

基于运动补偿的小型无人机云台控制器设计方法

李湘清¹, 孙秀霞¹, 彭建亮¹, 周新立²

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 中国人民解放军 95214 部队, 湖南 长沙 410007)

摘要:云台安装的摄像机可用于基于视觉的小型无人机目标跟踪与定位。分析了无人机平移和旋转运动对目标在图像平面成像的影响,推导出机体角速度与云台姿态角速度转换矩阵,设计基于运动补偿的云台控制器将无人机速度和机体角速度引入云台控制器输入,补偿因无人机运动引起的摄像机视线改变,并利用目标在图像平面的位置偏差修正摄像机跟踪误差。仿真实验表明所设计的云台控制器可提高目标跟踪精度,减少云台抖动。

关键词:运动补偿;云台控制器;无人机;摄像机

中图分类号: TP 242.6+2

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2011.02.29

Motion compensation based gimbal controller design for small UAV

LI Xiang-qing¹, SUN Xiu-xia¹, PENG Jian-liang¹, ZHOU Xin-li²

(1. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 95214 of the PLA, Changsha 410007, China)

Abstract: A gimballed camera can be used in vision-based target tracking and geolocation on small unmanned aerial vehicles (UAV). The effect of camera rotation and translation on target's image movement on an image plane is analyzed, the transfer matrix between UAV's body rates and gimbal attitude rates is inferred, a gimbal controller is designed which uses UAV's velocity and body rates as feedback to compensate camera's line-of-sight change, and the target's position on the image plane is used to correct the gimbal angle error. Simulation results show that the controller can improve tracking precision and eliminate gimbal vibration.

Keywords: motion compensation; gimbal controller; unmanned aerial vehicle (UAV); camera

0 引言

小型无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)视觉技术是当前研究热点问题之一,基于视觉的目标跟踪与定位研究中将视觉传感器如摄像机获得的信号作为反馈。云台安装的摄像机可用于基于视觉的 UAV 目标跟踪与定位中,通过调整旋转/倾斜(Pan/Tilt)姿态可改变摄像机视线,保持目标处于图像平面中心^[1]。利用计算机视觉技术提取目标在图像平面的位置,融合 UAV 位置、姿态及速度、云台姿态、摄像机参数等信息,可估算目标在三维空间的位置,进而估算目标运动速度、加速度、运动方向等状态信息,可用于侦察、目标监视等^[2-3]。

摄像机跟踪目标过程中,需要云台控制器实时调整摄像机旋转和倾斜角使目标处于图像平面中心区域。云台控制器设计可分为基于姿态的方法和基于图像的方法^[4];前者是估计问题与控制问题的结合,摄像机姿态通过视觉信息估算获得,闭环响应依赖姿态估计精度、摄像机校准误差及目标三维空间运动模型。后者设计控制器使目标在图像平面成像按预定方式移动,不需进行目标模型估算,对摄像

机校准和目标建模误差具有较强的鲁棒性,但要求较高的图像更新频率,适于地面机器人系统。针对 UAV 跟踪地面目标情形,文献[3]介绍了综合角速率陀螺反馈、GPS 前馈和目标图像位置反馈的云台控制方法,安装于云台上的角速率陀螺测量摄像机视线角速率,利用控制器修正角速率变化稳定摄像机并利用 GPS 前馈、目标图像位置反馈修正视线误差。

针对 UAV 跟踪目标过程中自身运动引起的摄像机视线变化,本文提出了一种基于 UAV 自身运动补偿的云台控制器设计方法,通过分析 UAV 飞行中平移和旋转运动对目标在图像平面成像的影响,推导出机体角速度与云台姿态角速度的关系,设计运动补偿云台控制器将 UAV 速度和机体角速度反馈引入云台控制回路,补偿因 UAV 自身运动引起的摄像机视线改变,并利用目标在图像平面的位置修正摄像机跟踪误差,仿真实验表明云台控制器可提高目标跟踪精度,减少云台抖动。

1 问题描述

1.1 坐标系定义

定义机体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$, 摄像机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$, 图像

平面 $o_c y_c z_c$ 。摄像机相对于 UAV 的姿态为 $\mathbf{x}_{\text{gim}} = [\psi_c, \theta_c]^T$, 如图 1 所示。

