Journal of Computer Applications
计算机应用,2016,36(9):2631 -2635
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2016-09-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2016)09-2631-05
doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.09.2631

无人机三维航路自适应跟踪控制

张　坤*,高晓光
(西北工业大学 电子信息学院,西安 710129)
(*通信作者电子邮箱 zhangkunhn@163.com)

摘　要:针对无人机自动驾驶仪参数标称值偏离实际值情况下的航迹跟踪问题,提出一种无人机三维航路自适应跟踪导引律。首先在无人机自动驾驶仪参数无偏离的条件下,推导出能够跟踪三维航路的速度指令、航迹倾斜角指令和航迹方位角指令,并使用 Lyapunov 稳定性理论证明了跟踪系统全局渐进稳定;之后考虑自动驾驶仪参数标称值偏离实际值的情况,设计自适应算法在线估计自动驾驶仪参数,得到无人机三维航路自适应跟踪导引律。仿真实验表明所提出的自适应跟踪导引律能够使无人机在自动驾驶仪参数偏离条件下有效跟踪三维航迹。

关键词:航路跟踪;参数偏离;导引律;无人机;自适应控制
中图分类号:V249　　**文献标志码**:A

Adaptive tracking control for unmanned aerial vehicle's three dimensional trajectory

ZHANG Kun*, GAO Xiaoguang
(*School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi* 710129, *China*)

Abstract: Concerning the problem of trajectory tracking control for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) when the nominal values of autopilot parameters deviate from the actual values, a three-dimensional trajectory adaptive tracking control law was proposed. First, with no parameter deviation of autopilot parameters, a guidance law was derived and commands were obtained for the UAV's airspeed, track angle and flight-path angle. Global asymptotic stability of the closed-loop tracking system was proved by Lyapunov stability theory. Then regarding the deviation of autopilot parameters, a parameter adaption algorithm was designed to estimate the actual autopilot parameters online, and an adaptive tracking control law for UAV's three-dimensional trajectory was obtained. Simulation results show that the proposed adaptive tracking control law can achieve UAV's three-dimensional trajectory tracking effectively in spite of autopilot parameter deviation.

Key words: trajectory tracking; parameter deviation; guidance law; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); adaptive control

0　引言

近年来,无人机在环境监测、地图测绘、灾难救援、边境巡逻、态势感知、毁伤评估、通信中继等民用和军用领域得到了广泛应用[1]。在多种任务想定中,无人机都需要具有规划参考航迹并精确跟踪该参考航迹的能力[2]。在城区监控和野外搜救等任务中,无人机需要在城市建筑之间或各种地形表面贴近飞行。这种情况下,无人机必须具备精确跟踪参考航迹能力。与有人机依赖飞行员控制飞机按照参考航迹飞行不同,无人机依赖自动控制技术实现该功能。作为无人机自动控制关键技术之一,航迹跟踪控制技术能够保证无人机跟踪以时间为参数的参考航迹[3]。航迹跟踪控制技术也应用于无人机编队控制、自动空中加油和追踪动态目标等动态任务中[4]。航迹跟踪控制的基本要求是精确性[5]。而对于无人机来说,其被控过程机理复杂,具有高度非线性、时变性和不确定性,又由于负载等内外部扰动因素的影响,精确的无人机航迹跟踪控制是一个较大的挑战[6]。

目前大部分的研究关注二维平面的航路跟踪。传统的线性化方法已经应用于航迹跟踪,但是对于复杂曲线航路无法提供满意的跟踪性能[7];文献[2,8]提出基于向量场的航路跟随方法,该方法可以很好地跟踪二维直线和圆弧航路,但是难以扩展到三维航路;文献[9]提出一种自适应最优航路跟随算法;文献[10]提出应用于直升机的航路规划和控制方法;文献[4]提出基于反步法的三维航路跟踪非线性制导律。以上文献对无人机模型作了简化,没有涉及动力学参数的不确定问题。

