

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211911

基于积分滑模的带机械臂无人机控制方法研究*

许金伟 周祖鹏

(桂林电子科技大学机电工程学院 桂林 541004)

摘要: 针对在复杂环境下带机械臂无人机进行空中轨迹飞行及抓取作业过程中,存在响应缓慢、不稳定性等问题,首次将积分滑模(ISMO)方法应用于带机械臂无人机控制。首先根据空间中的位姿关系及欧拉-拉格朗日方程,对无人机与三自由度机械臂建立整体的运动学和动力学模型,保证了系统的准确性。其次在利用数学模型描述各变量之间的相互关系后,搭建仿真复杂环境用于模拟整个采样过程。最后设计 ISMO 控制率用于整体控制,利用李雅普诺夫方程进行了证明。考虑全局在动静态下环境对无人机位置、姿态、机械臂的扰动以及抓取后增加负载的影响,经过仿真校验,其响应速度、鲁棒性等优于传统的 PID 控制器,保证了系统高效稳定地运行。

关键词: 机械臂;无人机;欧拉-拉格朗日方程;采样;ISMO

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on control method of UAV with manipulator based on integral sliding mode

Xu Jinwei Zhou Zupeng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow response and instability in the flight and grasping process of UAV with manipulator in complex environment, the ISMO method is applied to the control of UAV with manipulator for the first time. Firstly, according to the position and attitude relationship in space and Euler-Lagrange equation, the overall kinematics and dynamics model of UAV and 3-DOF manipulator is established to ensure the accuracy of the system. Secondly, after using the mathematical model to describe the relationship between variables, a complex simulation environment is built to simulate the whole sampling process. Finally, the ISMO control rate is designed for the whole control, which is proved by Lyapunov equation. Considering the influence of the global dynamic and static environment on the disturbance of the UAV position, attitude, manipulator and the increase of load after grasping. The simulation results show that its response speed and robustness are better than the traditional PID controller, which ensures the efficient and stable operation of the system.

Keywords: manipulator; unmanned aerial vehicle (UAV); Euler-Lagrange equation; sampling; ISMO

0 引言

当下无人机^[1]凭借自身的优势已成为时代研究的热点,但目前主要是限于监控、测绘和感知等方面。有人受生物鸟类启发,开始研究可动态抓握、操纵及交互的带机械臂无人机,能够执行全新的任务,来与周围的环境进行物理交互,可实现在复杂危险的环境下进行工作,比如在危险区域中进行环境监测和取样,高空中基础设施的检查维修等,有利于解决耗费人工、时效缓慢、操作困难等作业问题。

文献[2-3]对带机械臂无人机的作业类型进行分析综

述,给出了不同作业模式下的动力学建模,讨论了无人机和机械手的各种组合及其在不同任务中的控制及应用问题。目前带机械臂无人机主要分为两种控制方法:第1种是将无人机和机械臂视为独立系统进行控制,将机械臂产生的扰动视为对无人机的外部干扰。张广玉等^[4]设计的增强型H_∞控制器和钟杭等^[5]设计的动态重心补偿控制器都是用来补偿机械臂运动对于无人机平台所产生的扰动,以此来实现机体的稳定控制。目前多数飞行作业是在系统悬停状态下进行,此时二者的动力学耦合较小,文献[6-7]分别采用了滑模和PID控制方法来针对修剪树枝和林冠采样等

收稿日期:2022-11-01

* 基金项目:国家自然科学基金(61763006)项目资助

问题做了研究,保证了控制姿态的稳定。多数人采用无人机与机械臂进行单独控制,在一定程度上简化了算法的复杂程度,但是机械臂对于无人机的扰动力矩^[8]难以实时测量,无法清晰表达出耦合整体情况。

然而,第 2 种方法整体控制,则充分考虑了各个状态量之间的耦合关系,有利于系统的整体运动。孙敬陶等^[9]提出一种混合伺服系统,使其可借助视觉完成自主作业,又根据零空间行为利用冗余自由度进行分层控制,可以完成机体避障、系统重心调整等任务。Guo 等^[10]针对全过程下存在惯性变化、碰撞及外部扰动情况,采用混合系统方法对操纵过程进行建模和动力学解耦,提出了自适应轨迹线性化控制方案,保证了系统的稳定。文献^[11-12]建立了整体模型,利用基本行为复合来管理和实现复杂的多任务优先级运动控制。Jafarinasab 等^[13]基于牛顿-欧拉法对其推导了完整的非线性动力学方程,提出了一种新的基于模型的自适应运动控制算法。Kim 等^[14]设计了自适应滑模控制器,提出了一种基于图像视觉伺服的组合飞行器视觉导引方法。Lee 等^[15]利用参数估计法和增广自适应控制器,对因载荷的物理特性而产生的参数变化进行估计,使末端执行器能够跟踪期望的轨迹,而文献^[16-17]进一步地考虑了多体系统的完全耦合动力学、不确定性及物体与无人机之间的距离等单边约束等问题,来协同操作有效载荷,从而能进行更好地协调运动。

