

文章编号: 1001-0920(2008)03-0278-05

自由漂浮空间机器人的笛卡尔连续路径规划

徐文福^a, 刘宇^a, 强文义^b, 梁斌^a, 李成^a

(哈尔滨工业大学 a. 空间智能系统研究所, b. 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 对于自由漂浮空间机器人, 位置级逆运动学方程不适合于笛卡尔连续路径的规划, 而且机械臂的运动会对基座产生扰动. 为此提出了基于速度级逆运动学方程的方法, 可实现 5 个目标: 1) 惯性空间连续位姿跟踪; 2) 基座姿态无扰动的连续位置跟踪; 3) 基座姿态无扰动的连续姿态跟踪; 4) 基座姿态调整的连续位置跟踪; 5) 基座姿态调整的连续姿态跟踪. 采用阻尼最小方差法回避动力学奇异, 所规划的路径连续平滑. 仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词: 空间机器人; 连续路径规划; 零反作用机动; 动力学奇异

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Cartesian continuous path planning for free-floating space robot

XU Wen-fu^a, LIU Yu^a, QIANG Wen-yi^b, LIANG Bin^a, LI Cheng^a

(a. Institute of Space Intelligent System, b. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: XU Wen-fu, E-mail: wfxu@robotsat.com)

Abstract: For the free-floating space robot, the position-level inverse kinematics equations are unsuitable for the continuous Cartesian path planning, and the attitude of the satellite will be disturbed by the manipulator's motion. So a method based on the velocity-level inverse kinematics equations is proposed to plan the motion of the space manipulator. And five aims can be attained: 1) Continuous pose tracking in inertia space; 2) Continuous position tracking without disturbance on the base attitude; 3) Continuous orientation tracking without disturbance on the base attitude; 4) Continuous position tracking and adjusting the base attitude at the same time; 5) Continuous orientation tracking and adjusting the base attitude at the same time. The approach of damped least-squared inverse is used to avoid the dynamic singularity. The planned path is very smooth and suitable to control the manipulator. Simulation results show the effectiveness of the algorithm.

Key words: Space robot; Continuous path planning; Zero reaction maneuver; Dynamic singularity

1 引言

地面固定基座机器人的笛卡尔路径规划, 通常需要借助其位置级逆运动学. Paul 用一系列直线段构成笛卡尔路径^[1], 将机械臂末端在这些直线段中的速度和加速度转换到关节坐标上, 并用二次插值程序进行平滑. Taylor 利用四元数表示法描述末端的姿态, 改进了 Paul 的方法^[2]. 然而, 自由漂浮空间机器人系统是非完整系统, 无法像地面机器人那样, 通过解析的位置级逆运动学来求解空间机器人的关节角. 因此笛卡尔路径规划通常采用基于速度级运动学的方法, 如基于广义 Jacobian 矩阵的分解运动速度控制^[3] 以及转置 Jacobian 矩阵的控制技术^[4,5].

空间机器人与其基座之间存在动力学耦合, 机器人的运动会对基座产生扰动. 机械臂的最小扰动规划和姿态调整规划成为研究的热点. Dubowsky 等采用 EDM 技术规划空间机械臂的运动, 使其对基座姿态的扰动最小^[6]. Nenchev 等讨论了空间机器人的冗余特性, 并采用基于 FAR Jacobian 矩阵的方法^[7], 规划机械臂的运动, 不产生对基座姿态的扰动. Yoshida 等提出了零反作用机动的思想, 用以规划机械臂的运动^[8], 但对于非冗余的机械臂而言, 零反作用路径非常有限. Fernandes 等根据猫在自由落体过程中总能自动调整着地姿态的现象^[9], 研究了耦合刚体运动规划方法, 并将其用于调整基座姿态.

收稿日期: 2006-11-19; 修回日期: 2007-04-08.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2005AA745060).

