DOI：10.13382/j.jemi.B2205402

锥套定位的高精度点圆特征提取算法

李　华　孙永荣　赵科东　付宇龙　曾庆化
（南京航空航天大学导航研究中心　南京　211106）

摘　要：光学标记辅助加油锥套识别定位系统中，快速高精度提取光学标记质心坐标是锥套定位的重要基础。实际应用场景下，工作距离越远，光学标记点特征的成像越弱；且复杂的背景干扰使得质心提取的准确性大大降低。通过分析光学标记点、圆特征的成像特性，结合锥套结构特点，对光学标记圆特征进行提取，精确分割锥套有效特征区域以代替全局搜索，剔除大量背景干扰；进而提出了一种由类 FAST 阈值粗定位法与二维高斯残差重心拟合法相结合的二级高效点特征质心提取算法，通过设置亮度阈值快速识别光斑特征并获取粗略位置，在此基础上精确框选光斑像素分布邻域，拟合计算提取高精度亚像素质心坐标。实验表明，本文算法满足实时提取要求，与其他经典算法相比，本文算法在保持较高精度的同时，稳定性也能达到较高水平。

关键词：加油锥套；光学标记；图像处理；点圆特征；质心提取
中图分类号：TN219；V249.32　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.4050

High-precision point-circle feature extraction algorithm for refueling drogue positioning

Li Hua　Sun Yongrong　Zhao Kedong　Fu Yulong　Zeng Qinghua
（Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China）

Abstract: In the optical marker-assisted drogue positioning system, the rapid and high-precision extraction of the optical mark is an important foundation for the positioning of the drogue. In practical application scenarios, the longer the working distance, the weaker the imaging of the point features. And the complex background interference greatly reduces the accuracy of centroid extraction. By analyzing the characteristics of optical marking points and circular features, combined with the structural characteristics of the drogue, the circular feature of the optical marking is extracted so that the effective feature area, which is used to replace the global search, can be segmented to eliminate the background interference accurately. Furthermore, this paper mainly proposes a two-level high-efficiency point feature centroid extraction algorithm that combines the FAST-like threshold coarse localization method and the two-dimensional Gaussian residual centroid fitting method. The method identifies the spot features and obtains the rough position quickly by setting the brightness threshold. On this basis, the sub-pixel centroid coordinates are extracted by fitting calculation in the pixel distribution neighborhood of the spot. Experiments results show that the proposed algorithm meets the real-time extraction requirements. Compared with other classical algorithms, the algorithm can maintain a high accuracy and achieve a high level of stability.

Keywords: refueling drogue; optical marking; image processing; point circle feature; centroid extraction

0　引　言

软式空中加油场景下，飞机机动和周边空气的扰动都会使得锥套随机摆动[1]，导致加油对接操作难度增大，危险系数变高，相应的加油锥套增稳技术伴随空中加油技术的突破逐渐成为行业研究的热点[2]。相关研究表明，主动稳定加油锥套系统（actively stabilized refueling drogue system，ASRDS）可在获取锥套位置信息的前提下，通过控制锥套运动使得软管与锥套的组合装置在轻度紊流影响下具备良好的抗干扰能力[3]。在现有主流方案中，对锥套位置信息的估计方式包括机器视觉、差分 GPS、调制光场定位、惯性导航等等[4-5]。其中，机器视觉不需要在锥套上额外安装 GPS 接收机、惯性测量器件

