

## 博弈论在固定翼无人机地面目标跟踪控制中的应用

戴 冬<sup>1</sup>, 王 果<sup>1</sup>, 王 磊<sup>2</sup>

(1. 河南工学院 计算机科学与技术系, 河南 新乡 453003; 2. 西南财经大学 经济信息工程学院, 成都 610074)

**摘 要:** 目前多数使用固定翼无人机(UAV)跟踪地面目标的方法需要一个或多个严格假设, 限制了 UAV 的使用方式。针对该问题, 提出一种基于博弈论的 UAV 跟踪方法。使用四阶动力学方程进行跟踪目标和 UAV 的初始化建模, 对 2 个动态方程式集合运用零阶保持以获取整个系统的离散动态时间, 得到博弈目标函数, 并利用动态规划确定最优控制策略。使用单相机固定翼 UAV 的仿真实验验证了该方法的有效性, 与基于分段引导方法和视觉伺服控制方法相比, 其仰角和距离参数的方差较小, 可将目标控制在可视范围内。此外, 讨论风对实验的影响, 结果表明, 该方法可使 UAV 的最大抵抗风速达到 6 m/s。

**关键词:** 固定翼无人机; 无人机跟踪; 四阶动力学方程; 博弈论; 动态规划

**中文引用格式:** 戴 冬, 王 果, 王 磊. 博弈论在固定翼无人机地面目标跟踪控制中的应用研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(7): 287-292, 298.

**英文引用格式:** Dai Dong, Wang Guo, Wang Lei. Application of Game Theory in Ground Target Tracking Control Using Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle[J]. Computer Engineering, 2016, 42(7): 287-292, 298.

## Application of Game Theory in Ground Target Tracking Control Using Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle

DAI Dong<sup>1</sup>, WANG Guo<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, Henan Institute of Technology, Xinxiang, Henan 453003, China;

2. College of Economic Information Engineering, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China)

**【Abstract】** At present, majority methods of tracking ground target using fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle(UAV) need one or more strict assumptions, which limits the use of UAV. Aiming at this problem, a method of UAV tracking based on game theory is proposed. Firstly, a fourth-order dynamic equation is used to model and initialize the tracked objects and UAV. Then, discrete dynamic time of the whole system is obtained by Zero-order Hold(ZOH) of two dynamic equations, with getting the game objective function. Finally, dynamic programming is used to determine the optimal control strategy. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation results under practical applications using a fixed-wing UAV with single camera. Compared with the methods based on segmentation guiding and visual servo control, the proposed method has smaller variances of elevation and distance, so the target is always in the visible range. In addition, wind is considered in the experiments. The experimental results show that the maximum wind speed resisted by UAV in a conservative estimation is 6 m/s around.

**【Key words】** fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle(UAV); UAV tracking; fourth order dynamic equation; game theory; dynamic programming

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.07.048

### 1 概述

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)<sup>[1]</sup> 技术最近几十年获得了极大的发展, 各项技术和应用

层出不穷, 在小型无人机市场, 中国的大疆无人机占有最大比例的市场份额。在众多应用中, 无人机跟踪是最重要且最前沿的应用, 因为使用无人机进行跟踪在军事、森林防火、安防和摄影等领域应用广

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71473201); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JBK151127); 河南省高等学校重点科研基金资助项目(16A520048)。

**作者简介:** 戴 冬(1978-), 女, 讲师、硕士, 主研方向为目标跟踪、图像处理; 王 果, 副教授、硕士; 王 磊, 副教授、博士。

**收稿日期:** 2015-11-03 **修回日期:** 2015-12-06 **E-mail:** daidonghn@126.com

泛<sup>[2]</sup>,所以无人机跟踪更是现代战争攻式作战的基本要求,是未来发展的趋势<sup>[3]</sup>。多数无人机是固定翼无人机(本文讨论的即为固定翼无人机),如何选择恰当的控制策略进行有效且实用的跟踪是研究的关键<sup>[4]</sup>。目前多数 UAV 目标跟踪方法是利用持续时间反馈控制法则<sup>[5-7]</sup>和基于最优化的方法<sup>[8-11]</sup>。

文献[5]方法是一种以被动视觉为基础的地面车辆跟踪方法,需要保持近似水平圆轨道,采用 LFAST 自适应地进行估计速度,其动态输入必须满足一阶动力学建模,然而,一阶动态不能准确反映实际的机械特性。文献[6]方法需要假设模型固定翼 UAV 以平稳空速和横向加速度飞行,同时证明闭环行为的稳定,所有实验必须在既定的约束下进行才可实现。文献[7]提出一种产生期望航向角的分段引导律以及无人机转向控制律,同时分析了避免暴露时间和最小化暴露时间的 2 种情形,以跟踪地面非合作目标,然而,模型必须满足假设目标恒定速度运动和全方位的传感器,即保证目标可视性<sup>[6]</sup>。

