

风场情形基于视觉的无人机地面 目标跟踪控制律设计

李湘清^{1,2}, 孙秀霞¹, 彭建亮³

(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 410009;
3. 中国人民解放军 95588 部队, 陕西 西安 710078)

摘要: 分析了风场对无人机航迹角的影响, 定义空速、风速、目标运动速度的合向量为参考速度, 将风场情形运动目标跟踪问题转化为以参考速度跟踪静止目标的情形。在静止目标跟踪航向控制律基础上, 设计了一种风场情形基于参考速度的无人机地面目标跟踪航向控制律, 使参考速度与摄像机视线垂直且无人机与目标水平距离为指定值。不同风速条件下的目标跟踪仿真验证了控制律的有效性。

关键词: 目标跟踪; 风场; 无人机; 视觉

中图分类号: TP 242.6+2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.11.23

Guidance law design for vision-based unmanned aerial vehicle ground target tracking in wind

LI Xiang-qing^{1,2}, SUN Xiu-xia¹, PENG Jian-liang³

(1. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. 95214 Unit of PLA, Changsha 410009, China;
3. 95588 Unit of PLA, Xi'an 710078, China)

Abstract: The influence of wind on UAV's track angle is analysed. A reference velocity is defined as the combination of airspeed vector, wind and target velocity, and the moving target tracking in wind is transformed into static target tracking with a reference velocity, a new guidance law is designed for UAV ground target tracking in wind based on the static target tracking guidance law, which makes the reference velocity be perpendicular to the camera line-of-sight and maintains a designed horizontal distance between UAV and target. The guidance law is validated by target tracking simulation with different wind speeds.

Keywords: target tracking; wind; unmanned aerial vehicle; vision

0 引言

基于视觉的无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)地面目标跟踪可表述为如下过程: 利用摄像机获取目标图像; 检测目标并提取在目标图像平面坐标; 融合 UAV 状态、摄像机姿态、目标在图像平面坐标等估算目标在三维空间位置、速度、运动方向等; 调整 UAV 航向和云台姿态使目标处于摄像机视野内。上述过程重复进行以实现 UAV 对目标的连续跟踪。

对于有风情形的目标跟踪问题, 文献[1]中将风速与目标运动速度的合速度视为目标速度, 控制律引入 UAV 转弯角速率和速度限制, 设计多架 UAV 跟踪同一目标时的协同机制, 但未考虑目标加速度、转弯角度率等, 适于静止

或匀速运动目标跟踪的情形。文献[2]中设计目标跟踪控制律使摄像机视线(line-of-sight, LOS)在 UAV 转弯过程中保持指向地面指定位置, 可用于摄像机固定于 UAV 机体时的目标跟踪, 摄像机安装于云台上时这一控制律可减少云台转动, 提高摄像机图像质量, 适于有风情形下的静止目标跟踪。地面目标跟踪时, 除考虑 UAV 机动限制外, 需保持 UAV 与目标的距离在一定范围内, 文献[3]对利用 LOS 及 UAV 位置、速度、运动方向进行 UAV 与目标之间距离估算进行了研究。文献[4-7]对无风情形地面运动目标跟踪问题进行了详细探讨, 将目标运动速度和运动方向作为 UAV 航向控制律输入, 可实现运动目标跟踪并保持与目标的距离为指定值。文献[8-9]建立了基于 Serret-Frenet 坐标系的目标跟踪航迹控制模型, 提出了一种“优秀舵手”UAV 航

向控制律,可实现多架 UAV 协同跟踪地面运动目标,文献[10-18]对协同目标跟踪时的航向控制律进行了研究。

小型 UAV 跟踪地面目标时通常飞行速度较低,风场影响使航迹角发生变化。本文通过分析风场对 UAV 航迹角的影响,定义空速、风速、目标运动速度的合向量为参考速度,将风场条件运动目标跟踪问题转化为以参考速度跟踪静止目标的情形,在静止目标跟踪航向控制律基础上,设计了一种风场情形基于参考速度的 UAV 地面目标跟踪航向控制律,使参考速度与摄像机视线垂直且 UAV 与目标水平距离为指定值。不同风速条件下的目标跟踪仿真验证了控制律有效性。

