



基于零空间饱和及高阶校正的双臂飞行机器人控制

黄宏杰, 文浩*, 廖璨

南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016

*联系人, E-mail: wenhao@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2024-07-24; 接受日期: 2024-10-23; 网络出版日期: 2024-12-06

“十四五”民用航天技术预先研究项目(编号: D010301)资助

摘要 飞行机器人在轨操作研究多采用一臂抓一物或两臂抓一物的操作策略, 并未发挥出双臂操作的效率优势. 本文针对空间结构在轨组装任务中两臂同时抓两物的应用场景, 开展飞行机器人约束运动控制研究. 首先, 基于广义雅可比矩阵法和动量守恒方程建立自由漂浮状态下双臂飞行机器人运动学方程. 随后, 利用机械臂与基体的耦合特性, 基于高阶离散的速度校正(HDVC)方法和零空间饱和(SNS)方法, 提出一种高精度的约束运动控制算法 HDVC-SNS. 该方法可以显著降低控制律离散误差, 并通过关节速度限制保证机器人系统平稳运行. 最后, 通过多组数值仿真验证了 HDVC-SNS 算法的有效性.

关键词 双臂飞行机器人, 双目标抓取, 高阶校正, 零空间饱和

PACS: 45.20.df, 45.40.-f, 45.40.Ln, 45.50.Jf, 45.80.+r

1 引言

随着空间技术的飞速发展, 航天器与空间结构的组成日趋复杂, 性能也在不断提高. 飞行机器人作为重要的在轨服务实施者^[1], 可以胜任空间目标捕获^[2]、在轨实时监测、空间结构装配和维修^[3,4]等多种任务. 这极大程度上降低了航天员的舱外工作风险, 扩展了航天员舱外工作能力, 提高了在轨服务质量与安全性. 因此, 飞行机器人具有很强的实用性和巨大的发展潜力.

通常意义上的飞行机器人系统一般由多自由度机

械臂和航天器平台(一般为卫星或空间站等)组成, 是一个典型的空多体动力学系统. 浮动基双臂飞行机器人的机械臂与基体航天器之间存在强烈的动力学耦合^[5], 机械臂末端位置不仅与关节角度有关, 还与基体的位姿有关. 耦合效应引起的扰动会影响机械臂运动控制效果, 并可能对目标抓取及组装的精度产生严重影响, 甚至使飞行机器人偏离原先规划的路径而产生碰撞. 因此, 空间飞行机器人在轨目标抓捕任务对控制末端位姿精度、基体控制、关节避障等都提出很高要求.

近年来, 空间飞行机器人目标抓取问题也成为众多学者的研究热点. 目前, 飞行机器人的抓取研究主

引用格式: 黄宏杰, 文浩, 廖璨. 基于零空间饱和及高阶校正的双臂飞行机器人控制. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 224510
Huang H J, Wen H, Liao C. Dual-arm flying robot control based on saturation in null space and high-order correction (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 224510, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0286

要以单臂抓取单一目标居多。例如, Shi等人^[6]以空间单臂机器人抓取目标卫星为研究场景, 提出一种结合运动和力的混合控制器用于抓捕过程。Zhang等人^[7]利用基于强化学习的跟踪方法控制单臂飞行机器人进行空间翻滚物体的抓捕。除此之外, 由于单臂飞行机器人的抓捕能力有限, 因此许多学者转向对双臂飞行机器人进行研究, Han等人^[8]研究双臂飞行机器人在没有特定抓取点的情况下捕获失效卫星的控制策略。Wang和Katupitiya^[9]提出一种对模型不确定性具有较好鲁棒性的滑模控制器, 并应用于双臂飞行机器人对非合作目标进行捕获。Yang等人^[10]针对双臂飞行机器人携带两个模块化部件进行装配的任务, 设计出基于相对位姿误差的协调运动控制律以达到组装过程中干扰最小和避碰的要求。上述双臂飞行机器人抓捕策略主要使用双臂同时抓取单一目标或使用其中的一任务臂进行单一目标抓取。与单臂飞行机器人相比, 双臂飞行机器人展现出更强的抓取适应性, 并利于同时实现基体航天器位姿稳定。相较于分别研究其中一臂抓捕单目标, 通过空间双臂机器人同时抓捕两个目标需考虑双臂运动的相互影响, 其运动规划及控制所依据的耦合力学模型也更为复杂。

双臂飞行机器人在抓取过程中会面临各种关节变量约束, 如关节角限制、关节速度限制及避碰要求等。目前常见的处理手段是基于优化方法, 将关节约束转化为优化问题的约束。例如, Kalaycioglu和Ruiter^[11]针对捕获目标后的关节扭矩突增的现象, 提出用最优控制分配方法和非线性预测控制方法减小关节扭矩、目标接触力和复合冗余系统的力矩。Xue等人^[12]结合菌群优化算法和人工势函数法将末端轨迹规划转化成非线性优化问题, 有效避免关节奇异及碰撞情况的发生。An等人^[13]将双臂飞行机器人路径跟踪问题转化为凸最优控制问题进行求解。Ni等人^[14]为了避免机械臂与基体同时与障碍物发生碰撞, 将轨迹协调问题转化为优化问题, 利用粒子群算法寻找基座与机械臂的最优轨迹。上述方法利用高精度、快速的求解器对优化问题进行求解。在此过程中, 优化问题的复杂程度直接决定了计算规模的大小, 这往往导致复杂问题计算效率低下。因此, Flacco等人^[15]提出关节速度层次上的零空间饱和方法(Saturation in Null Space, SNS)对关节变量进行限制, 相比于基于优化方法, 该方法在计算速度和计算效率上都要明显优于前者。在Flacco等人工作

的基础上, Fiore等人^[16]拓展了零空间饱和的适用性, 提出了适用于关节速度、关节加速度、关节力矩约束的零空间饱和方法。SNS研究工作目前均针对固定机械臂, 尚未在空间飞行机器人场景中得以验证。

为了在数字化硬件中部署飞行机器人控制律, 需要对连续控制量进行离散化。但由于离散化过程中的数值积分会产生明显的累积误差, 这可能导致无法满足机械臂操控的高精度要求。因此, 为了提高机械臂控制精度, Guo等人^[17]在关节位置层次上提出了基于四阶差分的离散模型, 通过数值分析得到该模型在关节角层次上具有 $O(\tau^4)$ 的稳态误差(τ 为时间步长)。Cang等人^[18]在四阶离散模型的基础上, 利用差分原理将离散模型改进为五阶差分模型, 同样通过数值分析可得该模型的稳态误差是 $O(\tau^5)$, 其误差明显小于四阶模型。理论上可通过差分原理将离散模型改进为无穷高阶模型。但是随着离散阶数越高, 系统将明显出现高阶噪声, 且计算复杂度明显提高, 因此需要适当选取离散阶数。以上研究均针对固定机械臂且采用关节位置控制模式, 如何将其扩展至飞行机器人及速度控制模式还有待进一步研究。

航天器在轨组装等空间服务场景中, 双臂飞行机器人经常需要对两个目标进行控制操作, 因此有必要研究双臂同时抓两物的控制策略, 以有效发挥出双臂机器人的效率优势。针对飞行机器人双臂操作应用场景, 本文采用零空间饱和方法设计双臂抓取的约束运动控制律, 并基于高阶离散的关节速度校正方法(High-order Discretization Velocity Correction, HDVC)降低数值积分误差, 以提高控制精度。最后, 通过数值仿真算法对控制效果进行考核验证。

