

无人软管式加油近红外信标检测与匹配方法

赵建涛, 程咏梅, 刘虎成, 崔蓝月

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

摘要: 为了解决无人软管式加油信标点检测与匹配难的问题,设计了一种近红外信标检测系统,并提出一种鲁棒信标点匹配算法。该系统设计将8个850 nm波段近红外LED灯均匀布置在加油锥套外环,将850 nm带通滤镜和罗技C310摄像头结合,构成近红外信标检测系统;针对干扰点带来的误匹配问题,设计一种基于几何特征约束的信标点匹配算法,该算法可完成远干扰点排除、特征点排序、近干扰点排除和特征点标记。通过各种复杂环境的实验进行算法性能验证,结果表明:信标检测系统检测精度高、可靠性好;信标点匹配算法可以在复杂环境下鲁棒地实现信标点准确匹配。相对位置解算实验结果表明其解算精度较高。

关键词: 无人机; 软管式加油; 近红外信标; 检测; 信标点匹配; 几何特征; 相对位置解算

中图分类号: V249.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0021-06

Near-Infrared Beacon Detection and Matching Methods for UAV Probe and Drogue Refueling

ZHAO Jian-tao, CHENG Yong-mei, LIU Hu-cheng, CUI Lan-yue

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the beacon point detection and matching problem in unmanned aerial vehicle (UAV) probe and drogue refueling, a near-infrared beacon detection system was designed, and a robust beacon point matching algorithm was proposed. The near-infrared beacon detection system was constituted with eight 850 nm wavelength near-infrared Light-Emitting Diode (LED) lights arranged uniformly in outer ring of the refueling drogue, and 850 nm band-pass filter integrated with Logitech C310 camera. To solve the mismatch problem caused by interference points, a beacon point matching algorithm based on geometric feature constraint was presented, which can accomplish the far interference point exclusion, feature point sorting, near interference point exclusion and feature point marking. The algorithm performance was validated through experiments in various complex environments. The results show that the beacon detection system has the advantages of high detection accuracy and reliability, and the beacon point matching algorithm can realize exact matching of beacon points robustly in various complex environments. Experimental results of relative position calculation show that the calculation is of high accuracy.

Key words: UAV; probe and drogue refueling; near-infrared beacon; detection; beacon point matching; geometric feature; relative position calculation

0 引言

现代空中加油对接前主要分为会合阶段和对接阶段^[1]。在无人软管式加油对接阶段,受油机和锥套

之间的相对位置估计是否精确是决定空中加油成败的关键,一般要求最终插头与锥套之间的相对位置精度达到10 cm级^[2]。视觉导航具有近距离精度高、自主性强、成本低廉等优点,将其应用于无人软管式加油对接阶段具有广阔的应用前景^[3-4],而信标检测系统的设计以及信标点匹配算法则是视觉导航最为关键的部分,因为检测精度和匹配效果将直接影响导航参数的解算性能。针对无人软管式自主空中加油对接阶段视觉导航中存在的信标点检测与匹配难问题,文献

收稿日期:2014-07-17

修回日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61135001);西安市科技计划项目(CXY1350(2))

作者简介:赵建涛(1990—),男,陕西咸阳人,硕士生,研究方向为视觉导航、图像处理。

[5-10]研制了一种主动视觉传感器系统 VisNav,但 VisNav 需要依赖特制的传感器,实现难度较高,不具有通用性,而且数据链路间的通讯易受干扰;文献[11-14]研制了一种被动视觉传感器系统,但具体的信标检测以及匹配方法未曾提及;在文献[3,15]中,利用红外发光二极管布置在锥套上作为信标,但该算法只适合于简单背景下的信标检测,且不能克服个别灯有损坏或者遮挡的情况。

针对上述问题,本文设计了一种近红外信标检测系统,并提出一种基于几何特征的信标点匹配算法。通过半物理实验验证了信标检测系统及匹配算法的性能;通过相对位置解算实验分析了算法的解算精度。可为无人机空中加油对接阶段视觉相对导航的工程应用提供借鉴。

