

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108038

面向自主空中加油的锥套识别与测量算法研究*

唐崇武 汪刚志 张飞飞

(中国航空无线电电子研究所 上海 200233)

摘要: 为了在软式自主空中加油对接过程中实现对加油机锥套目标的识别及其位置的精确测量,提出了一种基于机器视觉的锥套检测与位置测量算法。首先,基于 Adaboost 机器学习算法,对海量的锥套正样本和背景负样本进行线下训练,得到可靠的锥套特征和 Cascade 分类器模型;然后,利用训练好的锥套特征分类器模型,对受油监视相机获取的视频进行实时锥套目标检测;最后,利用锥套目标在图像上的位置,建立二维图像与三维空间的关系模型,解算锥套相对于受油杆的三维位置信息。仿真实验结果表明,该方法对锥套目标的检测率在 95% 以上,综合处理时延低于 4 ms/帧,与受油杆的相对位置测量偏差低于 7%,可满足自主空中加油的需求。

关键词: 自主空中加油;锥套检测测量;机器视觉;机器学习

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Drogue detection and position measurement algorithm research for autonomous aerial refueling

Tang Chongwu Wang Gangzhi Zhang Feifei

(AVIC Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: A machine vision based drogue detection and location algorithm was proposed for getting exactly drogue detection and location results in docking process of probe and drogue autonomous aerial refueling (AAR). Firstly, reliable drogue feature and classifier models were generated through Adaboost training based on numerous positive and negative samples. Then, using the drogue model, the drogue can be detected on the drogue image sequences according to machine learning based detection and tracking technology. Finally, used the image domain position of drogue, the three-dimensional (3-D) position of drogue relative to refueling probe can be calculated through a mapping model from 2-D image to 3-D space. Simulation results showed that the drogue detection rate was over 95%, time clapse was less than 4 ms/frame, and the position measurement deviation was less than 7%, which can meet the requirements of AAR.

Keywords: autonomous aerial refueling; drogue detection and position measurement; machine vision; machine learning

0 引言

空中加油(aerial refueling, AR)是航空领域的重要技术之一。目前常用的空中加油方式主要包括硬管式加油^[1]和软管式加油^[2]。硬管式空中加油通过加油机控制位于加油机机尾的伸缩管伸入受油机的受油口来完成对接和加油任务。软管式加油由加油机在尾部释放一根长且柔软的软管,在软管的末端有一个筐形的锥套(drogue),受油机通过受油插头/油杆(refueling probe)与锥套相连进行受油作业。

目前,我国军机软式空中加油系统仍存在一些问题,如

缺乏有效的辅助对接手段、对机组人员和飞行员的素质要求较高、不具备全天候作业能力、不支持无人机加油等。而自主空中加油(autonomous aerial refueling, AAR)技术可以有效解决这些问题。为实现对接阶段的自主空中加油,需要有测量设备对末端近距对接阶段锥套与受油杆的相对距离进行精确测量^[3]。由于视觉传感器具备隐蔽性强、价格低廉的优点,近年来基于视觉的软式自主空中加油技术受到各国研究者的关注^[4]。

意大利 Perugia 大学的 Pollini 等^[5]研究了一类主动视觉传感器系统,在加油锥套上安装一系列发光二极管,通过监视相机获得锥套图像,并根据图像上发光二极管的相对

