

引用格式: HE Feng-tao, LI Si-jing, YANG Yi, *et al.* Receiver Alignment System Based on Underwater Spot Tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1001002
贺锋涛,李思静,杨祎,等. 基于水下光斑跟踪的接收机对准系统[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1001002

基于水下光斑跟踪的接收机对准系统

贺锋涛, 李思静, 杨祎, 张建磊

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘 要: 针对水下无线激光通信中光斑易变形、易受湍流影响和易被遮挡的问题, 采用均值漂移与无迹卡尔曼滤波器结合阈值判断的跟踪光斑算法, 获取跟踪光斑实时位置坐标. 分析得到光斑在被遮挡、变形和受湍流影响时, 实际移动轨迹和跟踪移动轨迹的误差分别在 2.1%、4% 和 1.2% 左右, 验证了算法的可行性. 搭建接收机对准系统, 利用跟踪光斑实时位置和中心位置的关系, 控制接收机和发射机的实时对准. 通过对比对准系统获得光斑的实际中心坐标和严格对准时光斑中心坐标之间的偏差, 来反映系统的对准精度, 实验结果发现接收机的运动角速度越大, 对准精度越小.

关键词: 水下无线光通信; 跟踪对准; 均值漂移; 无迹卡尔曼滤波器; 控制系统

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204910.1001002

Receiver Alignment System Based on Underwater Spot Tracking

HE Feng-tao, LI Si-jing, YANG Yi, ZHANG Jian-lei

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Aiming at the problem that the light spot in underwater wireless laser communication is easily deformed, susceptible to turbulence and to be blocked, firstly, the tracking light spot algorithm of Mean Shift combined with unscented Kalman filter and threshold judgment is used to obtain the real-time position coordinates of the tracking light spot. The analysis results show that when the light spot is blocked, deformed or affected by turbulence, the error between actual movement trajectory and tracking movement trajectory are about 2.1%, 4%, and 1.2%, respectively, which verifies the feasibility of the algorithm. A receiver alignment system is built to track the real-time position of the light spot. The real-time alignment of the receiver and transmitter is controlled based on the relationship of the real-time position and the center position. The alignment accuracy of the system is reflected by the deviation between the actual center coordinates and the center coordinates of the light spot obtained by comparing the alignment system. The experiment results show that the greater the angular velocity of the receiver's motion, the smaller the alignment accuracy.

Key words: Underwater wireless optical communication; Tracking alignment; Mean shift; Unscented Kalman filter; Control system

OCIS Codes: 010.3310; 060.4510; 140.0140

0 引言

水下无线光通信^[1-3](Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)因其灵活性好、数据传输速

基金项目: 国家自然科学基金(No.61805199), 陕西省技术创新引导专项基金(No. 2020TG-001), 西安邮电大学研究生联合培养工作基地(No.YJGJ201905), 国防基础科研计划实验室稳定支持专项项目(No.JCKY2020207CD02)

第一作者: 贺锋涛(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为水下无线光通信、激光散斑传感、成像方向. Email: hefengtao@xupt.edu.cn

收稿日期: 2020-06-30; **录用日期:** 2020-08-25

<http://www.photon.ac.cn>

率高和安全性好等优点,成为人们感兴趣的通信方式.但光源容易受到水下复杂环境的影响,偏离原本的发射接收链路,导致链路无法稳定维持数据的传输.

在空间和卫星光通信中对激光的捕获、跟踪和对准^[4](Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统应用已经成熟.如针对机载激光通信,有粗瞄系统和精瞄系统组成两级复合的跟踪系统^[5]和基于两轴四框架转台的通信跟踪系统^[6].但这些基于卫星光通信的ATP系统结构设备复杂、成本高,放在水下应用难度大,针对水下光通信链路对准的问题,国外研究者提出增加发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源发射机或接收机的结构复杂度的解决方案,如使用阵列LED发射机或大面积倍增管^[7-8],但这种增加通信稳定性的方法会导致系统的占用空间、成本和复杂度增大.近年来SOLANKI P B^[9-10]等提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的角度估计接收器方向与接收器-发射器线之间夹角的算法,以此来控制LED水下通信系统,该算法仅使用来自单个光电二极管测得的光强度进行连续测量,通过扫描技术获得连续的测量值,并验证了该对准算法的有效性.但是对于水下光通信来说,LED作为发射光源发散角大,导致无线光通信效率太低,传输距离太近.为了提高水下无线光通信效率和传输距离,采用通信速率高、保密性强、方向性好的激光作为系统的光源.

近年来,研究者降低复杂度,通常利用软件算法和硬件系统结合的方案来实现链路对准.如本课题组提出一种基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的水下激光通信精对准控制算法,采用非线性估计算法与基本状态控制反馈理论,通过反馈算法实现接收端与光斑中心的主动跟踪对准^[11].光斑跟踪是接收器对准系统的核心算法,针对光斑跟踪,研究者们提出并改进了各种目标跟踪算法^[12],如粒子滤波算法、模板匹配算法等,但这些算法的计算量大,激光光斑被遮挡、受湍流影响或者发生变形,会对跟踪产生很大的影响.而基于均值漂移(Mean Shift)的跟踪算法计算量较低,对目标发生旋转、边缘遮挡或者变形的因素不敏感,但当目标运动速度较快,或者目标被完全遮挡时,跟踪可能会失败.针对这一缺点,本文引入无迹卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)的预测机制,当目标丢失时,通过前期位置信息对目标进行最优位置估计.采用Mean Shift算法与UKF相结合的跟踪目标算法跟踪发射激光光斑,利用质心法获得跟踪到光斑的中心位置,结合链路对准控制系统提高链路对准性能.

