

## 用于目标跟踪的红外图像均衡算法设计与实现

陈力颖<sup>1,2\*</sup>, 李昂阳<sup>1,2</sup>, 赵军发<sup>1,2</sup>, 程传同<sup>3</sup>, 梅健<sup>4</sup>, 尹睿<sup>5</sup><sup>1</sup>天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;<sup>2</sup>天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;<sup>3</sup>中国科学院半导体研究所, 北京 100083;<sup>4</sup>国家集成电路创新中心, 上海 201203;<sup>5</sup>复旦大学微电子学院, 上海 200433

**摘要** 针对红外相机在进行目标跟踪时由于图像动态范围大、目标及相机高速运动导致拍摄图像经常过亮或过暗的问题,设计了一款高实时、高质量的红外图像均衡算法。该算法通过优化红外相机曝光参数完成图像主体与背景对比度的调节。首先对图像分区,通过分析相邻区域亮度变化,进行图像非连续区域检索,基于检索结果确定图像主体,并针对主体进行加权,统计图像亮度。接着为满足相机小型化需求,将插值法与查表法结合,根据图像亮度均值完成曝光参数的迭代。该算法不仅保证了图像主体清晰度以及红外相机曝光调节速度,而且避免了额外存储单元的需求。经红外相机实测,所提算法平均仅需 3.2 帧即可完成红外图像均衡化,平均曝光误差为 5.15%,具有较好的应用价值。

**关键词** 红外成像技术; 目标跟踪; 图像均衡; 区域检索; 查找表

中图分类号 TN219

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241309

## Design and Implementation of a High-Performance Infrared Image Equalization Algorithm for Enhanced Target Tracking

Chen Liying<sup>1,2\*</sup>, Li Angyang<sup>1,2</sup>, Zhao Junfa<sup>1,2</sup>, Cheng Chuantong<sup>3</sup>, Mei Jian<sup>4</sup>, Yin Rui<sup>5</sup><sup>1</sup>School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Photoelectric Detection Technology and System, Tianjin 300387, China;<sup>3</sup>Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;<sup>4</sup>National Integrated Circuit Innovation Center, Shanghai 201203, China;<sup>5</sup>School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China

**Abstract** A high-real-time, high-quality infrared image equalization algorithm has been developed to address the frequent brightness or darkness in captured images caused by the image's large dynamic range and high-speed motion of the targets and cameras during target tracking with infrared cameras. The proposed algorithm adjusts the contrast between the image subject and background by optimizing the exposure parameters of the infrared camera. First, the image is partitioned by analyzing brightness variations in adjacent areas. Then, non-continuous area retrieval is performed to identify the image subject, which is weighted to calculate the image brightness. To support camera miniaturization, the interpolation method is combined with the lookup table method to iteratively adjust the exposure parameters based on the image's average brightness. This algorithm ensures image subject clarity, speed of infrared camera exposure adjustment, and eliminates the need for additional storage units. Infrared camera testing demonstrates that the proposed algorithm achieves infrared image equalization at an average speed of 3.2 frames per second with an average exposure error of 5.15%, highlighting its practical application value.

**Key words** infrared imaging technology; target tracking; image equalization; regional search; lookup table

收稿日期: 2024-05-17; 修回日期: 2024-06-06; 录用日期: 2024-06-11; 网络首发日期: 2024-06-24

基金项目: 中国科学院青年创新促进会会员(2022109)

通信作者: \*nkchenly@163.com

# 1 引言

红外探测器因其对红外辐射的高度敏感性<sup>[1]</sup>、全天候工作能力、远距离观测能力<sup>[2]</sup>、高度集成化<sup>[3]</sup>、小型化和轻量化等优势得到广泛应用,特别是在目标跟踪领域发挥了关键作用<sup>[4]</sup>。在目标成像时,要保证图像的亮度适中,避免由于曝光参数设置失常导致主体与背景边界模糊,给后续识别与跟踪工作带来困难。此外,在目标跟踪时,目标和本体处于高速运动状态,要求相机能达到较高的帧频,并能使用尽可能少的帧数自主完成曝光参数校正,避免目标丢失。因此,设计一套能自主识别图像主体所在区域,并根据主体亮度快速调节相机曝光参数的红外图像均衡算法,对目标跟踪而言很有必要。

