

自由漂浮空间机器人无逆运动学 基于采样的运动规划

张红文^{1,2}, 朱战霞^{1,2}, 袁建平^{1,2}

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2.航天飞行动力学技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要:自由漂浮空间机器人(free-floating space robot, FFSR)是进行在轨服务的重要工具,其基座姿态和关节角间存在复杂的一阶微分约束关系,进行运动规划时需直接考虑微分约束,这让其运动规划问题充满挑战。“先求逆运动学,再规划轨迹”的运动规划框架,存在目标构型与初始构型未必在同一连通域的隐患,为克服这一隐患,基于有目标偏置的RRT(GB-RRT)研究了FFSR从初始构型到目标末端位姿的运动规划问题。对于算法中的目标末端位姿导引生长,考虑到因FFSR执行机构自由度不足,而导致的末端位姿误差收敛与有效调节基座姿态相互矛盾的问题,提出适时调节基座姿态的目标末端位姿导引局部规划器,该局部规划器在保证末端位姿误差能够收敛情况下,兼顾基座姿态调节。此外,还设计了用于探索构型空间的随机构型导引生长局部规划器。将上述2种局部规划器与GB-RRT结合,可实现在不求解逆运动学的情况下,完成规划任务,且保证基座姿态扰动满足要求。仿真验证了算法的有效性。

关键词:自由漂浮空间机器人;运动规划;基于采样的运动规划;非完整性

中图分类号:TP241.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2021)05-1005-07

FFSR具备节省燃料,延长系统寿命等优点,被广泛用于在轨服务。FFSR构型参数中,关节角和基座姿态间存在一阶导关系,需直接考虑微分约束进行运动规划。

FFSR运动规划方法中,研究较多的包含3类。早期学者研究了系统的操控(steer)问题,即在不考虑障碍物的情况下,生成一系列的动作,让FFSR从初始构型运动到目标构型。如Vafa等基于“虚拟机械臂(virtual manipulator, VM)”^[1]的模型,发展了自校正运动法^[1]及“扰动图法(disturbance map, DM)”^[2]。Nakamura和Mukherjee^[3]基于李雅普诺夫函数设计了双向方法。Fernandes等^[4]研究了耦合刚体的运动规划方法,此类方法着眼于利用关节运动操控基座姿态;但未考虑碰撞,不能形成完整的运动规划。第二类方法是基于多项式参数化的方

法,即以FFSR的初始关节角和最终关节角为端点,利用带未知系数的多项式对关节轨迹进行参数化,并以最终时刻基座姿态扰动为适应度函数,将规划问题转换为优化问题;利用遗传算法^[5]、粒子群算法^[6]、微分进化算法^[7]等解优化问题,可得最终轨迹。该方法不易控制轨迹的形状,因此很难考虑碰撞问题;此外,由于适应度函数计算需进行积分,因此效率低下。第三类方法是通过直接法或间接法将运动规划问题转换为非线性优化问题^[8-9]。Misra等^[10]于2017年基于非线性优化研究了空间机器人考虑任务约束的运动规划问题,并将问题构造为一个凸二次规划问题。该方法求解效率高,但也存在局部最优问题。