收稿日期：2022-04-19　　Received Date：2022-04-19

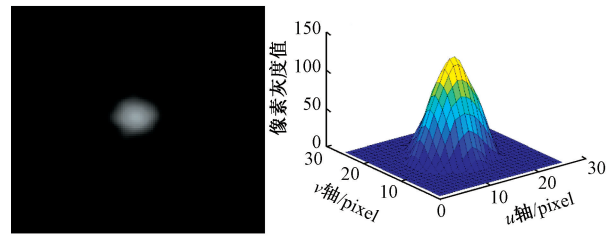
(inertial measurement unit,IMU)等可能会带来安全隐患的电子设备,结构简单,可靠性强,且速度更快、精度更高;然而其缺点也比较明显,依赖于图像特征的视觉设备在弱光、远距等场景下实用性不强。相应的改进策略则根据锥套自身结构特点,合理布置光学标记几何特征,对光学标记进行特征提取,进而计算出其在相机坐标系下的三维空间坐标。利用光学标记显著的成像特性,搭配工业相机的曝光时间、增益等参数调整,即便是远距低光场景下,也能实现锥套快速高精度定位。

锥套视觉定位系统中,特征在图像中的位置是用于视觉定位的基础,并且特征的图像坐标提取精度较大程度影响了目标定位定姿精度。而为了较为快速、高效的图像处理效率,光斑是较为常用的视觉特征点。目前,常用的光斑质心提取方法主要分为两种,分别是基于边缘分布类型和基于区域灰度分布类型。基于边缘分布的算法主要包括二次曲线(圆、椭圆)拟合法、Hough 变换法、线性插值法、空间矩法及各种改进算法等[6-8],此类算法往往提取的质心坐标更趋近于几何中心坐标。因此,在光斑区域形状边界较为规则及光斑所占像素面积较大等场景进行质心提取优势较为明显,否则算法稳定性较差,引起的误差也会相应更大,测量结果经常不具使用价值。基于灰度分布的算法主要包括传统能量质心法、加权灰度质心法、高斯曲面法及各种改进算法等[9-13]。此类算法充分利用光斑区域内部每个像素的灰度值大小,以像素灰度值作为权值,实现光斑质心亚像素坐标提取。多适用于光斑区域内部像素灰度分布均匀,光斑区域较小的情况。

当工作距离较远,光照条件较弱时,加油锥套自身被动特征无法有效成像,需要通过合作特征辅助定位,在 15~20 m 的较长工作距离下,现有算法难以精确稳定提取图像特征,从而无法保证高精度的锥套定位。因此针对光学标记的成像特性及现有经典质心提取算法在实际应用场景中存在的局限性,本文采用轮廓点集拟合法提取光学标记圆特征,根据锥套结构特点精确分割锥套有效特征区域,减弱噪声影响;主要提出一种二级高效点特征质心提取算法,即首先采用类 FAST 阈值粗定位法对光学标记点特征快速一级粗略提取;进而采用二维高斯残差重心拟合法二级精确提取光学标记亚像素质心坐标。仿真和实测实验都表明,本文算法实时性较强,且与其他经典算法相比,本文算法具有更高的精度和更强的稳定性。

1　光学标记点圆特征特性分析

在光学成像系统中,光学标记点在图像中的成像光斑分布符合点扩散函数(point spread function,PSF)特征[14]。对于球状的光学标记点而言,反射光呈球面漫反射形式,小球中心反射光强大于四周,可近似视为点光源,在锥套出现姿态变化时亦可稳定成像,如图 1(a)所示。



(a) 实际光斑图像
(a) Actual spot image

(b) 灰度分布示意图
(b) Grayscale distribution

图 1　实际光斑图像灰度分布示意图

Fig. 1　Grayscale distribution of actual spot image

实际光斑灰度分布情况如图 1(b)所示,可以看出,近 20 m 距离下,光学标记点成像后的光斑边缘灰度梯度下降较快,光斑中心亮度较暗,灰度值约为理论最高像素灰度值 255 的 1/2;且整体光斑区域直径较小,高亮区域占据像素面积约在 15 pixel 左右。在提取点特征时,若对原始图像进行全局搜索,当光照条件发生变化或背景干扰严重时,点特征提取的准确性和实时性难以保证,尤其易出现误检、漏检等问题。

