

基于分层运动分解的飞行机械臂视觉伺服控制

张兆鹏, 何 慰, 梁 潇[†], 韩建达, 方勇纯

(南开大学 人工智能学院 机器人与信息化研究所, 天津 300350; 南开大学 天津市智能机器人技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 飞行机械臂系统具有主动作业能力, 通过搭载视觉传感器感知周围环境, 系统的自主能力将进一步提高. 然而, 考虑到无人机的欠驱动和整个系统的非线性特性, 飞行机械臂系统的视觉伺服控制仍然是一项具有挑战性的工作. 本文在充分考虑机械臂对无人机的力/力矩作用后, 提出了一种基于分层运动分解的飞行机械臂视觉伺服控制方案. 首先, 对飞行机械臂系统的运动学和动力学模型进行分析. 然后, 根据所得的相机运动学模型, 通过基于图像的视觉伺服控制获得相机的期望速度, 进而制定无人机和机械臂的速度分配策略. 在考虑机械臂运动时对无人机产生的力/力矩影响, 设计了底层的飞行控制器. 最后, 在与现有方法的仿真对比中可以看出, 所提方法具有良好的控制性能, 对图像特征点位置的不确定性及图像噪声也表现了较好的鲁棒性.

关键词: 多旋翼无人机; 飞行机械臂; 视觉伺服控制

引用格式: 张兆鹏, 何慰, 梁潇, 等. 基于分层运动分解的飞行机械臂视觉伺服控制. 控制理论与应用, 2024, 41(5): 808 – 816

DOI: 10.7641/CTA.2023.20214

Visual servoing control for aerial manipulator via hierarchical motion decomposition

ZHANG Zhao-peng, HE Wei, LIANG Xiao[†], HAN Jian-da, FANG Yong-chun

(Institute of Robotics and Automatic Information System, College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China;
Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The aerial manipulator system has active operation capability, and the autonomous level of the system would be further improved if the aerial manipulator could perceive the surrounding environment by visual sensors. However, considering the underactuation of the multirotor and the nonlinear property of the overall system, visual servoing control of aerial manipulator systems is still a challenging work. This paper proposes a hierarchical motion decomposition based visual servoing control scheme for aerial manipulator systems with full consideration of the force/torque effect exerted by the robotic arm on the fuselage of the unmanned aerial vehicle (UAV). Firstly, the kinematics and dynamics model of the aerial manipulator system is analyzed. Then, based on the obtained camera's kinematics, the desired speed of the camera is obtained through image-based visual servo control, and the speed allocation strategy of the UAV and the manipulator is formulated. After considering the influence of the effect generated by the robotic arm on the UAV, the low-level flight controller is provided. Finally, compared with the existing method, the proposed method has better control performance and also presents good robustness against the uncertainty of image feature points position and image noise.

Key words: multirotor UAV; aerial manipulator; visual servoing control

Citation: ZHANG Zhaopeng, HE Wei, LIANG Xiao, et al. Visual servoing control for aerial manipulator via hierarchical motion decomposition. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(5): 808 – 816

1 引言

近些年来, 随着电子技术和机械制造工艺的逐渐成熟, 空中无人机的应用得以不断发展. 按照机体结

构进行分类, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 可以分为固定翼、旋翼和扑翼3种. 由于具备良好的灵活性、较强的机动性, 以及原地起降、空中悬停能

收稿日期: 2022-03-26; 录用日期: 2023-04-24.

[†]通信作者. E-mail: liangx@nankai.edu.cn; Tel.: +86 22-23505706.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(62273187, 62233011, 91848203), 天津市青年人才托举工程项目(TJSQNTJ-2020-21), 先进计算与关键软件海河实验室项目(22HHXCJC00003)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62273187, 62233011, 91848203), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by Tianjin (TJSQNTJ-2020-21) and the Haihe Lab of ITAI (22HHXCJC00003).

力^[1-3], 多旋翼无人机被广泛应用于环境检测、森林防火和摄影航拍等领域。

研究人员为多旋翼无人机的底部安装可驱动的多连杆机械臂^[4-5], 以实现在极端环境中样品的采集、特定地形上物品的运送等操作类任务. 韩国首尔国立大学的Kim等人在文献[4]中利用飞行机械臂开关抽屉. 美国宾夕法尼亚大学的Thomas等人^[5]设计了类猛禽的飞行机械臂, 能够高速地完成抓取和运输任务. 为飞行机械臂系统加上相机等传感器, 能够进一步扩展应用场景. 文献[6]中模仿天鹅, 为多旋翼无人机安装3自由度的机械臂, 相机安装在机械臂末端, 以实现相机更大范围的感知工作, 为复杂环境下的状态估计和飞行控制提供了基础. 视觉伺服控制指的是运用视觉信息去控制机器人运动, 按照误差信号所在的空间分为基于图像的视觉伺服(image-based visual servoing, IBVS)和基于位置的视觉伺服(position-based visual servoing, PBVS)两类^[7-8]. 由于IBVS具有不需要引入额外的几何信息求解相机在笛卡尔空间的位姿、对图像噪声更加鲁棒等特性, 针对无人机本体的视觉伺服控制, 研究者们提出了多种控制算法^[9-11]. 文献[9]针对旋翼无人机的视觉控制问题提出了基于非线性模型预测的控制方法, 存在外部扰动时能保证目标在相机视野范围内. Zhang等人^[10]提出了自适应输出反馈的视觉伺服控制方法, 与非线性观测器及基于特征流两种方法的对比实验结果展示了该方法具有更小的稳态误差和更好的鲁棒性. 文献[11]通过引入真实图像到虚拟图像的转换, 拓展了基于虚拟相机的IBVS方法, 使无人机能够针对任意姿态的目标平面进行调节控制.

飞行机械臂的视觉伺服控制不仅需要考虑无人机本体的欠驱动、非线性等特性, 还需考虑到无人机与机械臂两个子系统在动力学上的耦合. 机械臂在运动时会造成系统质心偏移, 增加无人机本体精准控制的难度. 针对该问题, 目前已有的研究依然较少, 美国宾夕法尼亚大学的Thomas等人^[12]直接在图像特征空间中得到飞行机械臂系统的动力学模型, 随后设计了何视觉控制器, 在仿真和实验中验证了该控制器的性能, 但该文仅仅分析了平面的情况, 并且机械臂只有1个自由度. 韩国首尔国立大学的Kim等人^[13]在飞行机械臂的视觉伺服任务中使用斑点图, 并使用图像矩作为图像特征, 在此基础上设计了自适应控制律弥补系统动力学的建模误差. 文献[14]结合了PBVS和IBVS, 同时利用笛卡尔空间中的误差及图像空间中的误差, 设计了上层的混合视觉伺服控制器, 但该文没有给出底层的飞行控制器设计. 孙敬陶等人^[15]提出了基于欧几里得单应性矩阵分解的混合视觉伺服控制方法. 文献[16]将相机放置在无人机本体上, 考虑系统完整的动力学模型后, 使用积分反步法设计了上层

的视觉控制器及底层控制器. Lippiello和Navarro等人^[17-18]提出分层任务组合的控制方案, 分别针对视觉特征收敛到目标位置、重心偏移补偿、避免关节角到达边界值等几个任务, 分别设计了对应的标量函数用来衡量任务的完成情况, 并将它们写成级联的形式, 随后设计了混合视觉伺服控制器, 确保上述标量函数达到渐近收敛.

