

空间机械臂抓取目标动力学与寻的制导控制

韩艳铎

(南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

摘 要: 针对安装有两连杆机械臂的航天器对地球圆轨道上的空间目标已形成自由绕飞(即满足齐次 C-W 方程)的情形, 研究通过机械臂抓取该目标的系统动力学建模与制导控制问题。在目标固连旋转参考系下, 运用非惯性系下的拉格朗日分析力学, 建立了两连杆机械臂系统动力学方程。忽略惯性耦合影响, 对模型进行了合理简化, 在此基础上设计了机械臂末端执行器即机械手抓取目标的寻的制导控制规律。然后代入原始复杂模型, 进行数值仿真校验。结果表明, 在机械臂载体自由绕飞空间目标的条件下, 机械手能够准确地抓住目标。

关键词: 空间机械臂; 空间目标; 非惯性系; 拉格朗日分析力学; 寻的制导

中图分类号: TP241, V448 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2016)09-1098-09

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.09.009

Dynamics and Homing Guidance for Space Manipulator Capturing On-Orbit Target

HAN Yan-hua

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The system dynamics modeling and homing guidance design are studied for the space manipulator whose carrier is flying freely governed by the homogeneous C-W equations around a space target. Under the target fixed rotating coordinate system, the non-inertial reference system based Lagrange analytical mechanics is used to derive the dynamics equations of the two-link robotic manipulator during capturing the space target. Then the homing guidance law of the end-effector of the manipulator is designed using the properly simplified dynamics model. Finally, numerical simulation for the closed loop dynamics is conducted by substituting the guidance law into the original complex dynamics model. The correctness of the model derived and the effectiveness of the guidance law designed are verified by the simulation results.

Key words: Space manipulator; Space target; Non-inertial system; Lagrange analytical mechanics; Homing guidance

0 引 言

空间机械臂在空间目标操作中扮演着重要角色^[1-2]。由于空间机械臂的载体是在轨飞行的航天器, 导致其抓取目标过程的动力学与控制问题比地面要复杂, 比如说, 需要考虑机械臂运动对其载体的耦合影响^[3-5]。文献[6-7]针对具有冗余自由度的空间机械臂抓取目标问题, 研究了机械臂轨迹优化问题, 其中就包括对载体的姿态干扰的考虑。文献[8-9]均设计了机械臂抓取目标的闭环控制律

问题。其中文献[8]考虑了机械臂关节柔性, 并引入了人工势的概念和控制方法, 能够保证闭环系统稳定性。文献[9]则采用了线性二次型最优控制。文献[10]考虑了机械臂末端效应器(下文统称机械手)与目标的接触动力学等因素, 建立了从捕获到握紧全过程的力学模型, 并设计了相应的控制规律。文献[11]从工程实际出发, 考虑到空间机械臂在地面重力环境装调好, 进入空间微重力环境后, 其力学模型将发生较大改变, 在地面装调阶段设计好的控制器可能失效。作者提出一种基于神经网络的自适应

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-04-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NS2016082)

应控制器,在地面重力环境和空间微重力环境下均具备良好的控制性能。文献[12]则在此基础上进一步考虑了机械臂关节柔性的影响,并引入奇异摄动方法,将快慢变量分开,然后仍基于神经网络控制器,自主适应机械臂进入空间后力学模型的变化。文献[13]针对刚柔耦合空间机械臂,采用近年比较流行的绝对节点坐标法建立了系统精确模型,然后设计了机械臂 PD 控制器。

目前,几乎所有关于空间机械臂抓取目标过程的动力学建模均基于惯性系,即假设空间操作机器人与空间目标自由漂浮于惯性空间,没有考虑它们的相对轨道动力学对系统动力学模型的影响。另外,机械臂控制器均是采用“规划+跟踪”的模式,即首先设计一条理想轨迹,然后再设计指令跟踪控制器来消除跟踪误差。本文尝试考虑空间机械臂载体与空间目标间相对轨道动力学的影响,在与目标固连的随动旋转参考系(非惯性系)下运用拉格朗日分析力学建立机械臂抓取目标过程的力学模型,并设计机械手寻的制导控制规律来完成对目标的“软接触”捕获。

