

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0803

## 空间自由漂浮机器人对运动目标抓捕的路径规划

关英姿<sup>1</sup>, 宋春林<sup>1</sup>, 董惠娟<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对空间机械臂对运动目标的抓捕提出了一种分段的在线运动规划方法, 重点解决机械臂可能遮挡立体视觉相机视线的问题, 并满足抓捕时间要求. 基于扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 建立了目标运动状态估计器. 对立体视觉相机的视线遮挡约束进行了数学建模. 将机械臂向目标的接近过程分成 2 个阶段, 在 2 个阶段中分别使用多约束环境下的滚动 RRT (快速扩展随机树) 方法和能够快速接近目标的比例导引算法, 并根据对目标运动状态的估计精度自主切换运动段. 同时考虑组合体的动力学耦合特性, 在运动规划中限制了平台姿态角速度. 利用数学仿真验证了本文的目标运动状态估计方法和运动规划方法. 比例导引方法可能由于机械臂遮挡立体视觉相机观测视线而抓捕失败, 而本文的分段运动规划方法对全部仿真情况都能成功抓捕目标. 本文的分段运动规划方法能够对各个方向运动的目标进行有效的运动状态估计并快速可靠地抓捕, 避免了因遮挡立体视觉相机观测视线引起的抓捕失败. 基于目标运动状态估计的切换策略能够根据实际的目标运动情况在线自主地切换 2 个运动段, 对运动状态未知的目标具有鲁棒性.

**关键词:** 运动规划; 自由漂浮机器人; 视线遮挡约束; 比例导引; 快速扩展随机树算法

**中图分类号:** V447; TP242

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2017)-06-0803-09

### Path Planning of the Free-floating Manipulator for Capturing a Moving Target

GUAN Yingzi<sup>1</sup>, SONG Chunlin<sup>1</sup>, DONG Huijuan<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A segmented on-line motion planning method is proposed for the free-floating space manipulator capturing moving targets, mainly to settle the LOS (line of sight) blocking problem of the stereo vision system probably caused by the manipulator, and to satisfy the time requirements for the capturing. An estimator of target motion states is built based on extended Kalman filter (EKF). The LOS blocking constraint of stereo vision system is modeled. The process of approaching the target is divided into two stages. The rolling RRT (rapidly-exploring random tree) algorithm in multi-constraint environment and the proportional navigation algorithm for approaching the target quickly are used in the two stages respectively. The switching between the two stages is performed according to the estimated accuracy of the target motion autonomously. Moreover, the angular velocity of the carrier is limited in the path planning according to the dynamic coupling of the combination. Mathematical simulations are conducted to verify the estimator of target motion and the path planning method of the manipulator. The proportional navigation algorithm may fail to capture the target due to the LOS blocking of stereo cameras caused by the manipulator, while the segmented motion planning method in this paper succeeds in capturing the target in all simulation conditions. The proposed segmented motion planning method is able to estimate effectively the motion states of the target, and capture the targets moving to different directions quickly and reliably, to avoid capturing failures caused by the LOS blocking of stereo vision system. The switching strategy based on the estimation of target motion can switch autonomously between two stages according to the actual motion of the target online, and shows robustness to the targets with unknown movement states.

**Keywords:** motion planning; free-floating robot; LOS (line of sight) blocking constraint; proportional navigation; RRT (rapidly-exploring random tree) algorithm

## 1 引言 (Introduction)

在进入 21 世纪后, 每年约有 100 颗卫星发射升空, 其中大部分能够正常工作, 但仍有一小部分

在达到使用寿命前出现故障, 另外也有一些航天器由于燃料耗尽而不得不废弃<sup>[1]</sup>. 对这些航天器进行在轨维护能够降低航天成本<sup>[2]</sup>. 美国航空航天局 (NASA) 在 20 世纪 80 年代开始了基于空间机器人

