

激光与光电子学进展

基于 Qt 和 MATLAB 混合编程的水下光斑目标跟踪软件设计

王凯强^{1,2,3*}, 李哲^{1,2,3}, 邢振冲^{1,2,3}, 马仙仙^{1,2,3}¹中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;²中国电科网络通信研究院, 河北 石家庄 050081;³河北省光子信息技术与应用重点实验室, 河北 石家庄 050081

摘要 水下无线激光通信相比于水声、长波、甚长波等传统水下无线通信手段具有明显的技术优势, 而在水下特殊信道环境影响下, 信号光斑易产生形变、闪烁, 导致通信链路建立和维护难以进行。针对这一问题, 提出了一种基于 Qt 和 MATLAB 混合编程的水下光斑目标跟踪软件设计方法, 通过均值漂移 (Mean Shift) 迭代算法实现水下目标光斑的识别和定位, 采用 MATLAB 和 Qt 混合编程手段编写软件界面, 搭建水箱实验平台并导入采集到的光斑序列图像。通过软件完成光斑目标识别和移动轨迹绘制, 计算结果与实际光斑移动轨迹基本吻合, 最大误差偏移量为 7.28 pixel, 验证了算法功能的有效性。

关键词 水下无线光通信; 均值漂移算法; 光斑跟踪定位; 软件设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231243

Design of Underwater Spot Target Tracking Software Based on Qt and MATLAB Mixed Programming

Wang Kaiqiang^{1,2,3*}, Li Zhe^{1,2,3}, Xing Zhenchong^{1,2,3}, Ma Xianxian^{1,2,3}¹54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;²Academy for Network and Communications of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;³Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Applications, Shijiazhuang 050081, Hebei, China

Abstract Underwater laser communication has significant technological advantages over traditional underwater wireless communication methods such as acoustic, long-wave, and very-long-wave communication. However, the underwater environment makes the signal spot vulnerable to deformation and flicker, thus hindering the establishment and maintenance of a reliable optical link. To overcome this problem, we devise an underwater spot tracking software design approach based on Qt and MATLAB mixed programming. The approach adopts the Mean Shift iterative algorithm for underwater spot target recognition and localization. A mixed programming method of MATLAB and Qt is used to create the software interface, build a water tank experimental platform, and import the spot photographs. Spot target recognition and movement trajectory drawing are realized using the software, thus verifying the effectiveness of the algorithm. The final result is essentially consistent with the actual spot trajectory, and the maximum error offset is 7.28 pixel.

Key words underwater wireless optical communication; mean shift algorithm; spot target tracking and positioning; software design

1 引言

相比于传统水下通信手段, 水下无线激光通信^[1-2] (Underwater wireless optical communication, UWOC) 具有灵活性好、传输速率高、不受电磁干扰等优势, 受

到人们的广泛关注。相比于大发散角的发光二极管 (Light emitting diode, LED) 光源^[3], 激光光源 (Laser diode, LD) 方向性好、调制速度高, 这意味着激光通信终端机具备更远的传输距离和更大的通信带宽, 但由于水下信道环境复杂多变, 激光通信链路的建立和维持

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-08-07

通信作者: *1761961020@qq.com

易受影响,无法实现稳定传输。

在无线激光通信系统中,往往采用转塔式或反射镜式二维机动平台,通过构建具备光信号捕获、跟踪、对准(Acquisition, tracking and pointing, ATP)功能的伺服控制机构来实现链路对准^[4]。例如在机载或车载平台上,采用两轴两框架转台和粗精跟踪系统组合的通信伺服结构,搭配自适应光学等校正手段和通信增强算法以实现大带宽、高保真的数据传输^[5]。这些手段对大气信道中的无线光信号传输和通信建链起到很好的效果,但在水下环境中 LD 易受湍流影响,导致光斑被遮挡或发生形变,对目标光斑的捕获和跟踪产生不利影响^[6]。

