

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0329

一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法

王 勋, 张代兵, 沈林成

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法. 通过设计虚拟向心力、虚拟弹簧力和虚拟阻力计算期望的转向速率. 其中虚拟向心力可以补偿参考路径曲率, 虚拟弹簧力使无人机收敛到参考路径上, 虚拟阻力能够在收敛过程中防止震荡的产生. 该方法不仅可以跟踪直线和圆形路径, 还可以精确跟踪变曲率曲线. 在跟踪直线时, 该方法等价于比例-微分控制; 跟踪圆形或变曲率曲线时, 等价于反馈线性化方法. 论文分析了该方法的稳定性和收敛性, 考虑了输入约束对该方法跟踪性能的影响. 利用虚拟力控制无人机, 使控制参数具有明确的物理意义, 从而使参数在实际应用中容易整定. 仿真结果证明该方法是有效的, 且跟踪性能优于 NLGL (非线性导航逻辑) 方法.

关键词: 无人机; 路径跟踪; 拟态物理学; 虚拟力; 曲线跟踪

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-03-0329-08

A Virtual Force Based Path Following Approach for Unmanned Aerial Vehicles

WANG Xun, ZHANG Daibing, SHEN Lincheng

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A virtual force based path following approach is presented for unmanned aerial vehicles (UAVs). Three virtual forces, including a virtual centripetal force, a virtual spring force and a virtual drag force, are designed to calculate the desired heading rate. The virtual centripetal force compensates the influence of the reference curvature. The virtual spring force ensures the vehicle converge to the reference path. Meanwhile, the virtual drag force prevents oscillation in the convergence process. The proposed approach can be used to accurately follow straight-line, circle, as well as curve with time-varying curvature. The approach is equivalent to a proportional-derivative controller when following a straight-line, equivalent to a feedback linearization method when following circular or curved paths. The stability and convergence are analyzed. The influence of the input constraint on the following performance is considered. When using virtual forces to control UAVs, the physical meanings of the parameters are definite, which makes them easy to tune in application. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach, and its performance is better than the NLGL (nonlinear guidance logic) approach.

Keywords: unmanned aerial vehicle; path following; physicomimetics; virtual force; curve tracking

1 引言 (Introduction)

无人机正在逐步代替人类执行一些繁琐、脏乱和危险的 (dull, dirty and dangerous) 任务^[1]. 尽管过去几十年无人机的应用主要由各国军队和政府部门主导. 但是随着小型和入门级无人机的发展, 无人机也逐渐受到工业部门、科研人员和业余爱好者的关注^[2], 从而为无人机的应用开拓了更宽的前景. 在实际应用中, 可靠的路径跟踪是无人机应该具备的基本能力. 论文以此为背景, 提出一种易于实现的路径跟踪控制方法.

现有文献已提出多种路径跟踪方法, 其中主要

包括两大类: 基于几何运算的方法^[3-11]和基于控制理论的方法^[12-20].

基于几何计算的方法首先来自于研究导弹制导的文献, 如追踪法^[3]、视线法 (LOS)^[4-8], 以及二者相结合的方法 (PLOS)^[10]. 基于追踪法和 LOS 的路径跟踪方法, 需要在参考路径上选择合适的虚拟目标点, 然后再控制无人机追逐虚拟目标点, 最终实现对期望路径的跟踪. 文 [9] 提出一种非线性导航方法 (NLGL), 也使用了虚拟目标点的概念, 通过设计非线性的侧向加速度, 使得无人机逐渐收敛到期望路径. 一般称无人机在期望路径上的投影

基金项目: 国家自然科学基金 (61403406).

通信作者: 王勋, xunwang@nudt.edu.cn

收稿/录用/修回: 2016-01-18/2016-03-14/2016-04-04

到虚拟目标点之间的距离为虚拟距离, 该参数很大程度上决定了 LOS 方法的稳定性, 同时也决定上述方法的跟踪性能. 这些基于几何计算的路径跟踪方法容易理解, 计算简单, 容易投入实际应用. 但是由于依赖于虚拟距离的选取, 因此这些方法在跟踪变曲率曲线路径时存在较大的跟踪误差.

利用控制理论研究路径跟踪问题, 可以方便的考虑稳定性和鲁棒性等性能指标, 因此一些研究者提出基于各种控制理论的路径跟踪方法. 其中最常见的是基于比例-积分-微分 (PID) 控制的路径跟踪方法^[12], 但这种方法的跟踪性能差于 NLGL 方法^[9]. 此外, 一些非线性控制理论也被用于研究路径跟踪问题, 如线性二次型调节器 (LQR)^[13-14]、模型预测控制 (MPC)^[15-16] 和自适应控制^[17-19] 等. 虽然这些方法可以方便的考虑系统稳定性和鲁棒性等问题, 但是相对于基于几何计算的方法, 这些方法更加抽象, 更依赖对象的数学模型, 因此较少投入实际应用.

与上述两类方法不同, 论文基于一种新的思路研究无人机的路径跟踪问题, 即拟态物理学方法 (physicomimetics). 拟态物理学也叫人工物理学 (artificial physics), 由 Spears 等人在研究智能体集群时提出^[20-21]. 其基本思想是在自然界物理现象的启发下, 在智能体之间设计虚拟作用力, 智能体根据虚拟力作出反应, 最终实现多智能体的集群控制. 这种方法的优点是计算简单, 且具有坚实的物理学理论基础.