本文的图像均衡化通过对红外相机进行自适应曝光控制的方式实现。目前,国内外自动曝光(AE)技术主要从直方图<sup>[5]</sup>、平均亮度<sup>[6]</sup>、图像熵<sup>[7]</sup>和图像融合<sup>[8-9]</sup>等方面进行研究与优化。Zhang等<sup>[10]</sup>提出一种主动曝光控制方法,通过最大化基于梯度的图像质量度量,来评价适当的曝光时间。但是基于梯度的度量倾向于高曝光,进而会导致图像过曝。为避免上述问题,Kim等<sup>[11]</sup>提出一种基于局部图像熵的梯度加权方案,该方案通过贝叶斯优化框架估计最优曝光时间。然而,贝叶斯优化和加权方案的复杂性导致该算法实时性较差。解静等<sup>[12]</sup>提出一种针对空间相机的快速自动曝光技术,通过分析像素灰度值进行目标与背景分离,接着采用最

速查表法迭代曝光参数,最快仅需5帧即可完成曝光调节。马泽龙等<sup>[13]</sup>采用直方图法与模糊逻辑结合的方式完成曝光参数调节,整个算法实现仅需2ms且图像信息熵、方差等参数均有较大提升。吴文麟等<sup>[14]</sup>针对工业相机突发的过曝现象,采用区域加权进行图像亮度统计,接着使用基于改进S曲线的方式完成曝光参数的快速迭代,将图像拉普拉斯算子平均标准差大幅度提升。然而在目标跟踪时,图像动态范围高,主体位置随机,固定区域的统计方案并不适用于本文应用场景。

本文针对高动态目标的高实时跟踪,提出一种快速自适应红外图像均衡算法。该算法能够有效区分目标跟踪主体与背景,并针对主体加权统计图像亮度。接着通过改进后的查表法快速稳定地调节曝光参数,为目标跟踪领域带来了显著的应用潜力。

## 2 图像亮度均值统计

所提红外图像均衡算法通过改变相机曝光参数,使得图像亮度适中,层次分明,这一功能的实现主要依赖算法的统计模块<sup>[12]</sup>。图1(a)为高速运动下的飞行器原始红外图像,此时飞机舵翼平均温度可达900K<sup>[15]</sup>。可以看到,飞行器与背景对比度强,亮度高,且连续出现。针对该特点,本文制定了如下的统计策略:首先通过二维搜索法<sup>[16]</sup>进行图像非连续区域检索;接着分析各行的亮暗关系完成图像主体判决;最后根据图像主体与背景的对亮度分配权重,完成图像平均亮度的统计。

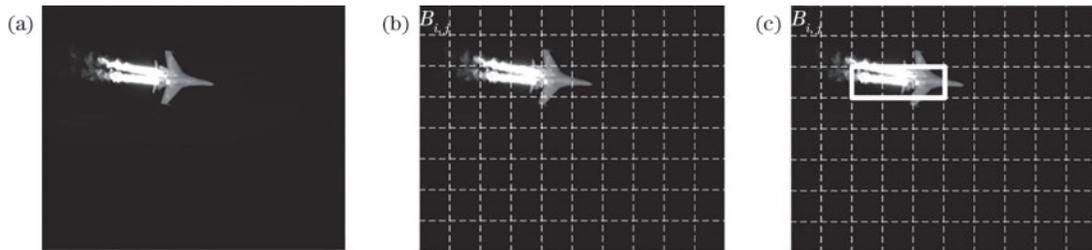


图1 飞行器红外图像。(a)原始图像;(b)图像分区;(c)主体识别结果

Fig. 1 Infrared images of the aircraft. (a) Original image; (b) image partitioning; (c) bright area recognition result

### 2.1 非连续区域检索

非连续区域检索通过分析相邻区域的亮度突变完成。首先将图像划分为如图1(b)所示的区域, $B_{i,j}$ 为每个区域像素亮度平均值。接着将相邻区域平均亮度作差,记为区域对比度 $D_{i,j}$ ,则可得到相邻区域的亮度变化关系:亮突变( $D_{i,j} \geq T$ ,记为01);暗突变( $D_{i,j} \leq -T$ ,记为10);连续( $|D_{i,j}| < T$ ,记为“00”), $T$ 为突变阈值。阈值的设定关系到检索是否成功。通过分析目标跟踪下的红外图像,将水平方向阈值设置为 $2^{N-3}$ ,垂直方向阈值设置为 $2^{N-2}$ ,其中, $N$ 为图像像素灰度级数。

当前区域的连续性判断通过分析相邻区域对比度完成。通过对图像分别进行水平、垂直方向的搜索,完成图像非连续区域检索。以坐标为 $(i,j)$ 的区域为例,

介绍区域连续性的判决过程(将 $D_{i,j}$ 与 $T$ 的关系记作 $R_{i,j}$ )。

所提算法对图像进行先水平从左到右,再垂直从上到下的搜索。在水平搜索过程中,当01和00相继出现时,表示当前区域为亮突变区域,后续的块可能均为亮区。则将亮标志打开,并将当前区域记作亮区。接着将该区域后续的区域全部记为亮区,直到出现10时,将当前区域标记为潜在的亮区,并关闭亮标志。此外,潜在亮区的判定还可以通过01与10的先后出现完成,此时,当前区域属于亮突变区域。潜在亮区的判决需要通过垂直方向的判决结果辅助完成。若垂直方向判断该区域为非连续区域,则标记为亮区;反之,则不做处理。暗区的判决过程与亮区