1 无人软管式加油近红外信标检测系统

目前的视觉导航多采用可见光信标,但是可见光信标在远距离时与背景不易区分,畸变较大,易受强光照及大雾天气干扰,并且特征难提取。考虑到自然场景中红外源较少,与背景易区分,且红外成像不受天气及时间的影响,特征点易检测,本文设计了一种软管式加油近红外信标检测系统,该系统可以完成受油机和锥套在对接阶段的精确信标检测。

1.1 信标设计

实验表明 850 nm 波段直插式近红外 LED 灯(发光角度为 30°,功率为 160 mW)可满足空中加油对接信标检测与匹配原理性实验的需要。因此,将 8 个 850 nm 波段近红外 LED 灯作为信标点,对称分布在锥套外边缘,锥套直径为 0.24 m,与真实锥套比例大致为 1:2.5,如图 1 所示。这样设计的信标具有如下优点:

- 1) 布置在锥套外边缘不易被遮挡;
- 2) 8 个 LED 灯对称分布设计,将相对位置解算要求特征点必须完全一一对应简化为只需正确排序特征点,简化了特征点匹配计算。



图1 近红外信标设计图

Fig.1 Near-infrared beacon design

1.2 信标检测系统

为了尽可能滤除背景中除信标以外的光源干扰,采用中心波长为 850 nm、带宽 30 nm 的带通滤镜。

相机选取原则为:相机应具有近红外波段成像功

能。本文选用罗技 C310 做原理性实验,可实现近红外成像。

所搭建近红外信标检测系统如图 2 所示。

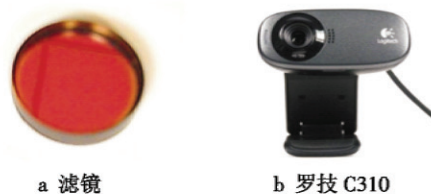


图2 近红外信标检测系统

Fig.2 Near-infrared beacon detect system

2 基于几何特征的信标点匹配算法

由于环境的影响,近红外信标检测系统获取的信标会出现杂点干扰、信标遮挡、损坏等情况,因此需要完成信标干扰点排除以及特征点排序等工作,从而完成信标特征点和真实物理特征点的准确匹配。由于设计的信标具有先验的几何特征,基于此,信标点匹配算法的基本思想是:获取信标实时图后,通过高通滤波、目标分割和质心求取等预处理步骤,精确提取目标特征点质心,然后通过远干扰点排除、特征点排序、近干扰点排除和特征点标记 4 个步骤实现信标点的准确匹配,算法原理如图 3 所示。

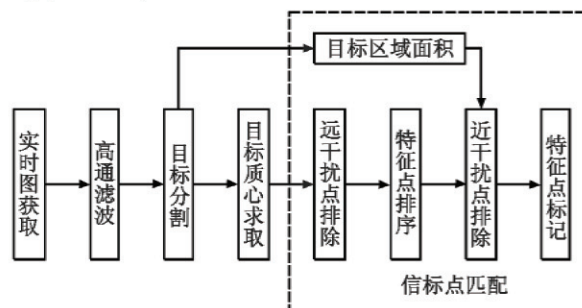


图3 基于几何特征的信标点匹配算法原理图

Fig.3 Principle of beacon point matching algorithm based on geometric features

2.1 图像预处理

获取实时图后,首先运用二维高斯高通滤波器对图像进行滤波,去除灰度分布比较平坦的背景干扰,然后运用固定阈值分割法^[16]对目标进行分割,再运用连接分量标注法^[16]标记出各个目标。

针对受油机和锥套之间的相对运动造成的信标点拖影问题,本文采用灰度值加权算法求取各个目标区域的质心以及目标区域的面积,该方法相比于传统的平均值求质心方法结果更精确。

