



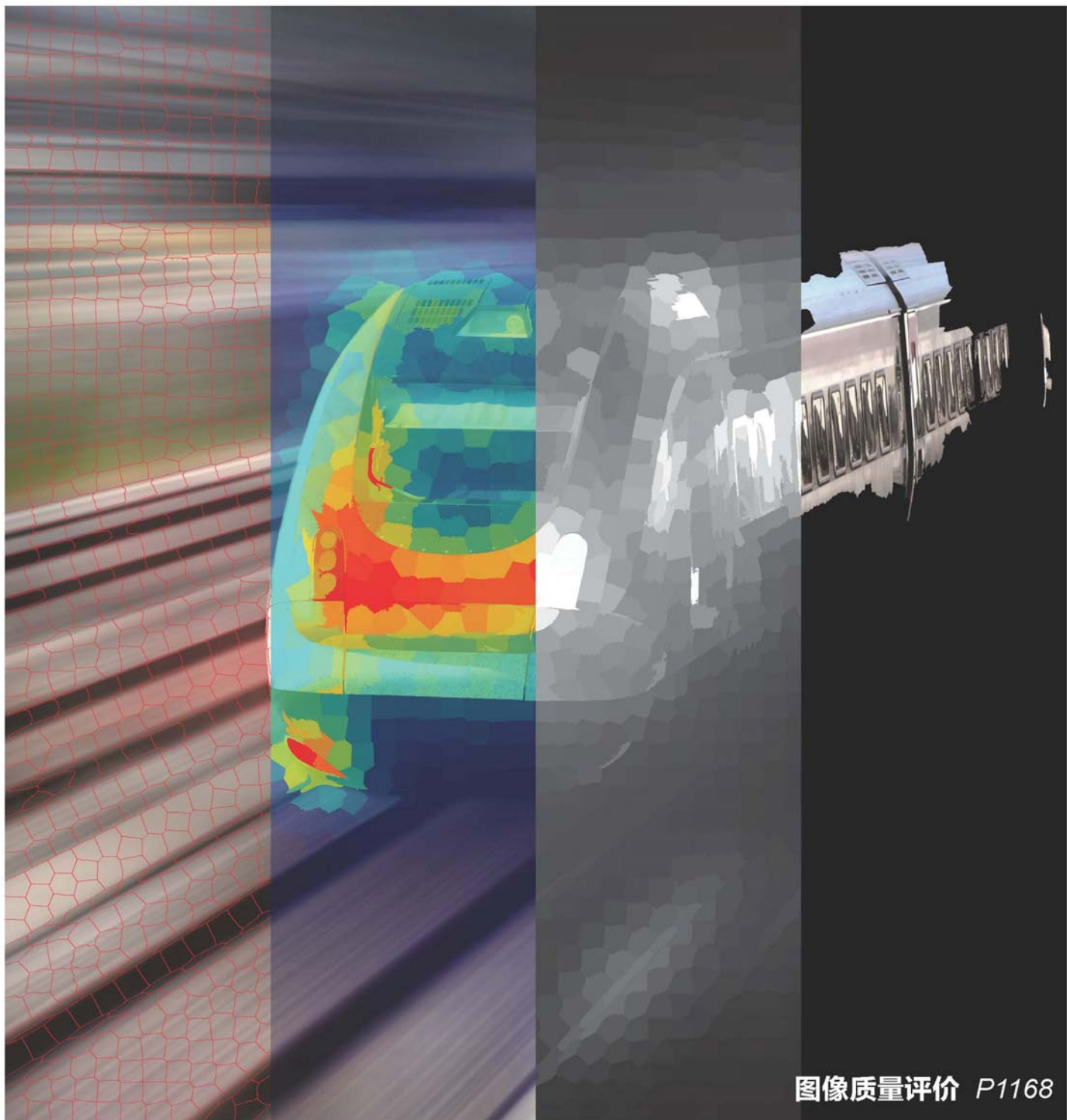
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
08
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

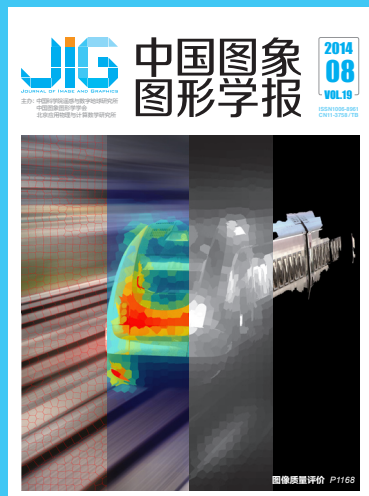


图像质量评价 P1168

中国图象图形学报

刊名题字: 宋健

月刊 (1996年创刊)



第19卷第8期 (总第220期)

2014年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

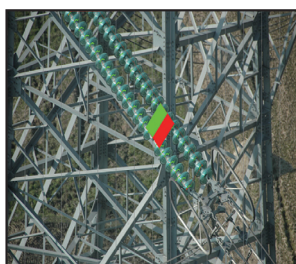
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



基于色调优化的图像视频细节增强(第1149页)



形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断(第1194页)



基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建
(第1210页)

