

小型无人机地面目标跟踪系统机载云台自适应跟踪控制

辛哲奎, 方勇纯, 张雪波

(南开大学 信息技术科学学院, 天津 300071)

摘要: 本文针对小型无人机地面目标跟踪系统, 提出了一种机载云台自适应跟踪控制算法. 该算法在摄像机外参数未知的情况下, 利用图像信息和机载传感器得到的无人机状态进行反馈, 最终实现了对云台摄像机姿态的控制, 使得无人机在跟踪目标飞行过程中, 地面目标可以始终保持在摄像机的图像中心. 为此, 论文首先通过分析无人机、目标和摄像机三者的相对位姿关系, 建立了目标点在图像平面的运动学模型. 在此基础上, 基于李雅普诺夫稳定性理论设计了自适应控制算法. 理论分析与仿真结果表明本文所设计的摄像机姿态控制器在摄像机外参数未知的情况下, 可以使被跟踪目标始终保持在图像中心.

关键词: 目标跟踪; 建模; 云台控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive control for the on-board pan-tilt camera in an UAV ground-target-tracking system

XIN Zhe-kui, FANG Yong-chun, ZHANG Xue-bo

(College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: For a ground-target-tracking system in an unmanned helicopter, an adaptive on-board pan-tilt motion controller is proposed to adjust the camera's pose to maintain the image of the tracked ground-moving target being at the center of the viewing frame, when the extrinsic parameters of the camera are unknown. First, the dynamic characteristics of the image signal are analyzed and a kinematics model is developed for the target in the image space by the geometrical relations among the helicopter, the target and the camera. Then, an adaptive pan-tilt motion control law is proposed based on the model to keep the target being at the center of the viewing frame. The performance of the controller is demonstrated by both the theoretical stability analysis and simulation results, showing that the proposed adaptive controller can maintain the target image at the center of the viewing frame in the presence of unknown camera extrinsic parameters.

Key words: target-tracking; modelling; pan-tilt control

1 引言(Introduction)

近年来, 随着自动化技术、计算机技术、电子器件等高新科技水平的不断提高, 无人驾驶飞行器(unmanned air vehicle: UAV, 简称无人机)的应用领域从单纯的军事领域逐渐扩展至民用领域, 其普及程度大大提高, 应用亦日益广泛^[1~3]. 在无人机执行一些特定任务的过程中(如反恐防暴、交通监控、抗灾救援等), 往往需要它能够对特定的目标进行自主跟踪飞行, 并将目标的有关信息传回指挥中心. 因此, 近几年来基于视觉的无人机控制技术得到了控制学与机器人学专家的极大关注, 成为该领域当前最活跃的研究方向之一^[4~8]. 在文献[4]中, 作者提出了一种基于运动补偿的方法从无人机机载摄像机拍摄的图像序列中检测出动态目标, 并对其在图像

平面的运动状态进行实时估计. 为了解决无人机在失去外部传感器(如GPS)时无法自定位的问题, 在文献[5]中作者提出了一种视觉里程计(visual odometer)的方法, 该方法利用安装在无人机底部的摄像机对地面的静止目标进行跟踪, 同时根据摄像机成像原理和相应的坐标变换估计得到无人机自身的平移量. 南加州大学机器人研究所Bergen Industrial Twin直升机为载体^[6,7], 设计了由3台FireWire摄像机构成的无人机视觉系统, 并利用该系统设计并实现了一种基于视觉的无人机特征跟踪控制方法, 它可以使无人机悬停在指定的位置. 在文献[8]中, 作者设计并实现了一种基于视觉的无人机自主降落算法. 该算法利用视觉传感器和GPS对移动的地面平台进行识别与跟踪, 并根据无人机当前的状态规划

收稿日期: 2009-08-09; 收修改稿日期: 2009-11-26.

基金项目: 天津市应用基础研究计划(07JCYBJC05400); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0210); 机器人学国家重点实验室开放课题资助项目(RLO200814).

最优的飞行轨迹使无人机最终降落在该平台上. 值得指出的是, 以上研究中被跟踪的对象一般为完全静止或者运动缓慢的目标, 因此, 并没有涉及目标偏离摄像机视野范围情况下摄像机姿态的控制.

