DOI：10.13382/j.jemi.B2407454

面向遮挡锥套的定位特征提取方法

周兆钦[1]　赵科东[1]　孙永荣[1]　付宇龙[2]　陈子豪[2]
（1.直升机动力学全国重点实验室　南京　210016；2.南京航空航天大学自动化学院　南京　211100）

摘　要：在自主空中加油中，锥套加油口的圆形结构常被用于辅助目标定位，然而复杂的背景干扰与插头遮挡使得圆特征提取准确性大大降低。针对背景干扰问题，设计自适应均值滤波器获取加油口质心信息，从而在更小的范围内利用图像学操作得到精确的边缘点；针对插头遮挡问题，提出基于凸包检测的离群点排除算法，增强了特征提取的抗干扰性能。在此基础上，提出基于几何距离的迭代重加权最小二乘来优化椭圆目标，进一步提高了定位圆特征的提取精度。在仿真平台上着重分析了迭代重加权最小二乘算法中 K 值对拟合精度与效率的影响，同时对拟合算法的精度和抗遮挡性能进行了测试，算法在无遮挡时平均误差小于 0.5%，在遮挡率为 50%时平均误差小于 2%。最后对实际锥套进行特征提取实验，与其他经典算法相比，精度上提高了 49.3%，提取误差均值为 0.79%，平均处理耗时为 13.9 ms，且在锥套被遮挡的特殊情况下，提取误差控制在 2%以内。实验结果表明，锥套的定位特征提取方法满足自主空中加油图像处理的准确性、快速性、鲁棒性要求，能够帮助提高自主空中加油对接成功率，减少事故发生的概率。

关键词：加油锥套；边缘提取；圆特征；迭代重加权；凸包缺陷
中图分类号：TN9；TP391.4　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.4050

Localization feature extraction method for obscured drogue

Zhou Zhaoqin[1]　Zhao Kedong[1]　Sun Yongrong[1]　Fu Yulong[2]　Chen Zihao[2]
（1. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Nanjing 210016, China; 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China）

Abstract: In autonomous aerial refueling, the circular structure of the drogue refueling port is often used to assist target positioning. Still, the complex background interference and oiled plug obscuring significantly reduce the accuracy of circular feature extraction. To address the background interference problem, an adaptive mean filter is designed to obtain the center of mass of refueling ports to obtain the accurate set of edge points in a smaller range using the imaging operation. To address the oiled plug obscuring problem, an outlier elimination algorithm based on convex hull detection is proposed to enhance the anti-interference performance of feature extraction. An iterative reweighted least squares based on geometric distance is proposed to optimize elliptic targets. On the simulation platform, the influence of K value on the fitting accuracy and efficiency of the iterative reweighted least squares algorithm is emphatically analyzed. At the same time, the accuracy and anti-occlusion performance of the fitting algorithm are tested. The average error of the algorithm is less than 0.5% when there is no occlusion and less than 2% when the occlusion rate is 50%. Finally, the feature extraction experiment of the actual drogue is carried out. Compared with other classical algorithms, the accuracy is improved by 49.3%, the average extraction error is 0.79%, the average processing time is 13.9 ms, and the extraction error is controlled within 2% under the special case that the drogue is obscured. Experimental results show that the positioning feature extraction method of drogue meets the requirements of accuracy, rapidity and robustness of image processing for autonomous aerial refueling, and can improve the success rate of autonomous aerial refueling docking and reduce the probability of accidents.

Keywords: drogue; edge extraction; circular feature; iterative reweighting; convex hull defect

收稿日期：2024-04-21　　Received Date: 2024-04-21

0　引　言

随着航空技术的发展,无人机被广泛应用于航空运输、环境保护、搜救、电力线检查等多个行业[1]。自主空中加油技术(autonomous aerial refueling,AAR)可以增加无人机的容量和有效载荷,提高相关行业应用任务的执行效率,扩大无人机执行任务时的作业半径[2]。

在对接过程中,精确测量加油锥套的相对位姿是空中加油对接成功与否的关键[3]。由于计算机视觉技术的成熟和人工智能技术[4]的快速发展,视觉导航凭借其低成本、无源性的优点为自主空中加油的实现提供了可靠的解决方案,该技术通过图像中的二维特征来解算相对导航信息[5-7]。

自主空中加油视觉导航技术分成主动视觉和被动视觉两大类,主动视觉精度较高但需要对锥套安装额外的光学标记[8-9];被动视觉仅利用锥套自身的特征实现对锥套的测姿定位[10],但因为无法获取精确的锥套特征信息往往精度较低,因此,不少学者对锥套的特征提取开展了研究。

中科院自控所的 Yin 等[11]提出了一种基于粒子滤波算法来检测跟踪锥套,并利用阈值分割算法来提取锥套中心圆特征,但特征提取的精度很大程度上受到阈值的影响;Ma 等[12]利用灰度直方图特征识别锥套区域,结合边缘检测器检测锥套轮廓,利用自适应模板模糊识别算法对候选弧段进行椭圆拟合并作为锥套特征,利用单圆特征进行定位,但软管带来的边缘弧段干扰使得该方法在 25 m 距离下最大误差达到 0.7 m;Zhang 等[13]基于双目立体视觉利用 AdaBoost 分类器算法对锥套图像进行识别,通过纹理描述算子 LBP 对局部图像进行边缘提取并作为锥套特征,根据特征点集的视差约束关系实现图像的快速立体校正、匹配与定位,但双目测距需要排除两幅图像不同角度带来的边缘干扰,且实时性较差;Garcia 等[14]开发了一种深度学习目标检测器,训练与检测多个特殊颜色的信标作为锥套特征,由于定位圆特征依赖于布置的 8 个特征,一旦遮挡情况下特征缺失将带来极大的拟合误差,从而影响定位精度。