图像处理和编码

利用纹理和空间相关性的HEVC帧内预测模式选择

齐美彬, 朱广辉, 杨艳芳, 蒋建国 1119

方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换

张湃, 王丽侠, 张银蒲 1126

L_{∞} 准则的最大误差图像压缩算法

李晓云, 庞超逸, 黎彤亮, 黄世中 1135

利用无参考图像内容量度优化非局部均值去噪方法的参数

侯鑫, 陆耀, 李建武 1142

基于色调优化的图像视频细节增强

王津航, 刘春晓, 朱臻阳, 金剑秋, 唐佳娣 1149

结合图像融合与分割的快速去雾

王伟鹏, 戴声奎 1155

彩色图约束的二阶广义总变分深度图超分辨率重建

邸维巍, 张旭东, 胡良梅, 段琳琳 1162

重要区域保持的图像缩放质量评价方法

梁云, 傅贤超, 刘财兴 1168

图像分析和识别

图嵌入正则化投影非负矩阵分解人脸图像特征提取

杜海顺, 张旭东 1176

基于稀疏编码的动态纹理识别

刘洋, 李一波, 姬晓飞, 王杨扬 1185

形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断

张晶晶, 韩军, 赵亚博, 刘浪, 王万国, 朱铭武 1194

迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪

黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊 1202

图像理解和计算机视觉

基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建

杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜 1210

医学图像处理

应用球形算子层次聚类的3维冠脉跟踪提取

郑永昌, 耿辰, 宋爽, 杨健 1219

遥感图像处理

波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法

王相海, 解天, 宋传鸣, 张智迪 1228

多线程遥感影像实时渐进传输

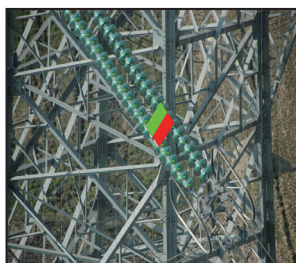
刘万军, 孟煜, 曲海成, 石翠萍 1237

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Image and video detail-enhancement via tone optimizationimage morphing(P1149)



Insulator Recognition and Defects Detection Based On Shape Perceptual (P1194)



Depth map super-resolution via adaptive weighting filter (P1210)

Image Processing and Coding

HEVC intra-prediction mode selection by using texture and spatial correlation	
Qi Meibin, Zhu Guanghui, Yang Yanfang, Jiang Jianguo	1119
Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering	
Zhang Pai, Wang Lixia, Zhang Yinpu	1126
Algorithm for maximum error image compression based on L_{∞} norm	
Li Xiaoyun, Pang Chaoyi, Li Tongliang, Huang Shizhong	1135
Optimizing the parameters of non-local means via no-reference image content metric for image denoising	
Hou Xin, Lu Yao, Li Jianwu	1142
Image and video detail-enhancement via tone optimization	
Wang Jinhang, Liu Chunxiao, Zhu Zhenyang, Jin Jianqiu, Tang Jiadi	1149
Fast haze removal method based on image fusion and segmentation	
Wang Weipeng, Dai Shengkui	1155
Depth image super-resolution based on second-order total generalized variation constrained by color image	
Di Weiwei, Zhang Xudong, Hu Liangmei, Duan Linlin	1162
Image retargeting quality assessment by preserving important regions	
Liang Yun, Fu Xianchao, Liu Caixing	1168

Image Analysis and Recognition

Graph embedding regularized projective non-negative matrix factorization for face image feature extraction	
Du Haishun, Zhang Xudong	1176
Dynamic texture recognition based on sparse coding	
Liu Yang, Li Yibo, Ji Xiaofei, Wang Yangyang	1185
Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual	
Zhang Jingjing, Han Jun, Zhao Yabo, Liu Liang, Wang Wanguo, Zhu Mingwu	1194
Droque image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting	
Huang Bin, Sun Yongrong, Yang Bowen, Wang Xiaoxiao, Liu Xiaojun	1202

Image Understanding and Computer Vision

Depth map super-resolution via adaptive weighting filter	
Yang Yuxiang, Zeng Yu, He Zhiwei, Gao Mingyu	1210

Medicine Image Processing

Novel 3D coronary artery extraction method using hierarchical clustering of spherical operator	
Zheng Yongchang, Geng Chen, Song Shuang, Yang Jian	1219

Remote Sensing Image Processing

Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree	
Wang Xianghai, Xie Tian, Song Chuanming, Zhang Zhidi	1228
Remote sensing image real-time progressive transmission based on multi-threads	
Liu Wanjun, Meng Yu, Qu Haicheng, Shi Cuiping	1237

中图分类号: V249.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)08-1202-08

论文引用格式: Huang B, Sun Y R, Yang B W, Wang X X, Liu X J. Drogue image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1202-1209. [黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊. 迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(8): 1202-1209.] [DOI:10.11834/jig.20140812]

迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪

黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊

南京航空航天大学自动化学院导航研究中心, 南京 210016

摘要: **目的** 针对自主空中加油过程中锥套图像目标识别与定位问题, 以锥套内部加油口作为匹配特征, 提出一种基于圆形特征的锥套检测与跟踪方法。 **方法** 锥套跟踪采用行列扫描法获取锥套内部边缘, 并通过迭代最小二乘拟合确定精确的椭圆形状参数, 而锥套检测采用多方位最近点区域搜索法提取锥套所在的所有可能图像区域, 并采用锥套跟踪进行精匹配和最终决策。 **结果** 实验结果表明, 该方法下锥套精确定位的成功率高达 94.71%, 锥套检测耗时小于 500 ms, 锥套跟踪的最大耗时为 21.59 ms, 平均耗时 4.18 ms。 **结论** 本文方法无须在锥套上额外安装光学标记, 且能够实时、精确地确定锥套所在的图像位置和大小。