为了成功地实现跟踪, 视觉传感器需要始终获得动态目标的图像, 并从图像信号中提取其运动状态以实现反馈控制. 遗憾的是, 由于无人机的飞行空间比较大, 很容易使目标偏离于摄像机的视野之外, 此时, 由于视觉传感器无法获得有效的目标图像将导致跟踪失败. 上述问题给动态目标跟踪带来了很大的困难, 如何快速准确地调整摄像机的姿态使得被跟踪的目标始终处于视野中一直是视觉控制领域的一个研究重点. 目前, 针对动态目标的跟踪问题一般都是以地面移动机器人平台^[9~12]. 遗憾的是, 由于直升机具有复杂的动力学特性, 以移动机器人平台设计的跟踪控制方法很难适用于无人机目标跟踪系统中. 此外, 在实际的小型无人机地面目标跟踪系统中, 为了获取尽可能开阔的视野, 往往安装摄像机使之朝向直升机的正前方, 此时, 摄像机坐标系与机体坐标系之间存在着平移外参数. 一般情况下, 很难通过测量的方法精确地获取这些参数. 此外, 图像噪声和未知的跟踪目标的运动状态等不确定因素也给云台摄像机的控制器设计带来了极大的困难.

本文针对小型无人机地面目标跟踪系统, 提出了一种机载云台自适应跟踪控制算法, 该算法在摄像机外参数未知的情况下, 利用图像信息和机载传感器获得的无人机状态实现了对云台摄像机姿态的控制, 使得无人机在跟踪目标飞行过程中, 地面目标可以始终保持在摄像机的图像中心. 具体而言, 将首先对目标图像信号的动态特性进行分析, 建立其关于目标运动状态, 无人机运动状态, 摄像机控制量, 摄像机外参数等之间的数学关系, 对于模型中未知的目标深度信息, 利用无人机、摄像机和目标的相对几何关系计算目标点在摄像机坐标系下的深度. 然后, 基于上述运动学模型设计了一种可以对未知平移外参数进行在线补偿的自适应控制律, 并基于李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统的稳定性.

2 运动学模型(Kinematic model)

基于视觉的无人机地面目标跟踪系统是指在低空飞行的小型无人直升机上, 携带摄像机的云台控制系统利用获得的视觉信息自动调整机载云台的水平旋转和俯仰角度, 使被跟踪的地面目标始终保持在摄像机的图像中心, 同时利用视觉信息对动态目标的运动状态进行估计, 并将其作为反馈信号控制无人机跟踪目标飞行. 本节主要针无人机地面目标跟踪系统建立运动学模型, 以便进行随后的控制器设计与跟踪性能分析.

2.1 几何模型(Geometrical model)

在图1所表示的无人机地面目标跟踪系统中, $\Sigma_s(X^s, Y^s, Z^s)$ 表示导航坐标系. Σ_b 表示无人机机体坐标系, 其原点选为无人机的质心, X^b 轴指向无人机纵轴, 机头方向为正, Y^b 轴指向无人机横轴, 右方为正, Z^b 轴按照右手法则确定. Σ_c 表示摄像机坐标系, 其原点为光心, Z^c 轴沿光轴方向, 与 X^c 轴和 Y^c 轴满足右手法则.

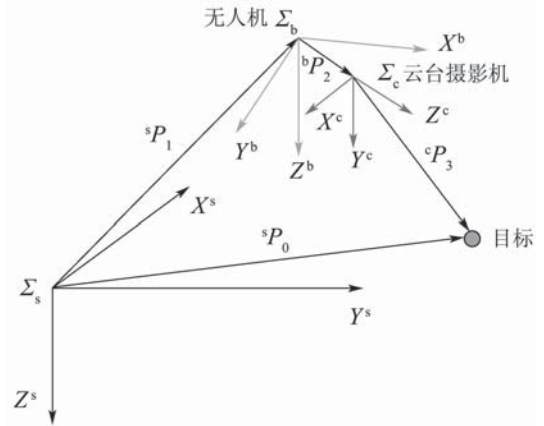


图1 无人机、摄像机和目标的相对位置

Fig. 1 The relative position and attitude

图中向量 ${}^s p_0 = [{}^s x_0 \ {}^s y_0 \ {}^s z_0]^T$ 和向量 ${}^s p_1 = [{}^s x_1 \ {}^s y_1 \ {}^s z_1]^T$ 分别表示目标和无人机在导航坐标系下的位置, ${}^b p_2 = [{}^b x_2 \ {}^b y_2 \ {}^b z_2]^T$ 为摄像机在机体坐标系下的安装位置. ${}^c p_3 = [{}^c x_3 \ {}^c y_3 \ {}^c z_3]^T$ 为目标在摄像机坐标系下的位置. 从图中不难看出各向量之间满足下面的几何关系^[13]:

$${}^s p_0 = {}^s p_1 + {}^s R \cdot {}^b p_2 + {}^s R \cdot {}^b R \cdot {}^c p_3, \quad (1)$$