在上述思想的启发下, 论文提出一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法. 通过设计虚拟力实现无人机对参考路径的精确跟踪. 首先选取参考点, 并根据参考点计算虚拟向心力、虚拟弹簧力和虚拟阻力, 其中虚拟向心力可以补偿参考点处的曲率, 虚拟弹簧力使侧偏距逐渐收敛到 0, 虚拟阻力能够防止收敛过程中产生震荡. 该方法不仅可以用于跟踪直线和圆形路径, 还可以精确跟踪变曲率曲线. 在跟踪直线时, 该方法等价于比例-微分控制; 跟踪圆形或变曲率曲线时, 等价于反馈线性化方法. 论文给出了该方法的稳定性和收敛性分析和无约束时控制器的最优参数关系. 考虑了输入约束对该方法跟踪性能的影响, 并给出存在输入约束时的参数选取建议. 利用虚拟力控制无人机, 不仅使该方法具有坚实的物理学理论基础, 还使控制参数具有明确的物理意义, 从而使参数在实际应用中容易整定.

为了验证方法的有效性, 论文给出了数值仿真

结果. 在数值仿真中, 分别给出了利用该方法跟踪直线、圆形和变曲率曲线的结果. 给出了输入饱和和约束对跟踪性能的影响, 进一步给出参数选取的调整建议. 在现有算法中选择性能较好的 NLGL 方法^[2,9] 作对比, 结果表明: 跟踪变曲率曲线时, 基于虚拟力的方法性能优于 NLGL 方法.

2 问题描述 (Problem formulation)

首先给出论文中考虑的无人机运动学模型, 然后给出参考路径的描述方法, 最后给出无人机路径跟踪问题的形式化描述以及虚拟力的概念.

2.1 无人机运动学模型

考虑无人机具有底层控制器, 具备高度保持能力, 并能够跟踪期望姿态、期望速度和期望转弯速率. 此时, 可以使用 2 维平面 Dubin 模型近似无人机的运动学模型, 由下式给出

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P} = (x, y, \psi)$ 为无人机的状态, 分别表示无人机的位置、航向; v 和 ω 为控制输入, 分别表示速度和转向速率. 若考虑输入饱和和约束, 则速度 v 和转向速率 ω 满足如下条件:

$$\begin{aligned} v_{\min} &\leq v \leq v_{\max} \\ \omega_{\min} &\leq \omega \leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

具体的约束参数值取决于无人机的机型和参数. 对于固定翼无人机, 约束参数满足 $0 < v_{\min} < v_{\max}$ 和 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} > 0$; 对于无人直升机和多旋翼机, 约束参数满足 $v_{\max} = -v_{\min} > 0$ 和 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} > 0$.

2.2 参考路径

考虑期望参考路径 (x_r, y_r, ψ_r) 由一个动态轨迹平滑器 (dynamic trajectory smoother, DTS)^[22] 生成, 参考路径满足

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos \psi_r \\ \dot{y}_r = v_r \sin \psi_r \\ \dot{\psi}_r = \omega_r \end{cases} \quad (3)$$

其中参考速度 v_r 和参考转向速率 ω_r 分段连续. 若考虑无人机的输入饱和和约束, 则还需满足如下条件

$$\begin{aligned} v_{\min} &\leq v_r \leq v_{\max} \\ \omega_{\min} &\leq \omega_r \leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

因此可用式 (3) 生成期望的参考路径, 包括直线路径、圆形路径和变曲率曲线路径.

2.3 路径跟踪问题

与轨迹跟踪问题不同, 路径跟踪问题不涉及时间参数化的轨迹^[23], 期望的参考路径与时间无关, 只取决于空间相对位置. 因此, 给出无人机路径跟踪问题定义如下:

定义 1: 设期望的参考路径为由标量函数 $\gamma = \gamma(t) \in \mathbb{R}$ 参数化的 $\mathbf{P}_r(\gamma) \in \mathbb{R}^3$. 路径跟踪控制的目的是通过设计期望速度和期望的转向速率, 使得闭环系统各状态有界, 并且使 $|v - v_r|$ 和 $\|\mathbf{P} - \mathbf{P}_r(\gamma)\|$ 尽可能小.

2.4 虚拟力

虚拟力的“虚拟”是指实际系统中并不存在, 而我们假设它存在, 以便于根据这些被虚拟出来的力计算无人机的控制输入. 这里所说的“实际系统”指实际的无人机路径跟踪问题. 在这个问题中, 无人机和参考点之间并不存在真实的弹簧, 也没有所谓的阻力和向心力. 因此, 我们说这些力是“虚拟力”. 此外, 论文中的这些“虚拟力”允许有一些超出“实际力”的特性, 如弹簧弹力为理想弹簧力, 弹簧的平衡长度为 0 等.

3 基于虚拟力的路径跟踪控制方法 (Virtual force based path following approach)

首先给出基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法, 然后分别分析跟踪直线、圆形和变曲率曲线路径时的稳定性和收敛性.

