图

Fig.5 Detection effect diagram of Gauss and Laplace operator

从图中可看出经过降噪处理后,边缘效果较为明显。所以文章最终决定采用此种边界检测算法进行下一步实验数据采集。

## 2.2 可见光相机与红外相机标定

张氏标定法具有良好标定精度,故文中将基于非线性最小二乘思路的张氏标定方法应用于双光谱热像仪的标定当中,黑白棋盘格作为标定样本,标定过程中将棋盘格左上角设定为世界坐标原点,分别使用可见光相机与红外相机在1.5 m距离下对标定板进行多组异角度图像采取计算,来保证红白光相机内参计量精度。本次实验中红白光相机分别提取二十张相片进行标定。

前文提到红外相机成像机理与可见光相机存在差异,故实验中为红外相机定制了一套金属标定板,依靠其背后电加热装置使其升温,通过热辐射线导出热量,最终实现在红外相机中的成像及标定效果。

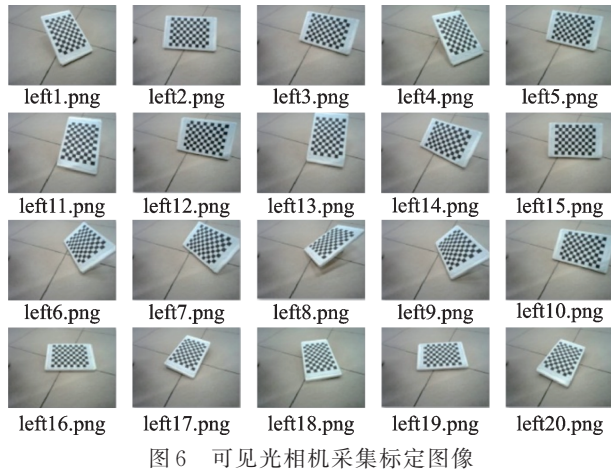


图6 可见光相机采集标定图像

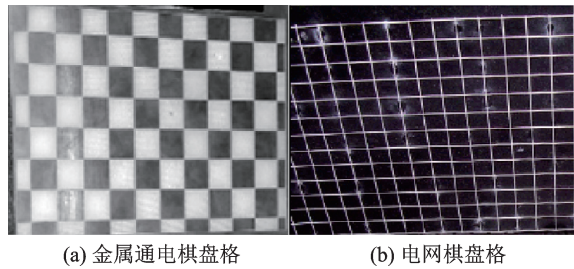


图7 实验用红外标定板

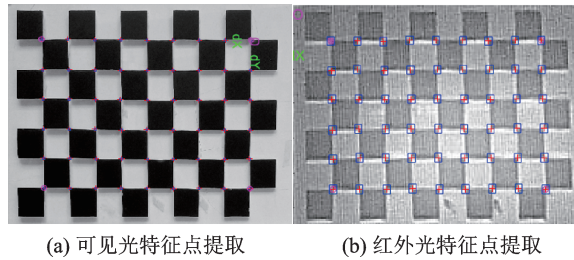


图8 可见光与红外光特征点提取

初始标定完成后,将标定数据整理并建立标定误差直方图,图中个别组图像素误差高出标注的均值误差,故实验中采取去除较高误差图像素的方式对标定结果进行校准,以达到提升标定精度的目的,最终读取标定参数,如表1所示。

表1 可见光单目与红外单目内外参数  
Tab. 1 Internal and external parameters of visible monocular and infrared monocular

参数类别	可见光相机	红外相机
X轴焦距	22 997.216 1	2 960.310 2
Y轴焦距	22 989.204 2	2 946.012 2
畸变系数	1.105 1	1.375 9
平均误差	0.597 5	0.580 1
旋转矩阵	$\begin{bmatrix} 0.999 9 & -0.003 1 & -0.019 0 \\ 0.007 0 & 0.999 7 & 0.013 2 \\ 0.020 1 & -0.024 1 & 0.999 6 \end{bmatrix}$	
平移向量	[-155.640 1, 2.262 7, -15.085 7]	