但是,经过文献检索尚未发现将积分滑模(integral sliding mode, ISMO)控制方法应用于带机械臂无人机方面的研究。由于 ISMO 控制具有快速收敛、无超调及抗干扰性能强的优点,因此,本文在带机械臂无人机的控制中采用了 ISMO 的控制方法。

主要面向复杂环境下的带机械臂无人机作业系统,首先利用空间位姿关系搭建出整体运动学模型,又根据欧拉-拉格朗日方程完成了系统的动力学模型,提升了整体模型的准确性。其次模拟作业系统搭建出整个采样过程,采用 ISMO 控制器用于带三自由度机械臂的无人机控制,相对于普通的 PID 控制器,最后仿真结果表明,在各种干扰以及添加负载后的情况下,依然能保持良好的鲁棒性和快速性。

1 整体数学建模

1.1 运动学模型

带机械臂无人机产生的运动为:上下、左右、前后、翻滚、俯仰、偏航、机械臂的转动。为了更好地描述带机械臂无人机的空间位姿,本文选取 ZYX 的坐标顺序,得到从机体坐标系相对于惯性坐标系的旋转矩阵,如下:

$$R_B^I = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\theta s\phi c\psi - c\phi s\psi & s\theta c\phi c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\theta s\phi s\psi + c\phi c\psi & s\theta c\phi s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:s 代表 sin,c 代表 cos, θ 指俯仰角, ϕ 指翻滚角, ψ 指

偏航角。

为了在局限环境下实现复杂多变的任务,提升空中作业的灵活性,采用了三自由度的机械臂联合无人机进行抓取采样。经过实际测量和参数辨识^[18],得到带机械臂无人机主要系统属性如表 1 所示。

表 1 主要系统属性

项目	数值	单位
无人机质量	2.16	kg
无人机与机械臂第一转轴距离	0.06	m
机械臂 1,2,3 质量	0.11、0.11、0.13	kg
机械臂 1,2,3 杆长	0.16、0.16、0.04	m
I_{xx}	0.064 8	kg·m ²
I_{yy}	0.064 8	kg·m ²
I_{zz}	0.121 4	kg·m ²

其中, (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) 组成对角阵,为无人机的转动惯量。首先设定 Σ_I 表示惯性坐标系, Σ_B 表示无人机的机体坐标系, Σ_i 表示 3 个机械臂的机体坐标系,所有刚体固定的坐标系分别位于其对应刚体的质心。

定义变量:

$$\begin{cases} \mathbf{p} = [x, y, z]^T \\ \Phi = [\phi, \theta, \psi]^T \\ \Theta = [\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{p} 为无人机的位置, Φ 为在惯性坐标系中的无人机的欧拉角, Θ 为机械臂的转角。将控制变量综合写为:

$$\mathbf{q} = [\mathbf{p}^T \ \Phi^T \ \Theta^T]^T \quad (3)$$

相关速度^[19]定义如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{R}_B^I \dot{\mathbf{p}}^B = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{O}_{3 \times 3} \ \mathbf{O}_{3 \times 3}] \dot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\omega} = \mathbf{R}_B^I \boldsymbol{\omega}^B = [\mathbf{O}_{3 \times 3} \ \mathbf{H} \ \mathbf{O}_{3 \times 3}] \dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & -s\psi & c\psi c\theta \\ 0 & c\psi & c\theta s\psi \\ 1 & 0 & -s\theta \end{bmatrix}$,为变换矩阵, \mathbf{I} 为惯性矩

阵, $\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}^B$ 分别是用 Σ_I 和 Σ_B 描述的无人机质心的平移速度, $\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}^B$ 分别是用 Σ_I 和 Σ_B 描述的无人机的角速度。

姿态的变化率与机体的角速度的变化关系如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{H} \dot{\Phi} \\ \boldsymbol{\omega}^B = (\mathbf{R}_B^I)^T \mathbf{H} \dot{\Phi} \end{cases} \quad (5)$$

根据空间中的位姿可以表示为位置和姿态,设定变换方程:

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p} + \mathbf{R}_B^I \mathbf{P}_i^B \quad (6)$$

式中: \mathbf{p}_i^B 表示机械臂在无人机机体坐标系中的位置, \mathbf{p}_i 表示每个机械臂在惯性坐标系中的位置,具体转变关系如图 1 所示。

此外对于每个机械臂的平移速度和角速度分别由关节变量和雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{T,i}, \mathbf{J}_{r,i}$ 相关联。

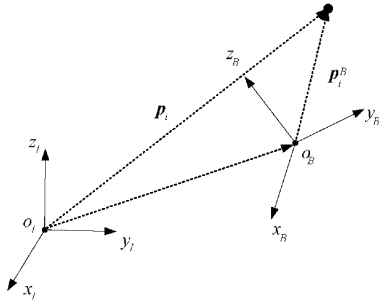


图1 坐标系转换示意图

$$\begin{cases} \dot{p}_i^B = J_{t,i} \dot{\Phi} \\ \omega_i^B = J_{r,i} \dot{\Phi} \end{cases} \quad (7)$$