关键词: 自主空中加油; 锥套跟踪; 锥套检测; 图像定位; 最小二乘拟合

Drogue image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting

Huang Bin, Sun Yongrong, Yang Bowen, Wang Xiaoxiao, Liu Xiaojun

Navigation Research Center, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: **Objective** To overcome the shortcoming about the lack of payload and endurance, the autonomous aerial refueling technology is an effective solution for unmanned aircraft to extend flight duration, which results in exponentially enhancing of the aircraft fighting efficiency, and it can also reduce the refueling operation risk for manned aircraft. Relative position sensing between the receiver aircraft and the refueling drogue is the first and necessary step in the autonomous aerial refueling procedure, and the vision-based method is the mostly used for relative positioning. We propose a circular feature-based drogue detecting and tracking method by using the internal refueling port of drogue as the matching feature. **Method** The drogue tracking is the final step which outputs the final image positioning results even in the drogue detecting process. In drogue tracking, the rectangle of interest (ROI) of current frame image is determined and extracted depending on the positioning result in the last frame, and then the Canny algorithm is applied to obtain the ROI edge image. With the edge pixel points, the row and column scanning method is used to obtain the inside edge points of circular objects, which can exclude the irrelevant image pixel points, and then the precise elliptical shape parameters can be solved through an iterative least-squares fitting method. In drogue detecting, a multi-direction closest point searching method is proposed to extract all possible drogue image areas by inspecting the circular feature when scanning the multiple directions of the interested pixel point, and final result with precise matching can be decided by the drogue tracking method mentioned before. **Result** Experiments are designed and done with a drogue model which has almost the same size of the real refueling drogue. The Hough-based circle detecting method is treated as the comparison method, and simultaneously a laser rangefinder is

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174197); 航空科学基金项目(2012ZC52045)

第一作者简介: 黄斌(1990—), 男, 现为南京航空航天大学导航、制导与控制专业博士研究生, 主要研究方向为飞行器导航、制导与控制。E-mail: bingo@nuaa.edu.cn

used to provide the reference positions in the experimental procedure. Experimental results show that, the proposed method has a success rate of 94.71% in precise relative distance positioning of drogue, better than the Hough-based circle detecting method. In real-time performance, the Hough-based circle detecting method has an average time consumption of 59.52 ms. When using the proposed method, drogue detecting takes less than 500 ms, and drogue tracking has a time consumption of maximum 21.59 ms and average 4.18 ms, which can well work with the camera having a frame rate of 25 frame/s. **Conclusion** Vision-based navigation method is a potential and available solution for probe-drogue aerial refueling docking, and the complex background of the tanker aircraft makes the image detecting and tracking of drogue difficult and easily disturbed. We use the internal circular refueling port as the image detecting feature, and propose a new drogue image detecting and tracking method. The installation of additional optical marks on the refueling drogue is not required, and the real-time position and size of drogue in the image plane can be accurately determined. The proposed method is able to meet the requirements of the accuracy, the real-time performance, and the reliability for image processing in the autonomous aerial refueling procedure.

Key words: autonomous aerial refueling; drogue tracking; drogue detecting; image positioning; least-squares fitting method

0 引言

软管式空中加油通过受油插头与加油机尾部加油锥套之间的对接完成加油过程。在此过程中,受油机需要与加油机保持编队飞行,同时还必须自主寻找加油锥套,并实时准确地获知锥套的位置,并按照可行轨迹向其不断靠近以确保成功对接。通过自主空中加油(AAR)的研究,可进一步降低空中加油的操作风险,提高飞机作战效能,是现代航空领域中的一项具有挑战性的任务^[1]。目前,计算机视觉以其精度高、价格低廉、无需主动通信等优点成为AAR的一种可行方法并得到了广泛研究,其中对于加油锥套的图像检测、跟踪与识别是受油插头与加油锥套成功对接的关键^[2]。

美国航空航天局(NASA)早在2005年就进行了无人机“插头—锥套式”空中加油试飞,通过在F/A-18B研究机上安装了一套名为VisNav的位置感知系统获得锥套的图像定位信息,该系统需要在加油锥套上安装多个LED光标(Beacon)^[1,3]。意大利比萨大学的Mati等人^[4]提出了在锥套断面放置明显标记点的方式,从而为锥套目标的检测与跟踪带来便利。西班牙马德里理工大学的Martinez等人建立了基于视觉的自主空中加油试验平台,采用多分辨率及模板匹配等方式,在不改造加油锥套的情况下完成了锥套目标的检测与识别^[5]。

王旭峰等人^[6]建立了自主空中加油的一个视觉相对导航半物理地面试验平台,并在加油锥套断面区域加装了红色标识环带,以增强特征区域与背景图像的对比度,从而可通过色彩识别获得图像定

位信息。而解洪文等人^[7]则在加油锥管端面上放置多个光学标记,并采用双目视觉的方式求解相对位置和姿态参数。另外,宋春华等人^[8]借鉴视频图像中运动目标检测的思想,提出了一种多尺度低秩和稀疏分解锥套检测算法,即通过小波分解获得多尺度低频图像序列,依次从较粗尺度向较细尺度逐步逼近获得目标锥套区域。

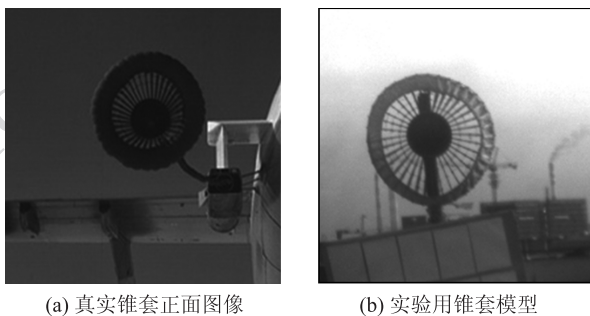
针对自主空中加油过程中锥套图像的目标识别与定位问题,首先分析了锥套图像特点并设计了一套基于圆形特征的锥套检测与跟踪策略,接着分别介绍了迭代最小二乘椭圆拟合的锥套跟踪方法和基于多方位最近点区域搜索的锥套检测方法,最后通过实验测试所提出的锥套图像定位方法,并验证了其在精度、可靠性和实时性等方面的性能。

