

引用格式:钟珍伟,秦勇,王宏伦,等.基于视觉的自主空中加油锥套跟踪与定位[J].电光与控制,2019,26(8):71-77. ZHONG Z W, QIN Y, WANG H L, et al. Drogue tracking and locating method for monocular-vision-based autonomous aerial refueling[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):71-77.

基于视觉的自主空中加油锥套跟踪与定位

钟珍伟, 秦勇, 王宏伦, 苏子康, 姚鹏, 李娜
(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘要: 主要针对国内软式空中加油,设计了一套基于机器视觉技术的自主空中加油锥套跟踪与定位系统。首先,对加油机系统建模,利用有限元分析进行加油软管锥套建模,为锥套运动提供基准数据;然后,利用最小椭圆定位完成锥套二维图像定位,结合LHM算法完成三维定位;接下来,考虑到锥套定位稳定性较差以及输出频率较低的问题,引入EKF提高系统鲁棒性并设置ROI区域减少图像处理时间;最后仿真结果表明,在不同紊流条件下,基于EKF的视觉测量系统可提高系统鲁棒性并使输出频率大大提升。

关键词: 空中加油; 软管锥套; 锥套跟踪; 锥套定位

中图分类号: V249 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.014

Drogué Tracking and Locating Method for Monocular-Vision-Based Autonomous Aerial Refueling

ZHONG Zhen-wei, QIN Yong, WANG Hong-lun, SU Zi-kang, YAO Peng, LI Na
(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper focuses on the domestic probe-drogué aerial refueling, and designs a set of vision-based autonomous aerial refueling system for drogué tracking and locating. Firstly, the tanker system is modeled. The finite element analysis is used to model the refueling hose drogué, which provides reference data for the movement of the drogué. A two-dimensional image localization of the drogué is completed by using the minimum ellipse localization, and the LHM algorithm is used to complete the three-dimensional localization. Then, considering the poor stability and low output frequency, EKF is introduced to improve the robustness of the system and decrease the time for image processing. Finally, the simulation results show that the vision-based measurement using EKF can improve robustness and output frequency under different turbulence conditions.

Key words: aerial refueling; hose drogué; drogué tracking; drogué locating

0 引言

自主空中加油(AAR)^[1]是指在人的指令、操作、监控下完成的有人驾驶飞机或无人驾驶飞机空中加油自动化的过程。区别于传统空中加油技术,AAR不需要飞行员直接操作,软管与插头的对接是由飞控计算机根据传感器的测量结果自主完成。针对我国采用的软式空中加油,加油锥套的精确定位是自主空中加油成功与否的关键。随着近些年来机器视觉的迅速崛起,将

自主空中加油技术与机器视觉技术结合越来越得到关注。国外的很多研究团队和高校已经投入大量资源到自主空中加油技术与机器视觉技术相融合的研究中,并且已经取得一定的研究成果。

文献[2-3]做了插头锥管方式下无人机空中加油的仿真实验,建立了一套计算机视觉系统,利用现成的商业软件构建了综合仿真环境,用来测试视觉算法;文献[4]对无人机硬管空中加油技术进行了研究,并采用KC-135加油机和ICE-101无人机模型进行空中加油仿真验证;文献[5]在无人机空中加油的分析、控制和建模工具方面展开了广泛的研究,最后利用B-747飞机模型作为加油机、F-4飞机模型作为受油机对整个系统进行仿真,取得了不错的效果;文献[6-7]提出一种新型的视觉导航系统VisNav,能够通过相应的传感器以及视

收稿日期:2018-03-16

修回日期:2018-09-29

基金项目:国家自然科学基金(61673042,61473012);长江学者和创新团队发展计划(IRT13004)

作者简介:钟珍伟(1992—),男,安徽铜陵人,硕士生,研究方向为空中加油。

觉处理算法对加油机和受油机的位置姿态进行精确测量,为无人机提供精确的定位信息;文献[8]针对自主空中加油锥套跟踪以及锥套三维空间定位问题提出一种基于直接法的层次视觉跟踪算法,并进行半物理仿真验证。

相比于国外,国内相关研究较少,本文从机器视觉角度出发,构建一套基于视觉的自主空中加油锥套定位与跟踪系统。首先通过加油机系统建模,完成加油软管锥套建模,为锥套的三维视景运动提供基准数据。通过本文的LHM(Lu, Hager and Mjolsness)算法完成加油锥套的三维空间定位,结合扩展卡尔曼滤波器(EKF)预测的ROI(Region of Interest)区域完成锥套位置跟踪,最终得出定位精度。