2.2 远干扰点排除

在实时图中,目标区域的质心构成椭圆。考虑到加油接近过程中受油机与锥套之间相对运动并不是很

大,因此可以用圆近似代替椭圆来排除远干扰点。本文根据这个先验信息,采用随机抽样一致法(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)在图像中寻找支持点最多的椭圆,从而找出锥套上及其附近的目标点,剔除离锥套较远的干扰点。

基于RANSAC的远干扰点排除算法实现步骤如下所述。

1) 建立椭圆方程 $p^2 + bpq + cq^2 + dp + eq + f = 0$, $b^2 - 4c > 0$, 随机采取5点 (p_i, q_i) , $i = 1, \dots, 5$, 构造椭圆, 计算椭圆方程中的 b, c, d, e, f 参数, 并判断椭圆几何特性是否满足要求, 否则重新采点。

2) 计算椭圆中心 (p_0, q_0) 以及等效半径 R 。椭圆中心的算式为

$$\begin{cases} p_0 = \frac{be - 2cd}{4c - b^2} \\ q_0 = \frac{bd - 2ce}{4c - b^2} \end{cases} \quad (1)$$

定义等效半径为

$$R = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 [(p_i - p_0)^2 + (q_i - q_0)^2]} \quad (2)$$

3) 依次计算其他点 (P_i, Q_i) 与椭圆中心的距离并与等效半径 R 进行判断, 建立如下规则判断其他点是否为该椭圆的支持点。

① 若 $\sqrt{(P_i - p_0)^2 + (Q_i - q_0)^2} \leq T \cdot R$, 则 (P_i, Q_i) 是支持点;

② 若 $\sqrt{(P_i - p_0)^2 + (Q_i - q_0)^2} > T \cdot R$, 则 (P_i, Q_i) 不是支持点。

其中, T 为一个大于1的阈值, 本文选为1.2。记录初始的5点 (p_i, q_i) , $i = 1, \dots, 5$, 支持点 (P_i, Q_i) 以及支持点个数。

4) 重复1)~3), 直至达到固定的循环次数, 最终找到支持点最多的椭圆模型对应的初始点以及支持点。

对于视频图像, 利用视频的连续性对算法进行改进, 首先在上一帧找到的椭圆附近寻找当前帧椭圆, 若未找到或者是视频第一帧的情况下, 再运用以上算法进行寻找与剔除。整体算法原理如图4所示。

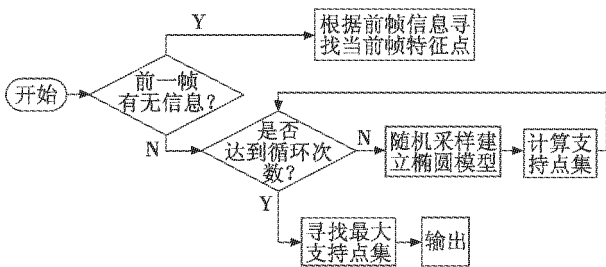


图4 远干扰点排除算法原理图

Fig.4 Principle of far interference point exclusion algorithm

2.3 特征点排序

特征点排序主要是为了对目标点进行顺时针或者逆时针排序, 并指定初始点, 从而完成图像特征点与真实物理特征点的匹配。本文首先求取所有特征点质心拟合圆的圆心, 以此点作为原点 O , 以与图像 x 轴相同的方向作为 X 轴, 以与图像 y 轴相同的方向作为 Y 轴, 建立 XOY 坐标系。记原点 O 到各特征点的向量为 F , 依次求出 F 与 X 轴正方向的夹角 α , α 的取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 不包括 360° 。 α 的算式为

$$\alpha = \begin{cases} \arctan(y/x) & x \geq 0, y \geq 0 \\ 180 + \arctan(y/x) & x < 0 \\ 360 + \arctan(y/x) & x \geq 0, y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, x, y 表示向量 F 的坐标。

然后对 α 按照由小到大的顺序进行排序, 即可得到逆时针排序的特征点序号(在图像坐标系中为顺时针)。最后, 对起始点和最后点重新考察, 选择最靠近 X 轴的点作为最终起始点。