1 锥套检测与跟踪策略

1.1 锥套图像特点分析

图1(a)为真实加油锥套的正面图像,可以看出锥套具有如下的形状特征:1)锥套由内部加油口、外围圆环及骨架组成,而加油口和外围圆环通过骨架连接;2)外围圆环和骨架分别对应着锥套的伞布和伞骨,可以收缩和扩张,在空中加油过程中可看成近似的刚性物体。

另外,从图1(a)可以看出,锥套后带有软管,当受油机采集到锥套图像时,锥套后面的软管或者加油机机体会包含在图像中,因此锥套图像会伴随有背景的干扰。考虑到这种背景的干扰,本文设计了图1(b)所示的锥套模型,锥套后面的支撑杆模拟了背景干扰情况。



(a) 真实锥套正面图像 (b) 实验用锥套模型

图1 锥套图像及实验模型

Fig. 1 Drogue image and experimental drogue model

在空中加油过程中,由于偏差角度较小,锥套内部加油口往往是完全可见的,因此,可采用内部加油口作为主要特征用于锥套图像的目标识别与定位。

1.2 基于圆形特征的锥套检测与跟踪策略设计

考虑到在空中加油过程中,加油机会保持较为平稳的飞行状态,因此,从受油机一侧去观察加油锥套。加油锥套在视频图像流中会呈现缓慢变化的特征,即前一帧图像中的加油锥套位置和当前帧图像中的加油锥套位置比较接近,因此在处理当前帧图像时,可利用前一帧处理结果来缩小待处理图像的大小,在保证稳定性的同时也提高了实时性。

而在第1帧或当前帧跟踪失败的情况下,则需要从全局图像中进行搜索,为了保证锥套识别策略在锥套检测与锥套跟踪两种方式下的一致性,可在锥套检测方式下,采用锥套的区域性特征进行初步检测后获得锥套所在的所有可能图像区域,接着利用锥套跟踪方法对这些锥套的可能图像区域进行精匹配和最终决策,从而保证了锥套识别策略的一致性,并提高了锥套识别程序代码的利用率。

本文提出了迭代最小二乘椭圆拟合的锥套跟踪方法,并采用基于多方位最近点区域搜索的锥套检测方法来处理第1帧及锥套跟踪失败的情况。在锥套检测方法中,只需要进行锥套区域性特征的判断,并提供锥套所在的所有可能图像区域,进一步的锥套精匹配和决策则可以重新采用文中提出的锥套跟踪方法。

2 迭代最小二乘椭圆拟合的锥套跟踪

2.1 锥套跟踪流程图

锥套跟踪是基于前一帧图像定位结果,选择当前帧目标所在的图像感兴趣区域(ROI),并在ROI区域内进行锥套定位与形状参数拟合。采用迭代最

小二乘椭圆拟合的锥套跟踪方法,工作流程图如图2所示,利用较为明显的边缘特征,可提取ROI区域内的锥套内部加油口的边缘点,进而可利用最小二乘法进行椭圆形状的参数拟合。考虑到背景干扰的影响,可采取粗精两级拟合的方式,提高锥套跟踪方法的可靠性。

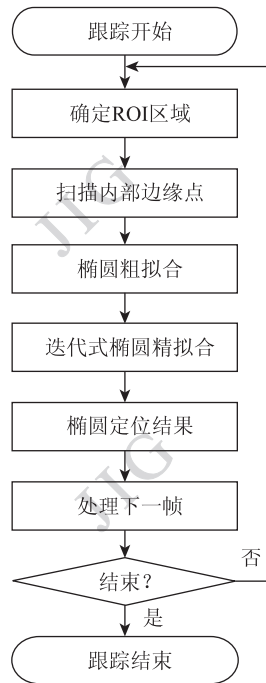


图2 锥套跟踪方法流程图

Fig. 2 Flowchart of drogue tracking method

2.2 锥套跟踪具体过程

1) 根据上一帧定位结果,确定并提取当前帧的ROI图像区域。记第 $k-1$ 帧获得的椭圆定位参数为 $(x_c^{(k-1)}, y_c^{(k-1)}, \theta^{(k-1)}, a^{(k-1)}, b^{(k-1)})$,参数具体含义如图3所示,则考虑当前帧(第 k 帧)的ROI区域,计算为

$$\begin{aligned} d_x &= \sqrt{(a \cos(\theta))^2 + (b \sin(\theta))^2} \\ d_y &= \sqrt{(a \sin(\theta))^2 + (b \cos(\theta))^2} \\ e_x &= d_x/6, e_y = d_y/6 \end{aligned} \quad (1)$$

2) 针对ROI图像区域灰度化,并基于Canny算子提取ROI图像的边缘点。

3) 行列扫描法筛选出内部边缘点。如图4所示为行列扫描法筛选内部边缘点的原理示意图,其中 P_1 为当前帧ROI区域的中心,依次从左向右以 P_1 所在行的所有像素点作为扫描起始点,从扫描起始点开始,向上下两个方向扫描。如图4所示,当扫描到 Q_2 处并向左扫描时,遇到边缘点 P_2 ,停止并检