面向飞行机械臂系统的视觉伺服控制问题, 本文在考虑完整动力学分析的基础上, 提出了一种基于分层运动分解的飞行机械臂视觉伺服控制方案, 同时, 充分考虑了机械臂对多旋翼机身的力/力矩作用. 第2节首先对相机的透视模型进行介绍, 随后使用分离式的策略对飞行机械臂系统建立了完整的运动学和动力学模型; 第3节引入IBVS视觉伺服控制器给出速度分配策略, 将相机的目标线速度及角速度分别与无人机及机械臂运动对应, 其中机械臂部分考虑关节角速度作为控制输入. 随后, 针对无人机的底层控制采用几何控制方法; 第4节将在MATLAB/Simulink仿真环境中通过对比验证所提方法的控制性能; 第5节是全文的总结.

2 运动学及动力学模型建立

2.1 符号说明

首先定义以下几个坐标系, \mathcal{F}_I , \mathcal{F}_B 和 \mathcal{F}_C 分别表示世界坐标系、无人机机体坐标系和相机坐标系.

使用图像平面上的点特征 \mathbf{s} 作为视觉伺服的图像特征, 4个特征点在图像平面的坐标分别为 $[u_1 \ v_1]^T$, $[u_2 \ v_2]^T$, $[u_3 \ v_3]^T$, $[u_4 \ v_4]^T$, 其目标值记为 \mathbf{s}_d .

记 ${}^I\mathbf{r}_b = [x_b \ y_b \ z_b]^T$ 为无人机质心在世界坐标系下的坐标, 无人机的姿态使用旋转矩阵 ${}^I R_B$ 描述, 其世界坐标系下的线速度为 ${}^I\mathbf{v}_b$, 在机体坐标系下的角速度为 ${}^B\boldsymbol{\omega}_b$. 无人机的控制输入分别为推力大小 F_t , 以及绕着机体坐标系3个轴的力矩 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$.

${}^B R_C$ 及 ${}^B P_C$ 分别是相机坐标系 \mathcal{F}_C 在机体坐标系 \mathcal{F}_B 下的姿态、位置表示, ${}^C\mathbf{v}_c$ 以及 ${}^C\boldsymbol{\omega}_c$ 分别为相机的线速度和角速度. η_1, η_2, η_3 分别是机械臂3个关节角度.

2.2 图像点特征的运动学

相机采用透视模型, 即

$$u_i = \frac{X_i}{Z_i}, \quad v_i = \frac{Y_i}{Z_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

其中 $X_i, Y_i, Z_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别是4个特征点在相机坐标系 \mathcal{F}_C 下的位置分量. 图像空间中点特征 \mathbf{s} 与相机速度的运动学关系如下^[7]:

$$\dot{\mathbf{s}} = L_s \begin{bmatrix} {}^C\mathbf{v}_c \\ {}^C\boldsymbol{\omega}_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 L_s 包含了4个图像点特征与相机速度的交互矩

阵, 即 $L_s = [L_{s1} \ L_{s2} \ L_{s3} \ L_{s4}]^T$, 任一交互矩阵 L_{si} 为

$$L_{si} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_i} & 0 & \frac{u_i}{Z_i} & u_i v_i & -(1 + u_i^2) & v_i \\ 0 & -\frac{1}{Z_i} & \frac{v_i}{Z_i} & 1 + v_i^2 & -u_i v_i & -u_i \end{bmatrix}.$$

2.3 飞行机械臂的运动学模型

本节将介绍飞行机械臂的运动学模型, 图1为飞行机械臂系统执行视觉伺服任务的示意图, 所采用的机械臂为3R机械臂, 相机固定在机械臂末端执行器处, 第3个关节的旋转轴与相机坐标系 \mathcal{F}_C 的 z 轴共线, 图1虚线下方是3R机械臂3个轴之间的关系, 该机械臂的DH(Denavit-Hartenberg)参数如表1所示.

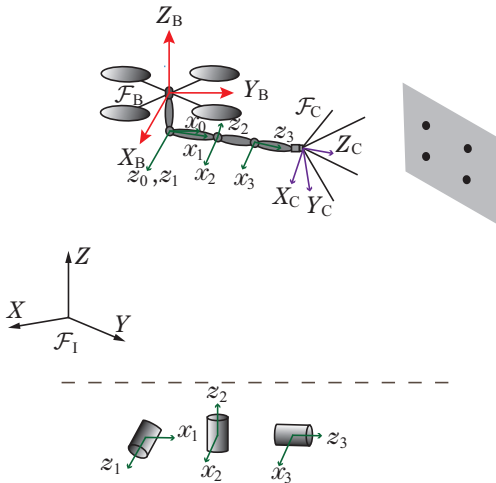


图1 飞行机械臂系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the aerial manipulator system

表1 DH参数

Table 1 DH parameters

Link i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	η_i
1	0	0	0	η_1
2	-90°	L_1	0	η_2
3	-90°	0	L_2	η_3
C	0	0	L_3	0

根据表1中的DH参数可以得到相机坐标系到无人机的变换矩阵为

$${}^B T_C = {}^B T_0 {}^T_1 {}^T_2 {}^T_3 T_C = \begin{bmatrix} s_2 c_3 & s_2 s_3 & -c_2 & p_x \\ -c_1 c_2 s_3 & -c_1 c_2 s_3 + s_1 c_3 & c_1 s_2 & p_y \\ -s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3 & -s_1 c_2 s_3 - c_1 c_3 & -s_1 s_2 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B R_C & {}^B P_C \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix},$$

其中:

$$p_x := -(L_2 + L_3)c_2,$$

$$p_y := L_1 c_1 - (L_2 + L_3)c_1 s_2,$$

$$p_z := -L_0 + L_1 s_1 - (L_2 + L_3)s_1 s_2,$$

$$c_i := \cos \eta_i, s_i := \sin \eta_i.$$

相机的线速度 ${}^C v_c$ 、角速度 ${}^C \omega_c$ 与无人机的线速度 ${}^I v_b$ 、角速度 ${}^B \omega_b$, 以及机械臂关节角速度 $\dot{\eta}$ 相关, 它们之间运动学的关系为

$${}^C v_c = {}^C R_B ({}^B R_1 {}^I v_b + {}^B J_v(\eta) \dot{\eta} + {}^B \omega_b \times {}^B P_c), \quad (3)$$

$${}^C \omega_c = {}^C R_B {}^B \omega_b + {}^C J_\omega(\eta) \dot{\eta}, \quad (4)$$