为解决上述问题,研究人员采用软件算法对目标光斑进行甄别并实现质心提取,提出了各种针对激光光斑的跟踪算法及优化手段,致力于提高光斑位置解算速度和识别准确率。2022 年,长春理工大学田明等^[7]采用图像处理器(Graphic processing unit, GPU)并行计算的手段加速灰度质心算法以实现高速率捕获和跟踪,确保高稳定性、低误码率的无线光通信传输。针对水下光斑跟踪方面的研究,国内近些年相关报道较多,如 2020 年,中国科技大学 Zhang 等^[8]提出了一种基于傅里叶相位的水下激光光斑定位算法,并通过长度为 10 m 的水箱实验验证了算法的可行性,相比于传统方式,该算法对偏转角的估计标准差有所改进。同年,西安邮电大学杨伟等^[9]将非线性估计算法(扩展卡尔曼滤波)与基本状态反馈控制理论相结合来实现水下 LD 光斑的追踪,根据光强预估最佳接收位置,并通过反馈算法实现主动跟踪对准,仿真结果表明接收端对准误差在 2 mm 以下,稳定后接收效率超过 98%。相较而言,国外近些年相关方面的研究报道较少,比较典型的有 2017 年英国 Williams 等^[10]开发的一套可实现水下激光捕获跟踪的双向通信设备。该系统采用发散角可变的光束扫描策略,通过宽视场互补金属氧化物半导体(CMOS)相机实现对大发散角的信标光捕获,并利用由硅基光电倍增管阵列构成的象限探测器进行信号光精跟踪。实验展示了 2 个水下节点的双向稳定激光捕获跟踪,其接收端信号光功率仅需达到 nW 级。

本文采用基于均值漂移(Mean Shift)的目标跟踪算法提高水下光斑的识别准确率和跟踪速度,该算法计算量较低、解算速度快,适用于需要实时跟踪的场合。同时,该算法对目标发生旋转、边缘遮挡和拉伸变形等因素不敏感,适合水下复杂信道环境^[8-9]。为便于操作并进行算法效果验证,采用 Qt Creator 和 MATLAB 混合编程方法编写光斑目标跟踪软件,将 MATLAB 算法程序封装成可调用动态链接文件(Dynamic link library, DLL)文件,借助 Qt 软件优秀的 2D 图像绘制能力,实现图像选择、目标框选、光斑定位和移动轨迹绘制等操作,结合均值漂移迭代算法,对拉伸形变的光斑目标同样具有良好的跟踪识别效果^[11-13]。

2 光斑检测系统搭建

光斑检测系统作为 ATP 系统的重要分系统,主要工作是完成图像采集、目标识别和光斑质心提取,生成偏离视场中心的脱靶量信息,并输出至下级伺服单元,从而实现高精度的光束跟踪^[10,13]。本实验所搭建的光斑检测系统主要器件和工作流程如图 1 所示。

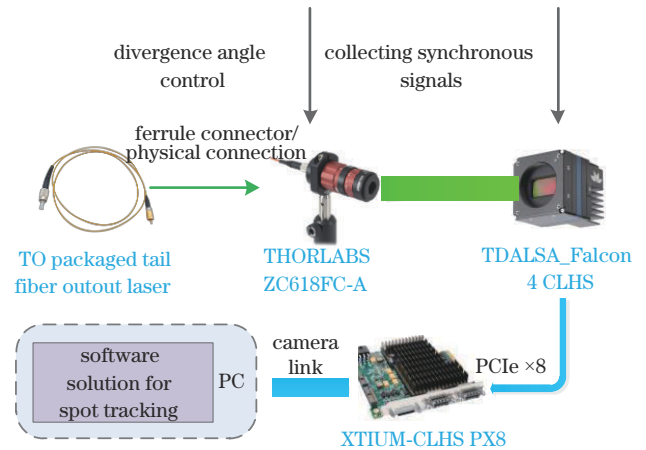


图 1 光斑监测系统方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the spot monitoring system scheme

光源选用欧司朗公司的大功率的晶体管外形(TO)封装半导体激光器,输出功率可达 80 mW,中心波长为 520 nm。采用光纤熔接工艺将出光端面耦合至一根单模光纤,后接变焦光纤准直器,通过调焦可将激光发散角约束至 0.1 mrad。考虑运动目标成像和目标视场角等因素,对相机像素、帧频和 CCD 阵列尺寸做出要求,选用 TDALSA 公司的 Falcon_4 CLHS 型号工业相机作为捕获探测器,像素数为 4480 pixel×2496 pixel,像元尺寸为 6 μm,最大帧频为 600 frame/s。根据图 1 所示光斑监测系统方案搭建实验平台,收发两端通过光学支架固定在位于 4.5 m 长水缸两端的小型光学平台上。发射端激光器由直流稳压电源驱动,调整准直器方向及发散角在光学镜头视场范围以内。为避免杂散光影响,接收端 CCD 相机放置于暗箱,开孔放置(520±10) nm 窄带滤光片。图像采集板卡通过 PCIe 接口插入工控机主板,安装相关硬件驱动程序及相机控制软件,调整镜头焦距和相机参数至视场内出现清晰绿色光斑,输入采集同步指令开始进行光斑图像信息采集,并将采集结果储存于工控机硬盘,由目标光斑跟踪软件进行目标的选取、识别、定位和跟踪计算。软件可对单帧序列图像进行处理,具体工作流程如图 2 所示。