作者简介: 徐文福 (1979—), 男, 贵州安顺人, 讲师, 博士, 从事空间机器人路径规划、视觉伺服控制的研究; 强文义 (1939—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、智能控制等研究.

本文利用速度级逆运动学方程,规划空间机器人的运动,可实现 5 种情况的笛卡尔连续路径跟踪:1)末端连续位姿跟踪;2)基座姿态无扰动的连续位置跟踪;3)基座姿态无扰动的连续姿态跟踪;4)基座姿态调整的连续位置跟踪;5)基座姿态调整的连续姿态跟踪.

2 空间机器人运动方程

2.1 空间机器人一般运动方程

有关空间机器人动力学建模和控制的一些重要研究成果参见文献[10]. 单臂空间机器人的模型如图 1 所示,它由 n 自由度机械臂和作为基座的航天器组成.

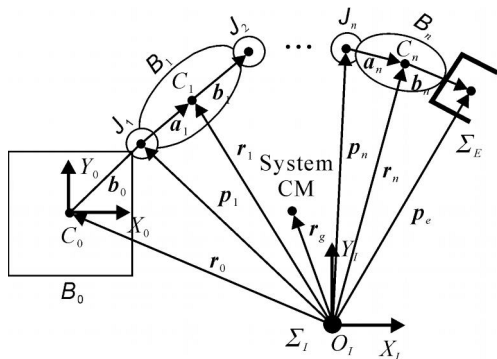


图 1 空间机器人系统组成

图 1 中, $r_i \in R^3$ 为刚体 i (记为 B_i) 质心 C_i 的位置矢量; $a_i, b_i \in R^3$, 分别为从关节 i (记为 J_i) 指向 C_i, C_{i-1} 指向 J_i 的矢量; $p_e \in R^3$ 为机械臂末端的位置矢量. 空间机器人的一般运动学方程可表示为

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\theta} \quad (1)$$

其中: $v_0, \omega_0 \in R^3$, 分别为基座质心处的线速度和角速度; θ_k 为 J_k 的转动角度(关节角), $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_n]$; J_b 和 J_m 分别为与基座运动和机械臂运动相关的 Jacobian 矩阵, 且有

$$J_b = \begin{bmatrix} E & -p_{0e} \\ O & E \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6}, \quad p_{0e} = p_e - r_0,$$

$$J_m = \begin{bmatrix} k_1(p_e - p_1) & \dots & k_n(p_e - p_n) \\ k_1 & \dots & k_n \end{bmatrix} \in R^{6 \times n}.$$

式中: $p_k \in R^3$ 为 J_k 的位置矢量, $k_k \in R^3$ 为关节 k 旋转轴的矢量, \tilde{p}_{0e} 为矢量 p_{0e} 的叉乘操作数.

2.2 自由漂浮模式的运动方程

对于自由漂浮模式(基座位置、姿态均不受控), 系统的线动量和角动量守恒, 即满足^[10]

$$\begin{bmatrix} P \\ L_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ME & M\tilde{r}_{0g}^T \\ M\tilde{r}_{0g} & H_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{Tw} \\ H_{w\phi} \end{bmatrix} \dot{\theta} = 0. \quad (2)$$

其中: $P \in R^3$ 为系统的线动量, $L_0 \in R^3$ 为整个系统相对于基座质心的角动量, M 为系统的总质量; H_w ,

$H_{w\phi}, J_{Tw}$ 的表达式参见文献[10]. 根据式(4)的前 3 行, 可解出

$$v_0 = -\tilde{r}_{0g}^T \omega_0 - \frac{J_{Tw}}{M} \dot{\theta} = \tilde{r}_{0g} \omega_0 - \frac{J_{Tw}}{M} \dot{\theta}. \quad (3)$$

代入后 3 行得

$$(M\tilde{r}_{0g}\tilde{r}_{0g} + H_w) \omega_0 + (H_{w\phi} - \tilde{r}_{0g}J_{Tw}) \dot{\theta} = 0. \quad (4)$$