文献[8]提出一种基于进化算法的近似求解方法,以解决 UAV 跟踪目标观测航路的时空优化问题。该方法的提出基于化学反应优化(Chemical Reaction Optimization, CRO)理论框架,并以这种启发式求解策略解决长时间跟踪问题,要求动态输入满足二阶连续。文献[9]提出了一种在线控制输入的方法,利用卡尔曼滤波更新目标状态,此外还对目标跟踪问题进行马尔科夫决策过程求解,但目标必须满足接近恒定速度模型。文献[10]在马尔科夫框架下,通过控制旋转速度平面引入随机性问题的优化求解,但要求飞行轨迹为连续平稳的轨迹。文献[11]提出一种基于图像视觉伺服控制的固定翼无人机跟踪方法,视觉伺服提供了改进的数据收集跟踪任务,引入无人机航向和航向角,利用状态反馈控制对横向动力学进行扩充,但要求跟踪的目标具有较好的可视性。

上述方法都需要满足一定的假设条件,例如:动态输入必须是一阶或二阶;被跟踪的目标需要恒定的运行速度;跟踪的目标必须可视;UAV 的飞行轨迹必须满足正弦轨迹或近似圆形轨迹。上述假设会严重限制无人机的使用方式,为此,本文提出一种使用博弈论控制 UAV 跟踪地面运动目标的方法。

## 2 基于博弈论的 UAV 目标跟踪

本节对如何将博弈论应用于目标跟踪进行详细描述,关键两点是对目标恒定速度的假设进行改进,以及对传感器可视限制进行说明。由于博弈的 2 个主要因素是参与者能够做出的动作以及这些动作的相关成本,

因此首先描述每一阶段参与者的动作以及各自动作的动力学方程,然后观察几何结构的成本函数。

### 2.1 动态博弈

目标跟踪的主要工作是使用持续时间运动模型,在离散时间上对持续时间的运动模型进行最优化。因此,首先利用四阶持续时间动力学对每个参与者进行初始化建模,然后对 2 个动态方程式集合运用  $Ts$  零阶保持(Zero-order Hold, ZOH),以获取整个系统的离散动态时间。

假设 UAV 可以调节飞行速度、高度以及通过内部反馈循环控制倾侧角。每  $Ts$  一次,根据博弈的控制策略对倾侧角设定值进行更新,进一步假设飞行器会按照固定的速度以及相对地平面恒定的高度飞行。因此, UAV 的状态包括其平面位置  $(x_a, y_a) \in \mathbb{R}^2$ 、前进方向  $\psi_a \in S^1$  以及倾侧角  $\varphi \in S^1$ ,其中,  $\mathbb{R}^2$  表示二维矢量;  $S^1$  表示标量。所以, UAV 的状态可以定义为  $\xi = (x_a, y_a, \psi_a, \varphi)$ 。

将 UAV 建模如下:

$$\xi = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ \psi_a \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \cos \psi_a \\ s \sin \psi_a \\ -(a_g/s) \tan \varphi \\ -a_g(\varphi - r) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $a_g > 0$  表示重力加速度;  $s$  表示飞行速度,本文先假设无风(后面对风速进行讨论)。此外,  $1/a_g > 0$  表示自动驾驶仪控制回路的时间常量。自动驾驶仪控制回路调节实际滚转的滚转动力  $\varphi$ 、前进方向动力  $\psi_a$  和控制滚转的滚转动力  $\varphi$  之间存在时间尺度分离,因此,可以忽略滚转动力,但不保持这个假设会减弱目标跟踪的性能。

在 UAV 子系统中运用  $Ts$  零阶保持,产生一个离散时间系统  $\xi^+ = f_1(\xi, r)$ ,此系统通过求解如式(1)所示的系统微分方程式获得。假设滚转命令  $r$  属于集合:

$$C = \{0, \pm \Delta, \pm 2\Delta\} \quad (2)$$

其中,  $\Delta > 0$  表示从一个 ZOH 时期到下一个时期过程中滚转设定值所能允许改变的最大值,利用  $r'$  表示在下一个 ZOH 时期中的滚转命令,其中  $r' \in U(r)$ ,满足:

$$U(r) = \{r, r \pm \Delta\} \cap C \quad (3)$$

假设目标是一个在陆地平面上行驶的非完整车辆,该非完整车辆可以转向和加速,其状态是由平面位置  $(x_g, y_g) \in \mathbb{R}^2$ 、前进方向  $\psi_g \in S^1$  和速度  $v \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  构成,其中,  $\mathbb{R}_{\geq 0}$  表示大于 0 的数值。因此,可以将其状态定义为:  $\eta = (x_g, y_g, \psi_g, v)$ 。目标的动态可以表示为:

$$\dot{\eta} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ \psi_g \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \psi_g \\ v \sin \psi_g \\ \omega \\ a \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\omega$  和  $a$  分别表示旋转率和加速度控制输入。