1 加油机系统建模

本文系统总体设计框架如图1所示,其中加油机系统建模是系统设计与算法仿真分析的基础。

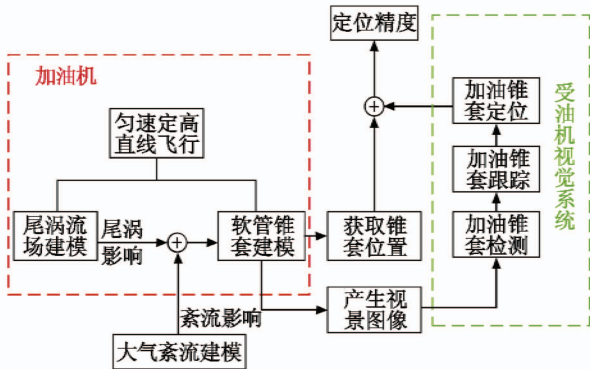


图1 系统框架图

Fig.1 System frame diagram

1.1 尾涡流场建模

尾涡流场建模采用经典的尾涡流场模型^[9],核心涡线的位置可确定为

$$\begin{cases} x = Vt \\ y = b \sqrt{t + \frac{\pi}{16}} \\ z = \frac{2\Gamma_0}{\pi^2 b} t \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为加油机机翼后方 Γ_0 任意截面位置,截面位置确定后,可根据加油机飞行速度 V 求得时间 t ; y, z 分别为涡线相对于机体轴侧向及垂向位置。

尾涡涡线上任一点的核心涡强度可由 Γ_c 和 r_c 表示,其算式为

$$\begin{cases} \Gamma_c = 0.4\Gamma_0 \exp(-0.8t/b') \\ r_c = 0.041(S_w/b) \sqrt{1 + 0.038\Gamma_0(b/S_w)^2 t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Γ_c 为核心涡环量; r_c 为核心涡半径; S_w 为机翼面

积; b 代表翼展; b' 代表左右尾涡间距。

距离核心涡中心 r 处的切向速度为

$$\vec{V}_\theta(r) = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \frac{r^2}{r^2 + r_c^2} \quad (3)$$

风梯度表达式为

$$W_x(r) = \int \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \frac{r^2}{r^2 + r_c^2} dr \quad (4)$$

1.2 大气紊流建模

大气紊流建模采用经典的Dryden模型^[10],大气紊流速度的空间频谱表达式为

$$\begin{cases} \Phi_{uu}(\Omega) = 2\sigma_u^2 \frac{L_u}{\pi} \frac{1}{1 + (L_u\Omega)^2} \\ \Phi_{vv}(\Omega) = \sigma_v^2 \frac{L_v}{\pi} \frac{1 + 3(L_v\Omega)^2}{[1 + (L_v\Omega)^2]^2} \\ \Phi_{ww}(\Omega) = \sigma_w^2 \frac{L_w}{\pi} \frac{1 + 3(L_w\Omega)^2}{[1 + (L_w\Omega)^2]^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Ω 为空间频率; L_u, L_v, L_w 分别为3轴紊流尺度; $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 分别为3轴风速的均方值。

1.3 加油锥套建模

加油锥套建模在考虑尾涡流场和大气紊流干扰的情况下,利用有限元的思想将加油软管分成若干段直线软管,对每一段软管进行受力分析。如图2所示,将软管分成等长的 $n+1$ 段,第0个节点直接与加油机相连,第 $n+1$ 个节点与加油锥套相连。假定加油软管总长度为 nL ,任意两个节点之间的距离为 L 。