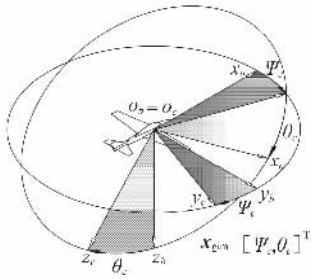


图 1 摄像机姿态定义

定义机体系到摄像机系的坐标转换顺序为 $o_b x_b y_b z_b \rightarrow z(\psi_c) \rightarrow y(\theta_c) \rightarrow o_c x_c y_c z_c$, 地面目标跟踪过程中, 摄像机通常指向 UAV 下方, 为表述方便, 图 1 中摄像机俯仰角 θ_c 的转动方向为沿 $o_c y_c$ 的反方向。假定摄像机系原点与机体系原点重合, 摄像机系到机体系的方向余弦阵 \mathbf{R}_{cb} 为

$$\mathbf{R}_{cb} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 & \sin \theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_c & 0 & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_c & 0 & \sin \psi_c \\ -\sin \psi_c & 0 & \cos \psi_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c \cos \psi_c & \cos \theta_c \sin \psi_c & \sin \theta_c \\ -\sin \psi_c & \cos \psi_c & 0 \\ -\sin \theta_c \cos \psi_c & -\sin \theta_c \sin \psi_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

摄像机坐标系中点 $\mathbf{P}_i = [x_i^c, y_i^c, z_i^c]^T$ 在图像平面上的投影坐标为 $\mathbf{P}_i = [y_i, z_i]^T$, 如图 2 所示, 其中 f 为焦距, 则

$$\begin{bmatrix} y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \frac{f}{x_c} \begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

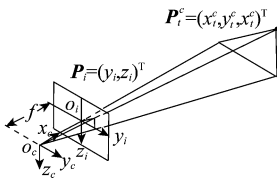


图 2 目标投影模型

1.2 舵机建模

当前小型舵机多采用脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号作为控制指令, 其角度响应可表示为^[5]

$$\frac{d\theta_a(t)}{dt} = \tau \cdot [\theta_{a_cmd}(t) - \theta_a(t)] \quad (3)$$

由上述方程, 有

$$\theta_a(t) = \frac{\tau \cdot dt \cdot \theta_{a_cmd}(t) + \theta_a(t - dt)}{1 + \tau \cdot dt} \quad (4)$$

式中, $\theta_a(t)$ 为舵机当前角度; $\theta_{a_cmd}(t)$ 为指令角度; τ 为时间常数; dt 为采样时间。仿真可得 $\theta_a(t)$ 指数趋向于 $\theta_{a_cmd}(t)$ 。

1.3 摄像机运动对目标在图像平面成像的影响

摄像机跟踪目标过程中, 摄像机与目标间的相对运动可抽象为平移和旋转两类。平移运动对目标在图像成像的影响^[6]如图 3 所示。

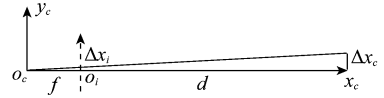


图 3 平移运动对目标在图像平面成像的影响

当目标与摄像机系原点距离为 d 、目标平移 Δx_c 时, 目标成像在图像平面的位移 Δx_i 为

$$\Delta x_i = \frac{f}{d} \Delta x_c \quad (5)$$

旋转运动对于目标在图像平面成像的影响^[6]如图 4 所示。

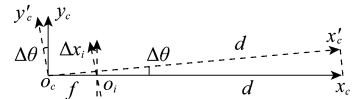


图 4 旋转运动对目标在图像平面成像的影响

摄像机绕光轴旋转 $\Delta \theta$ 角度时, 目标成像在图像平面的位移 Δx_i 为

$$\Delta x_i = -\frac{f}{d} \cdot d \cdot \Delta \theta = -f \Delta \theta \quad (6)$$

例如, 对于分辨率为 640 像素 \times 480 像素、视角为 30° 的摄像机, 当摄像机旋转角速度为 $5^\circ/\text{s}$ 时, 距离 $d = 300 \text{ m}$ 的目标在图像平面的移动速度为 104.5 像素/s, 与平移速度为 26.2 m/s 时产生的影响相当, 可见摄像机自身平移和旋转运动将引起较大的视线变化。