式中 ${}^B J_v(\eta)$, ${}^C J_\omega(\eta)$ 分别是相机线速度在机体坐标系 \mathcal{F}_B 及相机角速度在相机坐标系 \mathcal{F}_C 与机械臂3个关节角速度的雅克比矩阵, 它们的具体形式为

$${}^C J_\omega(\eta) = \begin{bmatrix} -s_2 c_3 & -s_3 & 0 \\ s_2 s_3 & -c_3 & 0 \\ -c_2 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^B J_v(\eta) = \begin{bmatrix} 0 & (L_2 + L_3)s_2 & 0 \\ L_1 s_1 + (L_2 + L_3)s_1 s_2 & -(L_2 + L_3)c_1 c_2 & 0 \\ L_1 c_1 - (L_2 + L_3)c_1 s_2 & (L_2 + L_3)s_1 c_2 & 0 \end{bmatrix}.$$

观察式(3)–(4), 将无人机线速度 ${}^I v_b$ 以及机械臂关节角速度 $\dot{\eta}$ 选取为底层控制器的期望值, 能够将式(3)–(4)改写成如下形式:

$${}^C v_c - {}^C R_B ({}^B \omega_b \times {}^B P_c) = {}^C R_1 {}^I v_b + {}^C J_v(\eta) \dot{\eta}, \quad (5)$$

$${}^C \omega_c - {}^C R_B {}^B \omega_b = {}^C J_\omega(\eta) \dot{\eta}. \quad (6)$$

2.4 飞行机械臂的动力学模型

使用分离式方法^[9]对飞行机械臂系统进行建模, 外环的动力学方程为

$$m_t {}^I \ddot{r}_b = -F_t {}^I R_B e_3 + m_t g e_3 + F_d, \quad (7)$$

其中: m_b 是无人机的质量, m_r 是机械臂的总质量, $m_t = m_b + m_r$ 是整个飞行机械臂系统的质量; F_d 是机械臂对无人机平动产生的干扰力, 具体表述如下:

$$F_d = -m_t {}^I R_B ({}^B \omega_b \times ({}^B \omega_b \times {}^B r_{bc}) + {}^B \dot{\omega}_b \times {}^B r_{bc} + 2 {}^B \omega_b \times {}^B \dot{r}_{bc} + {}^B \ddot{r}_{bc}), \quad (8)$$

其中: ${}^B r_{bc}$ 是质心偏移向量, 即从无人机质心到飞行机械臂整个系统的质心在机体坐标系 \mathcal{F}_B 下的表达; ${}^B \dot{r}_{bc}$ 是其对时间导数. 无人机内环的动力学模型为

$$\begin{aligned} & ({}^B I_b + {}^B I_r) {}^B \dot{\omega}_b = \\ & \tau - {}^B \omega_b \times ({}^B I_b + {}^B I_r) {}^B \omega_b + \\ & m_t ({}^B r_{bc} \times {}^I R_B^{-1} (g e_3 + {}^I \ddot{r}_b)) - {}^B \dot{I}_r {}^B \omega_b - \\ & {}^B \omega_b \times {}^B L_r - {}^B \dot{L}_r, \end{aligned} \quad (9)$$

其中: ${}^B L_r = \int_{m_r} ({}^B r_{op} \times {}^B \dot{r}_{op}) dm_p$ 是机械臂在机体坐标系 \mathcal{F}_B 下的角动量, ${}^B I_b$ 和 ${}^B I_r$ 分别是无人机及机械臂在 \mathcal{F}_B 下的惯量矩阵. 将内环动力学模型(9)改写成

以下形式:

$${}^B I_b {}^B \dot{\omega}_b = \tau - {}^B \omega_b \times ({}^B I_b {}^B \omega_b) + \tau_d, \quad (10)$$

其中 τ_d 作为机械臂对无人机内环产生的影响, 其具体形式为

$$\tau_d = m_t ({}^B r_{bc} \times {}^I R_B^{-1} (g e_3 + {}^I \ddot{r}_b)) - {}^B \dot{I}_r {}^B \omega_b \times {}^B I_r {}^B \omega_b - {}^B \dot{I}_r {}^B \dot{\omega}_b - {}^B \dot{L}_r - {}^B \omega_b \times {}^B L_r. \quad (11)$$

利用式(12)–(13)得到机械臂角动量及其导数的近似值^[19]如下:

$${}^B L_r \approx \frac{m_t^2}{m_r} {}^B r_{bc} \times {}^B \dot{r}_{bc}, \quad (12)$$

$${}^B \dot{L}_r \approx \frac{m_t^2}{m_r} {}^B r_{bc} \times {}^B \ddot{r}_{bc}. \quad (13)$$

进而得到 τ_d 的近似形式

$$\tau_d \approx m_t ({}^B r_{bc} \times {}^I R_B^{-1} (g e_3 + {}^B \ddot{r}_b)) - {}^B \dot{I}_r {}^B \omega_b - {}^B \omega_b \times {}^B I_r {}^B \omega_b - {}^B I_r {}^B \dot{\omega}_b - \frac{m_t^2}{m_r} {}^B r_{bc} \times {}^B \ddot{r}_{bc} - \frac{m_t^2}{m_r} {}^B \omega_b \times ({}^B r_{bc} \times {}^B \dot{r}_{bc}). \quad (14)$$

至此, 飞行机械臂的动力学模型建立完毕, 下一节将据此对该系统进行控制器设计.

3 控制器设计

第2节介绍了飞行机械臂系统的运动学及动力学模型, 这一节将在此基础上进行控制器设计. 图2为基于分层运动分解的控制系统框架, 主要包括视觉伺服控制器、速度分配及无人机控制器3个部分.

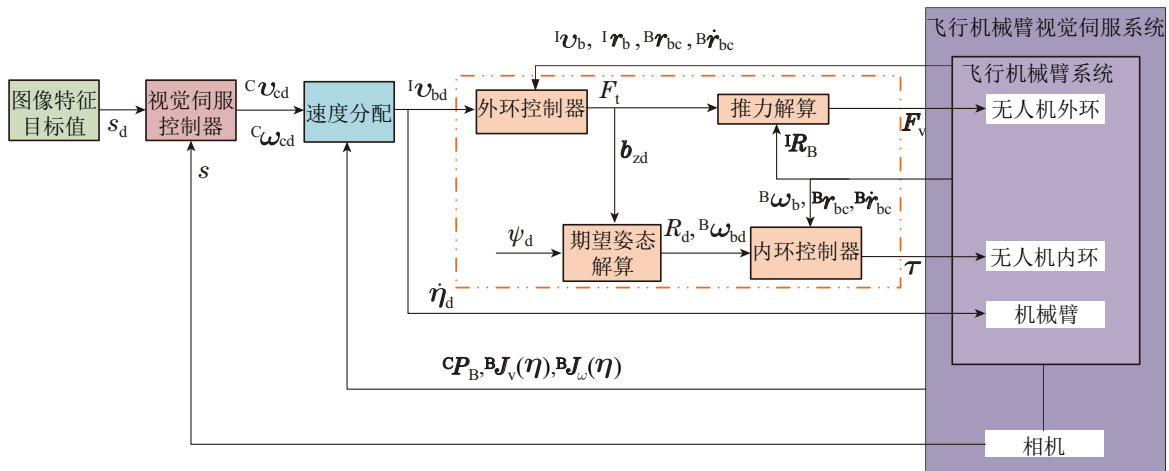


图2 飞行机械臂视觉伺服控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the aerial manipulator visual servoing control system