在目标子系统中利用  $Ts$  零阶保持处理离散时间系统  $\eta^+ = f_2(\eta, d)$ , 通过求解式(4)并结合  $d = (\omega, a)$  可以获取离散时间系统。为了对目标的动作空间进行解释, 首先引入可容许的目标速度集合  $W$  以及最大目标速度  $\bar{v}$ , 假设目标的最大速度小于 UAV 的空速。利用  $\bar{a}$  表示目标的最大加速度, 假设目标的加速度  $a$  属于以下集合:

$$D_a(v) = \begin{cases} \{0, \bar{a}\} & v = 0 \\ \{-\bar{a}, 0, \bar{a}\} & v \in W \setminus \{0, \bar{v}\} \\ \{-\bar{a}, 0\} & v = \bar{v} \end{cases} \quad (5)$$

此外, 由于  $W = \{0, \bar{a}T, 2\bar{a}T, \dots, \bar{v}\}$ , 因此感觉上  $W$  不变, 由于  $v^+ = aT + v$ , 用  $v \in W$  和  $a \in D_a(v)$  表示  $v^+ \in W$ , 实际上  $W$  在变化。这个属性不仅限制了速度的边界, 而且提高了动态优化方案的精确度。利用  $\bar{\omega}$  表示目标的最大旋转率, 假设通过以下集合获取目标旋转率  $\omega$  的值:

$$D_\omega(v) = \begin{cases} \{0\} & v \in \{0, \bar{v}\} \\ \{-\bar{\omega}, 0, \bar{\omega}\} & v \in W \setminus \{0, \bar{v}\} \end{cases} \quad (6)$$

对旋转率实施这种限制可以使目标车辆在以最大速度  $\bar{v}$  行驶或者突然停车时不能进行转向。此外, 目标车辆能够以其最大旋转率向左转、直行或向右转。目标的整体动作空间定义如下:

$$D(v) = D_\omega(v) \times D_a(v) \quad (7)$$

根据目标车辆当前的运行速度  $v$ , 目标在给定的博弈阶段能够随地选取 2 个~9 个动作对。

博弈的整体状态  $\xi \in Z$  定义为:

$$Z = \mathbb{R}^2 \times S^1 \times S^1 \times \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (8)$$

这将 UAV 和目标状态联合起来。在以目标为中心的坐标系中  $\xi$  的前 3 个组成元素是相对量, 剩余的组成元素是绝对量。在以目标为中心的坐标系中, 平面位置为:

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_g & \sin \psi_g \\ -\sin \psi_g & \cos \psi_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a - x_g \\ y_a - y_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

剩下的状态如下:

$$(\xi_3, \xi_4, \xi_5) = (\psi_a - \psi_g, \varphi, v) \quad (10)$$

通过  $f_1(\xi, r)$  和  $f_2(\eta, d)$  以及式(9)和式(10)中对状态的转换, 得到博弈的整体动态为  $\xi^+ = f(\xi, r, d)$ 。

## 2.2 目标函数

小型 UAV 在目标跟踪过程中具有微型平移和

倾斜平衡机制, 这个平衡机制限制了感知区域, 图 1 中给出了一个平衡机制, 其中, 照相机的瞬时视场 (Field of View, FOV) 及总的观测场 (Field of Regard, FOR) 分别用深灰色及浅灰色表示。该图最突出的特征是从 UAV 的右侧到其后侧分布着大量盲区, 因此, 目标必须位于 UAV 的左侧, 才能使目标处于 UAV 的可视范围内。

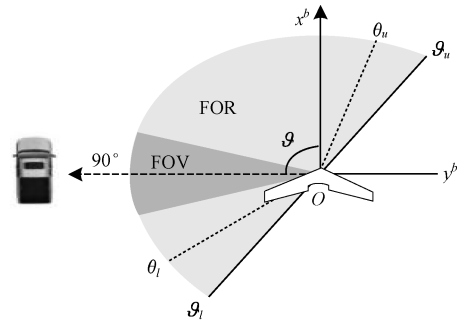


图1 微型平移和倾斜平衡机制

图2给出了微型平移和倾斜平衡机制的滚转角限制, 其中阴影区域表示仰角范围。视距向量相对于目标的滚转角用  $\varphi$  表示, 通过对飞行器的  $(x^b, y^b)$  平面进行正向感知可以测量这个滚转角。当图2中的机械滚转角限制没有在下视方向上产生盲点时, 还有其他因素可以使得其滚转角异常。特别地, 滚转角接近于  $0^\circ$  意味着照相机可以拍摄到 UAV 机身, 这会阻碍对目标的观察; 另一方面, 滚转角接近于  $0^\circ$  时将会导致飞行架发生不可预料运动<sup>[12]</sup>。