1 动力学建模

假设空间目标在绕地圆轨道上运动,安装有机械臂的空间操作航天器(下文统称为“载体”)对其已形成自由环绕飞行,如图1所示。图中,目标固连坐标系 oxy 的原点表示空间目标, ox 轴始终指向其运动方向。 oy 轴在地心与空间目标连线的延长线上。为便于后文严格地表述矢量,定义 ox 和 oy 轴上的单位矢量分别为 e_1 和 e_2 ,其构成的单位正交基矢量组用 $E \triangleq (e_1, e_2)$ 表示。图中,椭圆表示载体质心环绕空间目标的相对轨迹。为简单起见,我们假设此椭圆与空间目标绕地轨道共面。由近距离航天器相对轨道动力学知,图中载体绕飞空间目标的相对运动应为逆时针方向。机械臂是两连杆的(编号分别为 I 和 II)。连杆 I 和 II 的质量分别为 m_1 和 m_2 ,长度分别为 l_1 和 l_2 ,并假设均为均质杆。在连杆 I 和载体的铰接处(铰接点 I),以及连杆 II 和连杆 I 的铰接处(铰接点 II)安装有驱动电机,用来控制两连杆的运动,输出力矩分别为 M_1 和 M_2 。两连杆的相对转角分别为 θ_1 和 θ_2 。铰接点 I 到载体质心的距离为 d 。本文假设载体的质量和转动惯量远远大于机械臂,即忽略机械臂运动对载体的影响。

并且假定,载体的姿控系统保证其装有机械臂的一面始终对准空间目标。

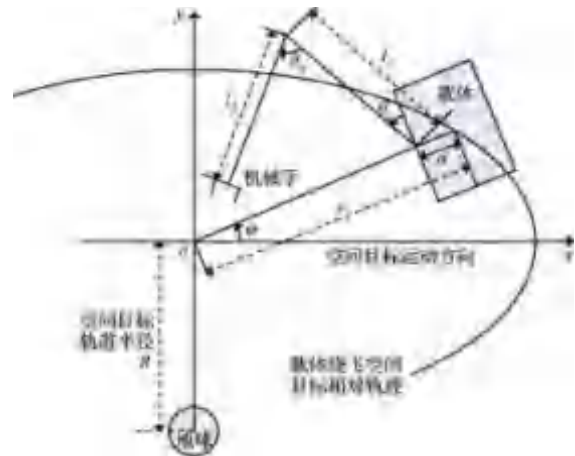


图1 空间机械臂抓取绕地圆轨道上的目标示意图

Fig. 1 Illustration of the space manipulator capturing the object in the circular earth orbit

图1中坐标系 oxy 与空间目标固连,绕地心做顺时针匀速圆周运动,旋转角速率为 n ,因此是非惯性系。在该参考系下观察,载体相对于空间目标作椭圆自由绕飞,根据 C-W 方程,其运动方程如下

$$\begin{cases} \ddot{x} = -2n\dot{y} \\ \ddot{y} = 3n^2y + 2n\dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = -2ny_0 \cos nt - nx_0 \sin nt \\ \dot{y} = \frac{n}{2}x_0 \cos nt - ny_0 \sin nt \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = x_0 \cos nt - 2y_0 \sin nt \\ y = y_0 \cos nt + \frac{x_0}{2} \sin nt \end{cases} \quad (3)$$

式中: x, y 表示载体的质心相对于空间目标的位置坐标; x_0, y_0 是其初值(即 $t = 0$ 时的值)。

设载体质心相对于空间目标的距离为 r ,相位角为 φ ,容易得到如下关系式

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \arctan \frac{y}{x}, \text{ 仅当在第一象限} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{r} = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \frac{-\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi}{r} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \ddot{r} = r\dot{\varphi}^2 + \ddot{x} \cos \varphi + \ddot{y} \sin \varphi \\ \ddot{\varphi} = \frac{-2\dot{r}\dot{\varphi} - \ddot{x} \sin \varphi + \ddot{y} \cos \varphi}{r} \end{cases} \quad (6)$$

众所周知,参考系 oxy 绕地心匀速圆周运动所等效的离心惯性力与地球对该参考系内各对象的万有引力相平衡,所以建模时无须考虑这两个力,但需要考虑该参考系的自转效应。

连杆 I 上任意一点(设其相对铰接点 I 的距离为 s_1) 相对于参考系 oxy 的原点 o 的位矢为

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{E} \begin{bmatrix} x - d\cos\varphi - s_1\sin(\varphi + \theta_1) \\ y - d\sin\varphi + s_1\cos(\varphi + \theta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:形如 $\mathbf{E} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 的矢量的展开式为 $\mathbf{E} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (e_1, e_2) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = e_1x + e_2y$ 表示该矢量在单位矢量 e_1 和 e_2 上的投影分量分别为 x 和 y 。后文类同,不再解释。

连杆 II 上任意一点(设其相对铰接点 II 的距离为 s_2) 相对于参考系 oxy 的原点 o 的位矢为

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{E} \begin{bmatrix} x - d\cos\varphi - l_1\sin(\varphi + \theta_1) + s_2\sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ y - d\sin\varphi + l_1\cos(\varphi + \theta_1) - s_2\cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

在坐标系 oxy 下,计算 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 对时间的相对导数(“相对”的意思即不计及基组 \mathbf{E} 对时间的导数):