结合式(6)、(7)得 \$\Sigma_i\$ 相对于 \$\Sigma_i\$ 的平移速度和角速度可写为:

$$\begin{cases} \dot{p}_i = \dot{p} + \dot{R}_B^T p_i^B + R_B^T \dot{p}_i^B = \\ [I_{3 \times 3} - [R_B^T p_i^B]^T R_B^T J_{t,i}] \dot{q} \\ \omega_i = \omega + R_B^T \omega_i^B = [O_{3 \times 3} \quad H \quad R_B^T J_{r,i}] \dot{q} \end{cases} \quad (8)$$

1.2 动力学模型

选用欧拉-拉格朗日方程^[20]建立带三自由度机械臂无人机的整体模型,具体如下:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (9)$$

$$L = E_k - E_p \quad (10)$$

式中: \$\tau\$ 为广义力, \$L\$ 为拉格朗日函数, \$E_k\$ 为系统的动能, \$E_p\$ 为系统的势能。

$$E_k = E_{kB} + \sum_{i=1}^3 E_{ki} \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{kB} = \frac{1}{2} \dot{p}^T m_B \dot{p} + \frac{1}{2} \dot{\Phi}^T H^T R_B^T I_B (R_B^T)^T H \dot{\Phi} \\ E_{ki} = \frac{1}{2} \dot{p}_i^T m_i \dot{p}_i + \frac{1}{2} \omega_i^T R_i I_i R_i^T \omega_i \end{cases} \quad (12)$$

式中: \$R_i = R_B^T R_i^B\$, \$I_B\$ 代表无人机的转动惯量, \$I_i\$ 代表每个机械臂的转动惯量。

\$E_p\$ 表示为每个刚体的势能之和^[21]:

$$E_p = m_B g e_3^T p + \sum_{i=1}^3 m_i g e_3^T (p + R_B^T p_i^B) \quad (13)$$

式中: \$e_3 = [0 \quad 0 \quad 1]^T\$, 可以导出组合系统的动态模型如下^[22]:

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \quad (14)$$

式中: \$D(q)\$ 为质量矩阵, \$C(q, \dot{q})\$ 为广义科氏力矩阵, \$G(q)\$ 为重力矩阵。

总动能可以用质量矩阵 \$D(q)\$^[23] 计算:

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (15)$$

其可以写成分块矩阵的形式:

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11}(q) & D_{12}(q) & D_{13}(q) \\ D_{21}(q) & D_{22}(q) & D_{23}(q) \\ D_{31}(q) & D_{32}(q) & D_{33}(q) \end{bmatrix} \quad (16)$$

具体展开:

$$\begin{cases} D_{11}(q) = (m_B + \sum_{i=1}^3 m_i) E_{3 \times 3} \\ D_{22}(q) = ((R_B^T)^T H)^T I_B (R_B^T)^T H + \sum_{i=1}^3 (m_i H^T [R_B^T p_i^B]^T [R_B^T p_i^B] H + ((R_B^T)^T H)^T R_B^T I_i (R_B^T)^T (R_B^T)^T H) \\ D_{33}(q) = \sum_{i=1}^3 (m_i (J_{t,i})^T J_{t,i} + (J_{r,i})^T R_B^T I_i (R_B^T)^T J_{r,i}) \\ D_{12}(q) = D_{21}(q)^T = - \sum_{i=1}^3 (m_i [R_B^T p_i^B]^T H) \\ D_{13}(q) = D_{31}(q)^T = \sum_{i=1}^3 (m_i R_B^T J_{t,i}) \\ D_{23}(q) = D_{32}(q)^T = \sum_{i=1}^3 (((R_B^T)^T H)^T R_B^T I_i (R_B^T)^T J_{r,i} - m_i H^T [R_B^T p_i^B]^T R_B^T J_{r,i}) \end{cases} \quad (17)$$

广义科氏力矩阵 \$C(q, \dot{q})\$ 可以通过用下面的关系计算第 \$k\$ 行和第 \$j\$ 列的每个元素来得到:

$$C_{kj} = \sum_{i=1}^9 \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial D_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial D_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial D_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (18)$$

重力矩阵 \$G(q)\$ 通过计算偏导数得:

$$G(q) = \frac{\partial E_p}{\partial q} \quad (19)$$

至此整体数学模型构建完毕。

2 算法控制及仿真实验

2.1 算法控制

当建立数学模型之后,在无人机飞行及机械臂的操作过程中,由于样品的突然加载或卸载、来自环境的反作用力以及风的扰动等可能会扰乱整个系统,这就对于其本身的控制提出了更高的要求。在无人机、机械臂电机等应用滑模算法^[24-26]较为常见,但少见有将其应用到带机械臂无人机整体控制,这对于面对全向扰动时,去执行空中操纵的任务是非常重要的。