2 运动补偿云台控制器设计

2.1 机体角速度与云台姿态角速度关系

UAV 机体角速度 $[p, q, r]^T$ 与引起的云台姿态角速度 $[\dot{\phi}_c, \dot{\theta}_c, \dot{\psi}_c]^T$ 间关系为^[7]

$$\begin{aligned} p &= \dot{\phi}_c \cos \theta_c \cos \psi_c + \dot{\theta}_c \sin \psi_c \\ q &= \dot{\phi}_c \cos \theta_c \sin \psi_c - \dot{\theta}_c \cos \psi_c \\ r &= \dot{\phi}_c \sin \theta_c + \dot{\psi}_c \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\dot{\phi}_c$ 为机体角速度引起的摄像机系“虚拟”滚转角速度, $\phi_c = 0$, 沿 $o_c x_c$ 轴方向, 表现为图像的旋转, 由于摄像机不具备绕 $o_c x_c$ 轴的自由度, 这一角速度不能通过云台补偿修正。由式(7)得

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_c \\ \dot{\theta}_c \\ \dot{\psi}_c \end{bmatrix} = \boldsymbol{\omega}_{cb} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中

$$\boldsymbol{\omega}_{cb} = \begin{bmatrix} \cos \psi_c / \cos \theta_c & \sin \psi_c / \cos \theta_c & 0 \\ \sin \psi_c & -\cos \psi_c & 0 \\ -\tan \theta_c \cos \psi_c & -\tan \theta_c \sin \psi_c & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 机体运动对视线的影响

(1) 机体平移运动对视线的影响: UAV 空速为 V_a 、迎角为 α 、侧滑角为 β , 当机体系中目标到 UAV 的向量为 $[D_x, D_y, D_z]^T$ 时, 机体速度引起的机体系视线角速度为

$$\begin{bmatrix} p_{1c} \\ q_{1c} \\ r_{1c} \end{bmatrix} = -\mathbf{R}_{lm} \begin{bmatrix} V_a \sin \beta / D_y \\ V_a \sin \alpha \cos \beta / D_z \\ V_a \cos \alpha \cos \beta / D_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

(2) 机体旋转运动对视线的影响: 机体角速度为 $[p, q, r]^T$ 时引起的视线角速度为

$$\begin{bmatrix} p_{2c} \\ q_{2c} \\ r_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (10)$$

综上, 机体运动引起的机体系视线角速度为

$$[p_c, q_c, r_c]^T = [p_{1c}, q_{1c}, r_{1c}]^T + [p_{2c}, q_{2c}, r_{2c}]^T \quad (11)$$

2.3 云台控制指令

二自由度云台可作旋转和倾斜运动, 通过云台补偿机体运动引起的对于摄像机系 $o_c y_c, o_c z_c$ 轴方向角速度, 由式(8)有

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_c \\ \dot{\psi}_c \end{bmatrix} = -\boldsymbol{\omega}_{ob} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ r_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

当目标在图像平面位置为 $[d_y, d_z]^T$ 时, 摄像机分辨率为 $p_y \times p_z$ 且视角分别为 λ_y, λ_z , 为使目标处于图像平面的中心, 云台应旋转角度为

$$\begin{bmatrix} d\theta_c \\ d\psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{2 \tan (\gamma_z / 2) dz}{p_z \sqrt{1 + \tan^2 d\psi}} \\ \arctan \frac{2 \tan (\gamma_y / 2) dy}{p_y} \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用 UAV 自身惯性传感器感知机体角速度, 采样时间为 Δt_i , 则有云台控制器输入指令为

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_c \\ \Delta \psi_c \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} \dot{\theta}_c \\ \dot{\psi}_c \end{bmatrix} \Delta t_i + k_2 \begin{bmatrix} d\theta_c \\ d\psi_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $k_1 > 0, k_2 > 0$ 。

2.4 运动补偿云台控制器设计

将 UAV 速度和角速度作为云台控制器输入, 设计基于比例-积分非零设定点 (proportional integral non-zero set point, PI-NZSP)^[5] 的云台控制器如图 5 所示, 其中 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_3, \mathbf{H}$ 为比例反馈系数, \mathbf{K}_2 为积分系数, \mathbf{K}_3 由式(7)~式(14)计算, 增益矩阵 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{E}$ 的求解采用基于线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 的设计方法。

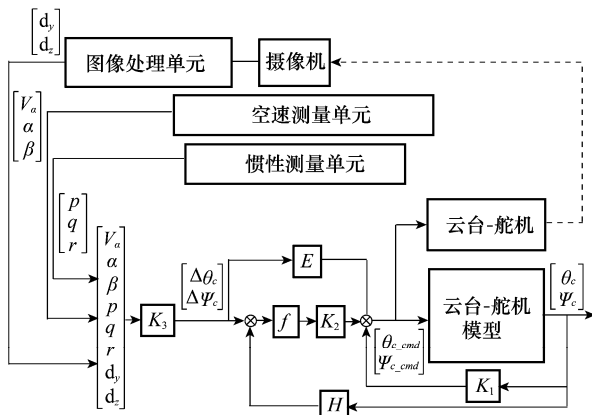


图 5 PI-NZSP 云台控制器^[5]