式(4)写成矩阵形式, 有

$$H_s \omega_0 + H \dot{\theta} = 0. \quad (5)$$

式(5)即为自由漂浮空间机器人的角动量守恒方程. 其中

$$H_s = (M\tilde{r}_{0g}\tilde{r}_{0g} + H_w) \in R^{3 \times 3},$$

$$H = H_{w\phi} - \tilde{r}_{0g}J_{Tw} \in R^{3 \times n}.$$

可以证明 H_s 是非奇异的, 因而

$$\begin{cases} v_0 = - (J_{Tw}/M + \tilde{r}_{0g}H_s^{-1}H) \dot{\theta} = J_{lm-v} \dot{\theta}, \\ \omega_0 = - H_s^{-1}H \dot{\theta} = J_{lm-\omega} \dot{\theta}. \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1), 得到自由漂浮模式下空间机器人系统的运动学方程

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_g \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{g-v} \\ J_{g-\omega} \end{bmatrix} \dot{\theta}. \quad (7)$$

其中: 矩阵 J_g 为空间机器人的广义 Jacobian 矩阵^[3], 它是基座姿态、机械臂关节角、各刚体质量、惯量的函数; J_{g-v} 和 $J_{g-\omega}$ 为 J_g 的分块矩阵.

3 空间机器人笛卡尔连续路径规划

本文讨论的空间机器人系统由具有 6 个转动关节的串联机械臂和作为其基座的航天器组成, 整个系统有 12 个自由度. 一般情况下, 将机械臂末端的位置(3 个自由度)、姿态(3 个自由度)以及基座的位置(3 个自由度)、姿态(3 个自由度)作为控制对象. 从理论上说, 通过机械臂的 6 个关节可控制上述 12 个自由度中的任意 6 个. 考虑到多数情况下基座姿态的控制比基座质心位置的控制更重要, 因而本文针对机械臂末端位置、姿态以及基座姿态的控制, 研究以下几种情况的路径规划方法.

3.1 机械臂末端连续位姿的跟踪

假设空间机器人末端位置按如下轨迹变化:

$$p_e = p_e(t), \quad 0 \leq t \leq t_f. \quad (8)$$

同时末端姿态从初始的 θ_{e0} 连续平滑地调整到 θ_{ef} (姿态采用 $Z-Y-X$ 欧拉角表示), 即

$$\theta_{e0} = [\theta_{e0}, \theta_{e0}, \theta_{e0}] \quad \theta_{ef} = [\theta_{ef}, \theta_{ef}, \theta_{ef}]. \quad (9)$$

如上所述, 自由漂浮空间机器人的连续路径规划无法采用基于位置级运动学的方法, 因此本文借助于速度级运动学方程来规划机械臂的运动. 首先将末端的线速度表示为

$$v_e(t) = \dot{p}_e(t), \quad 0 \leq t \leq t_f; \quad (10)$$

然后规划末端的角速度. 机械臂末端初始和终止姿态矩阵分别为

$$A_{d0} = R_z(\alpha_0) R_y(\beta_0) R_x(\gamma_0) = [n_0, o_0, a_0],$$

$$A_{df} = R_z(\alpha_f) R_y(\beta_f) R_x(\gamma_f) = [n_f, o_f, a_f].$$

其中 R_z, R_y, R_x 分别表示绕坐标轴旋转某一角度所对应的变换矩阵. 则末端指向偏差为

$$e_o = \frac{1}{2} (n_0 n_f + o_0 o_f + a_0 a_f) = r_{eo} \sin(\phi_{eo}). \quad (11)$$