相较于点特征,圆特征特性更为丰富,具备占像素数量多,整体性强,易于检测识别的优势。在图像中,三维世界中的圆呈现为椭圆曲线,一般方程表示为:

$$x^2 + e_1y^2 + e_2xy + e_3x + e_4y + e_5 = 0 \tag{1}$$

式中:e_1、e_2、e_3、e_4、e_5 为利用椭圆曲线的轮廓点集拟合计算所得的椭圆一般系数,进而可以获取椭圆中心坐标 (x_e, y_e),长半轴 a_e,短半轴 b_e,旋转角 θ_e,如图 2 所示。

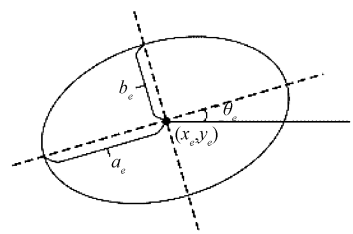


图 2　椭圆参数示意图

Fig. 2　Schematic diagram of ellipse parameters

对于平面上任意不三点共线的 5 点即可唯一确定 1 个椭圆,故即使在出现遮挡、破损等恶劣场景下,依然可以进行椭圆拟合[15],较大程度地弥补特征信息的缺失,使得圆特征具有较强的鲁棒性。

由于锥套伞骨完全张开后呈现近圆形,其最小外接矩形的长宽近似相等,将其记作 d。因此可预先测算出锥套尾圆环带半径 r 与 d 的比值关系,得到比例系数 k,

结合锥套的姿态角度变换,反映到二维图像中,以预检测到的圆特征的位置测算出整个锥套所在的图像 ROI 区域,面积为 S:

$$S = d^2 = (\alpha kr)^2 \tag{2}$$

式中:α 为根据锥套与镜头正视角的偏移程度进行调整的缩放系数,取值一般在 0.8~1.2 之间。

圆特征的提取可将所有锥套上光学标记特征区域精准分割出来,相比于全局搜索,减小了时间复杂度;既可减弱无法预见的随机噪声干扰,同时将范围精确控制在关键图像 ROI 区域,可有效提升点特征提取准确率。

2　光学标记点圆特征提取算法

2.1　轮廓点集拟合圆特征提取

本文利用锥套尾与软管连接处的圆形结构特点,布置光学标记圆特征,成像后采用基于轮廓点集的传统方法对圆特征进行提取,即首先利用二值化阈值对原始图像阈值分割,进而基于圆形特征的几何特性,以长宽比、饱和度作为约束条件,筛选有效轮廓,最终采用最小二乘椭圆拟合获取光学标记圆特征的二维图像参数,方法流程图如图 3 所示。

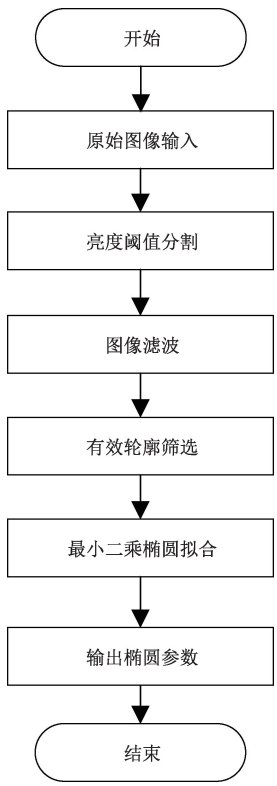


图 3　传统轮廓点集拟合圆特征提取流程

Fig. 3　Flow chart of circle feature extraction

2.2　二级高效点特征质心提取

在利用光学标记圆特征精确划分锥套有效特征区域以代替全局图像搜索的基础上,本文提出光学标记点特征的二级高效质心提取算法,是一种由类 FAST 阈值粗定位法与二维高斯残差重心拟合法相结合的快速高精度质心坐标提取算法。

1)类 FAST 阈值粗定位法

根据 FAST 特征的定义,若某像素与其周围邻域内足够多的像素点相差较大,则该像素可能是特征点[16]。本文设计的对光学标记点特征快速一级粗略提取的类 FAST 阈值粗定位法过程如下:

遍历从原图中分割出来的图像 ROI 区域内所有像素点,设定亮度条件阈值 T_1、T_2,根据式(3)将所有像素点分成 3 类:

$$P_0 = \begin{cases} P_{false}, \{ I_p \mid 0 < I_p < T_1 \} \\ P_{false}, \{ I_p \mid I_p > T_1, I_{p\to w} > I_p - T_2 \} \\ P_{true}, \{ I_p \mid I_p > T_1, \ 0 < I_{p\to w} < I_p - T_2 \} \end{cases} \tag{3}$$

式中:I 为当前遍历的像素点位置 p 处的灰度值,$I_{p\to w}$ 为以长度 w 作为邻域宽度的当前像素点 p 周边像素的灰度值,w 一般取值为 3~5,P_0 为像素点是否为特征点的属性标记,若判断为 P_{true},则判定该像素点为候选特征点,否则为非候选特征点。

对于单个光斑而言,可能存在多个候选特征点的情况,此时需计算像素点之间的距离,按距离将所有候选特征点分成多个集合,对单个集合内的特征点选取灰度值最大的像素整数坐标作为计算结果,记为 (x_{fst}, y_{fst})。

2)二维高斯残差重心拟合法

根据所得光斑粗略位置整数坐标 (x_{fst}, y_{fst}),即可在该像素邻域内精确提取光斑亚像素质心坐标。本文视觉成像系统中光斑灰度分布模型近似于高斯型,可表示为:

$$I(x,y) = K\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \tag{4}$$

式中:$I(x,y)$ 为像素坐标 (x,y) 处的灰度值;K 为光斑像素点的能量,即灰度最大幅值;σ_x 为 x 坐标方向上的标准差,σ_y 为 y 坐标方向上的标准差,与光斑弥散半径大小有关,(x_0, y_0) 为峰值对应的亚像素质心坐标。

对式(4)等式两边取对数处理,得:

$$\ln I = -\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{x_0 x}{\sigma_x^2} + \frac{y_0 y}{\sigma_y^2} + \ln K - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} \tag{5}$$

从本质上来讲,传统高斯曲面法提取光斑质心即为通过式(5)计算得出高斯二元函数的极大值点坐标。在散焦模糊条件下,利用传统高斯曲面法对高斯型 PSF 分布进行拟合精度高,稳定性好。然而传统高斯曲面法的

局限性在于高度依赖光斑的灰度分布类型,且当光斑大小未知时,难以准确框定光斑的有效区域,若只是单纯的放大区域半径,易出现灰度值为 0 的像素,导致该算法失效;反之,较随机性的小范围选取则会导致该算法精度和稳定性都大幅下降。

因此,本文设计二维高斯残差重心拟合法二级精确提取光斑质心亚像素坐标,实现过程如下:

对于单个光斑而言,在其整数质心坐标 (x_{fst},y_{fst}) 周围扩选大小为 $2l\times 2l$ 的矩形区域,利用式(6)取 $\beta=2$ 的传统能量质心法对光斑进行亚像素质心预定位得 (x_c,y_c)。

$$\begin{cases} x_c=\dfrac{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}x[I(x,y)]^{\beta}}{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}[I(x,y)]^{\beta}} \\ y_c=\dfrac{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}y[I(x,y)]^{\beta}}{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}[I(x,y)]^{\beta}} \end{cases} \tag{6}$$

式中:β 为灰度值权重系数,一般取值为 1 或 2。当 $\beta=1$ 时,式(6)为传统能量质心法;当 $\beta=2$ 时,式(6)为平方加权灰度质心法;当 $\beta>2$ 时,该算法对噪声十分敏感,尤其当有一定强度的干扰光线从侧面照射时,测量结果经常不可靠。