定义:

$$\begin{cases} e = q - q_d \\ \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d \\ \dot{q}_r = \dot{q} - s \end{cases} \quad (20)$$

式中: \$e\$ 为误差, \$q_d\$ 为期望数值, \$\dot{q}_r\$ 为定义的参考变量。

采用的 ISMO 控制的 \$s\$ 为:

$$s = k_1 e + k_2 \int_0^t e d\tau + \dot{e} \quad (21)$$

式中: \$k_1, k_2\$ 均为正系数矩阵。

为了改善滑模趋近运动的动态品质,选择指数型趋近律^[27]为:

$$\dot{s} = -Ws - Qsgn(s) \quad (22)$$

式中: W, Q 均为正系数矩阵。综合式(14)和式(20)~(22)联立得 ISMO 的控制率为:

$$\tau = D\ddot{q}_r + C\dot{q}_r + G - Ms - Nsgn(s) \quad (23)$$

式中: $M = DW - C, N = DQ$ 。利用李雅普诺夫稳定定理^[28]证明该系统的稳定性:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (24)$$

$$\dot{V} = ss\dot{s} = -Ws^2 - Qsgn(s)s \leq 0 \quad (25)$$

根据以上结果, $V > 0$, 系统正定, 当且仅当 $s = 0$ 时, $V = 0$, 整体系统在平衡点处是渐近稳定状态, 同时最后将收敛到滑模面 $s = 0$ 上, 满足李雅普诺夫理论。至此整体的系统控制部分已经完成, 得到的 τ 后, 根据无人机电机及机械臂舵机转速方式进行分配。所添加的全向扰动 d , 直接输出的 τ 合并, 进行负反馈, 整个系统实现了一个闭环的控制。

$$\ddot{q} = D(q)^{-1}(\tau + d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)) \quad (26)$$

由于符号函数 $sgn(s)$ 在实际控制的切换中存在一定的滞后性, 这会引起相应的抖振问题, 采用边界层法^[29]削弱 ISMO 系统所带来的抖振问题, 选取饱和函数 $sat(s)$, 根据滑模面 s 求取范数后的大小进行分段取值。

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda}s, & \|s\| \leq \lambda \\ sgn(s), & \|s\| > \lambda \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\lambda > 0$, 为边界层的厚度。

2.2 仿真模拟验证

为了验证所搭建模型和控制算法的准确性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型, 采用两种仿真实验进行校验。

经过参数调试, 设置 $k_1 = 9E, k_2 = 0.2E, W = 3\ 000E, \lambda = 0.4, Q = 6E, E$ 为相应的单位矩阵, 对比的 PID 控制算法参数通过经验法调试多组数据, 得到优良的 PID 参数, 设置为 $K_p = 35, K_i = 15, K_d = 4.5$ 。

1) 仿真实验 1

为了更直观的展示采样整个过程, 首先设置期望的飞行轨迹点 $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1, I_1$, 其所在的位置如表 2 所示。

表 2 轨迹坐标点

坐标	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	G_1	H_1	I_1
x/m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y/m	0	0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.0	10.0	10.0
z/m	0	10.0	10.0	4.0	4.0	4.0	10.0	10.0	0

设定仿真时间为 40 s, 时间间隔为 5 s 设定期望轨迹, 固定步长设定为 0.005, 期望输入如表 3 所示。

结合轨迹坐标点和移动抓取轨迹系统属性, 设定带机

表 3 移动抓取轨迹系统属性

时间 t/s	轨迹	期望输入	状态
0~5	$A_1 \sim B_1$	$[0, 0, 2t]$	起飞
5~10	$B_1 \sim C_1$	$[0, t-5, 10.0]$	直线飞行
10~15	$C_1 \sim D_1$	$[0, 5, 10-1.2(t-10)]$	直线飞行
15~20	$D_1 \sim E_1$	$[0, 5+0.2(t-15), 4]$	直线飞行
20~25	$E_1 \sim F_1$	$[0, 6, 4]$	悬停抓取负载
25~30	$F_1 \sim G_1$	$[0, 6, 4+1.2(t-25)]$	载物飞行
30~35	$G_1 \sim H_1$	$[0, 6+0.8(t-30), 10]$	载物飞行
35~40	$H_1 \sim I_1$	$[0, 10, 10-2(t-35)]$	载物降落