1 整体系统组成

研究的系统包括基于图像的光斑跟踪模块、光斑位置预测模块、光斑中心定位模块、接收器对准模块.图1为系统模块组成框图.

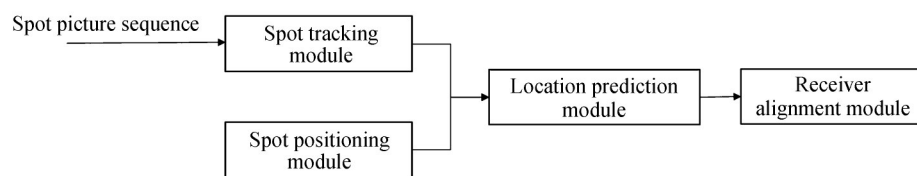


图1 系统模块组成框图

Fig. 1 System module composition block diagram

1) 光斑跟踪模块

光斑跟踪算法采用Mean Shift目标跟踪算法^[13-15],由于该算法复杂度较低,同时对边缘遮挡、目标旋转、变形和背景运动不敏感,所以当水下环境对光斑造成旋转、边缘遮挡、变形时,仍然可以有效跟踪到光斑.

2) 光斑中心定位模块

将光斑跟踪框从图像中提取出来,变成二值图像,然后通过质心法得到方框的中心坐标,实现光斑定位.

3) 光斑位置预测模块

当光斑快速运动或者被严重遮挡时,Mean Shift目标跟踪算法容易出现跟踪丢失的现象,引入UKF算法对光斑状态进行预测,将预测的位置作为Mean Shift光斑跟踪算法迭代的初始位置,有效提高算法的成功率.

4) 接收器对准控制模块

接收器对准模块由电机、驱动器、采集卡组成.将通过光斑中心定位模块得到的光斑中心在相机屏幕的位置坐标和屏幕的中心坐标进行比较,再由电机控制接收器使光斑位置向屏幕中心移动.

2 光斑跟踪和定位的算法

2.1 Mean Shift 用于目标光斑跟踪

2.1.1 目标模型描述

在初始帧手动框选跟踪目标光斑区域,假定目标光斑区域中有 n 个像素,用 $z_i (i=1, \dots, n)$ 表示目标光斑在图片的位置,均匀划分框选中每个区域的灰度和颜色,获得由 m 个相等的灰度区间组成的一个灰度直方图.目标光斑模型的颜色概率分布由 $q_u (u=1, \dots, m)$ 表示,即

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

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

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

式中, C 为归一化系数; $K(\cdot)$ 是 Epanechnikov 核函数; (x_0, y_0) 为目标光斑中心坐标; z_i^* 表示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 表示颜色直方图的颜色分量; $\delta[b(z_i) - u]$ 为 Kronecker 函数,判断 z_i 处的颜色值是否属于直方图分量,是为 1, 否为 0. 核函数用来给目标光斑区域像素设置加权值,在水下复杂环境的干扰下,光斑的形状、大小等特征值会产生变化,从而使目标光斑外层的像素值受到影响,目标光斑中心的像素更可靠,靠近中心位置的权重较大.

2.1.2 候选模型描述

在第 t 帧搜索图像时,以第 $t+1$ 帧的候选区域目标像素中心位置 f_0 的起点为搜索窗口的直方图中心,得到候选目标的直方图中心像素位置 f ,计算当前帧搜索目标的候选区域直方图.候选区域模型的颜色直方图概率密度计算公式为

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

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

式中, h 为核函数窗口大小, C_h 为标准化系数.

2.1.3 相似度测量

理想状态下两个模型的颜色分布一致,即相似度为 0. 采用 Bhattacharyya 系数作为相似度函数,定义为 $\rho(p, q) = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(f) q_u}$. 相似度函数越大,目标光斑模型和候选模型相似度越高.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,不是同一个目标.

2.1.4 Mean Shift 迭代过程

Mean Shift 算法的迭代过程就是搜索相似度函数值最大时目标光斑坐标位置的过程. Bhattacharyya 系数通过泰勒展开可表示为

$$\rho(p, q) \approx \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(f_0) q_u} + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^n w_i K\left(\left\|\frac{f - z_i}{h}\right\|^2\right) \quad (6)$$

式中, $w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(f)}} \delta[b(z_i) - u]$. 第二项随 f 变化, 求 $\rho(p, q)$ 最大值即求 $\frac{C}{2} \sum_{i=1}^n w_i K\left(\left\|\frac{f - z_i}{h}\right\|^2\right)$ 最大值, 其过程可以利用 Mean Shift 迭代方程完成, 即

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

式中, $g(x) = -K'(x)$, k 表示时刻.