进而在 (x_c,y_c) 周围扩选长度缩减 1/2 的 $l\times l$ 型矩形区域,将该矩形区域内所有像素点代入转化为矩阵形式的式(7),得:

$$\begin{bmatrix}\ln I_1\\ \ln I_2\\ \vdots\\ \ln I_{l^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_1^2 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1\\ x_2^2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ x_{l^2}^2 & y_{l^2}^2 & x_{l^2} & y_{l^2} & 1\end{bmatrix}\cdot$$

$$\left[-\frac{1}{2\sigma_x^2}\quad -\frac{1}{2\sigma_y^2}\quad \frac{x_0}{\sigma_x^2}\quad \frac{y_0}{\sigma_y^2}\quad -\frac{x_0^2}{2\sigma_x^2}-\frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}+\ln K\right]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

将式(7)用字母表示并构建残差函数:

$$E=I-XS \tag{8}$$

通过对 X 进行分解以简化计算,再根据高斯-牛顿法算法原理,最小化残差平方求解参数矩阵 $\boldsymbol{S}$,包含所有最优拟合参数 $x_0,y_0,\sigma_x,\sigma_y$,其中 (x_0,y_0) 即为最终所求光斑质心亚像素坐标。

3　实验设计

为了验证本文提出算法的准确性和稳定性,设计仿真和实测实验两组验证实验,将传统能量质心法(COM)[17]、高斯曲面拟合法(GSF)[18]、加权灰度质心法(WGC)[19]和二维高斯残差重心拟合法(GEMF)进行对比。

3.1　仿真实验

结合实际光斑占据像素区域大小,利用 MATLAB 根据点扩散函数生成大小为 26 pixel×26 pixel 的模拟光斑,理论光斑质心坐标为(13.5,13.5),如图 4 所示。采用硬件设备为 Intel(R) Core(TM) i7-10700F 处理器,16 G 内存;软件系统为 Ubuntu 18.04。

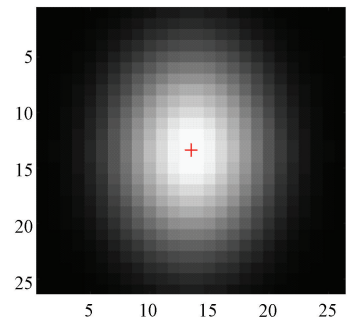


图 4　模拟光斑图像

Fig. 4　Simulated spot image

通过在模拟光斑图像上增加一定等级的高斯噪声,生成 100 幅加噪光斑图像,分别用 COM、GSF、WGC、GEMF 四种算法进行质心提取,实验结果如图 5 和 6 所示。

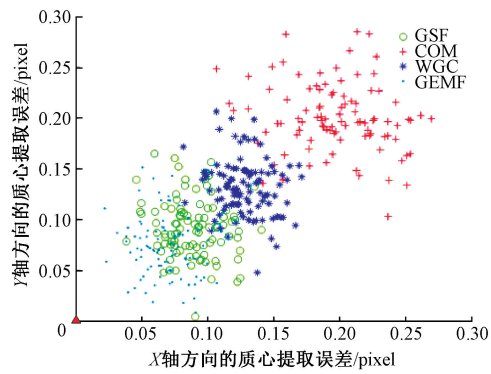


图 5　不同算法质心提取误差分布

Fig. 5　Centroid extraction error distribution

在添加同等级的高斯噪声条件下,传统能量质心法质心提取距离误差均值为 0.29 pixel,加权灰度质心法距离误差均值为 0.19 pixel,高斯曲面拟合法距离误差均值为 0.14 pixel,二维高斯残差重心拟合法距离误差均值为 0.10 pixel,显然本文算法光斑质心提取的精度高于另外 3 种算法。

