

# 基于 PTZ 相机的激光远程除冰视觉测距技术研究

王增专<sup>1,2</sup>, 蒋明<sup>1,2</sup>, 付小健<sup>1,2</sup>, 谭力恒<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074;  
2. 华中科技大学 鄂州工业技术研究院, 湖北 鄂州 436044)

**摘要:** 介绍了一种基于 PTZ (Pan/Tilt/Zoom) 相机的测量范围可调的激光三角测距新方法, 利用 VS2015 和 OpenCV, 设计实现了针对大型户外目标的激光远程除冰视觉测距系统, 通过自行开发的软件进行相机云台 PTZ 运动控制及激光光斑识别定位, 并借助 PTZ 相机水平 360° 全角度旋转、垂直 90° 翻转及 23 倍光学变焦能力, 实现了 40 m 范围内不同位置目标的距离测量; 测距实验结果表明, 系统测量误差在  $Zoom=3$  倍时不大于 54 mm, 在  $Zoom=5$  倍时不大于 27 mm, 在  $Zoom=10$  倍时不大于 19 mm, 在  $Zoom=15$  倍时不大于 15 mm, 在  $Zoom=20$  倍时不大于 11 mm, 测量误差随测量距离的增大而增大、随镜头变焦值的增大而减小。

**关键词:** 激光三角测距; 光斑识别; 机器视觉; 图像处理; 激光除冰

## Research on Laser Vision Ranging Technology Based on PTZ Camera for Remote Laser Deicing System

WANG Zengzhan<sup>1,2</sup>, JIANG Ming<sup>1,2</sup>, FU Xiaojian<sup>1,2</sup>, TAN Liheng<sup>1,2</sup>

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Ezhou Industrial Technology Research Institute, Huazhong University of Science and Technology, Ezhou 436044, China)

**Abstract:** A new method of laser triangulation based on PTZ camera was introduced. A laser remote deicing vision ranging system for large outdoor targets was designed and implemented using VS2015 and OpenCV. In order to make up for the limitations of ordinary laser rangefinders, such as limited range and poor flexibility, a laser ranging method with adjustable measurement range was proposed by combining the rotation and zoom advantages of PTZ camera. Through the PTZ controlling and spot recognition and positioning, and with the help of PTZ camera 360° full-angle rotation, vertical 90° flip and 23 times optical zoom capability, the distance measurement of targets at different positions within 40 m was realized. The experimental results show that the measurement error of the system is no more than 54 mm when the  $Zoom=3$  times, no more than 27 mm when the  $Zoom=5$  times, no more than 19 mm when the  $Zoom=10$  times, no more than 15 mm when the  $Zoom=15$  times, no more than 11 mm when the  $Zoom=20$  times. The measurement error increases with the increasement of the distance and decreases with the increasement of the  $Zoom$  value.

**Keywords:** laser triangulation ranging; light spot recognition; machine vision; image processing; laser de-icing

## 0 引言

激光除冰<sup>[1-5]</sup>作为一种新颖的非接触式除冰技术,能在远距离快速去除目标物体表面附着的冰雪覆盖物,主要应用于输电线路与桥梁拉索等冰雪灾害防护领域。激光远程除冰过程中,随着工作距离的增大激光功率密度会大大降低,根据工作距离动态调节输出激光束的参数、时机及作用位置,可以有效提高融冰速度。传统的用于激光除冰系统测距的方法主要有:红外测距<sup>[6]</sup>、超声测距<sup>[7]</sup>以及激光测距<sup>[8]</sup>等。红外测距具有测量精度高、速度快及结构简单等优势,但在强光直射环境下会导致测量误差。超声测距测量结果不受光照的影响,具有测距迅速、处理信息简单等

优势,但由于冰目标表面光滑易产生镜面发射而导致测量误差。激光测距具有快速测量、实时动态以及测量范围大等特点,在工业领域得到了广泛的应用。

激光三角测距法<sup>[9-11]</sup>是由学者 D. Burrows 和 J. Hadwin 于 1973 年提出的一种将传统三角测量法与先进的激光检测技术相结合的非接触式测距技术,具有铺设简单、功耗低等优点。在激光三角测距仪设计方面,陈念年<sup>[12]</sup>提出了一种高精度单点激光三角测距方法,在校正 CCD 相机畸变的基础上利用亚像素定位技术检测光斑中心,测量均方根误差为 24.9  $\mu\text{m}$ 。朱铮涛<sup>[13]</sup>建立了基于远心镜头的主动式激光三角测距模型用于检测物体厚度,测量精度在 5  $\mu\text{m}$  以内。张思详<sup>[14]</sup>搭建的激光三角测距仪避免了传统测量方法