### 2.3 测距实验

在稳定光照条件下对双光谱边界特征匹配方法于测距功能上的实现展开研究,实验将黑体作为采样目标,红外相机通过温度捕捉黑体边界特征信息,白光相机通过光学特性捕捉黑体边界特征信息。测量范围为40 m,以每4 m为间隔,记录每段距离下通过边界特征匹配算法得到的距离信息与真实距离信息。黑体温度设定到50 ℃。实验场景为室内,具备实验所需环境条件,视场角固定,无其它高温热源干扰,仅使黑体距离变化。图9(a)为iThermal系列ZS-Y650-T双光谱热像仪;图9(b)为黑体HT-C300,温度调试区间为0~300 ℃。实验过程中,环境温度18 ℃,湿度32%。

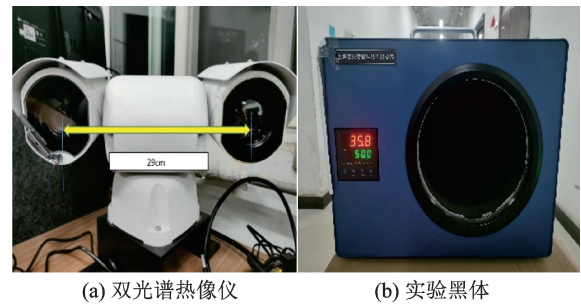


图9 iThermal系列双光谱热像仪与黑体

实验步骤:先找到黑体合适的移动路径,将黑体摆放在距离热像仪4 m处并设置温度为50 ℃,通过上位机软件调整双光谱热像仪视场像素大小并固定视场角,用毫米级高精度钢卷尺作为实际距离测量工具,测距间隔为4 m,实验总长度为40 m。设定上位机程序参数,调整灰度及温度区间,待黑体分别通过温度和光学特性清晰的出现在红白光双视场后,进行以每4 m为间隔的红光与白光图像采集,将每组距离下采集的红白光图像通过边界特征检测算法计算出黑体固定参考边界的像素位置,再将不同距离所对应双光谱中同一边界的像素差通过MATLAB中cftool工具平台进行线性拟合,生成像素差与距离关系拟合函数并建立测距误差模型。

拟合公式如下:

幂函数拟合(Power fitting)

$$y = 173.9x^{-0.6205} - 3.707$$

$$R^2 = 0.983 3 \quad (7)$$

有理数逼近拟合(Rational fitting)

$$y = (0.446 3x + 615)/(x + 6.423) R^2 = 0.983 4 \quad (8)$$

测距误差模型如下:

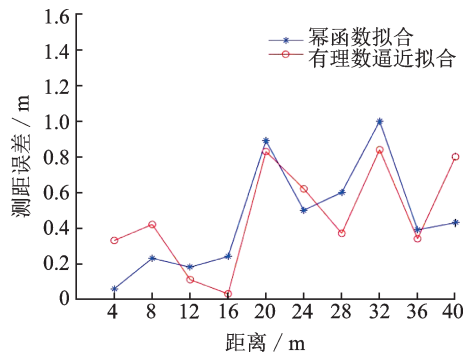


图 10 测距误差与距离关系图(组一)

Fig.10 Relationship between distance error and distance (Group 1)

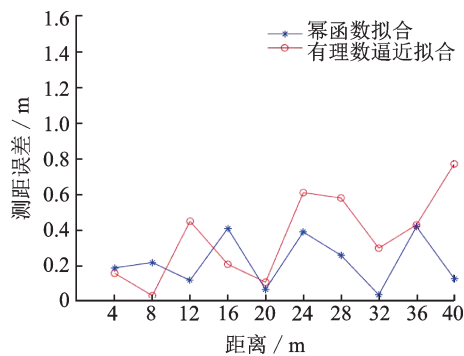


图 11 测距误差与距离关系图(组二)