在现有的锥套特征提取研究中,锥套的圆形特征凭借较强的抗干扰能力以及易于识别的特点[15],常被用于辅助完成目标的定位,然而现有的研究存在以下问题:一方面提取拟合精度不高,在远距离下尤为明显,从而影响最终定位准确性;另一方面则是抗干扰能力不强,在锥套受到遮挡或是背景复杂时无法提取有效的定位特征,测量结果往往不具备使用价值。

因此,以无人机空中加油为背景,针对实际对接过程中加油锥套存在的背景复杂与特征遮挡难题,开展基于卷积操作的锥套定位特征边缘提取研究,重点提出一种基于凸包检测的异常点剔除算法,提高遮挡情况下特征提取的鲁棒性;开展基于迭代重加权最小二乘椭圆拟合算法研究,进一步提升锥套圆形特征提取的精度。仿真和实测实验都表明,与其他经典算法相比,提出的面向遮挡锥套的定位特征提取算法抗遮挡性能更优,精确度更高,且具有不错的实时性。

1　视觉导航图像处理

在软管-锥套式空中加油中,应对不同环境下的锥套目标,尤其是锥套被插头遮挡下的情况,研究一种鲁棒的提取算法来获得定位目标的边缘特征,从而为圆特征的高精度拟合奠定基础。

1.1　锥套成像分析

当受油机位于加油机近后方或者近距离对接时,捕获的加油锥套如图 1 所示,锥套的基本结构由以下 3 个部分组成,图中①为内部近似圆形的黑色加油口[16],②为锥套上分布的 36 根浅灰色线性伞骨,③为环绕锥套的浅灰色伞布,其中加油口黑色圆形结构作为空间不变特征是锥套定位的主要依据。

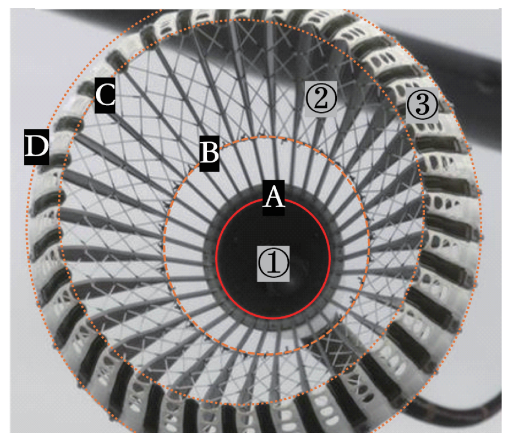


图 1　加油锥套基本结构

Fig. 1　Basic structure of drogue

然而在实际对接过程中,若要精确提取锥套加油口圆特征存在诸多干扰。一方面锥套存在内外多圆,如图 1 中虚线所示,受气流扰动影响,伞布伞骨上的外圆容易发生形变,因此无法用于定位。利用传统算法对全局图像进行椭圆检测确无法排除外圆干扰,并且由于背景干扰提取的内圆精度也不高,因此需要设计相应算法来排除锥套上的伞布、伞骨及锥套背景等干扰,得到准确的加油口圆特征边缘点集。

另一方面,受油插头会对锥套特征产生遮挡干扰。受油插头的结构为一根长直银色圆柱体,其头部直径略

小于加油口，当插头靠近加油口时，由于飞行对接姿态变化，某些视角下插头会对圆特征产生遮挡，如图 2 模拟图像所示，直接对所有边缘点进行拟合一方面增大了运算时间，更重要的是无法正确获得椭圆拟合的迭代初值，因此必须消除由受油插头遮挡带来的负边缘弧段影响。

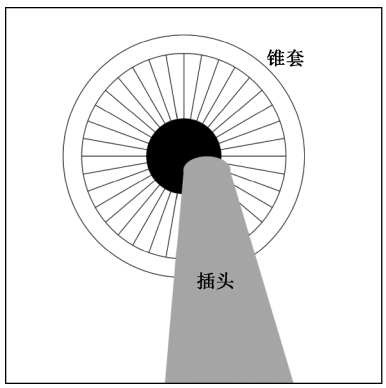


图 2　对接过程中锥套受遮挡的特殊情况

Fig. 2　The special case that the drogue is shielded during the docking process

1.2　基于卷积操作的边缘提取

根据加油口的黑色属性以及圆形特点，设计自适应的圆形均值卷积核，通过卷积操作寻找图像内平均像素最低的区域，进而排除锥套识别图干扰元素，提取锥套识别图中加油口的边缘信息。

以一张大小为 $m \times n$ 的锥套识别结果为例，考虑锥套实际三维尺寸，外圈半径记为 R_{out}，内圈加油口半径记为 R_{in}，定义圆形卷积核半径如式(1)所示，卷积加权值如式(2)所示。

$$r = \sqrt{\frac{\min(m,n)}{\max(m,n)}} \cdot (R_{in}/R_{out}) \cdot \min(m,n) \tag{1}$$

$$\text{kernel} = \frac{1}{\pi r^2}\begin{cases}1, dst \leqslant r\\ 0, dst > r\end{cases} \tag{2}$$