本文后续部分的结构如下: 第2节利用基于广义雅可比矩阵法与动量守恒方程建立双臂飞行机器人的运动学方程。第3节结合零空间饱和及高阶离散思想设计飞行机器人约束运动控制律。第4节通过搭建Coppelia-sim和Matlab联合仿真平台, 以六自由度浮动基座和双七自由度机械臂组成的飞行机器人为例, 对本文提出的控制方法进行考核验证。最后, 第5节对本文进行总结。

2 双臂飞行机器人运动学方程

飞行机器人属于典型的无根多体动力学系统, 需

考虑机械臂与基座的运动耦合, 因此其建模方法与固定机械臂略有不同. 在运动学方面常见的建模方法有基于广义雅可比矩阵法^[5,19,20]、虚拟机械臂方法^[21,22]和动态等效机械臂方法^[23]. 从动力学角度主要的建模方法有Newton-Euler方法^[24-26]、Lagrange方法^[27]以及使用广义速度作为描述变量的Kane方法^[28-30]. 但飞行机器人动力学方程的计算量要明显大于运动学方程, 并且相比之下运动学方程的计算效率明显更高. 因此, 本文从运动学角度出发, 基于广义雅可比矩阵法与动量守恒方程建立双臂飞行机器人的运动学方程, 并以此为基础设计运动控制律.

本文研究的双臂飞行机器人如图1所示, 该机器人是由两个冗余机械臂和基体航天器组成的机器人系统. 两个空间机械臂1, 2分别拥有 n_1, n_2 个自由度. 因此, 为了完整描述该系统则需要 (n_1+n_2+6) 个方程. 惯性坐标系、基体坐标系分别为 Σ_I, Σ_B , 机械臂1, 2的抓取末端坐标系分别为 Σ_{e1}, Σ_{e2} . 定义机械臂 $k \in \{1, 2\}$ 的关节速度为 $\dot{\mathbf{q}}^{(k)}$. 除非特别指出, 下文涉及的向量和矩阵均在惯性坐标系 Σ_I 下定义.

双臂飞行机器人系统的线动量和角动量为

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{n_1} m_i^{(1)} \mathbf{v}_i^{(1)} + \sum_{j=1}^{n_2} m_j^{(2)} \mathbf{v}_j^{(2)} + m_0 \mathbf{v}_b, \quad (1)$$

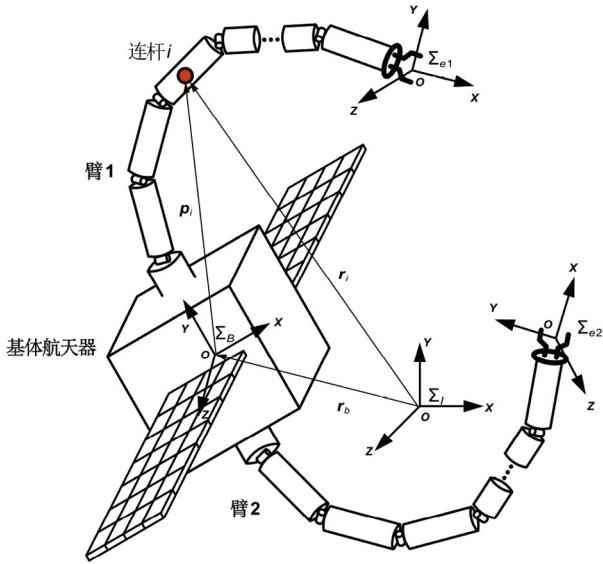


图1 (网络版彩图)双臂飞行机器人示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of a dual-arm flying robot.

$$\mathbf{L} = m_0 \mathbf{r}_b \mathbf{v}_b + \mathbf{I}_b \boldsymbol{\omega}_b + \sum_{i=1}^{n_1} (\mathbf{I}_i^{(1)} \boldsymbol{\omega}_i^{(1)} + m_i^{(1)} \mathbf{r}_i^{(1)} \mathbf{v}_i^{(1)}) + \sum_{j=1}^{n_2} (\mathbf{I}_j^{(2)} \boldsymbol{\omega}_j^{(2)} + m_j^{(2)} \mathbf{r}_j^{(2)} \mathbf{v}_j^{(2)}), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{v}_b \in \mathbb{R}^3$ 和 $\boldsymbol{\omega}_b \in \mathbb{R}^3$ 分别为基体航天器的线速度和角速度, $\mathbf{v}_i^{(k)} \in \mathbb{R}^3$, $\boldsymbol{\omega}_i^{(k)} \in \mathbb{R}^3$ 分别为臂 k 上的第 i 个连杆的质心线速度和角速度. m_0 , $m_i^{(1)}$ 和 $m_j^{(2)}$ 分别为基体航天器的质量、臂1的第 i 个连杆的质量和臂2的第 j 个连杆的质量. $\mathbf{r}_b \in \mathbb{R}^3$ 表示由惯性系原点指向基体系原点的向量, $\mathbf{r}_i^{(1)} \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{r}_j^{(2)} \in \mathbb{R}^3$ 分别表示由惯性系原点指向臂1关节 i 的向量和指向臂2关节 j 的向量. 上波浪线表示该向量所对应的反对称矩阵. $\mathbf{I}_i^{(1)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{I}_j^{(2)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别为臂1的第 i 个连杆和臂2的第 j 个连杆的惯性矩阵.

当系统的初始动量为0, 并且飞行机器人在空间中处于自由漂浮状态, 基体航天器未有主动力作用, 并忽略空间环境对机器人系统的扰动, 则该系统满足动量守恒条件. 利用上述条件, 合并式(1)和(2), 基体速度可用关节速度表示, 即

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_b \\ \boldsymbol{\omega}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}^{(1)} \\ \dot{\mathbf{q}}^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{J}_v = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_v^{(1)} & \mathbf{J}_v^{(2)} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 14}$ 表示基座线速度 $\mathbf{v}_b$ 到关节速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 的雅可比矩阵, $\mathbf{J}_\omega = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_\omega^{(1)} & \mathbf{J}_\omega^{(2)} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 14}$ 表示基座角速度 $\boldsymbol{\omega}_b$ 到关节速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 的雅可比矩阵^[10].