收稿日期:2021-06-15; 修回日期:2021-08-12。

作者简介:王增专(1996-),男,湖南衡阳人,硕士研究生,主要从事机器视觉方向的研究。

通讯作者:蒋明(1976-),男,四川武胜县人,博士,副教授,主要从事激光先进加工技术与计算机集成控制技术方向的研究。

引用格式:王增专,蒋明,付小健,等.基于 PTZ 相机的激光远程除冰视觉测距技术研究[J].计算机测量与控制,2021,29(12):89-94,125.

中需要选取基准点的缺陷, 将测量范围提升至 750 mm 时, 测量精度可达 0.3 mm。武泽键<sup>[15]</sup>搭建的利用功率自适应的激光三角测距仪有效保证了光斑图像的稳定性, 测量精度可达 0.05 mm, 大幅提升了测量精度。但现有激光三角测距仪由于激光采集设备的接收范围有限, 导致其无法胜任大范围的测距任务, 从而影响了激光三角测距仪的应用灵活性。

为了弥补普通激光测距仪范围受限、灵活性差等不足, 结合 PTZ 相机具有可变视角和可变分辨率能力, 提出了一种测量范围可调的激光测距方法, 通过软件控制 PTZ 相机进行旋转运动和变倍调节, 实现了不同位置、大范围目标的测距功能, 有助于辅助与增强激光除冰系统的工作性能。

### 1 激光除冰视觉测距系统结构

激光除冰视觉测距系统装置如图 1 所示。本系统主要由 PTZ 相机、指示激光器、三角支架及计算机等硬件设备和图像处理软件组成。本文使用的 PTZ 相机是海康威视 DS-2DC7423IW-A 型 400 万像素高清网络球机, 支持 2 560 × 1 440@30fps 高清画面输出, 内部集成云台能够承载相机水平 360 全角度旋转及垂直 90° 翻转, 镜头可伸缩可光学变焦, 焦距为 4.8~110 mm, 支持 23 倍光学变倍, 相机自身水平视角为 59.5~2.9° (广角—望角), 满足工程上场景范围动态变化和视觉测量精度的要求。指示激光器使用宏达公司 HD-D635P5-F1670 型 650 nm/5 mW 红色点光源。PTZ 相机与指示激光器分别固定于三角支架上, 且支持高度和俯仰位置调节。图像处理软件是在 Windows 10 环境下, 采用 Visual Studio 2015 和 MFC 进行界面层开发, 基于 OpenCV 开源视觉库和海康威视相机 SDK 开发包, 设计视觉处理算法。

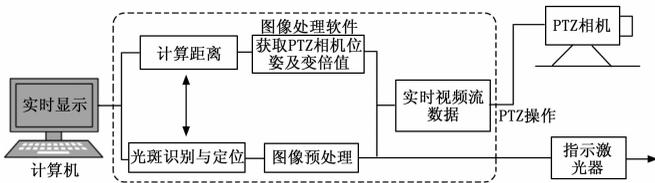


图 1 激光除冰视觉测距系统结构图

系统工作原理是激光三角测距原理<sup>[16-18]</sup>。要使测量系统具有较大的测量距离又能保证合理的测量范围, 必须保证采集设备具有可变视角和可变分辨率的能力, 为此本文基于 PTZ 相机实现了一种测量范围可调节的激光测距功能。如图 2 所示, 激光器向待测目标投射一束激光, PTZ 相机中心点在激光束投射路径上的垂直投影点为测距起点, 激光器与相机镜头中心点的间距为  $h$ 。通过控制 PTZ 相机进行位姿调节和变倍调节, 使得待测目标出现在拍摄画面中, 此时待测点和相机中心  $O$  之间的连线与测距起点和相机中心  $O$  之间的连线会存在一个夹角  $\theta$ 。当待测目标沿激光出射方向前后移动时, 相机画面中的光斑位置及大小也会随之发生变化, 从而造成  $\theta$  的变化。依据激光三角测距法的位置