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{x} + d\dot{\varphi}\sin\varphi - s_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\cos(\varphi + \theta_1) \\ \dot{y} - d\dot{\varphi}\cos\varphi - s_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\sin(\varphi + \theta_1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_2 = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{x} + d\dot{\varphi}\sin\varphi - l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\cos(\varphi + \theta_1) + s_2(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)\cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ \dot{y} - d\dot{\varphi}\cos\varphi - l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\sin(\varphi + \theta_1) + s_2(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)\sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

连杆 I 和 II 的质心位矢分别为

$$\mathbf{r}_{1c} = \mathbf{r}_1|_{s_1=\frac{l_1}{2}} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} x - d\cos\varphi - \frac{l_1}{2}\sin(\varphi + \theta_1) \\ y - d\sin\varphi + \frac{l_1}{2}\cos(\varphi + \theta_1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_{2c} = \mathbf{r}_2|_{s_2=\frac{l_2}{2}} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} x - d\cos\varphi - l_1\sin(\varphi + \theta_1) + \frac{l_2}{2}\sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ y - d\sin\varphi + l_1\cos(\varphi + \theta_1) - \frac{l_2}{2}\cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

以上两式对时间求一阶相对导数,得两连杆质心的相对速矢分别为

$$\dot{\mathbf{r}}_{1c} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{x} + d\dot{\varphi}\sin\varphi - \frac{l_1}{2}(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\cos(\varphi + \theta_1) \\ \dot{y} - d\dot{\varphi}\cos\varphi - \frac{l_1}{2}(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\sin(\varphi + \theta_1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{2c} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{x} + d\dot{\varphi}\sin\varphi - l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\cos(\varphi + \theta_1) + \frac{l_2}{2}(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)\cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ \dot{y} - d\dot{\varphi}\cos\varphi - l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1)\sin(\varphi + \theta_1) + \frac{l_2}{2}(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)\sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

连杆 I 和 II 的相对动能分别为

$$T_1 = \frac{1}{2}J_{1c}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{\mathbf{r}}_{1c} \cdot \dot{\mathbf{r}}_{1c} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{1}{2}J_{2c}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{\mathbf{r}}_{2c} \cdot \dot{\mathbf{r}}_{2c} \quad (16)$$

式中: J_{1c} 和 J_{2c} 分别是是连杆 I 和 II 相对于自身质心的转动惯量。

机械臂总的相对动能

$$T = T_1 + T_2 \quad (17)$$

由于参考系 oxy 自转而使连杆 I 和 II 具有的离心势能分别为

$$V_1 = -\frac{1}{2}J_1n^2 \quad (18)$$

$$V_2 = -\frac{1}{2}J_2n^2 \quad (19)$$

式中:

$$J_1 = J_{1c} + m_1\mathbf{r}_{1c} \cdot \mathbf{r}_{1c} \quad (20)$$

$$J_2 = J_{2c} + m_2\mathbf{r}_{2c} \cdot \mathbf{r}_{2c} \quad (21)$$

分别是连杆 I 和 II 相对于参考系 oxy 的原点 o

的转动惯量。

系统总的离心力势能

$$V = V_1 + V_2 \quad (22)$$

系统的拉格朗日函数

$$L = T - V \quad (23)$$

拉格朗日动力学方程为

$$\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial}{\partial q_j} \right) L = Q_j \quad (j = 1, 2) \quad (24)$$

式中: 广义坐标为

$$\begin{cases} q_1 \triangleq \theta_1 \\ q_2 \triangleq \theta_2 \end{cases} \quad (25)$$

广义力为

$$\begin{cases} Q_1 = M_1 + Q_1^c \\ Q_2 = M_2 + Q_2^c \end{cases} \quad (26)$$

式中: Q_1^c 和 Q_2^c 分别是连杆 I 和 II 受到的科氏力关于各自铰接点的矩:

$$\begin{cases} Q_1^c = \int \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_1} \cdot d\mathbf{F}_1^c + \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \theta_1} \cdot d\mathbf{F}_2^c \\ Q_2^c = \int \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_2} \cdot d\mathbf{F}_1^c + \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \theta_2} \cdot d\mathbf{F}_2^c \end{cases} \quad (27)$$

式中:

$$\begin{cases} d\mathbf{F}_1^c = -2\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{r}}_1 dm_1 = -2\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{r}}_1 \frac{m_1}{l_1} ds_1 \\ d\mathbf{F}_2^c = -2\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{r}}_2 dm_2 = -2\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{r}}_2 \frac{m_2}{l_2} ds_2 \end{cases} \quad (28)$$

分别是连杆 I 和 II 上的微元(相应的长度分别为 ds_1 和 ds_2) 所受到的科氏力。 \mathbf{n} 是坐标系 oxy 自转角速度矢量。根据前文的阐述,其大小为 n ,方向垂直纸面向里。