收稿日期:2021-10-09

* 基金项目:航空科学基金(AFSC-201955015001)项目资助

位置关系得到相对导航信号。美国 Texas A&M 大学研制的 VisNav 视觉定位系统^[6]、国内西北工业大学程咏梅教授团队提出的加油锥套方案^[7]也采用了在锥套中安装信号灯或近红外灯的相对位置解算方法。北京航空航天大学解洪文等^[8]在锥套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。此外,在锥套上加装红色标识环带以便于锥套检测的方法也被提出^[9]。上述基于主动视觉传感器的相对位置解算方法的主要问题是需要在锥套上加装特定的光学器件或标记,会对任务设备产生一定影响。为此,英国 Bristol 大学的 Martinez 等^[10]提出了用于增大算法可容许运动范围的组成图像校正反算法来实现锥套目标的跟踪测量。西北工业大学的宋春华等^[11]提出了一种多尺度低秩和稀疏分解锥套检测算法。北京航空航天大学的段海滨等^[12]在实验室环境下设计了一种在虚拟视景中基于鹰眼视觉注意机制模型提取颜色标志点并解算锥套相对位置的方法。但以上 3 种方法在夜间、锥套遮挡、光照干扰等复杂情况下的锥套检测和位置解算效果并不理想。在锥套位姿测量方面,中国科学院大学的叶云^[13]提出了一种结合锥套关键点邻域特征及关键点之间几何约束的检测方法,并结合轮廓定位、位姿测量等步骤获得锥套在相机坐标系下的位姿。但该方法处理延时较大,无法满足加受油任务的实时性需求。

针对以上问题,提出了一种基于机器视觉的锥套检测与位置测量算法。首先,在线下采集大量不同背景环境下及存在遮挡的锥套目标样本和背景干扰样本,通过机器学习的方法对样本集进行训练,生成锥套特征模型和分类器。然后对于受油监视相机获取的视频序列图像进行实时分析处理,利用分类器对视频帧图像中的锥套目标和背景进行分类,提取锥套目标,并利用置信度模型对目标进行判别,确定锥套目标的精确图像坐标。随后根据锥套的运动速度和尺度,确定跟踪区域,利用分类器在局部进行检测,完成锥套目标的跟踪。最终,通过相机的小孔成像模型,建立二维图像与三维空间的映射关系模型^[14],利用锥套目标图像坐标解算锥套相对于受油杆的三维位置信息。在媒体公开的加受油对接视频以及机载受油监视相机拍摄的真实加油锥套视频上进行了实验验证,结果表明,提出的算法可以有效检测空中背景下的锥套目标并解算其相对于受油杆的位置参数,具有良好的测量精度和实时性,满足自主空中加油的任务需求。

1 算法原理概述

1.1 问题描述

软管式自主空中加油对接过程如图 1 所示,其中 $O_c X_c Y_c Z_c$ 、 $O_d X_d Y_d Z_d$ 、 $O_p X_p Y_p Z_p$ 、 OXY 分别为相机坐标系、锥套坐标系、受油杆坐标系、图像坐标系。基于视觉的自主空中加油通过对安装在受油杆根部附近的监视相机拍摄的加油机尾部视频序列图像进行实时分析处理,识别受