1 问题描述

1.1 二维平面运动目标跟踪问题建模

无风情形基于视觉的二维平面目标跟踪问题建模如图 1 所示^[4-5,14,19-21]。摄像机指向目标时,LOS 为摄像机到目标的向量,定义视线角 λ 为 LOS 与 $o_n x_n$ 轴的夹角在二维平面 $o_n x_n y_n$ 的投影。 V_t 为目标速度, ψ_t 为目标运动方向, ρ 为 UAV 与目标的水平距离。假定摄像机能实时跟踪目标并使目标处于图像平面中心,此时 LOS 与摄像机光轴重合。无风情形下,UAV 平飞时空速向量 V_a 与地速向量 V_g 相等,此时航向 ψ 与航迹角 χ 相同。

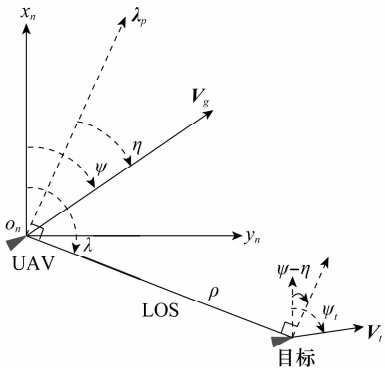


图 1 二维平面运动目标跟踪建模

UAV 绕目标作顺时针圆周运动时,定义 η 为向量 V_g 与 LOS 垂线向量 λ_p 的夹角,表达式为

$$\eta = \psi - (\lambda - \pi/2) \quad (1)$$

将 UAV 和目标速度向量投影至与 LOS 垂直的方向,得视线角速度为

$$\lambda = \frac{V_g \cos \eta - V_t \cos [\psi_t - (\psi - \eta)]}{\rho} \quad (2)$$

由式(1)的导数有

$$\eta = -\frac{V_g \cos \eta - V_t \cos [\psi_t - (\psi - \eta)]}{\rho} + \psi \quad (3)$$

UAV 与目标 LOS 方向相对速度为

$$\rho = -V_g \sin \eta + V_t \sin [\psi_t - (\psi - \eta)] \quad (4)$$

式(3)、式(4)即为目标跟踪问题的二维平面动力学方程。目标跟踪问题控制输入为 UAV 航向角速度 $\dot{\psi}$,控制目

标是使状态 $\eta(t) \rightarrow 0, \rho(t) \rightarrow \rho_d, \rho_d$ 为 UAV 与目标的二维指定距离。

由式(3),UAV 跟踪静止目标时航向控制律可写为^[3]

$$\dot{\psi} = \frac{V_g}{\rho_d} \cos \eta - K\eta \quad (5)$$

式中, $k > 0$ 。采用上述控制律跟踪静止目标时,UAV 将以目标为中心作圆周运动,与目标距离趋向于 ρ_d ,转弯角速率为 V_g/ρ_d 。该控制律亦适于运动目标跟踪且 V_t, ψ_t, ρ 未知的情形^[7,20],但仿真发现此时 η 变化范围较大, ρ 难以收敛,文献[20]对上述运动目标跟踪控制律进行了改进。

1.2 风场对 UAV 航迹的影响

UAV 空速向量 V_a 与地速向量 V_g 及风速向量 V_w 的关系如图 2 所示^[22-24],其中, ψ 为 UAV 航向, χ 为 UAV 航迹角, ψ_w 为风向。

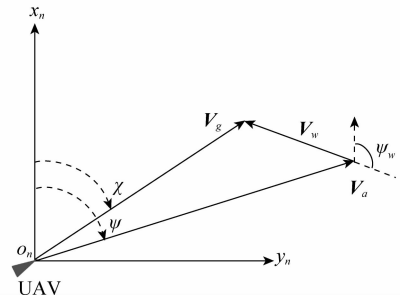


图 2 风场对 UAV 航迹的影响

风场使 UAV 航迹相对于航向发生变化,由图 2 有

$$V_a + V_w = V_g \quad (6)$$

在导航系中,有

$$V_a \cos \psi - V_w \cos \psi_w = -V_g \cos \chi$$

$$V_a \sin \psi - V_w \sin \psi_w = -V_g \sin \chi \quad (7)$$

由式(7)有

$$\tan \chi = \frac{V_a \sin \psi - V_w \sin \psi_w}{V_a \cos \psi - V_w \cos \psi_w} \quad (8)$$