由于受到内外部扰动和无人机自身的物理特性的影响,无人机飞行控制系统或自动驾驶仪的参数标称值偏离实际值,在航迹跟踪控制律设计中使用不精确的自动驾驶仪参数将会降低跟踪精度[11]。因此,为实现更佳的航迹跟踪效果,需要考虑自动驾驶仪参数的不确定性。文献[11]考虑不精确的自动驾驶仪参数,利用参数自适应和反步法推导出能够在线估计动力学参数并实现精确航迹跟踪的控制指令;文献[12]针对高超音速飞行器的纵向跟踪控制,提出能够估计不确定性的神经网络自适应动态控制方法;文献[13]使用在线学习自适应径向基神经网络处理旋翼无人机参数不确定性,实现了旋翼无人机的精确控制;文献[14]针对纯反馈不稳定将力学系统引入模糊系统,设计了在线估计模型未知参数的自适应模糊动态面控制。

基于此,本文提出一种能够实现无人机自动驾驶仪参数

收稿日期:2016-01-19;**修回日期**:2016-03-24。　**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(61573285)。
作者简介:张坤(1985—),男,河南新乡人,博士研究生,主要研究方向:多无人机导航制导与控制;　高晓光(1957—),女,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:复杂系统建模仿真与效能评估。

《计算机应用》Journal of Computer Applications

不确定条件下三维航迹自适应跟踪控制律。首先考虑自动驾驶仪参数标称值与实际值无偏离的情况，设计三维航迹跟踪控制律；进一步考虑标称值与实际值有偏离的情况，采用自适应控制方法设计能够实时估计动力学参数的自适应跟踪控制律。基于 Lyapunov 稳定性理论证明了该控制律能够使跟踪系统全局渐进稳定。

1 问题提出

为了使无人机按照规划航迹飞行，假设该规划航迹是一个虚拟的飞机的飞行航迹，该虚拟飞机作为长机引导无人机飞行，所以称之为虚拟长机，那么无人机可以通过跟踪该虚拟长机来实现航迹跟踪的目的。假设规划航迹光滑，各坐标分量的一、二阶导数都存在。虚拟长机位置表示为 (x_r,y_r,h_r)，虚拟长机的速度为 $(\dot{x}_r,\dot{y}_r,\dot{h}_r)$，虚拟长机的速度为 $(\ddot{x}_r,\ddot{y}_r,\ddot{h}_r)$，其中：$x_r$、$y_r$ 分别表示虚拟长机在北东地坐标系中的水平面内的坐标分量，h_r 表示高度。

装备自动驾驶仪的无人机模型为：

$$\begin{cases}\dot{x} = v\cos(\gamma)\cos(\chi)\\ \dot{y} = v\cos(\gamma)\sin(\chi)\\ \dot{h} = -\dot{z} = v\sin(\gamma)\\ \dot{v} = (v^c - v)/\alpha_v\\ \dot{\gamma} = (\gamma^c - \gamma)/\alpha_\gamma\\ \dot{\chi} = (\chi^c - \chi)/\alpha_\chi\end{cases} \tag{1}$$

其中：x、y、z 表示无人机在北东地坐标系中的三个坐标分量；h 表示飞行高度；v^c、γ^c、χ^c 分别表示速度指令、航迹倾斜角指令和航迹方位角指令；v、γ、χ 分别表示速度、航迹倾斜角和航迹方位角；α_* 表示与自动驾驶仪相关的常数[14]。自动驾驶仪参数实际值 $\boldsymbol{\theta} = (\alpha_v,\alpha_\gamma,\alpha_\chi)^{\mathrm{T}}$，其标称值记为 $\boldsymbol{\theta}_0$。