式中 ${}^s R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示机体坐标系 Σ_b 到导航坐标系 Σ_s 的旋转矩阵, 由欧拉角表示的无人机姿态 (θ, ϕ, ψ) 确定, ${}^b R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示摄像机坐标系 Σ_c 到 Σ_b 的旋转矩阵, 由云台摄像机的水平旋转角 α 和俯仰角 β 确定. 根据式(1)可以计算出目标在摄像机坐标系下的位置 ${}^c p_3$ 为

$${}^c p_3 = {}^c R \cdot {}^b R \cdot ({}^s p_0 - {}^s p_1) - {}^c R \cdot {}^b p_2, \quad (2)$$

即:

$$\begin{bmatrix} {}^c x_3 \\ {}^c y_3 \\ {}^c z_3 \end{bmatrix} = {}^c R \cdot {}^b R \cdot \left(\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \right) - {}^c R \cdot \begin{bmatrix} {}^b x_2 \\ {}^b y_2 \\ {}^b z_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2 目标在图像平面的运动学模型(The dynamics of the target in image plane)

目标点在图像平面的成像位置 $I = [u \ v]^T$, 可以用针孔模型近似表示:

$$[u \ v \ 1]^T = \frac{1}{c_{z_3}} \cdot M \cdot [c_{x_3} \ c_{y_3} \ c_{z_3}]^T. \quad (4)$$

上式中 $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示摄像机的内参数矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: a_x, a_y 表示摄像机的焦距, $[u_0 \ v_0]^T$ 表示图像中心的像素值. 将式(3)代入式(4)并整理得到目标点在图像平面的位置为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{c_{z_3}} C \cdot M \cdot \left({}^c R_s^b R \begin{bmatrix} x_0 - x_1 \\ y_0 - y_1 \\ -z_1 \end{bmatrix} - {}^c R \begin{bmatrix} {}^b x_2 \\ {}^b y_2 \\ {}^b z_2 \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

式中 $C \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ 表示如下常数矩阵

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对式(6)求导后可以得到目标在图像平面的运动方程为

$$\dot{I} = J_{v1} \cdot v_1 + J_{w1} \cdot w_1 + J_{v0} \cdot v_0 + J_{wc} \cdot w_c, \quad (8)$$

式中: $\dot{I} = [\dot{u} \ \dot{v}]^T$ 表示目标点在实际图像中的运动速度, $v_1 = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ 和 $w_1 = [w_x \ w_y \ w_z]^T$ 分别表示无人机的线速度和角速度, $v_0 = [\dot{x}_0 \ \dot{y}_0]^T$ 表示目标的运动速度, $w_c = [\dot{\alpha} \ \dot{\beta}]^T$ 表示云台的旋转速度. 矩阵 $J_{v1}, J_{w1} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ 分别表示由无人机线速度和角速度引起的图像雅克比矩阵. $J_{v0}, J_u \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 分别表示由目标运动和云台运动引起的图像雅克比矩阵. 下面给出它们的具体表达式.

a) 图像雅克比矩阵 J_{v1} :

$$J_{v1} = \frac{1}{c_{z_3}} \cdot N_1(u, v) \cdot {}^c R, \quad (9)$$

其中 c_{z_3} 表示目标在摄像机坐标系下的深度信息, $N_1(u, v) \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$, 由下式给出:

$$N_1(u, v) = \begin{bmatrix} -a_x & 0 & u - u_0 \\ 0 & -a_y & v - v_0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

b) 图像雅克比矩阵 J_{w1} :

$$J_{w1} = N_2(u, v) \cdot {}^c R - \frac{1}{c_{z_3}} \cdot N_1(u, v) \cdot {}^c R \cdot S({}^b x_2, {}^b y_2, {}^b z_2), \quad (11)$$

其中 $N_2(u, v) \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$, 由下式给出

$$N_2(u, v) = \begin{bmatrix} \frac{(u-u_0)(v-v_0)}{a_y} & -\frac{a_x^2 + (u-u_0)^2}{a_x} & \frac{a_x(v-v_0)}{a_y} \\ \frac{a_y^2 + (v-v_0)^2}{a_y} & -\frac{(u-u_0)(v-v_0)}{a_x} & -\frac{a_y(u-u_0)}{a_x} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中 $S({}^b x_2, {}^b y_2, {}^b z_2) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示与向量 $({}^b x_2, {}^b y_2, {}^b z_2)$ 对应的反对称矩阵.