油锥套并解算其相对于受油杆的位置关系,反馈给受油机飞行员调整飞行姿态完成受油杆头与锥套的精准对接。

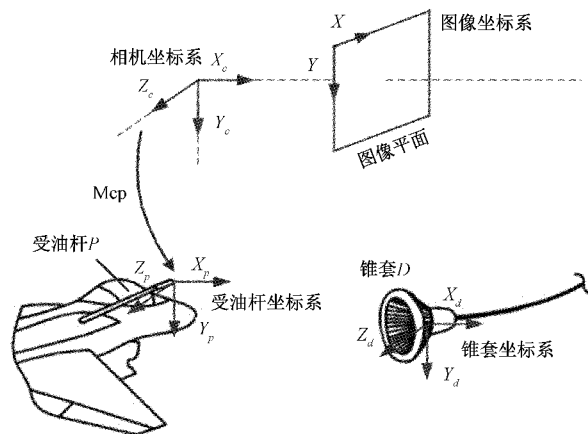


图 1 基于视觉的软管式自主空中加油对接示意图

1.2 算法框架

基于机器视觉的受油锥套识别与相对位置解算算法框架如图 2 所示。

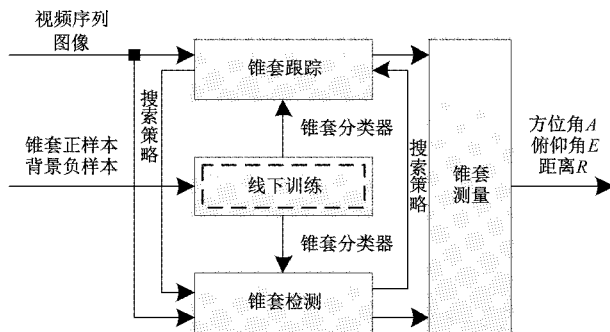


图 2 基于机器视觉的锥套识别与相对位置解算算法框架

图 2 算法框架共分为 4 个处理模块。

- 1) 线下训练模块:通过对锥套目标正负样本图像的训练,生成锥套特征和分类器模型。
- 2) 锥套检测模块:完成对视频序列图像上锥套目标的检测。基本流程为:将图像分为不同尺度下的搜索窗口,对每个窗口利用锥套分类器进行分类,将分类结果中得分最高且满足阈值条件的窗口作为锥套目标窗口。模块输入为视频帧图像,输出为锥套目标窗口的图像坐标及大小(宽、高)。
- 3) 锥套跟踪模块:完成对视频序列图像上锥套目标的跟踪。基本流程为:根据锥套检测结果以及锥套目标的运动特性,预估锥套跟踪区域;根据前一帧图像的锥套目标预估当前帧的锥套大小,进而在跟踪区域内执行锥套检测,得分最高且满足阈值条件的作为锥套目标输出。模块输入为前一帧图像的锥套检测结果以及当前帧图像,输出为当前帧图像的锥套目标检测结果。
- 4) 锥套测量模块:完成锥套目标在相机坐标系中的位姿数据(距离、俯仰、侧偏)解算。模块输入为锥套目标的图像坐标数据,输出为锥套目标在相机坐标系中的位姿。

1.3 算法原理

1) 线下训练

采集锥套目标图像和空中背景图像作为正负样本训练集,提取正负样本的 Circle-Haar 特征,进而采用 Adaboost 算法对特征进行基于 Cascade 的级联分类学习,得到锥套特征级联分类器模型。

2) 线上检测跟踪

(1)对受油监视相机采集的视频序列图像进行实时处理,在不同尺度空间建立扫描窗口,利用 Circle-Haar 算子对每个区域进行特征提取。

(2)利用训练好的锥套特征级联分类器模型对所提取的区域特征进行分类,提取符合条件的区域作为锥套目标候选窗口。

(3)利用后验概率模型对提取的锥套目标候选窗口进行评估,通过评估则输出为正确检测的锥套目标,失败的返回第二步重新进行检测。

(4)一旦正确检测,便进入跟踪模式,即利用前一帧图像的检测结果预估当前帧的检测窗口大小和日标尺度大小,对当前帧图像进行局部检测以完成锥套目标跟踪。

(5)利用后验概率模型对跟踪的目标进行评估,通过评估则输出为正确的锥套目标,错误的返回第2步重新进行检测。

3) 位置解算

利用针孔相机的视觉成像原理对检测与跟踪得到的锥套目标图像坐标位置(二维)与空间中的锥套位置(三维)之间的关系进行解算,得到锥套在相机坐标系中的位姿信息。

2 基于 Circle-Haar 的线下训练

2.1 Circle-Haar 特征提取模型

为了提高锥套目标检测识别算法在旋转、尺度缩放、光照、噪声、遮挡等环境下的鲁棒性,设计的线下训练器将样本数据集按照相应的变换准则,通过旋转、缩放、改变光照、添加噪声、不同比例遮挡等途径进行数据增广,训练得到锥套特征分类模型,以适应实际加受油任务中的复杂环境。