基于采样的运动规划方法,能高效解决有高自由度构型空间的机器人运动规划问题。其中RRT

收稿日期:2020-11-09

基金项目:西北工业大学博士论文创新基金(CX2021049)资助

作者简介:张红文(1991—),西北工业大学博士研究生,主要空间机器人及机器人运动规划研究。

通信作者:朱战霞(1973—),女,西北工业大学教授、博士生导师,主要从事飞行动力学与控制、空间操作地面实验方法研究。

e-mail: zhuzhanxia@nwpu.edu.cn

(rapidly-exploring random tree) 对有微分约束运动规划有很强的适用性^[11]。一般情况下,运动规划多采用“先求逆运动学,再规划路径/轨迹”的框架;但这一框架存在逆运动学所求目标构型与初始构型未必在同一连通域内的隐患。针对这一问题, Bertram、Weghe 等^[12-13] 基于有目标偏置的 RRT (RRT with Goal Bias, GB-RRT) 给出了解决方案,即不求逆运动学,而是直接引入目标末端位姿导引生长。在该方案中,用于目标末端位姿导引生长的局部规划含一个迭代过程,每次迭代通过雅克比矩阵的转置,将末端位姿误差映射到构型空间,从而产生一系列越来越接近目标末端位姿的构型,但该方案针对固定基座机械臂的路径规划问题,而 FFSR 的运动规划需直接考虑微分约束。此外,固定基座机械臂执行机构自由度大于末端位姿自由度,但 FFSR 末端末端位姿导引生长,除要求具备最终收敛到目标末端位姿的能力外,还需保证基座姿态扰动不能过大,因此执行机构自由度不足。

本文以 GB-RRT 为框架设计规划算法,解决 FFSR 从初始构型到目标末端位姿的运动规划问题。为适应 FFSR 直接考虑微分约束的需求,在 Weghe 等^[13] 提出的方法基础上,在每次迭代中引入积分机制;为克服 FFSR 执行机构自由度不足的问题,提出适时调节基座姿态的目标末端位姿导引生长局部规划器,以调节末端位姿为主,同时在必要时兼顾考虑基座姿态的调节。

1 自由漂浮空间机器人的运动学方程

FFSR 如图 1 所示,符号定义与文献[14]相同。

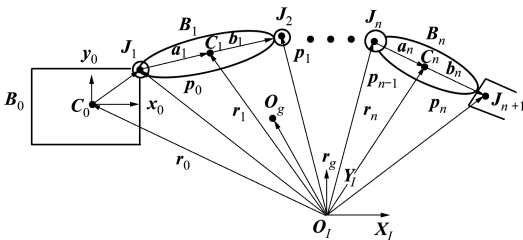


图 1 FFSR 模型简图

1.1 仅考虑几何关系的运动学方程

1.1.1 姿态方程

定义 FFSR 的构型参数为 $q = [\Psi_b^T \quad \Theta^T]^T$, 其中

Ψ_b 为基座姿态角, Θ 为关节角向量。FFSR 末端执行器 (End-Effector, 简称为 EE) 姿态变换矩阵与 q 间的映射关系为

$${}^l R_e = f_{eR}(q) \tag{1}$$

FFSR 的 EE 姿态角 Ψ_e 与 ${}^l R_e$ 对应, 因此

$$\Psi_e = f_{e\Psi}(q) \tag{2}$$

1.1.2 位置方程

FFSR 末端执行器位置 p_e 为

$$p_e = r_0 + b_0 + \sum_{j=1}^n (a_j + b_j) \tag{3}$$

1.1.3 速度方程

FFSR 末端执行器角速度 ω_e 为

$$\omega_e = \omega_0 + \sum_{j=1}^n k_j \dot{\theta}_j \tag{4}$$

末端执行器线速度 v_e 度为

$$v_e = v_0 + \omega_0 \times (p_e - r_0) + \sum_{j=1}^n [k_j \times (p_e - p_j)] \dot{\theta}_j \tag{5}$$

根据(4)~(5)式,可得 FFSR 的末端执行器速度 \dot{x}_e 为

$$\dot{x}_e = \begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\Theta} \tag{6}$$

J_b, J_m 的表达式见文献[14]。

1.2 动量守恒方程

FFSR 的动量方程为

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ME & M\tilde{r}_{0g}^T \\ M\tilde{r}_{0g} & H_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{Tw} \\ H_{w\varphi} \end{bmatrix} \Theta \tag{7}$$

式中, P 与 L 分别为 FFSR 的线动量、角动量, 相关矩阵的定义见文献[14]。令

$$H_b = \begin{bmatrix} ME & M\tilde{r}_{0g}^T \\ M\tilde{r}_{0g} & H_w \end{bmatrix}, H_m = \begin{bmatrix} J_{Tw} \\ H_{w\varphi} \end{bmatrix}$$