用 $\Delta s = s - s_d$ 表示图像特征的误差, 控制目标为特征点在相机平面的坐标 s 到达指定值 s_d , 即

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \Delta s = 0. \quad (15)$$

3.1 视觉伺服控制器

由式(2)的形式, 设计如下控制器以实现图像特征点的指数收敛^[7]:

$$[{}^C v_{cd} \quad {}^C \omega_{cd}]^T = -\Lambda \hat{L}_s^+ e_s, \quad (16)$$

其中 Λ 是一个控制增益对角矩阵,

$$\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\},$$

\hat{L}_s 是图像点特征交互矩阵 L_s 的估计, 使用相机到达期望位置时特征点在相机坐标系 \mathcal{F}_C 的期望深度 Z_i^* . 式(16)中的 \hat{L}_s^+ 是 \hat{L}_s 的Moore-Penrose广义逆矩阵.

3.2 速度分配

目前能够安装在无人机上的机械臂往往不支持力矩控制, 因此在设计机械臂的控制器时使用每个关节

的关节角速度 $\dot{\eta}$ 作为机械臂的输入.

在前一部分, 通过视觉伺服控制器(16)得到了相机的期望线速度 ${}^C v_{cd}$ 和角速度 ${}^C \omega_{cd}$. 这一部分将设计无人机和机械臂的运动以实现相机的期望线速度和角速度. 由相机的运动学方程(5)–(6), 分别设计无人机、机械臂的控制输入. 由式(6)分析可知, 通过机械臂能够满足相机转动要求的角速度, 即

$$\dot{\eta}_d = {}^C J_\omega^{-1}(\eta) ({}^C \omega_{cd} - {}^C R_B {}^B \omega_b). \quad (17)$$

在得到 $\dot{\eta}_d$ 后, 将其代入式(5)得到无人机的目标线速度表达如下:

$${}^I v_{bd} = {}^I R_C ({}^C v_{cd} - {}^C R_B ({}^B \omega_b \times {}^B P_c) - {}^C J_v(\eta) \dot{\eta}_d). \quad (18)$$

3.3 无人机控制器设计

本小节将为无人机设计底层控制器, 包含推力大小 F_1, F_2, F_3 , 以实现式(18)中所得无人机期望线速度 ${}^I v_{bd}$ 的跟踪.

3.3.1 外环控制器

无人机外环控制器上利用比例-积分 (proportion-integration, PI) 控制律跟踪视觉伺服控制器产生的期望速度, 即

$$\mathbf{F}_v = k_p \mathbf{e}_p + k_v \mathbf{e}_v - m_t \mathbf{g} \mathbf{e}_3 + m_t \dot{\mathbf{v}}_{bd} - \bar{\mathbf{F}}_d, \quad (19)$$

其中: $\mathbf{e}_v = {}^I \mathbf{v}_{bd} - {}^I \mathbf{v}_b$, $\mathbf{e}_p = \int \mathbf{e}_v dt$; k_p , k_v 是外环控制增益, 推力大小 $F_t = \mathbf{F}_v^T {}^I R_B \mathbf{e}_3$. 前述式(8)中分析了机械臂运动产生的质心偏移, 其补偿项为

$$\bar{\mathbf{F}}_d = -m_t {}^I R_B ({}^B \boldsymbol{\omega}_b \times ({}^B \boldsymbol{\omega}_b \times {}^B \mathbf{r}_{bc}) + 2 {}^B \boldsymbol{\omega}_b \times {}^B \dot{\mathbf{r}}_{bc}). \quad (20)$$

扰动力 \mathbf{F}_d 中未补偿的项为 $\Delta \mathbf{F}_d = \mathbf{F}_d - \bar{\mathbf{F}}_d$.

3.3.2 内环控制器

内环的控制策略采用几何控制^[20], 外环得到了目标推力 \mathbf{F}_v , 其方向为

$$\mathbf{b}_{zd} = \frac{\mathbf{F}_v}{\|\mathbf{F}_v\|}, \quad (21)$$

\mathbf{b}_{xc} 根据给定的偏航角设定值 ψ_d 得到

$$\mathbf{b}_{xc} = [\cos \psi_d \quad \sin \psi_d \quad 0]^T, \quad (22)$$

目标机体坐标系另一方向向量为

$$\mathbf{b}_{yd} = \frac{\mathbf{b}_{zd} \times \mathbf{b}_{xc}}{\|\mathbf{b}_{zd} \times \mathbf{b}_{xc}\|}, \quad (23)$$

综上, 目标姿态的旋转矩阵定义如下:

$$R_d = [\mathbf{b}_{yd} \times \mathbf{b}_{zd} \quad \mathbf{b}_{yd} \quad \mathbf{b}_{zd}]. \quad (24)$$

无人机的姿态误差定义为

$$\mathbf{e}_R = \frac{1}{2} (R_d^T R - R^T R_d)^\vee, \quad (25)$$

其中上标 \vee 表示反对称矩阵求其对应的向量. 无人机的角速度误差为

$$\mathbf{e}_\omega = {}^B \boldsymbol{\omega}_b - R^T R_d {}^B \boldsymbol{\omega}_{bd}, \quad (26)$$

为方便表达, 式(25)–(26)中的矩阵 R 是机体坐标系在世界坐标系的旋转矩阵 ${}^I R_B$, 目标角速度为 ${}^B \boldsymbol{\omega}_{bd} = (R_d^T \dot{R}_d)^\vee$. 综合以上分析, 无人机内环的控制输入为

$$\boldsymbol{\tau} = -k_R \mathbf{e}_R - k_\omega \mathbf{e}_\omega + {}^B \boldsymbol{\omega}_b \times {}^B I_b {}^B \boldsymbol{\omega}_b - {}^B I_b ({}^B \dot{\boldsymbol{\omega}}_b R^T R_d {}^B \boldsymbol{\omega}_{bd} - R^T R_d {}^B \dot{\boldsymbol{\omega}}_{bd}) - \bar{\boldsymbol{\tau}}_d, \quad (27)$$

其中: k_R 与 k_ω 是内环控制器的控制增益, ${}^B \dot{\boldsymbol{\omega}}_b$ 为向量 ${}^B \boldsymbol{\omega}_b$ 对应的反对称矩阵, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_d$ 为机械臂运动对无人机产生干扰力矩的补偿项, 表达如下:

$$\bar{\boldsymbol{\tau}}_d = m_t {}^B \mathbf{r}_{bc} \times {}^I R_B^{-1} (\mathbf{g} \mathbf{e}_3 + {}^I \ddot{\mathbf{r}}_b) - \frac{m_t^2}{m_r} {}^B \boldsymbol{\omega}_b \times ({}^B \mathbf{r}_{bc} \times {}^B \dot{\mathbf{r}}_{bc}) - {}^B \dot{I}_r {}^B \boldsymbol{\omega}_b. \quad (28)$$

扰动力矩 $\boldsymbol{\tau}_d$ 中未补偿的项为 $\Delta \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau}_d - \bar{\boldsymbol{\tau}}_d$.