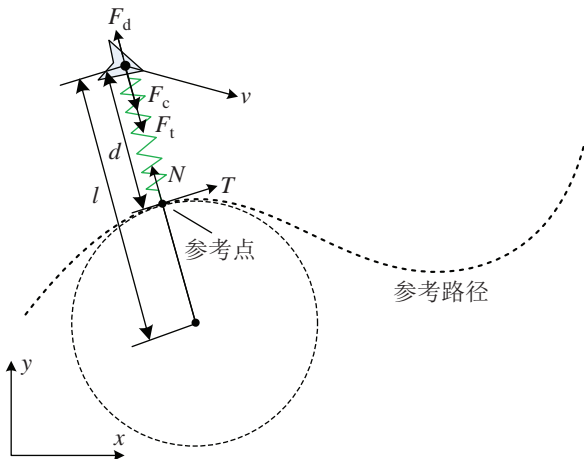


图 1 基于虚拟力的路径跟踪控制方法示意图

Fig.1 Diagram of the virtual force based path following approach

路径跟踪问题中首先要在期望路径上选择参考点, 用于根据无人机的实时状态和路径跟踪算法计算控制输入. 文中选择距离无人机最近的点作为参考点, 如图 1 所示. 其中, T 是参考点处参考路径

的切线, 指向参考速度方向; N 是参考路径法线, 指向 T 的左侧.

假设无人机的初始航向角与参考点航向角满足关系 $|\psi_0 - \psi_r| < \frac{\pi}{2}$. 此条件很容易通过简单的航向跟踪实现 (如 Bang-Bang 控制). 满足上述条件之后, 设计两种虚拟力, 分别是作用在无人机质心上的虚拟向心力和位于无人机和参考点之间的虚拟弹簧力. 虚拟弹簧力包括因形变产生拉力和因长度变化产生阻力. 虚拟弹簧的平衡长度为 0, 弹性系数为 $k > 0$, 阻力系数为 $c > 0$. 因此, 沿虚拟弹簧方向对无人机进行受力分析, 有

$$F_N = Ma_N = F_t + F_d + F_c \quad (5)$$

其中 F_N 和 a_N 分别表示无人机受到 N 方向上的合力和 N 向加速度; M 表示无人机质量; F_t 和 F_d 分别表示虚拟弹簧的弹力和阻力; F_c 为无人机在 T 方向的速度产生的虚拟向心力. 虚拟力的大小由下式给出:

$$\begin{cases} F_t = -kd \\ F_d = -cd \\ F_c = \frac{Mv_T^2}{l} \end{cases} \quad (6)$$

其中 d 为侧偏距, 正方向与 N 相同, 即无人机在 T 左侧为正, 右侧为负. 假设无人机具有单位质量, 即 $M = 1$, 将式 (6) 中的力代入式 (5) 可得

$$a_N = -kd - cd + \frac{v_T^2}{l} \quad (7)$$

分析图 1 可得如下关系:

$$\begin{cases} l = \frac{v_r}{\omega_r} - d \\ a_l = a_N \cos(\psi_r - \psi) \\ \omega = \frac{a_l}{v} \end{cases} \quad (8)$$

其中 a_l 为无人机的侧向加速度, 向左为正. 由式 (7) 和 (8) 可以得到转向速率指令, 因此基于虚拟力的路径跟踪控制方法给出的期望转向速率为

$$\omega = \frac{\cos(\psi_r - \psi)}{v} (-kd - cv_N + \omega_r \frac{v_r^2}{v_r - d\omega_r}) \quad (9)$$

若考虑无人机的输入约束, 则有

$$\omega = \text{sat}(\omega) = \begin{cases} \omega_{\max}, & \omega \in (\omega_{\max}, +\infty) \\ \omega, & \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \\ \omega_{\min}, & \omega \in (-\infty, \omega_{\min}) \end{cases} \quad (10)$$

根据无人机路径跟踪问题的定义, 无人机的期望速度指令可以直接取参考速度, 即:

$$v = v_r \quad (11)$$

为了保证参考点唯一, 假设参考路径上距离无人机最近的点只有一个. 对于直线路径, 该假设对上述控制方法没有任何约束; 对于圆形路径, 则无人机的初始位置不在圆心上. 下面首先在不考虑输入约束的情况下给出方法的稳定性和收敛性分析. 输入约束将在数值仿真中进行讨论.

3.1 直线路径跟踪

无人机跟踪直线路径时, 有 $\omega_r = 0$. 因此, 在不考虑输入约束的情况下由基于虚拟力的路径跟踪方法给出的转向速率可以简化为

$$\omega = \frac{\cos(\psi_r - \psi)}{v}(-kd + cv_N) \quad (12)$$

考虑关系 (8) 式, 上式可转换为

$$\ddot{d} = -kd - c\dot{d} \quad (13)$$

令 $\mathbf{X} = [x_1, x_2]' = [d, \dot{d}]'$, 则上述微分方程可转化为如下状态空间方程

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k & -c \end{bmatrix} \quad (14)$$

令 $\dot{\mathbf{X}} = 0$, 可得系统具有唯一平衡点 $\hat{d} = \hat{x}_1 = 0$, $\hat{\dot{d}} = \hat{x}_2 = 0$.