Fig.11 Relationship between distance error and distance (Group 2)

拟合函数中: $x$ 为目标在红白双光谱中像素差值; $y$ 为目标拟合计算后距离值。测距时,将红白双光谱中同一目标的同一边界像素差值输入像素差与距离关系数学模型中,便能得到目标边界到双光谱热像仪的距离信息。

若  $10 \leq x \leq 60$ ,则检测距离值普遍小于真实距离值;

若  $60 < x \leq 200$ ,则检测距离值普遍大于真实距离值。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 实验结果

表 2 与表 3 是记录黑体在 40 m 范围内往返时目标边界在双光谱中的像素差值。由实验数据得知,待测目标出现在红白双光谱中的像素偏差伴随距离增加逐渐减小,测距精度也随着距离增加逐渐降低。为了保证双光谱测距准确性,需要通过数据结果进行距离误差补偿。

表 2 黑体正向移动时双光谱中像素差

Tab.2 Pixel difference in dual spectra when black body moves forward

距离/m	组一 双光谱像素差/px
4	197
8	109
12	77
16	57
20	46
24	36
28	28
32	23
36	20
40	17

表 3 黑体逆向移动时双光谱中像素差

Tab.3 Pixel difference in dual spectra when black body moves in reverse direction

距离/m	组二 双光谱像素差/px
4	157
8	77
12	46
16	34
20	25
24	20
28	16
32	13
36	11
40	9

#### 3.2 实验分析

将数据可视化可更好理解与分析数据,故通过 MATLAB 将表 2 与表 3 数据绘制成距离与像素差关系折线图,如图 12 所示。

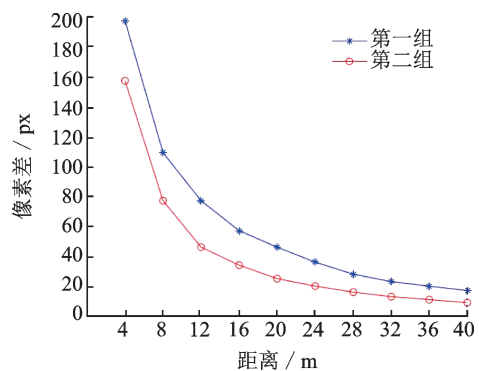


图 12 双光谱距离与像素差图

Fig.12 Bispectral distance and pixel difference

采样目标在双光谱中的像素差伴随距离的增加逐渐减小,在 4 m~16 m 距离较近的条件下,像素差的变化幅度较大,在 28 m 后像素差的变化幅度逐渐平缓,表明采集的实验数据有效并符合客观规律。

分析图 10 及图 11 可知,有理数逼近算法(Rational)应用于红白双光谱测距中,测距误差相对较小,

但仍不理想,需要通过进一步补偿减小误差。所以根据实际距离值、检测距离值与误差值之间的关系进行多项式拟合补偿。建立距离-像素补偿模型,得到40 m范围补偿模型如下:

$$y = y_0 - 1.871e - 09x^5 + 6.729e - 07x^4 - 8.061e - 05x^3 + 0.004\ 034x^2 - 0.088\ 97x + 1.128 \quad (9)$$

式中: $y$ 为补偿后距离值; $y_0$ 为检测距离值; $x$ 为目标边界在双光谱中像素差值。

再次布置实验,此次选择不同规格型号黑体作为测距目标,在40 m范围内将目标移动距离间隔设置为3 m,经补偿模型对检测距离值进行补偿,计算补偿后距离值与真实距离值的差值,并通过相对误差与均方根误差来考量补偿后的双光谱测距模型质量,如表4所示。