其中，卷积核大小为 $n \times n$，$n = 2r + 1$，dst 指核内其余点到核中心的距离。

利用上述卷积核对图像进行卷积操作，在结果特征图谱中寻找最低像素点，理想情况下最低像素点往往不止一个，如图 3 中五角星所示，将所有的最低点记为 $\{C_i = (x_i, y_i)\}_{i=1}^{n}$，利用质心公式求得黑色区域质心 $(x_{roi}, y_{roi}) = (\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i)$。

在区域质心的基础上截取长宽均为 $2r$ 的感兴趣区域，结合灰度阈值分割以及边缘检测算法提取得到椭圆特征的候选点集 $\{z_i = (x_i, y_i)\}_{i=1}^{n}$。

1.3　基于凸包检测的抗遮挡方法

银色插头造成完整黑色区域的破坏，在色域空间上呈现明显区分。图 2 中插头遮挡带来的拟合候选点影响如图 4 所示，由于灰度阈值分割图像出现一定程度的内凹，将在交界处形成负边缘弧段，严重影响椭圆拟合精度。

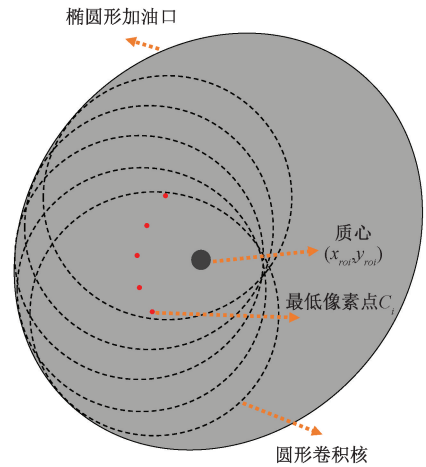


图 3　多个最低像素点示意图

Fig. 3　Schematic diagram of multiple lowest pixel points

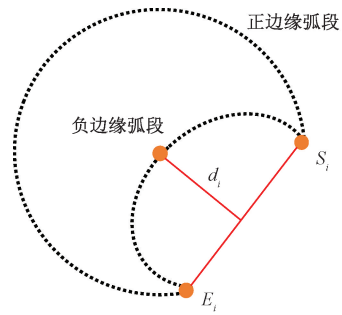


图 4　插头遮挡带来的拟合候选点影响

Fig. 4　The effect of plug occlusion on fitting candidate points

针对遮挡带来的轮廓曲线内凹问题，基于多边形边界上随机点的凸包缺陷检测(convex hull detection)能够有效消除干扰点影响[17]。凸包和本体的任何偏差都可以认为是凸性缺陷，利用凸包缺陷检测算法计算缺陷特征集合 $\{S_i, E_i, d_i\}$，包含每个缺陷的起始点 S_i，结束点 E_i、最远距离 d_i，设定距离阈值 T_d，根据式(3)判断所有 d_i 与 T_d 的大小关系：

$$\begin{cases}Z, d_i \leqslant T_d\\ Z - \{z_i \mid S_i < z_i < E_i\}, d_i > T_d\end{cases} \tag{3}$$

式中：Z 表示总体候选点集，$\{z_i \mid S_i < z_i < E_i\}$ 表示在候选点集中从 S_i 到 E_i 的所有连续点的集合。遍历所有弧段，保留图中正边缘弧段，删除负边缘弧段。利用凸包缺陷算法排除遮挡点集，降低了对异常值的敏感度，更易获得椭圆的无偏估计。

2　迭代重加权最小二乘椭圆拟合

基于最小二乘的椭圆拟合算法高效且易于实现,但对噪声的鲁棒性不强。本节在代数拟合的基础上,结合上节的边缘提取算法,提出一种鲁棒迭代重加权迭代(robust iterative reweighted least squares, R-IRLS)方法来拟合椭圆,提升了算法的精度。

2.1　椭圆拟合优化方程设计

椭圆拟合的问题可以建模如下,已知有候选点 $Z\{z_i=(x_i,y_i)\}_{i=1}^{n}$,其中包含了椭圆上的点与噪声点,目标是将具有未知参数 $a\{A,B,C,D,E,F\}$ 的椭圆拟合到候选点,使得总体误差距离最小。椭圆的一般方程如式(4)所示。

$$Ax^2+By^2+Cxy+Dx+Ey+F=0 \tag{4}$$

基于椭圆的代数定义,将椭圆的拟合问题转化为新的目标优化问题,在最小二乘的基础上引入权重 w_i,目标函数如式(5)所示。

$$\boldsymbol{S}=\sum_{i=1}^{n}w_i(\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_i)^2 \tag{5}$$

其中,椭圆的参数 $\boldsymbol{a}=[A\quad B\quad C\quad D\quad E\quad F]^{\mathrm{T}}$,数据点的向量定义为 $\boldsymbol{X}_i=[x_i^2\quad x_iy_i\quad y_i^2\quad x_i\quad y_i\quad 1]^{\mathrm{T}}$,$w_i$ 利用 huber 权重函数[18]计算得到,如式(6)所示。

$$w(\delta_i)=\begin{cases}1, & |\delta_i|<\gamma\\ \gamma/|\delta_i|, & |\delta_i|>\gamma\end{cases} \tag{6}$$