表 1 区域连续性判决过程  
Table 1 Regional continuity adjudication process

$R_{i,j}$	$R_{i,j+1}$	Operate
	00	If bright/dark flag on, save $B_{i,j}$ coordinate as bright/dark; else, no operation
00	01	If dark flag on, mark the horizontal potential dark blocks, turn off dark flag; else, no operation
	10	If bright flag on, mark the horizontal potential bright blocks, turn off bright flag; else, no operation
	00	Turn on bright flag, save $B_{i,j}$ coordinate as bright
01	01	No operation
	10	Mark $B_{i,j}$ as potential bright block
	00	Turn on dark flag, save $B_{i,j}$ coordinate as dark
10	01	Mark $B_{i,j}$ as potential dark block
	10	No operation

同理。标记出的亮区与暗区即为当前图像的非连续区域。

## 2.2 图像主体判决

目标跟踪时,拍摄主体温度高,红外图像主体亮度强。根据该特性,结合第 2.1 小节中的非连续区域检索结果,完成图像主体区域锁定。每一行的检索结果有两种:连续和非连续。对于非连续的行,直接记录亮区坐标,对应区域即为主体所在区域。对于连续的行,需要将当前行亮度均值与  $2^{N-1}$  作差,若差值大于 0,则当前行均为亮区,将其记录为主体区域;反之,则将其当作背景。

如图 1(c) 所示,实线区域即为使用该判决方法得到的图像主体。

## 2.3 图像亮度均值计算

通过对图像主体与背景分配不同的权重值完成图像亮度均值的统计。主体和背景的权重由两个区域之间的对比度  $D$  决定,其中,  $B_{\text{sub}}$  和  $B_{\text{back}}$  分别是主体和背景的平均亮度。

$$D = B_{\text{sub}} - B_{\text{back}} \quad (1)$$

主体部分权重  $W_{\text{sub}}$  的计算通过图 2 所示的函数确定。若对比度高,则主要根据主体亮度完成参数调节;亮度接近,说明主体区域亮度较低,需结合背景亮度完成图像统计。

背景区域的权重  $W_{\text{back}}$  则由式(2)得到:

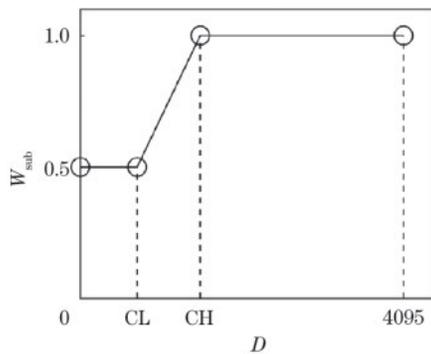


图 2 主体权重函数设置

Fig. 2 Principal weight function settings

$$W_{\text{back}} = 1 - W_{\text{sub}} \quad (2)$$

则图像加权后的亮度均值为

$$B = \frac{B_{\text{sub}}W_{\text{sub}} + B_{\text{back}}W_{\text{back}}}{W_{\text{sub}}X + W_{\text{back}}} \quad (3)$$

式中:  $X$  表示是否识别到图像主体。若识别到主体,则  $X=1$ ; 反之,则为 0,将整帧图像的平均亮度作为最终的统计亮度。

## 3 曝光参数快速迭代策略

为保证所提图像均衡算法能够快速有效地完成曝光参数校正,采用查表法进行曝光参数迭代。首先以红外成像技术曝光过程为基础,介绍了传统的查找表技术实现原理;接着根据目标跟踪对红外相机小型化的需求,提出了改进后的查表法。

### 3.1 传统查表法原理

图 3 是本课题组设计的红外探测器像素读出电路,兼容先积分后读出(ITR)、边积分边读出(IWR)两种读出方式,最大帧率可达 300 Hz,可以满足目标跟踪下红外相机高帧率的需求。虚线框中为积分电路,负责将光电二极管产生的光电流,转化为电压并存储到积分电容  $C_{\text{int}}$  中<sup>[17]</sup>。所谓的相机曝光实质上是对光电流的积分过程。

在理想情况下,积分电容的电容值不变,则由公式  $V=IT/C$  可得对于每一个光电流  $I$ , 都有:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4)$$