1.3 考虑动量守恒后的运动学方程

1.3.1 基座姿态角一阶导方程

FFSR 线动量、角动量守恒, 假设系统的初始动量为 0, 则可将基座速度 \dot{x}_b 表示为 Θ 的函数

$$\dot{x}_b = \begin{bmatrix} v_b \\ \omega_b \end{bmatrix} = -H_b^{-1} H_m \dot{\Theta} = J_{b\Theta} \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} J_{bv} \\ J_{b\omega} \end{bmatrix} \dot{\Theta} \tag{8}$$

取上述方程后 3 行, 可得基座角速度 ω_b 为

$$\omega_b = J_{b\omega} \dot{\Theta} \tag{9}$$

令 ${}^b \omega_b$ 为 ω_b 在基座固连坐标系中的表示, ${}^b \omega_b$ 基座姿态角一阶导 $\dot{\Psi}_b$ 间存在如下关系

$${}^b\boldsymbol{\omega}_b = \mathbf{N}_b [\dot{\alpha}_b \quad \dot{\beta}_b \quad \dot{\gamma}_b]^\top = \mathbf{N}_b \dot{\boldsymbol{\psi}}_b \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{N}_b = \begin{bmatrix} 1 & \tan(\beta_b) * \sin(\alpha_b) & \tan(\beta_b) * \cos(\alpha_b) \\ 0 & \cos(\alpha_b) & -\sin(\alpha_b) \\ 0 & \sin(\alpha_b)/\cos(\beta_b) & \cos(\alpha_b)/\cos(\beta_b) \end{bmatrix}$$

考虑(9)式及(10)式,则 $\dot{\boldsymbol{\psi}}_b$

$$\dot{\boldsymbol{\psi}}_b = \mathbf{N}_b^{-1} ({}^l\mathbf{R}_b)^{-1} \mathbf{J}_{b\omega} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_{b\psi} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{J}_{b\psi}$ 为与基座姿态角相关的雅克比矩阵。

1.3.2 状态转移方程

考虑(11)式,则 FFSR 的状态转移方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{n \times n} \\ \mathbf{J}_{b\psi} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_x \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (12)$$

式中, \mathbf{J}_x 为与状态转移相关的雅克比矩阵。

1.3.3 广义雅克比矩阵

考虑(6)式以及(8)式,可得

$$[\mathbf{v}_e^\top \quad \boldsymbol{\omega}_e^\top]^\top = (\mathbf{J}_b \mathbf{J}_{b\theta} + \mathbf{J}_m) \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_g \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (13)$$

\mathbf{J}_g 为广义雅克比矩阵。

1.3.4 考虑线动量守恒积分形式后的方程

FFSR 的线动量可积分为位置形式

$$M\mathbf{r}_g = m_0\mathbf{r}_0 + \sum_{i=1}^n m_i\mathbf{r}_i \quad (14)$$

考虑到 $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_0 + \mathbf{b}_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (\mathbf{a}_j + \mathbf{b}_j) + \mathbf{a}_i$, 可得

$$M\mathbf{r}_g = M\mathbf{r}_0 + \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\mathbf{b}_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (\mathbf{a}_j + \mathbf{b}_j) + \mathbf{a}_i \right) \right]$$

式中, $\mathbf{r}_{0i} = \mathbf{b}_0 + \sum_{j=1}^{i-1} (\mathbf{a}_j + \mathbf{b}_j) + \mathbf{a}_i$ 表示各连杆质心相对于基座质心的位置矢量,因此上式又可以写成

$$M\mathbf{r}_g = M\mathbf{r}_0 + \sum_{i=1}^n m_i\mathbf{r}_{0i} \quad (15)$$

进而

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_g - \left(\sum_{i=1}^n m_i\mathbf{r}_{0i} \right) / M \quad (16)$$