3.2　实测实验

为验证本文算法在实际锥套视觉定位系统中的稳定

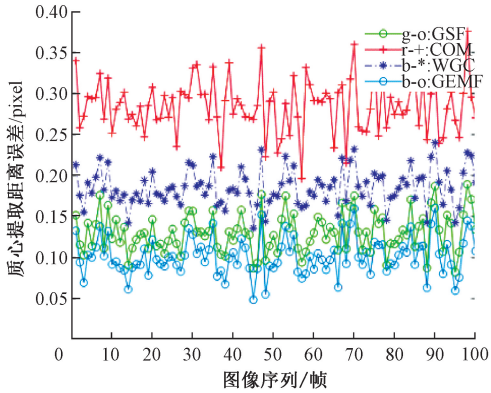


图 6　不同算法质心提取距离误差

Fig. 6　Centroid extraction distance error

性与实时性，本文搭建室外锥套定位硬件平台进行实验。

实验场景和设备如表 1 和图 7 所示，将相机放置距锥套 20 m 处，进行锥套位置解算。实测实验主要通过分析传统能量质心法、高斯曲面拟合法、加权灰度质心法和本文所提出的质心提取算法对锥套位置解算的影响，将提取实际图像光斑坐标的稳定性作为直接评价指标；锥套位置解算结果的一致性作为间接评价指标，比较算法间差异及其适用性。

表 1　室外锥套定位硬件平台设备

Table 1　Outdoor drogue positioning hardware platform equipment

硬件设备	详细参数
锥套	1∶1 模型
工业相机	GS3-U3-23S6C
镜头	25mm Computar
近红外设备	OPT
滤光片	AZURE-BP 850 nm

图 7　实测实验场景图

Fig. 7　Experimental scene and equipment

直接评价指标实验：连续采集 2 000 帧图像序列，对其中第 51~1 850 帧间共 1 800 帧进行图像处理，保持锥套距相机距离不变，调整锥套左右和上下位置，重复数次以上过程。将多个光学标记点特征的亚像素质心坐标分维统计，于单坐标轴采集 100 800 个数据，利用 4 种方法分别对所采集图像进行质心坐标提取，稳定性结果如图 8 所示；并分别计算 u、v 方向上质心坐标提取均方差，结果如表 2 所示。

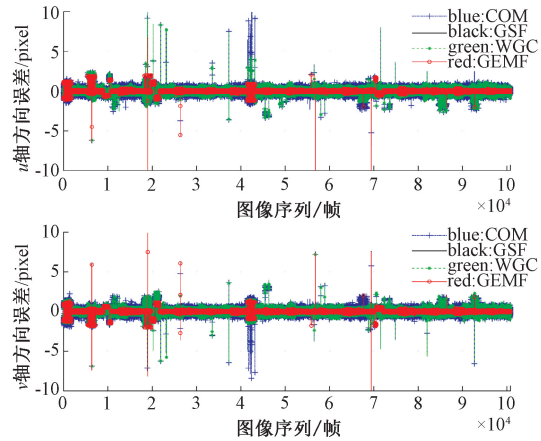


图 8　不同算法提取多个光斑质心稳定性

Fig. 8　Stability of extracting multiple spot centroids

表 2　不同算法提取多个光斑质心均方差

Table 2　MSE of extracting multiple spot centroids

方法	COM	GSF	WGC	GEMF
MSE(u)/pixel	0.59	0.54	0.57	0.50
MSE(v)/pixel	0.44	0.35	0.41	0.32

可以看出，二维高斯残差重心拟合法相比于其他 3 种算法中表现最差的传统能量质心法质心提取的均方差最多减少 0.12 pixel，连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 15%；相比于表现较好的高斯曲面拟合法质心提取的均方差最多减少 0.04 pixel，连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 8%，具备更好的光斑质心提取稳定性。处理单帧平均时间均在 5.6 ms 左右，实时性较高。

间接评价指标实验：连续采集 2 000 帧图像序列，对其中第 51~1 850 帧间共 1 800 帧进行图像处理，保持锥套距相机距离不变，调整锥套左右和上下位置，重复数次以上过程，采用 8 个光学标记点特征构建 PNP 问题对锥套进行定位[20]。