显然,受油锥套主要具有两类特征:1)显著的圆形形状特征;2)呈现“外白内黑”的灰度分布。因此考虑设计一种圆形的类 Haar 特征来作为锥套的分类特征,采用如图3所示的 Haar 矩形区域比较采样得到分类判别组合式。

针对图像样本 I 的分类判别组合式 $f(I)$ 计算公式如下:

$$f(I) = \sum_{i=1}^n w_i [s_{i1} \text{sum}_{i1}(I) - s_{i2} \text{sum}_{i2}(I)] \quad (1)$$

式中: n 表示 I 中的候选特征区域个数, s_{i1} 为特征区域 i 的面积(即像素个数), $\text{sum}_{i1}(I)$ 为特征区域 i 的像素灰度的总和, w_i 是每一个 Circle-Haar 特征通过 boost 训练自动得到的权重值。特征区域矩形块具有不同的位置、大小和长宽比,可以用于提取各种不同的独立特征。每个样本区域

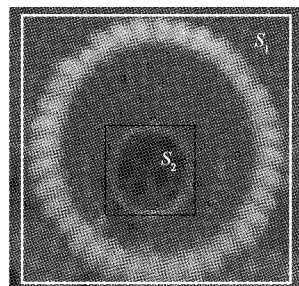


图3 Circle-Haar 特征示意图

可以产生大量的 Circle-Haar 特征。

2.2 Adaboost 训练

为得到适配海量样本的目标检测器,需要考虑针对海量样本的训练方法,Adaboost 算法就是一种面向海量样本的特征权值训练方法。该算法针对样本集中每个个体独立设置动态权重,权重即随机选取样本时被选中的概率。从样本集中按权重随机选取测试样本对分类器进行验证,并根据结果做出调整。验证过程中对识别错误的样本加大权重,以便后期重点关注;识别正确的样本被降低权重,以加快学习效率。通过多次反复测试,直到识别的正确率逐步上升至一个稳定的可接受的范围,则停止训练。具体算法可参考 Schapire 等^[15]提出的 boosting 方法。

3 基于 Cascade 的线上检测跟踪

3.1 Cascade 分类

为了满足快速目标检测的需求,把分类器设计成树状级联结构,得到一个 Cascade 分类器,如图4所示。

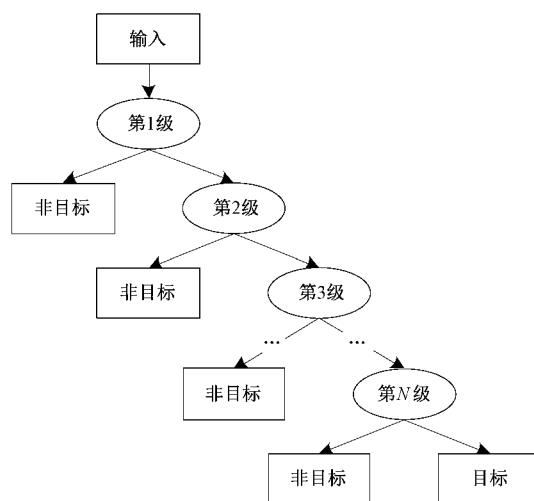


图4 Cascade 级联分类器

Cascade 分类器的设计宗旨是:越接近输入层,否定率越高、计算量越小,最大限度地提高分类器运算速度。因为确定一个区域不是锥套区域是相对容易的,每一级判定都能很快地完成“证伪”,且单层判别的正确率都达到了 99.8% 以上,大部分候选目标都能在前几层判别中被判定

为伪目标,无需完成全部判定,减少了计算量。只有极少部分真正目标需要通过深层的判定。通过这样的方式,可以避免大部分的无效计算。

3.2 结合跟踪搜索策略的检测模型

为进一步提升检测速度,在进行当前帧处理时,可以采取跟踪策略,即根据前一帧检测得到的矩形目标区域 $rect$ 进行启发式搜索,也即仅搜索当前帧对应于 $rect$ 及其一定范围的邻域,这样搜索量大大减少,可以极大提高搜索效率。