令 $\boldsymbol{r} = (x,y,h)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{r}_r = (x_r,y_r,h_r)^{\mathrm{T}}$，本文提出如下问题：当无人机自动驾驶仪参数标称值与实际值偏离，即 $\|\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_0\| \neq 0$ 时，设计反馈控制律使得无人机在任意初始条件下跟踪误差收敛到零，即有下式成立：

$$\lim_{t\to\infty}\|\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{r}_r(t)\| = 0 \tag{2}$$

2 导引律设计

本节采用反馈线性法和自适应控制推导无人机三维航迹跟踪控制指令。令：

$$\begin{cases}v_x = v\cos(\gamma)\cos(\chi)\\ v_y = v\cos(\gamma)\sin(\chi)\\ v_h = v\sin(\gamma)\end{cases} \tag{3}$$

进一步，令 $\boldsymbol{v} = (v_x,v_y,v_h)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_r$，$\boldsymbol{\eta} = v - \dot{\boldsymbol{r}}_r$，$\boldsymbol{\mu} = (v,\gamma,\chi)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\mu}^c = (v^c,\gamma^c,\chi^c)^{\mathrm{T}}$。那么，跟踪系统动力学方程为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\eta}\\ \dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{A}^{-1}(\boldsymbol{\mu}^c - \boldsymbol{\mu}) - \ddot{\boldsymbol{r}}_r\end{cases} \tag{4}$$

其中：

$$\boldsymbol{A} = \mathrm{diag}(\alpha_v,\alpha_\gamma,\alpha_\chi)$$

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix}\cos(\gamma)\cos(\chi) & -v\sin(\gamma)\cos(\chi) & -v\cos(\gamma)\sin(\chi)\\ \cos(\gamma)\sin(\chi) & -v\sin(\gamma)\sin(\chi) & v\cos(\gamma)\cos(\chi)\\ \sin(\gamma) & v\cos(\gamma) & 0\end{bmatrix}$$

定义滑模函数为：

$$\boldsymbol{s} = \dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\xi} \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{\Lambda} = \mathrm{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3)(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3 > 0)$。那么，

$$\dot{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\eta} \tag{6}$$

设计控制器为：

$$\boldsymbol{\mu}^c = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{T}^{-1}(\ddot{\boldsymbol{r}}_r - \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{K}\boldsymbol{s}) \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{K}$ 为正定对角矩阵。

定理 1 由虚拟长机、无人机方程(1)和控制器(7)组成的闭环系统渐近稳定且控制器能够保证跟踪误差收敛到零。

证明 对以 $\boldsymbol{s}$ 为状态变量的系统，取 Lyapunov 候选函数：

$$V_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s} \tag{8}$$

那么：

$$\dot{V}_1 = \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}(\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\eta}) \tag{9}$$

将式(7)代入式(9)可得：

$$\dot{V}_1 = -\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{s} \tag{10}$$

显然，V_1 是正定函数，其导数负定。由 Lypunov 稳定性定理知该闭环系统渐近稳定。所以当 $t\to\infty$ 时，$\boldsymbol{s}\to 0$。由滑模定义式(5)可知 $\dot{\boldsymbol{\xi}} = -\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\xi}$，因而有 $\boldsymbol{\xi} = \exp(-\boldsymbol{\Lambda}t)$，故有 $t\to\infty$，$\boldsymbol{\xi}\to 0$，即式(2)成立。

由于式(7)给出的控制器包含无人机自动驾驶仪参数实际值 $\boldsymbol{\theta}$，在标称值与实际值有偏离时，该控制器无法实现或者只能依靠标称值，但依靠有偏离的标称值将使跟踪精度降低。因此，需要给出一种实时在线的估计算法来给出自动驾驶仪参数实际值 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$。现在来设计自适应控制器。

令：

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{T}^{-1}(\ddot{\boldsymbol{r}}_r - \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{K}\boldsymbol{s}) \tag{11}$$

那么式(7)简化为：

$$\boldsymbol{\mu}^c = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi} \tag{12}$$