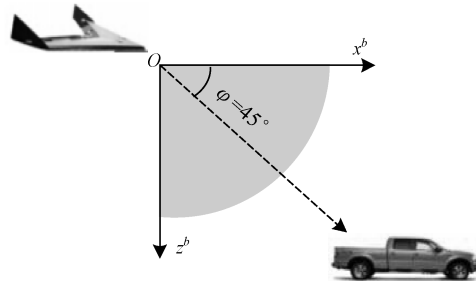


图2 微型平移和倾斜平衡机制的滚转角限制

基于以上感知限制, 本文将这些限制作为软限制, 当目标方向相反时, 博弈的目标是为了使得 UAV 能够保持一个相对于地面目标较好的视角, 即 UAV 希望能够尽量靠近目标, 同时避免飞行架角度发生极端变化。获取 UAV 最小化和目标最大化的博弈如下:

$$g(\xi) = g_1(\vartheta) + g_2(\varphi) + g_3(\rho) \quad (11)$$

其中,  $\vartheta$  表示图1中的方位角;  $\varphi$  表示图2中的仰角;

$\rho = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}$ ;  $g_1(\vartheta) \sim g_3(\vartheta)$  分别如下:

$$g_1(\vartheta) = (\lambda_1 \max\{\vartheta - \vartheta, 0, \vartheta - \vartheta\})^2$$

$$g_2(\varphi) = \lambda_2^2 (\varphi - \pi/4)^2$$

$$g_3(\rho) = (\lambda_3 \rho)^2 \quad (12)$$

其中,  $\lambda_i > 0, \bar{\vartheta} \geq \underline{\vartheta}$ 。在一些非零平面距离  $\rho$  处可以获取的仰角为  $\varphi = \pi/4$ , 测量点仰角值是相对于机身而言的, 因此, 当  $\rho$  等于 UAV 的飞行高度时,  $\varphi$  通常不等于  $\pi/4$ , 这是由于 UAV 通常具有一个非零倾侧角。

### 2.3 博弈设置

博弈具有一个完美的状态反馈信息结构, 因此, 当参与者在进行博弈时, 能够知晓整个过程中的状态变化, 不受噪声所干扰, 从而能够决定其下个动作是什么。每个参与者通过行为策略确定其下个动作, 行为策略是一种在阶段  $k$  与每个状态  $\zeta \in Z$  相关的决策准则, 对参与者来说, 行为策略是所有可采用的动作的一个概率分布。UAV 所有动作以及目标所有动作的概率分布分别用下列的状态相关概率表示:

$$A(\varphi) = \{\alpha \in \mathbb{R}^{m(\varphi)} : \sum_i \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0 \forall i\} \quad (13)$$

$$B(v) = \{\beta \in \mathbb{R}^{n(v)} : \sum_j \beta_j = 1, \beta_j \geq 0 \forall j\} \quad (14)$$

其中,  $m(\varphi) = |U(\varphi)|$  表示 UAV 可选取的动作数;  $n(v) = |D(v)|$  表示目标可选取的动作对数。因此, UAV 和目标的行为策略分别由时间相关映射  $\gamma_k: Z \rightarrow A(\varphi)$  和  $\kappa_k: Z \rightarrow B(v)$  组成, 状态分布相关概率的定义如下:

$$\begin{aligned} r_k &\sim \gamma_k(\zeta[k]) \\ d_k &\sim \kappa_k(\zeta[k]) \\ \forall k &\in \{0, 1, \dots, K-1\} \end{aligned}$$

其中,  $\zeta[k]$  表示在博弈阶段  $k$  时的状态  $\zeta$ 。

由于博弈的状态为随机演变, 因此最大化目标的函数为:

$$J(\gamma, \kappa) = E[\sum_{k=0}^K g(\zeta[k]) | \zeta[0]]$$

其中,  $\zeta[0] \in Z$  和  $E[\cdot]$  表示期望值。最后的目标是确定行为策略  $(\gamma^*, \kappa^*)$  的一个鞍点对, 对于所有的  $\zeta[0] \in Z$ , 有:

$$\begin{aligned} J(\gamma^*, \kappa) &\leq J(\gamma^*, \kappa^*) \leq J(\gamma, \kappa^*) \\ \forall \gamma &\in \Gamma_1, \forall \kappa \in \Gamma_2 \end{aligned}$$

### 3 利用动态规划确定最优策略的方法

利用动态规划可以确定第 2 节中最优策略  $\gamma^*$ ,  $\kappa^*$  以及博弈  $J(\gamma^*, \kappa^*)$  相应的值, 如文献[13]提到的迭代过程, 以价值函数  $V_k(\zeta)$  为中心, 价值函数涉及时刻  $k \in \{0, 1, \dots, K\}$  从状态  $\zeta \in Z$  开始的代价函数。在最后时刻对价值函数进行初始化, 如  $V_k(\zeta) = g(\zeta)$ 。为了在剩余时间中确定价值函数, 首先引入一个中间时刻和状态相关的矩阵  $G(k, \zeta) \in \mathbb{R}^{m(\varphi) \times n(v)}$ , 该矩阵的定义如下:

$$[G_{ij}(k, \zeta)] = g(\zeta) + V_{k+1}(f(\zeta, r^{(i)}, d^{(j)})) \quad (15)$$