为获得航迹角速度 $\dot{\chi}$ 与航向角速度 $\dot{\psi}$ 的关系,对式(8)求导, $V_a = 0$ 时,风场条件下 ψ 与 χ 的关系为^[2,6,23]

$$\frac{\dot{\chi}}{\dot{\psi}} = \frac{\cos^2 \chi [1 - V_w/V_a \cos (\psi - \psi_w)]}{(\cos \psi - V_w/V_a \cos \psi_w)^2} \quad (9)$$

由上式可知,风场情形下航迹角速度与航向角速度之间为非线性关系,为使 UAV 跟踪指定航迹,指令航向角速度需考虑当前风向和风速的影响。

2 风场情形的控制律

2.1 参考速度向量定义

风场情形下,将空速向量 V_a 、目标速度向量 V_t 、风速向量 V_w 的合向量定义为 UAV 相对于目标的参考速度向量 V_r ^[4],如图 3 所示,则

$$V_r = V_g - V_t = V_a + V_w - V_t \quad (10)$$

在 $o_n x_n, o_n y_n$ 方向,有

$$\begin{aligned} V_r \cos \psi_r &= V_a \cos \psi - V_t \cos \psi_t + V_w \cos \psi_w \\ V_r \sin \psi_r &= V_a \sin \psi - V_t \sin \psi_t + V_w \sin \psi_w \end{aligned} \quad (11)$$

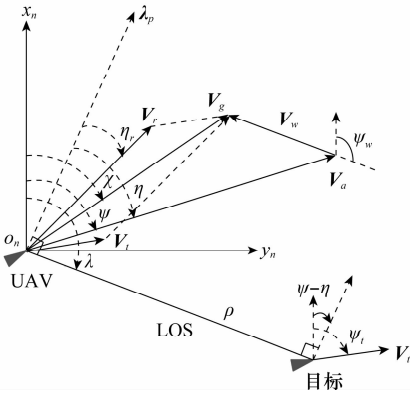


图 3 风场情形下目标跟踪参考速度定义

由式(11)有

$$\tan \psi_r = \frac{V_a \sin \psi - V_t \sin \psi_t + V_w \sin \psi_w}{V_a \cos \psi - V_t \cos \psi_t + V_w \cos \psi_w} \quad (12)$$

对式(12)求导,当 $V_a = V_t = V_w = 0, \psi_t = \psi_w = 0$ 时,得航向角速度 $\dot{\psi}$ 与参考速度向量的角速度 $\dot{\psi}_r$ 的关系为

$$n = \frac{\dot{\psi}_r}{\dot{\psi}} = \frac{V_a^2 - V_a [V_t \cos(\psi - \psi_t) + V_w \cos(\psi - \psi_w)]}{V_r^2} \quad (13)$$

风速、风向不变且 UAV 空速保持不变飞行时,参考速度向量的角速度与航向角速度的关系受当前风场及目标运动速度影响。风场条件下的运动目标跟踪问题可视为 UAV 以参考速度向量 V_r 跟踪静止目标的情形。

2.2 风场情形基于参考速度的控制律

将向量 V_a, V_t, V_w 分别投影至 LOS 方向和与 LOS 垂直方向,有

$$\begin{cases} V_r \cos \eta_r = V_a \cos \eta - V_t \cos [\psi_t - (\psi - \eta)] + V_w \cos [\psi_w - (\psi - \eta)] \\ V_r \sin \eta_r = V_a \sin \eta - V_t \sin [\psi_t - (\psi - \eta)] + V_w \sin [\psi_w - (\psi - \eta)] \end{cases} \quad (14)$$

式中, η 定义为向量 V_a 与 λ_p 夹角。由式(14)得

$$\tan \eta_r = \frac{V_r \sin \eta_r}{V_r \cos \eta_r} \quad (15)$$

对式(15)求导,得

$$\dot{\eta}_r = \dot{\eta} \quad (16)$$

将式(14)代入式(3)、式(4),有^[3]

$$\dot{\eta}_r = -\frac{V_r}{\rho} \cos \eta_r + \dot{\psi}_r \quad (17)$$

$$\dot{\rho} = -V_r \sin \eta_r \quad (18)$$

采用式(5)的静止目标跟踪控制律,参考速度向量的期望角速度为

$$\dot{\psi}_r = \frac{V_r}{\rho_d} \cos \eta_r - k \eta_r \quad (19)$$

由式(13)航向角速度 $\dot{\psi}$ 与参考速度角速度 $\dot{\psi}_r$ 的关系,风场情形基于参考速度的 UAV 航向控制律为

$$\dot{\psi} = \frac{1}{n} \dot{\psi}_r = \frac{1}{n} \left(\frac{V_r}{\rho_d} \cos \eta_r - k \eta_r \right) \quad (20)$$