可求出

$$r_{eo} = e_o / |e_o|, \phi_{eo} = \arcsin(|e_o|). \quad (12)$$

选择适当的末端姿态轨迹 $\phi_e(t)$ ($\phi_e(0) = \phi_{eo}, \phi_e(t_f) = 0$), 使得机械臂末端连续平滑地调整到期望的指向. 则末端角速度可按下式规划:

$$\dot{e}(t) = r_{eo} \dot{\phi}_e(t), \quad 0 \leq t \leq t_f. \quad (13)$$

根据规划的末端线速度和角速度, 采用速度级逆运动学规划机械臂的关节运动速度

$$\dot{d}(t) = (J_g(t))^\# \begin{bmatrix} v_e(t) \\ e(t) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中 $(J_g)^\#$ 为广义 Jacobian 矩阵的阻尼最小方差逆, 用于回避空间机器人动力学奇异的影响, 即

$$(J_g)^\# = (J_g)^T [J_g (J_g)^T + \lambda^2 I]^{-1}. \quad (15)$$

阻尼系数 λ 满足 $0 < \lambda < 1$. 因而期望的关节角为

$$d(t + \Delta t) = d(t) + \dot{d}(t) \Delta t. \quad (16)$$

其中: Δt 为关节控制周期, d 和 \dot{d} 分别为期望的和当前的关节角.

连续路径跟踪的算法如图 2 所示.

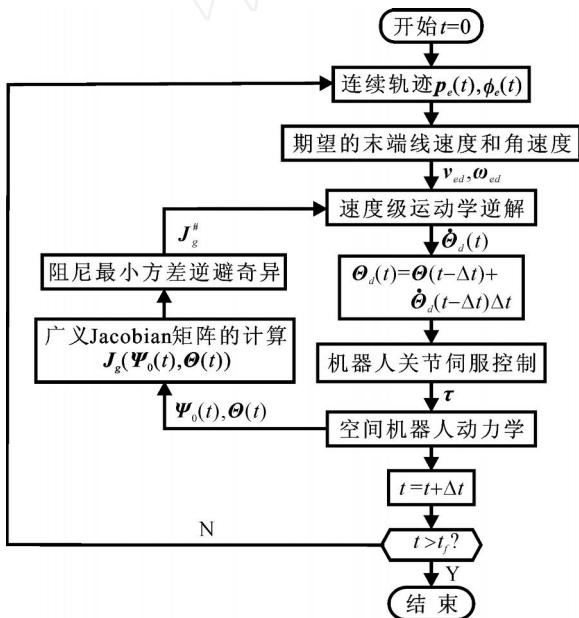


图 2 自由漂浮空间机器人连续路径跟踪算法

需要指出的是, 如果关节伺服控制精度足够高, 则在跟踪算法中不需要引入机器人关节伺服控制和空间机器人动力学模块, 而认为 $\dot{d}(t) = \dot{d}_j(t)$; 同时根据式 (6) 计算基座姿态角速度, 再通过数值积分得到基座姿态 o .

3.2 基座姿态无扰动的连续路径跟踪

为保证机械臂的运动不对基座姿态产生扰动, 即 $\dot{o} = 0$, 根据动量守恒方程 (5), 须满足

$$H \dot{o} = 0. \quad (17)$$

另一方面, 根据式 (7), 空间机器人的末端速度与关节角速度之间有如下关系:

$$v_e = J_{g_v} \dot{d}, \quad \dot{e} = J_{g_e} \dot{d}. \quad (18)$$

结合方程 (17) 和 (18), 可得如下关系:

$$\begin{bmatrix} H \\ J_{g_e} \end{bmatrix} \dot{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_e \end{bmatrix}.$$

令矩阵

$$G_v = \begin{bmatrix} H \\ J_{g_e} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

当 G_v 满秩时, 可按下式规划关节角速度:

$$\dot{d} = G_v^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ v_e \end{bmatrix}. \quad (20)$$

如果 G_v 接近奇异, 则采用阻尼最小方差法规划机械臂关节角速度, 这样虽然牺牲了部分精度, 但可使机械臂平滑地通过奇异点. 按式 (20) 规划机械臂的关节运动, 可使机械臂末端跟踪期望的笛卡尔位置, 且不对基座姿态产生扰动.