其中,  $f(\cdot)$  与第 2.1 节中的动态相关;  $r^{(i)}$  和  $d^{(j)}$  分别表示状态空间  $U(k)$  的第  $i$  个元素和  $U(k)$  的第  $j$  个元素。对于  $k \in \{0, 1, \dots, K-1\}$ , 根据下列循环以倒序形式计算代价函数。

$$\begin{aligned} V_k(\zeta) &= \min_{\alpha \in A(\varphi)} \max_{\beta \in B(v)} \alpha^T G(k, \zeta) \beta \\ &= \max_{\beta \in B(v)} \min_{\alpha \in A(\varphi)} \alpha^T G(k, \zeta) \beta \end{aligned} \quad (16)$$

为了求解式(16)中的最优化问题, 根据下式可以构建行为控制策略:

$$\gamma_k^*(\zeta) = \operatorname{argmin}_{\alpha \in A(\varphi)} \max_{\beta \in B(v)} \alpha^T G(k, \zeta) \beta \quad (17)$$

$$\kappa_k^*(\zeta) = \operatorname{argmax}_{\beta \in B(v)} \min_{\alpha \in A(\varphi)} \alpha^T G(k, \zeta) \beta \quad (18)$$

通过上述过程可以获得  $J(\gamma^*, \kappa^*) = V_0(\zeta)$ ,  $\forall \zeta \in Z$ 。

为了简化计算过程, 引入  $Z \in Z$  将价值函数的计算限制在一个有限的点数内,  $Z \in Z$  表示具有  $N_s$  个离散元素的状态空间的一个有限子集和, 相应的量化函数  $q: Z \rightarrow Z$  的定义如下:

$$q(\zeta) = \operatorname{argmin}_{W \in Z} \|\zeta - W\|_1 \quad (19)$$

价值函数的计算结果与第一个重新定义的  $G(k, \zeta)$  的值近似,  $G(k, \zeta)$  的定义如下:

$$[G_{ij}(k, \zeta)] = g(\zeta) + V_{k+1}(q[f(\zeta, r^{(i)}, d^{(j)})]) \quad (20)$$

同理, 根据式(16)计算  $\zeta \in Z$  的价值函数。根据式(17)和式(18)计算出状态  $\zeta \in Z$  的行为策略, 在实际应用过程中, 在时刻  $k$  利用  $\gamma_k^*(q(\zeta))$  和  $\kappa_k^*(q(\zeta))$  计算出  $\zeta \in Z \setminus Z$  的控制策略。

## 4 实验结果与分析

本节给出配备单个照相机的 UAV 的现场测试结果, 首先分析飞行测试结果, 然后对控制策略的行为和性能进行说明。

### 4.1 实验设置

本文利用一个三角形 UAV 进行目标跟踪测试, 该 UAV 如图 3 所示, 其由一个 60 in 的膨胀聚丙烯泡沫飞翼构成, 飞翼中可以容纳 4 个锂聚合物电池, 这些电池可以驱动一个连接在推进器上的电动马达, 该 UAV 的主要负载是一个常平架视频照相机。其中常平架的特定平移限制是  $\theta_l = -135^\circ$  和  $\theta_u = 15^\circ$ 。相应的 FOR 限制为  $\vartheta_l = -152^\circ$  和  $\vartheta_u = 32^\circ$ 。



图 3 实验 UAV

UAV 的自动驾驶仪调整油门,2 个升降副翼保持飞行速度、高度和命令滚转角不变。选取  $T=2\text{ s}$  的 ZOH 周期近似校正 UAV 的横滚动态时间。在每个动态最优中选取离散时间的步长个数使得规划周期 ( $KT=30\text{ s}$ )。在博弈论情况下,需要  $r_k \sim \gamma_0^*(\xi)$ ,  $\forall k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 。

在跟踪过程中,地面车辆随意行驶,UAV 由地面控制站控制,如图 4 所示。本文利用 Matlab 计算出 UAV 的控制动作,通过与安装在卡车上的 GCS 和 GPS 接收器进行通信,获取 UAV 遥测以及目标数据,根据特定的控制策略在 UAV 上测试所确定的滚转命令。然后将滚转命令发送到 GCS,并中继到 UAV。



图 4 空-地跟踪示意图

在实际情况下,风速占 UAV 飞行速度的很大一部分<sup>[14]</sup>,本文方法不能处理很大的风,很大的风会显著改变 UAV 的运动,通过一种近似策略可以处理轻度到中度的风,但不修改目标当前的陆地速度。由式(9)和式(10)中定义的坐标系都是以目标为中心,因此,本文将风和目标速度进行结合以形成目标当前的陆地速度,即利用  $w \in \mathbb{R}^2$  表示风,通过下式获取目标当前前进方向  $\hat{\psi}_g$  和速度  $\hat{v}$ :

$$\hat{\psi}_g = \arctan(v \sin \psi_g - w_2, v \cos \psi_g - w_1) \quad (21)$$

$$\hat{v} = \sqrt{(v \cos \psi_g - w_1)^2 + (v \sin \psi_g - w_2)^2} \quad (22)$$