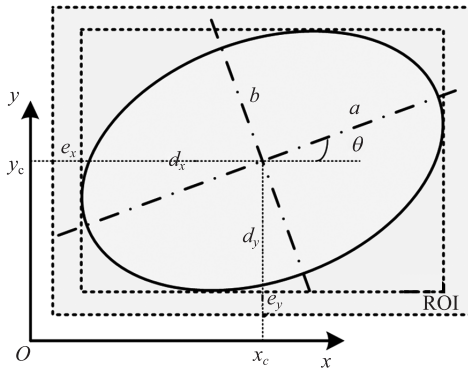


图3 椭圆参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ellipse parameters

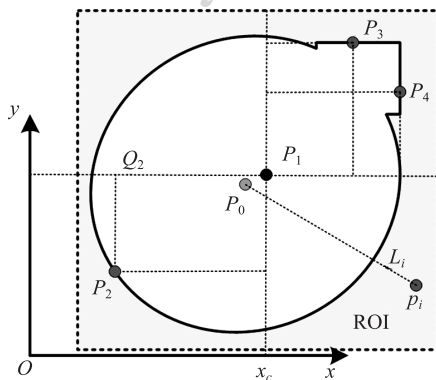


图4 行列扫描法原理示意图

Fig. 4 Principle of row and column scanning method

测 P_2 在水平方向是否也是内部边缘,即以 P_2 为起始点,从左向右直到 P_1 所在列,当期间没有其他像素点时,则判断当前点为内部边缘点。从图4中可以看出,行列扫描法能分辨出 P_3 、 P_4 不属于内部边缘点。

4) 基于内部边缘点的最小二乘椭圆粗拟合。记内部边缘点的图像坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, 所在的椭圆平面方程为

$$x^2 + gxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (2)$$

则可计算出最小二乘拟合椭圆平面方程参数

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix}$$

$$B = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 \end{bmatrix}^T$$

$$P = [g \ c \ d \ e \ f]^T = A^{-1} B \quad (3)$$

进而可根据平面方程参数 (g, c, d, e, f) 计算出椭圆的5个形状参数 $(x_{c0}, y_{c0}, \theta_0, a_0, b_0)$ 。

$$M_0 = \begin{bmatrix} f & d/2 & e/2 \\ d/2 & 1 & g/2 \\ e/2 & g/2 & c \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & g/2 \\ g/2 & c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a_0 = \sqrt{-\det(M_0)/(\lambda_1 \det(M))}$$

$$b_0 = \sqrt{-\det(M_0)/(\lambda_2 \det(M))}$$

$$x_{c0} = (ge - 2cd)/(4c - g^2)$$

$$y_{c0} = (gd - 2e)/(4c - g^2)$$

$$\theta_0 = \arctan((1 - c)/b)/2$$

式中, (λ_1, λ_2) 是 M 的特征值, 并满足条件 $|\lambda_1 - 1| \leq |\lambda_1 - c|$ 。

5) 迭代最小二乘椭圆拟合确定最终定位参数。计算所有边缘点到粗拟合椭圆曲线间的距离, 并选择距离小于预设阈值(一般可选择为1.5)的边缘点, 如果满足条件的像素点个数超出预设阈值(一般可选择椭圆周长的一半), 则认为当前拟合结果满足条件, 并作为最终定位结果输出; 否则利用满足条件的像素点再次进行最小二乘椭圆拟合, 直到拟合结果满足条件, 或者到达迭代次数后仍不满足, 则认为当前帧目标跟踪失败。

如图4所示, 对于边缘点 $P_i(x_i, y_i)$ 到椭圆 $(x_{c0}, y_{c0}, \theta_0, a_0, b_0)$ 间的距离 L_i 计算

$$d_m = \left\| \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)/a_0 & \sin(\theta_0)/a_0 \\ -\sin(\theta_0)/b_0 & \cos(\theta_0)/b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_{c0} \\ y_i - y_{c0} \end{bmatrix} \right\|$$

$$L_m = \left\| \begin{bmatrix} x_i - x_{c0} \\ y_i - y_{c0} \end{bmatrix} \right\|$$

$$L_i = |L_m/d_m - L_m| \quad (5)$$

3 基于多方位最近点区域搜索的锥套检测方法

锥套检测用于第1帧及当锥套跟踪失败时对锥套进行重定位, 由于在第2节中介绍的锥套跟踪方法的主要思想是基于图像边缘点的最小二乘椭圆拟合, 因此只需要找到锥套内部加油口的候选区域, 然

后对该区域进行最小二乘形状识别,即可判断当前区域是否为锥套所在位置。

本文提出一种基于多方位最近点搜索的锥套检测方法,其基本思想是利用图像边缘点,通过对多个方位进行扫描,搜索离当前边缘点最近的边缘点,根据两边缘点的距离和相对位置关系即可初步判断当前区域是否为近似圆形区域,进而将近似圆形区域作为候选的锥套内部黑块区域,采用第2节介绍的锥套识别方法进行判断。

基于多方位最近点搜索的锥套检测方法的具体步骤如下:

1) 对锥套图像进行 Canny 边缘提取,获得全局边缘图像;

2) 按照从上到下、从左到右的顺序扫描全局边缘图像,对于每一个边缘图像点,搜索多个方位的最近边缘点,并进行椭圆区域初步判断。

如图5所示,具体过程为:当扫描到边缘点 Q_1 时,首先向右下(1,1)方向搜索最近点 Q_2 ,求解 Q_1 和 Q_2 中点 Q_3 ;并以 Q_3 为起点,依次向右上(1,-1)方向、左下(-1,1)方向、左(-1,0)方向、右(1,0)方向搜索最近边缘点,记为 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 和 Q_7 ;然后以 Q_1 、 Q_2 、 Q_4 、 $\dots$ 、 Q_7 等6个边缘点进行椭圆拟合,若满足拟合误差条件及椭圆度条件,则认为当前区域为候选的锥套位置。例如图5中以 P_1 为当前扫描点时则不满足椭圆区域的特征条件。