关系, 可以得出待测距离  $D$  的大小为:

$$D = h \tan(\alpha \pm P_{fc} \cdot R_{pp} + r_o) \quad (1)$$

其中:  $\alpha$  为相机云台转角,  $P_{fc}$  (pixels from center) 为光斑像点到成像中心的像素个数,  $R_{pp}$  (radian per pixel) 为单个像素点所代表的弧度,  $r_o$  (radian offset) 为安装补偿因子。 $R_{pp}$  和  $r_o$  由相机固有参数决定, 由式 (1) 可知, 定焦距下  $\theta$  的大小主要取决于  $\alpha$  和  $P_{fc}$ 。可以通过一定的图像处理算法获得  $P_{fc}$  的大小, 在海康威视相机 SDK 开发包的支持下, 获得对应的云台转角  $\alpha$  大小, 进而实现激光测距功能。由于 PTZ 成像视野大小的影响, 固定位姿下系统的测量范围受限, 如图 2 所示, 位置 A 为测量的最小距离, 位置 C 为测量的最大距离。另外, 合理调节 PTZ 相机变倍值得到高分辨率的光斑图像, 会降低由环境光线干扰而导致的测距误差, 进而实现远距离测距。

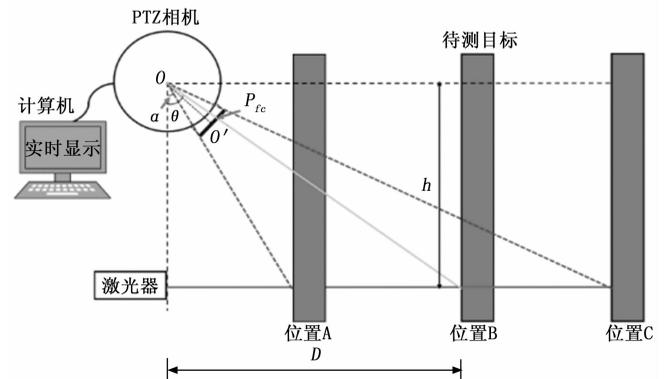


图 2 测量范围可调的激光三角测距法原理示意图

### 2 视觉测距系统软件设计

图像处理软件是整个视觉测距系统的关键所在, 负责完成光斑图像的采集、识别、定位及距离解算。软件运行的过程是, 首先利用海康威视提供的开发包对 PTZ 相机进行二次开发获取实时光斑视频流数据, 并解码为 YUV 图像数据结构, 再利用 cvCvtColor () 函数转换成 OpenCV 提供的库函数设计光斑图像的处理算法, 配合 PTZ 的云台控制实现激光测距功能。视觉测距系统软件设计流程图如图 3 所示。为了满足测距的实时性需求, 作者采用 MFC 多线程和链式队列相结合的方式, 实现图像数据采集与处理过程的协同工作, 最小化系统开销。

#### 2.1 PTZ 相机云台控制

云台指的是支撑和安装 PTZ 相机的平台, 可以通过云台控制器对外部信号的响应实现 PTZ 相机两个自由度的旋转及画面缩放。使用的海康威视 PTZ 相机支持水平 0~360° 旋转、垂直 -15~90° 旋转及 23 倍光学变焦, 且该款相机提供了通信及二次开发接口, 便于用户控制云台转动及变焦调节。云台控制的任务是根据用户指令驱动云台旋转与变倍, 保证画面中捕获高分辨率的光斑图像。系统云台控制工作流程是, 首先在使用 SDK 中的基础 API 之前, 调用函数 NET\_DVR\_Init 初始化 SDK; 接着使用函数 NET\_