式中:  $T_1$  为当前曝光时间;  $V_1$  为对应曝光时间下的积分电压;  $T_2$  为下一帧曝光时间;  $V_{\text{tar}}$  为期望得到的积分电压。对式(4)进行变换,即可得到曝光时间的迭代公式:

$$T_2 = ST_1 \quad (5)$$

式中:  $S = V_{\text{tar}}/V_1$ , 为曝光时间的校正系数。然而当前主流的积分电路由于面积限制,常常采用 metal oxide semiconductor(MOS)电容作为积分电容,这类电容的电容值会随着电压值增大发生改变。图 4 为 MOS 电容的 CV 特性曲线。当电容两端电压小于阈值时,电

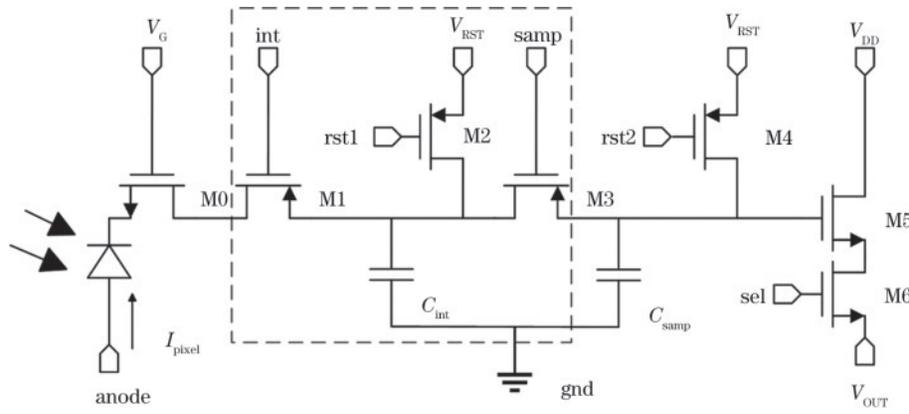


图3 像素读出电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the pixel readout circuit

容值变化显著;当超过阈值,电容值变化缓慢,最终趋于稳定。

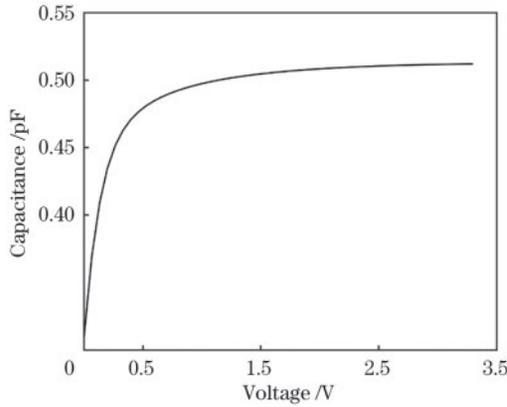


图4 CV特性曲线

Fig. 4 CV characteristic curve

由于积分电容的非线性,根据公式  $V=IT/C$ ,只能得到:

$$\frac{V_1}{V_{tar}} = \frac{T_1 C_1}{T_2 C_2} \quad (6)$$

式中:  $C_1$  表示电容两端电压为  $V_1$  时的电容值;  $C_2$  表示电容两端电压为  $V_{tar}$  时的电容值。

将 MOS 电容电压与电容值对应关系代入式(6),即可得到曝光时间的真实校正系数  $S_{real}$  的曲线,如图5所示,  $Q$  表示电压值对应的 12 bit 数字码字。

传统的查表法(LUT)将每一个数字码字对应的曝光校正系数  $S_{real}$  放入存储单元,作为查找表使用,在保证算法速度的同时达到较高的精度<sup>[18]</sup>。但是这样做,实现起来会占用较多的存储空间,特别是随着当前红外相机动态范围的扩大,数字码字变多,存储资源占用也变大,不符合算法小型化的需求。