由于参数 $\boldsymbol{\theta}$ 未知，那么控制器只能用估计值给出：

$$\boldsymbol{\mu}^c = \boldsymbol{\mu} + \hat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\varphi} \tag{13}$$

其中，$\hat{\boldsymbol{A}} = \mathrm{diag}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \mathrm{diag}(\hat{\alpha}_v,\hat{\alpha}_\gamma,\hat{\alpha}_\chi)$。

设计自适应律如下：

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}} = -\boldsymbol{P}\,\mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi})\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s} \tag{14}$$

其中：$\boldsymbol{P} = \mathrm{diag}(p_1,p_2,p_3)(p_1,p_2,p_3 > 0)$。

定理 2 由虚拟长机、无人机方程(1)、控制器(13)和自适应律(14)组成的闭环系统稳定且跟踪误差收敛到零。

证明 考虑 Lyapunov 候选函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P}^{-1}\tilde{\boldsymbol{\theta}} \tag{15}$$

其中，$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}$。

对时间求导可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{T}\boldsymbol{A}^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\varphi} - \ddot{\boldsymbol{r}}_r) + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P}^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} =\\ &-\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{s} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P}^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} + \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{A}^{-1}\hat{\boldsymbol{A}} - \boldsymbol{I})\boldsymbol{\varphi} =\\ &-\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{s} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P}^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} + \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}\,\mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi})\boldsymbol{A}^{-1}\tilde{\boldsymbol{\theta}}\end{aligned} \tag{16}$$

注意到 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = -\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$，并将式(14)代入，则有：

$$\dot{V}_2 = -\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{s} \tag{17}$$

显然，V_2 是正定函数，其导数半负定，故由 Lypunov 稳定性定理知该闭环系统稳定。

Journal of Computer Applications 《计算机应用》

另外,由于 $\dot{V}_2 \leqslant 0$,故 $V_2(t)$ 有界。因而有 $-\int_0^\infty \dot{V}_2(t)\,\mathrm{d}t = V_2(0) - V_2(\infty) < \infty$,所以 $\infty > -\int_0^\infty \dot{V}_2(t)\,\mathrm{d}t = \int_0^\infty \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{s}\,\mathrm{d}t \geqslant \lambda_k \int_0^\infty \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}\,\mathrm{d}t$,其中 λ_k 是 $\boldsymbol{K}$ 的最小特征值。因而 $\int_0^\infty \|\boldsymbol{s}\|_2^2\,\mathrm{d}t < \infty$。于是由 Barbalat 引理[15]得 $\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{s} = 0$。类似定理 1 分析可得式(2)成立。

另外,由式(14)可知,$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}$ 趋近 0,又由于 $\boldsymbol{\theta}$ 是常量,不是持续性激励,因此 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 将收敛到一个常数。

3　仿真实例

定理 2 表明本文提出的控制器(13)和自适应律(14)组成的自适应导引律在理论上是成立的,为验证该自适应导引律跟踪三维曲线的有效性,将导引律应用于无人机跟踪三维空间内上横 8 字形航迹。以时间为参数的螺旋线参考航迹由航迹生成器生成,在生成参考航迹时考虑了无人机的速度、过载等约束[16]。以下将给出三个仿真实验,分别是标称值无偏离时不采用自适应航迹跟踪控制律,标称值偏离时不采用自适应航迹跟踪控制律以及标称值偏离时采用自适应航迹跟踪控制律的情况。仿真实验设置如下:仿真时间为 100 s,仿真步长为 0.01 s,无人机参数 $\boldsymbol{\theta}$ 实际值(1,1,1),无人机初始状态是(160 m, 10 m, 260 m),v = 13 m/s, γ = 0 rad, $\chi = \pi/4$ rad。设计参数 $\boldsymbol{\Lambda}$ = diag(1,1,1), $\boldsymbol{K}$ = diag(1,1,1), $\boldsymbol{P}$ = diag(0.1,0.1,0.1)。无人机参考航迹为上横 8 字形[17-18],其方程为:

$$\begin{cases} x_r = a\cos(\omega t) \\ y_r = a\sin(2\omega t) \\ h_r = b + c\cos(\omega t) \end{cases}$$