系统的特征方程为

$$\det(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad (15)$$

因此, 系统的特征根为

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4k}}{2} \quad (16)$$

由于虚拟弹簧的弹性系数和阻力系数满足 $k > 0$, $c > 0$, 因此, 总有 $\text{real}(\lambda) < 0$, 即系统 (14) 始终渐近稳定. 因此, 不考虑输入约束的情况下利用基于虚拟力的路径跟踪方法能保证侧偏距收敛到唯一的平衡点 0.

评述 1: 如果不考虑无人机的控制输入约束, 当虚拟弹簧的参数满足 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 侧偏距 d 能够快速无超调地收敛到 0.

从式 (16) 中可知: 当阻力系数满足 $c > 2\sqrt{k}$ 时, 系统 (14) 为 2 阶过阻尼系统, 此时, 侧偏距可以无超调地收敛到平衡位置, 但是收敛速度由于阻尼过大而变得较慢; 当阻力系数满足 $0 < c < 2\sqrt{k}$ 时, 系统 (14) 为 2 阶欠阻尼系统, 此时侧偏距在收敛到 0 之前会产生超调和衰减震荡; 当阻力系数满足 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 系统 (14) 为临界阻尼系统, 此时侧偏

距能够无超调收敛到 0, 而且收敛速度相对过阻尼的情况更快.

值得指出, 当无人机跟踪直线路径时, 基于虚拟力的路径跟踪控制方法实际控制效果等价于线性系统的比例-微分控制器, 其中 $e = -d$, $\dot{e} = -\dot{d}$, $K_P = k$, $K_D = c$. 因此当没有输入约束时, 评述 1 中参数 $c = 2\sqrt{k}$ 是一个理想的整定结果. 此外, 只要满足 $k > 0$, $c \geq 2\sqrt{k}$, 系统都能得到无超调收敛的结果. 因此, 该方法具有很强的参数适应性.

3.2 圆形路径跟踪

当无人机跟踪圆形路径时, 有 $r = \left| \frac{v_r}{\omega_r} \right| = \text{const.}$

令 $a_c = \frac{v_T^2}{l}$ 表示向心加速度, 根据式 (7), 当 $k = c = 0$ 时, $a_N = a_c$ 恰好能使无人机沿着以 $|l| = \left| \frac{v_r}{\omega_r} + d \right|$ 为半径、与参考路径同心的圆形路径盘旋. 可以看出 a_c 并不改变侧偏距 d 的大小. 因此, 只有虚拟弹簧的弹力和阻力能够影响无人机侧偏距的变化. 进而有

$$\ddot{d} = a_N + a_c = -kd - c\dot{d} \quad (17)$$

此时, 在期望转向速率 (9) 式的作用下, 无人机跟踪圆形路径时关于侧偏距 d 的动态与跟踪直线路径时相同. 因此, 侧偏距能渐近稳定并收敛到 0.

3.3 变曲率曲线路径跟踪

当无人机跟踪一般的变曲率曲线路径时, 尽管 $\frac{\omega_r}{v_r}$ 是变化的, 虚拟力方法中的虚拟向心力 $\frac{v_T^2}{l}$ 作为非线性反馈, 其分母中 $l = \frac{v_r}{\omega_r} - d$ 仍能反映出 $\frac{\omega_r}{v_r}$ 的变化. 向心力描述的是无人机沿切向的运动速度对法向状态的影响, 因此通过引入虚拟向心力 $\omega_r \frac{v_T^2}{d\omega_r + v_r}$ 作为非线性反馈, 可以抵消实际应用中 v_T 对侧偏距 d 的影响. 因此, 仍然只有弹簧的弹力和阻力影响侧偏距的变化. 此时对系统稳定性和收敛性的分析与直线路径跟踪和圆形路径跟踪时相同. 可以看出, 直线路径跟踪和圆形路径跟踪是一般曲线跟踪的两个特例.

评述 2: 与直线路径跟踪不同, 无人机跟踪圆形路径或者一般的曲线路径时, 基于虚拟力的路径跟踪控制方法等效于非线性系统的反馈线性化方法.

反馈线性化是指对非线性系统施加状态反馈或进行非线性变换使所得到的闭环系统成为等价的线性系统. 论文中原系统是非线性的. 通过引入非线性反馈 $\omega_r \frac{v_T^2}{d\omega_r + v_r}$, 并通过适当的非线性变换, 使得分析系统时输入由实际的控制输入 ω 变换为侧偏

距的 2 阶导数 \ddot{d} . 从而将非线性系统转变为易于分析的 2 阶线性系统. 并且得到的闭环系统等效于利用了比例-微分控制的线性系统. 因此, 评述 1 中的结论, 同样适用于圆形路径跟踪和变曲率曲线跟踪的情况.

与传统的反馈线性化和比例-微分控制相比, 基于虚拟力的路径跟踪控制方法控制参数的物理意义明确, 使得在实际应用中更容易整定, 如 $k > 0$ 和 $c \geq 2\sqrt{k}$.