软件操作界面使用 Qt 5.14.1 编写,编译器采用 MSVC2017 64 bit。Qt 特有的信号-槽机制可方便实现 C++ Callback 函数回调功能,使用简便高效,同时具备优良的跨平台开发能力,降低了移植难度。Qt 丰富的应用程序编程接口(API)资源编写功能可以满足

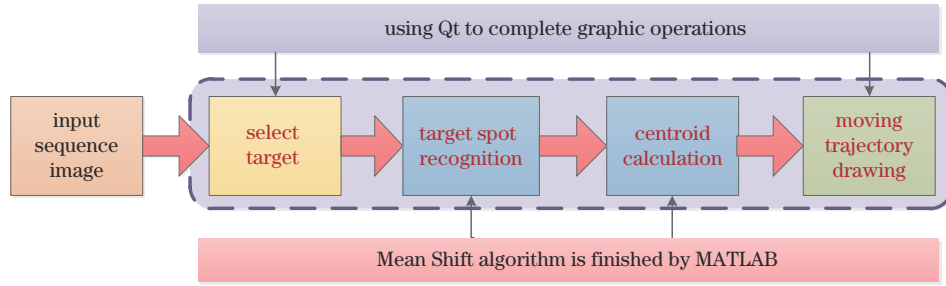


图 2 目标跟踪算法软件工作流程

Fig. 2 Workflow of target tracking algorithm software

文件读取、图像存储和图形绘制等需求。图像处理算法部分通过 MATLAB R2022b(64 bit)编写 .m 文件来完成,实现目标区域灰度直方图统计、候选区域灰度直方图统计、均值漂移迭代、坐标位置更新、质心计算等操作。利用软件 Package 功能将文件打包成 C++ 动态链接库 DLL,Qt 导入 lib 库后可调用 DLL 中的函数。通过 Realease 编译后的 exe 文件经 Deployqt 工具打包,即可生成兼容 Windows 平台的软件版本。

3 水下光斑目标跟踪软件设计

3.1 水下光斑目标跟踪算法构建

水下光斑跟踪采用均值漂移算法来实现目标跟踪,在初始帧处手动框选目标光斑区域,以当前位置作为下一帧的起始搜索中心,提取当前区域的像素信息作为目标光斑模型^[12]。模型计算过程如下:假定目标光斑区域中有 n 个像素点,用 $z_i (i=1, \dots, n)$ 表示目标区域分布的像素点。由于工业相机采集到的是 RGB 彩色图像,像素灰度值计算方法为像素点对应 R、G、B 三种颜色分量分别乘以不同权重再求和。均匀划分框选区域中的灰度,获得由 m 个不同的灰度值组成的灰度直方图, m 的取值范围为 $[0, 4096]$ 。目标光斑模型灰度分布由 $q_u (u=1, \dots, m)$ 表示,

$$q_u = C \sum_{i=1}^n K(z_i^2) \delta[b(z_i) - u], \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n K(\|z_i^*\|^2)}, \quad (2)$$

$$z_i^* = \sqrt{\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}{x_0^2 + y_0^2}}, \quad (3)$$

式中: C 为归一化系数; $\|\cdot\|$ 表示取模,即像素点坐标距取样矩形框中心点的距离; $K(\cdot)$ 为 Epanechnikov 核函数; (x_0, y_0) 为目标光斑中心坐标; z_i^* 为以目标光斑中心为原点的归一化像素坐标; $b(z_i)$ 为 z_i 处像素对光斑模型颜色直方图的颜色索引; u 为颜色直方图的颜色分量; $\delta[b(z_i) - u]$ 用于判断 z_i 处的颜色值是否属于直方图分量,是为 1, 否为 0。水下信道环境特殊,外界因素会使光斑形状、大小受到扰动,导致光斑外延像素

信息不够可靠,采用以核函数为目标区域设置加权值,离目标中心越近,权值越重。

在当前帧中进行图像搜索时,以上一帧目标像素的中心位置作为起始搜索窗口,得到候选区域的灰度直方图分布,设候选目标中心像素位置为 f , 计算得到灰度直方图概率密度计算公式为

$$p_n(f) = C_h \sum_{i=1}^n K\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right) \delta[b(z_i) - u], \quad (4)$$

$$C_h = \left[\sum_{i=1}^n K\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