3) 采用第2节中的基于内部边缘点的迭代最小二乘椭圆拟合法对各个候选区域进行识别判断,并确定精确的锥套位置。

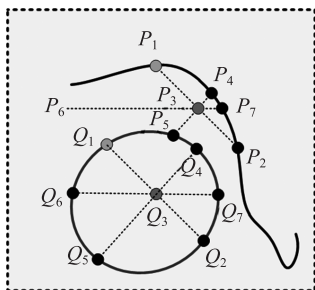


图5 多方位最近点区域搜索法示意图

Fig. 5 Multi-direction closest point searching method

4 实验结果及分析

4.1 实验结果定性分析

实验中采用图1(b)所示的锥套模型,并将锥套

模型放在一个可电动控制的运动装置上;采集设备为 MVC1300SAM-GE60-N00 型 JAI 工业相机,采集视频的帧率为 25 帧/s,视频图像的大小为 768×576 像素。实验过程中控制锥套装置从远处(约 25 m)逐渐靠近工业相机,直到约 2 m 的距离时采集结束。

实验中,选取 Canny 边缘提取算子的高、低阈值依次为 120、48(256 灰度级别),算子内核大小为 3,高斯函数标准差为 0.4;最小二乘椭圆拟合法的迭代次数为 20。在首帧图像的锥套检测过程中,设置内部黑块半径的范围限定为 15~30 像素。

本文方法采用 Canny 算法来进行图像边缘检测,与 Sobel 算法、Prewitt 算法、Robert 算法、Laplace 算法、LOG 算法等其他边缘检测算法相比,Canny 算法具有信噪比大、抗干扰能力强、边缘检测精度高等优点,因此本文方法能够有效抑制图像噪声对最终目标定位结果的影响。

通过对多组采集视频进行分析和处理,可以发现锥套检测方法在远距(15~20 m)时能将锥套加油口作为候选检测区域进行识别,而锥套跟踪方法在大部分情况下都能准确定位加油口。如图6所示是某组采集视频的处理结果,从图6(a)~(d)分别对应帧1、帧150、帧353、帧427的定位结果,可以看出,在远距情况下,图6(a)(b)图中的伞骨信息不明显,锥套加油口的边缘提取效果较理想,用最小二乘拟合具有较高的精度和可靠性;而在近距情况下,图6(c)(d)图中的伞骨信息较为突兀,对于圆形目标的识别来说干扰较大,文中所提的锥套跟踪算法在这种较强的干扰下仍然能够准确定位。

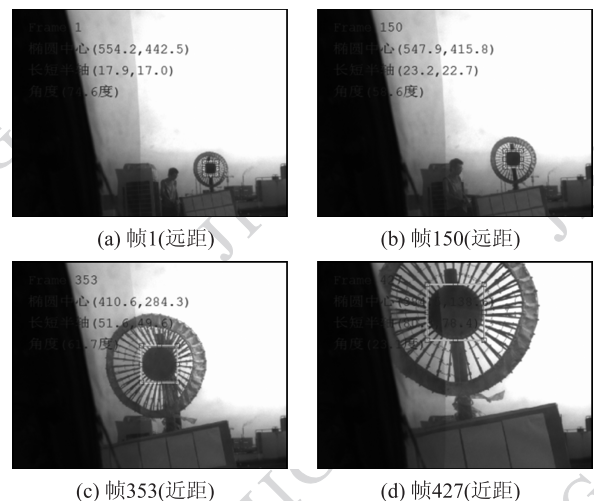


图6 锥套图像检测与跟踪的定位结果

Fig. 6 Positioning results of drogue image detecting and tracking

4.2 锥套图像定位系统的性能指标

考虑到空中加油的具体应用要求,下面将通过实验数据来分析锥套图像检测与跟踪方法的精度、实时性和可靠性等性能指标。另外,在实验中同时采用基于 Hough 变换的圆形目标检测方法对锥套内部加油口进行识别和定位,从而与本文方法进行对比。

在精度和可靠性方面,可通过人眼观测来确定某一帧是否定位准确,从 4.1 节可以看出当锥套区域定位正确时,定位结果具有亚像素精度,这是由最小二乘拟合方法的原理所决定的。当然,对于视频中的每一帧图像采用人眼观测来提供精度信息是不合适的,可采用一个参考长度与基于图像定位结果的解算长度进行对比,从而反映锥套图像定位的精度。

在实验中采用了武汉承拓 GHLM20B 激光测距仪进行测距,测距的起点为摄像机位置,终点为锥套内部加油口区域,并将测距结果作为参考距离;然后利用锥套定位结果、摄像机标定参数及实际锥套尺寸来求解锥套与摄像机之间的距离,并与激光测距仪提供的参考距离进行对比,以距离百分比误差来反映锥套的图像定位精度。

图 7 所示为某次实验的参考距离与解算距离的对比曲线,可以看出:1)当摄像机与锥套相距在 20 m 以上时,两者的误差较大,这是由于远景情况下锥套内部圆形加油口在整幅图像中的面积较小,一个像素的解算误差就会引起较大的距离误差,另一方面,远景时激光测距仪的输出周期较长,跟不上图像的采集速度,导致某段时间内激光测距仪的输出始终为一常值;2)当摄像机与锥套