设前一帧矩形目标区域 $rect$ 的宽高分别为 w 和 h ,则当前帧的跟踪搜索区域范围可设置为与 $rect$ 中心位置相同,宽高分别为 αw 和 αh 的矩形区域。搜索的尺度范围设为 $[(1-\beta)w \times (1-\beta)h] \sim [(1+\beta)w \times (1+\beta)h]$,这样可以极大降低搜索的计算量。跟踪搜索示意图如图 5 所示。

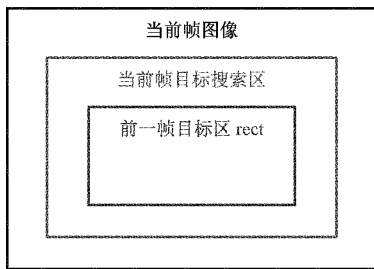


图 5 跟踪搜索示意图

跟踪能够显著提高算法的运行效率,但如果前一帧出现错检,则在后续检测时会一直在错误的目标区域附近搜索,导致跟踪错误。为此引入目标可信度估计,在跟踪过程中记录搜索框的目标可信度,如果可信度低于阈值(阈值通常由实验确定),或者无法成功搜索出目标,则立即重启全图检测环节。采取的跟踪可信度估计策略如下:

1) 对视频序列的连续 n 帧执行全图检测,得到各自的锥套目标区域检测结果,记为 $\mathbf{P}_1 = (x_1, y_1, w_1, h_1)'$, $\mathbf{P}_2 = (x_2, y_2, w_2, h_2)'$, ..., $\mathbf{P}_n = (x_n, y_n, w_n, h_n)'$ 。其中 (x, y, w, h) 分别表示目标区域左上角相对于图像左上角的坐标以及目标区域宽高。实验中取 $n = 5$ 。

2) 对连续 n 帧检测结果进行判断,若两两之间的向量欧氏距离均小于一定阈值,则记该连续 n 帧检测结果稳定。若不满足条件,则从第 $n+1$ 帧开始重新执行连续 n 帧全图检测,直到获取满足要求的连续 n 帧稳定检测结果集合,记为 $\Theta = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 。欧氏距离计算公式如下:

$$D_E(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (w_1 - w_2)^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (2)$$

3) 在上一步基础上,对第 $n+1$ 帧执行跟踪策略,记其搜索区域为 $\mathbf{P}_{n+1} = (x_{n+1}, y_{n+1}, w_{n+1}, h_{n+1})'$, 计算其与 Q_n 的欧氏距离 $D_E(\mathbf{P}_{n+1}, Q_n)$, 若小于一定阈值,则认为跟踪策略执行成功,同时,记 $\mathbf{P}_{n+1} = Q_{n+1}$ 并更新 $\Theta = \{Q_2,$

$Q_3, \dots, Q_n, Q_{n+1}\}$ 。若不满足阈值要求,则重新执行第二步。

结合跟踪搜索策略的检测流程如图 6 所示。通过检测-跟踪双状态机切换,可以实现快速准确的锥套目标检测和跟踪。

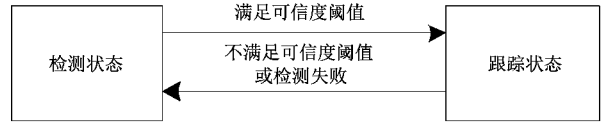


图 6 结合跟踪搜索策略的检测流程

4 基于小孔成像模型的锥套位置测量

在小孔成像模型下,以受油监视相机 C 为原点 $T = 0$, 光轴 Z 方向为单位阵 $R = I$, 则可建立如下成像方程:

$$z \cdot [u \ v \ 1]' = R(X - T) \quad (3)$$

将 $R = I, T = 0$ 代入式(3)得到空间点 P 在相机坐标系的坐标 $[X_p, Y_p, Z_p]'$ 为:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = z \begin{bmatrix} \frac{u - c_x}{f_x} \\ \frac{v - c_y}{f_y} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: z 代表相机光心到物平面的距离; f_x, f_y 分别表示相机光学系统在 x, y 方向上的焦距; v, u 分别表示空间点 P 在像平面上的成像点 P' 在图像坐标系 $X'C'Y'$ 下的横纵坐标; c_x, c_y 分别表示图像坐标系下的相机原点平移量。小孔成像模型如图 7 所示。