将式(9)~(10)代入式(28),并结合 \mathbf{n} 的定义,容易算出

$$d\mathbf{F}_1^c = \mathbf{E} \begin{bmatrix} [-\dot{y} + d\dot{\varphi} \cos \varphi + s_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1) \sin(\varphi + \theta_1)] 2n \frac{m_1}{l_1} ds_1 \\ [\dot{x} + d\dot{\varphi} \sin \varphi - s_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1) \cos(\varphi + \theta_1)] 2n \frac{m_1}{l_1} ds_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$d\mathbf{F}_2^c =$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} [-\dot{y} + d\dot{\varphi} \cos \varphi + l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1) \sin(\varphi + \theta_1) - s_2(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] 2n \frac{m_2}{l_2} ds_2 \\ [\dot{x} + d\dot{\varphi} \sin \varphi - l_1(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1) \cos(\varphi + \theta_1) + s_2(\dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] 2n \frac{m_2}{l_2} ds_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

另外,由图1和式(7-8)容易算出

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_1} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} -s_1 \cos(\varphi + \theta_1) \\ -s_1 \sin(\varphi + \theta_1) \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_2} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \theta_1} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} -l_1 \cos(\varphi + \theta_1) + s_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ -l_1 \sin(\varphi + \theta_1) + s_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial \theta_2} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} -s_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ -s_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (31)$$

将式(11)~(23)、(25)~(27)、(29)~(31)代入式(24),得两连杆机械臂系统动力学方程

$$\mathbf{A} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C} = \mathbf{M} \quad (32)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\theta} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix}$$

具体元素如下:

$$\begin{cases} a_{11} = (J_{1c} + J_{2c}) + \frac{1}{4} [(m_1 + 4m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2] - m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ a_{12} = a_{21} = -J_{2c} - \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ a_{22} = J_{2c} + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 \\ b_{11} = b_{22} = 0 \\ b_{12} = -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 [2(n - \dot{\varphi}) - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2] \sin \theta_2 \\ b_{21} = \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 [(n - \dot{\varphi}) - \dot{\theta}_1] \sin \theta_2 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{4} \{ (m_1 + 4m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 - 4m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2d [(m_1 + 2m_2) l_1 \sin \theta_1 - m_2 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)] \ddot{\varphi} + \\ &\quad \frac{1}{2} d [m_2 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - (m_1 + 2m_2) l_1 \cos \theta_1] (n^2 + \dot{\varphi}^2) + d [(m_1 + 2m_2) l_1 \cos \theta_1 - m_2 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \\ &\quad n \dot{\varphi} + \frac{1}{2} [(m_1 + 2m_2) l_1 \cos(\varphi + \theta_1) - m_2 l_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] n^2 x + \frac{1}{2} [(m_1 + 2m_2) l_1 \sin(\varphi + \theta_1) - \\ &\quad m_2 l_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] n^2 y + [(m_1 + 2m_2) l_1 \sin(\varphi + \theta_1) - m_2 l_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] n \dot{x} - \\ &\quad [(m_1 + 2m_2) l_1 \cos(\varphi + \theta_1) - m_2 l_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] n \dot{y} - \frac{1}{2} [(m_1 + 2m_2) l_1 \cos(\varphi + \theta_1) - \\ &\quad m_2 l_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] \ddot{x} - \frac{1}{2} [(m_1 + 2m_2) l_1 \sin(\varphi + \theta_1) - m_2 l_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] \ddot{y} \\ c_2 &= \frac{1}{2} m_2 l_2 [d \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \cos \theta_2 - l_2] \ddot{\varphi} - \frac{1}{2} m_2 l_2 [d \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin \theta_2] (n^2 + \dot{\varphi}^2) + \\ &\quad m_2 l_2 [d \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin \theta_2] n \dot{\varphi} + \frac{1}{2} m_2 l_2 n^2 [x \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) + y \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] + \\ &\quad m_2 l_2 n [\dot{x} \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) - \dot{y} \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] - \frac{1}{2} m_2 l_2 [\ddot{x} \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) + \ddot{y} \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2)] \end{aligned} \right.$$

2 机械手寻的制导控制律设计

设机械手在坐标系 oxy 下的位置坐标为 (x_e, y_e) 。机械手与目标间的距离为 ρ 。相对于目标的视线角(即从目标到机械手的连线与参考线 ox 轴的夹角)为 α 。则显然有

$$\begin{cases} x_e = \rho \cos \alpha \\ y_e = \rho \sin \alpha \end{cases} \quad (33)$$

本文寻的制导律的设计目标是实现机械手与目标间的距离和径向速度趋于零,同时视线角也趋于稳定,即视线角速率趋零。用公式表示就是 $\rho \rightarrow 0, \dot{\rho} \rightarrow 0, \dot{\alpha} \rightarrow 0$ 。为此设计 ρ 和 $\dot{\alpha}$ 的动态特性如下

$$\begin{cases} \ddot{\rho} + k_1 \dot{\rho} + k_0 \rho = 0 \\ \ddot{\alpha} + \lambda \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