c) 图像雅克比矩阵 J_{v0} :

$$J_{v0} = -\frac{1}{c_{z_3}} \cdot N_1 \cdot {}^c R \cdot {}^b R \cdot C^T. \quad (13)$$

d) 图像雅克比矩阵 J_{wc} :

$$J_{wc} = \begin{bmatrix} -\frac{a_x^2 + (u-u_0)^2}{a_x} & \frac{(u-u_0)(v-v_0)}{a_y} \\ -\frac{(u-u_0)(v-v_0)}{a_x} & \frac{a_y^2 + (v-v_0)^2}{a_y} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

矩阵 J_{wc} 的行列式可以由下式计算:

$$\det(J_{wc}) = -a_x a_y - \frac{a_x}{a_y} (v-v_0)^2 - \frac{a_y}{a_x} (u-u_0)^2, \quad (15)$$

其中 a_x, a_y 均为大于零的常数, 因此矩阵 J_{wc} 的行列式恒不为零, 即矩阵 J_{wc} 可逆.

假设 1 目标始终位于摄像机的前方, 并且其到摄像机光心的距离有界, 即 $0 < c_{z_3} < \infty$.

假设 2 无人机的飞行高度 $-z_1$ 远远大于摄像机光心与无人机质心的距离 $\|{}^b p_2\|$, 且满足 $-z_1 \geq |{}^b x_2| + |{}^b y_2| + |{}^b z_2| + c$, 其中 c 为大于零的常数.

假设 3 无人机、摄像机和目标的所有运动状态均有界.

3 云台跟踪控制器设计(Pan-tilt tracking controller design)

3.1 开环误差系统分析(Error system)

摄像机姿态控制的最终目的是使目标位于图像中心 $[u_0 \ v_0]^T$, 即设计云台的旋转速度使得目标点在图像平面的位置 $[u(t) \ v(t)]^T \rightarrow [u_0 \ v_0]^T$. 为此, 定义如下的系统误差信号:

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(t) - u_0 \\ v(t) - v_0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

对式(16)求导、代入式(8)并整理, 可以得到如下的开环误差方程:

$$\dot{e} = J_{v1} \cdot v_1 + J_{w1} \cdot w_1 + J_{v0} \cdot v_0 + J_{wc} \cdot w_c. \quad (17)$$

本文以云台的角速度 $w_c = [\dot{\alpha} \ \dot{\beta}]^T$ 作为控制输入. 应该注意的是, 式(17)中的雅克比矩阵 J_{v1}, J_{w1} 和 J_{v0} 中均包含目标的深度信息 c_{z_3} , 该信号无法利用视觉传感器直接测得. 为此, 将利用目标的图像信息和坐标系之间的几何关系来计算目标点在摄像机坐标系下的深度 c_{z_3} . 将式(3)代入式(4)可以得到

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{c_{z_3}} M \left({}^c R_s^b R \begin{bmatrix} x_0 - x_1 \\ y_0 - y_1 \\ -z_1 \end{bmatrix} - {}^c R \begin{bmatrix} {}^b x_2 \\ {}^b y_2 \\ {}^b z_2 \end{bmatrix} \right). \quad (18)$$

对式(18)进行整理后,可以得到如下的三元一次方程组:

$$A(t) \cdot x(t) = b(t), \quad (19)$$

式中: $A(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $b(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 分别表示方程组的系数矩阵和常数项, $x(t) = [{}^c z_3 \ x_0 \ y_0]^T$ 为方程组的待求变量. 通过求解方程组(19)可以得到目标的深度信息 ${}^c z_3$ 的表达式为

$${}^c z_3 = \frac{\omega \cdot [{}^b x_2 \ {}^b y_2 \ {}^b z_2]^T - z_1}{g}, \quad (20)$$

其中辅助变量 $\omega \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$, $g \in \mathbb{R}$ 定义为:

$$\omega = -[0 \ 0 \ 1] \cdot {}^s_b R, \quad (21)$$

$$g = R_{13} a_x^{-1} e_1 + R_{23} a_y^{-1} e_2 + R_{33}. \quad (22)$$

式中: R_{ij} 表示矩阵 $R = {}^c_b R \cdot {}^b_s R$ 的第 i 行, 第 j 列元素. 将式(20)代入式(17), 并整理得到开环误差动态方程:

$$\dot{e} = \frac{Y \cdot {}^b p_2 + f_{v1}}{\omega \cdot {}^b p_2 - z_1} + f_{w1} + J_{v0} \cdot v_0 + J_{wc} \cdot w_c. \quad (23)$$