针对代数距离缺乏几何解释造成误差较大的问题,提出基于椭圆几何定义的误差计算方法。椭圆是点的轨迹,将椭圆上各点到两焦点的距离作为误差衡量标准,如式(7)所示。

$$\delta_i=\|z_i-c_1\|+\|z_i-c_2\|-2a \tag{7}$$

2.2　迭代重加权算法流程

式(8)定义了 γ 作为截断误差,小于 γ 判定为正常点,权重设置为 1,大于 γ 判定为异常点,权重按照式(6)进行调整,从而对数据点进行迭代拟合。K 值越小,抗干扰能力越强,但效率降低;K 值越大,抗干扰能力越差,效率越高。算法实现步骤如图 5 所示。

$$\gamma=med(\delta_i,i\in[1,n])\times k \tag{8}$$

式中:δ_i 为各点误差,$\|\cdot\|$ 为二范数,c_1 和 c_2 为两个焦点,a 为半长轴的长度。

步骤 1)选取 LS(常规最小二乘法)估计的 $\hat{a}^0$ 为迭代初始值,求出残差 δ^0。步骤 2)标准化残差,利用权重函数计算各样本的权重 W_i。步骤 3)在新的权重基础上利用加权最小二乘法估计 $\hat{a}^1$ 代替 $\hat{a}^0$,得到新的残差 δ^1。步骤 4)返回步骤 2),迭代计算 $\hat{a}^i$,当相邻两步的回归系数差值最大值小于设定的误差阈值 λ 时,即 $\max|\hat{a}^i-\hat{a}^{i-1}|<\lambda$,迭代结束。

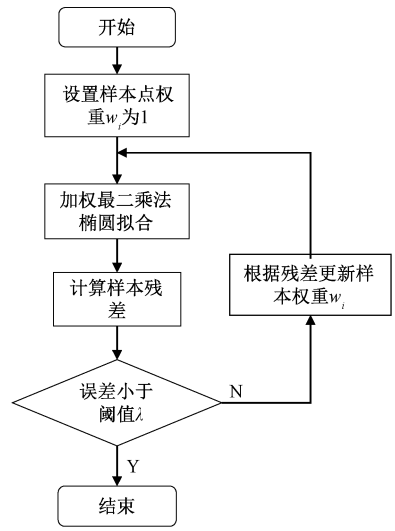


图 5　迭代重加权最小二乘算法流程

Fig. 5　Flow chart of iterative reweighted least squares algorithm

该算法使用当前数据点的权重来调整最小二乘问题,使得残差较大的数据在下一次迭代中具有较低的影响力,能够有效处理异常值和离群点,并且算法所执行的操作是基于各点到焦点的几何距离之和,而非各点到椭圆的代数距离,大大提高运算效率与精度。

3　实验设计

为验证方法有效性,本节首先对迭代重加权算法中的截断误差值 K 进行分析,从抗干扰性能和效率两个角度确定 K 值大小,进而利用模拟数据和实际图像对所提出方法进行性能验证。除此之外,也将 R-IRLS 算法与几种传统特征提取方法进行了对比,包括主成分分析(principal components analysis, PCA)算法[19]和随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)[20]。其中,PCA 算法计算点集分布的主方向和次方向,并根据点集到主方向距离的平方和最小原则优化长短轴和圆心;RANSAC 算法通过对点集数据进行随机抽样来估计模型参数。为保持实验一致性,以下算法中 R-IRLS 和 RANSAC 算法的误差阈值均设置为 1,以耗时相同为基准,设置 RANSAC 的迭代次数为 100。

3.1　仿真实验

1)迭代重加权 K 值影响实验

为测试迭代重加权算法式(8)中 K 值对算法抗干扰能力与计算效率的影响,在仿真平台搭建拟合实验。

设定椭圆参数,圆心为(300,200),长轴为 500,短轴为 300,倾斜角度为 80°,以此生成椭圆上的散点数据,个数为 200,并随机增加不同程度的图像噪声,测试不同 K

值下拟合算法的精度与效率,拟合误差定义为:

$$Fitting_error = \frac{S_{E_t} - S_{E_t \cap E_f}}{S_{E_t}} \tag{9}$$

其中,E_t 为真实椭圆,E_f 为拟合椭圆,$S_{E_t \cap E_f}$ 为真实椭圆与拟合后的椭圆的交并面积。实验过程中设定 K 值范围从 10~0.1 变化,图像噪声分别为 1、5、10,误差阈值 λ 取 1,实验重复进行 100 组,统计各次实验的迭代重加权的平均拟合误差和重加权次数,得到如表 1 所示的结果。

表 1　不同 K 值下拟合算法的精度与和效率统计表

Table 1　Statistical table of accuracy and efficiency of fitting algorithm under different K values

K 值	拟合误差			加权次数
噪声/pixel	1	5	10	10
10	0.50	0.94	2.24	1.1
2	0.50	0.88	2.15	4.1
1	0.50	0.86	2.05	5.2
0.8	0.50	0.85	2.01	5.3
0.675	0.50	0.83	1.97	6.1
0.5	0.50	0.76	1.95	8.9
0.1	0.50	0.76	1.94	13.3