其中,  $\arctan$  表示第四象限的反正切函数,实际上,风确实改变了 UAV 的陆地速度  $v_g \in \mathbb{R}^2$ ,增加了陆地速度,但本文仅规划了目标速度的范围和单个 UAV 的陆地速度,在实际的设定中风速的计算值与真实值之差在  $0.5\text{ m/s}$  以内,风速的评估误差不会引起显著的性能退化<sup>[15]</sup>。由于在整个  $15\text{ min}$  的实验过程中平均风速小于  $0.5\text{ m/s}$ ,因此风的影响非常微弱。由于实际情况下的风速通常大于这种特定实验环境的风速,因此本文在后面讨论了处理控制策略,即对于平稳风的鲁棒性问题。

## 4.2 博弈论结果

图 5 给出了窗口目标和 UAV 的轨迹,其中,“S”表示起始位置;“E”表示截止位置。UAV 保持在目标的右侧位置,不定期地绕着目标做逆时针旋转。尽管 UAV 和目标速度有差异,但是这种行为能

使 UAV 距离目标足够近,而且可以确保目标一直位于 UAV 的 FOR 内。UAV 轨迹的其他特性是:UAV 从来没有从目标上空飞过,当 UAV 从目标上空飞过时,两者之间的距离最短,但使得仰角接近  $90^\circ$ ,这种行为是最小化到目标的距离和避免大的仰角之间进行折衷权衡。

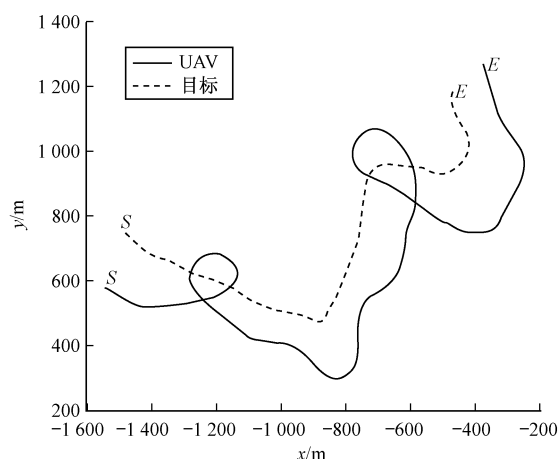
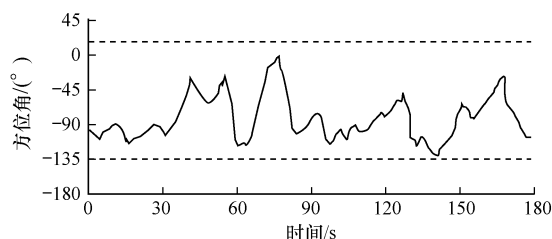
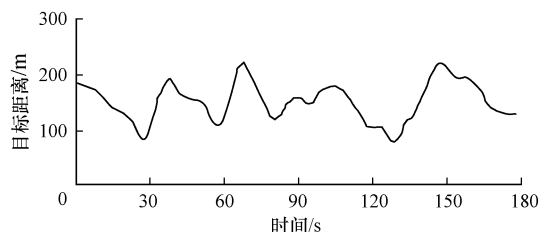


图 5 采用博弈论控制策略时 UAV 在 3 min 内跟踪目标的轨迹

图 6 所示为方位角  $\nu$  与时间  $t$  的关系,以及 UAV 与目标距离  $\rho$  与时间  $t$  的关系。由于方位角保持在常平架机械限制范围(虚线所示)以内,因此在整个  $3\text{ min}$  的窗口内,目标一直位于 FOV 的范围内。但是,在这个窗口中方位角发生了显著的变化,这是因为方位角在 2 个边界附近取值。常平架缓慢地从 UAV 的左后方移动到 UAV 的前方的过程中花费了  $t=60$  到  $t=75$  间的时间间隔,这个过程完全可见。常平架在  $t=140$  附近接近其机械限制的下限。



(a) 方位角与时间的关系



(b) 目标距离与时间的关系

图 6 采用博弈论控制策略时的视角几何性能

图 7 给出了博弈论  $\gamma^*$  的滚转命令序列,没有使用最大的  $30^\circ$  的滚转命令,而是采用  $15^\circ$  的滚转命令,