类似地, 结合方程 (17) 和 (18), 可得

$$\begin{bmatrix} H \\ J_{g_w} \end{bmatrix} \dot{o} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \end{bmatrix}.$$

令矩阵

$$G_w(\psi_0, \theta) = \begin{bmatrix} H \\ J_{g_w} \end{bmatrix},$$

则机械臂的关节角速度为

$$\dot{d} = G_w^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \end{bmatrix}. \quad (21)$$

按式 (21) 规划机械臂的关节运动, 可控制机械臂末端姿态按期望的轨迹改变, 且不对基座姿态产生扰动. 算法流程类似于图 2.

3.3 基座姿态调整的连续路径跟踪

根据方程 (5) 可得

$$H \dot{o} = -H_s \dot{o}_s. \quad (22)$$

类似于上节对基座姿态无扰动的规划方法, 结合式 (22) 和 (18) 来规划机械臂的运动, 不但可以调整基座姿态, 而且能使机械臂末端跟踪期望的笛卡尔路径 (位置或姿态).

构造形如式 (19) 的矩阵, 并按下式规划机械臂的关节速度:

$$\dot{d} = G_v^{-1} \begin{bmatrix} -H_s \dot{o}_s \\ v_e \end{bmatrix}, \quad (23)$$

则可通过机械臂的运动调整基座的姿态, 同时机械

臂末端跟踪期望的笛卡尔位置。

同理,按下式规划机械臂的关节速度:

$$\dot{d} = G_w^{-1} \begin{bmatrix} -H_s & 0 \\ e \end{bmatrix}, \quad (24)$$

则可通过机械臂的关节运动调整基座的姿态,同时机械臂末端跟踪期望的笛卡尔姿态。

4 仿真研究

所研究的空间机器人系统由一飞行基座、6DOF 机械臂以及目标星组成。质量特性如表 1 所示。其中:Sat 表示空间基座; B_i 表示第 i 个刚体; ${}^i a_i, {}^i b_i, {}^i I_i$ 为相应变量在坐标系 i 中的表示。

4.1 空间机器人连续位姿跟踪

现以直线路径规划为例,说明自由漂浮空间机器人连续位姿跟踪的规划方法。

基座姿态及机械臂关节角初值分别为

$$\omega_0 = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ],$$

$$\phi_0 = [0^\circ, 47.72^\circ, -93.91^\circ, 0^\circ, -43.82^\circ, 0^\circ].$$

此时,机械臂末端相对于惯性系(原点位于系统质心)的位置和姿态分别为

$$p_{d0} = [1.5571 \text{ m}, -0.0137 \text{ m}, 1.0214 \text{ m}], \quad (25)$$

$$\omega_0 = [0^\circ, 0^\circ, -180^\circ]. \quad (26)$$

要求机械臂末端跟踪连续的笛卡尔位姿,其中终止时刻的位置和姿态分别为

$$p_{df} = [1.5071 \text{ m}, 0.0563 \text{ m}, 0.7214 \text{ m}], \quad (27)$$

$$\omega_f = [31.44^\circ, -20.31^\circ, 153.12^\circ]. \quad (28)$$

机械臂运动总时间 $t_f = 20 \text{ s}$ 。采用梯形规划方法,加速段时间为 $t_s = 5 \text{ s}$,则末端最大线速度为

$$v_{em} = (p_{df} - p_{d0}) / (t_f - t_s).$$

另外,根据式(12)可得

$$r_{\omega} = [-0.3220, -0.7614, 0.5626]^T,$$

$$\phi_{\omega} = 40.45^\circ.$$

按梯形法规划机械臂末端的最大角速度为

$$\omega_m = \phi_{\omega} r_{\omega} / (t_f - t_s).$$

动力学仿真结果表明,机械臂末端能准确地跟踪期望的位姿轨迹,如图 3 所示。由于跟踪过程不考虑基座的控制,使基座姿态发生变化,其中 Z 轴最大变化为 -2.91° , Y 轴为 1.94° , X 轴为 2.02° 。