### 3.2 改进的查表法

从算法精度与占用资源两方面考虑,对传统查表法进行改进。通过采集图5真实校正系数曲线的斜率变点<sup>[19]</sup>进行线性插值,将曲线转化为几条线段。

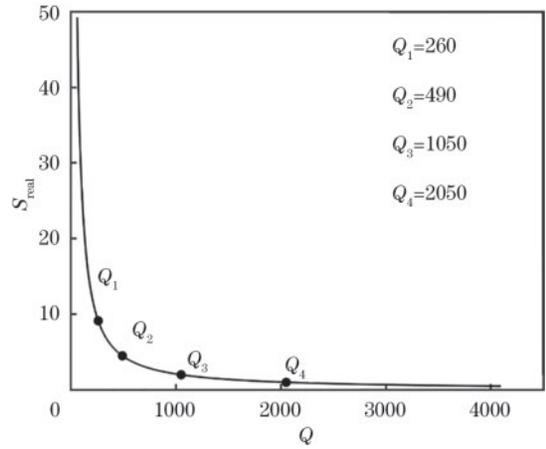


图5 曝光参数校正曲线

Fig. 5 Exposure parameter correction curve

转化后的线段可以直接用逻辑表示,不会占用额外的存储单元。式(7)为插值后的曲线表达式,与原曲线比对,插值后的公式与原曲线平均误差为 5.625%。在曝光调节过程中,通常认为图像亮度处于目标亮度的上下 10% 范围内,即可结束调节。因此该误差处于可接受范围。基于第 2.3 小节得到的图像亮度均值  $B$ ,结合式(5)与式(7),即可完成曝光参数的迭代。

$$S_{real} = \begin{cases} 2^3, & B \leq 260 \\ 12 - B \cdot 2^{-6}, & 260 < B \leq 490 \\ 6 - B \cdot 2^{-8}, & 490 < B \leq 1050 \\ 3 - B \cdot 2^{-10}, & 1050 < B \leq 2050 \\ 1.5 - B \cdot 2^{-12}, & 2050 < B \end{cases} \quad (7)$$

图6是所提图像均衡算法的实现流程。首先对图像分区;然后计算各区域的平均亮度及区域对比度;接着通过非连续区域检索,锁定拍摄主体,并针对主体亮度分权统计;最后基于得到的图像统计亮度  $B$  进行查找表,计算得到当前的曝光参数校正系数,并结合式(7)得到下一帧的曝光时间。

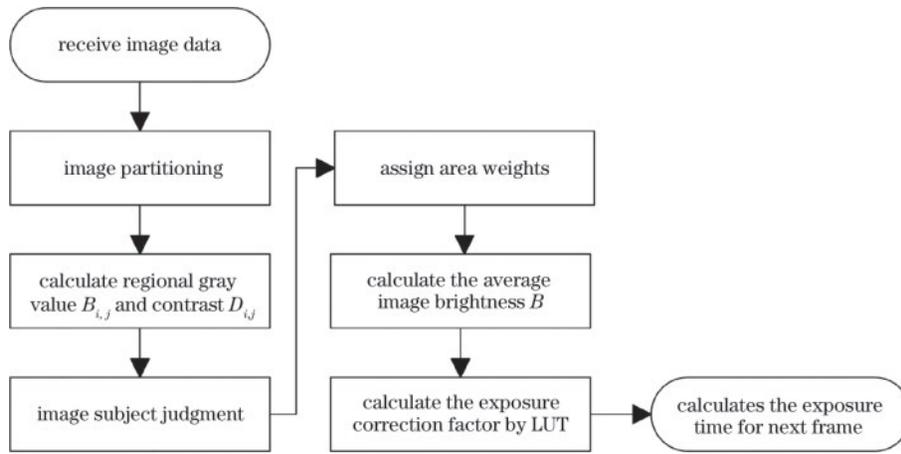


图 6 算法实现流程

Fig. 6 Algorithm implementation process

## 4 算法评估

为验证所提算法在不同场景下的主体识别正确率以及曝光调节效率,从以下两个角度进行算法评估:1)将主体置于不同位置,查看主体识别结果;2)配置不同的初始曝光时间,查看相机的曝光调节结果。

使用一款制冷红外相机进行曝光测试。相机分辨率为  $640 \times 512$ , 使用 8 bit 数字输出。将算法部署在

Python 软件中完成图像读取、分析及曝光参数迭代等工作,并使用 RS422 串口进行相机曝光参数的控制。实验设置图像目标统计亮度为 128。图 7(a)为现场可编程门阵列 (FPGA) 电路板的实物图,图 7(b)为 FPGA 电路板运行时的红外图像,此时 FPGA 芯片温度较高,反映到红外图像中,该区域亮度较高。通过在常温环境中拍摄运行中的 FPGA 电路板,制造高反差场景,进行算法评估。