机械臂末端速度 $\xi_e^{(1)} \in \mathbb{R}^6$, $\xi_e^{(2)} \in \mathbb{R}^6$ 与基体速度、关节速度之间有如下关系^[31]:

$$\begin{pmatrix} \xi_e^{(1)} \\ \xi_e^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_m^{(1)} & \mathbf{0}_{6 \times n_2} \\ \mathbf{0}_{6 \times n_1} & \mathbf{J}_m^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}^{(1)} \\ \dot{\mathbf{q}}^{(2)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{J}_s^{(1)} \\ \mathbf{J}_s^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_b \\ \boldsymbol{\omega}_b \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{J}_m^{(k)} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{Te}^{(k)} \\ \mathbf{J}_{Re}^{(k)} \end{pmatrix}$, $\mathbf{J}_{Te}^{(k)} = (\mathbf{e}_1^{(k)} \times \mathbf{d}_1^{(k)} \quad \dots \quad \mathbf{e}_{n_k}^{(k)} \times \mathbf{d}_{n_k}^{(k)})$,

$\mathbf{J}_{Re}^{(k)} = (\mathbf{e}_1^{(k)} \quad \dots \quad \mathbf{e}_{n_k}^{(k)})$, $\mathbf{J}_s^{(k)} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{3 \times 3} & -(\mathbf{r}_e^{(k)} - \mathbf{r}_b)^\times \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$, $k \in \{1, 2\}$. $\mathbf{r}_e^{(k)}$ 表示由惯性系原点指向机械臂 k 抓取末端的向

量. $\mathbf{e}_i^{(k)}$ 表示机械臂 k 的第 i 个关节旋转轴方向的单位向量. $\mathbf{d}_i^{(k)}$ 表示由机械臂 k 的第 i 个关节指向第 i 个连杆质心的向量. $\mathbf{r}^\times$ 表示对应向量 $\mathbf{r}$ 的反对称矩阵^[5].

联立式(3)和(4)可得双臂飞行机器人在初始动量为0的自由漂浮状态下末端速度和关节速度的关系如下:

$$\begin{pmatrix} \xi_e^{(1)} \\ \xi_e^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s \begin{pmatrix} \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_w \end{pmatrix} + \mathbf{J}_m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}^{(1)} \\ \dot{\mathbf{q}}^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{其中, } \mathbf{J}_s = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_s^{(1)} \\ \mathbf{J}_s^{(2)} \end{pmatrix}, \mathbf{J}_m = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_m^{(1)} & \mathbf{0}_{6 \times n_2} \\ \mathbf{0}_{6 \times n_1} & \mathbf{J}_m^{(2)} \end{pmatrix}.$$

令 $\mathbf{J}_g = \mathbf{J}_s \begin{pmatrix} \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_w \end{pmatrix} + \mathbf{J}_m$, 即 $\mathbf{J}_g$ 为双臂飞行机器人的广义

雅可比矩阵.

3 双臂飞行机器人运动控制

本节针对双臂飞行机器人同时抓取两个目标的任务场景, 设计机械臂运动控制器. 利用SNS方法将关节速度限制在约束允许范围内, 进而结合HDVC方法构造高精度约束运动控制律HDVC-SNS, 在满足约束条件的同时降低数值积分误差, 提升控制效果.

3.1 伺服控制器设计

两机械臂的当前末端位姿可以用齐次变换矩阵 $\mathbf{T}^{(1)}$, $\mathbf{T}^{(2)}$ 进行描述, 则期望的目标位姿分别为 $\mathbf{T}_d^{(1)}$, $\mathbf{T}_d^{(2)}$. 并且机械臂当前末端位姿与目标位姿的位姿误差可以用一个六维向量 $\mathbf{e} = (\mathbf{t}, \theta \mathbf{u})$ 进行表示^[32], 前三个元素表示平移分量用 $\mathbf{t}$ 表示, 分别为 x, y, z ; 后三个元素表示旋转分量用轴角 $\theta \mathbf{u}$ 表示, 分别为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$. 令 $\mathbf{e}_{\text{pos}}^{(k)} = \mathbf{t}$, $\mathbf{e}_{\text{ori}}^{(k)} = \theta \mathbf{u}$, $k \in \{1, 2\}$.

将空间机器人两机械臂末端的位置和姿态误差向量分别定义为 $\mathbf{e}_{\text{pos}} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{\text{pos}}^{(1)\top} & \mathbf{e}_{\text{pos}}^{(2)\top} \end{bmatrix}^\top \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 和 $\mathbf{e}_{\text{ori}} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{\text{ori}}^{(1)\top} & \mathbf{e}_{\text{ori}}^{(2)\top} \end{bmatrix}^\top \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$. 设计如下关节速度伺服控制律:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_g^\dagger \cdot (-\lambda \mathbf{e}), \quad (6)$$

其中, $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{\text{pos}}^{(1)\top} & \mathbf{e}_{\text{ori}}^{(1)\top} & \mathbf{e}_{\text{pos}}^{(2)\top} & \mathbf{e}_{\text{ori}}^{(2)\top} \end{bmatrix}^\top$ 为双臂位姿的总误差向量, $\mathbf{J}_g^\dagger$ 是 $\mathbf{J}_g$ 的广义逆矩阵, λ 为增益系数.

此外, 由于本文讨论的是一般情况下的双臂飞行机器人, 该机器人是由两个冗余机械臂和基体航天器组成的机器人系统. 因此, 可以利用机械臂的冗余自由度在雅可比矩阵的零空间中进一步对关节速度进行约束, 雅可比零空间控制的基本表达式如下:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_g^\dagger \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{P} \dot{\mathbf{q}}_N, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{P} = \mathbf{E} - \mathbf{J}_g^\dagger \mathbf{J}_g$ 是维数为 $(n_1 + n_2) \times (n_1 + n_2)$ 的雅可比零空间中的投影矩阵, $\dot{\mathbf{x}}$ 为任务空间中的机械臂末端速度, 满足 $\dot{\mathbf{x}} = -\lambda \mathbf{e}$, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵, $\dot{\mathbf{q}}_N$ 为零空间速度向量.

3.2 关节任务约束

考虑一般情况下飞行机器人自身的运动能力与任务约束, 可以对关节速度进行如下限制:

$$\mathbf{V} \leq \dot{\mathbf{q}} \leq \mathbf{V}. \quad (8)$$

在明确约束边界后, 下文采用零空间饱和方法计算约束限制下的关节速度. SNS算法^[15]旨在解决冗余机器人在关节约束下的运动控制问题. 利用式(7)计算逆矩阵 $\mathbf{J}_g^\dagger$ 时引入饱和矩阵 $\mathbf{W}$, 将式(7)的逆矩阵计算按 $(\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger$ 代入可以得到SNS投影方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger \dot{\mathbf{x}} + \left(\mathbf{E} - (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger \mathbf{J}_g \right) \dot{\mathbf{q}}_N \\ &= \dot{\mathbf{q}}_N + (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger (\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{J}_g \dot{\mathbf{q}}_N) \\ &= (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger \dot{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{P}} \dot{\mathbf{q}}_N, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{E} - (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger \mathbf{J}_g$ 是引入饱和矩阵后的雅可比零空间中的投影矩阵, 饱和矩阵 $\mathbf{W}$ 是由0/1元素组成的 n 维对角矩阵 $\mathbf{W} = \text{diag}\{\mathbf{W}_{ii}\}$. 若关节 i 为超过约束最严重的关节(即饱和关节), 则令 $\mathbf{W}_{ii} = 0$, 表示在零空间下将关节 i 设置为饱和速度, 关节被约束, 失去变速能力. 若 $\mathbf{W}_{ii} = 1$, 说明此时关节仍具有自主变速能力.