Mean Shift 方法是以前一帧目标位置为当前帧候选模型起始位置, 并以此作为下一帧的起始搜索中心, 不断重复. 图 2 为 Mean Shift 向量迭代示意图.

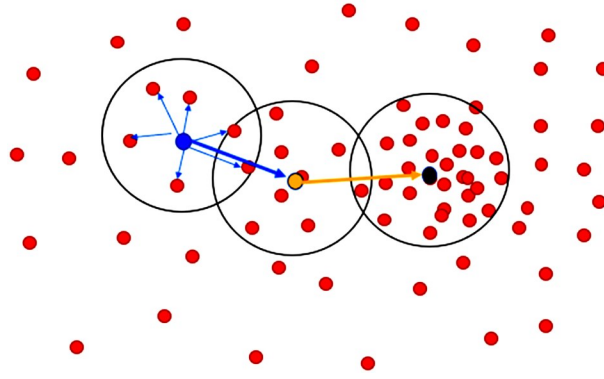


图 2 Mean Shift 向量迭代示意图
Fig. 2 Mean Shift vector iteration diagram

Mean Shift 迭代步骤可总结为:

- 1) 确定前一帧的目标位置 y_0 , 计算目标模板的概率密度 $\{q_u\}_{u=1 \dots m}$;
- 2) 用 y_0 初始化当前帧的目标位置, 计算候选目标模型 $\{p_u(y_0)\}_{u=1 \dots m}$;
- 3) 根据 $w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(f)}} \delta[b(z_i) - u]$ 计算当前窗口内各点权重值;
- 4) 计算目标的新位置

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^m z_i w_i g\left(\left\|\frac{y_0 - z_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^m w_i g\left(\left\|\frac{y_0 - z_i}{h}\right\|^2\right)}$$

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

- 5) 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 $\rho[p(y_1), q]$;
- 6) 若 $\|y_1 - y_0\| < \epsilon$, 则停止迭代; 否则, $y_0 \leftarrow y_1$ 并转至步骤 2).

2.2 光斑中心定位

光斑跟踪算法的输入为光斑图片序列, 输出为一个含有跟踪光斑的矩形区域, 要实现对准, 就必须获得光斑移动时刻在相机屏幕里的位置坐标.

算法步骤为:

- 1) 将输出图像中的矩形框提取出来, 转变为二值图像;

- 2) 删除二值图像中的杂点;
- 3) 寻找二值图像中的白色区域;
- 4) 利用 Matlab 中 $\max(x)$ 、 $\min(x)$ 、 $\max(y)$ 、 $\min(y)$ 的函数求出白色区域坐标 (x, y) .

2.3 无迹卡尔曼滤波器

UKF 滤波是基于 EKF 滤波的不足,通过对系统的优化设计得到的一种基于 Unscented 变换技术的卡尔曼滤波器^[16],针对一步预测方程,采用无迹变换(Unscented Transformation, UT)处理均值和协方差的非线性传递.即使系统模型复杂,卡尔曼算法的复杂性和实现难度也不会大幅增加,稳定性比 EKF 算法强.

假设 n 维随机变量 $x: N(x, P_x)$, x 通过非线性函数 $y=f(x)$ 变换后得到 n 维的状态随机变量 y . 若过程中的噪声与测量的噪声同时隐含在系统中,即系统的状态转移模型 x_k 和观测模型 y_k 为

$$\left\{ \begin{array}{l} x_k = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-1) \\ y(k-1) \\ v_x(k-1) \\ v_y(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t^2/2 \\ t^2/2 \\ t \\ t \end{bmatrix} w_k \\ \\ y_k = \begin{bmatrix} x'(k) \\ y'(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_k \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, $x(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示目标在水平方向和垂直方向上的坐标, $v_x(k)$ 和 $v_y(k)$ 表示目标在两个方向上的移动, $x'(k)$ 和 $y'(k)$ 表示观测信息, w_k 和 v_k 分别为状态转移与观测模型的高斯白噪声, t 是两个相邻帧的时间间隔,取值为 1.

这时需要对状态变量进行扩展,状态向量与噪声向量合成的增广状态为 $x_{a,k}$,增广向量状态的均值和方差分别为 $\hat{x}_{a,k}$ 和 $P_{x,k}$,即

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{a,k} = [x_k^T, w_k^T, v_k^T]^T \\ \hat{x}_{a,k} = [\hat{x}_k^T, 0_{m \times 1}^T, 0_{l \times 1}^T]^T \\ P_{x,k} = \begin{bmatrix} P_{x,k} & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, m 和 l 分别为过程噪声和观测噪声的维数.

UKF 滤波算法实现步骤为:

- 1) 初始化均值和方差

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_0 = E[x_0] \\ P_{x,0} = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \\ \hat{x}_{a,0} = E[x_0^T \quad 0_{m \times 1}^T \quad 0_{l \times 1}^T]^T \\ P_{a,0} = \begin{bmatrix} P_{x,0} & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} = [P_0 \quad P_w \quad P_v] \end{array} \right. \quad (10)$$

式中, P_w 为状态转移噪声协方差, P_v 为观测噪声.