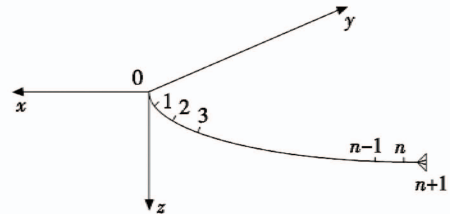


图2 坐标系与软管节点离散化示意图

Fig.2 Coordinate system and the nose nodes

从图2可以看出,坐标系的原点为第0个节点所在位置, x 轴方向与飞机速度方向相同, y 轴向右, z 轴和 x, y 轴组成右手系。

对每个节点进行受力分析,节点受力分析如图3所示。

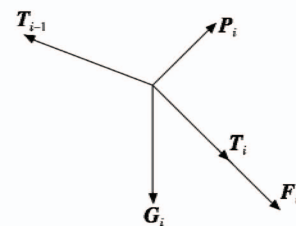


图3 第*i*个节点的受力图

Fig.3 The free-body diagram of node *i*

由图 3 可以看出,每个节点受到 5 个力作用,包括前段软管拉力 T_{i-1} ,后段拉力 T_i ,重力 G_i ,软管摩擦力 F_i 以及软管压力差 P_i 。对于第 $n+1$ 个节点,即软管和锥套交接点,锥套所受的阻力为 G_i, F_i, P_i 3 个作用力之和。则前段软管拉力 T_{i-1} 的方向为 $b_i = (x_{i-1} - x_i, y_{i-1} - y_i, z_{i-1} - z_i)$, F_i 和 T_i 的方向为 $a_i = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i)$, P_i 的方向为远方空气气流和加油机尾涡流场产生的诱导速度矢量和,当第 i 个节点达到平衡时,作用于该节点上的各个力的关系为

$$T_{i-1} + T_i + G_i + F_i + P_i = 0 \quad (6)$$

1.4 软管锥套建模仿真

对加油机左边吊舱释放锥管进行仿真,加油软管锥套系统仿真参数如下:总长度 24.328 m,将整个软管分成 24 段,每段长度相同,软管密度 4.11 kg/m,加油锥套重 29.5 kg,锥套直径 0.82 m,软管半径 0.067 m,加油机飞行高度 7620 m,加油机质量 136 t,翼展 39.88 m,加油吊舱距离翼尖 2.85 m,飞行速度为 139 m/s。本次仿真时长为 100 s,选取 40 s,60 s,80 s,100 s 时刻锥套三维运动进行显示,软管平衡拖拽位置计算效果如图 4 所示。

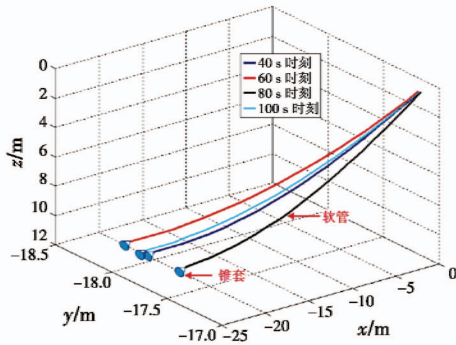


图 4 软管锥套不同时刻平衡拖拽位置

Fig. 4 Position of drogue and hose at different moments

将不同紊流情况下加油锥套三维空间内运动进行对比显示,如图 5。

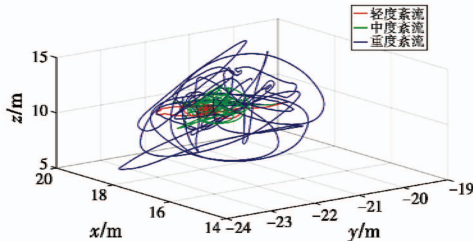


图 5 不同紊流下加油锥管在三维空间内运动对比图

Fig. 5 Drogue's trajectory under different kinds of turbulence

可以看出,不同紊流情况下加油软管锥套摆动范围差别比较大。图 6 为轻度紊流下加油锥套软管三维视景运动示意图。

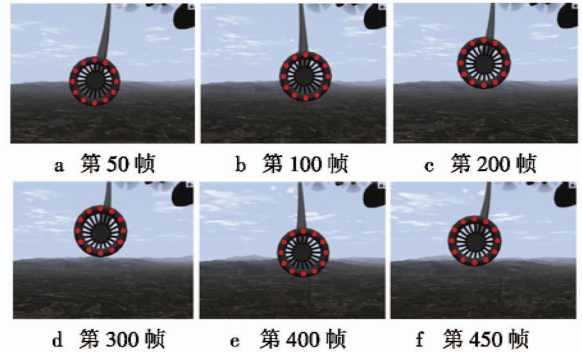


图 6 锥管视景运动示意图

Fig. 6 Motion of drogue on visual platform

2 锥套定位

锥套空间定位是建立在锥套检测的基础上,关于检测部分不再详述,可参考文献[11]。单目视觉锥套定位的假设条件是锥套平面与相机平面平行,在空中加油受油机姿态变化不大的情况下,该假设条件基本成立。通过最小椭圆法对锥套检测的结果进行拟合,由摄像机标定获取摄像机内外参数,结合三维空间定位算法得到对应的空间定位坐标,与加油软管锥套建模基本坐标作差,获取对应定位精度。空间定位流程如图 7 所示,其中选取的坐标系为相机坐标系,即 z 轴垂直成像平面指向光心, x 轴向右 y 轴向下组成像平面。