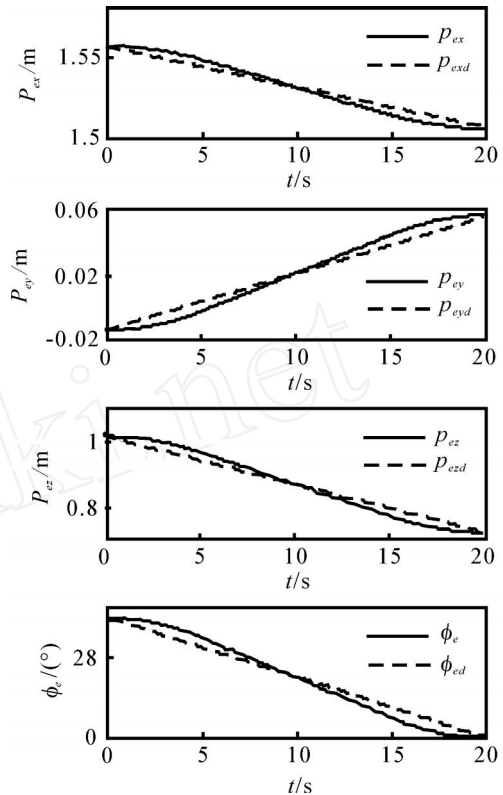


图 3 末端位置和姿态跟踪情况

表 1 空间机器人质量特性

	Sat	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Mass/ kg	400	6	5	5	4	3	2
${}^i a_i/\text{m}$		0	0.2702	0	0	0	0
		0.15	-0.2513	0.15	-0.35	0	0.075
	0.357	0	0.5598	0	0	0	0
${}^i b_i/\text{m}$	-0.0095	0	0	0	0	-0.0662	0
	0.419	0.15	-0.0487	0.15	-0.35	0	0.1595
I_{xx}	30	0.15	0.0926	0.105	0.2498	0.033	0.052
I_{yy}	28	0.15	0.9053	0.105	0.2498	0.0172	0.052
I_{zz}	32	0.075	0.8451	0.0294	0.0196	0.026	0.022
I_{xy}	0.26	0	0	0	0	0	0
I_{xz}	0.37	0	0.1315	0	0	0	0
I_{yz}	-0.29	0	0	0	0	0	0

4.2 基座姿态无扰动的末端姿态跟踪

假设希望空间机器人末端姿态从初始 α_0 平滑地调整到 α_{ef} (如式(26)和(28)所示). 机械臂末端角速度可按4.1节的方法进行规划,并根据式(21)计算关节运动. 仿真结果表明,机械臂末端的姿态按期望的轨迹变化,在整个运动过程中基座的姿态不发生任何改变,如图4所示.