2.4 近干扰点排除

由于信标设计的特殊性, 当锥套平面与摄像机光轴夹角过大时, LED灯附近偶尔会出现干扰点, 但干扰点的大小与真实的目标点相比面积总是较小。如果不做近干扰点的排除, 会导致信标点的错误匹配。

本文设计采用相邻两特征点之间的圆心角 β 来近似衡量相邻特征点之间的距离。利用式(3)求出的圆心角 α 可求出 β 。 β 的算式为

$$\beta_i = \begin{cases} \alpha_{i+1} - \alpha_i & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ 360 - \alpha_N + \alpha_1 & i = N \end{cases} \quad (4)$$

式中, N 为剔除掉离锥套较远的干扰点后的目标总个数。

本文设计依次求出相邻特征点之间的圆心角 β_i , 判断 β_i 小于某一阈值时, 认为有干扰点存在, 剔除掉面积较小的干扰点, 其中, 目标区域的面积可在目标分割环节中得到。

2.5 特征点标记

在加油过程中, 由于环境因素, 可能存在个别LED灯受遮挡或者损坏的情况, 此时在特征点标记时, 需要为受遮挡或者损坏的LED灯保留序号, 使之不影响后续LED灯的序号。本文对排除掉近干扰点后的特征点重新计算圆心角 β_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中, n 表示排除掉近干扰点后的特征点总个数, $n \leq 8$, 默认特征点序号为 $1, 2, \dots, n$ 。本文根据相邻特征点之间的圆心角大小, 适当地标记特征点序号。具体算法如下所述。

令

$$\gamma_i = \beta_i / 45 - 1 \quad (5)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 0 & \gamma_i < 0 \\ \text{round}(\gamma_i) & \gamma_i \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\text{round}(\gamma_i)$ 表示对 γ_i 进行四舍五入。求出的 λ_i 即为第 i 个特征点到下一个特征点之间漏检的信标个数。

本文根据以上算法, 最终完成信标特征点的准确匹配。

3 实验结果与分析

3.1 实验步骤

本文实验在室外空旷区域进行, 实验步骤如下: 1) 采用搭建的近红外信标检测系统获取信标图; 2) 对原图进行高通滤波; 3) 对高通滤波后的图像进行二值化; 4) 运用灰度值加权法提取二值图像目标质心; 5) 对二值图像中的远干扰点进行排除; 6) 对剩余目标点排序; 7) 二值图像中近干扰点排除; 8) 标记最终特征点序号。