- 2) 计算 Sigma 点

根据 $\hat{x}_{a,k-1}$ 和 $P_{a,k-1}$, 构造增广 Sigma 点

$$\begin{cases} \chi_{a,k-1}^0 = \hat{x}_{a,k-1} \\ \chi_{a,k-1}^i = \hat{x}_{a,k-1} + \left(\sqrt{(N+\kappa)P_{a,k-1}} \right)_i, i=1, \dots, N \\ \chi_{a,k-1}^i = \hat{x}_{a,k-1} - \left(\sqrt{(N+\kappa)P_{a,k-1}} \right)_i, i=N+1, \dots, 2N \end{cases} \quad (11)$$

式中, $N = n + m + l$ 为增广状态的维数, 且 Sigma 点向量为 $\chi_a = [\chi_x^T \ \chi_w^T \ \chi_v^T]^T$, 系数 $\kappa = \alpha^2(N+k) - N$; $k = 3 - N$; $0 < \alpha \leq 1 \times 10^{-4}$.

3) 时间传播方程

将 Sigma 点带入式(12)和(13), 通过式(14)计算状态向量均值.

$$\chi_{x,k|k-1}^i = f(\chi_{x,k-1}^i, \chi_{w,k-1}^i) \quad (12)$$

$$\chi_{k|k-1}^i = h(\chi_{x,k|k-1}^i, \chi_{v,k-1}^i) \quad (13)$$

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2N} W_i^{(m)} \chi_{x,k|k-1}^i \quad (14)$$

式中, $f(\cdot)$ 为状态转移函数, $h(\cdot)$ 为状态转移函数, $W_i^{(m)}$ 为均值权系数. $W_0^{(m)} = \kappa / (N + \kappa)$; $W_i^{(m)} = 1/2[N + \kappa]$; $i = 1, \dots, 2N$.

4) 测量更新方程

将式(12)和(13)代入式(15)和(16), 通过式(17)计算增益.

$$P_{y,k} = \sum_{i=0}^{2N} W_i^{(c)} [\chi_{k|k-1}^i - \hat{y}_k^-] [\chi_{k|k-1}^i - \hat{y}_k^-]^T \quad (15)$$

$$P_{x,k}^- = \sum_{i=0}^{2N} W_i^{(c)} [\chi_{x,k|k-1}^i - \hat{x}_k^-] [\chi_{x,k|k-1}^i - \hat{x}_k^-]^T \quad (16)$$

$$K = P_{xy,k} P_{y,k}^{-1} \quad (17)$$

式中, $W_0^{(c)} = \kappa / (N + \kappa) + (1 - \alpha^2 + \beta)$; $W_i^{(c)} = W_i^{(m)}$ $i = 1, \dots, 2N$, 将增益带入式(18)和(19), 对均值和方差进行更新.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(y_k - \hat{y}_k^-) \quad (18)$$

$$P_{x,k} = P_{x,k}^- - K P_{y,k} K^T \quad (19)$$

2.4 融合 UKF 的 Mean Shift

图 3 为融合 Mean Shift 与 UKF 结合轨迹线性拟合的流程. 当目标运动速度较快或出现严重遮挡时, 传

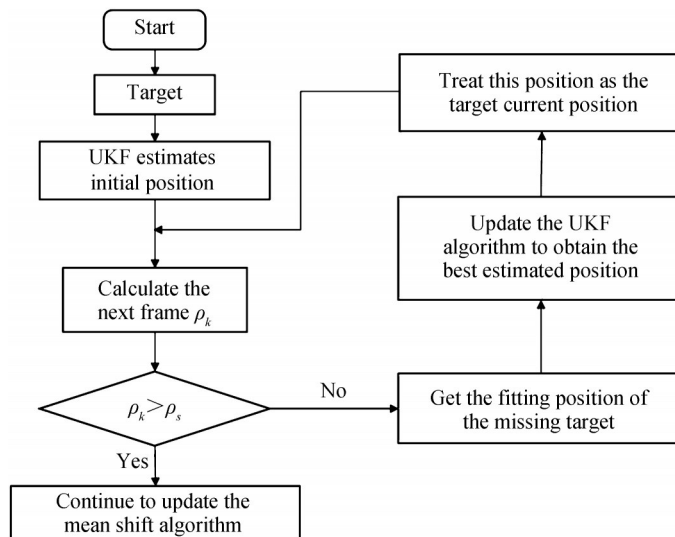


图 3 融合 UKF 与线性拟合的 Mean Shift 迭代流程
Fig. 3 Mean Shift iterative flow chart combining UKF and linear fitting

统 Mean Shift 算法会跟丢目标,导致跟踪失败.而 UKF 滤波器可以为 Mean Shift 算法估计目标的迭代初始位置,有效跟踪快速运动的目标^[17].利用相似度函数 ρ 判断目标是否跟丢,当前帧 ρ_k 大于阈值 ρ_s 时,继续更新算法,否则跟踪失败.采用一种线性拟合的方法^[18],将前几帧的目标位置坐标代入式(20),得到目标丢失的拟合位置,更新 UKF 算法,获得最优估计位置,更新 Mean Shift 算法的搜索窗口,继续搜索目标.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中, (x, y) 为像素坐标位置, t 为图像帧数.