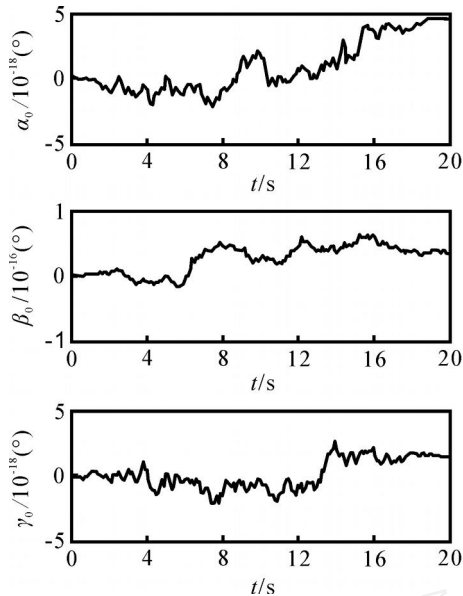


图4 机械臂运动过程中基座姿态的变化

4.3 基座姿态无扰动的末端位置跟踪

假设要求机械臂末端作连接 P_{e0} 和 P_{ef} 的直线运动(如式(25)和(27)所示),并且整个运动过程中不改变基座的姿态. 机械臂末端线速度仍按4.1节的方法进行规划,并根据式(20)计算机械臂的运动,可实现对基座姿态无扰动的连续位置跟踪. 动力学仿真表明,机械臂末端位置基本按期望的直线路径运动,整个运动过程中基座的姿态不发生变化(限于篇幅,未给出相关曲线).

4.4 基座姿态调整的末端姿态跟踪

设空间基座的初始姿态($Z-Y-X$ 欧拉角)为 $\alpha_0 = [5^\circ, 5^\circ, -5^\circ]$,希望通过机械臂的运动将基座姿态调整到 $[0, 0, 0]$,即期望终止时刻的基座姿态为 $\alpha_{ef} = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$,同时希望机械臂末端的姿态从 α_0 调整到 α_{ef} .

首先规划基座的姿态角速度. 采用类似于式(11)和(12)的方法,计算出终止时刻与期望时刻基座姿态误差的轴角关系

$$\begin{aligned} \Gamma_{b0} &= [0.5934, -0.5438, -0.5934]^T, \\ \Phi_{b0} &= 8.78^\circ \end{aligned}$$

即基座质心坐标系绕矢量 Γ_{b0} 旋转 Φ_{b0} 角后,其指向与终止时刻的相同. 因而按梯形法规划空间基座的角速度,其中最大角速度为 $\alpha_{bm} = \Phi_{b0} / (t_f - t_s)$.

根据式(24)规划机械臂的关节角速度并进行数值积分,得到机械臂的关节路径. 仿真结果表明,机械臂末端能跟踪期望的姿态变化,同时基座姿态可平稳地调整到期望的状态,如图5所示.

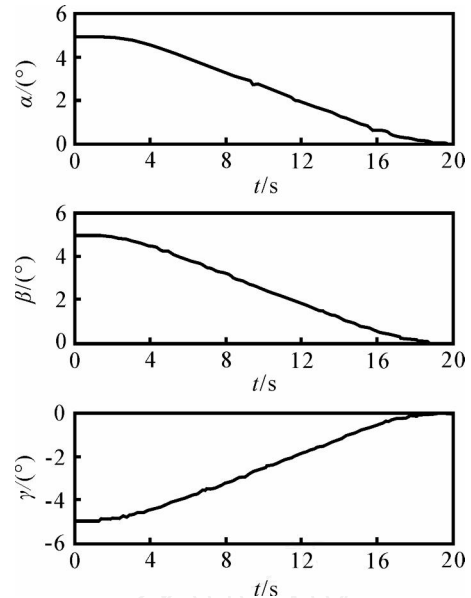


图5 基座姿态的调整过程

4.5 基座姿态调整的末端位置跟踪

基座姿态调整的要求与4.4节相同,同时希望机械臂末端位置从 P_{e0} 直线运动到 P_{ef} . 末端线速度按4.1节进行规划,根据式(23)计算关节角速度并进行数值积分,得到机械臂的关节路径. 机械臂按此路径运动,不但可调整基座姿态,而且能实现末端跟踪连续路径(限于篇幅,未给出相关曲线).

5 结 语

自由漂浮空间机器人系统是典型的非完整系统,无法像地面机器人那样,借助于解析的位置级逆运动学规划笛卡尔空间的连续路径. 由于空间机器人与其基座之间存在动力学耦合,机器人的运动会对其基座的位置和姿态产生扰动. 本文针对机械臂末端位置、姿态和基座姿态的控制,研究了5种情况的路径规划方法. 这5种情况下的笛卡尔连续路径规划方法满足不同的要求,对于空间机器人的运用具有重要意义. 不足之处在于,由于规划方法依赖于速度级逆运动学,会受到Jacobian矩阵奇异的影响;本文采用阻尼最小方差法回避奇异的影响,牺牲了部分精度. 今后的工作将进一步研究避奇异的问题.