注 1 雅可比矩阵 ${}^C J_\omega(\boldsymbol{\eta})$ 在 $\eta_2 = 0^\circ$ 的时候奇异, 但在实际控制过程中机械臂离该奇异构型较远.

注 2 因为传感器的限制, 无人机的角加速度 ${}^B \dot{\boldsymbol{\omega}}_b$ 以

及关节角加速度产生的 $\ddot{\mathbf{r}}_{bc}$ 是难以得到的, 并且这两项通常相比较小, 因此在所设计的控制器中可以忽略这两项^[19].

注 3 针对视觉伺服控制部分, 控制器(16)可以实现图像特征 \mathbf{e}_s 的指数收敛^[7]. 无人机控制器(19)(27)中对机械臂运动产生的扰动力/力矩进行了部分补偿, 由式(8)(11)(20)(28)可知扰动 $\Delta \mathbf{F}_d$ 及 $\Delta \boldsymbol{\tau}_d$ 有界, 参考文献 [20] 可以得到跟踪误差有界的结论.

4 仿真验证

本章将在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真环境, 通过性能测试、力/力矩补偿项测试、鲁棒测试及对比测试验证所提控制策略的性能, 系统参数设置如下:

$$\begin{aligned} m_b &= 1.2 \text{ kg}, \quad m_1 = 0.1 \text{ kg}, \quad m_2 = 0.1 \text{ kg}, \\ m_3 &= 0.075 \text{ kg}, \quad L_0 = 0.05 \text{ m}, \quad L_1 = 0.15 \text{ m}, \\ L_2 &= 0.1 \text{ m}, \quad L_3 = 0.05 \text{ m}, \\ {}^B I_b &= \text{diag}\{[0.012 \quad 0.012 \quad 0.018]\}. \end{aligned}$$

4.1 性能测试仿真

飞行机械臂的初始状态为

$$\begin{aligned} x_b(0) &= 0 \text{ m}, \quad y_b(0) = 0 \text{ m}, \quad z_b(0) = 0 \text{ m}, \\ \eta_1(0) &= -9^\circ, \quad \eta_2(0) = -90^\circ, \quad \eta_3(0) = 54^\circ. \end{aligned}$$

4个特征点在世界坐标系下的位置为

$$\begin{aligned} P_1 &= (-0.2, 5, 1.15), \quad P_2 = (0.2, 5, 1.15), \\ P_3 &= (-0.2, 5, 0.85), \quad P_4 = (0.2, 5, 0.85). \end{aligned}$$

图像特征点的设定值为

$$\begin{aligned} (u_{1d}, v_{1d}) &= (0.1, 0.125), \quad (u_{2d}, v_{2d}) = (0.3, 0.125), \\ (u_{3d}, v_{3d}) &= (0.1, 0.275), \quad (u_{4d}, v_{4d}) = (0.3, 0.275). \end{aligned}$$

飞行机械臂系统视觉伺服控制器及无人机内外环控制器的控制增益如下:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \text{diag}\{[0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15, 0.15, 0.15]\}, \\ k_p &= \text{diag}\{[0.01 \quad 0.4 \quad 0.002]\}, \\ k_v &= \text{diag}\{[1.0 \quad 2.0 \quad 0.7]\}, \\ k_R &= \text{diag}\{[5 \quad 5 \quad 4.7]\}, \quad k_\omega = \text{diag}\{[0.6 \quad 0.6 \quad 1]\}. \end{aligned}$$

图3–9为性能测试仿真的曲线图. 图3是4个特征点 \mathbf{s} 与期望位置 \mathbf{s}_d 的误差曲线, 图4则是它们在图像平面的轨迹. 从图中可以看出, 特征点在图像平面的位置 \mathbf{s} 能够到达期望值 \mathbf{s}_d , 验证了所设计控制器的性能. 图3中 $\Delta \mathbf{s}_u = \mathbf{s}_{ud} - \mathbf{s}_u$, $\Delta \mathbf{s}_v = \mathbf{s}_{vd} - \mathbf{s}_v$, 下标 i 表示第 i 个特征点坐标的误差. 图5展示了相机的期望速度与实际速度, ω_{cx} , ω_{cy} , ω_{cz} 分别是相机角速度在3个方向上的分量, 类似地, v_{cx} , v_{cy} , v_{cz} 是相机线速度的分量. 图6是机械臂的3个关节角及关节角速度. 图7中给出了无人机对上层视觉伺服控制器得到的期望线速度的跟踪情况, 其中 v_{bx} , v_{by} , v_{bz} 分别是无人机线速度

在机体坐标系 \mathcal{F}_B 中3个方向上的分量,可以看出带有力/力矩补偿的无人机底层控制器(19)(27)能够实现对机体期望速度 ${}^I\mathbf{v}_{bd}$ 的有效跟踪. 最后,图8-9分别展示了无人机的欧拉角以及控制输入.