给出构型参数 \mathbf{q} , 可计算在惯性空间之中的表示 ${}^l\mathbf{b}_i, {}^l\mathbf{a}_i$, 进而可计算 \mathbf{r}_0 , 即 \mathbf{q} 为构型参数 \mathbf{q} 的函数。再考虑(3)式,可知 \mathbf{p}_e 为 \mathbf{q} 的函数

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{f}_{ep}(\mathbf{q}) \quad (17)$$

综合考虑(1)式以及(17)式,可得端位姿 \mathbf{x}_e 与 \mathbf{q} 间的映射关系

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_e \\ \boldsymbol{\psi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ep}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{f}_{e\psi}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \mathbf{f}_e(\mathbf{q}) \quad (18)$$

2 FFSR 无逆运动学基于采样的运动规划

算法伪代码如 Algorithm 1 所示,在每次迭代中,利用随机采样构型 q_{sample} 或目标末端位姿 x_{ed} 来导引树的生长,这2种生长分别称为随机导引生长(Extend_Randomly() 函数)与目标末端位姿导引生长(Extend_Toward_Goal())。每次迭代生成一个随机数 $p \in [0, 1]$,若 $p < p_g$,则进行目标末端位姿导引生长。

algorithm 1 GB-RRT for FFSR

```

1 tree.V.init( $q_I$ )
2 for  $i=1$  to  $K$  do
3   if rand() $<p_g$ 
4     is_reach = extend_toward_goal()
5     if is_reach = true
6       break
7   else
8     extend_randomly()
9 return tree

```

2.1 局部规划器设计

2.2.1 随机构型导引生长局部规划器

随机构型导引生长选择离 q_{sample} 最近的节点作为待扩展点 q_{extended} , 并从 q_{extended} 向 q_{sample} 进行局部规划,以生成局部轨迹以及新的节点。

algorithm 2 extend_randomly

```

1  $q_{\text{sample}} = \text{random\_config}()$ 
2  $q_{\text{extend}} = \text{nearest\_node}(\text{tree}, q_{\text{sample}})$ 
3  $q_{\text{present}} = q_{\text{extend}}$ 
4 last_checked_q =  $q_{\text{present}}$ 
5 shall_end = false
6 while all( shall_end = false)
7    $J_b = \text{Jacobian}(q_{\text{present}})$ 
8    $J_x = [J_b, \text{eye}(n, n)]$ 
9    $\Delta q = q_{\text{sample}} - q_{\text{present}}$ 
10   $J_V = \text{inv}(J_x) * \Delta q$ 
11   $B_V = J_b * J_V$ 
12   $q_{\text{present}} = q_{\text{present}} + [B_V; J_V]^* \text{time\_step}$ 
13  If max( $q_{\text{present}} - \text{last\_checked\_q}$ ) > =
14     collision_check_thresh
15     is_collision = collision_check( $q_{\text{present}}$ )
16     last_checked_q =  $q_{\text{present}}$ 
17     shall_end = check_termination()
18 return

```

相应局部规划器的伪代码见 Algorithm 2, 其含一个迭代过程, 每次迭代中, 计算当前构型 q_{present} 和 q_{sample} 间的误差 $\Delta q = q_{\text{sample}} - q_{\text{present}}$, 并计算 q_{present} 处的 J_x ; 然后通过 J_x 的伪逆, 将 Δq 映射到动作空间, 得到 Θ

$$\Theta = J_x^+ q \quad (19)$$

FFSR 按照 Θ 运动能够减小 Δq 。利用 $J_{b\psi}$ 左乘 Θ , 得到与 Θ 所对应的 Ψ_b

$$\Psi_{b\text{next}} = J_{b\psi} \Theta_{\text{next}} \quad (20)$$

从而得到构型速度

$$\dot{q} = [\Psi_b^T \quad \Theta^T]^T \quad (21)$$

通过积分, 更新构型

$$q_{\text{present}} = q_{\text{present}} + \dot{q} \cdot t \quad (22)$$

对 q_{present} 进行碰撞检测, 以保证所生成的局部轨迹处于自由构型空间。若满足下述任何一个条件, 则停止迭代: ①检测出碰撞; ②构型超出限制, 即基座姿态扰动超出限制, 或者关节角度超出范围; ③构型参数之中最大扩展值达到一定的阈值。