式中, n 由式(13)计算。

2.3 稳定性分析

将式(19)代入式(17)可得

$$\dot{\eta}_r = \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho} \right) V_r \cos \eta_r - k \eta_r \quad (21)$$

定义如下 Lyapunov 函数^[4]

$$V(\eta_r, \rho) = 1 - \frac{\rho}{\rho_d} e^{(1-\frac{\rho}{\rho_d})} \cos \eta_r \quad (22)$$

当 $\eta_r \in (-\pi/2, \pi/2), \rho \in (0, \infty)$ 时, $V(\eta_r, \rho) \geq 0$, 且当且仅当 $\eta_r = 0, \rho = \rho_d$ 时 $V(\eta_r, \rho) = 0$ 。对上式求导并将式(18)、式(21)代入,得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\eta_r, \rho) &= -\frac{1}{\rho_d} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d} \right) \cos \eta_r e^{(1-\frac{\rho}{\rho_d})} \rho + \\ &\frac{\rho}{\rho_d} \sin \eta_r e^{(1-\frac{\rho}{\rho_d})} \dot{\eta}_r = -k \frac{\rho}{\rho_d} \sin \eta_r e^{(1-\frac{\rho}{\rho_d})} \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)可知:当 $k > 0, \eta_r \in (-\pi/2, \pi/2)$ 时,因 $\rho_d > 0, \rho > 0$, 故 $\dot{V}(\eta_r, \rho) \leq 0$ 。当且仅当 $\eta_r = 0$ 时 $\dot{V}(\eta_r, \rho) = 0$, 则 $(\eta_r = 0, \rho = \rho_d)$ 为渐近稳定平衡点^[4]。

综上,当 UAV 航向角速度为式(20)时,风场情形的目标跟踪控制律是渐近稳定的, V_r 将与 LOS 垂直, UAV 与目标距离 $\rho \rightarrow \rho_d$ 。

3 仿真实验

仿真过程中不考虑风场对 UAV 姿态、速度的影响,假定自动驾驶仪能够保持 UAV 稳定飞行,忽略 UAV 和目标的高度变化。初始条件定义如下:时间(单位:s) $t = (0, 100)$, UAV 空速 $V_a = 25$ m/s, 离地高度 150 m, 初始航向 $\psi(0) = (\pi/6)$ rad。定义两种目标运动模式:① 直线运动 $V_t(t) = 10$ m/s, $\psi_t(t) = (\pi/3)$ rad; ② 曲线运动 $V_t(t) = (10 + 5 \cos(\pi t/5))$ m/s, $\psi_t(t) = (\cos(\pi t/5))$ rad。UAV 和目标初始位置(单位:m)分别为: $P_u^0 = (100, -100, 150), P_t^0 = (0, 0, 0)$, 定义两种情形的风速:① $V_w = 5$ m/s, $\psi_w = (\pi/3)$ rad; ② $V_w = 10$ m/s, $\psi_w = (3\pi/4)$ rad。选择 $\rho_d = 150$ m, $k = 0.75$ 。

图 4、图 5 分别为 UAV 跟踪匀速运动目标和变速运动目标时的二维平面轨迹。其中,粗线为本文算法仿真结果,控制律考虑风场影响时的情形,细线为相同控制律条件下未考虑风场影响的情形。由图可见, UAV 以当前时刻目标位置为圆心绕目标作顺时针圆周运动,不同风速和风向时,由于地速差异, UAV 跟踪目标时的二维平面运动轨迹不同。