械臂无人机在复杂环境中进行采样的整体运行轨迹如图 2 所示。

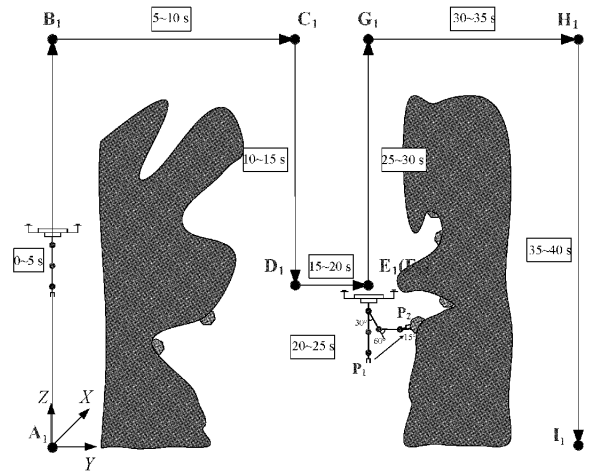


图 2 移动抓取采样

根据总扰动 d , 分别设置位置扰动 d_f 、姿态扰动 d_r 、机械臂扰动 d_v 为:

$$d = [d_f, d_r, d_v]^T = [d_x, d_y, d_z, d_\phi, d_\theta, d_\psi, d_{\theta_1}, d_{\theta_2}, d_{\theta_3}]^T \quad (28)$$

假设在位置处的干扰是持续的风扰, 假设定为:

$$d_f = \begin{cases} d_x = \sin(0.6t) \\ d_y = \cos(0.7t) \\ d_z = \sin(0.8t) \end{cases} \quad (29)$$

由于测试的是带机械臂无人机仅在 $y-z$ 平面进行操作, 所以位置 x 的期望数据恒为零值。通过仿真能够发现, 无人机在给定持续的位置干扰状态下, ISMO 控制显示的位置 x 误差范围在量级 10^{-3} m 范围内, 而 PID 控制的位置 x 误差最大可达到 0.05 m 左右。经局部放大图知, 在位置 y 与 z 的控制当中, PID 控制很难在发生路径转折的时候, 短时间内能够趋于平衡, 达不到期望的效果。位置测试的结果如图 3 所示。

在抓取物体时候, 负载增加, 会通过串联机械臂的各个关节传递给连接无人机的基座部分, 带来姿态力矩的扰动, 假设定为:

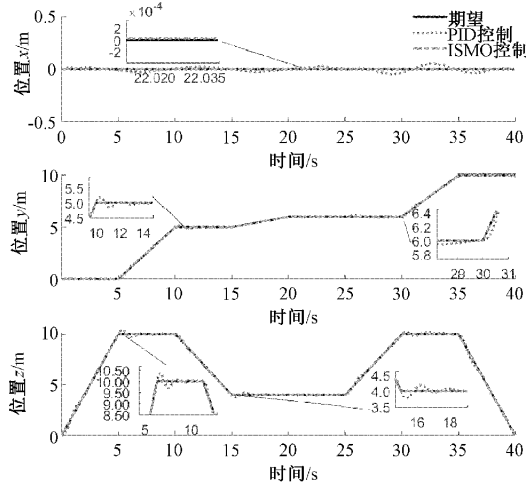


图3 仿真实验1无人机位置状态

$$d_{\tau} = \begin{cases} d_{\phi} = 0.04 + \sin(0.3t) \\ d_{\theta} = 0.05 + \cos(0.4t) \\ d_{\psi} = 0.06 + \sin(0.5t) \end{cases} \quad (30)$$

PID在面对姿态的干扰下,其翻滚角 ϕ 和俯仰角 θ 存在正负高达 2° 左右的不规则震荡。对于期望的偏航角 ψ 为 60° ,特别是在后续的20s以后,机械臂开始转动时,ISMO相比于PID控制算法的有更小的震荡和快速稳定性。姿态测试的结果如图4所示。

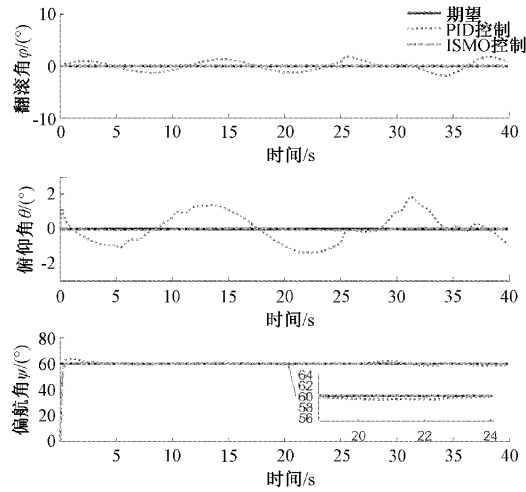


图4 仿真实验1无人机姿态角度

在悬停的时间内,在20s时,第1个机械臂的转动角度为 30° ,在22s时,第2个机械臂的转动角度为 60° ,在24s时,第3个机械臂的转动角度为 15° ,在25s时,到达相应的位置后执行末端的抓取动作,同时添加抓取物品的负载质量为0.1kg到系统中,从第25s开始,对机械臂在抓取的过程中,考虑到机械连接的误差等,假设模拟干扰为:

$$d_v = \begin{cases} d_{\theta_1} = \sin(t) \\ d_{\theta_2} = 2\cos(t) \\ d_{\theta_3} = 3\sin(t) \end{cases} \quad (31)$$