4 数值仿真 (Numerical simulation)

为验证论文提出的路径跟踪控制方法, 本节给出数值仿真结果. 仿真包括 4 个情景, 前 3 个情景分别是直线路径跟踪、圆形路径跟踪和变曲率曲线路径跟踪. 每个情景包括两种情况, 即不考虑无人机输入约束和考虑输入约束. 分析输入约束对路径跟踪性能的影响, 并给出参数整定建议. 情景 4 中, 选择 NLGL 方法进行对比仿真.

在所有仿真中, 采用固定翼无人机运动学模型 (1), 控制输入为期望速度 v 和期望转向速率 ω , 且所有仿真中, 参考路径速度为 20 m/s. 无人机的期望速度等于参考速度, 保持不变, 即:

$$v = v_r = 20 \text{ m/s} \quad (18)$$

不考虑输入约束时, 期望转向速率按照式 (9) 进行计算; 考虑输入约束时, 期望转向速率按照式 (9)、(10) 进行计算.

4.1 情景 1: 直线路径跟踪

首先不考虑输入约束的影响. 无人机的初始位置为 (50 m, 50 m), 初始航向角为 0 rad. 参考路径的起点为 (0 m, 0 m), 初始航向角为 $\psi_r = 0 \text{ rad}$, 转向速率始终为 $\omega_r = 0 \text{ rad/s}$. 虚拟弹簧的弹性系数为 $k = 1$. 为了验证评述 1 中的结果, 阻力系数分别选择 $c = \sqrt{k}$ 、 $c = 2\sqrt{k}$ 和 $c = 3\sqrt{k}$ 进行仿真. 图 2 给出了不同阻力系数下无人机跟踪直线路径的仿真结果. 3 种情况下无人机均能收敛到期望的直线路径, 但是收敛过程不同, 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 但是收敛过程较长.

实际应用中, 大部分无人机具有输入饱和约束. 这里考虑无人机具有输入约束 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} = 0.2 \text{ rad/s}$, 其余参数不变. 图 3 给出考虑输入约束时无人机跟踪直线路径的仿真结果. 3 种情况下无

人机均能收敛到期望的直线路径. 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡, 且相对于无输入约束的情况超调变大, 收敛过程变长; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 收敛之前也有轻微超调, 同样收敛过程变长; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 收敛过程稍微变长. 可见, 评述 1 的结论在存在约束时并不成立.

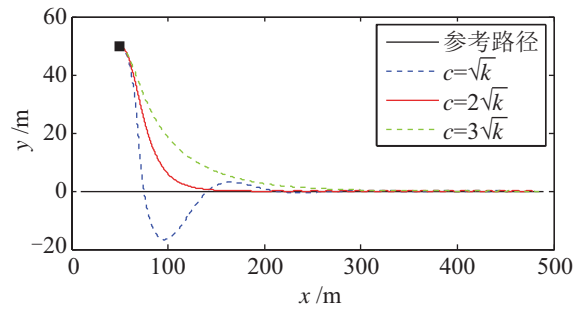


图 2 阻力系数不同时无人机直线跟踪结果: 不考虑输入约束

Fig.2 UAV trajectories for straight-line following with different drag coefficients: without considering input constraints

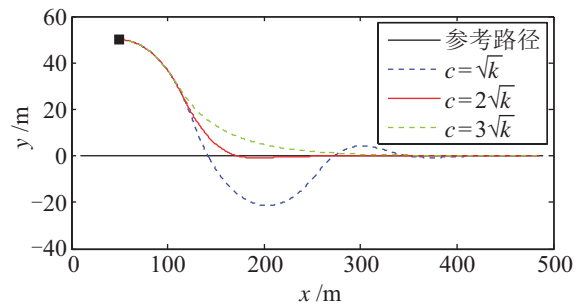


图 3 阻力系数不同时无人机直线跟踪结果: 考虑输入约束

Fig.3 UAV trajectories for straight-line following with different drag coefficients: considering input constraints

4.2 情景 2: 圆形路径跟踪

不考虑输入约束时, 无人机的初始位置为 (200 m, 150 m), 初始航向角为 0 rad. 参考路径的起点为 (0 m, 200 m), 初始航向角为 $\psi_r = 0 \text{ rad}$, 转向速率始终为 $\omega_r = -0.1 \text{ rad/s}$. 虚拟弹簧的弹性系数为 $k = 1$. 阻力系数分别选择 $c = \sqrt{k}$ 、 $c = 2\sqrt{k}$ 和 $c = 3\sqrt{k}$ 进行仿真. 图 4 给出了不同阻力系数下无人机跟踪圆形路径的仿真结果. 3 种情况下无人机均能收敛到期望的圆形路径, 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 但是收敛过程较长. 可见, 评述 1 中的结论同样适用于跟踪无约束圆形路径的情况.

考虑无人机具有输入约束 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} = 0.2 \text{ rad/s}$, 其余参数不变. 图 5 给出考虑输入约

束时无人机跟踪圆形路径的仿真结果. 3 种情况下无人机均能收敛到期望的圆形路径, 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡, 且相对于图 4 中无输入约束的情况超调变大, 收敛过程变长; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 收敛之前也有轻微超调, 同样收敛过程变长; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 收敛过程稍微变长. 评述 1 的结论在存在约束时并不成立.