实验结果表明,当值较大时,算法对异常值的容忍度较低,K 大至无穷时权重恒为 1,算法退化成普通最小二乘,此时不考虑异常值的影响,迭代次数为 1。当 K 值逐渐减小时,γ 减小,较小的截断误差值会增加算法对异常值的鲁棒性,使得最终的拟合误差降低,增强了算法的抗干扰性能,但这也导致了需要更多的迭代次数来频繁调整参数来适应数据中的异常值。综合考虑当 $K=0.675$ 时,拟合误差与加权次数均较小,因此后续的实验中采用该值作为截断误差值。

2)椭圆拟合精度实验

为进一步评估迭代重加权最小二乘椭圆拟合算法精度,在仿真平台搭建对比实验。实验中椭圆参数设定同上,在图像上增加 0~10 pixels 的噪声,对比分析 R-IRLS、PCA、RANSAC 3 种算法的性能。

图 6 显示了 3 种椭圆拟合算法的精度随图像噪声的变化曲线,随着图像噪声的增大,3 种算法的拟合误差均逐渐增大,由于 RANSAC 算法的随机性,当误差点数量较大时,算法的初值估计便出现偏差,导致后续的拟合无法收敛;PCA 算法表现同样不佳,因为算法对长短轴的方向判断不敏感。R-IRLS 拟合算法在 2 pixels 噪声下平均拟合误差小于 0.5%,10 pixels 噪声下平均拟合误差小于 2%,平均误差相较于 PCA 减少了 0.48%,相较于 RANSAC 减少了 1.68%,证明 R-IRLS 拟合算法具有较高的精度。

3)抗遮挡仿真实验

为定量衡量算法在锥套遮挡情况下的特征提取效果,在仿真平台上搭建抗遮挡实验。模拟实际空中加油 5 m 距离下锥套成像,分辨率设定为 1 920×1 280,建立多幅 256×256 的二值图像,背景 RGB 为(255,255,255),前景为 RGB 已知的黑色椭圆。设定椭圆圆心为[128,128],长轴为 90,短轴为 80,倾斜角为 10°,通过对椭圆进行不同程度的遮挡,将遮挡率定义为遮挡后的椭圆与遮挡前椭圆的面积比值,验证 R-IRLS、PCA、RANSAC 3 种算法的椭圆拟合抗干扰能力。按照不同遮挡率,对椭圆从 0%~80%分别进行 13 组实验,每组实验随机进行 1 000 次,记录平均误差。

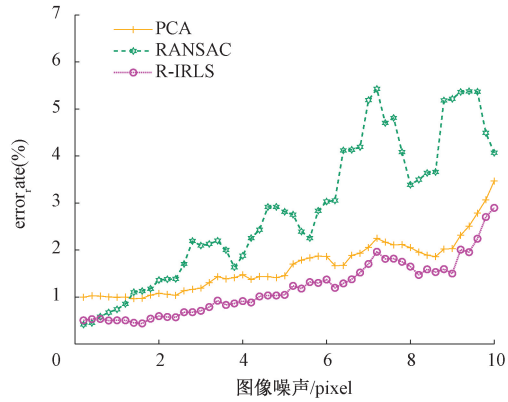


图 6　不同椭圆拟合算法拟合误差随图像噪声的变化曲线

Fig. 6　The curve of the fitting error of different elliptic fitting algorithms with the change of image noise

图 7 显示了不同遮挡率下 3 种算法的椭圆拟合效果,图 8 比较了 3 种算法的拟合误差随遮挡率的变化情况。出现遮挡后,PCA 算法拟合的椭圆会按照遮挡后的长短轴重新规划椭圆的中心和角度,从而产生较大误差;RANSAC 算法根据遮挡点的数量大小呈现不同程度的拟合误差。得益于离群点的提前剔除与迭代重加权最小二乘,基于凸包检测的抗遮挡算法相比其他算法具有很高的抗干扰性能,在遮挡率为 50%以下时拟合误差控制在 2%以内,能够应对绝大多数锥套被遮挡的情况,当遮挡率大于 70%时,特征提取才会出现较大误差,仿真实验表明抗遮挡算法具有高精度、强鲁棒的优势。

3.2　实测实验

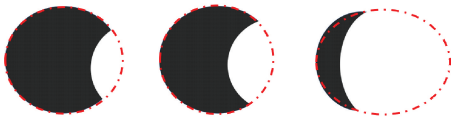
为验证算法在实际场景中的特征提取效果,分别对空中加油锥套和地面加油锥套进行特征提取实验。

1)典型空中场景验证

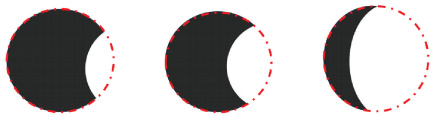
为测试算法在实际空中加油场景中的可靠性,在目前公开的少量低画质、远距离的锥套中选择部分有效图片进行测试,从椭圆拟合视觉效果上进行定性分析,圆特征提取效果如图 9 所示。