对于机械臂关节角度测试的结果如图5所示,经局部放大图知,在系统执行起飞的前2s内,ISMO和PID控制都存在一定的震荡幅度,但是PID控制震荡的时间长于2s且波动范围更大。在3个机械臂分别开始运动的第20s、22s及24s时,PID控制在达到期望前出现了最大范围 3° 左右的超调量。由于3个机械臂的扰动会相互影响,在20s、22s及24s时刻,ISMO和PID控制都出现了小幅度的震荡,在第25s时,添加0.1kg的负载致使PID控制器后续出现更加明显的来回波动情况。

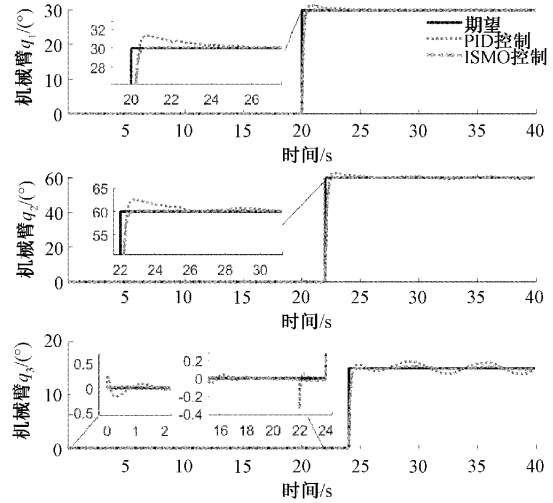


图5 仿真实验1机械臂关节角度

图6所示为机械臂末端相对于无人机本体的位置变化,在20s、22s、24s机械臂分别开始运动时候,通过放大图可知,PID控制依然在几秒内无法达到相应的位置,无法进行精确采样。另外,输出的结果同时也可以校验机械臂数学模型的准确性。

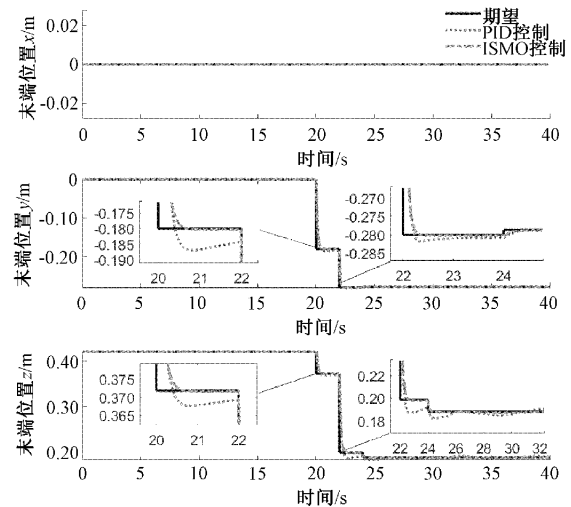


图6 仿真实验1机械臂末端位置

仿真实验1的测试结果表明:PID控制在系统初始阶段、突变阶段、受到干扰阶段均存在一定的滞后和较大范围的超调,无法保证精准跟踪轨迹和采样,而ISMO控制将误

差能够维持在稳定的范围,可以保持飞行时稳定姿态和精准采样。为了避免实验产生的偶然性,下面进行仿真实验 2。

2) 仿真实验 2

在给定的期望空间轨迹为 $(\sin(t), \cos(t), 0.2t)$ 的情况下,设置仿真时间同样为 40 s,固定步长设定为 0.005,在系统执行前 30 s 内,不添加任何的系统干扰,执行到 30 s 后,对其添加了对应式(29)、(30)及式(31)的干扰值,最终的整体控制轨迹如图 7 所示。两种控制算法在一定时间内能达到相应的期望值,但是在系统开始执行的阶段,PID 控制出现了一定程度的震荡和滞后,时间持续约 5 s。在 5~30 s 的范围内,系统为平稳运行阶段,没有外在的干扰,PID 与 ISMO 控制均能达到相对理想的控制效果。但是在系统执行到 30 s 后,文中对此阶段添加了全向扰动,图中可以看出 PID 控制开始出现不规则震荡,不能精确追踪相应的期望轨迹。

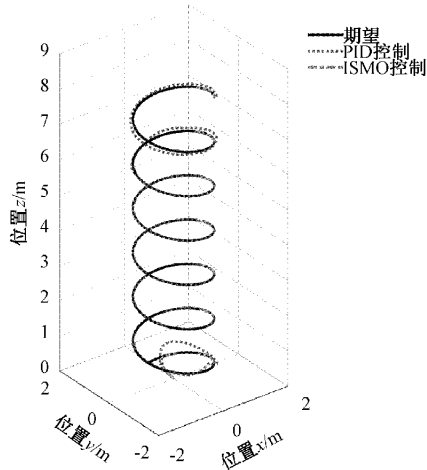


图 7 仿真实验 2 整体轨迹

对于无人机位置,轨迹的偏差在位置 y 处最大,在初始阶段,PID 控制已特别明显偏离轨迹,同时经放大图可知,在 31~32 s 内,系统的最高期望值为 1 m,PID 控制超过了 1.02 m,误差已经超出了 2%。位置 x 图及位置 z 的放大图依旧表明 PID 控制的震荡幅度较 ISMO 控制大,且响应缓慢。具体的位置控制结果如图 8 所示。