由于式(3)的滚转角动作空间变化为 $15^\circ$ ,因此避免了反极性滚转命令间的大幅变化。

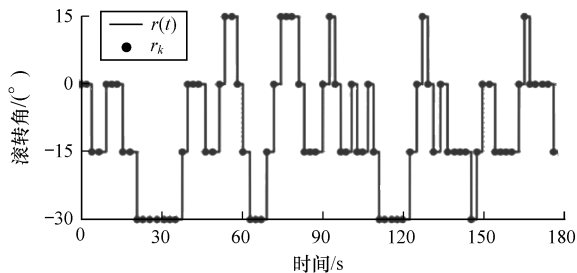


图7 博弈论策略 $\gamma^*$ 的滚转命令序列

#### 4.3 与其他方法的定量比较与分析

本节进行定量统计以凸显本文方法相对于其他技术的优势,比较对象是文献[7,11]方法。

表1 15 min窗口内不同方法的统计结果

| 方法       | 最小仰角/(°) | 最大仰角/(°) | 仰角方差     | 平均目标距离/m | 目标距离方差 | $g(\zeta)$ 平均值 |
|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------------|
| 文献[7]方法  | -166.71  | 16.632   | 1 026.81 | 150.90   | 2 104  | 10.76          |
| 文献[11]方法 | -140.30  | 20.190   | 663.31   | 131.81   | 1 372  | 7.75           |
| 本文方法     | -138.21  | 21.920   | 593.21   | 128.74   | 1 269  | 6.99           |

#### 4.4 有关风的因素讨论

风一般是 UAV 飞行速度的重要部分,本文在实验过程中利用飞行模拟器模拟了向东吹且速度稳定的风。此外,当 UAV 在跟踪目标时,主要测试的是逆风情况。

表2给出了博弈论策略的结果,其中风速表示每个场景的绝对风速。由表2可知,在前3个情形

由于每种方法都进行最少 15 min 的飞行测试,因此在一个 15 min 窗口内选取数值进行统计以客观比较。表1给出了3种方法的关键参数。其中,采用的第一个参数是仰角 $\vartheta$ 。3种方法都引起常平架达到饱和并且至少一次达到常平架的 $-135^\circ \sim 15^\circ$ 的机械限制,利用 $\vartheta$ 的最小和最大统计值对其进行表示。但是,本文方法仰角均未超出FOR的 $-152^\circ \sim 32^\circ$ 间的限制,目标从未跑出UAV的视线之外,文献[7]和文献[11]方法均超出了最低边界一次。目标跑出了UAV的视线之外1次。从表1的统计方差中可以明显看出,采用本文方法时仰角的变化幅度要大于采用其他方法的变化幅度。因此,本文方法更适合视觉目标的跟踪,其仰角和距离参数的方差明显更小,且目标一直在可视范围内。

下博弈论策略表现出很好的效果,在前2个情形下没有使得目标离开视线,在第3个情形下仅使得目标离开了视线一次。在6 m/s场景中,后4个量的数值要显著大于4 m/s场景中对应的量的值。在4 m/s场景中,后4个量的值发生了显著的变化,这表明这种策略的能力边界发生了交叉,而使用本文方法时目标仅有2次离开视线。

表2 15 min窗口内平稳风速情况下博弈控制策略统计结果

| 风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 最小仰角/(°) | 最大仰角/(°) | 仰角方差  | 平均目标距离/m | 目标距离方差 | $g(\zeta)$ 平均值 |
|---------------------------------------|----------|----------|-------|----------|--------|----------------|
| 3.0                                   | -165.5   | 61.09    | 1 378 | 158.5    | 2 967  | 12.28          |
| 4.0                                   | -164.6   | 55.16    | 1 273 | 182.4    | 5 890  | 14.81          |
| 6.0                                   | -172.3   | 60.15    | 1 418 | 190.5    | 8 415  | 15.74          |
| 7.5                                   | -131.5   | 63.52    | 1 529 | 190.8    | 8 181  | 17.82          |

## 5 结束语

本文研究博弈论在固定翼 UAV 目标跟踪中的应用,提出一种新的跟踪方法,主要贡献如下:(1)无人机本身和目标采用四阶持续时间动力学建模,利用滚转角作为动态角度的控制输入,四阶动力学建模非常接近实际情况;(2)半驱动的 UAV 飞行轨迹围绕陆地目标展开,不需要简化 UVA 动态以及假设目标运动或可视感知条件;(3)本文 UAV 跟踪对环境阻碍和运动的不可预测性具有鲁棒性。

本文对决策理论的代价函数进行设计,并通过实验证明基于博弈论控制方法能够获得较好的视角几何,可以直接用这种方法处理不同的滚转动态,或处理目标速度不可预测的情形。同时通过对代价函数适当的选取也说明,只要向模型中添加足够的随

机性就可以利用相对简单的运动模型处理运动规划问题。

下一步研究工作是对博弈控制策略进行测试,通过对目标的状态进行评估来完成此过程,利用 UAV 上安装的视觉传感器构建目标的状态。不但要进行仿真实验,而且还必须进行飞行测试,从而在对目标状态进行评估时验证控制策略对噪声的鲁棒性。

#### 参考文献

- [1] 甄红涛,齐晓慧,李杰,等.四旋翼无人机L\_1自适应块控反步姿态控制器设计[J].控制与决策,2014,32(6):87-91.
- [2] Beard R W,McLain T W. Small Unmanned Aircraft:Theory and Practice [M]. Princeton, USA: Princeton University Press,2012.