3 实验系统设计与实现

3.1 实验环境

搭建一个 3 m 的水箱作为水下无线光通信实验平台,实验平台由发射机、信道和接收机组成.表 1 为实验发射机和信道参数.

表 1 实验参数
Table 1 Experimental parameters

Transmitter parameters	Value	Channel parameters	Value
Operating voltage/V	5	Distance/m	3.15
Wavelength/nm	520	Attenuation coefficient/(dB·m ⁻¹)	1.1
Transmit power/mW	30	Temperature/°C	26
Divergent half angle/(°)	0.03		

接收机为对准系统,包括 CGImagetech 公司的 CGU3-500C 型号的相机、电机、采集卡和 PC 端.在相机前放置一个分级式阵列天线,使光源移动范围更大,其平面布局如图 4 所示,分级式阵列天线由中心主菲涅尔透镜和周围 6 个子菲涅尔透镜组成,接收视场角为 $-16^\circ \sim 16^\circ$,接收范围为 $-22 \sim 22$ mm.相机采集光斑图片信息,通过 USB 口传递到上位机,上位机通过 Matlab2016 和 Visual Studio2015 混编技术实时分析处理图片信息来发送驱动电机信号,使电机产生相应的运动,从而达到发射机和接收机的链路对准.图 5 为系统框架图.

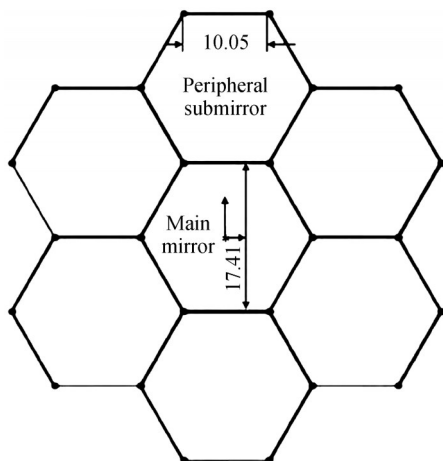


图 4 分级阵列天线平面布局
Fig. 4 Plane layout of hierarchical array antenna

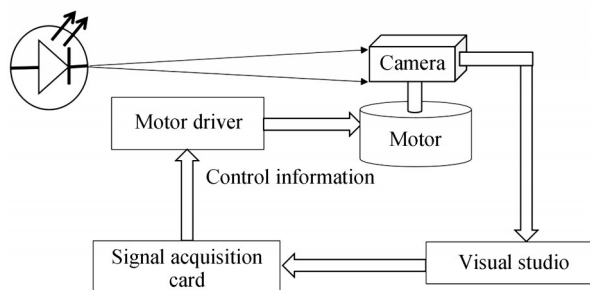


图 5 系统框架图
Fig. 5 System framework diagram

3.2 实验测试

3.2.1 跟踪算法测试结果

首先在水中分别拍摄正常被遮挡、变形和受湍流影响时的光斑连续横向运动图像,拍摄过程中,用遮挡物将光斑遮挡,再移开.将光斑序列传递给光斑跟踪算法,获得跟踪结果.

图 6(a)为正常光斑和当光斑某刻被遮挡时的跟踪结果,选取了一组序列中具有代表性的 6 个跟踪时刻,由图可知,在 d 时刻光斑被遮挡时,跟踪框仍然根据 UKF 算法预测到的光斑位置继续进行跟踪,并且在 e 时刻捕获到光斑,保证了后续跟踪工作的执行;图 6(b)为光斑实际移动轨迹和跟踪轨迹的比较;表 2 为 6 个跟踪时刻的像素坐标偏差和均方根误差,结合图 6(b)观察可得均方根误差最大为 2.1%。

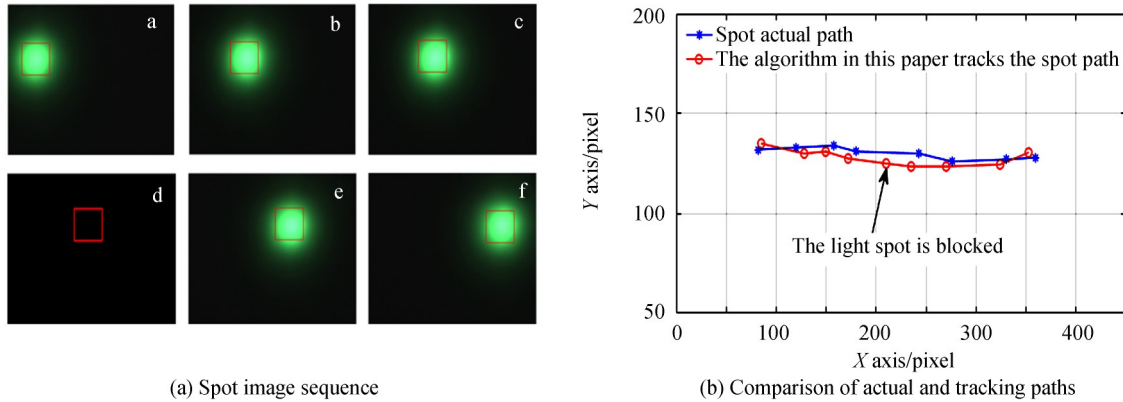


图 6 光斑被遮挡时的跟踪结果

Fig. 6 Tracking results when the light spot is blocked

表 2 光斑被遮挡时的跟踪误差

Table 2 Tracking error when the light spot is blocked

Serial number	Spot actual center coordinates	Spot tracking center coordinates	Pixel coordinate error	Root mean square error
a	(82, 132)	(85, 135)	4.24	1%
b	(158.5, 134)	(149.5, 131)	9.02	2.1%
c	(180, 131)	(172, 127.5)	8.73	2%
d		(210, 125)		
e	(276.5, 126)	(270, 123.5)	8.13	1.5%
f	(359, 128)	(352.5, 130.5)	6.96	1.4%