SNS算法的核心思想是通过名义缩放因子 $s \in [0, 1]$ 对任务进行调整以满足关节约束, 即在SNS投影方程(9)引入缩放因子 s 对目标任务 $\dot{\mathbf{x}}$ 进行缩放, 最

终可以得到满足约束的关节速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 如下:

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_N + (\mathbf{J}_g \mathbf{W})^\dagger (s \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{J}_g \dot{\mathbf{q}}_N). \quad (10)$$

采用如下参数对SNS算法进行初始化: $\mathbf{W} = \mathbf{E}$ (启用所有关节), 零空间速度 $\dot{\mathbf{q}}_N = \mathbf{0}$, 名义缩放因子 $s = 1$. 除此之外, SNS算法还定义了当前循环的最佳缩放因子 s^* , 以保留循环过程中满足任务的最大缩放因子, 并且初始化为 $s^* = 0$. 在线运行时, 主要通过优化循环程序实现: 第一步, 通过式(9)计算出关节速度 $\dot{\mathbf{q}}$, 当 $\dot{\mathbf{q}}$ 满足约束要求时结束循环并直接输出 $\dot{\mathbf{q}}$, 否则进行下一步. 第二步, 根据任务缩放因子算法^[33]计算满足约束的 s^* , 确定饱和关节 i , 令对应 $\mathbf{W}$ 中的 $\mathbf{W}_{ii} = \mathbf{0}$, 对应的零空间速度 $\dot{\mathbf{q}}_{N,i}$ 按式(11)进行计算:

$$\dot{\mathbf{q}}_{N,i} = \begin{cases} \nabla, & \dot{\mathbf{q}}_{N,i} > \nabla, \\ \underline{\mathbf{v}}, & \dot{\mathbf{q}}_{N,i} < \underline{\mathbf{v}}. \end{cases} \quad (11)$$

第三步, 当 $\text{rank}(\mathbf{J}_g \mathbf{W}) < \dim(\dot{\mathbf{x}})$ 时, 结束循环, 令 $s = s^*$, 利用式(10)计算得到最终的关节速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 并输出. 否则, 回到第一步计算 $\dot{\mathbf{q}}$ 是否满足约束条件.

3.3 基于高阶离散的速度校正

由式(6)可知, k 时刻的关节速度控制指令 $\dot{\mathbf{q}}_k$ 为

$$\dot{\mathbf{q}}_k = \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_k, t_k) \cdot (-\lambda \mathbf{e}_k), \quad (12)$$

其中, $t_k = k\delta$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $\mathbf{q}_k$ 为 t_k 时刻下的关节角, δ 为时间步长. 在数字化硬件上部署速度控制律时通常采用零阶保持器, 即从第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻之间关节速度 $\dot{\mathbf{q}}_k$ 保持不变. 由于零阶保持器带来的误差将对机械臂末端控制精度产生影响. 为此, 基于高阶离散的HDVC方法对关节速度控制指令(12)进行校正.

针对连续函数 $\varphi(t)$, 通过泰勒级数展开可以得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k+1}) &= \varphi(t_k) + \delta \dot{\varphi}(t_k) + \frac{\delta^2}{2!} \ddot{\varphi}(t_k) \\ &\quad + \frac{\delta^3}{3!} \dddot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k-1}) &= \varphi(t_k) - \delta \dot{\varphi}(t_k) + \frac{\delta^2}{2!} \ddot{\varphi}(t_k) \\ &\quad - \frac{\delta^3}{3!} \dddot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k-2}) &= \varphi(t_k) - 2\delta \dot{\varphi}(t_k) + \frac{(2\delta)^2}{2!} \ddot{\varphi}(t_k) \\ &\quad - \frac{(2\delta)^3}{3!} \dddot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k-3}) &= \varphi(t_k) - 3\delta \dot{\varphi}(t_k) + \frac{(3\delta)^2}{2!} \ddot{\varphi}(t_k) \\ &\quad - \frac{(3\delta)^3}{3!} \dddot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k-4}) &= \varphi(t_k) - 4\delta \dot{\varphi}(t_k) + \frac{(4\delta)^2}{2!} \ddot{\varphi}(t_k) \\ &\quad - \frac{(4\delta)^3}{3!} \dddot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\dot{\varphi}(t_k)$, $\ddot{\varphi}(t_k)$ 和 $\dddot{\varphi}(t_k)$ 分别代表 $\varphi(t_k)$ 的一阶、二阶、三阶导数. 对于上述表达式, 按“ $11 \times (13) + 4 \times (14) - 5 \times (15) - 3 \times (16) + 2 \times (17)$ ”进行计算, 可得

$$\begin{aligned} 11\varphi(t_{k+1}) + 4\varphi(t_{k-1}) - 5\varphi(t_{k-2}) - 3\varphi(t_{k-3}) + 2\varphi(t_{k-4}) \\ = 9\varphi(t_k) + 18\delta \dot{\varphi}(t_k) + O(\delta^4), \end{aligned} \quad (18)$$

重新整理式(18)可得

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t_k) &= (11\varphi(t_{k+1}) - 9\varphi(t_k) + 4\varphi(t_{k-1}) - 5\varphi(t_{k-2}) \\ &\quad - 3\varphi(t_{k-3}) + 2\varphi(t_{k-4})) / (18\delta) + O(\delta^3). \end{aligned} \quad (19)$$

至此, 通过泰勒级数展开构造出四阶差分公式(19).

同理, 对于关节速度 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ 可以得到与式(19)一样形式的四阶差分公式, 具体如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_k &= (11\mathbf{q}_{k+1} - 9\mathbf{q}_k + 4\mathbf{q}_{k-1} - 5\mathbf{q}_{k-2} \\ &\quad - 3\mathbf{q}_{k-3} + 2\mathbf{q}_{k-4}) / (18\delta) + O(\delta^3). \end{aligned} \quad (20)$$

将式(20)代入式(12), 略去 δ 的高阶量, 可得 $\mathbf{q}_{k+1}$ 的近似值为

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{k+1} &= \frac{9}{11}\mathbf{q}_k - \frac{4}{11}\mathbf{q}_{k-1} + \frac{5}{11}\mathbf{q}_{k-2} + \frac{3}{11}\mathbf{q}_{k-3} \\ &\quad - \frac{2}{11}\mathbf{q}_{k-4} - \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_k, t_k) \cdot (\lambda' \delta \mathbf{e}(t_k)). \end{aligned} \quad (21)$$

设计 k 时刻的校正速度指令 $\hat{\mathbf{q}}_k$ 为

$$\hat{\mathbf{q}}_k = \frac{\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k}{\delta}, \quad k = 4, 5, 6, \dots, \quad (22)$$

其中, $\lambda' = \frac{18}{11}\lambda$ 为四阶差分方法的名义增益. 上述HDVC算法通过以下过程进行初始化: 初始关节角 $\mathbf{q}_0$ 已知, 前四步状态($\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_4$)分别按如下方式计算:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_1 = \frac{9}{11}\mathbf{q}_0 + \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_0, t_0) \cdot (-\lambda' \delta \mathbf{e}_0), \\ \mathbf{q}_2 = \frac{9}{11}\mathbf{q}_1 - \frac{4}{11}\mathbf{q}_0 + \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_1, t_1) \cdot (-\lambda' \delta \mathbf{e}_1), \\ \mathbf{q}_3 = \frac{9}{11}\mathbf{q}_2 - \frac{4}{11}\mathbf{q}_1 + \frac{5}{11}\mathbf{q}_0 + \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_2, t_2) \cdot (-\lambda' \delta \mathbf{e}_2), \\ \mathbf{q}_4 = \frac{9}{11}\mathbf{q}_3 - \frac{4}{11}\mathbf{q}_2 + \frac{5}{11}\mathbf{q}_1 + \frac{3}{11}\mathbf{q}_0 + \mathbf{J}_g^\dagger(\mathbf{q}_3, t_3) \cdot (-\lambda' \delta \mathbf{e}_3). \end{cases} \quad (23)$$

至此, 由式(21)–(23)即可得出基于高阶离散原理的四阶HDVC方法. 值得注意的是, 由于实际计算过程中会出现广义雅可比奇异问题, 因此采用阻尼最小二乘广义逆矩阵 $\mathbf{J}_{\text{DLS}}^\dagger = \mathbf{J}_g^T(\mathbf{J}_g \mathbf{J}_g^T + \mu \mathbf{E})^{-1}$ 替代广义逆矩阵进行仿真计算. 其中, μ 为阻尼因子.