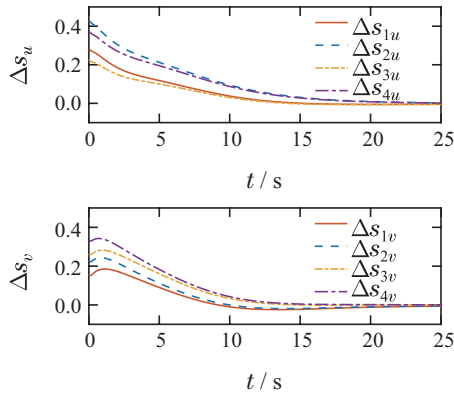


图 3 图像特征点误差

Fig. 3 The error of image feature points

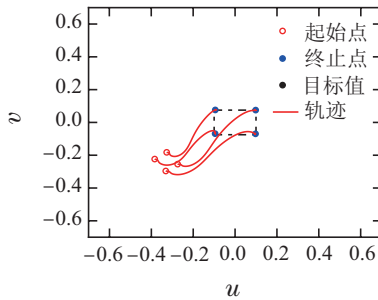


图 4 特征点在图像平面的轨迹

Fig. 4 Trajectories of feature points on the image plane

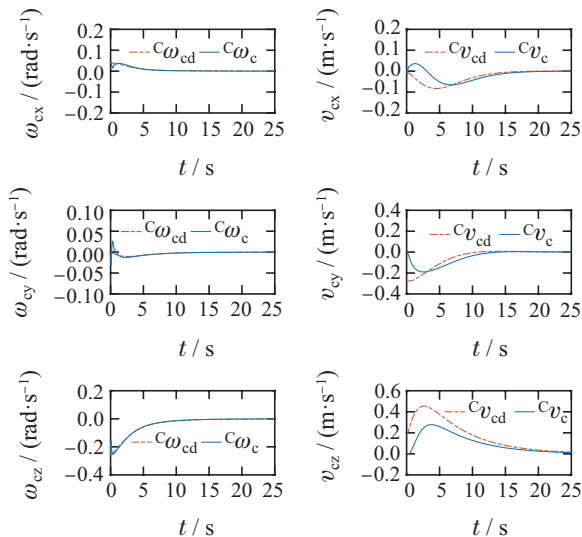


图 5 相机的期望速度与实际速度

Fig. 5 Desired and executed velocity of the camera

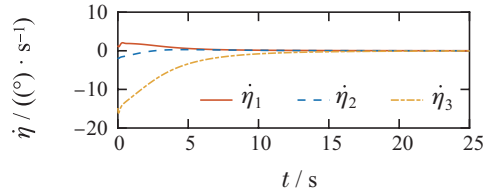
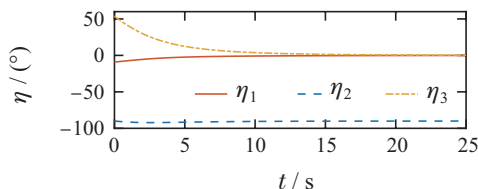


图 6 关节角及关节角速度

Fig. 6 Joint angles and joint rates

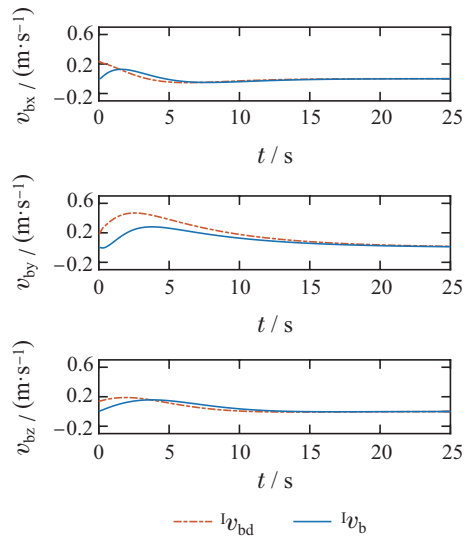


图 7 无人机的期望线速度及实际线速度

Fig. 7 Desired and executed linear velocity of UAV

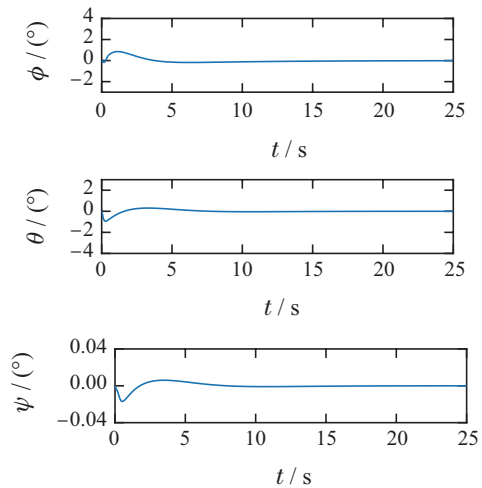
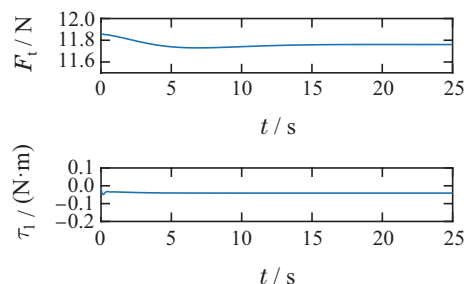


图 8 无人机欧拉角

Fig. 8 Euler angles of UAV



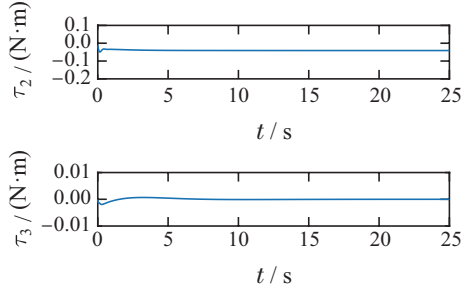


图9 控制输入
Fig. 9 Control inputs

4.2 力/力矩补偿项测试

本组仿真通过比较无人机和力矩控制器对期望速度的跟踪效果,以验证力/力矩补偿项 $\bar{\mathbf{F}}_d$ 以及 $\bar{\boldsymbol{\tau}}_d$ 发挥的作用.本组仿真与第4.1节性能测试仿真中的系统参数以及控制器参数设定完全一致,对比测试将无人机底层控制器中的补偿项 $\bar{\mathbf{F}}_d$ 以及 $\bar{\boldsymbol{\tau}}_d$ 去除.

图10–11展示了在有无质心偏移的力/力矩补偿两种情况时,无人机和相机对期望线速度的跟踪情况. $\Delta \mathbf{v}_b = {}^I \mathbf{v}_{bd} - {}^I \mathbf{v}_b$, $\Delta \mathbf{v}_c = {}^C \mathbf{v}_{cd} - {}^C \mathbf{v}_c$.其中: $\Delta \mathbf{v}_{b1}$ 和 $\Delta \mathbf{v}_{c1}$ 是有补偿的情况, $\Delta \mathbf{v}_{b2}$ 和 $\Delta \mathbf{v}_{c2}$ 是没有补偿的情况.在运动过程中,机械臂给无人机带来的质心偏移主要是在机体坐标系 \mathcal{F}_B 的 y 轴方向,从图10能够看出,无人机对 v_{byd} 的跟踪上有补偿情况明显优于无补偿情况.同样地,质心偏移主要是在相机坐标系 \mathcal{F}_C 的 z 轴方向,从图11能看出相机对 v_{czd} 的跟踪上,带有补偿项能够明显提升控制性能.