仿真 1　在无人机参数标称值(1,1,1),即标称值等于实际值的条件下,验证控制律(7)。仿真结果如图 1 ~3。图 1 显示无人机飞行的三维航迹和参考航路;图 2 显示无人机与虚拟长机的位置误差;图 3 显示无人机的控制量,即空速指令、航迹偏角和航迹倾角指令。可以看出,控制量能够使无人机的飞行航迹收敛到三维参考航路,说明该控制律可以有效跟踪三维空间复杂曲线。

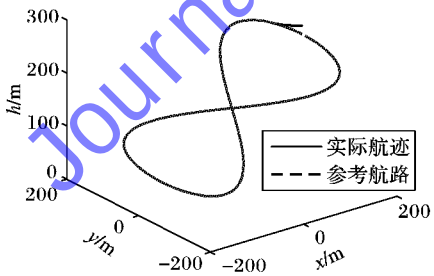


图 1　仿真 1 的航迹和参考航路

仿真 2　在无人机参数标称值(0.5,0.5,0.5),即标称值偏离实际值的条件下,不使用自适应算法,将标称值作为估计值,使用控制律(13)。仿真结果如图 4 ~6。图 4 显示无人机的三维航迹和参考航路,图 5 显示无人机与虚拟长机的位置误差,图 6 显示无人机的控制量。可以看出,当无人机动力学参数标称值偏离实际值时,动力学参数不能精确获知,导致无人机不能精确跟踪参考航迹。进一步的仿真实验还可以得出,当无人机标称值与实际值偏差越大,其跟踪误差越大。限于篇幅,这里没有给出实验结果。

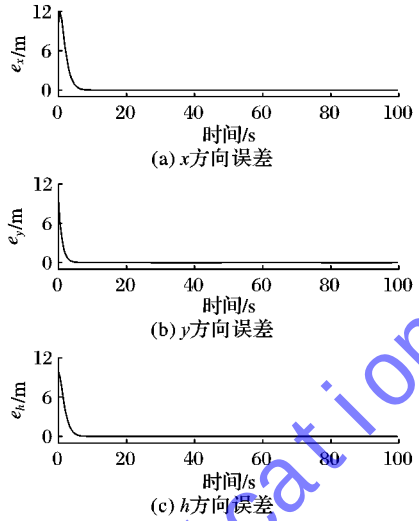


图 2　仿真 1 的位置误差

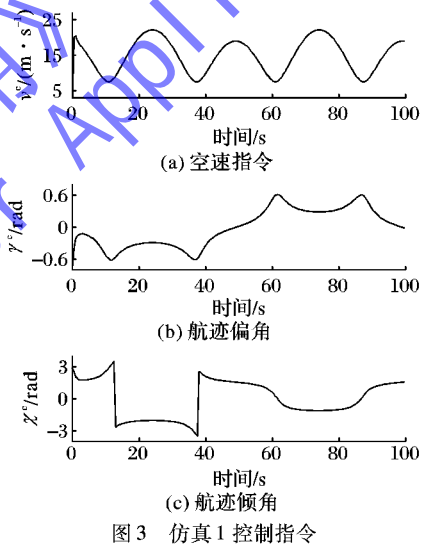


图 3　仿真 1 控制指令

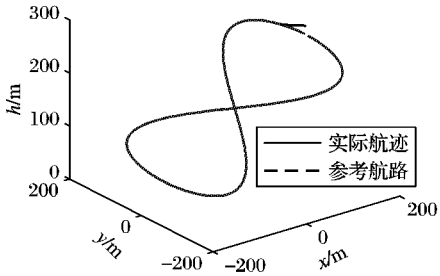
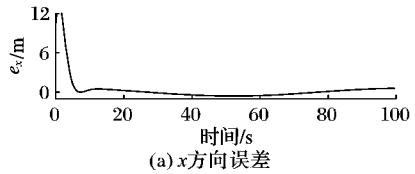