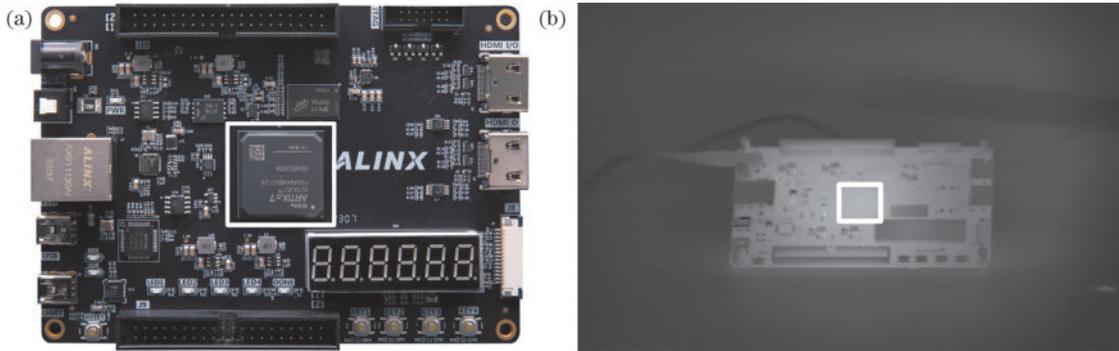


图 7 FPGA 电路板。(a)实物图;(b)红外图

Fig. 7 FPGA circuit boards. (a) Visible light image; (b) infrared image

### 4.1 主体识别结果分析

通过将运行中的 FPGA 开发板置于图像的不同区域,模拟目标跟踪时主体位置的随机性,来验证算法是否能正确识别主体位置。图 8(a)~(e)分别为拍摄主体位于左上、中心、右上、左下、右下的主体识别结果,实线框为识别到的主体区域。可以看到,所提算法基本能完成 FPGA 芯片所在区域的识别。

### 4.2 曝光调节效率分析

通过为相机配置不同的初始曝光时间,完成算法曝光调节效率的测试。曝光调节效率主要包括两个方面:1)曝光调节所需帧数;2)算法精度。曝光误差<sup>[20-21]</sup>计算方式为最终得到的图像统计亮度与目标统计亮度之间的误差。初始曝光时间通过串口手动调整,包括两组实验:1)最小曝光时间;2)最大曝光

时间。在实验过程中,所提算法对所有场景的主体区域都做出了准确识别,并能快速完成有效曝光调整。

表 2 是两组实验对应的结果。当初始曝光时间为最小值时,平均调整帧数为 3.8 帧,平均曝光误差为 4.81%;当设置为最大值时,平均调整帧数为 2.6 帧,平均曝光误差为 5.49%。两组实验结果表明,所提算法可对相机进行高实时、高精度的曝光调节。

图 9 为拍摄主体位于图像中心,初始曝光时间为最小曝光值的调节过程。从图 9(a)初始曝光状态到图 9(d)曝光调节完毕,一共经历了 3 帧,可以看到图像亮度稳步提升。曝光调节完毕,此时图像统计亮度为 117.5,曝光误差为 8.2%,满足目标跟踪对拍摄图像的亮度需求。

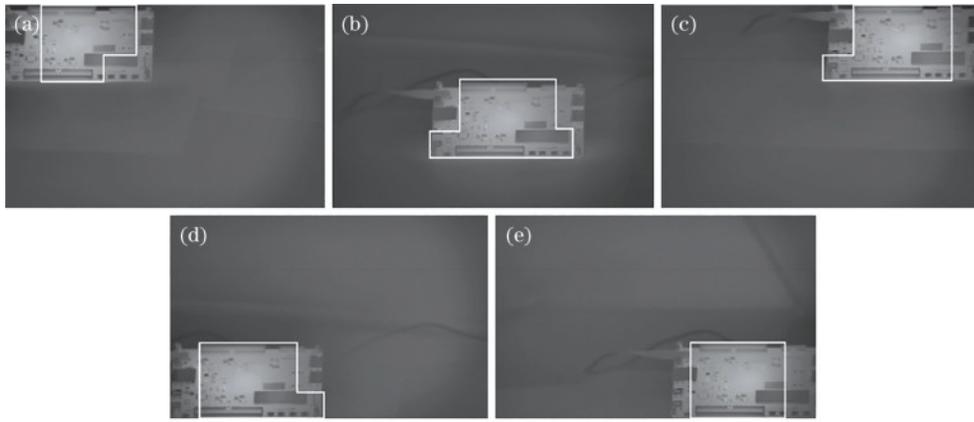


图 8 拍摄主体置于图像不同位置的主体识别结果。(a)左上;(b)中心;(c)右上;(d)左下;(b)右下

Fig. 8 Subject recognition results for subjects placed at different positions in the image. (a) Top left; (b) centre; (c) top right; (d) bottom left; (e) bottom right

表 2 不同初始曝光时间下调节结果

Table 2 Adjustment results at different initial exposure times

Parameter	Experiment	
	1	2
Required frames	3.8	2.6
Error / %	4.81	5.49

### 4.3 不同曝光方案性能对比

为了更直观地展示所提算法的可行性,与其他几

个曝光方案进行了性能对比。当前大部分相关研究使用的相机为 CMOS 图像传感器 (CIS), 本文采用红外探测器 (IRD) 完成算法实现。从表 3 可以看到: 所提算法在速度上有较大的优势, 相较于传统的区域权重法<sup>[16]</sup>, 调整速度提升了 165.6%, 跟传统查表法<sup>[18]</sup>相比, 也有 12.5% 的速度优势; 在算法精度方面, 与传统查表法相比, 提升了 22.3%, 可以满足目标跟踪需求。