3.2 不同环境下实验

3.2.1 不同距离情况下信标检测与匹配结果

实验在晴天室外空旷区域进行。当锥套与摄像机径向距离不同时, 信标检测与匹配效果如图 5、图 6 所示, 图 6 中每个分图右上角为局部放大图。

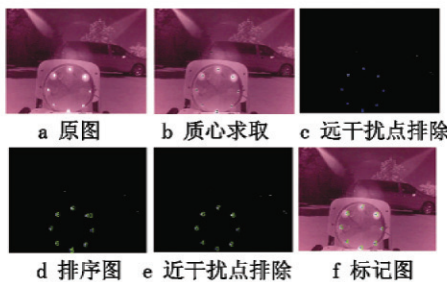


图 5 1 m 检测与匹配效果图

Fig.5 Detection and matching results of 1 m

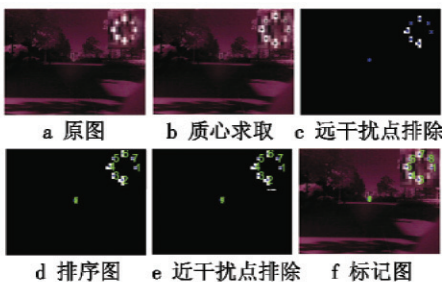


图 6 24 m 检测与匹配效果图

Fig.6 Detection and matching results of 24 m

根据多次不同距离实验可得到, 信标检测与匹配最远距离可以达到 24 m。

3.2.2 不同角度情况下信标检测与匹配结果

实验在晴天室外空旷区域进行, 径向距离为 2 m。当摄像头光轴与锥套平面的垂线不平行, 存在一定角度时, 信标检测与匹配效果如图 7、图 8 所示, 每个分图

的右上角为局部放大图。

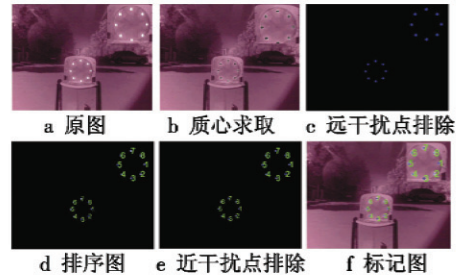


图 7 0°时检测与匹配效果图

Fig.7 Detection and matching results of 0°

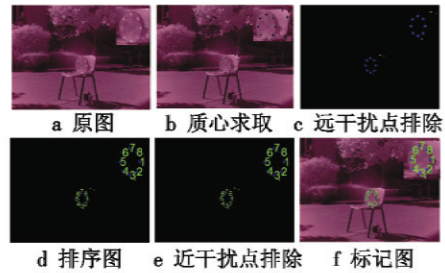


图 8 45°时检测与匹配效果图

Fig.8 Detection and matching results of 45°

本文实验所选 LED 灯角度为 30°, 从图 7、图 8 可以看出, 本文的信标检测与匹配算法在角度为 45° (径向距离 2 m) 时依然可以准确地检测到信标, 并完成信标匹配。

3.2.3 不同光线情况下信标检测与匹配结果

实验在室外空旷区域进行。在强光照和阴天情况下, 信标检测与匹配效果如图 9、图 10 所示, 每个分图的左上角或右上角为局部放大图。

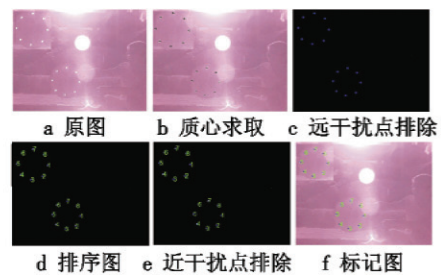


图 9 晴天正对太阳检测与匹配效果图

Fig.9 Detection and matching results of sunny day facing the sun

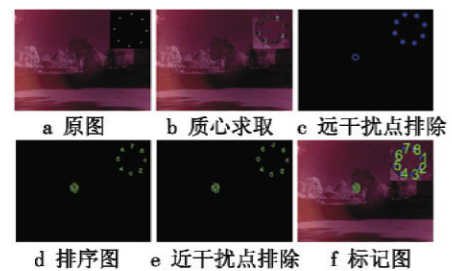


图 10 阴天检测与匹配效果图

Fig.10 Detection and matching results of cloudy day

从图 9、图 10 可以看出,本文的算法无论是在晴天正对太阳强光照还是阴天弱光照情况下,都可以稳定准确地实现信标精确检测与匹配,鲁棒性很好。

3.2.4 部分 LED 灯受遮挡或灯光微弱情况下信标检测与匹配结果

在实际环境中,个别 LED 灯存在受遮挡或者灯光微弱等问题,导致这些 LED 灯不能被正常检测到,此时需要利用算法正确标记其他 LED 灯的序号,才不会影响到后续的相对位置解算。本文算法在部分 LED 灯受遮挡或者灯光微弱情况下检测效果如图 11 所示,每个分图的右上角为局部放大图。