实测结果表明,针对典型空中加油场景中的两种锥套,包括图 9(a)白色伞布类型、图 9(b)黑色伞布类型

(a) PCA算法的特征提取效果
(a) The feature extraction effect of PCA algorithm



(b) RANSAC算法的特征提取效果
(b) The feature extraction effect of RANSAC algorithm



(c) R-IRLS算法的特征提取效果
(c) The feature extraction effect of R-IRLS algorithm

图 7　不同遮挡率下(从左至右分别为 15%、30%、75%)的椭圆拟合效果图

Fig. 7　Ellipse fitting renderings for different occlusion rates (15%, 30%, 75% from left to right)

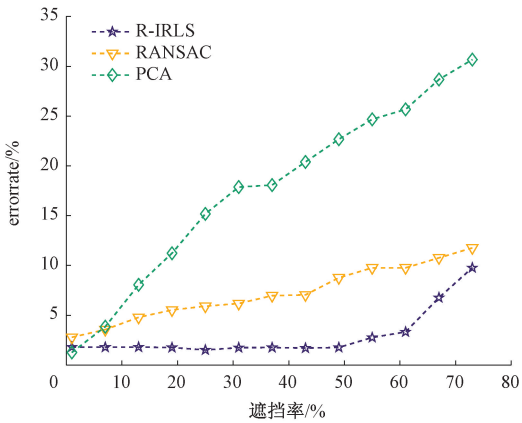
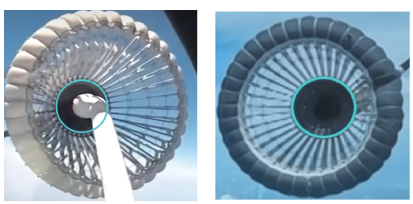


图 8　不同遮挡率下的椭圆拟合误差

Fig. 8　Ellipse fitting error under different occlusion ratio



(a) 白色伞布型
(a) White umbrella cloth type

(b) 黑色伞布型
(b) Black umbrella cloth type

图 9　实际加油场景下锥套特征提取效果

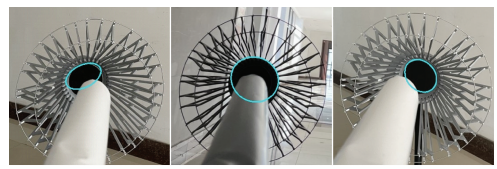
Fig. 9　Feature extraction effect of occlusion drogue in actual refueling scene

等,R-IRLS 算法均能够排除周围干扰,准确捕捉加油口的定位特征,并且在图 9(a)中锥套被插头部分遮挡的情况下也能获得不错的效果。

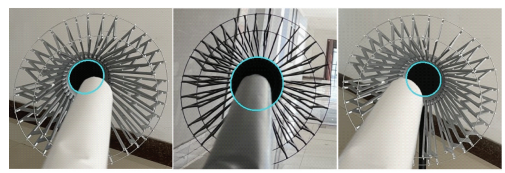
2)抗遮挡实验

为测试凸包缺陷检测算法对特征提取的增益效果,利用自制的插头对锥套形成不同程度的遮挡,从椭圆提取视觉效果上进行定性分析。实验过程中,控制边缘提取算法与拟合算法不变,仅对是否加入凸包缺陷的抗遮挡方法这一变量进行对比分析。

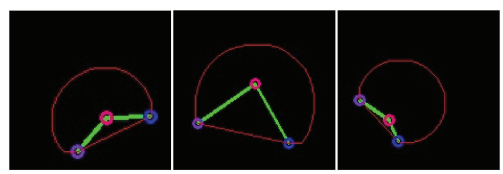
传统算法面对遮挡时的提取效果如图 10(a)所示,由于锥套受到遮挡,圆形特征会因为遮挡问题向内侧变形,传统算法对二值图像中的所有边缘点进行拟合,其中包含了黑色加油口与白色插头交接处的负边缘弧段,导致出现较大的拟合误差;加入了凸包缺陷检测的抗遮挡算法提取效果如图 10(b)所示,检测得到的凸包缺陷如图 10(c)所示,结果表明算法能够准确识别插头遮挡的方向与形状,并对遮挡产生的一系列负边缘弧段进行剔除,从而获得更加准确的定位特征,证明了基于凸包缺陷检测的抗遮挡方法的有效性。



(a) 传统的特征提取结果
(a) Traditional feature extraction result graph



(b) 抗遮挡算法的特征提取结果
(b) The feature extraction result graph of the algorithm in this paper



(c) 凸包检测效果
(c) Convex hull detection effect diagram

图 10　模拟场景下遮挡锥套特征提取效果

Fig. 10　Feature extraction effect of obscured drogue in simulated scene

3)定位精度实验

在本实验中,通过自主设计的锥套特征提取定位系统对算法进行验证。比较不同的特征提取算法得到锥套圆形特征信息,结合圆位姿解算算法获取定位结果,间接评估算法的提取精度。

如搭建的实验场景图11所示,实验涉及的软硬件如表2所示,实验过程中控制加油锥套从10 m距离不断靠近相机,大约至3 m时采集结束,全站仪记录位置真值,期间部分图像存在插头遮挡情况,共采集133帧。

图11　地面锥套定位实验场景

Fig. 11　Ground drogue positioning experiment scene

表2　室外锥套定位软硬件

Table 2　Outdoor drogue positioning hardware and software

硬件设备	详细参数
锥套	1∶1模型
工业相机	BFS-U3-51S5C
镜头	25 mm Computar
CPU	Intel(R)Core(TM)i7-10700F
软件开发环境	ubuntu20.04,opencv4.6
全站仪	徕卡毫米级