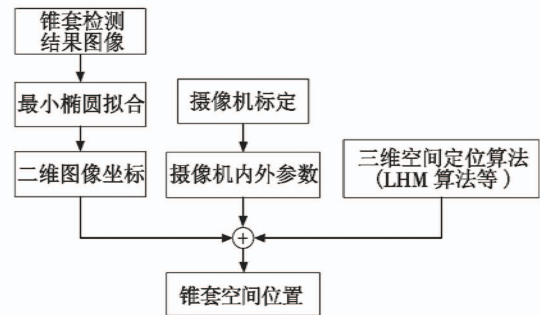


图 7 锥套空间定位流程图

Fig. 7 Flow chart of drogue positioning in 3D space

2.1 最小椭圆拟合

椭圆可由椭圆中心坐标 (x_0, y_0) 、长半轴 a 、短半轴 b 、长半轴与 x 轴的夹角这 5 个参数唯一确定^[10]。椭圆方程有两种表达形式,分别为

$$\frac{[(x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta]^2}{a^2} + \frac{[(y - y_0) \cos \theta - (x - x_0) \sin \theta]^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (8)$$

其中,式(7)是椭圆标准方程,式(8)是椭圆一般方程,通过对两种表达式对比可以得到参数 x_0, y_0 关于参数 A, B, C, D, E 的表达式为

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{2BC - AD}{A^2 - 4B}, \frac{2D - AD}{A^2 - 4B} \right) \quad (9)$$

对目标函数

$$\min F(A, B, C, D, E) = \sum_{k=1}^n (x_k^2 + Ax_k y_k + By_k^2 + Cx_k + Dy_k + E)^2 \quad (10)$$

进行求解可以得到参数 A, B, C, D, E 的值。将参数 A, B, C, D, E 的值代入式(9)即可得到锥套的二维图像中心坐标,完成二维图像定位。

2.2 LHM 算法定位

LHM^[12]以最小化对象空间共线误差为目标,实现目标的位置估计。首先,通过使用对象空间误差函数定义位置估计,然后以另一种方式将目标函数重写,使得目标函数可以以迭代方式求解3D-3D的位置估计问题。该算法通过对对象空间共线误差向量

$$\mathbf{e}_i = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}) \quad (11)$$

描述位置估计。式中: \mathbf{R} 为旋转矩阵; \mathbf{t} 为平移向量; \mathbf{p}_i 为参考点的三维坐标; $\hat{\mathbf{V}}_i$ 为观察点的投影矩阵,即

$$\hat{\mathbf{V}}_i = \frac{\hat{\mathbf{v}}_i \hat{\mathbf{v}}_i^T}{\hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_i} \quad (12)$$

式中, $\hat{\mathbf{v}}_i = [u_i \ v_i \ 1]$ 表示标记点的二维图像坐标。

然后,求解满足误差平方和最小的 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} ,即

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{e}_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (13)$$

由式(13)可知,对于所有的标记点图像坐标,已经完成包含在投影矩阵 $\hat{\mathbf{V}}_i$ 中,由于上述目标函数是 \mathbf{t} 的二次方程,给定一个固定的旋转矩阵 \mathbf{R} , \mathbf{t} 的算式为

$$\mathbf{t}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \left(\mathbf{I} - \frac{1}{n} \sum_j \hat{\mathbf{V}}_j \right)^{-1} \sum_j (\hat{\mathbf{V}}_j - \mathbf{I}) \mathbf{R} \mathbf{p}_j \quad (14)$$

定义

$$\begin{cases} \mathbf{q}_i(\mathbf{R}) = \hat{\mathbf{V}}_i(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}(\mathbf{R})) \\ \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i(\mathbf{R}) \end{cases} \quad (15)$$

式(13)可以重写为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}(\mathbf{R}) - \mathbf{q}_i(\mathbf{R})\|^2 \quad (16)$$