图 7(a)为光斑由于水流波动发生变形时的跟踪结果,图 7(b)为光斑实际移动轨迹和跟踪轨迹的比较,光斑运动的 a、b 时刻还未发生明显变形, c、d 时刻的光斑大小和形状都发生变化,因此发生形变的光斑在本文算法的作用下,依然可以有效跟踪,只是误差发生变化.光斑的形变程度由光斑圆度描述,如表 3 所示,圆度越小,形变度越大,形变光斑的跟踪误差越大,最大达到 4% 左右。

实验通过在光源处注入 98℃ 热水的方式模拟产生湍流,光斑在海水湍流影响下发生闪烁变化,此时的

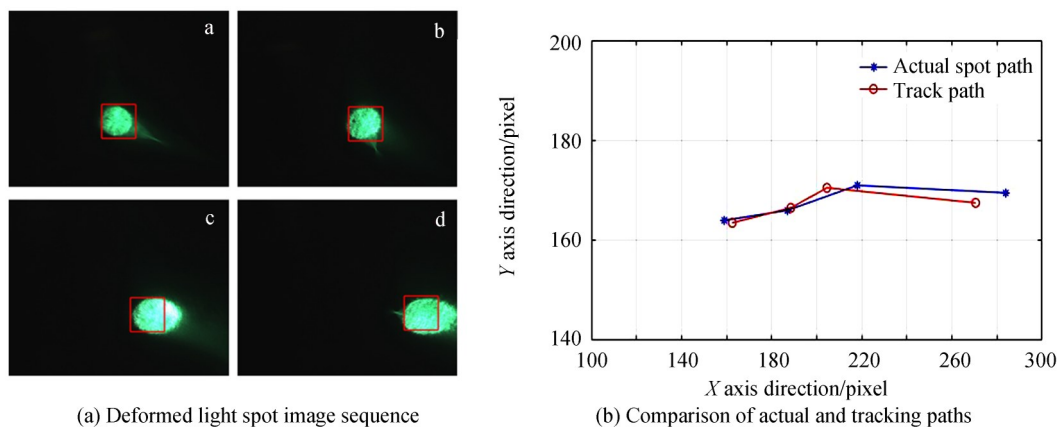


图 7 光斑变形时的跟踪结果

Fig. 7 Tracking results when the light spot is deformed

表3 光斑变形时的跟踪误差
Table 3 Tracking error when the light spot is blocked

Serial number	Spot roundness	Spot actual center coordinates	Spot tracking center coordinates	Pixel coordinate error	Root mean square error
a	0.81	(159,164)	(162.5,163.5)	3.57	1%
b	0.94	(187.5,166)	(188.5,166.5)	1.58	0.5%
c	0.63	(218,171)	(204.5,170.5)	13.5	4.1%
d	0.69	(284,169.5)	(270.5,167.5)	13.9	4%

光斑跟踪序列如图8(a),当湍流逐渐消失时,光斑逐渐恢复,观察可得跟踪仍有效进行.图8(b)为光斑实际移动轨迹和跟踪轨迹的对比,结合表4可知跟踪均方根误差最大为1.2%.

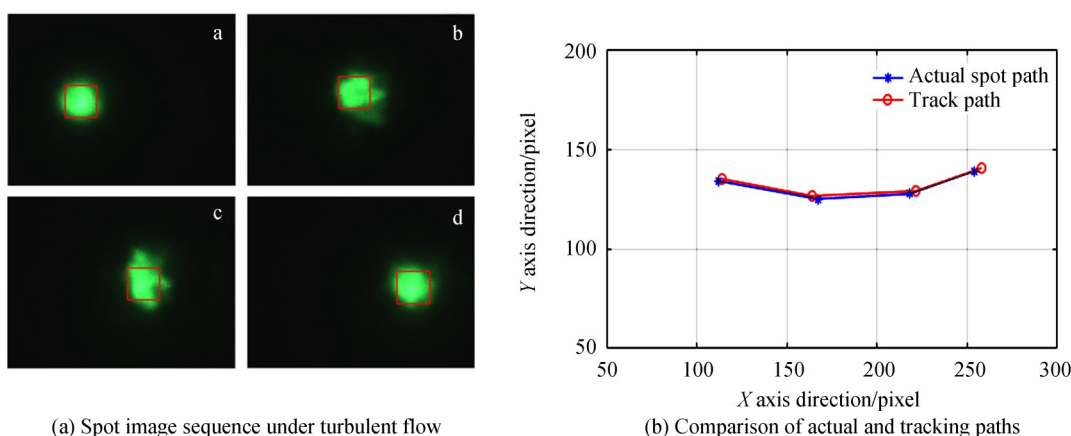


图8 湍流下光斑的跟踪结果
Fig. 8 Spot tracking results under turbulence

表4 湍流下光斑的跟踪误差
Table 4 Tracking error under turbulence

Serial number	Spot actual center coordinates	Spot tracking center coordinates	Pixel coordinate error	Root mean square error
a	(112,134)	(114,135)	2.23	0.7%
b	(167,125)	(164,126.5)	3.16	1%
c	(218,127.5)	(221.5,129)	3.80	1.2%
d	(256,139)	(258,140.5)	2.5	0.78%