摄像机在机体坐标系下的安装位置 ${}^b p_2$ 为系统的未知参数, $Y \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$, $f_{v1}, f_{w1} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 的具体表达式为

$$\begin{cases} Y = g \cdot N_1(u, v) \cdot {}^c_b R \cdot S(w_1), \\ f_{v1} = g \cdot N_1(u, v) \cdot {}^c_b R \cdot v_1, \\ f_{w1} = N_2(u, v) \cdot {}^c_b R \cdot w_1. \end{cases} \quad (24)$$

由于旋转矩阵 ${}^s_b R$ 的每个元素的绝对值都小于1, 可以得到下面的不等式:

$$\begin{aligned} & \omega \cdot [{}^b x_2 \ {}^b y_2 \ {}^b z_2]^T - z_1 \geq \\ & -(|{}^b x_2| + |{}^b y_2| + |{}^b z_2|) - z_1, \end{aligned} \quad (25)$$

根据假设2, 可以进一步得到不等式:

$$\omega \cdot [{}^b x_2 \ {}^b y_2 \ {}^b z_2]^T - z_1 \geq c. \quad (26)$$

3.2 自适应控制律设计(Adaptive controller design)

对于方程(23)所描述的开环系统, 根据李雅普诺夫稳定性理论可以设计如下的自适应控制器:

$$\begin{aligned} w_c = J_{wc}^{-1} \cdot & \left(-\frac{Y \cdot {}^b \hat{p}_2 + f_{v1}}{\omega \cdot {}^b \hat{p}_2 - z_1} - \frac{\dot{\omega} \cdot {}^b \hat{p}_2 - \dot{z}_1}{2(\omega \cdot {}^b \hat{p}_2 - z_1)} e - \right. \\ & \left. f_{w1} - J_{v0} \cdot v_0 - K \cdot e \right), \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $K \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为对角正定控制增益矩阵, ${}^b \hat{p}_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 表示对未知参数 ${}^b p_2$ 的估计, 它们可以通过下面的式子进行在线更新:

$${}^b \dot{\hat{p}}_2 = \Gamma \cdot \text{proj}(\mu), \quad (28)$$

其中: $\Gamma \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定对角更新增益矩阵, $\mu \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 定义为:

$$\begin{aligned} \mu = & \left(-\frac{2\omega^T {}^b \hat{p}_2^T Y^T + 2\omega^T f_{v1}^T + (\dot{\omega}^T {}^b \hat{p}_2 - \dot{z}_1) \omega^T e^T}{2(\omega \cdot {}^b \hat{p}_2 - z_1)} + \right. \\ & \left. Y^T + \frac{\dot{\omega}^T e^T}{2} \right) \cdot e, \end{aligned} \quad (29)$$

函数 $\text{proj}(\mu)$ 定义如下^[14]:

$$\text{proj}(\mu) = \begin{cases} \mu, & {}^b \hat{p}_2 \in \text{int}(\Lambda), \\ \mu, & {}^b \hat{p}_2 \in \partial(\Lambda), \mu^T {}^b p_2^\perp \leq 0, \\ P_r^t(\mu), & {}^b \hat{p}_2 \in \partial(\Lambda), \mu^T {}^b p_2^\perp > 0. \end{cases} \quad (30)$$

其中: Λ 定义为 $\Lambda = \{{}^b \hat{p}_2(t) : \omega(t) \cdot {}^b \hat{p}_2(t) - z_1 \geq \varepsilon\}$, ε 为任意小于等于 c 的正常数. $\text{int}(\Lambda)$ 表示点集 Λ 的内部, $\partial(\Lambda)$ 表示点集 Λ 的边界; ${}^b p_2^\perp(t)$ 表示由原点指向 ${}^b p_2(t)$ 的向量在点 ${}^b p_2(t)$ 处垂直于 $\partial(\Lambda)$ 的分量, 正方向规定为由 $\text{int}(\Lambda)$ 向外. $P_r^t(\mu)$ 表示由原点指向 μ 的向量沿 $\partial(\Lambda)$ 在点 ${}^b p_2(t)$ 处切线方向的分量.

注 1 在参数更新律(28)中引入 $\text{proj}(\cdot)$ 函数是为了保证 $\omega(t) \cdot {}^b \hat{p}_2(t) - z_1 \geq \varepsilon$, 从而确保所设计的自适应控制器(27)没有奇异性.