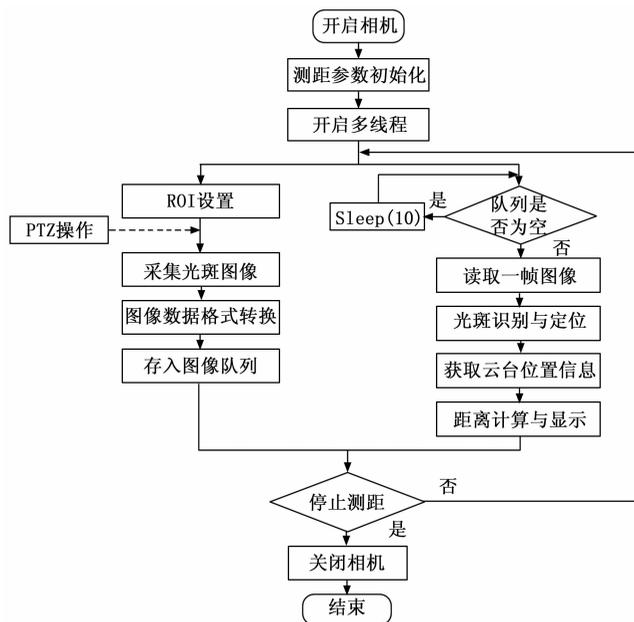


图 3 系统软件算法流程图

DVR\_Login\_V30 实现注册登录设备; 再利用带速度的控制函数 NET\_DVR\_PTZControlWithSpeed 依据用户指令向云台发送控制码, PTZ 接收后经云台控制器解码并驱动相机调节姿态和焦距, 云台转速有 6 个等级, 支持上下左右以及左上、左下、右上、右下共 8 个方向旋转, 镜头可伸缩可光学变焦; 最后在系统活动结束前需要调用函数 NET\_DVR\_Cleanup 释放 SDK 内存资源。

## 2.2 图像预处理

图像进行预处理<sup>[19]</sup>能减轻后续识别任务的负担, 提升图像质量。针对背景区域和噪声干扰的问题, 利用光斑 ROI 定位算法和中值滤波算法对光斑图像进行了增强, 突出了图像特征。

PTZ 采集图像的视场通常超过光斑的大小, 为了使后续算法处理目标更集中, 通过设置图像感兴趣区域 ROI 的方式截取图像中的光斑区域, 以消除背景带来的影响。使用 OpenCV 库函数 cvSetImageROI 设置 ROI 的大小, 将图像中光斑区域标记截取出来。由于激光反射形成的光斑易受到散射、衍射和自然光的影响, 从而导致采集到的光斑通常出现色变和形变等现象, 提升了光斑识别与定位算法的难度。为了滤除图像噪声及增强目标的可处理性, 选用中值滤波算法对噪声进行抑制。中值滤波是一种非线性滤波算法, 其处理过程是将图像中任意像素点的像素值更新为其邻域内的中值。使用 OpenCV 库函数 medianBlur 实现均值滤波操作, 该方法在抑制噪声的同时可以有效地克服由线性滤波算法导致的图像模糊等问题, 达到了“保边去噪”效果。

## 2.3 光斑识别与定位

在图像处理过程中, 颜色是一种描述图像非常有力的因子<sup>[20]</sup>。区别于灰度图像, 彩色图像对图像的信息往往表

达更完整。通过对原始光斑信号的分析, 发现光斑在图像中呈现红色或中心为白色且被红色包围的颜色特征。此时若采用单阈值分割的方法对图像进行处理将丢失光斑的颜色信息, 基于此本文采用 HSI 颜色阈值分割算法实现光斑初步检测。由于系统采集到的原始光斑图像是基于 RGB 颜色空间的, 需要进行颜色空间转换以获得 HSI 颜色空间下的光斑图像。首先将  $H$ 、 $S$ 、 $I$  分量取值范围标准化到  $[0, 255]$ , 再利用 OpenCV 库函数 cvThreshold 分别对各分量进行红色区域提取, 当阈值满足  $H: [220, 255]$ 、 $S: [43, 255]$ 、 $I: [46, 255]$  时可以准确分割出光斑区域, 最后使用函数 merge 合并成单通道图像, 得到二值化的光斑图像。为了填充空洞和去除边缘毛刺, 采用 OpenCV 库函数 floodFill 对区域进行漫水填充, 再调用形态学开操作函数 open 平滑边缘。

由于检测出来的二值图像通常存在背景区域的干扰, 如树叶、红色标记物等, 需要进一步验证结果区域是否为激光光斑。通常激光光斑表现为具有规则圆形或椭圆形的轮廓特征, 基于此采用圆形度检测算法对二值图像进行区域筛选, 以提高光斑识别的精度。圆形度是用于表征目标边缘轮廓复杂程度的物理量, 其取值范围为  $(0, 1]$ 。使用 OpenCV 库函数 contourArea 和 arcLength 计算区域面积  $A$  和周长  $L$ , 进而计算得到圆形度  $\omega$  的大小为:

$$\omega = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (2)$$

考虑到光斑的轮廓特征及系统的实时性要求, 选用圆拟合法对光斑进行定位。圆拟合法指的是当目标区域的形状是圆形或椭圆时, 可以通过提取图像边缘点并采用最小二乘法来逼近其轮廓。由于光斑边缘一般具有较好的对称性, 因此边缘检测算子的选用对光斑中心的计算精度影响可以忽略不计。使用 OpenCV 库函数 Canny 提取光斑轮廓, 并将边缘点的图像坐标保存到容器  $\text{vector}<\text{Point}>$  中, 通过遍历一次容器中的数据点就可以计算出光斑的中心坐标。本文设计的光斑图像处理流程如图 4 所示, 对不同环境、不同光照条件下采集的激光光斑图像处理结果如图 5 所示。

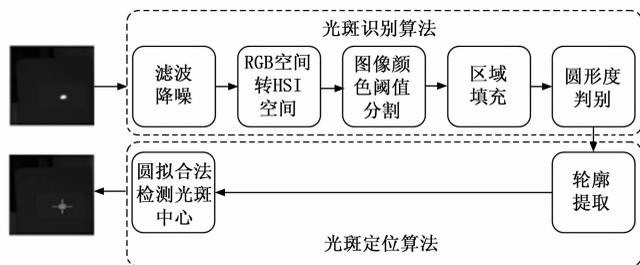


图 4 光斑图像处理流程图

## 3 实验结果与结果分析

### 3.1 系统参数标定

在应用公式 (1) 进行测距之前, 由于系统参数  $h$ 、 $R_{pp}$  及  $r_0$  需要进行标定。其中  $h$  可以通过卡尺或测距仪测量得

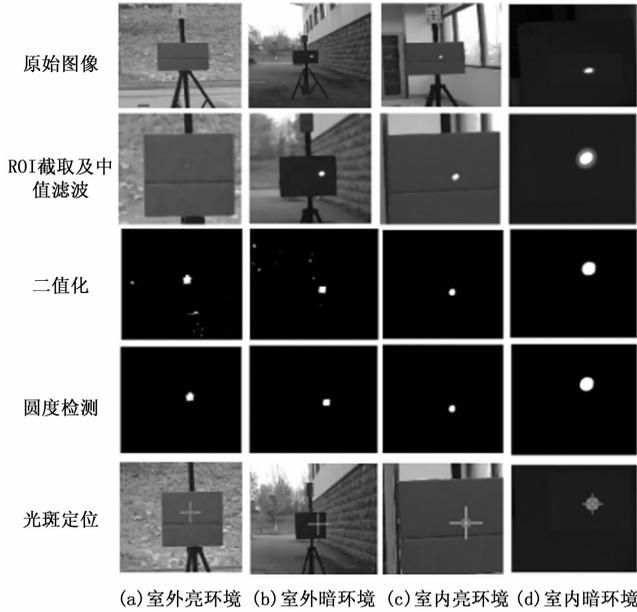


图 5 光斑图像处理结果图

到，而不同  $Zoom$  值下  $R_{pp}$  及  $r_o$  的大小则通过对已知目标测量对应的像素值和角度值，通过计算得到。

搭建的激光三角测距实验平台如图 6 所示，激光器与相机位置固定，且  $h=1\ 200\text{ mm}$ ， $r_o=1.607^\circ$ 。

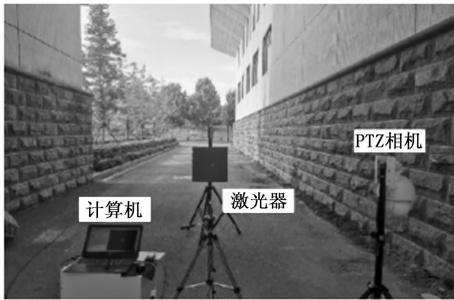


图 6 激光三角测距实验平台

$R_{pp}$  实验标定结果如图 7 所示，在  $Zoom=3/5/10/15/20$  倍的条件下， $R_{pp}$  值分别为  $0.008\ 7/0.005\ 4/0.002\ 8/0.002\ 5/0.001\ 5^\circ/\text{pixel}$ 。