2.2.2 适时调节基座姿态的目标末端位姿导引生长局部规划器

```

algorithm3 extend_toward_goal
1   $q_{\text{extend}} = \text{nearest\_node}(\text{tree}, X_{\text{goal}})$ 
2   $q_{\text{present}} = q_{\text{extend}}$ 
3   $\text{last\_checked\_}q = q_{\text{present}}$ 
4   $\text{shall\_end} = \text{false}$ 
5  while all( $\text{shall\_end} = \text{false}$ )
6     $J_B = \text{Jacobian}(q_{\text{present}})$ 
7     $J_C = \text{general\_Jacobian}(q_{\text{present}})$ 
8     $\Delta x = X_{\text{goal}} - f(q_{\text{present}})$ 
9     $\Delta q_B = q_{B_{\text{goal}}} - q_{B_{\text{present}}}$ 
10    $J_{V\_for\_EE} = \text{pinv}(J_C) * \Delta X$ 
11   if  $\Delta q_B > B\_adjust\_thresh$ 
12      $J_{V\_for\_B_A} = \text{pinv}(J_B * \text{null}(J_C)) * \Delta q_B$ 
13   else
14      $J_{V\_for\_B_A} = 0$ 
15    $J_V = J_{V\_for\_EE} + \text{null}(J_C) * J_{V\_for\_B_A}$ 
16    $B_V = J_b * J_V$ 
17    $q_{\text{present}} = q_{\text{present}} + [B_V; J_V] * \text{time\_step}$ 
18   if  $\max(q_{\text{present}} - \text{last\_checked\_}q) > C\_check\_tresh$ 
19      $\text{is\_collision} = \text{collision\_check}(q_{\text{present}})$ 
20      $\text{last\_checked\_}q = q_{\text{present}}$ 
21    $\text{shall\_end} = \text{check\_termination}()$ 
22  return
    
```

作为待扩展点 q_{extended} , 并从 q_{extended} 向 x_{ed} 进行局部规划; 其要求尽可能消除相对于 x_{ed} 的误差, 同时保证 Ψ_b 不超出取值范围。本文提出适时调节基座姿态的目标末端位姿导引生长其局部规划器, 其伪代码如 Algorithm 3 所示。作为执行机构的 FFSR 操作臂关节仅有 7 个自由度, 而末端位姿任务为六自由度, 基座姿态为三自由度。相对于到达 x_{ed} 以及保持 Ψ_b 处于一定取值范围的要求, 执行机构自由度不足; 因此若在局部规划的每一次迭代中, 同时调节 x_e 和 Ψ_b , 则末端位姿误差无法收敛。

本文引入参考目标基座姿态 Ψ'_b , 以及基座姿态误差阈值向量 $\Delta\Psi'_b$ 。其中 Ψ'_b 根据 Ψ_b 取值区间 $[\Psi_{b\text{min}} \quad \Psi_{b\text{max}}]$ 设计, 且选在区间的中心; $\Delta\Psi'_b$ 小于 $[\Psi_{b\text{min}} \quad \Psi_{b\text{max}}]$ 区间长度的一半, 且为正值。在每次迭中, 计算当前基座姿态 $\Psi_{b\text{present}}$ 与参考目标基座姿态 Ψ'_b 间的误差 $\Delta\Psi_b = \Psi'_b - \Psi_{b\text{present}}$; 若 $|\Delta\Psi_b|$ 的全部分量小于误差阈值, 则不调节 Ψ_b , 而若 $|\Delta\Psi_b|$ 有分量达到阈值, 但是又离 Ψ_b 取值边界还有一定距离时, 则启动 Ψ_b 调节。这样既能克服执行机构自由度不足的问题, 保证末端位姿误差收敛; 又能在 Ψ_b 还未到达界限时就对其进行调节, 保证其处于取值范围。