无人机系统的姿态控制结果如图 9 所示,在系统的前 5 s 内,PID 相对于 ISMO 控制在开始就出现了俯仰角 θ 为 1° 左右和偏航角 ψ 超过 3° 的超调量。同时很明显可以观测出在 30 s 以后,PID 控制在受到干扰时,出现了无规律的摆动。经偏航角 ψ 处的放大图知,在 30~34 s 阶段,出现了约 2° 的误差,而 ISMO 控制具有优良的抗扰动能力,无明显误差。

机械臂系统的期望角度为 $(30^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$,机械臂关节角度在开始摄动的时候,最高会出现约 4° 的大范围超调,而 ISMO 控制保留了其无超调量等优势。机械臂 q_3 的局部放大图展示出,两种方法都出现了一定的震荡误差,但是 PID

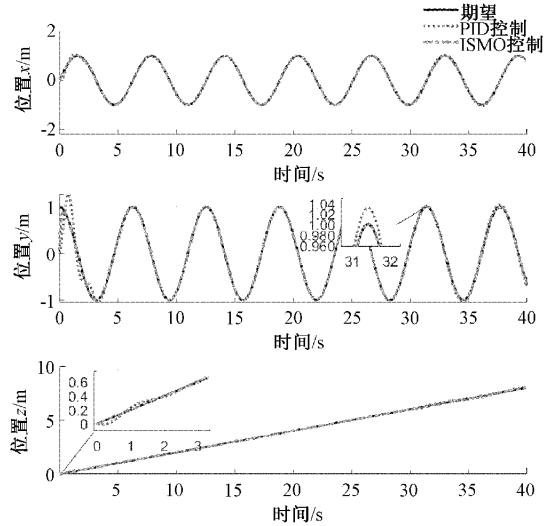


图 8 仿真实验 2 无人机位置

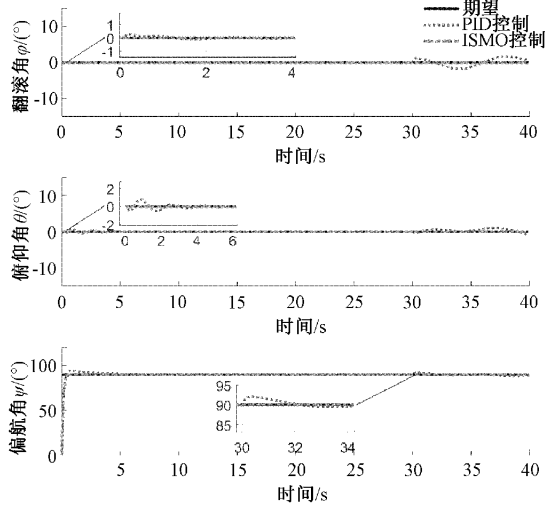


图 9 仿真实验 2 无人机姿态角度

控制的幅度明显大于 ISMO 控制。控制结果如图 10 所示。

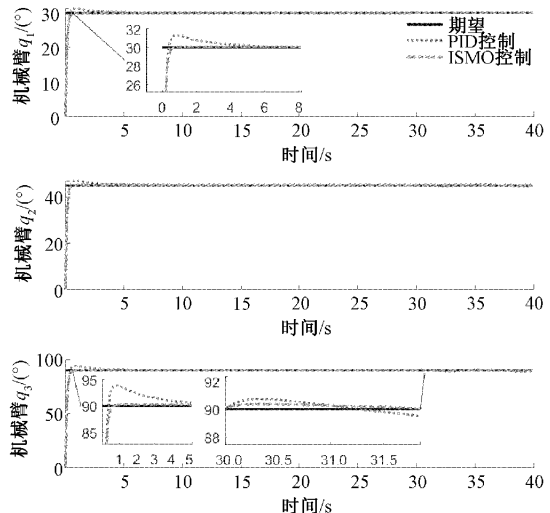


图 10 仿真实验 2 机械臂关节角度

仿真实验2同样校验了所搭建模型的准确性和合理性。

3 结 论

本论文将无人机与三自由度机械臂有机结合,利用位姿关系和欧拉-拉格朗日方程推算出整体数学模型,为后续稳定控制提供了基础;对带机械臂无人机首次设计 ISMO 控制器,凭借其有效地抑制外部扰动和不确定性的能力,在给定的位置、姿态、机械臂干扰及添加负载后的仿真实验中,可快速的回到预先设定轨迹中去,提升了对非结构性干扰因素的抗干扰性能,可用于在复杂环境下的样品采样等问题中;仿真结果表明,与传统的 PID 控制方法相比, ISMO 控制方法具有明显的优势。虽然控制效果精度比较高,但是尚未经过实物验证。因此,下一步将针对如何开展实物实验进行相关研究。