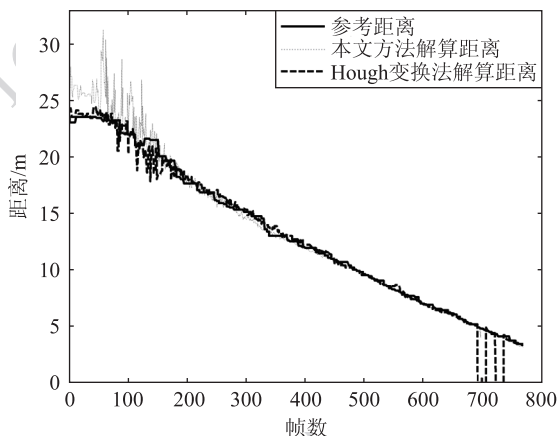


图7 解算距离与参考距离的对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of solved and reference distances

相距在 3~20 m 范围时,基于图像定位结果的解算距离基本没有突变的情况,从而说明了锥套检测与跟踪识别方法获得了准确的图像定位结果,基本没有目标丢失的情况;3)在 700 帧左右,本文方法解算距离曲线存在一个较小的突变,说明此时锥套的图像定位结果比真实的锥套图像区域要大,存在一个较大误差,但很快又回到了准确定位的情况;4)在 700 帧左右和 730 帧左右, Hough 变换法解算距离为 0,说明在该时间段 Hough 变换法没有找到锥套加油口目标。

采用多组锥套采集视频进行实验,并对 3~20 m 范围内的解算距离相对误差进行统计,共计 1 719 帧的相对距离误差,本文方法和 Hough 变换法解算的相对距离误差统计直方图分别如图 8 和图 9 所示,其中本文方法解算的相对距离误差在 10% 以外有 6 帧,6% 以外的有 91 帧,即说明在 99.65% 的情况下,相对距离误差要小于 10%;在 94.71% 的情况下,相对距离误差要小于 6%,锥套距离解算具有较高的精度。

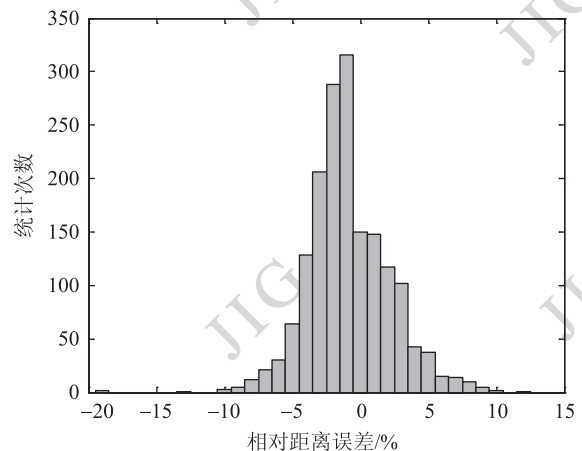


图8 本文方法解算距离相对误差统计直方图

Fig. 8 Histogram of relative distance errors for the suggested method in the paper

而对于 Hough 变换法,有 52 帧没有找到圆形目标,可靠性要远低于本文方法。在不考虑 Hough 变换法检测失败的情况,其相对距离误差在 10% 以外有 13 帧,6% 以外的有 98 帧,可以看出 Hough 变换法在检测成功的情况能够较准确地定位锥套加油口目标,定位精度与本文方法相当。

下面进一步分析图像定位误差与解算相对距离误差的关系,根据小孔成像原理,可得

$$\frac{y}{r} = \frac{f}{p} \quad (6)$$

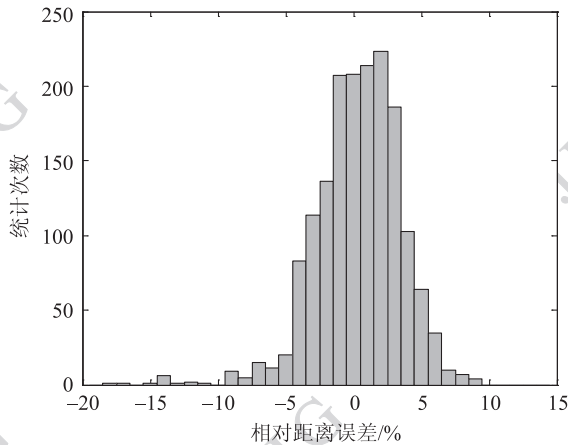


图9 Hough变换法解算距离相对误差统计直方图

Fig. 9 Histogram of relative distance errors for the Hough transformation method

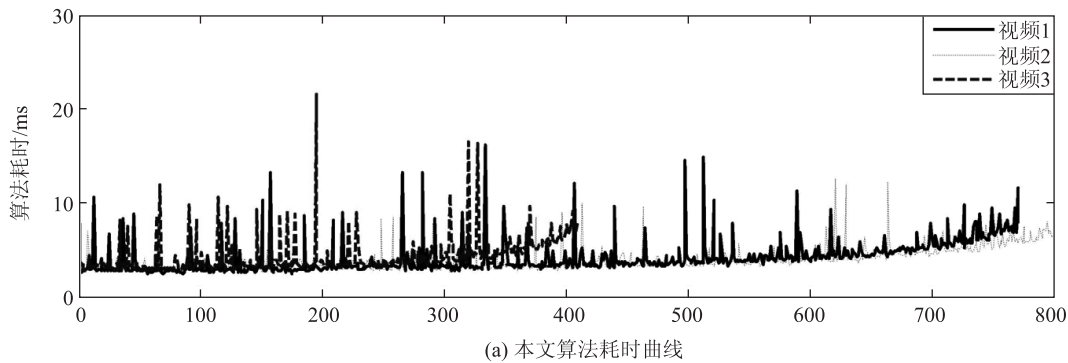
式中, y 为摄像机与圆形目标间的距离, r 为圆形目标的半径, f 为与摄像机焦距等长的图像像素点个数, p 为图像中圆形目标半径所对应的像素点个数。对式(6)微分不难得到