式中: k_0, k_1, λ 均为大于零的常数。特别是为了保证 ρ 单调减小而不发生振荡,选择 $k_0 = \frac{1}{4} k_1^2$, 则式

(34) 的第一式表示临界阻尼二阶动态特性。

将式(33)对时间求二阶导得

$$\begin{cases} \ddot{x}_e = \ddot{\rho} \cos \alpha - \ddot{\alpha} \sin \alpha - 2\dot{\rho} \dot{\alpha} \sin \alpha - \rho \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \\ \ddot{y}_e = \ddot{\rho} \sin \alpha + \ddot{\alpha} \cos \alpha + 2\dot{\rho} \dot{\alpha} \cos \alpha - \rho \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \end{cases} \quad (35)$$

机械手的位置坐标 (x_e, y_e) 就是式(8)中矢量 r_2 的两分量当 $s_2 = l_2$ 时的值,即

$$\begin{cases} x_e = x - d \cos \varphi - l_1 \sin(\varphi + \theta_1) + \\ \quad l_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ y_e = y - d \sin \varphi + l_1 \cos(\varphi + \theta_1) - \\ \quad l_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (36)$$

式(36)对时间求二阶导并忽略掉其中的小量

$\ddot{\varphi}, \ddot{\alpha}, \ddot{x}, \ddot{y}$ 得

$$\begin{cases} \ddot{x}_e = l_1 \ddot{\theta}_1^2 \sin(\varphi + \theta_1) - \\ \quad l_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) + \\ \quad [l_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) - l_1 \cos(\varphi + \theta_1)] \ddot{\theta}_1 - \\ \quad l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ \ddot{y}_e = -l_1 \ddot{\theta}_1^2 \cos(\varphi + \theta_1) + \\ \quad l_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) + \\ \quad [l_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) - l_1 \sin(\varphi + \theta_1)] \ddot{\theta}_1 - \\ \quad l_2 \ddot{\theta}_2 \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (37)$$

为设计基于寻的制导的关节驱动力矩,尚须用到两连杆机械臂系统动力学方程。不过,在设计(而非仿真)阶段可以忽略系统内的诸多耦合干扰因素,使用简化的动力学模型如下

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_1 = \frac{M_1}{J_1'} \\ \ddot{\theta}_2 = \frac{M_2}{J_2'} \end{cases} \quad (38)$$

式中: J_1' 表示连杆 I 和 II 关于铰接点 I 的转动惯量之和; J_2' 表示连杆 II 关于铰接点 II 的转动惯量。其计算公式如下

$$\begin{cases} J_1' = J_{1c} + \frac{1}{4}m_1l_1^2 + J_{2c} + m_2\mathbf{r}_{2c}' \cdot \mathbf{r}_{2c}' \\ J_2' = J_{2c} + \frac{1}{4}m_2l_2^2 \end{cases} \quad (39)$$

式中: \mathbf{r}_{2c}' 表示连杆 II 的质心相对于铰接点 I 的位置矢量。由图 1 经简单的几何分析不难写出

$$\mathbf{r}_{2c}' = \mathbf{E} \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\varphi + \theta_1) + \frac{l_2}{2} \sin(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \\ l_1 \cos(\varphi + \theta_1) - \frac{l_2}{2} \cos(\varphi + \theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (40)$$

式(34)~(35)、(37)~(40)联立,解得机械臂关节驱动控制律:

$$\begin{cases} M_1 = [4(J_{1c} + J_{2c}) + (m_1 + 4m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 - 4m_2l_1l_2\cos\theta_2]/(4l_1\sin\theta_2) \times \\ \quad [\rho\dot{\alpha}^2\sin(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2) + \dot{\alpha}(\lambda\rho - 2\dot{\rho})\cos(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2) + \\ \quad (l_2 - l_1\cos\theta_2)\dot{\theta}_1^2 + l_2\dot{\theta}_2^2 - 2l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + (k_0\rho + k_1\dot{\rho})\sin(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2)] \\ M_2 = \frac{4J_{2c} + m_2l_2^2}{4l_1l_2\sin\theta_2} \{ \rho\dot{\alpha}^2[l_2\sin(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2) - l_1\sin(\alpha - \varphi - \theta_1)] - \\ \quad \dot{\alpha}(\lambda\rho - 2\dot{\rho})[l_1\cos(\alpha - \varphi - \theta_1) - l_2\cos(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2)] + \\ \quad (l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos\theta_2)\dot{\theta}_1^2 + (l_2^2 - l_1l_2\cos\theta_2)\dot{\theta}_2^2 + 2l_2(l_1\cos\theta_2 - l_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \\ \quad (k_1\dot{\rho} + k_0\rho)[l_2\sin(\alpha - \varphi - \theta_1 + \theta_2) - l_1\sin(\alpha - \varphi - \theta_1)] \} \end{cases} \quad (41)$$