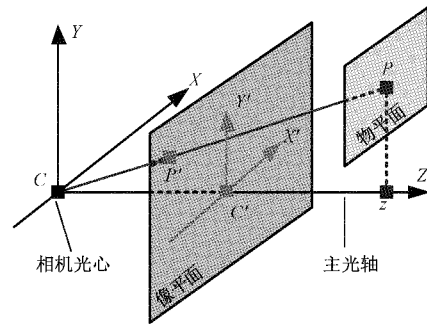


图 7 小孔成像模型

假设物体保持垂直于视线方向的分布^[9], 具有如图 8 所示的相似模型。

则可以推出:

$$Z = \frac{D}{u} \times f \quad (5)$$

式中: D, f, u 分别代表锥套的直径、相机焦距和锥套图像在图像坐标系下的直径(像素数)。通过式(4)和(5)可以解算出锥套在相机坐标系下的位置。该位置可以通过相机与受油杆的旋转和平移矩阵换算成锥套中心与受油杆杆头的位置关系。

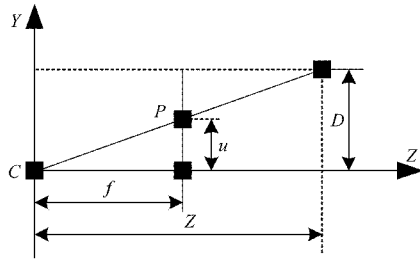


图8 相似模型

5 仿真结果分析

在媒体公开的两段加受油对接视频和两段机载受油监视相机拍摄的真实锥套视频数据上进行了算法仿真测试,分别对锥套目标检测率、处理延时、相对位置测量精度进行了计算和统计分析,以此验证算法的处理性能(其中媒体公开的视频仅用来测试锥套目标检测率和处理延时)。

在线下训练阶段,首先构建图像数据集,并采用人工标注的方式提取数据集中的锥套目标样本,选取其中的2%作为训练正样本,而训练负样本通过在所有的图像中随机选择非锥套目标区域来获得。在线上检测跟踪阶段,跟踪搜索策略使用参数为 $\alpha=1.4, \beta=0.2$ 。

测试数据方面,媒体公开的加受油视频#1和#2帧数分别为2 417帧和2 397帧,分别为复杂光照场景和阴天及云雾场景,如图9所示。

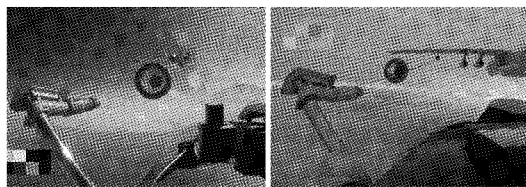


图9 测试使用的公开加受油视频

真实锥套视频#3和#4帧数分别为2 492帧和1 764帧,采集视频使用的受油监视相机和加油锥套的相关参数如表1所示。

表1 受油监视相机和锥套相关参数

设备	相关参数
监视相机	工作波段:可见光
	视场角: $40^{\circ} \times 30^{\circ}$
	相机帧率:30 Hz
锥套	视频帧分辨率: 720×576
	实物尺寸(直径):0.75 m