4 仿真验证

4.1 联合仿真环境

空间飞行机器人系统在地面实验环境下无法完全模拟其在空间微重力环境下的运动响应. 因此利用 Coppeliassim 软件搭建与 Matlab 通讯的联合仿真环境, 模拟空间飞行机器人双臂同时对两个目标进行抓捕操作的场景对设计的运动控制律进行考核验证, 仿真场景如图2所示.

图2所示飞行机器人系统主要由基体航天器与两个七自由度机械臂组成, 其中两机械臂对称布置在基体航天器两侧, 主要物理参数如表1所示. 该飞行机器人系统在初始时刻为静止状态, 系统的初始关节角如表2所示. 两个抓取目标点的位置坐标在惯性系下的描述如表3所示, 表3中的欧拉角($\alpha \beta \gamma$)满足XYZ顺序.

4.2 仿真算例一

算例一的主要目的是验证HDVC方法在飞行机器人双臂抓捕场景中对提高误差收敛速度和末端位姿精度的有效性.

该仿真算例对一阶差分控制律(12)、四阶HDVC控制律以及五阶HDVC控制律进行比较^[18]. 为了便于在相同控制模式下进行比较, 通过式(22)将文献[18]中的位置控制律转换为速度控制律. 仿真实验中总时长设定为15 s, 选取时间步长 $\delta = 0.05$ s, 选取反馈增益 $\lambda = 4$, 对关节变量无约束条件.

在此过程中, 机械臂末端位置误差范数和姿态误差范数的变化情况如图3所示. 从图示数据分析可知,

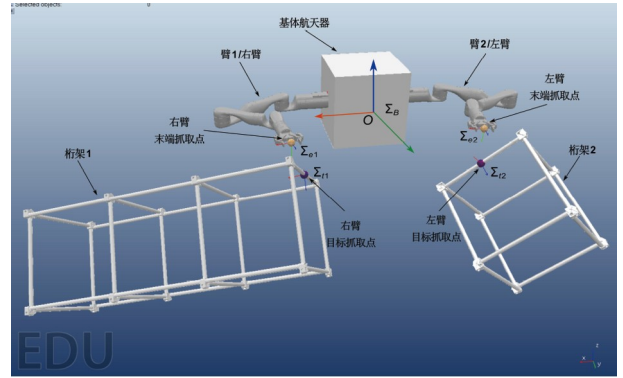


图2 (网络版彩图) 仿真场景示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the simulation scene.

五阶HDVC控制律的误差收敛速度最快. 相比之下, 一阶差分控制律的误差收敛速度最慢. 这是由于HDVC方法采用高阶差分, 有效降低了数值近似的截断误差^[18], 因而利于加快收敛速度.

三种控制律在开始后9 s内末端位姿误差基本收敛到稳态误差范围内, 然而误差并未完全归零, 而是在误差允许范围内持续进行“动态微调”. 此时, 机械臂末端的“动态微调”过程实际上是需要机械臂克服基体航天器的微小运动带来的扰动误差, 动态调整抓取末端的位姿精度. 图3截取了该“动态微调”过程中的10–12 s, 可以看出使用HDVC方法的位置和姿态误差范数都要明显小于一阶差分控制律(12)相对应的误差范数. 值得注意的是, 相比于四阶差分算法, 五阶差分算法所得的速度曲线平滑度有所降低, 在起始段存在较显著的高频波动, 如图4和5所示.

因此, 本文在综合考虑计算复杂度与速度变化平滑性后, 选择使用四阶HDVC算法而不采用五阶HDVC算法, 下文的仿真算例均采用四阶HDVC算法.

4.3 仿真算例二

算例二的主要目的是验证SNS算法对HDVC算法中出现的关节速度突增现象的抑制效果, 并通过数值对HDVC-SNS算法做整体考核验证. 空间飞行机器人执行双臂末端抓取任务的全过程如图6所示. 由图4可知关节速度可能会超出速度约束. 因此, 引入SNS算法对关节速度进行约束, 以确保关节运动在安全的约束条件下进行.

将机械臂关节速度的限制区间设置为 $[-3, 3]$ rad/s, 仿真总时长设定为15 s, 时间步长选取

表 1 算例中飞行机器人物理参数

Table 1 Physical parameters of the flying robot in the simulation example

名称	质量 (kg)	质心坐标 (m)	惯量矩阵 (kg m ²)
基体航天器	25	(0 0 0)	$\begin{pmatrix} 1.0103 & 0.0893 & 0.0 \\ 0.0893 & 2.3148 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 2.3212 \end{pmatrix}$
link1	1.377	(−0.000023 −0.010364 −0.073360)	$\begin{pmatrix} 0.004570 & 0.000001 & 0.000002 \\ 0.000001 & 0.004831 & 0.000448 \\ 0.000002 & 0.000448 & 0.001409 \end{pmatrix}$
link2	1.164	(−0.000044 −0.099580 −0.013278)	$\begin{pmatrix} 0.011088 & 0.000005 & 0 \\ 0.000005 & 0.001072 & −0.000691 \\ 0 & −0.000691 & 0.011255 \end{pmatrix}$
link3	1.164	(−0.000044 −0.006641 −0.117892)	$\begin{pmatrix} 0.010932 & 0 & −0.000007 \\ 0 & 0.011127 & 0.000606 \\ −0.000007 & 0.000606 & 0.001043 \end{pmatrix}$
link4	0.930	(−0.000018 −0.075478 −0.015006)	$\begin{pmatrix} 0.008147 & −0.000001 & 0 \\ −0.000001 & 0.000631 & −0.000500 \\ 0 & −0.000500 & 0.008316 \end{pmatrix}$
link5	0.678	(0.000001 −0.009432 −0.063883)	$\begin{pmatrix} 0.001596 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001607 & 0.000256 \\ 0 & 0.000256 & 0.000399 \end{pmatrix}$
link6	0.678	(0.000001 −0.045483 −0.009650)	$\begin{pmatrix} 0.001641 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000410 & −0.000278 \\ 0 & −0.000278 & 0.001641 \end{pmatrix}$
link7	0.500	(−0.000281 −0.011402 −0.031080)	$\begin{pmatrix} 0.000570 & 0.000002 & 0.000003 \\ 0.000002 & 0.000352 & 0.000111 \\ 0.000003 & 0.000111 & 0.000609 \end{pmatrix}$