锥套位置解算结果一致性如图 9 所示，因锥套视觉定位系统只考虑 XY 平面内锥套飘摆运动，故本文只对 XY 平面进行分析，解算结果均方差如表 3 所示。

表 3　不同质心提取方法锥套位置解算结果均方差

Table 3　MSE of position solution results

方法	COM	GSF	WGC	GEMF
MSE(X)/mm	23.95	15.16	21.29	13.91
MSE(Y)/mm	20.45	15.00	16.92	13.49

可以看出，采用二维高斯残差重心拟合法相比于表现最差的传统能量质心法，锥套位置解算结果均方差最

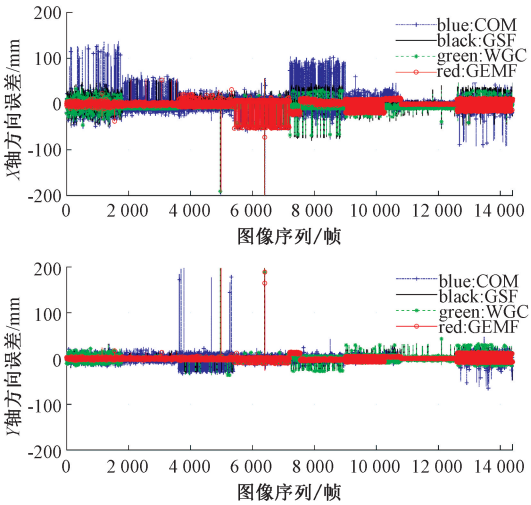


图 9　不同质心提取算法锥套位置解算结果一致性

Fig. 9　Consistency of position solution results

多减少 10.04 mm,连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 35%;相比于表现较好的高斯曲面拟合法,锥套位置解算结果均方差最多减少 1.51 mm, 连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 10%,本文算法在锥套位置解算层面一致性较好。

本文布置 8 个光学标记点特征构建 PNP 问题对锥套进行位置解算,计算 X 轴平均误差为 24.30 mm,Y 轴平均误差为 43.20 mm,单帧平均解算时间为 8.92 ms,在近 20 m 的工作环境下,解算速度快,精度高,间接证明本文算法的有效性。

4　结　论

针对实际应用场景下因距离及背景干扰等因素导致特征提取准确性不高的问题,本文提取光学标记圆特征分割锥套有效特征区域,消除背景干扰,提高光斑提取准确性。主要提出了一种由类 FAST 阈值粗定位方法与二维高斯残差重心拟合法相结合的光学标记二级高效质心提取算法。经过仿真和实测实验验证,本文算法在仿真实验中,精度误差可达 0.1 pixel,点特征质心提取精度高;实测实验中,对实际多帧图像中多个光斑质心提取,本文算法相比于其他 3 种算法中表现较好的高斯曲面拟合法质心提取的均方差最多减少 0.04 pixel,连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 8%;计算锥套位置解算结果一致性,相比于表现较好的高斯曲面拟合法,锥套位置解算结果均方差最多减少 1.51 mm, 连续多帧亚像素质心坐标均方差减少了 10%,稳定性较好。本文研究对复杂背景下高精度质心提取具有重要意义,对加油锥套定位系统应用也具有参考价值。

参考文献

[1] LIU Z, SONG C, LIANG J, et al. Advances in modeling and control of probe-drogue aerial refueling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 150-160.

[2] 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.

[3] ZHAO K, SUN Y, ZHANG Y, et al. Monocular visual position and attitude estimation method of a drogue based on coaxial constraints[C]. Sensors (Basel), 2021.

[4] ZHANG J, LI J, YANG C, et al. Research on relative positioning algorithm for large aircraft aerial refueling[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(7): 147-151.

[5] HU Z, YUAN S, QIAN S. Vision/GPS-based docking control for the UAV autonomous aerial refueling[C]. Guidance, Navigation & Control Conference. IEEE, 2016.

[6] 吴泽楷,李恭强,王文涛,等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 346-350.
WU Z K, LI G Q, WANG W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 346-350.