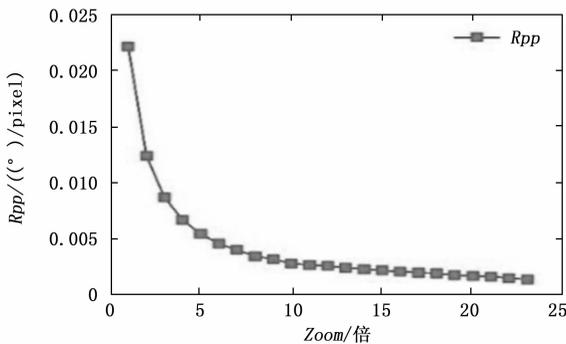


图 7 参数实验标定结果图

### 3.2 激光三角测距实验

将待测目标放置于距离相机不同的位置处，通过软件计算得到定点的测距结果，并与实际距离作比较。测量结果如表 1 所示。结果表明，固定变倍值下系统的测量误差随着距离的增大而增大，测量误差在  $Zoom=3$  倍时不大于  $54\text{ mm}$ ，在  $Zoom=5$  时不大于  $27\text{ mm}$ ，测量误差在  $Zoom=10$  时不大于  $19\text{ mm}$ ，在  $Zoom=15$  时不大于  $15\text{ mm}$ ，在  $Zoom=20$  时不大于  $11\text{ mm}$ 。

表 1 不同变倍值下  $40\text{ m}$  范围内测距结果

实际距离 /mm	变倍值/倍	云台转角/ $^\circ$	光斑中心横坐标/pixel	$P_{ic}/\text{个}$	测量值 /mm	误差 /mm
5 000	3	74.1	1 370.103	90.103	5 004.030	4.030
	5	74.7	1 316.547	36.547	4 996.172	-3.828
	10	74.6	1 389.106	109.106	4 996.476	-3.524
	15	75.0	1 232.019	47.981	5 003.298	3.298
	20	74.9	1 252.891	27.109	4 997.352	-2.648
10 000	3	80.6	1 397.229	117.229	10 005.698	5.698
	5	81.2	1 348.507	68.507	10 005.344	5.344
	10	81.3	1 380.022	100.022	9 995.006	-4.994
	15	78.3	1 421.003	141.003	10 004.115	4.115
	20	81.4	1 394.070	114.070	10 003.267	3.267
20 000	3	84.7	1 312.156	32.156	19 979.881	-20.119
	5	84.7	1 329.837	49.837	19 989.038	-10.962
	10	84.6	1 397.155	117.155	20 009.657	9.657
	15	81.5	1 355.411	75.411	20 005.961	5.961
	20	84.8	1 389.689	109.689	19 994.961	-5.039
30 000	3	86.3	1 252.500	27.500	29 957.915	-42.085
	5	86.3	1 238.713	41.287	29 984.757	-15.243
	10	86.2	1 237.663	42.337	29 987.997	-12.003
	15	86.0	1 317.204	37.204	30 008.233	8.233
	20	86.0	1 337.729	57.729	30 007.65	7.650
40 000	3	86.4	1 309.586	29.586	39 946.317	-53.683
	5	87.1	1 207.879	72.121	39 973.101	-26.899
	10	86.5	1 352.516	72.516	39 981.336	-18.664
	15	86.9	1 210.830	69.170	39 985.519	-14.481
	20	86.8	1 200.660	79.340	39 989.973	-10.027

图 8 展示了不同变倍值下实际距离与测量绝对误差的变化关系，观察可得，系统测量误差随着变倍值的增大而减小，这是由于随着  $Zoom$  值的减小，相机固有的视场角会变大，即  $R_{pp}$  值会增大，从而导致测量误差放大。

综上所述，可以通过调节相机  $Zoom$  值实现  $40\text{ m}$  范围内不同位置处的精确测距。具体地，当待测距离在  $5\text{ m}$  以内时  $Zoom$  值的可选区间为  $[1, 5)$  倍，在  $5\sim 10\text{ m}$  时  $Zoom$  值的可选区间为  $[5, 10)$  倍，在  $10\sim 20\text{ m}$  时  $Zoom$  值的可选区间为  $[10, 15)$  倍，在  $20\sim 30\text{ m}$  时  $Zoom$  值的可选区间为  $[15, 20)$  倍，在  $30\sim 40\text{ m}$  时  $Zoom$  值的可选区间为  $[20, 23]$  倍。实验中，单帧图像处理耗时为  $29.95\text{ ms}$ 。

### 4 结束语

为了实现激光远程除冰系统视觉测距需求，基于 OpenCV (下转第 125 页)