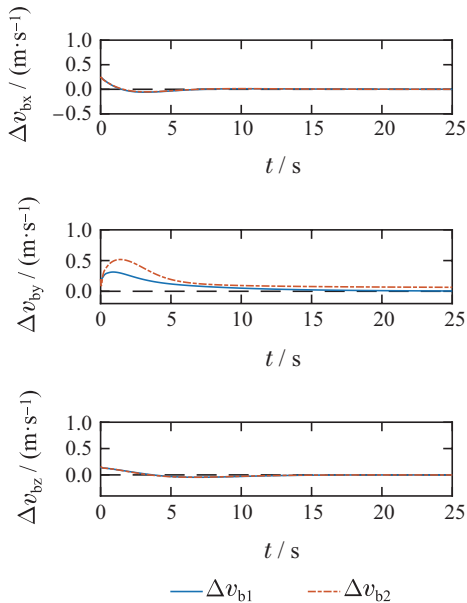


图10 有无补偿情况下无人机线速度跟踪误差

Fig. 10 Comparison of UAV linear velocity tracking error with or without compensation terms

4.3 鲁棒性测试仿真

本节将在控制增益不变的情况下,改变图像特征点在笛卡尔空间的位置,进行3组仿真,测试所提控制

算法针对特征点位置变化的鲁棒性,并在第3组仿真中考虑图像噪声的影响.飞行机械臂的初始状态设置为

$$\begin{aligned} x_b(0) &= 0 \text{ m}, y_b(0) = 0 \text{ m}, z_b(0) = 0 \text{ m}, \\ \eta_1(0) &= -9^\circ, \eta_2(0) = -81^\circ, \eta_3(0) = 0^\circ. \end{aligned}$$

图像特征点的目标值设定为

$$\begin{aligned} (u_{1d}, v_{1d}) &= (-0.16, -0.12), \\ (u_{2d}, v_{2d}) &= (0.16, -0.12), \\ (u_{3d}, v_{3d}) &= (-0.16, 0.12), \\ (u_{4d}, v_{4d}) &= (0.16, 0.12). \end{aligned}$$

下面3组仿真中飞行机械臂系统的控制增益与第4.1节仿真中的一致.

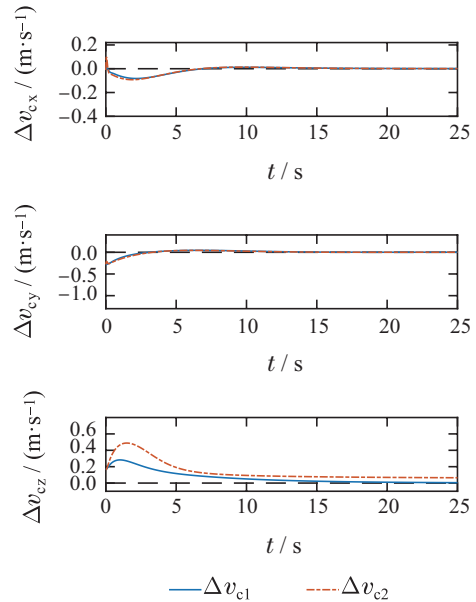


图11 有无补偿情况下相机线速度跟踪误差

Fig. 11 Comparison of camera linear velocity tracking error with or without compensation terms

4.3.1 鲁棒性测试第1组仿真

4个图像特征点在笛卡尔空间中的位置为

$$\begin{aligned} P_1 &= (-0.2, 4, 1.65), P_2 = (0.2, 4, 1.65), \\ P_3 &= (-0.2, 4, 1.35), P_4 = (0.2, 4, 1.35). \end{aligned}$$

4.3.2 鲁棒性测试第2组仿真

4个图像特征点在笛卡尔空间中的位置为

$$\begin{aligned} P_1 &= (-0.2, 4, 2.35), P_2 = (0.2, 4, 2.35), \\ P_3 &= (-0.2, 4, 2.05), P_4 = (0.2, 4, 2.05). \end{aligned}$$

4.3.3 鲁棒性测试第3组仿真

4个图像特征点在笛卡尔空间中的位置为

$$\begin{aligned} P_1 &= (0.8, 4, 2.35), P_2 = (1.2, 4, 2.35), \\ P_3 &= (0.8, 4, 2.05), P_4 = (1.2, 4, 2.05). \end{aligned}$$

本组仿真除改变图像特征点在笛卡尔空间中的位置外, 还对特征点在图像平面上的成像点坐标加入了均值为0, 方差为 2.5×10^{-5} 的高斯白噪声 $N(t)$.

由图 12-14 可以看出, 在不改变控制增益的情况下, 即使图像特征点在笛卡尔空间中的位置发生变化, 视觉伺服控制器及无人机底层控制器依然能够控制飞行机械臂系统运动到指定位置, 验证了所设计控制器对特征点在笛卡尔空间中位置变化的鲁棒性. 除此之外, 由图 14 可以看出所提方法对图像噪声也具有较好的鲁棒性.

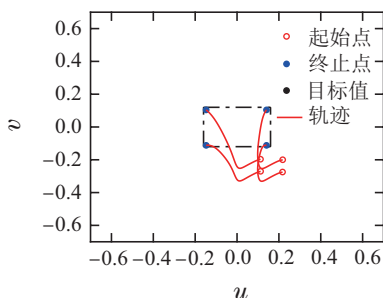


图 12 特征点在图像的轨迹 (第1组)

Fig. 12 Trajectories of feature points (group 1)

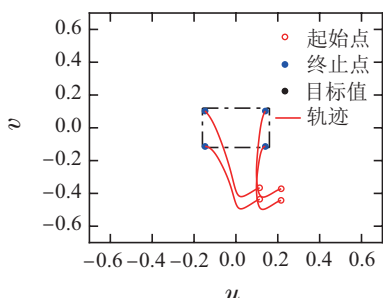


图 13 特征点在图像的轨迹 (第2组)

Fig. 13 Trajectories of feature points (group 2)

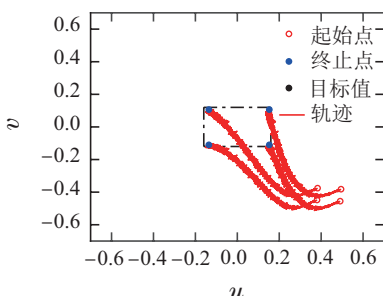


图 14 特征点在图像的轨迹 (第3组)

Fig. 14 Trajectories of feature points (group 3)

4.4 对比测试仿真

本组仿真将给出所提方法与文献[21]中方法的控制效果比较, 以展示本文所提方法的性能, 仿真效果如图 15-16 所示.