建立云台状态空间模型, 其中, $\mathbf{x} = [\theta_c, \psi_c]^T, \mathbf{u} = [\theta_{c_cmd}, \psi_{c_cmd}]^T$ 。

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\tau & 0 \\ 0 & -\tau \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \tau & 0 \\ 0 & \tau \end{bmatrix} \mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (15)$$

利用 Matlab 离散化函数, 采样时间为 T_s ,

$$[\Phi, \Gamma] = c2d(\mathbf{A}, \mathbf{B}, T_s) \quad (16)$$

定义

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \Phi - \mathbf{I} & \Gamma \\ \mathbf{H} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{H} = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。令 $\mathbf{P}^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{II}_{11} & \mathbf{II}_{12} \\ \mathbf{II}_{21} & \mathbf{II}_{22} \end{bmatrix}, \text{得}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{II}_{11} + \mathbf{II}_{12} \quad (18)$$

控制系统的离散增益 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 运用 $\text{lqr}(\cdot)$ 函数计算为^[5]

$$[\mathbf{K}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{M}, \mathbf{S}, \mathbf{E}] = \text{lqr}(a, b, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N}, T_s) \quad (19)$$

式中, $a = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{N}$ 为状态向量 \mathbf{x} 与控制量 \mathbf{u} 的相关矩阵, 这里定义为 2×2 的零矩阵。加权矩阵 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}, \mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \mid \mathbf{K}_2]$$

$\tau = 20$ 时, 选择加权矩阵为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

得增益矩阵

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.168 & 6 & 0 & 0 \\ & 0.168 & 6 & 0 \\ & & 0 & 0.003 \\ & & & 0 & 0.003 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.003 & 0 \\ 0 & 0.003 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1.168 & 6 & 0 \\ & 0 & 1.168 & 6 \end{bmatrix}$$

3 仿真实验

仿真过程假定摄像机安装于 UAV 重心位置。保持地速 20 m/s 平飞, 与目标相对高度为 150 m^[5,8], 采用文献[9-11]中的目标跟踪航向控制律。仿真过程为 100 s, 采样周期 0.01 s, 图像处理获得目标位置的过程中, 延迟时间为 0.1 s, 更新频率为 4 Hz, 假定目标在图像平面的位置估算存在零均值、方差为 1 的白噪声干扰, 目标在图像平面的位置分辨率为 0.5 像素。云台控制器更新频率为 20 Hz, 角度指令分辨率为 0.112°, 云台旋转角范围为 $(-170^\circ, 170^\circ)$, 倾斜角范围为 $(-10^\circ, 90^\circ)$, $k_1 = k_2 = 1$ 。摄像机分辨率为 640×480 像素、视角为 30° , UAV 跟踪目标的二维平面运动轨迹如图 6 所示。图 7 为 UAV 飞行过程中滚转角和航向角变化, 由于 UAV 绕目标作顺时针盘旋飞行, 航向角在 $[0^\circ, 360^\circ)$ 范围内连续变化。

图 8 和图 9 分别为 70 s~80 s 时 UAV 跟踪地面目标时引入运动补偿前后的云台旋转角、倾斜角及对应误差对比, 其中虚线为未加入运动补偿时的情形, 实线为加入运动补偿后的情形。无运动补偿情形下, 将目标在图像平面的偏差直接转换为云台控制指令, 这时云台出现抖动, 将引起图像模糊。