通过迭代计算 \mathbf{R} ,假设第 k 次估计的 \mathbf{R} 为 $\mathbf{R}^{(k)}$,则 $\mathbf{t}^{(k)} = \mathbf{t}(\mathbf{R}^{(k)})$, $\mathbf{q}_i^{(k)} = \mathbf{R}^{(k)}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}^{(k)}$,下一次迭代的 $\mathbf{R}^{(k+1)}$ 值可以转化成求解绝对定向问题,即

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{q}_i^{(k)}\|^2 \quad (17)$$

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \max_{\mathbf{R}} \text{tr}(\mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{R}^{(k)})) \quad (18)$$

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i'(\mathbf{R}) \mathbf{p}_i'^T \\ \mathbf{p}_i' = \mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}} \\ \mathbf{q}_i'(\mathbf{R}) = \mathbf{q}_i(\mathbf{R}) - \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{R}) \end{cases} \quad (19)$$

对 $\mathbf{M}(\mathbf{R})$ 进行SVD分解,分解为 $(\mathbf{U}, \mathbf{\Sigma}, \mathbf{V})$,则 $\mathbf{U}^T \mathbf{M} \mathbf{V} = \mathbf{\Sigma}$,可以得到

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \mathbf{V} \mathbf{U}^T \quad (20)$$

根据式(20),通过 $\mathbf{R}^{(k+1)}$ 的值对 $\mathbf{t}^{(k+1)}$ 进行更新,最终设定误差阈值,当计算得到的误差小于设定的阈值时,停止更新,获得位置估计值。

3 基于EKF的锥套定位与跟踪

由于对整幅图像进行处理计算量过大,导致锥套的输出频率较低,并且锥套受气流扰动会飘出相机视野造成检测失败,因此,提高锥套定位的鲁棒性和输出频率显得十分重要。EKF是一种高效的递归滤波器,可以通过外部量测信息来估计非线性系统的内部状态。以LHM算法所得锥套坐标作为EKF的量测输入来修正锥套运动过程模型,该方法不仅能提高系统鲁棒性,而且根据滤波器所估计的锥套运动速度可预测出下一时刻锥套位置,用以设置ROI区域,可大大缩短图像处理时间。

3.1 锥套定位过程模型

状态变量 \mathbf{x} 选为相机坐标系下的3轴位置、3轴速度、3轴加速度以及像素坐标系下的位置分量和速度分量,即

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{1,3} \\ x_{4,6} \\ x_{7,9} \\ x_{10,11} \\ x_{12,13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^c \\ \mathbf{v}^c \\ \mathbf{a}^c \\ \mathbf{r}^p \\ \mathbf{v}^p \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\text{式中: } \mathbf{r}^c = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \mathbf{v}^c = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \mathbf{a}^c = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}, \mathbf{r}^p = \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}, \mathbf{v}^p = \begin{bmatrix} V_U \\ V_V \end{bmatrix};$$

\mathbf{r}^c 为相机坐标系下的位置向量; \mathbf{v}^c 为速度向量; \mathbf{a}^c 为加速度向量; \mathbf{r}^p 为通过锥套检测之后在像素坐标系下的位置向量; \mathbf{v}^p 为速度向量。假设锥套中心的加速度为零,状态量的导数关系分别为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{r}}^c = \mathbf{v}^c = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{v}}^c = \mathbf{a}^c = \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{a}}^c = \mathbf{0} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{r}}^p = \mathbf{v}^p = \begin{bmatrix} x_{12} \\ x_{13} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{12} \\ \dot{x}_{13} \end{bmatrix} = \dot{y}^p = \mathbf{0} \quad (26)$$

基于视觉的锥套测量 EKF 过程模型可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{w}(t) \quad (27)$$

即

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^c \\ \dot{\mathbf{v}}^c \\ \dot{\mathbf{a}}^c \\ \dot{\mathbf{r}}^p \\ \dot{\mathbf{v}}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}^c \\ \mathbf{a}^c \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{v}^p \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{r^c} \\ n_{v^c} \\ n_{a^c} \\ n_{r^p} \\ n_{v^p} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中： $\mathbf{w}(t)$ 和 $(n_{r^c} \ n_{v^c} \ n_{a^c} \ n_{r^p} \ n_{v^p})^T$ 表示过程噪声，反映了系统建模的精确程度。

3.2 锥套定位量测模型

对于量测变量 z ，选择相机坐标系下的 3 轴位置分量，以及通过图像处理获得的像素坐标系下的锥套中心位置，即

$$z = \begin{bmatrix} z_{1,3} \\ z_{4,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^c \\ \mathbf{r}^p \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中， \mathbf{r}^c 为量测，可由 LHM 算法计算得到，基于视觉的锥套测量 EKF 量测模型可表示为

$$z(t) = h(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{v}(t) \quad (30)$$