$$\frac{dy}{y} = -\frac{dp}{p} \quad (7)$$

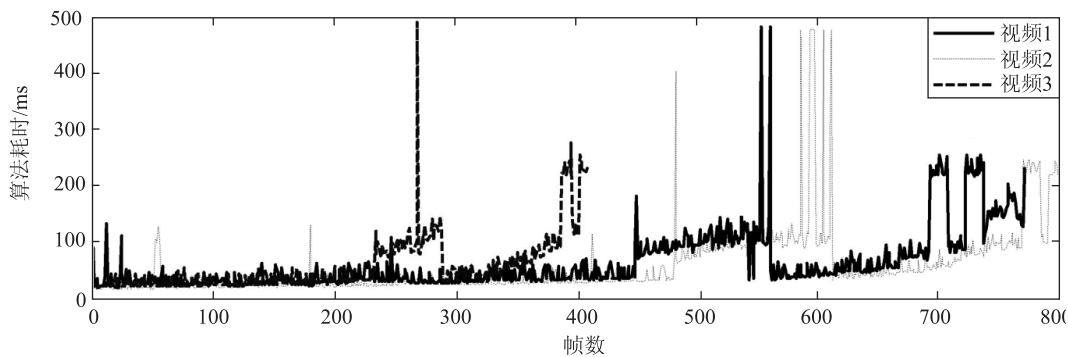
式中,左侧即为解算相对距离误差,右侧为图像定位相对误差。式(7)说明了图像定位相对误差直接决

定了解算相对距离误差。因此,可通过图像重采样方式降低图像单位像素对应的物理长度,或采用图像亚像素边缘提取方法提高椭圆拟合点的位置精度,从而减小 dp ,提高视觉解算相对距离误差。

在实时性方面,锥套图像定位的测试结果如图10所示,共记录了3组视频的锥套定位消耗时间。软件开发环境为VS 2010和OpenCV 2.3,测试硬件平台配置为Intel(R) Core(TM) i7-3520M CPU 2.9 GHz和4.00 GB RAM。从图10中可以看出,本文方法的第1帧处理耗时较长,由于首次处理采用锥套检测方式,3组视频的第1帧图像定位耗时分别为117 ms、53 ms和359 ms,均小于500 ms,满足对于首次处理的实时性要求;而从第2帧开始采用锥套跟踪方式,随着锥套与摄像机距离逐渐变小,耗时呈现增大的趋势,大部分的耗时集中在3~8 ms,最大的一次耗时为21.59 ms,对所有测试耗时统计后得到统计帧数为1991帧、耗时均值为4.18 ms、均方差为1.64 ms,满足了视频采集帧率为25帧/s时的视频图像处理要求。而对于Hough变换法,最小耗时为15.52 ms,最大耗时甚至达到491 ms,平均耗时为59.95 ms,难以满足图像处理的实时性要求。



(a) 本文算法耗时曲线



(b) Hough变换法耗时曲线

图10 锥套图像定位耗时曲线

Fig. 10 Time-consuming curve of drogue image positioning

5 结 论

自主空中加油技术是未来航空领域的研究热点,随着我国无人机技术逐渐发展,自主空中加油技术的重要性将日益突出。而锥套图像检测、跟踪与定位是基于视觉的自主空中加油技术中非常关键的第1步。本文针对自主空中加油过程中锥套图像目标识别与定位问题,以锥套内部加油口作为匹配特征,提出一种基于圆形特征的锥套检测与跟踪策略。其中锥套跟踪采用行列扫描法获取锥套内部边缘,并通过迭代最小二乘拟合确定精确的椭圆形状参数,而锥套检测采用多方位最近点区域搜索法提取锥套所在的所有可能图像区域,并采用锥套跟踪进行精匹配和最终决策。实验结果表明,本文锥套图像检测与跟踪方法能满足自主空中加油对图像处理的准确性、可靠性和实时性等的要求。

参考文献 (References)

- [1] Dong X M, Xu Y J, Chen B. Progress and challenges in automatic aerial refueling [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 9(6): 1-5. [董新民, 徐跃鉴, 陈博. 自动空中加油技术研究进展与关键问题[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 9(6): 1-5.]
- [2] Mu C D, Li B R. Vision-based autonomous aerial refueling [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(5): 670-677. [慕春棣, 李波睿. 基于视觉的自动空中加油技术[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(5): 670-677.]
- [3] Hansen J L, Murray J E, Campos N V. The NASA dryden AAR project: a flight test approach to an aerial refueling system [EB/OL]. 2014-02-23 [2014-02-23]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040085352_2004088803.pdf.
- [4] Mati R, Pollini L, Lunghi A, et al. Vision-based autonomous probe and drogue aerial refueling [C]//Proceedings of the 14th Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press, 2006: 1-6.
- [5] Martinez C, Richardson T, Thomas P, et al. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, (61): 876-895.
- [6] Wang X F, Dong X M, Kong X W. Machine vision aided simulation of probe and drogue unmanned aerial vehicle autonomous aerial refueling [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5245-5250. [王旭峰, 董新民, 孔星炜. 机器视觉辅助的插头锥套式无人机自主空中加油仿真[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5245-5250.]
- [7] Xie H W, Wang H L. Binocular vision-based short-range navigation method for autonomous aerial refueling [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 206-209. [解洪文, 王宏伦. 基于双目视觉的自动空中加油近距导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 206-209.]
- [8] Song C H, Gao S B, Cheng Y M. Drogue detection algorithm in visual navigation system for autonomous aerial refueling [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 1089-1094. [宋春华, 高仕博, 程咏梅. 自主空中加油视觉导航系统中的锥套检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1089-1094.]