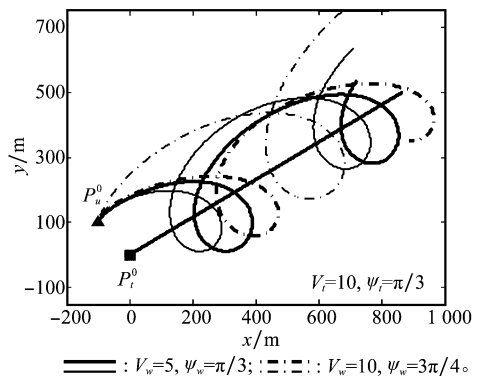


图 4 UAV 跟踪匀速运动目标的二维平面轨迹

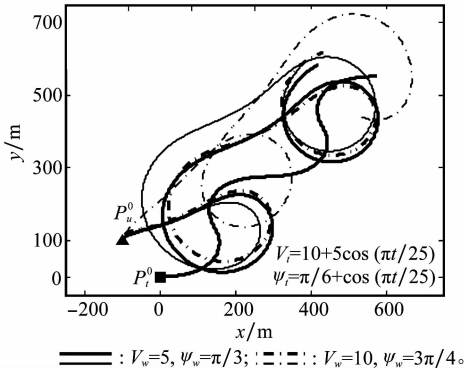


图 5 UAV 跟踪变速运动目标的二维平面轨迹

图 6 为目标跟踪过程中 UAV 与目标水平距离 $\rho(t)$ 变化。仿真实验表明,本文控制律可实现 $\rho(t)$ 在有风情形下保持在指定范围内,而未考虑风场影响时 $\rho(t)$ 变化幅度较大,不能收敛。

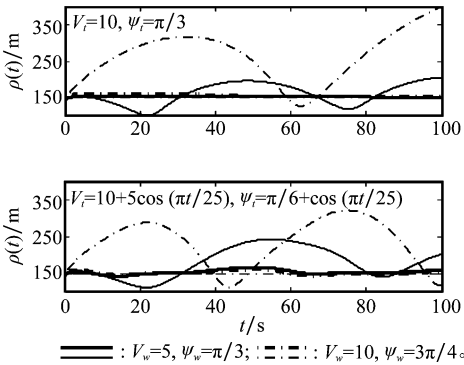


图 6 UAV 跟踪目标时 $\rho(t)$ 变化

图 7、图 8 分别为目标跟踪过程中 $\eta(t)$ 、 $\eta_r(t)$ 变化。由图可见,风场、目标运动等因素使 $\eta(t)$ 振荡,UAV 纵轴与 LOS 的夹角将连续变化,表现为目标跟踪过程中摄像机在一定范围内连续调整 LOS,以保持目标处于图像平面内。仿真过程中 $\eta_r(t) \rightarrow 0$,表现为参考速度向量与 LOS 垂直。

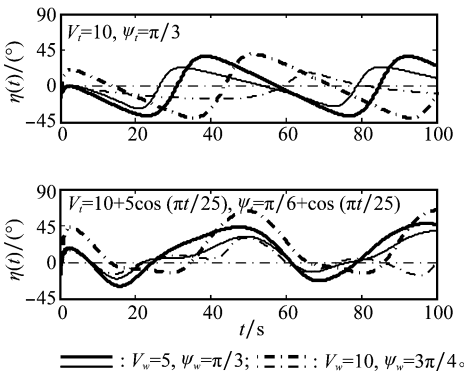


图 7 UAV 跟踪目标时 $\eta(t)$ 变化

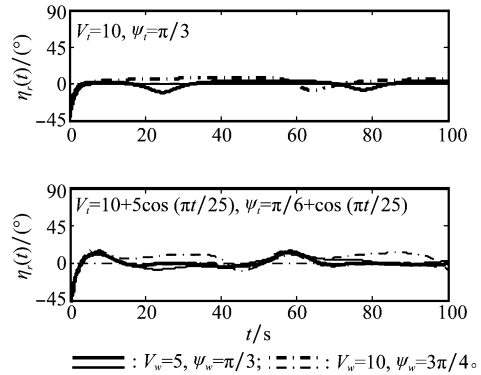


图 8 UAV 跟踪目标时 $\eta_r(t)$ 变化

4 结 论

针对风场条件下基于视觉的 UAV 地面目标跟踪问题,通过分析风场对 UAV 航迹的影响,将风速、目标速度与 UAV 当前空速的合向量作为参考速度,设计风场情形目标跟踪控制律使参考速度向量与 LOS 垂直,UAV 与目标水平距离趋向于指定值。稳定性分析和对比仿真实验验证了本文提出的航向控制律的有效性。

UAV 实际飞行过程中,风对目标跟踪精度具有较大影响,本文提出的基于参考速度的目标跟踪航向控制律能够在不同风速条件下跟踪地面运动目标,是基于视觉的 UAV 目标跟踪控制律的扩展。本文研究中未涉及目标跟踪过程中 UAV 高度、空速控制律,后续研究中还有待完善。