式中: θ_1 , $\dot{\theta}_1$ 和 θ_2 , $\dot{\theta}_2$ 可以分别由安装在铰接点 I 和 II 上的传感器直接测得。 ρ , $\dot{\rho}$ 和 α , $\dot{\alpha}$ 可以由安装在机械手部位的基于相机的机器视觉系统测得^[14-16]。

注意到式(41)当 $\theta_2 = 0$ 时奇异。为避免奇异,两连杆机械臂不能从完全折叠状态(即 $\theta_1 = \theta_2 = 0$)启动。在开启该制导律前,连杆 II 相对于连杆 I 应该保持一个很小但非零的折叠状态。制导律一旦启动, θ_2 会逐渐增大(但不可能达到 180° , 因为两连杆总长度往往大于载体相对于目标的距离)就不会发生奇异性了。

以上推导寻的制导律时使用了 \ddot{x}_e , \ddot{y}_e 的近似简化表达式,以及两连杆机械臂系统动力学方程的近似简化表达式,所以尚须将制导律代入原来的未经简化的复杂模型进行数值仿真来检验其有效性。仿真时,在机械臂运动环节须调用精确的动力学方程,即式(32)。

3 仿真校验

数值仿真入口参数如表 1 所示。

表 1 仿真入口参数

Table 1 Inlet parameters for numerical simulation

仿真入口参数	数值
m_1/kg	2
m_2/kg	2
l_1/m	6
l_2/m	6
$J_{1c}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	6
$J_{2c}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	6
d/m	2
$n/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0012
x_0/m	10
y_0/m	2
k_1/s^{-1}	0.1
k_0/s^{-2}	0.0025
λ/s^{-1}	0.1

设定仿真结束条件为机械手进入空间目标 5 cm 范围内,即认为此时机械手已具备抓握目标的条件。仿真结果如图 2~7 所示。

图 2 是载体相对于目标的轨迹。图 3 中粗实线

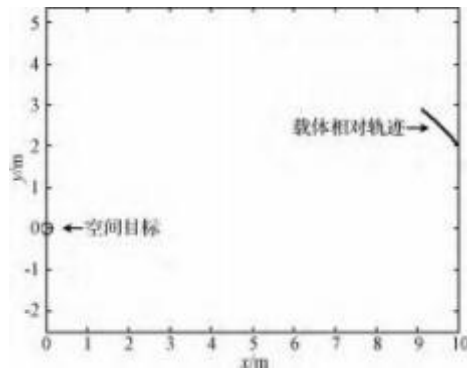


图 2 载体质心相对于空间目标的轨迹

Fig. 2 Relative trajectory of the center of mass of the carrier to the space target

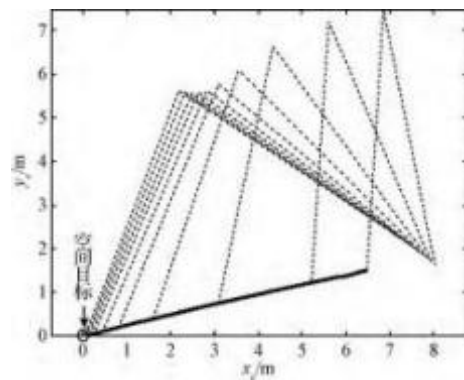


图 3 机械手相对于空间目标的轨迹及相应的机械臂构型变化过程

Fig. 3 Relative trajectory of the end-effector to the space target and the corresponding configuration of manipulator

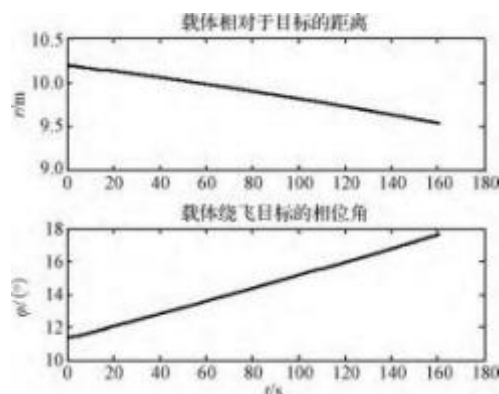


图 4 载体质心相对于空间目标的距离及绕飞相位角

Fig. 4 Distance and phase angle of the center of mass of the carrier relative to the space target

表示机械手运动轨迹,虚线表示相应的机械臂构型变化过程。图 2 和 3 中坐标原点处的小圆圈表示空间目标。图 4 表明,在相对轨道动力学支配下,机械臂抓取目标过程中,载体相对于目标的距离减小了