式中: h 为框选目标范围大小; C_h 为标准化系数。在理想情况下,候选区域的灰度直方图分布与初始模型一致,但在实际跟踪过程中,图像帧中的光斑形状与初始目标并不相同。采用 Bhattacharyya 系数作为相似度函数,即 $\rho(p, q) = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(f) q_u}$ 。相似度函数值越大,目标光斑模型和候选模型的相似度越高。当 $\rho(p, q)$ 趋近于 1 时,两者相似度最高;趋近于 0 时,两者相似度最低。通过均值漂移算法进行迭代,求得相似度函数值最大的位置坐标。将 Bhattacharyya 系数进行泰勒展开,可表示为

$$\rho(p, q) \approx \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(f) q_u} + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^n w_i K\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right), \quad (6)$$

式中: $w_i = \sqrt{\frac{q_u}{p_u(f)}}$ 。求 $\rho(p, q)$ 最大值,即求 $\frac{C}{2} \sum_{i=1}^n w_i K\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right)$ 最大值。通过均值漂移算法进行迭代,即

$$f_{k+1} = f_k + \frac{\sum_{i=1}^n w_i (f_k - z_i) g\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right)}{\sum_{i=1}^n w_i g\left(\frac{f - z_i^2}{h}\right)}, \quad (7)$$

式中: $g(x) = -K'(x)$; k 表示帧数。

算法流程如图 3 所示,具体步骤步骤如下:

1) 手动框选目标位置,计算目标区域灰度模型 $\{q_u\}, u=1, \dots, m$ 。

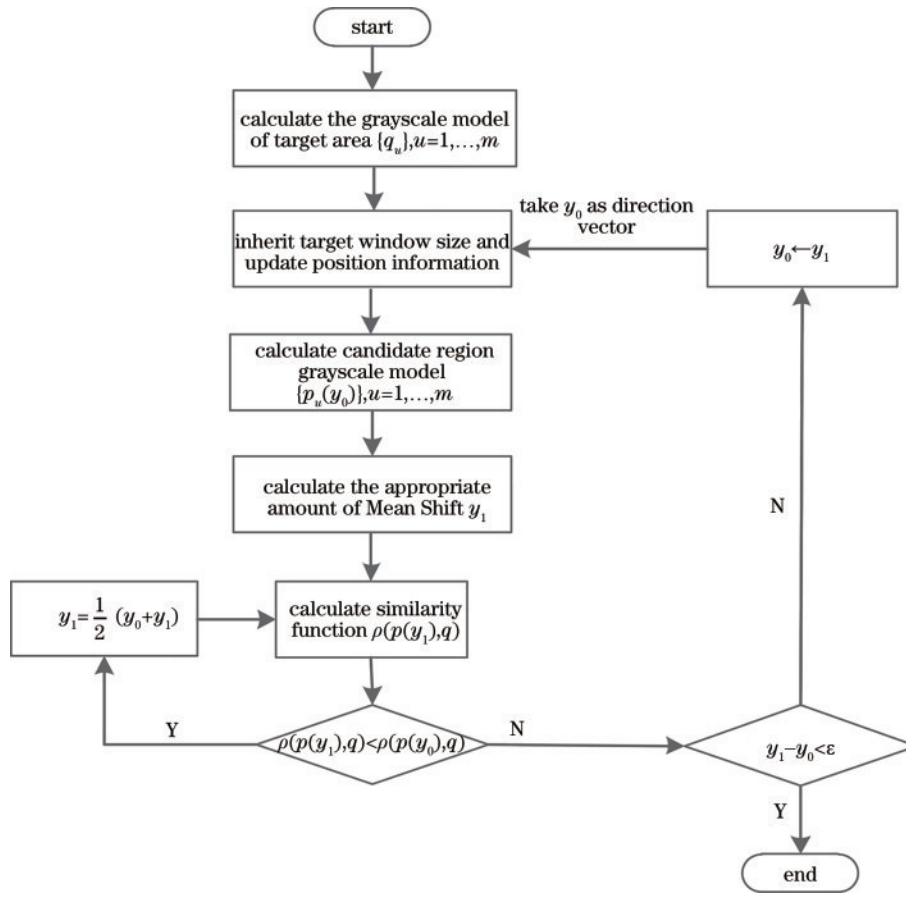


图 3 均值漂移算法迭代流程

Fig. 3 Mean Shift algorithm iteration process

2) 继承上一帧目标位置为初始起点, 计算候选区域灰度模型 $\{p_u(y_0)\}, u=1, \dots, m$ 。

3) 根据 $w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(f)}} \delta[b(z_i) - u]$ 计算当前窗口内各灰度权重分布。

4) 更新位置坐标信息 $y_1 = \frac{\sum_{i=1}^m z_i w_i g\left(\frac{y_0 - z_i^2}{h}\right)}{\left[\sum_{i=1}^m w_i g\left(\frac{y_0 - z_i^2}{h}\right)\right]}$ 。