注 2 在控制器(27)和参数更新律(28)中, 由于无法测得目标的运动速度 v_0 , 因此, 无法直接计算由目标运动引起的图像变化 $J_{v0} \cdot v_0$. 为此, 本文采用自校正 Kalman 滤波器对其进行在线估计^[12]. 该方法不仅对图像噪声具有一定的鲁棒性, 而且可以在一定程度上避免由视野遮挡引起的目标丢失现象.

3.3 稳定性分析(Stability analysis)

定理 1 自适应控制器(27)以及对应的参数更新律(28), 可以使目标在图像平面的位置渐进收敛到图像中心, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (31)$$

证 将自适应控制器(27)代入系统(23), 并进行整理后得到闭环方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & \frac{Y \cdot {}^b p_2 + f_{v1}}{\omega \cdot {}^b p_2 - z_1} - \frac{Y \cdot {}^b \hat{p}_2 + f_{v1}}{\omega \cdot {}^b \hat{p}_2 - z_1} - \\ & \frac{\dot{\omega} \cdot {}^b \hat{p}_2 - \dot{z}_1}{2(\omega \cdot {}^b \hat{p}_2 - z_1)} - K \cdot e. \end{aligned} \quad (32)$$

构造李雅普诺夫函数如下:

$$V(t) = \frac{1}{2} e^T (w^b p_2 - z_1) e + \frac{1}{2} {}^b \tilde{p}_2^T \Gamma^{-1} {}^b \tilde{p}_2, \quad (33)$$

式中 ${}^b \tilde{p}_2(t)$ 表示如下的参数估计误差:

$${}^b \tilde{p}_2(t) = {}^b p_2 - {}^b \hat{p}_2(t). \quad (34)$$

将式(33)对时间求导, 并将式(28)与式(32)代入其中, 经过整理后得到

$$\dot{V}(t) = \mu^T {}^b \tilde{p}_2 - {}^b \tilde{p}_2^T \text{proj}(\mu) - (w^b p_2 - z_1) e^T K e. \quad (35)$$

对于式(30)所定义的函数 $\text{proj}(\mu)$, 可以证明

$${}^b\tilde{p}_2^T \mu - {}^b\tilde{p}_2^T \text{proj}(\mu) \leq 0, \quad (36)$$

因此, 结合式(26), $\dot{V}(t)$ 可以进一步改写为

$$\dot{V}(t) \leq -(w^b p_2 - z_1) \cdot e^T K e \leq -ce^T K e. \quad (37)$$

根据式(33)和(37)可知, $V(t) \in L_\infty$, 且 $e(t), {}^b\tilde{p}_2(t) \in L_\infty$, 然后利用式(32) (34)和假设3可知 $\dot{e}(t), {}^b\dot{\tilde{p}}_2(t) \in L_\infty$. 令

$$f(t) = ce^T K e \geq 0,$$

则容易得到

$$\dot{f}(t) = 2ce^T K \dot{e} \in L_\infty,$$

所以由芭芭拉定理的推论^[15]可以证明

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

证毕.

注3 当目标由于地形等原因进行小幅度的三维运动时, 它在垂直方向的小幅度运动可以等效成无人机的高度变化来进行相应处理. 仿真测试表明本文所设计的控制策略对于目标在垂直方向上的小范围运动具有较强的鲁棒性.

4 仿真结果(Simulation results)

本文在MATLAB/Simulink下, 建立了基于视觉的无人机地面目标跟踪仿真系统, 并利用该系统对所设计的机载云台自适应跟踪控制器(27)的性能进行了测试. 实验中无人机以10 m的水平距离跟踪目标飞行, 且飞行高度保持在10 m. 为了模拟阵风对无人机飞行轨迹与姿态的影响, 在无人机运动学模型中加入了正弦扰动信号. 此外, 还加入了分布为(0, 10)的高斯噪声, 模拟由于图像处理引入的观测噪声. 仿真实验中, 目标与无人机的初始位置分别选为:

$$\begin{aligned} [x_0(0) \ y_0(0)]^T &= [12 \ 0]^T, \\ [x_1(0) \ y_1(0) \ z_1(0)]^T &= [0 \ 0 \ 10]^T. \end{aligned}$$

摄像机的初始姿态选为:

$$[\alpha(0) \ \beta(0)]^T = [0 \ -\frac{\pi}{4}]^T,$$

控制器的各个增益选择为:

$$K = \text{diag}\{2, 2\}, \Gamma = 0.1I_3.$$

式中: $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角阵, I_3 表示三阶单位阵. 在第1组仿真实验中, 目标首先沿X轴直线运动, 然后分别在时刻 $t = 20$ s和时刻 $t = 60$ s改变运动方向. 无人机的跟踪轨迹如图2所示. 图3记录了目标点与图像中心的偏差, 从该图可以看出, 跟踪过程中目标始终处在图像的中央区域. 图4则记录了系统参数在

线估计值的变化情况, 不难看出, 各个参数的估计值在一段时间后分别收敛到某一恒定值.