式中， $\mathbf{v}(t)$ 为量测噪声，代表了 LHM 定位算法的精度。

3.3 EKF 更新过程及锥套跟踪

系统更新分为以下几个部分：状态变量协方差矩阵的初始化、基于过程模型的状态预测、协方差预测、计算滤波增益、利用革新值和滤波增益更新状态量以及协方差矩阵更新。更新过程如图 8 所示。

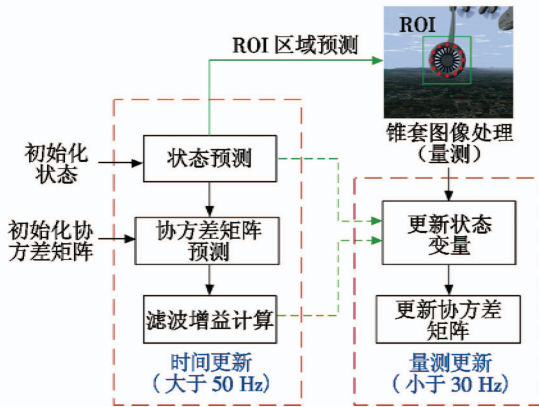


图 8 EKF 视觉测量更新过程

Fig. 8 Vision measurement updating process of EKF

图 8 中，左侧代表时间更新，右侧是量测更新，由于图像处理速度较慢，量测更新频率有限，而过程更新的频率可以很高。

EKF 更新过程中很重要的一点是对 ROI 区域的预测，ROI 区域即为重点处理区域，下一次图像处理时只会处理 ROI 中的图像，这样大大减少了图像处理的

像素点，提高了量测输出频率。ROI 区域的 4 个边界值分别为

$$\begin{bmatrix} U_{\min} \\ U_{\max} \\ V_{\min} \\ V_{\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_x^p - l \\ \mathbf{r}_x^p + l \\ \mathbf{r}_y^p - l \\ \mathbf{r}_y^p + l \end{bmatrix} \quad (31)$$

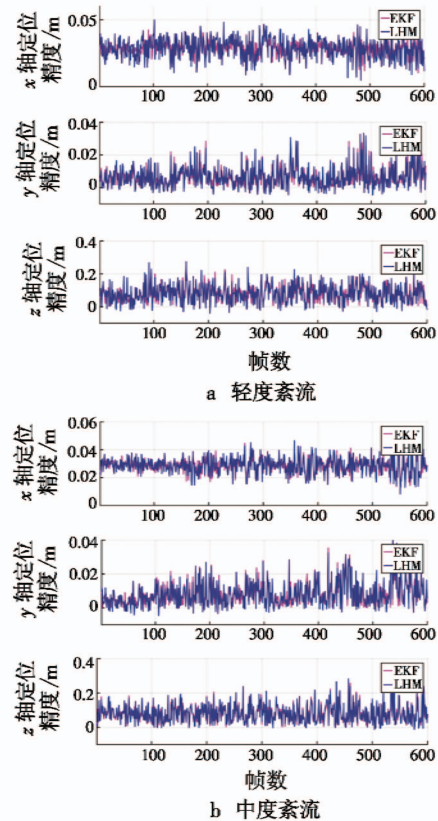
式中： $(\mathbf{r}_x^p, \mathbf{r}_y^p)$ 是状态量 \mathbf{r}^p 在 x, y 两个轴向上的分量，由过程模型预测得出，它表示了锥套中心位置下一时刻的坐标点； l 是 ROI 区域边长的一半，其至少要大于锥套半径的像素长度 d 。未设置 ROI 区域时，锥套处理的输出频率不足 10 Hz，设置 ROI 之后，量测输出频率可达 30 Hz。

4 系统仿真

4.1 基于 EKF 的锥套处理视景仿真

本文仿真采用的原始图片像素均为 788×613 ，在高度为 7620 m 的位置上，加油机做定直平飞，相机距离加油锥套的距离为 8 m。本节验证基于 EKF 的锥套定位算法对精度的影响以及引入 ROI 之后图像处理速度的提升效果。在启用 EKF 之前需要进行初始化，初始值即为当前利用 LHM 算法测量所得的锥套像素坐标以及锥套相机坐标系位置，初始速度及加速度为零。