5) 计算 $\rho(p(y_1), q) = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(y_1) q_u}$ 。

6) 若 $\rho(p(y_1), q) < \rho(p(y_0), q)$, 则 $y_1 \leftarrow \frac{1}{2}(y_0 + y_1)$, 重新计算 $\rho(p(y_1), q)$;

若 $y_1 - y_0 < \epsilon$, 则停止迭代; 否则, $y_0 \leftarrow y_1$ 并转至步骤 2) 其中, ϵ 表示无穷小量。

7) 取目标区域的框线中心位置为跟踪到的目标光斑质心坐标。

3.2 软件交互界面设计

使用 Qt 软件和 C++ 语言制作上位机的可视化界面, 分别对函数进行封装, 为每个函数设置用户输入和输出窗口, 并通过控件完成文件读取和显示。为便

于实现目标截取操作, 重写 QLabel 函数为自定义的 MyLabel 类, 在 UI 编辑界面提升控件, 可实现在绘制框线时打印矩形窗口尺寸及位置信息的功能, 并支持进行窗口拖动平移操作。

通过调用 DLL 文件中的函数, 可实现图像像素灰度信息统计和均值漂移算法迭代的功能, 将更新后的位置坐标信息赋值给 C++ 程序内部的变量, 以便进行后续计算。使用 MATLAB 生成的动态链接库使程序可以脱离 MATLAB 环境独立运行, 节省程序所占用的内存资源, 提高代码的执行效率, 弥补了 Qt 不便于进行大规模矩阵和高精度浮点型计算的缺点。最终创建的用户界面包含 4 个部分, 分别是目标截取、模型计算、目标识别和移动轨迹绘制。分别使用 Qt 绘制美化并与内部算法进行完整联通, 以方便用户操作, 4 个界面功能如下:

1) 目标光斑截取: 通过可拖拽的矩形框线选取第一帧中的光斑作为初始模型;

2) 单帧图像跟踪: 根据初始光斑模型, 利用均值漂移算法对单帧图像进行目标识别, 计算迭代后的目标位置中心和灰度权值, 并打印直方图分布结果;

3) 序列图像跟踪: 读取光斑移动的单帧图像, 以上一帧识别结果作为下一帧目标模型进行均值算法迭代;

4) 移动轨迹绘制: 读取光斑移动的序列图像, 根据光斑中心计算结果绘制移动轨迹。

为避免用户界面冻结问题, 使用多线程完成均值漂移算法的迭代: 点击开始运行模型后, 将输入参数赋值, 通过 WorkThread 类创建一个新的线程, 并启动线程, 在线程中完成计算后, 发送停止信号, 释放并

等待线程的回收, 最后将输出结果打印在显示控件上。

用户操作界面是软件开发面向用户的重要一环, 界面安排是否合理、清晰, 使用是否方便, 操作是否简单等都是在这一部分应该考虑的重点。最终界面显示效果如图 4 所示。



图 4 水下光斑目标跟踪软件界面

Fig. 4 Underwater spot target tracking software interface

4 测试结果与分析

为进一步模拟在真实水下环境中接收到的光斑图像, 利用 4.5 m 长的水缸搭建桌面演示平台。通过工业相机采集水下光斑移动的视频信息, 在时间轴上等间隔截取部分图像并存储至工控机硬盘, 通过目标光斑跟踪软件选定初始光斑目标, 读取单帧和序列图像, 利用均值漂移算法分别对图像进行目标识别。

4.1 单帧图像不同光斑识别效果

首先, 在水缸两端拍摄正常光斑连续运动的视频图像, 选取图像序列中较为典型、光斑无明显形变的单帧图像进行测试。通过软件截取目标光斑作为初始模型, 保留窗口尺寸和位置信息作为均值漂移的初始起点进行迭代, 形状相似、位置不同的光斑识别结果如图 5 所示。