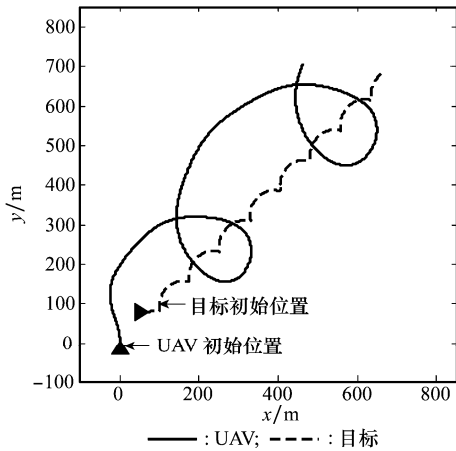


图 6 UAV 跟踪目标的二维平面轨迹

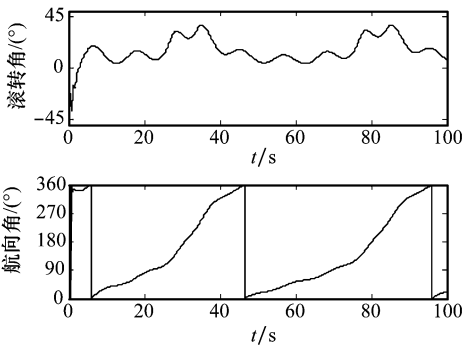


图 7 UAV 滚转角及航向角变化

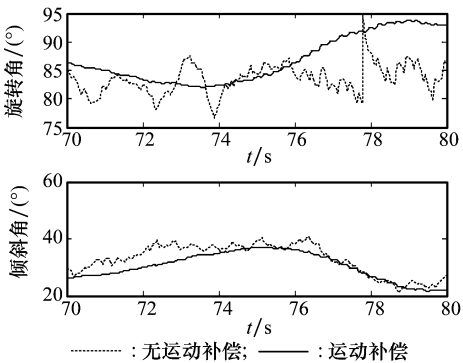


图 8 引入运动补偿前后云台角度对比

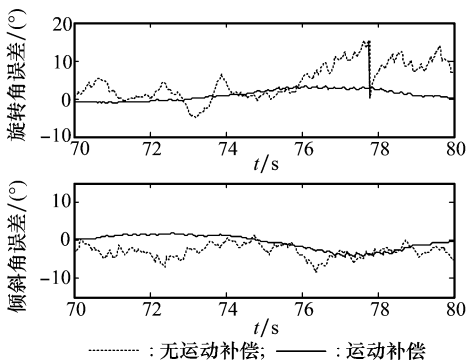


图 9 引入运动补偿前后云台角度误差对比

上述仿真实验可看出,PI-NZSP 云台控制器引入 UAV 速度与角速度补偿后,减小了连续目标跟踪过程中图象处理延迟、UAV 航向变化及滚转角抖动等因素对摄像机目标跟踪的影响,云台俯仰、倾斜角度为连续变化,同时提高了跟踪精度。

4 结 论

本文提出了一种基于运动补偿的摄像机云台控制器设计方法,设计了 PI-NZSP 云台控制器抵消目标跟踪过程中 UAV 自身运动对于摄像机视线的影响,仿真表明这一控制器一方面减少了目标跟踪过程中摄像机抖动,目标跟踪过程中云台平稳转动使摄像机图像清晰,有利于图像处理及目标检测,另一方面提高了目标跟踪精度,目标与图像平面中心的偏差减小。

参考文献:

[1] Campbell M, Wheeler M. A vision based geolocation tracking system for UAVs[C]// *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006.

[2] Campbell M, Whitacre W. Cooperative tracking using vision measurements on seascan UAVs[J]. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2007, 15(4): 613 - 626.

[3] Wheeler M, Wise R, Rysdyk R, et al. Autonomous cooperative geolocation and coordinated tracking of moving targets[C]// *Proc. of AIAA Infotech and Aerospace Conference and Exhibit*, 2007.

[4] Hamel T, Mahony R. Image based visual servo control for a class of aerial robotic systems [J]. *Journal of Automatica*, 2007, 43(1): 1975 - 1983.

[5] Crawford B. Design and evaluation of an autonomous, obstacle avoiding, flight control system using visual sensors[D]. USA: University of Kansas, 2004.

[6] 丁卫. 基于超小型无人机的地面目标实时图像跟踪[D]. 上海: 上海大学, 2007. (Ding W. Real time video tracking the ground object from a subminiature unmanned aerial vehicle[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.)

[7] Uy-Loi L. *Stability and control of flight vehicle*[M]. Washington: University of Washington, 1997.

[8] Li Z Y, Dobrokhodov V, Xargay E, et al. Development and implementation of L1 gimbal tracking loop Inboard of small UAV[C]// *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2009.

[9] Wang I, Dobrokhodov V, Kammer I I, et al. On vision-based target tracking and range estimation for small UAVs[C] // *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2005.

[10] Dobrokhodov V, Kammer I, Jones K. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVS [C] // *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006.

[11] Ma L L, Cao C Y, Hovakimyan N, et al. Adaptive vision-based guidance law with guaranteed performance bounds[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(3): 834 - 852.