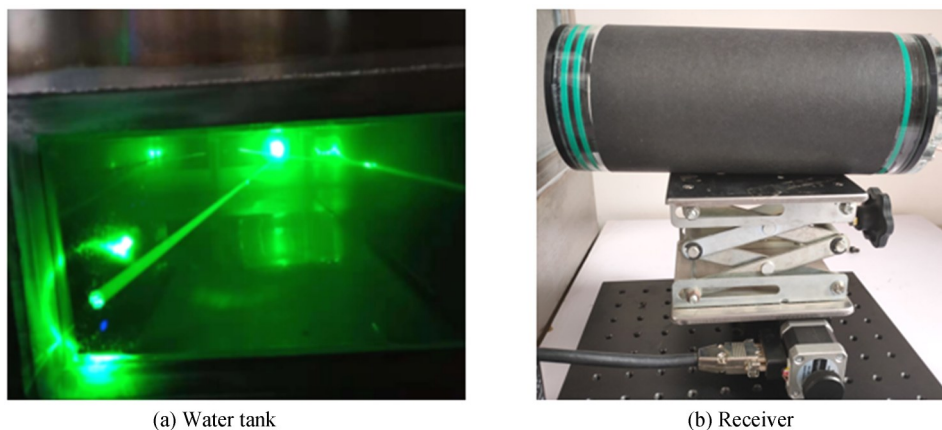
3.2.2 接收机对准系统测试

图9为搭建的接收机对准系统,接收机封装筒可以放入水中.首先,将发射激光对准接收相机的中心位置,记录此时的坐标 (x_0, y_0) ,人为干扰发射源偏离原来链路,同时接收端相机会实时拍摄光斑序列并传递给光斑跟踪算法,算法跟踪到光斑之后,获得跟踪到的光斑中心坐标,即跟踪框的中心坐标 (x, y) ,所用的一维电机只能左右移动,故比较 x 和 x_0 ,当 $x < x_0$ 时,控制电机左移,反之则右移,直到 $|x - x_0| \leq 1$,移动结束.对准系统流程如图10所示.

测试发现,对准精度与电机运动角速度有关,对准精度由对准系统获得光斑的实际中心坐标和严格对准时光斑中心坐标之间的偏差来描述,图11为两者之间的关系,观察可得电机运动角速度越大,像素坐标偏差越大,对准精度越低.

4 结论

本文针对水下环境中激光光斑产生易被遮挡、变形或受湍流影响的问题,提出一种水下光斑跟踪算法.



(a) Water tank

(b) Receiver

图 9 对准系统
Fig. 9 Alignment system

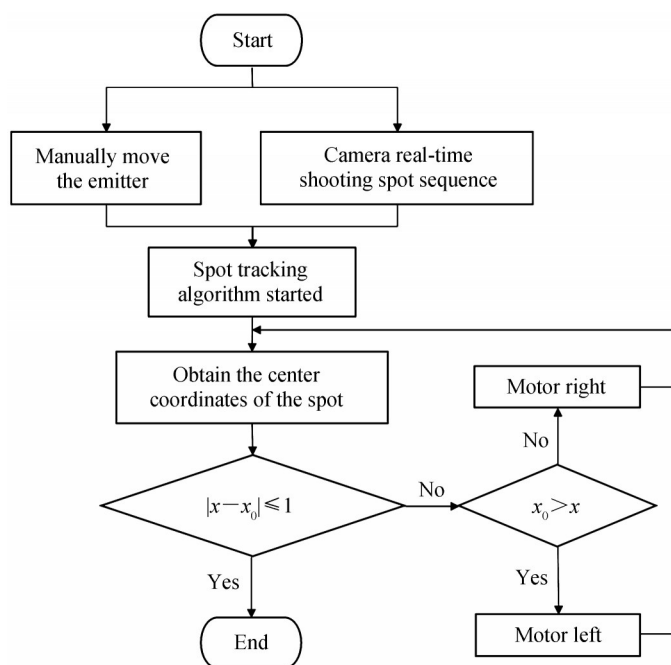


图 10 接收机对准流程
Fig. 10 Receiver alignment flow chart

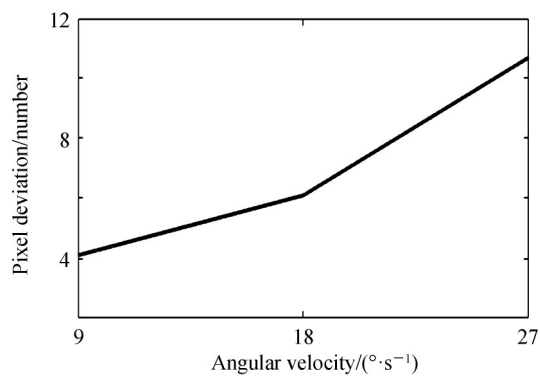


图 11 坐标偏差和角速度的关系
Fig. 11 Relationship between coordinate deviation and angular velocity