通过水下光斑目标跟踪软件截取光斑位置信息为

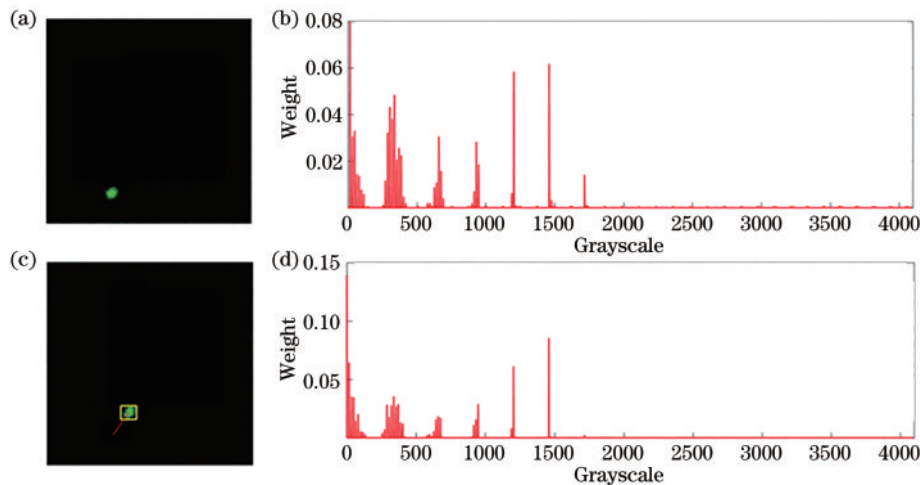


图 5 光斑追踪效果。(a) 原始光斑照片; (b) 原始目标灰度权值矩阵分布; (c) 光斑识别结果; (d) 识别目标灰度权值矩阵分布
Fig. 5 Spot tracking effect. (a) Original spot photo; (b) distribution of weight matrix of original spot photo; (c) spot recognition result; (d) distribution of weight matrix of matched target

(141, 401), 尺寸信息为 $35 \text{ pixel} \times 35 \text{ pixel}$ 。经均值漂移算法 12 次迭代后识别到移动后的光斑位置, 绘制移动前后目标中心位置轨迹。最终结果的灰度权值模型分布与原始光斑较为相似, 光斑移动轨迹符合实际结果。以同一初始模型对水下变形光斑进行目标识别,

结果如图 6 所示。

经均值漂移算法迭代 16 次后识别到目标光斑所在位置, 截取到最终结果的灰度权值分布与原始光斑有较大的差别。说明应用均值漂移算法的光斑追踪软件对拉伸变形光斑依然可以进行有效识别。

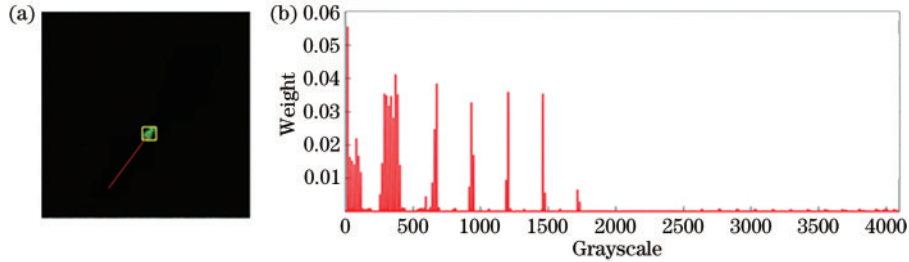


图 6 光斑追踪效果。(a)光斑识别结果;(b)识别目标灰度权值矩阵分布

Fig. 6 Spot tracking effect. (a) Recognition result; (b) distribution of weight matrix of matched targets

4.2 序列图像光斑目标追踪及移动轨迹绘制

通过人为增加扰动的方式模拟海水湍流, 使水下光斑目标闪烁, 使用相机拍摄光源运动状态下的光斑移动图像。等时间间隔下截取 8 帧典型单帧图像, 如图 7 所示。

通过水下光斑目标跟踪软件读入序列图像, 在第一帧图像中选取目标初始模型, 截取光斑位置为 (96, 279), 矩形框尺寸为 $27 \text{ pixel} \times 27 \text{ pixel}$ 。由图 7 可以看

出, 在水箱中加入扰动后的目标光斑的形状尺寸受到影响, 在第 4 帧和第 7 帧目标光斑出现明显的形状拉伸, 其他帧中光斑大小也不均匀。应用均值漂移算法的目标识别软件追踪到光斑所在位置, 并绘制光斑中心移动轨迹, 如图 8(a) 所示。所得移动轨迹与光源移动方向和距离基本吻合, 考虑截取图像帧间时间、像元尺寸、光源实际移动距离、镜头参数等因素, 计算扰动下光斑跟踪误差如图 8(b) 所示。