参考文献(References)

- [1] Paul R P. Manipulator Cartesian path control[J]. IEEE Trans on System, Man & Cybernetics, 1979, 9(11): 702-711.

(下转第287页)

参考文献(References)

- [1] Hedrick J K, Gopalswamy S. Nonlinear flight control design via sliding methods[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 1990, 13(5): 850-858.
- [2] Cianr-dong Yang, Chien-chung Kung. Nonlinear H flight control of general six-degree-of-freedom motions [J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(2): 278-288.
- [3] 朱荣刚, 姜长生, 邹庆元, 等. 新一代歼击机超机动飞行的神经网络动态逆控制[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 242-245.
(Zhu Rong-gang, Jiang Chang-sheng, Zou Qing-yuan, et al. Study on dynamic inversion control and simulation of supermaneuverable flight of the new generation fighter [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2003, 24(3): 242-245.)
- [4] 陈谋, 姜长生, 吴庆宪. 基于多模型方法的全包络鲁棒飞行控制器设计[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 486-492.
(Chen Mou, Jiang Chang-sheng, Wu Qing-xian. Design of full envelope robust flight controller based on multiple model method [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 486-492.)
- [5] 熊治国, 孙秀霞, 胡孟权. 抗扰控制器在超机动飞行快回路控制中的应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 440-444.
(Xiong Zhi-guo, Sun Xiu-xia, Hu Meng-quan. Application of auto disturbance rejection controller in fast variable system of super-maneuverable flight [J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 440-444.)
- [6] Wen-hua Chen. Nonlinear disturbance observer enhanced dynamic inversion control of missiles[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(1): 161-166.
- [7] Euntai Kim. A fuzzy disturbance observer and its application to control [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 10(1): 77-85.
- [8] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. Nonlinear disturbance observer for two-link robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [9] Huang Yu-hong, Messner William. Novel disturbance observer design for magnetic hard drive servo system with a rotary actuator[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(4): 1892-1894.
- [10] 陈谋, 姜长生, 吴庆宪. 基于干扰观测器的一类不确定非线性系统鲁棒 H 控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 611-614.
(Chen Mou, Jiang Chang-sheng, Wu Qing-xian. Robust H control for a class of nonlinear uncertain systems with disturbance observer[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(4): 611-614.)

(上接第 282 页)

- [2] Taylor R H. Planning and execution of straight line manipulator trajectories [J]. J of Research and Development, 1979, 23(4): 424-436.
- [3] Umetani Y, Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 303-314.
- [4] Moosavian S A, Papadopoulos E. Control of space free-flyers using the modified transpose Jacobian algorithm [C]. Proc of the 1997 Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Grenoble, 1997: 1-6.
- [5] Taira Y, Sagara S, Katoh R. Digital adaptive control of space robot manipulators using transpose of generalized Jacobian matrix[C]. Proc of the IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, 2000: 1553-1558.
- [6] Dubowskys S, Torres M. Path planning for space manipulators to minimizing spacecraft attitude disturbance[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway, 1991: 2522-2528.
- [7] Nenchev D, Umetani Y, Yoshida K. Analysis of a redundant free-flying spacecraft/ manipulator system[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(1): 1-6.
- [8] Yoshida K, Hashizume K, Abiko S. Zero reaction maneuver: Flight validation with ETS-VII space robot and extension to kinematically redundant arm[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway, 2001: 441-446.
- [9] Fernandes C, Gurvits L, Li Z X. Near-optimal nonholonomic motion planning for a system of coupled rigid bodies [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(3): 450-463.
- [10] Xu Y S, Kanade T. Space robotics: Dynamics and control [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992.