该算法采用颜色作为目标特征模型进行直方图建模的 Mean Shift 算法,结合具有预测目标位置作用的 UKF 算法,在光斑快速运动或被遮挡时,通过前期光斑位置信息对光斑最新位置进行最优位置估计.利用水下拍摄的光斑运动图像,验证了算法在光斑被遮挡、变形和受湍流影响时,也能成功跟踪到光斑.计算分析了光斑实际移动轨迹和跟踪移动轨迹的像素坐标误差,得到正常光斑和变形光斑跟踪均方根误差分别在 2.1%、4% 和 1.2% 左右.最后设计并搭建了基于光斑跟踪的接收机对准系统,通过光斑定位坐标与对准中心坐标比较来控制接收相机移动与发射机对准,得到接收机运动速度和对准精度的关系.设计的对准系统可为激光对准的应用提供参考,之后的研究可以通过添加转向镜来分散光束,分别用于相机成像和雪崩光电二极管探测通信.

参考文献

- [1] ZENG Z, FU S, ZHANG H, *et al.* A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, **19**(1):204-238.
- [2] KAUSHAL H, KASSOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, **4**:1518-1547.
- [3] JOHNSON L J, GREEN R J, LEESON M S. Underwater optical wireless communications: depth dependent variations in attenuation[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(33):7867-7873.
- [4] LIU Chang-cheng. Simulation and design of ATP subsystem in atmospheric laser communication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
刘长城. 大气激光通信中 ATP 系统的仿真与设计[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [5] LI Xiao-ming, ZHANG Li-zhong, MENG Li-xin, *et al.* Research and experiment of pointing/acquisition/tracking system for airborne space laser communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, **37**(6):1044-1051.
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.
- [6] MENG Li-xin. Research on acquisition and tracking technology of airborne laser communication [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
孟立新. 机载激光通信中捕获与跟踪技术研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [7] PONTBRIAND C, FARR N, WARE J, *et al.* Diffuse high-bandwidth optical communications[C]. *IEEE Oceans*, 2008: 10747915.
- [8] ANGUITA D, BRIZZOLARA D, PARODI G. Building an underwater wire-less sensor network based on optical communication: research challenges and current results[J]. *Sensor Technologies and Applications*, 2009: 476-479.
- [9] SOLANKI P B, AI-RUBAIAI M, TAN X B. Extended Kalman filter-aided alignment control for maintaining line of sight in optical communication[C]. *IEEE American Control Conference*, 2016:16193909.
- [10] SOLANKI P B, AI-RUBAIAI M, TAN X B. Extended Kalman filter-based active alignment control for LED optical communication[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018:**23**(4): 1501-1511.
- [11] LIU Hao, YANG Yi, YIN Ya-fang, *et al.* Alignment control algorithm of underwater LD communication based on EKF [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020,**49**(4): 0406003.
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.
- [12] MENG Lu, YANG Xu. A survey of object tracking algorithms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019,**45**(7):1244-1260.
孟球,杨旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报,2019,**45**(7):1244-1260.
- [13] SUN Yu-qiu, HU Wei, LI Xiong. Bandwidth adaptive Mean-Schiff tracking algorithm[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edit)*, 2017,**14**(1):5-11.
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
- [14] TIAN Xin. Research of object tracking based on mean shift algorithm [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
田莘. 基于 Mean Shift 算法的目标跟踪问题研究[D]. 西安:西安科技大学,2010.
- [15] ZHU Hao-nan, XU Ming-min, SHEN Ying. Research on multi video tracking based on Mean Shift [J]. *Computer Science*, 2018,**45**(S1):220-226.
朱浩楠,许明敏,沈瑛. 基于 Mean Shift 的多视频车辆跟踪研究[J]. 计算机科学,2018,**45**(S1):220-226.
- [16] JULIER S, UHLMANN J, DURRANT-WHYTE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000,**45**(3):477-482.
- [17] LIU Xian-ru, CAI Zi-xing. Real time object tracking using mean shift combined UKF [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011,**42**(5):1338-1343.
刘献如,蔡自兴. UKF 与 mean shift 算法相结合的实时目标跟踪[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,**42**(5):1338-1343.
- [18] LIU Xiao-feng, ZHANG Chun-fu, TANG Peng. Moving spot tracking and positioning method based on monocular vision [J]. *Information Technology*, 2020,**44**(1):48-53.
刘晓峰,张春富,唐鹏. 基于单目视觉的移动光斑跟踪定位方法[J]. 信息技术,2020,**44**(1):48-53.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.61805199), Shaanxi Provincial Special Fund for Technology Innovation Guidance (No. 2020TG-001), Xi'an University of Posts and Telecommunications Joint Graduate Training Base (No. YJGJ201905), National Defense Basic Research Program Laboratory Stable Support Special Project(No. JCKY2020207CD02)