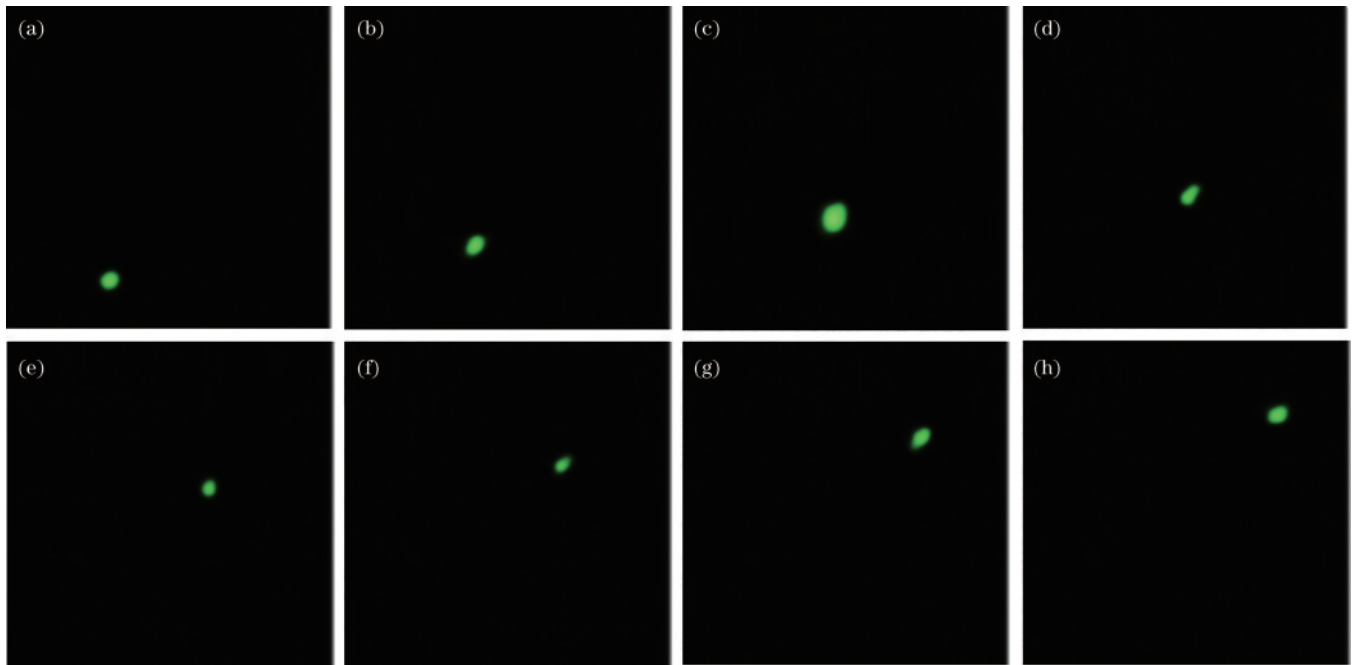


图 7 移动光斑目标序列帧图像

Fig. 7 Moving spot target sequence frame images

根据软件跟踪结果计算水下信道扰动下移动光斑的跟踪误差, 结果如表 1 所示。光斑目标提取跟踪结果与实际光斑运动趋势基本吻合, 通过均值漂移算法计算出每帧迭代次数均低于 20 次。由表 1 可以看出, 光斑中心计算坐标与实际光斑移动位置存在差异, 主

要由两个因素引起: 初始帧的目标选取通过截取矩形窗口完成, 停止迭代意味着当前矩形框内像素的灰度权值模型与所框选目标具有较高相似度。由于光斑出现拉伸形变, 且相似度判定存在阈值, 因此不能保证矩形窗口中心位置为目标真正中心位置; 由于施加人为

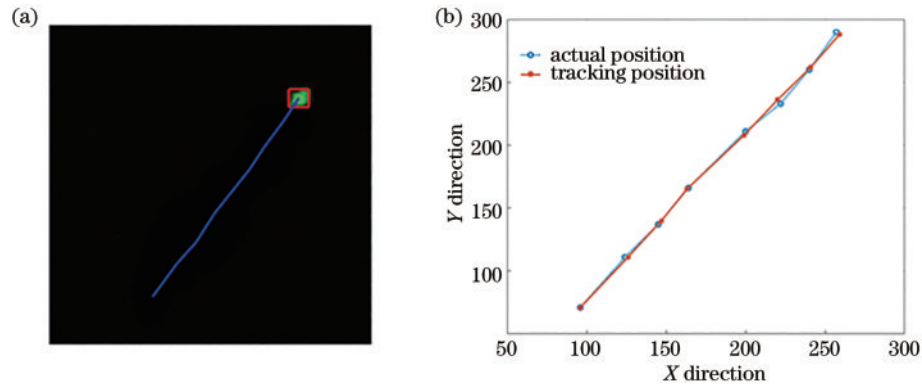


图 8 序列光斑图像追踪结果。(a)光斑移动轨迹绘制;(b)跟踪位置与实际位置坐标误差曲线

Fig. 8 Sequential spot image tracking results. (a) Spot movement trajectory drawing; (b) coordinate error curves of tracking and actual positions

表 1 水下信道扰动下移动光斑跟踪误差
Table 1 Moving spot tracking error underwater channel disturbance