图 9 展示了在轻度、中度以及重度紊流条件下分别利用 EKF 和 LHM 算法对锥套进行定位的精度对比。



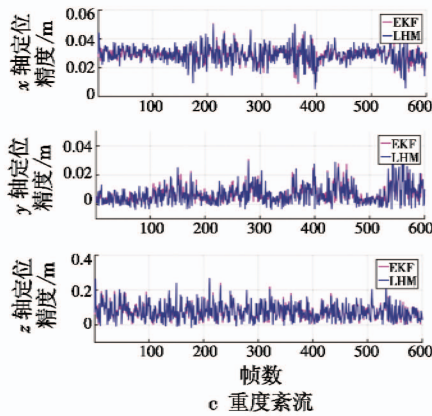


图9 不同紊流强度下EKF与LHM算法定位精度对比
 Fig.9 Positioning error of EKF and LHM under different kinds of turbulence

由图9可知,LHM算法对于锥套x轴向和y轴向的定位精度均在厘米级范围内,对于z轴向的定位精度约为0.1m,这是由于z轴向代表锥套的深度信息,测量误差相比于其他两轴较大。由图可知,加入EKF,将LHM作为其量测之后,锥套定位精度变化不大,但稳定性有所提升。

图10代表在轻度、中度以及重度紊流下,利用EKF所估计的ROI区域与一般图像处理输出频率对比,可以看出原图像处理频率只有10Hz,设置ROI区域之后量测输出频率约为30Hz。由于在EKF中过程模型的更新频率可高于量测模型,因此锥套位置信息输出频率可达50Hz。

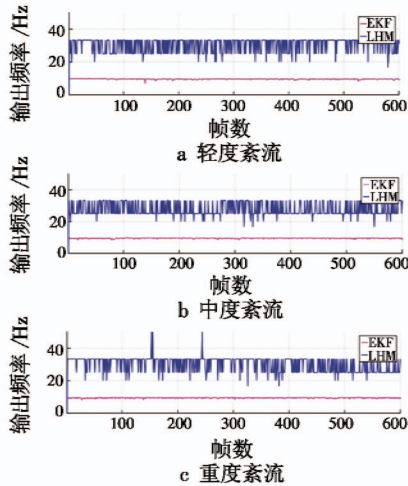


图10 不同紊流强度下EKF与LHM输出频率对比
 Fig.10 Output frequency of EKF and LHM under different kinds of turbulence

4.2 受油机运动时视景仿真

本节验证受油机相对加油机运动同时加紊流的情况下本文视觉处理过程的稳定性。受油机在加油机坐标系下的初始位置为(-33,-15,14), (单位m),仿真开始时,受油机以0.5m/s的相对速度靠近加油机,

在使用跟踪时增加不同紊流,图11表示了锥套3轴位置计算精度分别在轻度、中度以及重度紊流影响下的对比,由图可知,3种紊流中,轻度紊流下图像处理精度变化不大,具有较好的稳定性。

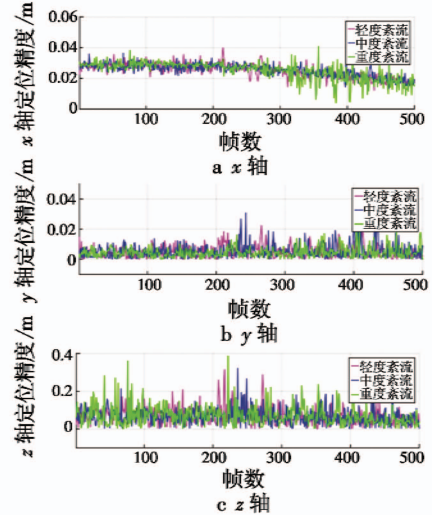


图11 不同紊流强度下受油机接近加油机时EKF算法处理精度对比

Fig.11 EKF precision under different kinds of turbulence when receiver aircraft approaching tanker aircraft

图12代表使用跟踪时,在轻度、中度以及重度紊流情况下,受油机以0.5m/s的速度接近加油机时对应帧处理时间对比示意图。

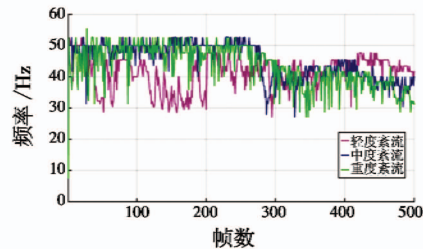


图12 使用跟踪时,不同紊流下EKF算法帧处理时间示意图

Fig.12 Processing time of EKF under different kinds of turbulence with drogue tracking