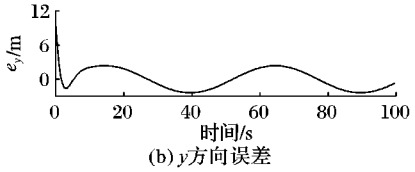
图 4　仿真 2 的航迹和参考航路

仿真 3　在无人机参数标称值(0.5,0.5,0.5),即标称值偏离实际值的条件下,将标称值作为估计值的初始值,使用自适应控制律(13);同时与文献[4]的反步法导引律进行对比。反步法导引律参数为:$\alpha_x = \alpha_y = \alpha_h = 0.1$, $\beta_x = \beta_y = \beta_h = 0.4$,仿真时间为 400 s,仿真结果如图 7 ~10。图 7 显示无人机飞行的三维航迹和参考航路,图 8 显示无人机与虚拟长机的位置误差,图 9 显示本文方法得到的无人机的控制量,图 10 显示本文方法对无人机动力学参数的估计值。可以看出,尽管无人机参数有偏离,自适应控制律给出的控制量仍然能够使无人机精确跟踪三维参考航路。

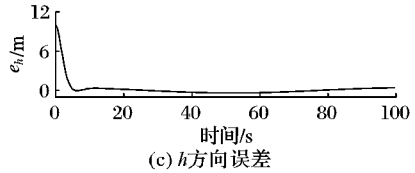
Journal of Computer Applications 《计算机应用》



(a) x方向误差

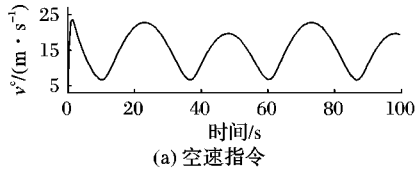


(b) y方向误差

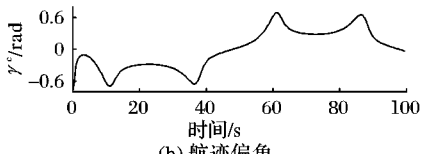


(c) h方向误差

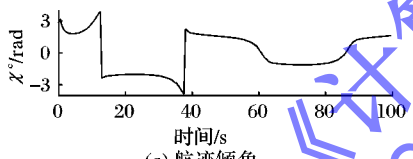
图 5 仿真 2 的位置误差



(a) 空速指令



(b) 航迹偏角



(c) 航迹倾角

图 6 仿真 2 的控制指令

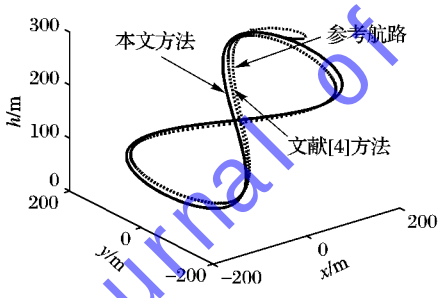
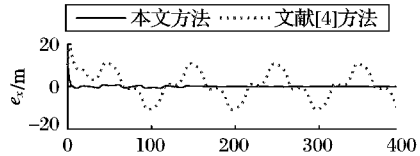


图 7 仿真 3 的航迹和参考航路

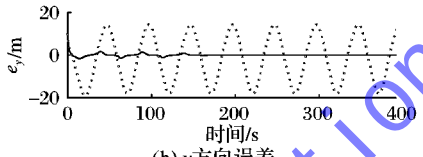
仿真 2 和仿真 3 的对比说明无人机动力学参数标称值偏离实际值条件下自适应控制律提高了三维航迹跟踪精度。另外,从位置误差(图 8)可以看出,在无人机动力学参数偏离情况下,由于自适应控制律中包括无人机动力学参数的自适应估计算法,本文方法的跟踪误差小于文献[4]的方法。对比实验说明,在无人机动力学参数偏离条件下,本文方法与文献[4]的方法相比具有更好的跟踪性能。