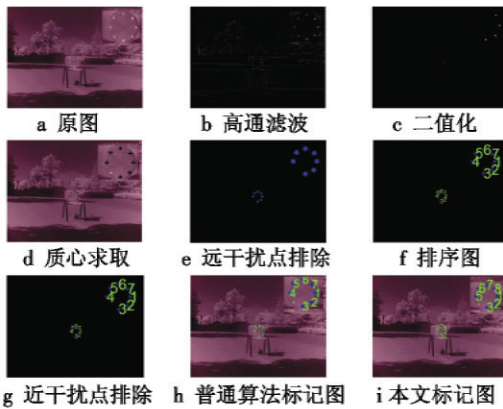


图 11 部分 LED 灯受遮挡或灯光微弱情况下信标检测与匹配结果图

Fig. 11 Detection and matching results of some beacons blocked, damaged or obscured

从图 11 可以看出,当个别 LED 灯不能被正常检测时,普通算法 LED 灯序号标记错误,将 5 号灯标为 4 号,后续灯都标记错误,而本文的算法可以正确地标记出 LED 灯序号,鲁棒性较强。

4 解算结果分析

相对位置解算主要是基于机器视觉原理,利用图像中检测出的特征点坐标,结合先验信标的关系来实现信标和摄像机的相对位置求解。目前基于相对位置解算的算法研究较多,精度都较高^[17-18],因此整个视觉导航的精度主要取决于信标点检测精度和匹配效果。本文采用上述信标检测与匹配算法,利用文献[17]的解算算法进行相对位置解算,完成半物理实验验证。

半物理实验将锥套固定在一定位置,分别测量相机光心相对于锥套中心的偏移量 x, y 以及相机光心与锥套中心的垂直距离 z 作为真值。在同一位置拍摄不同角度照片 12 张,得到 12 张图片的解算误差绝对值的平均值作为这个位置的平均误差值。解算结果如表 1 所示。

表 1 半物理实验精度分析表

Table 1 The semi-physical experiment accuracy analysis

序号	真值						误差		
	x/m	y/m	z/m	俯仰/ (°)	航向/ (°)	滚转/ (°)	x/m	y/m	z/m
1	0	0.18	24	10	10	0	0.040	0.022	1.103
2	0	0.18	20	10	10	0	0.032	0.017	0.512
3	0	0.18	16	10	10	0	0.047	0.030	0.297
4	2	0.18	12	10	10	0	0.041	0.018	0.112
5	0	0.18	12	15	10	0	0.041	0.097	0.078
6	-2	0.18	8	20	10	0	0.050	0.036	0.080
7	0	0.18	8	15	10	0	0.021	0.037	0.049
8	2.31	0.18	4	30	10	0	0.014	0.062	0.016
9	2	0.18	4	10	12	0	0.004	0.052	0.025
10	1.45	0.18	4	20	10	0	0.024	0.026	0.034
11	0.7	0.18	4	10	10	0	0.005	0.025	0.021
12	0	0.18	4	15	10	0	0.024	0.032	0.022
13	-2	0.18	2	45	8	0	0.005	0.064	0.019
14	0	0.18	2	13	6	0	0.019	0.010	0.009
15	1	0.18	1	45	15	0	0.073	0.065	0.064
16	0	0.18	1	10	12	0	0.007	0.009	0.013

表中,角度真值为同一位置给的最大角度值,最小角度均为 0°。

由室外实验的误差分析可知,随着摄像机与锥套距离的减小,解算误差减小。24 m 时, x, y 方向位置误差不超过 4 cm, z 方向位置误差不超过 1.2 m; 12 m 时, x, y 方向位置误差不超过 10 cm, z 方向位置误差不超过 12 cm; 1 m 时,随着角度由 45° 减小为 10°, x, y 方向位置误差由 7.3 cm 减小到 0.7 cm, z 方向位置误差由 6.4 cm 减小到 1.3 cm。半物理实验表明本文的信标检测与匹配算法是相当有效的,解算精度较高。

5 总结

本文面向无人机软管式加油对接阶段视觉导航,设计了一种基于近红外的信标检测系统,并提出了一种基于几何特征的鲁棒信标特征点匹配算法,最终通过半物理实验验证了系统的可靠性及精度。结果表明:

- 1) 本文设计的基于近红外的无人机软管式加油信标检测系统可完成复杂环境下信标点的精确检测,可靠性高,易于实现,工程应用性强;
- 2) 本文提出的基于几何特征的无人机软管式加油信标特征点匹配算法可抗环境干扰,鲁棒性强,在信标出现遮挡、损坏以及灯光微弱等情况下都能稳定地实现信标特征点的准确匹配,可满足空中加油需要;
- 3) 在工程应用方面,信标检测效果与摄像机分辨率以及合作目标 LED 灯的功率和发光角度相关,提高摄像机分辨率或者 LED 灯的功率和发光角度,算法适用范围将会进一步增大。

参 考 文 献

- [1] 陈初干,王启珍.空中加油(二)[J].江苏航空,2004(2):38-40.(CHEN C G, WANG Q Z. Aerial refueling (II)[J]. Jiangsu Aviation, 2004(2):38-40.)
- [2] 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,2008,9(6):1-5.(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, 2008, 9(6):1-5.)
- [3] 段海滨,张奇夫,范彦铭.基于计算机视觉的 UAV 自主空中加油半物理仿真[J].北京航空航天大学学报,2013,39(11):1491-1496.(DUAN H B, ZHANG Q F, FAN Y M. Hardware-in-loop simulation platform for UAV autonomous aerial refueling based on computer vision[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(11):1491-1496.)
- [4] 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.(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.)
- [5] BOWERS R E. Estimation algorithm for autonomous aerial refueling using a vision based relative navigation system [D]. Texas A & M University, 2005.
- [6] VALASEK J, GUNNAM K, KIMMETT J, et al. Vision based sensor and navigation system for autonomous air refueling [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(5):979-989.
- [7] MARWAHA M, VALASEK J, NARANG A. Fault tolerant SAMI for vision-based probe and drogue autonomous aerial refueling [C]//AIAA, Aerospace Conference, 2009. doi: 10.2514/6.2009-1887.
- [8] TANDALE M D, BOWERS R, VALASEK J. Robust trajectory tracking controller for vision based probe and drogue autonomous aerial refueling [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California, 2005:1-16.
- [9] KATAKE A, CHOI H. VisNav100: A robust, compact imaging sensor for enabling autonomous air-to-air refueling of aircraft and unmanned aerial vehicles [C]//Image Processing: Machine Vision Applications III, 2010:1-11.
- [10] TANDALE M D, BOWERS R, VALASEK J. Trajectory tracking controller for vision-based probe and drogue autonomous aerial refueling [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(4):846-857.
- [11] MATI R, POLLINI L, LUNGHI A, et al. Vision-based autonomous probe and drogue aerial refueling [C]//Control and Automation, 2006:28-30.
- [12] POLLINI L, INNOCENTI M, MATI R. Vision algorithms for formation flight and aerial refueling with optimal marker labeling [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, San Francisco, California, 2005:15-18.
- [13] POLLINI L, CAMPA G, GIULIETTI F, et al. Virtual simulation set-up for UAVs aerial refuelling [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Texas, 2003:11-14.
- [14] POLLINI L, MATI R, INNOCENTI M. Experimental evaluation of vision algorithms for formation flight and aerial refueling [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Rhode Island, 2004:16-19.
- [15] 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.(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.)
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 [M]. 2 版. 阮秋琦,阮宇智,译.北京:电子工业出版社,2002.(GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Translated by RUAN Q Q, RUAN Y Z. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002.)
- [17] 张远民.基于机器视觉的无人机着陆定位技术研究 [D].成都:电子科技大学,2005.(ZHANG Y M. Research on landing positioning technology of UAV based on the machine vision [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2005.)
- [18] 李飞,唐大全,沈宁,等.无人机视觉辅助着陆中的姿态和位置估算[J].电光与控制,2012,19(1):69-73.(LI F, TANG D Q, SHEN N, et al. Estimation of attitude and position for vision assisted landing of UAVs [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(1):69-73.)