[7] 李高,何元烈,曾碧. 三角测距激光雷达的光斑定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(11): 1692-1697.
LI G, HE Y L, ZENG B. Spot positioning algorithm for laser radar based on triangulation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(11): 1692-1697.

[8] LIU T, LI G, NIE X, et al. Enhancement of contour smoothness by substitution of interpolated sub-pixel points for edge pixels[C]. IEEE, 2021.

[9] ZHAN W, LU H, WANG X, et al. Experimental study on sub-pixel subdivision location of linear CCD based on gray weighted centroid algorithm [J]. Optical Technology, 2018, 44(4): 476-479.

[10] 朱红,谢俊峰,孙广通,等. 面向星载激光光斑的质心定位精度分析[J]. 遥感信息, 2021, 36(2): 1-5.
ZHU H, XIE J F, SUN G T, et al. Centroid location accuracy analysis of spaceborne laser spot[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(2): 1-5.

[11] 刘杰,张耿,冯向朋,等. 基于三次样条拟合插值的高精度质心定位方法[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 132-138.
LIU J, ZHANG G, FENG X P, et al. High precision

centroid location algorithm based on cubic spline fitting and interpolation[J]. Acta Optica Sinica,2021,41(12): 132-138.

[12] LV W, AN B, WU Y. Digital image distortion and proofreading technology in micro focal spot X-ray inspection[C]. 2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2014:1060-1062.

[13] WANG S, YAN B, DONG M, et al. An improved centroid location algorithm for Infrared LED feature points[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2013, 8916:19.

[14] DWIKA D A, FAUZAN M O, ADHIKA D R. Edge preserving filter to support PSF estimation of scanning electron microscope images[C]. 2019 6th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA). IEEE, 2019: 113-116.

[15] 孔盛杰,黄翔,周蒯,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(4):247-255.

[16] 卢胜男,李小和. 基于对称 FAST 特征的车辆目标检测方法[J]. 微电子学与计算机,2020,37(2): 37-42.
LU SH N, LI X H. Vehicle detection method using symmetrical FAST feature [J]. Microelectronics & Computer, 2020,37(2):37-42.

[17] 王宇. 基于灰度质心法的雷达干扰源定位方法研究[J]. 自动化技术与应用,2016,35(2):63-66.
WANG Y. Study on interference localization method for warming radar based on center of gravity method[J]. Communication and Information Processing, 2016, 35(2):63-66.

[18] 段振云,王宁,赵文珍,等. 基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1):219-225.
DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W ZH, et al. Sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(1):219-225.

[19] 刘雨,肖本贤,尹柏强. 基于修正 RSSI 值的四边形加权质心定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10):107-114.
LIU Y, XIAO B X, YIN B Q. Quadrilateral weighted centroid localization algorithm based on RSSI of correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34(10):107-114.

[20] 汪佳宝,张世荣,周清雅. 基于视觉 EPnP 加权迭代算法的三维位移实时测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):166-175.
WANG J B, ZHANG SH R, ZHOU Q Y. Vision based real-time 3D displacement measurement using weighted iterative EPnP algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(2):166-175.

作者简介

李华(通信作者),2018 年于南京航空航天大学获得学士学位,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: huali@nuaa.edu.cn

Li Hua (Corresponding author) received the B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2018. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include the computer vision, which focuses on the basic image processing, feature extraction and the application on the aerial refueling visual navigation system.

孙永荣,分别在 1991 年于南京航空学院获得学士学位,1997 年和 2004 年于南京航空航天大学获得硕士学位和博士学位,现为南京航空航天大学教授,主要研究方向为惯性导航与组合导航、图像/视觉导航技术。
E-mail: sunyr@nuaa.edu.cn

Sun Yongrong received his B. Sc. degree from Nanjing Aeronautical Institute in 1991, M. Sc. and Ph. D. degrees from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1997 and 2004, respectively. Currently he is a professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include inertial navigation and combination navigation, visual navigation technology.