4 结语

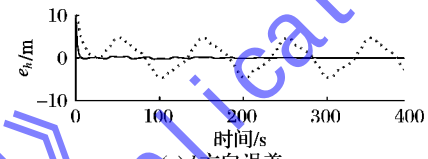
本文讨论了无人机动力学参数不确定条件下的无人机三维航路跟踪问题,提出了一种能够实现在无人机动力学参数标称值偏离实际值时三维航路跟踪的自适应控制律。首先假设动力学参数标称值与实际值匹配,设计了航迹跟踪控制律;之后考虑动力学参数标称值与实际值不匹配,设计自适应控制律来估计实际的动力学参数,得到航迹跟踪自适应控制律。仿真结果验证了航迹跟踪自适应控制律的有效性。



(a) x方向误差

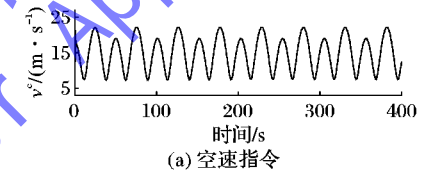


(b) y方向误差

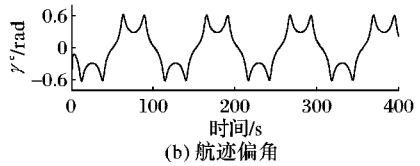


(c) h方向误差

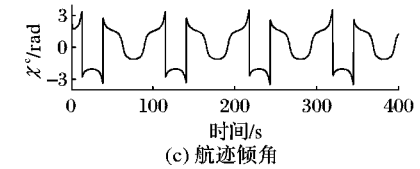
图 8 仿真 3 跟踪 8 字形的位置误差



(a) 空速指令

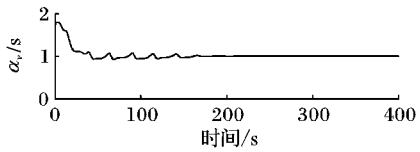


(b) 航迹偏角

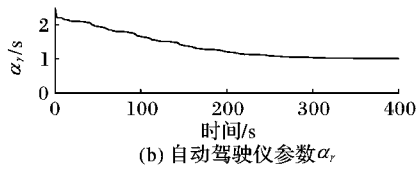


(c) 航迹倾角

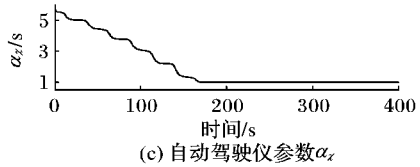
图 9 仿真 3 的控制指令



(a) 自动驾驶仪参数α_x



(b) 自动驾驶仪参数α_y



(c) 自动驾驶仪参数α_z

图 10 仿真 3 的估计参数

进一步的工作可以从以下方面开展:1)本文提出的控制

《计算机应用》Journal of Computer Applications

律使用的是全状态反馈,能否使用高增益观测器等方法将控制律扩展到输出反馈;2)考虑无人机动力学特性中的未建模动态,使用神经网络控制或模糊控制等方法研究无人机动力学特性含有未建模动态项的航迹跟踪问题。

参考文献:

[1] CHO A, KIM J, LEE S, et al. Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and Pitot tube [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 109 – 117.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 刘重,高晓光,符小卫,等. 基于反步法和非线性动态逆的无人机三维航路跟踪制导控制[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 2030 – 2040. (LIU Z, GAO X G, FU X W, et al. Three-dimensional path tracking guidance and control for unmanned aerial vehicle based on back-stepping and nonlinear dynamic inversion [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(12): 2030 – 2040.)