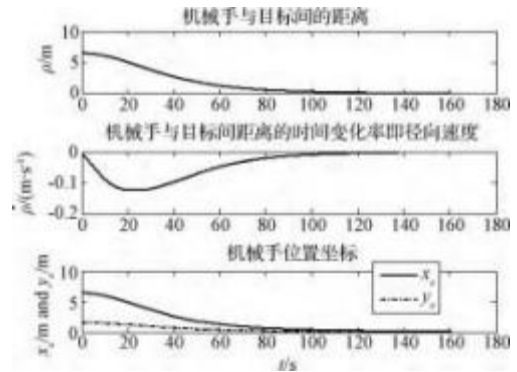


图 5 机械手的运动

Fig. 5 Motion of the end-effector of the space manipulator

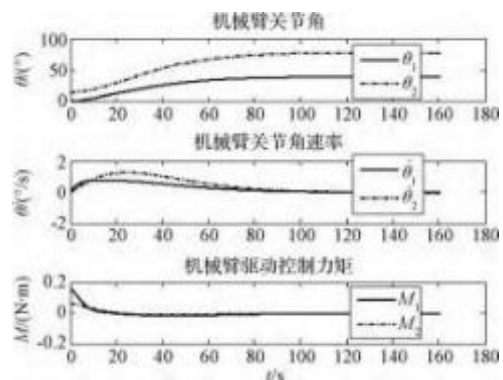


图 6 两连杆机械臂运动与控制

Fig. 6 Motion and control of the two-link space manipulator

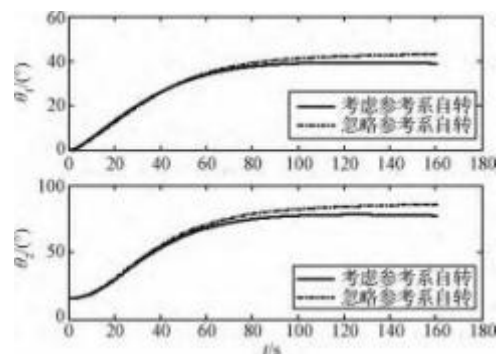
图 7 考虑和忽略参考系自转时关节角 θ_1 和 θ_2 仿真结果对比

Fig. 7 Simulation results of θ_1 and θ_2 with or without the rotation of reference system

约 0.67 m, 相位角增加了约 6.3° 。

图 5 和 6 显示,机械手与目标间的距离逐渐减小到我们预先设定的门限值 5 cm,径向相对速度也减小到趋于零(事实上仿真结束时仅有 $0.15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。避免抓取瞬间与目标的碰撞。寻的制导过程总共耗时约 160 s。机械臂关节控制力矩幅值不到

0.2 N·m, 且控制过程平稳。

另外, 对于考虑参考系 oxy 自转和忽略其自转两种情况下的闭环动态过程进行了仿真对比。仿真显示, 抓取过程耗时略有差别(约 0.53 s)。机械臂关节角的对比曲线如图 7 所示。可见考虑参考系自转相比于忽略其自转时的 θ_1 值要小约 5° , θ_2 的值则要小约 10° 。仿真结果也表明, 机械手相对于空间目标的轨迹受参考系自转影响较小, 其曲线比较接近(限于篇幅此处不再画出), 主要是由于本文机械臂控制采用寻的制导的闭环形式, 对外部干扰的鲁棒性较强。从几何上解释, 因为两个关节角的参考正方向是相反的(由图 1 可见, θ_1 以逆时针为正, 而 θ_2 以顺时针为正), 且 θ_1 表示机械臂根部转角, 而 θ_2 表示机械臂中间关节转角, 前者对机械手位置影响更大, 所以 θ_1 的减小量对机械手轨迹的影响正好可被两倍于其的 θ_2 的增量抵消。如果采用开环控制(比如事先规划好机械手相对轨迹然后跟踪此轨迹), 则参考系自转对机械手相对于空间目标的运动轨迹的影响将不容忽视, 严重时可能导致抓取任务失败。限于本文主题和篇幅, 开环控制下参考系自转对系统动力学特性和控制效果的影响就不详述了。

4 结束语

本文基于非惯性系下的拉格朗日分析力学, 建立了空间操作航天器对目标形成自由绕飞的情形下, 其两连杆机械臂抓取目标过程的动力学方程。然后采用寻的制导方法, 设计了机械臂关节驱动控制力矩闭环控制律。数值仿真结果证实了所设计的制导控制律的有效性。

由于该制导控制律的强鲁棒性, 参考系自转角速度 n 对系统闭环动态特性的影响不大, 但由于 n 与载体绕飞空间目标的相位角速度 $\dot{\varphi}$ 为同一量级(严格地说 n 等于 $\dot{\varphi}$ 的平均值), 所以考虑载体绕飞空间目标情形下机械臂的动力学建模问题, 意味着 $\dot{\varphi}$ 已被计及, 就没有理由忽略 n 及其效应。事实上, 在机械臂开环控制的情形, 或者需要机械臂快速高精度操作的时候, 机械臂运动速度与参考系自转角速度共同诱发的科氏力也将较大, 则参考系自转角速度效更不容忽略。