参考文献

- [1] 张世勇,张雪波,苑晶,等.旋翼无人机环境覆盖与探索规划方法综述[J].控制与决策,2022,37(3):513-529.
- [2] 丁希仑,金雪莹.旋翼无人机交互作业动力学建模研究进展[J].航空学报,2022,43(10):526-543.
- [3] HOSSEIN B K, FARROKH J S, ABDELKADER A. Aerial manipulation—A literature survey[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 107:221-235.
- [4] 张广玉,何玉庆,代波,等.面向抓取作业的飞行机械臂系统及其控制[J].机器人,2019,41(1):19-29.
- [5] 钟杭,王耀南,李玲,等.旋翼飞行机械臂建模及动态重心补偿控制[J].控制理论与应用,2016,33(3):311-320.
- [6] 王少辉,杨忠,张秋雁,等.树障清理空中机器人的姿态控制器设计[J].仪器仪表学报,2019,40(6):247-256.
- [7] JAMES K, KARL S, XU W. Aerial manipulator interactions with trees for canopy sampling[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4):1740-1749.
- [8] ZHAO M, SHI F, ANZAI T, et al. Online motion planning for deforming maneuvering and manipulation by multilinked aerial robot based on differential kinematics [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2):1602-1609.
- [9] 孙敬陶,钟杭,王耀南,等.旋翼飞行机械臂的混合视觉伺服和分层控制方法[J].仪器仪表学报,2018,39(7):56-65.
- [10] GUO P, XU K, DENG H, et al. Modeling and control of a hexacopter with a passive manipulator for aerial manipulation [J]. Complex & Intelligent Systems, 2021, 7(6):3051-3065.
- [11] BAIZID K, GIGLIO G, PIERRI F, et al. Behavioral control of unmanned aerial vehicle manipulator systems[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(5):1203-1220.
- [12] SANTAMARIA-NAVARRO A, GROSCH P, LIPPIELLO V, et al. Uncalibrated visual servo for unmanned aerial manipulation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4):1610-1621.
- [13] JAFARINASAB M, SIROUSPOUR S, DYER E. Model-based motion control of a robotic manipulator with a flying multirotor base [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(99):2328-2340.
- [14] KIM S, SEO H, CHOI S, et al. Vision-guided aerial manipulation using a multirotor with a robotic arm[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4):1912-1923.
- [15] LEE H, KIM H J. Estimation, control and planning for autonomous aerial transportation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(4):3369-3379.
- [16] THAPA S, BAI H, ACOSTA J. Cooperative aerial manipulation with decentralized adaptive force-consensus control[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 97(4):171-183.
- [17] KIM S, SEO H, SHIN J, et al. Cooperative aerial manipulation using multirotors with multi-DOF robotic arms[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2):702-713.
- [18] 全权.多旋翼飞行器设计与控制实践[M].北京:电子工业出版社,2018.
- [19] KIM S, CHOI S, KIM H, et al. Robust control of an equipment-added multirotor using disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(4):1524-1531.
- [20] LIPPIELLO V, RUGGIERO F. Cartesian impedance control of a UAV with a robotic arm [J]. IFAC Proceedings Volumes,2012,45(22):704-709.
- [21] KIM S, SEO H, KIM H J. Operating an unknown drawer using an aerial manipulator [C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015:5503-5508.
- [22] ARLEO G, CACCAVALE F, MUSCIO G, et al. Control of quadrotor aerial vehicles equipped with a robotic arm [C]. 2013 21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2013:1174-1180.
- [23] 何慰,方勇纯,梁潇,等.一种两自由度飞行机械臂系统的设计与实现[J].航空学报,2021,42(2):264-274.
- [24] MOFID O, MOBAYEN S. Adaptive sliding mode

- control for finite-time stability of quad-rotor UAVs with parametric uncertainties [J]. *Isa Trans*, 2018, 72:1-14.
- [25] 李波,梁宇飞,李国栋,等. 基于趋近律的互补积分终端滑模音圈电机控制[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(3):67-71.
- [26] 吴伟,曾庆军,王阳,等. 水下机器人多电机协同模糊滑模控制研究[J]. *中国测试*, 2021, 47(11):101-106.
- [27] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 先进控制系统设计方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.
- [28] 丁力,夏天,康绍鹏,等. 悬停状态下旋翼飞行器自适应鲁棒控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 73-79.
- [29] 陈增强,王辰璐,李毅,等. 基于积分滑模的四旋翼飞行器控制系统设计[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(9): 2181-2186.

作者简介

许金伟, 硕士研究生, 主要研究方向为带机械臂无人机设计与控制。

E-mail: auxjw1998@163.com

周祖鹏(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂机电系统建模与控制、仿生学等。

E-mail: zupengzhou@163.com