对于 Algorithm 3 的每次迭代, 首先进行以下计算: ①计算当前构型 q_{present} 对应的 $J_{b\psi}, J_g$ 。②计算 q_{present} 所对应的末端位姿 $x_e = f_e(q_{\text{present}})$ 与 x_{ed} 间误差 $x_e = x_{ed} - x_e$ 。③计算 $\Delta\Psi_b$ 。然后, 通过 J_g 的伪逆, 将 x_e 映射到动作空间, 得到关节角速度 Θ_1

$$\Theta_1 = (J_g)^+ x_e \quad (23)$$

FFSR 按照 Θ_1 运动可以减小 x_e 。判断 $|\Delta\Psi_b|$ 是否有分量达到调节阈值, 若有则触发基座姿态调节, 即在 J_g 的零空间内, 通过 $J_{b\psi}$ 的伪逆产生减小 $\Delta\Psi_b$ 的动作 Θ_2

$$\Theta_2 = (J_{b\psi} \cdot \text{null}(J_g))^+ \Delta\Psi_b$$

$$\text{null}(J_g) = E_{n \times n} - J_g^+ J_g \quad (24)$$

否则 $\Theta_2 = 0$ 。最后, 将 Θ_2 与 Θ_1 融合产生动作 Θ

$$\Theta = \Theta_1 + \text{null}(J_g) \Theta_2 \quad (25)$$

获得动作后, 后续其他步骤与 2.2.1 节中相应的步骤相同。本局部规划器的终止条件包含: ①检测出碰撞; ②构型超出限制, 即基座姿态扰动超出限制, 或者关节角度超出范围; ③到达目标。

目标末端位姿导引生长, 即选择离 x_{ed} 最近的点

3 仿 真

所选对象为带七自由度关节操作臂的 FFSR,其参数见表 4,D-H 参数见表 5。设置 3 个矩形障碍,质心位置、尺寸分别为:(1,1,2.8)m,2 m×1 m×1 m;(4,0,-1)m,1 m×2 m×2 m;(6,1.5,2.5)m,1 m×2 m×2 m。仿真分 2 种场景:①从初始构型到目标末端位置;②从初始构型到目标末端位姿。对①以及②,初始构型:0°;系统质心位置: $r_g [0 \ 0 \ 0] m$;关节角范围:

表 1 FFSR 的动力学以及几何参数

刚体 序号	质量/ kg	长/m * 宽/m * 高/m	转动惯量		
			I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
0	900	1×1×1	600	1 200	800
1	20	0.35×0.16×0.16	20	20	30
2	20	0.35×0.16×0.16	20	20	30
3	40	4×0.16×0.16	1	40	40
4	40	4×0.16×0.16	1	40	40
5	20	0.35×0.16×0.16	20	20	30
6	20	0.35×0.16×0.16	20	20	30
7	40	1.2×0.16×0.16	10	8	4