算法软件开发及运行的软硬件环境如表2所示。

5.1 锥套检测结果

公开测试视频数据上的单帧锥套检测结果如图10所示。可以看到算法在不同环境下都能够较好的对锥套目标进行提取。

表2 软件运行环境

环境	相关配置
软件环境	VS 2015, OpenCV 2.4.13.7
硬件环境	CPU: Intel Core i7-7700@2.8 GHz 内存:16 GB

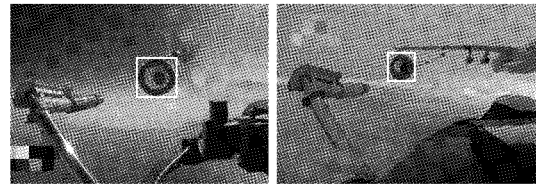


图10 公开测试视频数据锥套检测结果示例

所有测试视频数据的检测结果指标统计如表3所示。

表3 锥套检测结果

视频	总帧数	正确检测帧数	虚警帧数	漏检帧数	检测跟踪成功率/%	虚警率/%	漏检率/%
#1	2 417	2 359	38	20	97.6	1.6	0.8
#2	2 397	2 344	28	25	97.8	1.2	1.0
#3	2 492	2 370	57	42	95.1	2.3	1.7
#4	1 764	1 700	37	23	96.4	2.1	1.3

从表3中可以看出,提出的算法在锥套检测跟踪上有较高的成功率。虚警主要由于检测到加油机尾喷管等其他圆形物体导致,漏检主要由于云雾遮挡、锥套形变等原因导致。后期可以通过增加相应的训练集正样本和背景负本来优化这一问题。

5.2 耗时

以测试视频#3为例,其每帧图像处理时间统计如图11所示。

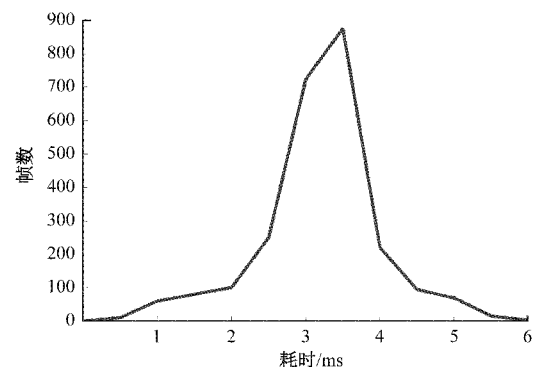


图11 测试视频#3的每帧图像处理时间统计

从图11中可以看出,每帧图像的处理时间基本在6 ms内。经分析,检测算法耗时为0~4 ms,跟踪算法耗时为0~2 ms,综合平均耗时为3.19 ms/帧。再考虑数据引

接时延,因此,最高处理帧率能达到 $1\ 000/(3.19+\text{数据引接时延})$ 帧/s,可以达到实时处理的效果。

5.3 锥套位置测量精度

以视频序列 3 为例,根据每帧图像的锥套检测结果解算出来的锥套相对于受油杆头的位置误差如图 12 所示。其中真实位置数据由飞行任务记录数据给出。

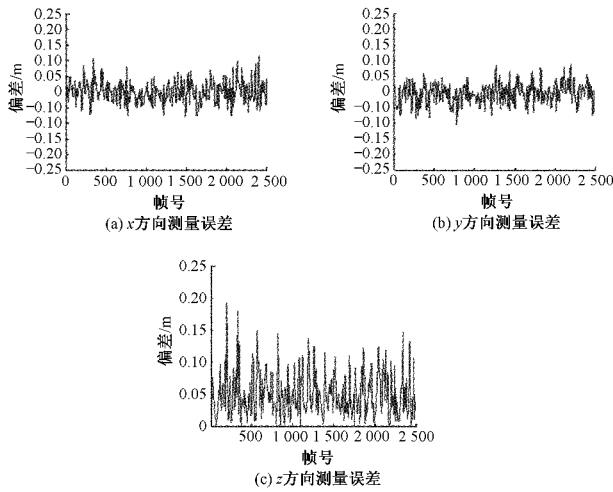


图 12 锥套位置测量误差

从图 12 中可以看出,在末段对接阶段, x 、 y 方向上的测量误差较低, z 方向上的测量误差由于受到成像误差影响,相对较高。一般的,末段对接阶段锥套与受油杆头的距离在 3 m 以内,图中所示的 3 个方向上的测量误差不超过实际距离的 7%,满足受油对接任务使用需求。