表 2 机械臂初始关节角

Table 2 Initial joint angles of the robotic arm

臂1关节序号	关节角 (rad)	臂2关节序号	关节角 (rad)
Joint1	1.5708	Joint1	1.5708
Joint2	−0.5236	Joint2	0.5236
Joint3	0	Joint3	0
Joint4	−2.2689	Joint4	2.2689
Joint5	0	Joint5	0
Joint6	1.0472	Joint6	−1.0472
Joint7	0	Joint7	0

表 3 目标位置点坐标

Table 3 Coordinates of the target position

坐标	目标点1	目标点2
x (m)	0.8972	0.0078
y (m)	0.8573	0.8873
z (m)	2.1011	2.1011
α (rad)	−2.3558	−1.9096
β (rad)	−0.0136	−0.0592
γ (rad)	0.3681	−0.7903

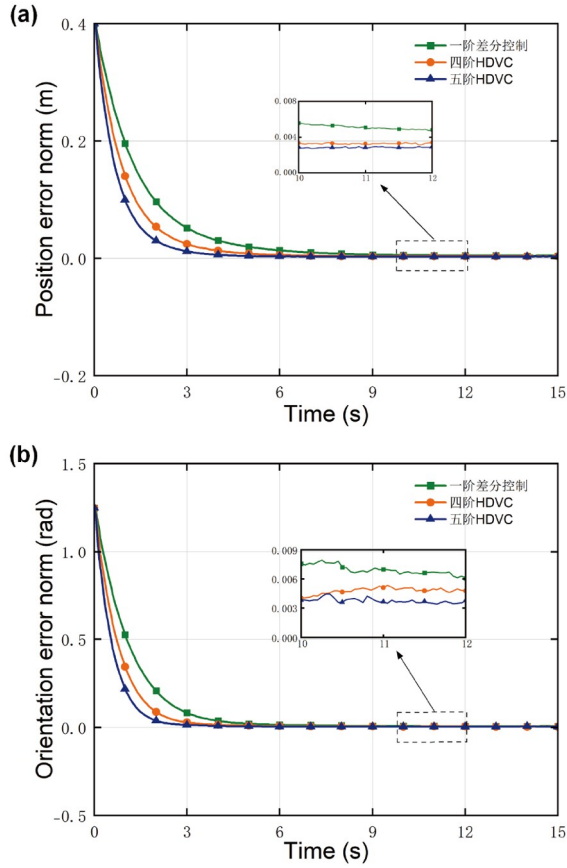


图 3 (网络版彩图)三种控制律在仿真场景下的末端位置误差范数(a)和末端姿态误差范数(b)

Figure 3 (Color online) The norms of end-effector position error (a) and end-effector orientation error (b) for three control laws in the simulation scenario.

为0.05 s, 选取反馈增益 $\lambda = 4$. 该过程中各关节速度及关节角的变化情况如图7和8所示, 可见SNS算法能够

将关节速度有效限制在指定区间内. 从图7可知关节速度从开始时刻收敛到平稳状态大概需要8 s, 而后将以微小的关节速度对机械臂末端进行“动态微调”. 在仿真末时刻, 机械臂末端与抓取目标的位姿误差的 L_2 范数分别为 $\|\mathbf{e}_{\text{pos}}\|_2 \leq 8 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\|\mathbf{e}_{\text{ori}}\|_2 \leq 9 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (保留一位有效数字).

为了评估HDVC-SNS算法在双臂抓取场景中的性能, 将HDVC-SNS算法、HDVC算法与一阶差分控制律(12)进行详细比较, 该仿真算例的末端位置误差范数和姿态误差范数结果如图9所示. 从图9可以看出在HDVC算法的基础上引入SNS算法, 尽管HDVC-SNS算法在误差收敛速度上相较于HDVC算法略显迟缓, 但两者均显著快于一阶差分控制律的表现. 图9截取了“动态微调”过程中的11–13 s, 结果显示采用四阶HDVC-SNS控制律的末端位姿误差范数最小, 而采用一阶差分控制律的末端位姿误差范数最大. 可见引入SNS算法对关节速度进行约束时可能在误差收敛速度上会略低于无约束的情况, 但对整体的收敛时间无较大影响.

5 讨论与结论

本文针对双臂飞行机器人同时抓捕两个目标的任务场景, 通过基于广义雅可比矩阵法和动量守恒原理推导出双臂飞行机器人系统运动学方程, 以此为基础设计机械臂关节速度控制律. 为抑制关节速度约束和补偿零阶保持带来的误差, 基于零空间饱和及高阶校正方法提出了一种约束运动控制方法HDVC-SNS. 以配备双七自由度机械臂的飞行机器人为例, 通过数值

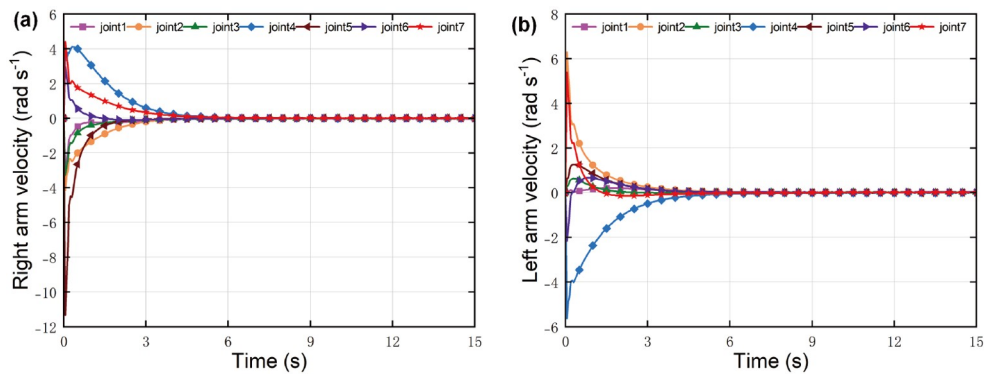


图 4 (网络版彩图)四阶HDVC控制律右臂(a)和左臂(b)关节速度变化图

Figure 4 (Color online) Joint velocity variations of the right arm (a) and the left arm (b) under the fourth-order HDVC control law.

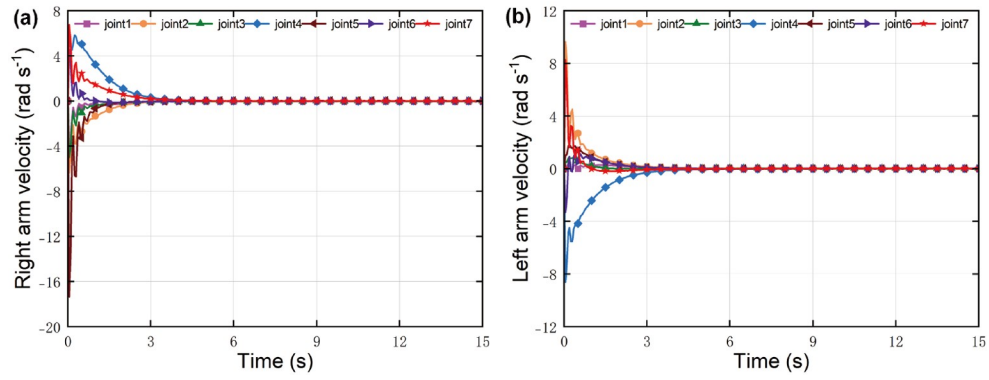


图 5 (网络版彩图)五阶HDVC控制律右臂(a)和左臂(b)关节速度变化图

Figure 5 (Color online) Joint velocity variations of the right arm (a) and the left arm (b) under the fifth-order HDVC control law.