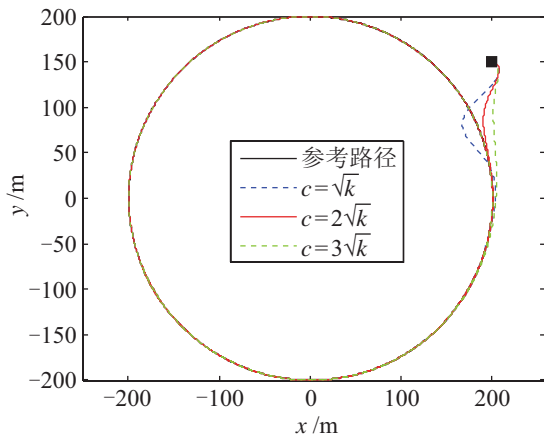


图 4 阻力系数不同时无人机圆形路径跟踪结果: 不考虑输入约束

Fig.4 UAV trajectories for circular path following with different drag coefficients: without considering input constraints

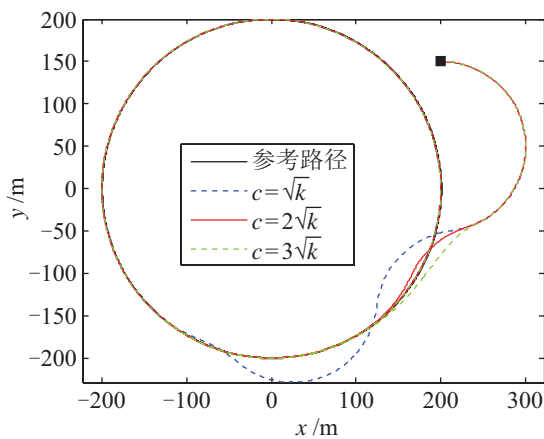


图 5 阻力系数不同时无人机圆形路径跟踪结果: 考虑输入约束

Fig.5 UAV trajectories for circular path following with different drag coefficients: considering input constraints

4.3 情景 3: 变曲率曲线路径跟踪

不考虑输入约束时. 无人机的初始位置为 (0 m, 150 m), 初始航向角为 $\frac{\pi}{2}$ rad. 参考路径的起点为 (0 m, 0 m), 初始航向角为 $\psi_r = 0$ rad, 转向速率为 $\omega_r = -0.1 \sin(\frac{\pi t}{30})$. 虚拟弹簧的弹性系数为 $k = 1$. 阻力系数分别选择 $c = \sqrt{k}$ 、 $c = 2\sqrt{k}$ 和 $c = 3\sqrt{k}$ 进行仿真. 图 6 给出了不同阻力系数下无人机跟踪曲

线路径的仿真结果. 3 种情况下无人机均能收敛到期望的曲线路径, 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 但是收敛过程较长. 可见, 评述 1 中的结论同样适用于跟踪无约束曲线路径的情况.

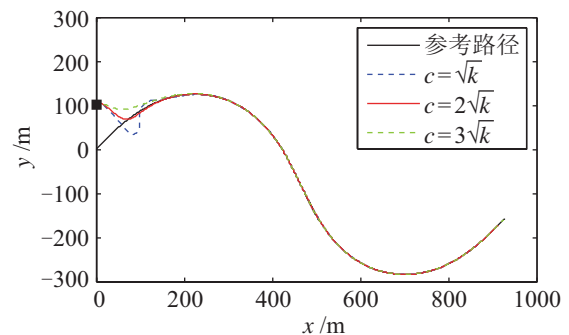


图 6 阻力系数不同时无人机曲线跟踪结果: 不考虑输入约束

Fig.6 UAV trajectories for curved path following with different drag coefficients: without considering input constraints

考虑无人机具有输入约束 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} = 0.2$ rad/s, 其他参数不变. 图 7 给出考虑输入约束时无人机跟踪曲线路径的仿真结果. 3 种情况下无人机均能收敛到期望的曲线路径, 当 $c = \sqrt{k}$ 时, 在无人机收敛到参考路径之前有超调和震荡, 且相对于无输入约束的情况超调变大, 收敛过程变长; 当 $c = 2\sqrt{k}$ 时, 收敛之前也有轻微超调, 同样收敛过程变长; 当 $c = 3\sqrt{k}$ 时, 无人机可以无超调收敛到期望的参考路径, 收敛过程稍微变长. 评述 1 的结论在存在约束时并不成立.