实验结果表明,与现有的基于视觉的锥套识别和相对位置测量技术相比,提出的方法可以在不对任务设备进行任何改装的前提下,利用监视相机采集的视频数据,实现实时锥套目标检测识别,并根据识别结果解算锥套相对于受油杆的位姿,且精度较高。同时,算法的计算复杂度较低,大量工作可以在线下训练阶段完成,适合机载嵌入式平台移植。

6 结 论

面向软式自主空中加油任务提出了一种基于机器视觉的锥套检测与位置测量方法。首先通过 Adaboost 算法训练锥套正负样本的 Circle-Haar 特征,生成锥套目标的 Cascade 分类器;然后通过建立目标可信度估计方法,采用跟踪检测机制提高检测的准确度、可靠性和速度,从而对受油监视相机采集的视频进行锥套目标实时检测;最终通过建立锥套目标图像与三维空间的关系模型,解算锥套目标与相机的相对位置关系。实验结果表明,该方法能在锥套对接阶段获取高精度实时位置测量数据,辅助受油对接任务。未来,应针对光照、云雾等复杂的任务环境,在锥套特征设计、遮挡条件下的圆轮廓提取、圆形/椭圆形锥套轮廓建模等方面进行算法优化,并开展算法的机载嵌入式平台移植工作。

参考文献

- [1] 王力,孔媛媛,方冰,等. 空中加油问题模型建立及其解法[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(7): 101-112.
- [2] 王伟,刘喜藏,王鹏,等. 空中加油软管一锥套动态建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2012, 20(17): 135-137.
- [3] 汪刚志,王新华,陈冠宇,等. 基于视觉的无人机空中加油目标识别技术研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 89-94.
- [4] 杨博文. 锥套图像检测识别与飞行演示验证研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [5] POLLINI L, MATI R, INNOCENTI M, et al. A synthetic environment for simulation of vision-based formation flight[R]. AIAA-2003-5376.
- [6] GUNNAM K K, HUGHES D C, JUNKINS J L, et al. A vision-based DSP embedded navigation sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(5): 428-442.
- [7] 宋春华,赵建涛,刘虎成,等. 基于近红外的自主空中加油相对位置解算[J]. 电力电子技术, 2013, 47(1): 41-43.
- [8] 解洪文,王宏伦. 基于双目视觉的自动空中加油近距离导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 206-209.
- [9] 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.
- [10] MARTINEZ C, RICHARDSON T, CAMPOY P. Towards autonomous air-to-air refuelling for UAVs using visual information[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013: 5756-5762.
- [11] 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.
- [12] 段海滨,张奇夫,邓亦敏,等. 基于方鹰眼视觉的无人机自主空中加油[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1450-1458.
- [13] 叶云. 基于单目视觉的空中加油目标位姿测量方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [14] 尹英杰,徐德,张正涛,等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 347-352.
- [15] SCHAPIRE R E, FREUND Y, BARTLETT P, et al. S boosting the margin: A new explanation for the effectiveness of voting methods[C]. The Annals of Statistics, 1998, 26(5): 1651-1686.

作者简介

唐崇武,工学博士,工程师,主要研究方向为航空图像处理与目标识别、视觉测量等。

E-mail: t2801@163.com

汪刚志,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为自主空中加油对接引导、视觉测量与控制等。

E-mail: wanggangzhi2013@163.com

张飞飞,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为自主空中加油对接引导、视觉测量与控制等。

E-mail: 772338187@qq.com