从图中可以看出,3种紊流情况下帧处理时间有一点差别,但均能满足实时性能需求。3种紊流情况下,帧处理时间均呈现微微上升趋势,这是因为加油机受油机相对距离较远时,ROI区域较小,帧处理时间也相对较短,随着距离变近,锥套在相机视野中所占比例增大,处理时间也会增加。

4.3 包含控制系统的闭环仿真

图13所示为整个控制系统的闭环仿真结构图,在锥套图像处理的基础上,由本文算法进行锥套定位,得到加油插头和锥套的相对位置,将位置误差经过自抗扰姿态控制器得到期望姿态,再经姿态控制器控制受

油机。最后完成了空中加油的自动对接,可见该锥套定位算法能够满足空中加油的对接仿真要求。

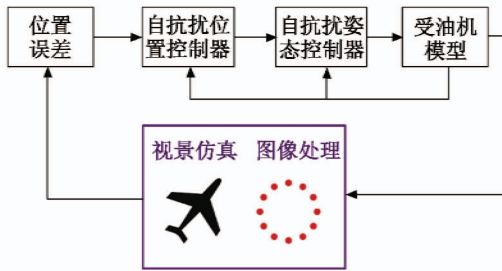


图13 控制系统闭环仿真结构图

Fig.13 Structural diagram of control system simulation

5 总结

本文首先建立加油软管以及大气紊流模型作为视觉仿真的基础,然后利用椭圆拟合和LHM算法对锥套进行三维定位,最后基于EKF对系统进行优化。从仿真结果可以看出,LHM定位算法在轻度、中度、重度紊流干扰下均具有很高的定位精度。在不同紊流下,引入EKF之后,视觉定位系统的鲁棒性均有提升,并且ROI区域跟踪在不降低加油锥套定位精度的基础上,使锥套定位系统输出频率得到很大提升。由于光照条件及其他环境因素的影响,基于LED灯的锥套检测效果并不十分稳定,因此有待进一步探索基于深度学习的图形处理算法。

参考文献

- [1] KHANAFSEH S M, PERVAN B. Autonomous airborne refueling of unmanned air vehicles using the global positioning system[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(5):1670-1682.
- [2] 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, 2003:1-8.
- [3] 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, 2004. doi:10.2514/6.2004-4918.

evaluation of vision algorithms for formation flight and aerial refueling[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-4918.

- [4] CAMPA G, FRAVOLINI M L, FICOLA A, et al. Autonomous aerial refueling for UAVs using a combined GPS-machine vision guidance[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-5350.
- [5] FRAVOLINI M L, FICOLA A, NAPOLITANO M R, et al. Development of modelling and control tools for aerial refueling for UAVs [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2003. doi:10.2514/6.2003-5798.
- [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] 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.
- [8] MARTINEZ C, RICHARDSON T, THOMAS P, et al. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(8):876-895.
- [9] BROWN A P, BASTIAN M. A feasibility study on the in-flight measurement of enroute wake vortex characteristics [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-5366.
- [10] 赵震炎,肖业伦,施毅坚. Dryden 大气紊流模型的数字仿真技术[J]. *航空学报*, 1986, 7(5):433-443.
- [11] 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(6):87-93.
- [12] LU C P, HAGER G D, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(6):610-622.

(上接第36页)

- [8] WENZEL K E, ROSSET P, ZELL A. Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57(1/2/3/4):297-311.
- [9] 陈龙胜,陈谋,姜长生. 基于视觉信息的无人机自主着陆过程姿态和位置估计[J]. *电光与控制*, 2009, 16(5):47-51.
- [10] ZHUANG L K, HAN Y D, FAN Y M, et al. Method of pose estimation for UAV landing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(s):S20401-1-S20401-4.

- [11] 周超,韩波,李平,等. 基于自适应特征的地标跟踪算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(24):155-157.
- [12] 尹文生,罗瑜林,李世其. 基于OpenCV的摄像机标定[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(1):197-199.
- [13] 周城宇,甄子洋,黄一敏,等. 基于视觉引导的无人直升机着舰技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(4):43-48.
- [14] 周富强,张广军. 一种单摄像机视觉导引方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(9):1129-1132.