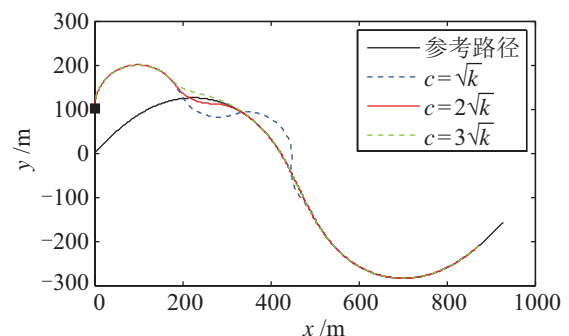


图 7 阻力系数不同时无人机曲线跟踪结果: 考虑输入约束
Fig.7 UAV trajectories for curved path following with different drag coefficients: considering input constraints

图 2~图 7 中的仿真结果表明, 基于虚拟力的路径跟踪方法, 适用于存在输入饱和约束的无人机. 与无约束系统相比, 存在约束时, 由于输入的

饱和限制, 系统收敛需要更多的调节时间. 虽然不能像无约束时选择最优的参数关系 $c = 2\sqrt{k}$, 但是通过适当增大阻力系数 c 也能获得较为理想的跟踪效果, 实际应用中建议选择 $c \geq 3\sqrt{k}$. 此外, 整体收敛速度也可以通过调节弹性系数 k 来实现. 实际应用中, k 的最优值取决于所使用的无人机的机动性能.

4.4 情景 4: 与 NLGL 方法对比

为进一步说明基于虚拟力的路径跟踪方法的跟踪性能, 选择 NLGL 方法作对比. 参考轨迹的航向速率为

$$\omega_r = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10 \text{ s} \\ -0.1, & 10 \text{ s} \leq t < 40 \text{ s} \\ 0.1, & 40 \text{ s} \leq t < 60 \text{ s} \end{cases} \quad (19)$$

无人机初始状态与参考点相同. 对比仿真中, 两种方法均考虑无人机具有输入约束 $\omega_{\max} = -\omega_{\min} = 0.2 \text{ rad/s}$. 基于虚拟力的方法的参数为 $k = 1$, $c = 3\sqrt{k}$; NLGL 的参数按照文 [9] 中的方法选择, 即 $L = 0.6r$, 由 $v_r = 20 \text{ m/s}$ 可知, 参考路径中包含的两个圆环部分具有相同的半径 $r = \frac{v_r}{\omega_r} = 200 \text{ m}$, 因此, 此处选择 $L = 120 \text{ m}$. 图 8 给出分别采用两种方法时的无人机仿真轨迹, 图 9 给出分别采用两种方法时的侧偏距曲线. 可以看出, 两种方法都可以实现对路径的跟踪. 在跟踪直线和圆形路径时, 两种方法都具有较好的效果, 但当参考路径的曲率 ω_r 发生变化时, 采用 NLGL 方法的跟踪结果存在较大的跟踪误差. 在整个仿真过程中, 基于虚拟力的路径跟踪方法跟踪误差均为 0. 可见, 提出的基于虚拟力的无人机路径跟踪方法可以精确跟踪变曲率曲线, 且跟踪性能优于 NLGL 方法.

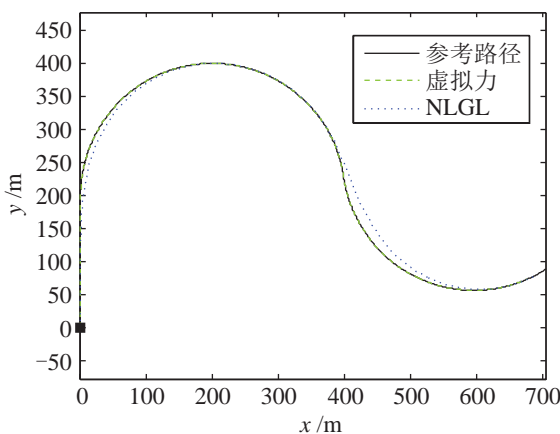


图 8 基于虚拟力的方法和 NLGL 方法的仿真轨迹对比
Fig.8 UAV trajectories in the comparative simulation between the virtual force based approach and the NLGL approach

在实际路径跟踪问题中, 参考路径一般是人为设定的, 或通过路径规划算法计算得出, 并不需要传感器测量. 因此, 一般参考路径是精确已知的, 从而参考点的航向速率 ω_r 也精确已知. 有效利用参考路径的航向速率信息可以提高变曲率曲线的跟踪精度. 在所提出的虚拟力方法中, 设计了虚拟向心力, 虚拟向心力的大小和方向很大程度上取决于参考点处的航向速率 ω_r , 其实际效果可以实时抵消参考路径曲率变化带来的影响. 而 NLGL 方法没有利用该信息. 因此, 基于虚拟力的方法可以精确跟踪变曲率曲线, 而 NLGL 方法在曲率发生变化时存在较大的侧偏距.

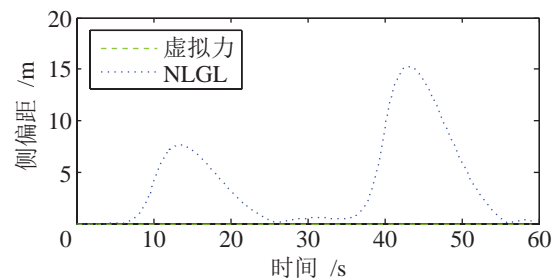


图 9 基于虚拟力的方法和 NLGL 方法的仿真侧偏距对比
Fig.9 Cross-tracking errors in the comparative simulation between the virtual force based approach and the NLGL approach

5 结论 (Conclusion)

针对无人机路径跟踪问题, 论文提出了一种基于虚拟力的控制方法. 通过设计虚拟力计算期望的转向速率. 其中虚拟向心力能够补偿参考路径曲率, 因此该方法可以用于跟踪变曲率曲线. 理论分析表明, 在跟踪直线时, 该方法等价于比例-微分控制; 跟踪圆形或变曲率曲线时, 等价于反馈线性化方法. 论文分析了方法的稳定性和收敛性, 考虑了输入约束对该方法跟踪性能的影响, 并给出有无约束时的参数选择建议. 利用虚拟力控制无人机, 使控制参数具有明确的物理意义, 从而使参数在实际应用中容易整定. 仿真结果表明基于虚拟力的路径跟踪方法可以精确跟踪直线、圆形和变曲率曲线, 且跟踪性能优于 NLGL 方法.