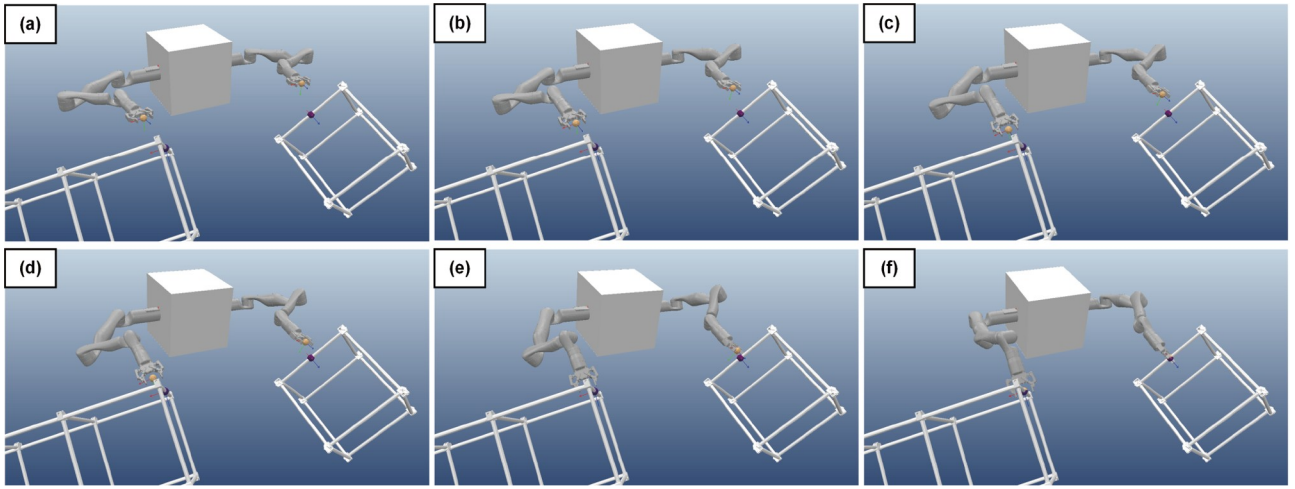


图 6 (网络版彩图) (a)–(f) 仿真场景下的双臂飞行机器人抓取过程

Figure 6 (Color online) (a)–(f) The grasping process of the dual-arm flying robot in the simulation scenario.

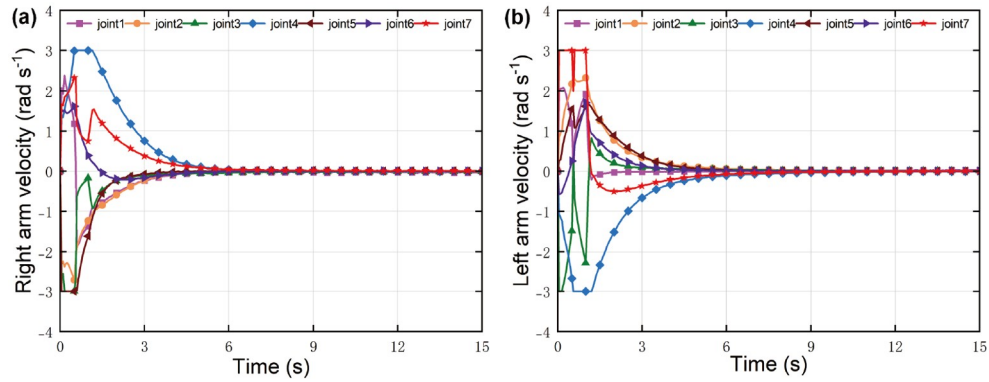


图 7 (网络版彩图) HDVC-SNS方法右臂(a)和左臂(b)关节速度变化图

Figure 7 (Color online) Joint velocity variations of the right arm (a) and the left arm (b) under the HDVC-SNS method.

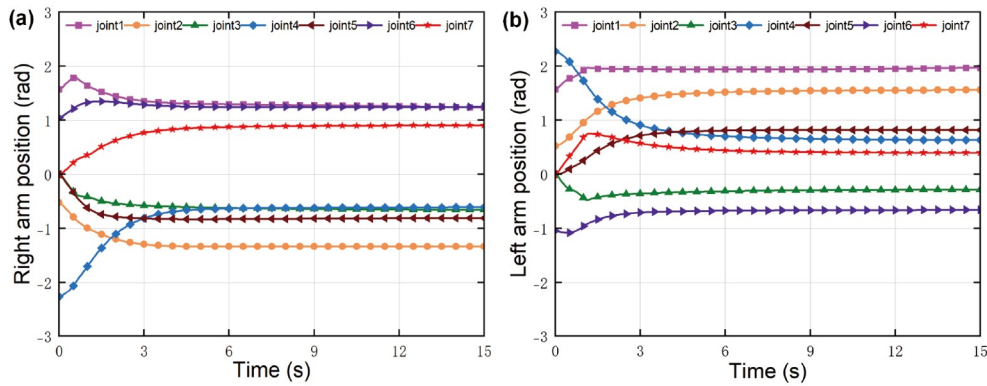


图 8 (网络版彩图) HDVC-SNS方法右臂(a)和左臂(b)关节角变化图

Figure 8 (Color online) Joint angle variations of the right arm (a) and the left arm (b) under the HDVC-SNS method.

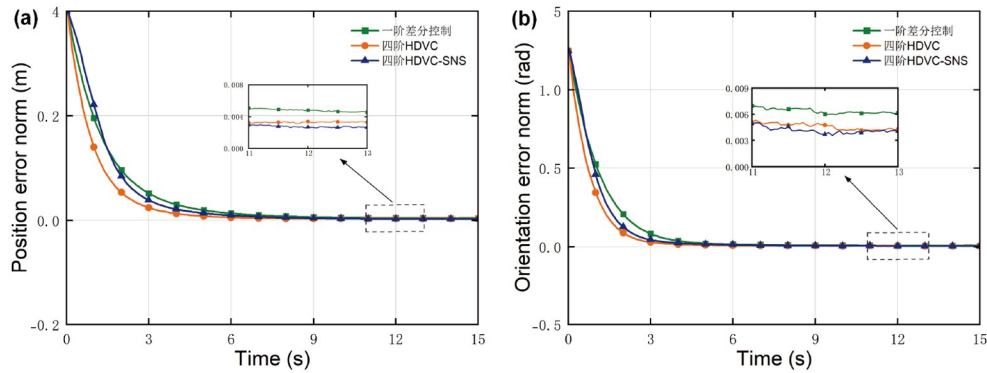


图 9 (网络版彩图)三种控制律在仿真场景下的末端位置误差范数(a)和末端姿态误差范数(b)

Figure 9 (Color online) The norms of end-effector position error (a) and end-effector orientation error (b) for three control laws in the simulation scenario.