[5] SUJIT P B, SARIPALLI S, SOUSA J B. Unmanned aerial vehicle path following: a survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicless [J]. IEEE Control Systems, 2014, 34(1): 42 – 59.

[6] 张坤,高晓光. 未知风场扰动下无人机三维航迹跟踪鲁棒最优控制[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 3009 – 3015. (ZHANG K, GAO X G. Robust optimal control for unmanned aerial vehicles' three-dimensional trajectory tracking in wind disturbance [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37(12): 3009 – 3015.)

[7] 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.

[8] LAWRENCE D A, FREW E W, PISANO W J. Lyapunov vector fields for autonomous unmanned aircraft flight control [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(5): 1220 – 1229.

[9] RATNOO A, SUJIT P B, KOTHARI M. Adaptive optimal path following for high wind flights [C]// Proceedings of the 18th International Federation of Automatic Control World Congress. Milano: IFAC Secretariat, 2011: 12985 – 12990.

[10] GUERRERO J A, ESCARENO J A, BESTAOUI Y. Quad-rotor MAV trajectory planning in wind fields [C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 778 – 783.

[11] REN W. Trajectory tracking control for a miniature fixed-wing unmanned air vehicle [J]. International Journal of Systems Science, 2007, 38(4): 361 – 368.

[12] BUTT W A, YAN L, AMEZQUITA S K. Adaptive integral dynamic surface control of a hypersonic flight vehicle [J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(10): 1717 – 1728.

[13] LEI X, LU P. The adaptive radial basis function neural network for small rotary-wing unmanned aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4808 – 4815.

[14] 刘金琨,郭一. 一类纯反馈力学系统的自适应模糊动态面控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1591 – 1595. (LIU J K, GUO Y. Adaptive fuzzy dynamic surface control for a class of pure-feedback mechanical systems [J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1591 – 1595.)

[15] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002: 126 – 132.

[16] ANDERSON E P, BEARD R W, MCLAIN T W. Real-time dynamic trajectory smoothing for unmanned air vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 471 – 477.

[17] PARK S. Autonomous aerobatics on commanded path [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 22(1): 64 – 74.

[18] CABECINHAS D, CUNHA R, SILVESTRE C. A nonlinear quadrotor trajectory tracking controller with disturbance rejection [J]. Control Engineering Practice, 2014, 26(1): 1 – 10.

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61573285).

ZHANG Kun, born in 1985, Ph. D. candidate. His research interests include multiple unmanned aerial vehicles' navigation, guidance and control.

GAO Xiaoguang, born in 1957, Ph. D., professor. Her interests include modeling, simulation and effectiveness evaluation of complicated systems.

(上接第 2600 页)

[17] LI Z, CHANG S, LIANG F, et al. Learning locally-adaptive decision functions for person verification [C]// Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 3610 – 3617.

[18] LI W, ZHAO R, XIAO T, et al. DeepReID: deep filter pairing neural network for person re-identification [C]// Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Columbus Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2014: 152 – 159.

[19] YI D, LEI Z, LIAO S. Deep metric learning for practical person re-identification [C]// ICPR '14: Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2014: 34 – 39.

[20] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965 – 976.

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61402519) and the Jiangsu Provincial Nature Science Foundation (BK20140071, BK2012512).

ZHANG Gengning, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include person re-identification, computer vision.

WANG Jiabao, born in 1985, Ph. D., lecturer. His research interests include machine learning, computer vision.

LI Yang, born in 1984, Ph. D. candidate, lecturer. His research interests include machine learning, computer vision.

MIAO Zhuang, born in 1976, Ph D., associate professor. His research interests include intelligent information processing.

ZHANG Yafei, born in 1955, Ph. D., professor. His research interests include artificial intelligence.

LI Hang, born in 1983, Ph. D. candidate. His research interests include computer vision.

Journal of Computer Applications 《计算机应用》