图12所示的部分图像特征提取效果表明R-IRLS算法所能够在不同距离下准确提取定位圆特征,且能够应对锥套被遮挡的特殊情况。不同算法特征提取的定位结果如图13所示,定位误差统计如表3所示,通过与真值的对比发现,RANSAC算法由于在采样过程中具有随机性,在插头遮挡时导致部分图像出现异常,相对定位误差均值为1.67%,最大值达到16.89%;PCA算法对所有边缘点进行检测拟合,容易出现误差极大情况,相对定位误差均值为2.1%,最大值达到60.63%。

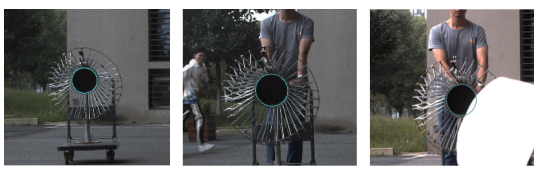


图12　R-IRLS算法特征提取效果

Fig. 12　The feature extraction effect of R-IRLS algorithm

利用R-IRLS算法的定位结果没有出现突变,对锥套特征提取的相对定位误差均值为0.79%,最大误差为1.05%,出现在10 m距离,此时锥套成像相对较小,一个像素点的检测偏移会带来较大的定位误差。得益于凸包检测提前排除离群点,以及迭代加权式的最小二乘优化椭圆目标,在实际加油过程中锥套可能被插头遮挡的情况下,R-IRLS算法相较于RANSAC算法精度上提升了49.3%,相较于PCA算法精度上提升了62.3%;平均耗时为13.9 ms,处理帧率达到71帧,满足加油对接场景下特征提取的实时性需求。

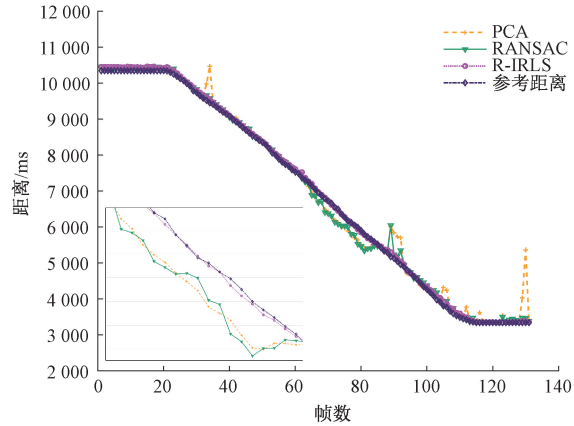


图13　不同算法特征提取定位结果与真值对比

Fig. 13　Comparison between the localization results of different feature extraction algorithms and the true value

表3　不同算法提取定位误差

Table 3　Different algorithms extract positioning errors

方法	RANSAC	PCA	R-IRLS
平均值/%	1.67	2.11	0.79
最大值/%	16.89	60.63	1.05

采用多组锥套采集视频进行实验,期间对锥套进行不同程度的遮挡,保证遮挡率小于50%。在3~10 m范围内对解算距离相对误差进行统计,共计676帧,利用R-IRLS算法得到的相对距离误差概率如图14所示,相对定位误差在1%以内的概率达到83.2%,全流程定位误差在2%以内,证明了R-IRLS特征提取算法具有较高的精度和抗遮挡性能。

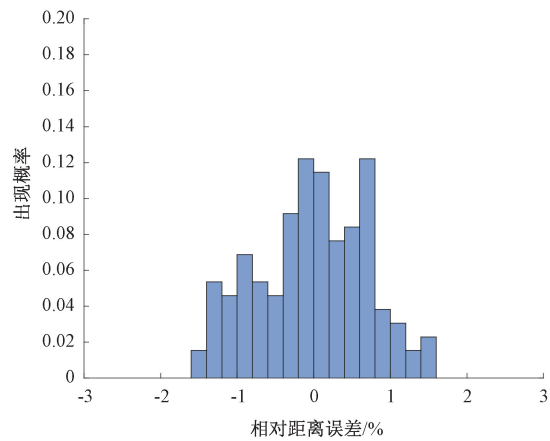


图14　相对距离误差统计直方图

Fig. 14　This method is used to solve the relative distance error statistical histogram

4　结　论

针对自主空中加油过程中遮挡锥套的定位特征提取问题,基于锥套加油口的圆特征提取方法能够有效排除背景干扰与插头遮挡,提高特征提取的有效性。主要设计了一种自适应均值滤波器以获取圆形特征候选点,融合了凸包缺陷检测算法提高遮挡情况下特征提取的鲁棒性,并提出了一种的迭代重加权算法来实现高精度的椭圆拟合。经过仿真和实测验证,在仿真实验中,无遮挡时平均误差小于 0.5%,在遮挡率为 50%时平均误差小于 2%;在实测实验中,相较于其他两种经典算法,特征提取精度提高了 49.3%,平均耗时达到 13.9 ms,在锥套被遮挡的特殊情况下,定位误差控制在在 2%以内,满足自主空中加油图像处理的准确性、快速性、鲁棒性要求,未来对加油锥套定位系统应用也具有参考价值。

参考文献

[1] LIU Y, LI H, WANG L, et al. Deep learning approach to drogue detection for fixed-wing UAV autonomous aerial refueling with visual camera[C]. IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Warsaw, Poland, 2023: 827-834.