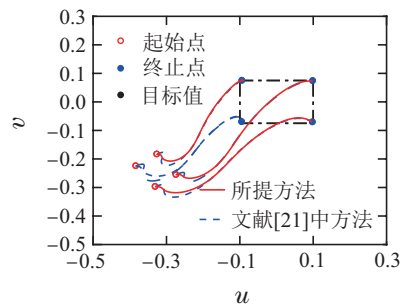
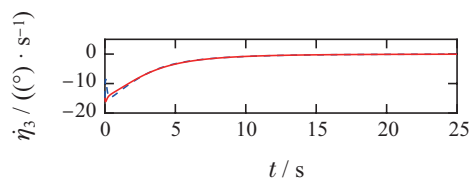
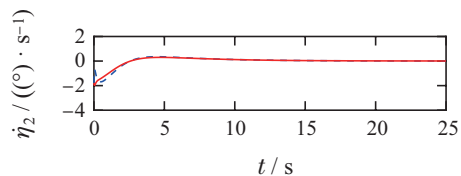
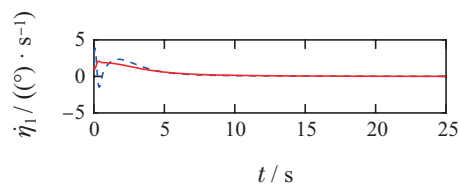


图 15 所提方法及文献[21]中方法的图像特征点轨迹

Fig. 15 Trajectories of feature points by the proposed method and the method in [21]



— 本文所提方法 - - - 文献[21]中方法

图 16 本文所提方法及文献[21]中方法

Fig. 16 Joint rates by the proposed method and the method in [21]

相比于所提方法设计无人机和机械臂的运动以实现相机的期望线速度和角速度, 文献[21]中方法则是直接建立图像特征误差及飞行机械臂的运动学模型, 即

$$\dot{e}_s = J\dot{\xi} - L_\omega\bar{\omega}, \quad (29)$$

并基于该模型(29), 设计如下控制器以完成图像特征的镇定控制:

$$\dot{\xi}_d = J^+(-\Lambda e_s + L_\omega\bar{\omega}), \quad (30)$$

其中: $\dot{\xi}_d$ 是飞行机械臂可驱动的部分, 即无人机的线速度和机械臂的关节角速度; $\bar{\omega}$ 是不可驱动的部分.

本文所提方法(16)-(18)将无人机线速度与机械臂的关节角速度分离设计, 相比之下, 文献[21]中的控制策略(30)对两者的设计是耦合的. 这导致机械臂的关节角速度及图像特征点轨迹在起始阶段有较大的振荡, 如图 15-16 所示.

5 总结与展望

本文首先引入了相机的成像模型,对飞行机械臂系统的运动学模型和动力学模型分别进行了研究.随后在所建立的模型基础上设计了飞行机械臂的控制策略,包括视觉伺服控制器及底层的无人机控制器.特别地,由视觉伺服控制器得到相机的期望线速度及角速度分别通过对无人机及机械臂的速度分配实现.对于无人机本体则基于几何控制,加入了面向质心偏移的力/力矩补偿项.最后在MATLAB/Simulink仿真环境中通过对比验证了所设计控制策略良好的控制性能.

接下来的工作将在本文所提速度分离框架的基础之上,进一步优化视觉控制器及无人机的底层控制器,并在实际的飞行机械臂实验平台进行算法测试.

参考文献:

- [1] CHEN M, XIONG S, WU Q. Tracking flight control of quadrotor based on disturbance observer. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(3): 1414 – 1423.
- [2] LIANG Xiao, WANG Yang, HE Wei, et al. Cooperative control for underactuated aerial transportation systems via the energy-based analysis. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2473 – 2481. (梁潇, 王杨, 何慰, 等. 基于能量分析的欠驱动飞行吊运系统协同控制. *控制理论与应用*, 2020, 37(12): 2473 – 2481.)
- [3] CASBEER D W, KINGSTON D B, BEARD R W, et al. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles. *International Journal of Systems Science*, 2006, 37(6): 351 – 360.
- [4] KIM S, SEO H, KIM H J. Operating an unknown drawer using an aerial manipulator. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle: IEEE, 2015: 5503 – 5508.
- [5] THOMAS J, POLIN J, SREENATH K, et al. Avian-inspired grasping for quadrotor micro UAVs. *Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. Portland: ASME, 2013, 55935: V06AT07A014.
- [6] FEI Y, CHEN H, QUAN F, et al. Swan-inspired unmanned aerial vehicles with long-neck visual perception system. *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Hong Kong: IEEE, 2019: 1335 – 1340.
- [7] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. I. basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82 – 90.
- [8] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. II. advanced approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109 – 118.
- [9] ZHANG K, SHI Y, SHENG H. Robust nonlinear model predictive control based visual servoing of quadrotor UAVs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(2): 700 – 708.
- [10] ZHANG X, FANG Y, ZHANG X, et al. Dynamic image-based output feedback control for visual servoing of multirotors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7624 – 7636.
- [11] LI J, XIE H, LOW K H, et al. Image-based visual servoing of rotorcrafts to planar visual targets of arbitrary orientation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 7861 – 7868.
- [12] THOMAS J, LOIANNIO G, SREENATH K, et al. Toward image based visual servoing for aerial grasping and perching. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong: IEEE, 2014: 2113 – 2118.
- [13] KIM S, SEO H, CHOI S, et al. Vision-guided aerial manipulation using a multirotor with a robotic arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(4): 1912 – 1923.
- [14] QUAN F, CHEN H, LI Y, et al. Singularity-robust hybrid visual servoing control for aerial manipulator. *Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Kuala Lumpur: IEEE, 2018: 562 – 568.
- [15] SUN Jingtao, WANG Yaonan, TAN Jianhao, et al. Hybrid visual servoing for rotor aerial manipulation system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(4): 505 – 515. (孙敬陶, 王耀南, 谭建豪, 等. 旋翼飞行机械臂系统的混合视觉伺服控制. *控制理论与应用*, 2019, 36(4): 505 – 515.)
- [16] MEBARKI R, LIPPIELLO V, SICILIANO B. Image-based control for dynamically cross-coupled aerial manipulation. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Chicago: IEEE, 2014: 4827 – 4833.
- [17] LIPPIELLO V, CACACE J, NAVARRO A S, et al. Hybrid visual servoing with hierarchical task composition for aerial manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letter*, 2016, 1(1): 259 – 266.
- [18] NAVARRO A S, PATRICK G, LIPPIELLO V, et al. Uncalibrated visual servo for unmanned aerial manipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1610 – 1621.
- [19] ZHANG G, HE Y, DAI B, et al. Robust control of an aerial manipulator based on a variable inertia parameters model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9515 – 9525.
- [20] LEE T, LEOK M, MCCLAMROCH N H. Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3). *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Atlanta: IEEE, 2010: 5420 – 5425.
- [21] MEBARKI R, LIPPIELLO V. Image-based control for aerial manipulation. *Asian Journal of Control*, 2014, 16(3): 646 – 656.

作者简介:

张兆鹏 博士研究生, 目前研究方向为飞行机械臂系统的视觉伺服控制, E-mail: zhangzp@mail.nankai.edu.cn;

何慰 博士研究生, 目前研究方向为无人机系统控制, E-mail: hewei@mail.nankai.edu.cn;

梁潇 副教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性控制、无人机的运动规划与先进控制, E-mail: liangx@nankai.edu.cn;

韩建达 教授, 博士生导师, 目前研究方向为机器人自主行为共性技术、医疗与康复机器人共性技术与系统、移动机器人系统, E-mail: hanjianda@nankai.edu.cn;

方勇纯 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制、机器人视觉伺服、无人机及桥式吊车等欠驱动系统控制, E-mail: fangyc@nankai.edu.cn.