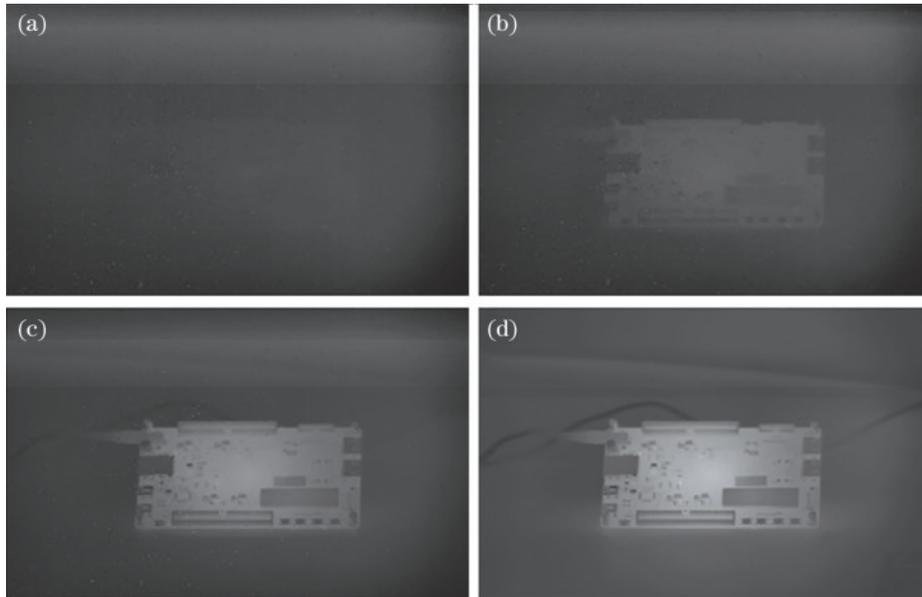


图 9 曝光调节过程。(a) 初始曝光状态;(b) 第一帧调节结果;(c) 第二帧调节结果;(d) 曝光调节完毕结果

Fig.9 Exposure adjustment process. (a) Initial exposure status; (b) the result of the adjustment for the first frame; (c) the result of the adjustment for the second frame; (d) the result of the adjusted exposure

表 3 不同曝光方案性能对比

Table 3 Comparison of performance of different exposure schemes

Parameter	This paper	Ref. [12]	Ref. [16]	Ref. [18]	Ref. [22]
Sensor type	IRD	CIS	CIS	CIS	CIS
Iterative method	LUT	LUT	Formula calculation	LUT	Dynamic step
Required frames	3.2	5(least)	8.5	3.6	4(least)
Error / %	5.15		5.51	6.3	2.25

## 5 结 论

本文针对目标跟踪对红外相机在成像均衡性、曝光参数收敛速度,以及小型化等方面的需求,设计了一款红外图像均衡算法。该算法基于目标跟踪主体的亮度特性,对图像进行非连续区域检索,锁定图像主体坐标,并针对主体分配权重完成图像亮度统计。接着将插值法与传统查表法结合,对曝光参数进行快速迭代。改进后的查表法直接使用逻辑处理计算校正系数,不再需要额外的存储资源。实验结果表明,所提算法能够识别高反差场景,准确记录下图像主体坐标,且调整速度较快,仅需 3.2 帧即可完成图像正常曝光,比传统区域权重法提高了 165.6%,曝光误差仅为 5.15%,非常适合目标跟踪应用场景。