在第2组仿真实验中, 目标以s形向 45° 方向运动. 此时, 无人机的跟踪轨迹如图5所示, 相应的目标的图像坐标见图6. 从仿真结果可以看出, 即使在无人机与目标的相对位姿发生较大变化的情况下, 目标在图像平面的位置仍然被保持在图像的中心区域.

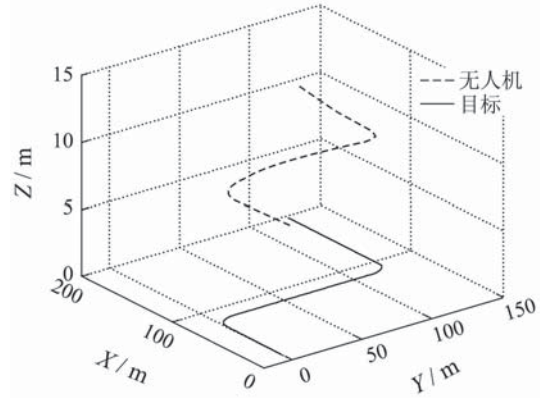


图2 无人机与目标的运动轨迹(第1组)

Fig. 2 The trajectory of the helicopter and target (first group)

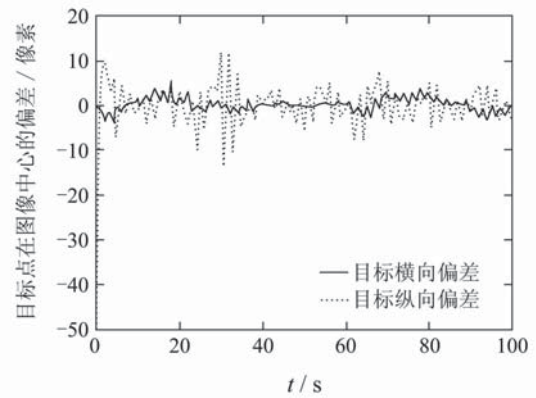


图3 目标的图像坐标(第1组)

Fig. 3 The pixel coordinates of the target (first group)

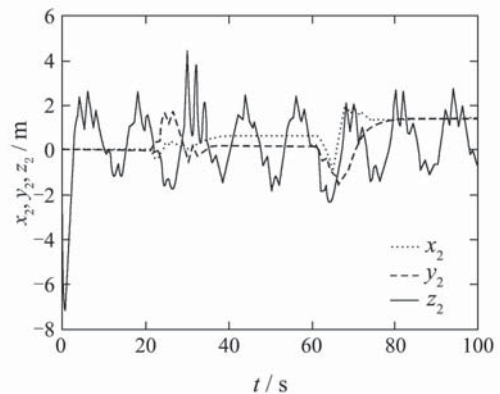


图4 系统参数在线估计(第1组)

Fig. 4 Estimation of system parameters (first group)

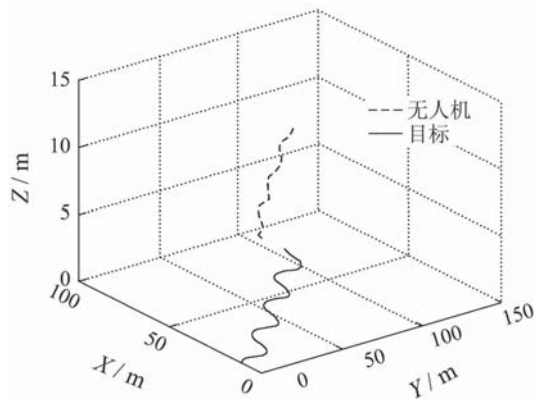


图5 无人机与目标的运动轨迹(第2组)

Fig. 5 The trajectory of the helicopter and target (second group)