本文在建立系统动力学模型时, 作了一些假设, 比如载体质量和转动惯量远大于机械臂, 从而忽略

了机械臂运动对载体的影响。另外, 仅研究了载体绕飞目标的相对轨迹与目标绕地轨道共面的情形。需要进一步深入研究的问题包括: 建立机械臂与载体相互耦合的复杂系统动力模型, 以及载体对空间目标的绕飞轨迹与目标绕地轨道非共面情形下的系统动力学与控制问题等等。

参 考 文 献

- [1] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 435–443. [Liu Hong, Jiang Zai-nan, Liu Ye-chao. Review of space manipulator technology[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 435–443.]
- [2] Li D M, Rao W, Hu C W, et al. Overview of the chinese space station manipulator [C]. AIAA Space Conference and Exposition, California, USA, August 31–September 2, 2015.
- [3] Miguel A T, Steven D. Minimizing spacecraft attitude disturbances in space manipulator systems[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992, 15(4): 1010–1017.
- [4] Kazuya Y, Kenichi H, Dragomir N N, et al. Control of a space manipulator for autonomous target capture[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Denver, USA, August 14–17, 2000.
- [5] Farhad A. Cartesian control of space manipulators for on-orbit servicing [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Canada, August 2–5, 2010.
- [6] Kei S. Quasi-optimal control of space redundant manipulators [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Portland, OR, USA, 1999.
- [7] 贾庆轩, 张龙, 陈钢, 等. 多目标融合的冗余空间机械臂碰前轨迹优化[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 639–647. [Jia Qing-xuan, Zhang Long, Chen Gang, et al. Pre-impact trajectory optimization of redundant space manipulator with multi-target fusion[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(6): 639–647.]
- [8] Yuji M, Takeo H. Positioning control of a flexible manipulator of a space robot based on artificial potential method[C]. The 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Long Beach, CA, USA, 1998.
- [9] Seiya U, Modi V J. Optimal controller for a space platform based manipulator capturing a satellite[C]. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Boston, MA, USA, 1998.
- [10] Gabriele G, Satomi K, Seishiro K. Capture of a non-cooperative object using a two-arm manipulator[C]. The 55th International Astronautical Congress, Vancouver, Canada, 2004.
- [11] 刘福才, 高娟娟, 王芳. 不同重力环境下空间机械臂神经自适应鲁棒控制[J]. 宇航学报, 2013, 34(4): 503–510. [Liu Fu-cai, Gao Juan-juan, Wang Fang. Neural adaptive robust control of space manipulator under different gravity environment [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(4): 503–510.]

- [12] 刘福才,高静芳,贾晓菁. 考虑重力影响的柔性关节空间机械臂任务空间神经网络控制[J]. 宇航学报,2015,36(12): 1391 – 1397. [Liu Fu-cai, Gao Jing-fang, Jia Xiao-jing. Adaptive network control of flexible-joint space manipulator in task space under gravity effect [J]. Journal of Astronautics, 2015,36(12): 1391 – 1397.]
- [13] 荣吉利,杨永泰,李健,等. 空间机械臂建模方法与控制策略研究[J]. 宇航学报,2012,33(11): 1564 – 1569. [Rong Ji-li, Yang Yong-tai, Li Jian, et al. Research on modeling and control scheme of space manipulator[J]. Journal of Astronautics, 2012,33(11): 1564 – 1569.]
- [14] 谭启蒙,胡成威,高升. 空间机械臂视觉相机内参标定技术研究[J]. 航天返回与遥感,2013,34(6): 74 – 80. [Tan Qi-meng, Hu Cheng-wei, Gao Sheng. Research on calibration of intrinsic parameters for space manipulator camera based on 2D planar pattern [J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2013,34(6): 74 – 80.]
- [15] 刘玉,陈凤,黄建明,等. 空间机械臂视觉测量技术研究[J]. 载人航天,2014,20(2): 127 – 133. [Liu Yu, Chen Feng, Huang Jian-ming, et al. Study on vision measurement technology of space robotic arm[J]. Manned Space flight, 2014, 20(2): 127 – 133.]
- [16] Dong G Q, Zhu Z H. Vision-based pose and motion estimation of non-cooperative target for space robotic manipulators [C]. AIAA Space Conference and Exposition, San Diego, CA, USA, August 4 – 7, 2014
- 作者简介:
韩艳铎(1976 –),男,副教授,主要从事空间多体系统动力学与控制,以及航空航天器飞行力学与制导、控制的研究。
通信地址:南京市御道街29号 南京航空航天大学航天学院 315 信箱(210016)
电话:15951948242
E-mail: hanyanhua@nuaa.edu.cn

(编辑: 张宇平)