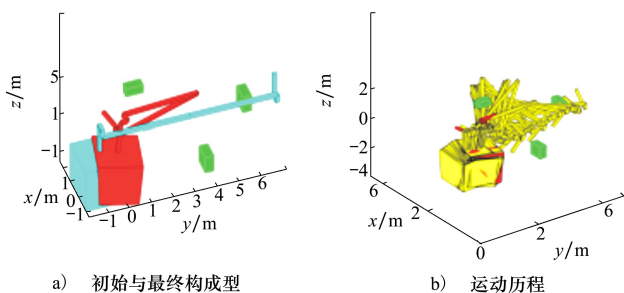


图 2 场景 1:初始构型与最终构型,从初始构型向目标末端位置的运动历程

3.2 场景 2 的结果

116 次迭代后,到达目标末端位姿,规划成功;图 4a)中,红色为最终构型,青色为初始构型。从初

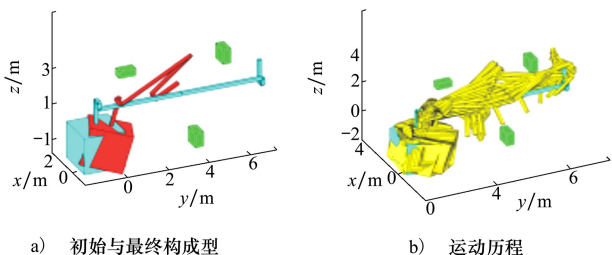


图 4 场景 2:初始构型与最终构型,从初始构型向目标末端位姿的运动历程

$\pm 300^\circ; \Psi_b = [0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]$ 。其中,对场景 1, $p_e = [0 \ 2 \ 1] m; \Psi_b$ 范围: $\pm 20^\circ; \Delta \Psi_b = 15^\circ$ 。对场景 2: $p_e = [4 \ 3 \ 1] m, \Psi_e = [50^\circ \ 60^\circ \ 70^\circ]; \Psi_b$ 范围: $\pm 30^\circ; \Delta \Psi_b = 25^\circ$ 。

表 2 FFSR 的 D-H 参数

i	α_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/(^\circ)$	d_i/m	$\theta_i/(^\circ)$
1	0	0	2.5	600
2	0	90	0.35	20
3	0	90	0.35	20
4	4	0	0	40
5	4	0	0.35	40
6	0	90	0.35	20
7	0	90	1.2	20

3.1 场景 1 的结果

36 次迭代后,FFSR 的末端到达目标位置,规划结束。如图 2a)所示,图中淡蓝色为初始构型,红色为最终构型。从初始构型到目标末端位置的运动历程如图 2b)所示,整个过程中未发生碰撞。关节角、基座姿态随时间的变化分别如图 3 所示,从图 3b)可看出,基座姿态满足取值范围限制。

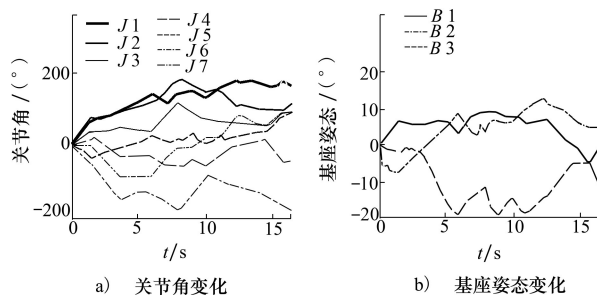


图 3 场景 1:关节角及基座姿态变化曲线

始构型向目标末端位姿的运动历程如图 4b)所示,整个过程未发生碰撞。关节角、基座姿态随时间的变化如图 5 所示,可发现基座姿态处于取值范围内。

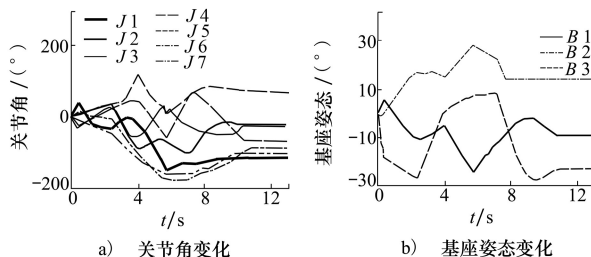


图 5 场景 2:关节角及基座姿态变化曲线

4 结 论

本文基于 GB-RRT 设计了 FFSR 无逆运动学的运动规划算法,并提出适时调节基座姿态的目标末端位姿引导局部规划器,引入参考目标基座姿态、基

座姿态误差阈值。在该局部规划器的每一次迭代中,只有相对于参考目标基座姿态误差达到阈值,才调节基座姿态,否则只调节末端位姿。该局部规划器所生成的轨迹能满足基座姿态取值限制,且具备让末端位姿误差收敛的能力,克服了 FFSR 执行机构自由度不足的问题。

参考文献:

- [1] VAFA Z, DUBOWSKY S. On the dynamics of manipulators in space using the virtual manipulator approach[C]//1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987: 579-585
- [2] VAFA Z, DUBOWSKY S. On the dynamics of space manipulators using the virtual manipulator, with applications to path planning[M]. Springer, Boston, MA, 1993: 45-76
- [3] NAKAMURA Y, MUKHERJEE R. Non-holonomic path planning of space robots via bi-directional approach[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990: 1764-1769
- [4] FERNANDES C, GURVITS L, LI Z. Near-optimal nonholonomic motion planning for a system of coupled rigid bodies[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(3): 450-463
- [5] XU W, LI C, WANG X, et al. Study on non-holonomic cartesian path planning of a free-floating space robotic system[J]. Advanced Robotics, 2009, 23(1/2): 113-143
- [6] WANG M, LUO J, WALTER U. Trajectory planning of free-floating space robot using particle swarm optimization(PSO)[J]. Acta Astronautica, 2015, 112: 77-88
- [7] WANG M, LUO J, FANG J, et al. Optimal trajectory planning of free-floating space manipulator using differential evolution algorithm[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(6): 1525-1536
- [8] YAMADA K. Arm path planning for a space robot[C]//Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993: 2049-2055
- [9] SUZUKI T, NAKAMURA Y. Planning spiral motion of non-holonomic space robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996: 718-725
- [10] MISRA G, BAI X. Task-constrained trajectory planning of free-floating space-robotic systems using convex optimization[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(11): 2857-2870
- [11] LAVALLE S M, KUFFNER J R J. Randomized kinodynamic planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400
- [12] BERTRAM D, KUFFNER J, DILLMANN R, et al. An integrated approach to inverse kinematics and path planning for redundant manipulators[C]//2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006: 1874-1879
- [13] WEGHE M V, FERGUSON D, SRINIVASA S S. Randomized path planning for redundant manipulators without inverse kinematics[C]//7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2007: 477-482
- [14] 徐文福. 空间机器人目标捕获的路径规划与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
XU Wenfu. Path planning and experiment study of space robot for target capturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese)

Non-inverse kinematics of free-floating space robot based on motion planning of sampling

ZHANG Hongwen^{1,2}, ZHU Zhanxia^{1,2}, YUAN Jianping^{1,2}

(1.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Xi'an 710072, China)

Abstract: Motion planning is one of the fundamental technologies for robots to achieve autonomy. Free-floating space robots composed manipulators and base satellite that do not actively control its position and attitude has non-holonomic characteristics, and there is a first-order differential relationship between its joint angle and the base attitude. In addition, the planning framework which first converts the goal end-effector pose to its corresponding target configuration, and then plan the trajectory from the initial configuration to the goal configuration still has the following problems: the goal configuration and the initial configuration may not be in the same connected domain. Based on the RRT framework, the motion planning of a free-floating space robot from the initial configuration to the goal end-effector pose is studied. In the algorithm design, in order to deal with the differential constraints of the free-floating space robot, and the requirement that the attitude disturbance of its base cannot exceed its limit, a control-based local planner for random configuration guiding growth of the tree and a control-based local planner for goal end-effector pose guiding growth of the tree that can adjust the attitude of the base when necessary are proposed. The former can ensure the effective exploration of the configuration space, and the latter can avoid the occurrence of singularity while ensuring that the algorithm converges quickly and the base attitude disturbance meets the constraints. The present algorithm does not need to solve the inverse kinematics, can successfully complete the planning task, and ensure that the base attitude disturbance meets the requirements. The simulation verifies the effectiveness of the algorithm.

Keywords: free-floating space robot; motion planning; motion planning of sampling; nonholonomic robot

引用格式:张红文,朱战霞,袁建平.自由漂浮空间机器人无逆运动学基于采样的运动规划[J].西北工业大学学报,2021,39(5):1005-1011

ZHANG Hongwen, ZHU Zhanxia, YUAN Jianping. Non-inverse kinematics of free-floating space robot based on motion planning of sampling[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(5): 1005-1011 (in Chinese)