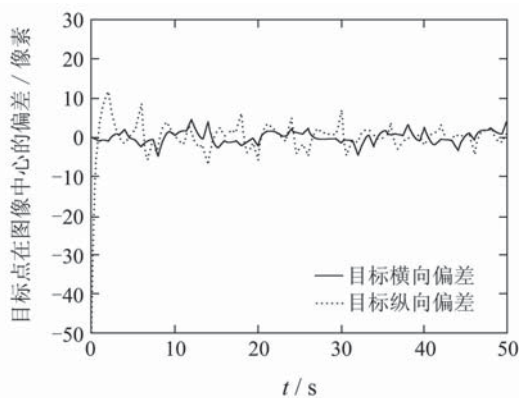


图6 目标的图像坐标(第2组)

Fig. 6 The pixel coordinates of the target (second group)

仿真结果表明, 本文所设计的云台跟踪控制器, 在摄像机外参数未知的情况下, 仍可以通过调整摄像机的姿态, 使得被跟踪目标保持在图像中心区域。

5 结论(Conclusion)

本文针对小型无人机地面目标跟踪系统, 提出了一种机载云台的自适应跟踪控制算法, 该算法在缺乏深度信息传感器和摄像机外参数未知的情况下, 利用图像信息和机载传感器获得的无人机状态实现了对云台摄像机姿态的控制, 使得无人机在跟踪目标飞行过程中, 地面目标可以始终保持在摄像机的图像中心。通过理论分析和仿真测试证实了这种机载摄像机姿态控制方法能够实现对动态目标的视觉跟踪。后续工作将对本文所设计的控制方法进行实验测试。

参考文献(References):

[1] DENEALD D, SCHINSTOCK D, LEWIS C. Tracking ground target with measurements obtained from a single monocular camera mounted on an unmanned aerial vehicle[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, USA: IEEE, 2008: 65 – 72.

- [2] ARIYUR K, FREGENE K, AUTONOMOUS. Tracking of a ground vehicle by a UAV[C] // *Proceedings of American Control Conference*. Washington, USA: IEEE, 2008: 669 – 671.
- [3] MARTIN S, NEWMAN A. The application of particle swarm optimization and maneuver automaton during non-markovian motion planning for air vehicles performing ground target search[C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France: IEEE, 2008: 2605 – 2610.
- [4] JUNG B, SUKHATME G. Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment[C] // *Proceedings of The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*. Amsterdam, Netherlands: IOS Press 2004. 980 – 987.
- [5] AMIDI O, KANADE T, FUJITA K. A visual odometer for autonomous helicopter flight[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, 28(2/3): 185 – 193.
- [6] SARIPALLI S, SUKHATME G S, MEJIAS L O, et al. Detection and tracking of external features in an urban environment using an autonomous helicopter[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 3972 – 3977.
- [7] LUIS M, SARIPALLI S, PASCUAL C. Visual servoing of an autonomous helicopter in urban areas using feature tracking[J]. *Field Robotics*, 2006, 23(3/4): 185 – 199.
- [8] SARIPALLI S, MONTGOMERY F J, SUKHATME G S. Visually-guided landing of an unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2005, 19(3): 371 – 381.
- [9] FREDA L, ORIOLO G. Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55(6): 419 – 432.
- [10] SAMSON C, ABDERRAHIM K. Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space[C] // *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Sacramento, California: IEEE, 1999: 1136 – 1141.
- [11] COUE C, BESSIERE P. Chasing an elusive target with a mobile robot[C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Hawaii, UAS: IEEE, 2001: 1370 – 1375.
- [12] TSAI C, SONG K, DUTOIT X, et al. Robust mobile robot visual tracking control system using self-tuning kalman filter[C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Florida, USA: IEEE, 2007: 161 – 166.
- [13] 辛哲奎, 方勇纯. 无人机地面目标跟踪系统的建模与控制[J]. 高技术通讯, 2009, 19(4): 398 – 403.
(XIN Zhekui, FANG Yongchun. Modeling and control for tracking ground target using an unmanned air vehicle[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2009, 19(4): 398 – 403.)
- [14] BEHAL A, SETLUR P, DIXON W E. Adaptive position and orientation regulation for the camera-in-hand problem[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2005, 22(9): 457 – 473.
- [15] KHALIL H K. *Nonlineair Systems*[M]. 3rd Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.

作者简介:

辛哲奎 (1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性系统控制、无人机飞行控制等, E-mail: xinzk@robot.nankai.edu.cn;

方勇纯 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 主要研究方向为复杂系统非线性控制、机器人视觉控制等, E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn;

张雪波 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性控制、机器人视觉伺服等, E-mail: zhangxb@robot.nankai.edu.cn.