(下转第298页)

## 参考文献

- [1] Lee J H, Okamoto S, Koike H, et al. Development and Motion Control of a Biped Walking Robot Based on Passive Walking Theory [J]. *Artificial Life and Robotics*, 2014, 19(1): 68-75.
- [2] Li Zhibin, Tsagarakis N G, Caldwell D G. Walking Pattern Generation for a Humanoid Robot with Compliant Joints[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 35(1): 1-14.
- [3] Wang Ting, Chevallereau C, Tlalolini D. Stable Walking Control of a 3D Biped Robot with Foot Rotation[J]. *Robotica*, 2014, 32(4): 551-570.
- [4] 肖 乐, 张玉生, 殷晨波. 仿人机器人双足行走模型研究[J]. *计算机工程*, 2011, 37(12): 173-175.
- [5] Jo H S, Mir-Nasiri N. Dynamic Modelling and Walk Simulation for a New Four-degree-of-freedom Parallelogram Bipedal Robot with Sideways Stability Control [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 57(1): 254-269.
- [6] Beranek R, Ahmadi M. A Behavior Based Locomotion Controller with Learning for Disturbance Compensation in Bipedal Robots [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1915-1920.
- [7] Alcaraz-Jiménez J J, Herrero-Pérez D, Martínez-Barberá H. Robust Feedback Control of ZMP-based Gait for the Humanoid Robot Nao [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(9-10): 1074-1088.
- [8] Lu Zhenli. Design of a 3DOF Passive Rotating Platform for the Adaptive Motion Planning of a Single-legged Robot [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [9] 刘亚荣. 基于混合驱动的异构双腿机器人运动控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [10] 夏露露, 许化龙, 夏 昕. 惯性平台调平回路的自抗扰控制[J]. *电子测量技术*, 2010(4): 106-108.
- [11] Gao Zhiqiang. Scaling and Bandwidth-parameterization Based Controller Tuning [C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Colorado, USA: [s. n.], 2003: 4989-4996.
- [12] Xu Wei, Xiong Rong, Wu Jun. Force/Torque-based Compliance Control for Humanoid Robot to Compensate the Landing Impact Force [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Networking and Distributed Computing*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 336-340.
- [13] 黄建松, 汪 玉, 李政年. 舰员抗冲击鞋性能试验及评估方法研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2012, 31(3): 466-470.
- [14] 倪 德, 朱如鹏, 陆凤霞, 等. 有阻尼智能弹簧减振系统参数的一种设计方法[J]. *振动与冲击*, 2014(23): 116-121.
- [15] 舒歌群, 赵文龙, 梁兴雨, 等. 约束阻尼结构的振动分析及结构参数优化研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(3): 108-114.
- [1] Lu Zhenli. Design of a 3DOF Passive Rotating Platform
- (上接第 292 页)
- [3] 章国林, 李 平, 韩 波, 等. 多雷达威胁环境下的无人机路径规划[J]. *计算机工程*, 2011, 37(4): 206-209.
- [4] 丁 卫. 基于超小型无人机的地面目标实时图像跟踪[M]. 上海: 上海大学出版社, 2011.
- [5] Li Zhiyuan, Hovakimyan N, Dobrokhodov V, et al. Vision-based Target Tracking and Motion Estimation Using a Small UAV [C]//*Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 2505-2510.
- [6] Regina N, Zanzi M. Fixed-wing UAV Guidance Law for Surface-target Tracking and Overflight [C]//*Proceedings of 2012 IEEE Aerospace Conference*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1-11.
- [7] 王 勋, 孔维玮, 张代兵, 等. 无人机跟踪地面非合作目标的分段引导与控制方法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2012, 32(9): 1423-1428.
- [8] 王道波, 王 寅, 蒋婉玥, 等. 基于化学反应优化的多无人机地面移动目标协同观测航迹规划[J]. *中国科学技术科学*, 2015, 45(6): 583-594.
- [9] Miller S A, Harris Z A, Chong E K P. A POMDP Framework for Coordinated Guidance of Autonomous UAVs for Multi-target Tracking [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009, 34(7): 1-17.
- [10] Anderson R. A Stochastic Approach to Dubins Feedback Control for Target Tracking [C]//*Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 3917-3922.
- [11] Mills S, Aouf N, Mejias L. Image Based Visual Servo Control for Fixed Wing UAVs Tracking Linear Infrastructure in Wind [C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 5769-5774.
- [12] Collins G E, Stankevitz C, Liese J. Implementation of a Sensor Guided Flight Algorithm for Target Tracking by Small UAS [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8047: 2471-2479.
- [13] 张朋柱. 合作博弈理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [14] 孙海波, 周 锐, 邹 丽, 等. 通信和测量受限条件下异构多 UAV 分布式协同目标跟踪方法[J]. *航空学报*, 2011, 36(2): 299-310.
- [15] Oh H, Kim S, Shin H S, et al. Coordinated Standoff Tracking of Groups of Moving Targets Using Multiple UAVs [C]//*Proceedings of the 21st Mediterranean Conference on Control and Automation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 969-977.

编辑 顾逸斐

编辑 金胡考