表4 红白双光谱距离补偿

Tab. 4 Red and white bispectral distance compensation

实际距离/m	检测距离/m	测量误差比例/(%)	补偿后距离/m	补偿误差比例/(%)
3	3.105	3.500	2.995	0.167
6	6.130	2.166	5.988	0.200
9	9.210	2.333	8.990	0.100
12	12.460	3.833	11.883	0.975
15	15.330	2.200	15.140	0.933
18	18.504	2.800	17.931	0.383
21	21.622	2.962	20.941	0.280
24	24.490	2.042	24.106	0.441
27	27.701	2.596	26.868	0.488
30	30.530	1.766	29.980	0.066
33	33.870	2.636	33.103	0.312
36	36.710	1.972	36.080	0.222
39	39.771	1.977	39.110	0.282
40	40.780	1.950	40.075	0.188

通过有理数逼近算法(Rational)获取检测距离值,再经多项式拟合进行补偿,补偿效果如图13。

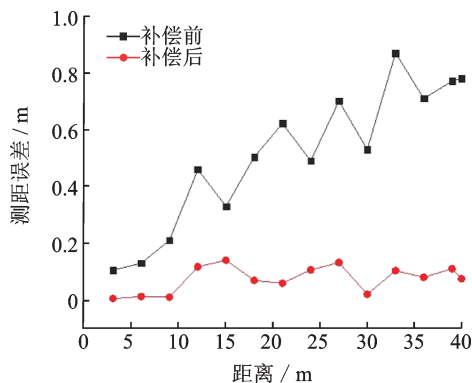


图13 补偿前后误差效果对比

Fig. 13 Error effect comparison before and after compensation

通过图13能观察到经多项式补偿后的误差效果,测量误差整体波动幅度降低,误差区间及误差值减小。结合表4分析可知,通过有理数逼近算法得到检测距离相对误差最大值为3.50%,经补偿算法校正后的最大相对误差是0.975%,均方根误差为0.1476。综上,文中提出的测距模型结合多项式补偿计算可以实现红白双光谱测距,并有较好的测距精度。

## 4 结 论

文中对红白光双目系统实现测距的方法进行研究。当黑体距离双目系统40 m范围内,红白光相机捕捉的图像清晰,得到的像素位置较准确,测距精度较高;当距离超过40 m时,测距误差值逐渐增大。将实验检测距离数据与对应边界像素数据进行线性拟合,得出距离与像素拟合关系。依照检测距离数据与红白光谱中边界像素差值的关系,再根据真实距离与检测距离的差值关系,经补偿后提出红白双光谱边界特征匹配测距算法。经实验验证该算法可实现红白光双目系统测距,且在40 m范围内测距最大相对误差是0.975%。该算法对实现双光谱测距具有真实意义,且具有进一步完善空间。

## 参 考 文 献

- [1] 丁 飞, 刘桂华, 高军强. 基于一种改进的HOG-SVM的红外视频图像人形检测方法[J]. 自动化仪表, 2017, 38(2): 45-48+52.
- [2] 刘 钢, 额日其太, 朱希娟. 巡航导弹蒙皮红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5): 1012-1017.
- [3] 邓茜文, 冯子亮, 邱晨鹏. 基于近红外与可见光双目视觉的活体人脸检测方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(7): 2096-2103.
- [4] 王伟明, 陈志斌, 沈晓彦. 红外测距仪电路延时模拟检测研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 72-76.
- [5] 化春键, 潘 瑞, 陈 莹. 基于改进ORB-RANSAC的双目测距方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 366-373.
- [6] Pan Ning, Jiang Shengchuan, Du Yuchuan, et al. Infrared thermal imaging for intelligent leakage detection in underground integrated pipe corridors[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2020, 48(6): 20180420.
- [7] 宋丽琼, 刘 静, 燕 俊, 等. 单目标探测下的双红外被动测距方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(1): 150-153.
- [8] 王吉岱, 郭 帅, 孙爱芹, 等. 基于双目视觉技术的高压输电线路巡检机器人在线测距[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 6130-6134.