### 参 考 文 献

- [1] 孙建平, 齐宏, 王申领, 等. 复杂环境背景下典型飞行器表面红外反射特性研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 493-501.  
Sun J P, Qi H, Wang S L, et al. Research on infrared reflection characteristics of typical aircraft surface in complex environment[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 493-501.
- [2] 叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 15-39.  
Ye Z H, Li H H, Wang J D, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 15-39.
- [3] 李敬国, 袁媛, 于艳. 红外焦平面列级数字化技术[J]. 激光与红外, 2023, 53(8): 1266-1271.  
Li J G, Yuan Y, Yu Y. Column-level digitization technology of infrared focal plane array ROIC[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(8): 1266-1271.
- [4] 王军, 姜志, 孙慧婷, 等. 基于噪声方差估计的红外弱小目标检测与跟踪方法[J]. 光电子·激光, 2018, 29(3): 305-313.  
Wang J, Jiang Z, Sun H T, et al. Detection and tracking of weak infrared targets based on noise variance estimation[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2018, 29(3): 305-313.
- [5] Ma Z L, Gao H B, Yu Y, et al. Brightness measurement and auto exposure control for high-speed camera[J]. International Journal of Control and Automation, 2016, 9(12): 439-452.
- [6] 田宗浩, 刘楨, 张晓龙. 基于弹载相机的快速自动曝光算法设计[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(1): 57-64, 69.  
Tian Z H, Liu Z, Zhang X L. Design of fast automatic exposure algorithm based on missile camera[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(1): 57-64, 69.
- [7] 罗青松. 无人机相机自动曝光与自动白平衡算法的研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2018.  
Luo Q S. Research and implementation of automatic exposure and automatic white balance algorithm based on UAV camera[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 刘卫华, 马碧燕. 基于图像全序列特征权重的多曝光图像融合方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 0811008.  
Liu W H, Ma B Y. Multiexposure image fusion method based on feature weight of image sequence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(8): 0811008.
- [9] 郑剑, 刘豪, 于祥春, 等. 一种基于反转融合框架的图像曝光校正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 1210002.  
Zheng J, Liu H, Yu X C, et al. Image exposure correction method based on inversion fusion framework [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(12): 1210002.
- [10] Zhang Z C, Forster C, Scaramuzza D. Active exposure control for robust visual odometry in HDR environments [C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 29-June 3, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 3894-3901.
- [11] Kim J, Cho Y, Kim A. Exposure control using Bayesian optimization based on entropy weighted image gradient [C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 21-25, 2018, Brisbane, QLD, Australia. New York: IEEE Press, 2018: 857-864.
- [12] 解静, 胡永富, 唐琦, 等. 一种空间相机快速自动曝光技术[J]. 光电工程, 2018, 45(11): 180033.  
Xie J, Hu Y F, Tang Q, et al. Automatic exposure technology for space camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(11): 180033.
- [13] 马泽龙, 高慧斌, 余毅, 等. 采用图像直方图特征函数的高速相机自动曝光方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1026-1035.  
Ma Z L, Gao H B, Yu Y, et al. Auto exposure control for high frame rate camera using image histogram feature function[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 1026-1035.
- [14] 吴文麟, 廖晓波, 李俊忠, 等. 工业相机过曝光自适应优化控制算法[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 226-233.  
Wu W L, Liao X B, Li J Z, et al. Adaptive optimization control method for overexposure of industrial camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(2): 226-233.
- [15] 常秋英, 蔡礼港, 杨超, 等. 基于表面织构的高超声速飞行器舵翼热防护技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 1-5.  
Chang Q Y, Cai L G, Yang C, et al. Research on thermal protection of hypersonic aircraft rudder based on surface texture[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(7): 1-5.
- [16] Liang J Y, Qin Y J, Hong Z L. An auto-exposure algorithm for detecting high contrast lighting conditions [C]//2007 7th International Conference on ASIC, October 22-25, 2007, Guilin, China. New York: IEEE Press, 2007: 725-728.
- [17] Li H, Hu A, Nie Z, et al. A 640 × 512 ROIC with optimized BDI input stage and low power output buffer

- for QDs-based infrared image sensor[J]. *Microelectronics Journal*, 2022, 124: 105435.
- [18] 戈志伟, 姚素英, 徐江涛, 等. 一种应用于 CMOS 图像传感器的快速自动曝光控制方法[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(10): 854-859.  
Ge Z W, Yao S Y, Xu J T, et al. A fast automatic exposure control method for CMOS image sensor[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2010, 43(10): 854-859.
- [19] 朱旭, 庞天晓. 长相依面板数据的斜率变点分析[J]. *高校应用数学学报 A 辑*, 2022, 37(4): 379-396.  
Zhu X, Pang T X. Change-point analysis for the slope in long-range dependent panel data[J]. *Applied Mathematics A Journal of Chinese Universities*, 2023, 37(4): 379-396.
- [20] 张伟, 宋杰, 吕圣, 等. 结构光测量中相机曝光优化与图像质量评估[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(12): 1215002.
- Zhang W, Song J, Lü S, et al. Camera exposure optimization and image quality evaluation in structured light measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(12): 1215002.
- [21] 刘思淇, 余飞鸿. 一种用于 CMOS 相机的自适应阻尼平滑自动曝光算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(22): 2211003.  
Liu S Q, Yu F H. A smooth automatic exposure algorithm with adaptive damping for CMOS camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(22): 2211003.
- [22] 翟梦伟, 余飞鸿. 基于 HDMI 数码显微相机的自动曝光优化方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(6): 0618021.  
Zhai M W, Yu F H. Automatic exposure optimization method for HDMI digital microscopy cameras[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(6): 0618021.