下一步工作将考虑无人机 6 自由度模型和测量噪声, 研究上述方法在实际系统中的应用, 并基于文 [24-25] 给出的试验系统开展飞行实验研究.

参考文献 (References)

[1] Wang X, Zhu H, Zhang D, et al. Vision-based detection and tracking of a mobile ground target using a fixed-wing UAV[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11: No.156.

- [2] Sujit P B, Saripalli S, Sousa B J. Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(1): 42-59.
- [3] Conte G, Duranti S, Merz T. Dynamic 3D path following for an autonomous helicopter[C]//*IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. 2004.
- [4] Ambrosino G, Ariola M, Ciniglio U, et al. Path generation and tracking in 3-D for UAVs[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(4): 980-988.
- [5] Osborne J, Rysdyk R. Waypoint guidance for small UAVs in wind[C]//*Infotech@ Aerospace: Advancing Contemporary Aerospace Technologies and Their Integration*. Reston, USA: AIAA, 2005: 459-470.
- [6] Fossen T I, Breivik M, Skjetne R. Line-of-sight path following of underactuated marine craft[C]//*Proceedings of the 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 2003: 244-249.
- [7] Rysdyk R. UAV path following for constant line-of-sight[C]//*2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conference and Workshop and Exhibit*. 2003.
- [8] Rysdyk R. Unmanned aerial vehicle path following for target observation in wind[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(5): 1092-1100.
- [9] Park S, Deyst J, How J P. Performance and Lyapunov stability of a nonlinear path following guidance method[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(6): 1718-1728.
- [10] Kothari M, Postlethwaite I, Gu D W. A suboptimal path planning algorithm using rapidly-exploring random trees[J]. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2010, 2(1-2): 93-104.
- [11] Nelson D R, Barber D B, McLain T W, et al. Vector field path following for miniature air vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(3): 519-529.
- [12] Sun M R, Zhu R M, Yang X G. UAV path generation, path following and gimbal control[C]//*IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 870-873.
- [13] Wang B, Dong X X, Chen B M. Cascaded control of 3D path following for an unmanned helicopter[C]//*IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 70-75.
- [14] Lee S, Cho A, Kee C. Integrated waypoint path generation and following of an unmanned aerial vehicle[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2010, 82(5): 296-304.
- [15] Li Z, Sun J, Oh S. Handling roll constraints for path following of marine surface vessels using coordinated rudder and propulsion control[C]//*American Control Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 6010-6015.
- [16] Jackson S, Tisdale J, Kamgarpour M, et al. Tracking controllers for small UAVs with wind disturbances: Theory and flight results[C]//*47th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 564-569.
- [17] Cao C, Hovakimyan N, Kaminer I, et al. Stabilization of cascaded systems via L_1 adaptive controller with application to a UAV path following problem and flight test results[C]//*American Control Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1787-1792.
- [18] Aguiar A P, Kaminer I, Ghabelloo R, et al. Coordinated path following of multiple UAVs for time-critical missions in the presence of time-varying communication topologies[C]//*17th IFAC World Congress*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008: 16015-16020.
- [19] Kaminer I, Yakimenko O, Dobrokhodov V, et al. Coordinated path following for time-critical missions of multiple UAVs via L_1 adaptive output feedback controllers[C]//*AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Reston, USA: AIAA, 2007: 915-948.
- [20] Spears W M, Gordon D F. Using artificial physics to control agents[C]//*International Conference on Information Intelligence and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 1999: 281-288.
- [21] Spears W M, Spears D F, Hamann J C, et al. Distributed, physics-based control of swarms of vehicles[J]. *Autonomous Robots*, 2004, 17(2-3): 137-162.
- [22] Ren W, Beard R W. Trajectory tracking for unmanned air vehicles with velocity and heading rate constraints[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(5): 706-716.
- [23] Aguiar A P, Hespanha J P. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8): 1362-1379.
- [24] Wang X, Kong W W, Zhang D B, et al. Active disturbance rejection controller for small fixed-wing UAVs with model uncertainty[C]//*IEEE International Conference on Information and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 2299-2304.
- [25] Wang X, Zhang J Y, Zhang D B, et al. UAV formation: From numerical simulation to actual flight[C]//*IEEE International Conference on Information and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 475-480.

作者简介:

王 勋 (1988-), 男, 博士生. 研究领域: 无人机飞行控制, 编队控制.

张代兵 (1977-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师. 研究领域: 无人机系统, 机器人技术.

沈林成 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 无人机系统, 机器人技术, 任务规划技术.