[2] 秦勇,王宏伦,苏子康,等. 基于视觉的自主空中加油锥套检测与跟踪[J]. 战术导弹技术,2016,180(6):87-93.
QIN Y, WANG H L, SU Z K, et al. Detection and tracking of autonomous aerial refueling drogue based on vision[J]. Tactical Missile Technology, 2016, 180(6): 87-93.

[3] 李华,孙永荣,赵科东,等. 锥套定位的高精度点圆特征提取算法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(9):190-196.
LI H, SUN Y R, ZHAO K D, et al. High-precision point-circle feature extraction algorithm for refueling drogue[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 190-196.

[4] 张耀,吴一全,陈慧娴. 基于深度学习的视觉同时定位与建图研究进展[J]. 仪器仪表学报,2023,44(7):214-241.
ZHANG Y, WU Y Q, CHEN H X. Research progress of visual simultaneous localization and mapping based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 214-241.

[5] 赵敏琨,刘小雄,徐新龙,等. 基于视觉的空中加油定位技术研究[J]. 计算机测量与控制,2023, 31(6):267-273,279.
ZHAO M K, LIU X X, XU X L, et al. Research on inflight refueling positioning technology based on vision[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(6): 267-273, 279.

[6] TONG K W, WU J, HOU Y H. Robust drogue positioning system based on detection and tracking for autonomous aerial refueling of UAVs[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023. DOI: 10.1109/TASE.2023.3308230.

[7] 卢艳军,刘飒. 基于视觉的无人机导航技术研究[J]. 自动化仪表,2021,42(4):1-7.
LU Y J, LIU S. Research on vision-based UAV navigation technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(4): 1-7.

[8] ZHANG J, LIU Z. Tracking and position of drogue for autonomous aerial refueling[C]. IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC), 2018, 4(7): 171-175.

[9] 吴雷,孙永荣,李旺灵,等. 自主空中加油单目视觉导航误差影响因素研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(11):132-138.
WU L, SUN Y R, LI W L, et al. Study on influencing factors of error in autonomous aerial refueling monocular visual navigation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 132-138.

[10] 黄斌. 无人机空中加油近距高精度视觉导航技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
HUANG B. Research on close-range high-accuracy vision navigation technology for UAV aerial refueling[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[11] YIN Y, XU D, WANG X, et al. Detection and tracking strategies for autonomous aerial refuelling tasks based on monocular vision[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(7): 97.

[12] MA Y, ZHAO R, LIU E, et al. A novel method for measuring drogue-UAV relative pose in autonomous aerial refueling based on monocular vision[J]. IEEE Access, 2019, 7: 139653-139667.

[13] ZHANG J, LIU Z, GAO Y, et al. Robust method for measuring the position and orientation of drogue based on stereo vision[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4298-4308.

[14] GARCIA J A B, YOUNES A B. Real-time navigation for drogue-type autonomous aerial refueling using vision-based deep learning detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(4): 2225-2246.

[15] ZHAO K, SUN Y, LI H, et al. Monocular visual pose

estimation for flexible drogue by decoupling the deformation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.

[16] 吴玲,孙永荣,赵科东. 一种自主空中加油视觉导航图像处理方法[J]. 科学技术与工程,2021,21(20):8552-8557.
WU L, SUN Y R, ZHAO K D. An image processing method for autonomous aerial refueling visual navigation[J]. Science Technology and Engineering. 2021, 21(20): 8552-8557.

[17] REITZNER M, SCHÜTT C, WERNER E M. The convex hull of random points on the boundary of a simple polytope [J]. Discrete & Computational Geometry, 2023, 69(2): 453-504.

[18] 龚循强,李志林. 稳健加权总体最小二乘法[J]. 测绘学报,2014,43(9):888-894,901.
GONG D Q, LI ZH L. Robust weighted population least squares method [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2014, 43(9): 888-894,901.

[19] 李思奇,吕王勇,邓柙,等. 基于改进 PCA 的朴素贝叶斯分类算法[J]. 统计与决策,2022,38(1):34-37.
LI S Q, LYU W Y, DENG X, et al. Naive Bayes classification algorithm based on improved PCA [J]. Statistics & Decision, 2022,38(1):34-37.

[20] SABO K, SCITOVSKI R. Multiple ellipse detection by using RANSAC and DBSCAN method [C]. ICPRAM, 2020: 129-135.

作者简介

周兆钦,2022 年于宁波大学获得学士学位,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为图像处理与视觉导航技术。
E-mail: zhouzhaoqin@ nuaa. edu. cn

Zhou Zhaoqin received the B. Sc. degree from Ningbo University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include image processing and visual navigation technology.

赵科东(通信作者),2023 年于南京航空航天大学获取工学博士学位,现为南京航空航天大学自动化学院讲师,主要研究方向为图像/视觉导航、组合导航等。
E-mail: kd_zhao@ nuaa. edu. cn

Zhao Kedong (Corresponding author) received the Ph. D. degree in engineering from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2023. Now he is a lecturer at the School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include image/visual navigation, integrated navigation, etc.