Sequence	Actual position	Tracking position	Pixel error / pixel
a	(96,279)	(96,279)	-
b	(124,239)	(126,239)	2.00
c	(145,213)	(147,210)	7.28
d	(164,184)	(163,185)	1.41
e	(200,139)	(199,142)	3.33
f	(222,117)	(220,114)	3.60
g	(240,90)	(241,88)	2.24
h	(257,66)	(259,62)	4.47

扰动因素,光路发生偏折,入射光斑位置偏离原本出射方向,使光斑移动轨迹判定出现误差。通过对比移动轨迹与实际光斑运动位置可以看出,最大误差偏移量为 7.28 pixel。

5 结 论

针对在水下无线光通信特殊信道环境下,激光信号易受湍流影响,导致光斑拉伸变形、难以识别,进而影响伺服系统跟踪对准的问题,采用 MATLAB 与 Qt 混合编程的方法,编写了基于均值漂移算法的水下光斑目标识别跟踪软件。该软件采用颜色及中心位置权重分布作为目标特征构建灰度权值分布模型,经均值漂移迭代算法可快速识别到目标所在位置,且不受光斑本身形变影响。最后搭建水箱实验平台,拍摄在人为模拟湍流扰动下的目标光斑图像并导入软件进行计算验证,成功追踪到序列图像帧中闪烁光斑所在位置并绘制出光斑移动轨迹,经分析其最大误差偏移量为 7.28 pixel。本实验设计编写的软件可为水下无线激光通信伺服跟踪系统软件算法设计提供参考,为水下特殊环境中目标光斑质心提取、跟踪相机脱靶量计算等过程提供一种解决思路。该软件的算法兼容性强,可作为伺服系统嵌入式算法的先验平台。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [3] 朱凡, 李颖先, 谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 817-826.
Zhu F, Li Y X, Tan J B. Design of high-accuracy laser beam collimation system[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(4): 817-826.
- [4] 李小明, 张立中, 孟立新, 等. 机载无线激光通信对准-捕获-跟踪系统及动态飞行试验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(6): 1044-1051.
Li X M, Zhang L Z, Meng L X, et al. Research and experiment of pointing/acquisition/tracking system for airborne space laser communication[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(6): 1044-1051.
- [5] 王蓉蓉, 蒋中云. 基于改进 CenterNet 的水下目标检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(2): 0215001.
Wang R R, Jiang Z Y. Underwater object detection algorithm based on improved CenterNet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(2): 0215001.
- [6] 刘有用, 张江梅, 王坤朋, 等. 不平衡数据集下的水下目标快速识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(17): 236-242.
Liu Y Y, Zhang J M, Wang K P, et al. Fast underwater target recognition with unbalanced data set[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(17): 236-242.
- [7] 徐声振, 田明, 倪小龙, 等. 采用 GPU 加速的无人机光通信系统对准技术[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(6): 29-36.
Xu S Z, Tian M, Ni X L, et al. Alignment technology of UAV optical communication system using GPU acceleration [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(6): 29-36.
- [8] Zhang X N, Li S B, Liu W J, et al. Positioning of turbulence-distorted laser spot for underwater optical

- wireless communication[C]//2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 20-22, 2020, Porto, Portugal. New York: IEEE Press, 2020.
- [9] 刘豪, 杨祎, 阴亚芳, 等. 基于 EKF 的水下 LD 通信精对准控制算法[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0406003.
Liu H, Yang Y, Yin Y F, et al. Alignment control algorithm of underwater LD communication based on EKF[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0406003.
- [10] Williams A J, Laycock L L, Griffith M S, et al. Acquisition and tracking for underwater optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10437: 1043707.
- [11] 孟球, 杨旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1244-1260.
Meng L, Yang X. A survey of object tracking algorithms [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1244-1260.
- [12] 孙玉秋, 胡维, 黎雄. 带宽自适应的 Mean-Shift 跟踪算法[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(1): 5-11, 83.
Sun Y Q, Hu W, Li X. Algorithm of target tracking based on mean-shift with adaptive bandwidth[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(1): 5-11, 83.
- [13] 李鑫鹏, 于德洋, 郭劲, 等. 极紫外光刻光源驱动激光光斑高精度检测技术研究[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 0204002.
Li X P, Yu D Y, Guo J, et al. Research on high-precision detection technology of laser spot driven by extreme ultraviolet lithography light source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(2): 0204002.
- [14] 张倩, 张坤, 朱美强, 等. 运动模糊情况下的结构光光条中心快速提取[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0112002.
Zhang Q, Zhang K, Zhu M Q, et al. Fast extraction of structured light stripe center under motion blur[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0112002.