参考文献:

- [1] Kingston D, Beard R. UAV splay state configuration for moving targets in wind[C]// *Proc. of the Advance in Cooperative Control and Optimization*, 2007:109 - 128.
- [2] Rysdyk R. Unmanned aerial vehicle path following for target observation in wind[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2006, 29(5):1092 - 1100.
- [3] Dobrokhodov V N, Kaminer I I, Jones K D, et al. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2006:1 - 12, AIAA 2006 - 6606.
- [4] Li Z Y, Dobrokhodov N, Xargay E, et al. Development and implementation of L1 gimbal tracking loop onboard of small UAV[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2009:1 - 18, AIAA 2009 - 5681.
- [5] Ma L L, Cao C C, Hovakimyan N, et al. Adaptive vision-based guidance law with guaranteed performance bounds[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(4): 834 - 852.
- [6] Rysdyk R, Lum C, Vagnersz J. Autonomous orbit coordination for two unmanned aerial vehicles[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2005:1 - 9, AIAA 2005 - 6362.

- [7] Ma L L, Cao C C, Hovakimyan N, et al. Adaptive vision-based guidance law with guaranteed performance bounds for tracking a ground target with time-varying velocity[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2008;1-32, AIAA 2008-7445.
- [8] Oliveira T, Encarnacao P. Ground target tracking for unmanned aerial vehicles[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010;1-13, AIAA 2010-8082.
- [9] Richard W, Rolf R. UAV coordination for autonomous target tracking[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2006;1-22, AIAA 2006-6453.
- [10] Kammer I, Yakimenko O, Vladimir N D, et al. Coordinated path following for time-critical missions of multiple UAVs via L1 adaptive output feedback controllers[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2007;1-34, AIAA 2007-6409.
- [11] Peterson C, Derek P. Multi-vehicle coordination in an unknown flowfield[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2010;1-20, AIAA 2010-7585.
- [12] Richard A W, Rolf R. Robust UAV coordination under variable communication rates[C]// *Proc. of the AIAA Infotech and Aerospace Conference and Exhibit*, 2007;1-16, AIAA 2007-2757.
- [13] Wise R. UAV guidance control laws for autonomous coordinated tracking of a moving ground target[D]. Washington D. C. : University of Washington, 2007.
- [14] Vladimir N D, Isaac I K, Kevin D J, et al. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2006;1-12, AIAA 2006-6606.
- [15] David C, Sukkarieh S, Goktogan H, et al. The development of a real-time modular architecture for the control of UAV teams[C]// *Proc. of the Field and Service Robotics*, 2006;465-476.
- [16] David C, Goktogan H, Sukkarieh S. The demonstration of a cooperative control architecture for UAV teams[C]// *Proc. of the Conference of Experimental Robotics*, 2008;501-510.
- [17] Cole T D, Thompson P, Goktogan H, et al. Demonstrating the benefits of cooperation for a UAV team performing vision based feature localisation [J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2009;54:105-115.
- [18] Thompson P, Sukkarieh S. Development of an angular characterization system for cooperative UAV/UGV applications[C]// *Conference of Fields and Service Robotics*, 2006;105-116.
- [19] Wang H I, Dobrokhodov V N, Kammer I I, et al. On vision-based target tracking and range estimation for small UAVs[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2005;1-11, AIAA 2005-6401.
- [20] Ma L L, Cao C Y, Hovakimyan N, et al. Development of a vision-based guidance law for tracking a moving target[C]// *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2007;1-14, AIAA 2007-6744.
- [21] Dobrokhodov N, Kammer I, Jones K, et al. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using unmanned air vehicles[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2008, 31(4):907-917.
- [22] Wheeler M, Wise R, Rysdyk R, et al. Autonomous cooperative geo-location and coordinated tracking of moving targets[C]// *Proc. of the AIAA Infotech and Aerospace Conference and Exhibit*, 2007;1-10, AIAA 2007-2852.
- [23] Osborne J, Rysdyk R. Waypoint guidance for small UAVs in wind[C]// *Proc. of the Infotech and Aerospace*, 2005;1-12, AIAA 2005-6951.
- [24] Summers T H, Maruthi R A, Mears M J. Coordinated standoff tracking of moving targets; control laws and information architectures[C]// *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA-2008-7021.