仿真对该控制方法进行了考核验证。仿真结果表明所设计的运动控制律能够有效处理关节速度约束和补偿

离散误差, 在保证控制精度的同时将关节速度保持在允许范围内。

参考文献

- Li W J, Cheng D Y, Liu X G, et al. On-orbit service (OOS) of spacecraft: A review of engineering developments. *Prog Aerosp Sci*, 2019, 108: 32–120
- Li C, Yang J, Chang S. Review on key technologies of space intelligent grasping robot. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2022, 44: 64
- Li D, Zhong L, Zhu W, et al. A survey of space robotic technologies for on-orbit assembly. *Space Sci Technol*, 2022, 2022: 9849170
- Ma B, Jiang Z, Liu Y, et al. Advances in space robots for on-orbit servicing: A comprehensive review. *Adv Intell Syst*, 2023, 5: 2200397
- Misra G, Bai X. Task-constrained trajectory planning of free-floating space-robotic systems using convex optimization. *J Guid Control Dyn*, 2017, 40: 2857–2870
- Shi L, Xiao X, Shan M, et al. Force control of a space robot in on-orbit servicing operations. *Acta Astronaut*, 2022, 193: 469–482
- Zhang O, Yao W, Du D, et al. Trajectory optimization and tracking control of free-flying space robots for capturing non-cooperative tumbling objects. *Aerosp Sci Tech*, 2023, 143: 108718
- Han D, Liu Z, Huang P. Capture and detumble of a non-cooperative target without a specific gripping point by a dual-arm space robot. *Adv Space Res*, 2022, 69: 3770–3784

- 9 Wang X, Katupitiya J. Robust control of a dual-arm space robot to capture a non-cooperative target in 3D space. *Aerosp Sci Tech*, 2023, 141: 108538
- 10 Yang S, Wen H, Hu Y, et al. Coordinated motion control of a dual-arm space robot for assembling modular parts. *Acta Astronaut*, 2020, 177: 627–638
- 11 Kalaycioglu S, Ruiter A. Dual arm coordination of redundant space manipulators mounted on a spacecraft. *Robotica*, 2023, 41: 2489–2518
- 12 Xue Z, Zhang X, Liu J. Trajectory planning of a dual-arm space robot for target capturing with minimizing base disturbance. *Adv Space Res*, 2023, 72: 2091–2108
- 13 An Q, Zhang Y, Hu Q, et al. Time-optimal path tracking for dual-arm free-floating space manipulator system using convex programming. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2023, 59: 6670–6682
- 14 Ni S, Chen W, Ju H, et al. Coordinated trajectory planning of a dual-arm space robot with multiple avoidance constraints. *Acta Astronaut*, 2022, 195: 379–391
- 15 Flacco F, De Luca A, Khatib O. Control of redundant robots under hard joint constraints: Saturation in the null space. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31: 637–654
- 16 Fiore M D, Meli G, Ziese A, et al. A general framework for hierarchical redundancy resolution under arbitrary constraints. *IEEE Trans Robot*, 2023, 39: 2468–2487
- 17 Guo D, Xu F, Li Z, et al. Design, verification, and application of new discrete-time recurrent neural network for dynamic nonlinear equations solving. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 14: 3936–3945
- 18 Cang N, Tang H, Guo D, et al. Discrete-time zeroing neural network with quintic error mode for time-dependent nonlinear equation and its application to robot arms. *Appl Soft Comput*, 2024, 157: 111511
- 19 Umetani Y, Yoshida K. Continuous path control of space manipulators mounted on OMV. *Acta Astronaut*, 1987, 15: 981–986
- 20 Pasetto A, Vyas Y, Cocuzza S. Zero reaction torque trajectory tracking of an aerial manipulator through extended generalized Jacobian. *Appl Sci*, 2022, 12: 12254
- 21 Vafa Z, Dubowsky S. On the dynamics of manipulators in space using the virtual manipulator approach. In: Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh: IEEE, 1987. 579–585
- 22 Kobayashi M, Motoi N. Local path planning: Dynamic window approach with virtual manipulators considering dynamic obstacles. *IEEE Access*, 2022, 10: 17018–17029
- 23 Liang B, Xu Y, Bergerman M. Mapping a space manipulator to a dynamically equivalent manipulator. *J Dyn Syst Meas Control*, 1998, 120: 1–7
- 24 Valverde A, Tsiotras P. Dual quaternion framework for modeling of spacecraft-mounted multibody robotic systems. *Front Robot AI*, 2018, 5: 128
- 25 Liu Y, Teng L, Jin Z. Adaptive control of mini space robot based on linear separation of inertial parameters. *Aerospace*, 2023, 10: 679
- 26 Liu Y, Yi W, Feng Z, et al. Design and motion planning of a 7-DOF assembly robot with heavy load in spacecraft module. *Robot Comput-Integr Manuf*, 2024, 86: 102645
- 27 Santini P, Gasbarri P. Dynamics of multibody systems in space environment; Lagrangian vs. Eulerian approach. *Acta Astronaut*, 2004, 54: 1–24
- 28 Zhong Y W, Wang L M. A method to establish the dynamic models of multibody system based on Kane's equations. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control. Paris: Atlantis Press, 2015. 21–26
- 29 Phillips J R, Amirouche F. A momentum form of Kane's equations for scleronomic systems. *Math Comput Model Dyn Syst*, 2018, 24: 143–169
- 30 Madonna D P, Pontani M, Gasbarri P. Berthing proximity maneuvers and trajectory planning of a space manipulator via Kane's formulation. *Acta Astronaut*, 2024, 222: 674–691
- 31 Peng J, Xu W, Hu Z, et al. Modeling and analysis of the multiple dynamic coupling effects of a dual-arm space robotic system. *Robotica*, 2020, 38: 2060–2079
- 32 Sugihara T. Solvability-unconcerned inverse kinematics by the levenberg-marquardt method. *IEEE Trans Robot*, 2011, 27: 984–991
- 33 Flacco F, Luca A D, Khatib O. Motion control of redundant robots under joint constraints: Saturation in the null space. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul: IEEE, 2012. 285–292

Dual-arm flying robot control based on saturation in null space and high-order correction

HUANG HongJie, WEN Hao^{*} & LIAO Can

*State Key Laboratory of Mechanics and Control of Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China*

**Corresponding author (email: wenhao@nuaa.edu.cn)*

Research on the on-orbit operations of flying robots predominantly utilizes single-arm or dual-arm for grasping a single object, thereby neglecting the efficiency advantages inherent in dual-arm operations. This study investigates the scenario where a dual-arm flying robot simultaneously grasps two objects during on-orbit assembly tasks and explores constrained motion control methodologies for such systems. First, the kinematic equations of the dual-arm flying robot in a free-floating state are established based on the generalized Jacobian matrix method and the momentum conservation equation. Subsequently, leveraging the coupling dynamics between the manipulators and the base, a high-precision constrained motion control algorithm, termed HDVC-SNS, is proposed based on the high-order discretization velocity correction (HDVC) method and the saturation in the null space (SNS) method. This strategy substantially mitigates discretization errors of the control law and ensures the smooth operation of the robotic system by limiting joint velocities. Finally, the HDVC-SNS algorithm is verified by multiple sets of numerical simulations.

dual-arm flying robot, dual-target capturing, high-order correction, saturation in null space

PACS: 45.20.df, 45.40.-f, 45.40.Ln, 45.50.Jf, 45.80.+r

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0286](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0286)