的在轨服务研究<sup>[3]</sup>。空间自由漂浮机器人在大量的在轨服务和维护任务中具有很强的应用前景。自由漂浮机器人的运动规划是其自主运行的重要保证。

空间漂浮机器人一般由机械臂和平台构成,在空间无外力矩情况下,根据角动量守恒定律,机器人的机械臂和平台的运动是耦合的,机械臂的运动将引起平台运动。针对这一问题,一些研究人员研究了载体无扰动或小扰动的运动规划方法<sup>[4-6]</sup>,也有学者利用各种优化方法研究时间最短、驱动力矩最小的规划方法<sup>[7-10]</sup>。夏红伟等<sup>[11]</sup>针对自由漂浮空间机械臂系统的基座姿态扰动问题,利用混沌粒子群算法提出了最小化姿态扰动的轨迹优化策略,并与梯形规划进行了比较,其优化结果显著减小了姿态扰动,但大大增加了运动时间。李岩等<sup>[12]</sup>和郭闯强等<sup>[13]</sup>利用遗传算法研究了机械臂从初始构型到目标构型的能耗和姿态扰动最优问题。祁若龙等<sup>[14]</sup>用分段样条曲线在关节空间规划机械臂的运动,再用遗传算法求解多目标优化问题得到分段点的参数。Zhang<sup>[15]</sup>用正弦函数参数化关节角轨迹,考虑机械臂的运动约束定义目标函数然后使用模拟退火粒子群优化算法(SAPSO)计算最优轨迹。

空间机械臂所抓取的目标有固定目标和运动目标2种。相对而言,机械臂对运动目标的抓捕更困难,一方面为了方便传感器实时观测目标位置,需要添加额外的运动约束,另一方面空间机械臂的运动范围往往有限,为避免运动目标超出机械臂的可达范围,机械臂对目标的抓捕运动需要快速完成。对于自由漂浮机器人对运动目标的抓捕问题,Liu<sup>[16]</sup>利用UKF(无迹卡尔曼滤波器)建立了一个速度观测器,并规划了带有速度补偿的机械臂运动轨迹。Lampariello<sup>[17]</sup>离线建立了机械臂轨迹和目标运动的映射表,任务执行过程中查表得到合适的运动轨迹接近目标。Xu<sup>[18]</sup>使用手眼相机在考虑姿态约束和关节奇异的情况下规划了对运动目标抓捕的运动轨迹。Wang<sup>[19]</sup>使用手眼相机观测目标上已知的特征点位置,并在相机的图像平面上搭建自适应控制器使特征点的位置收敛到期望位置。

空间机械臂的工作范围通常比较局促,机械臂本身或者航天器的其他部件可能成为机械臂工作过程中的障碍物。此外,航天器上一些传感器也可能给机械臂的运动增加约束。针对空间机械臂的避障问题,Liu<sup>[20]</sup>采用人工势场方法在关节空间内研究了机械臂的避障运动规划,但该方法需要在关节空间内建立障碍物的模型,对高自由度机械臂难以应用。Zhou<sup>[21]</sup>利用蚁群算法在笛卡尔空间内规划了

机械臂末端执行机构的无碰撞最短路径。Rybus<sup>[22]</sup>以平台位姿和机械臂的末端位置为状态量,利用RRT算法规划了包含2个关节的平面内自由漂浮机械臂关节轨迹。谢碧云等<sup>[23]</sup>针对7自由度机械臂提出了一种双向RRT(rapidly-exploring random tree)算法用于有冗余自由度的机械臂系统规避障碍物的运动规划,算法需要目标位置作为输入,然后通过逆解机械臂运动学获得多组关节状态,再建立双向搜索树,计算量巨大,而且不能适应运动目标。杨明远等<sup>[24]</sup>针对一种确定的机械臂构型和球形障碍物,对每个臂杆依次分析了碰撞条件,并据此提出了关节空间的A\*算法规划从初始构型到目标构型的运动轨迹。王悦等<sup>[25]</sup>针对避障问题提出了一种关节空间折线路径规划方法,然后用多项式函数分段平滑折线轨迹。但该方法在平滑曲线时需要人工干预以合理地划分运动段。

机械臂需要依赖传感器对目标的观测规划运动轨迹,而机械臂的运动又可能遮挡传感器对目标的观测。以往针对空间机械臂抓捕目标的运动规划研究忽视了机械臂运动对传感器测量的遮挡问题。对于传感器观测约束的问题,本文以立体视觉相机为例,建立其对目标观测的视线遮挡的数学描述。将视线遮挡约束作为障碍物利用滚动RRT算法在考虑视线遮挡约束的前提下规划机械臂的路径。

另外此前关于空间机械臂的避障运动规划研究中通常隐含假设障碍物位置已知且静止,实际上障碍物的位置也需要根据传感器的测量值在线计算,因此很多避障运动规划的实用性不足。本文根据目标的位置测量值实时计算描述观测约束的障碍物位置。此外为了减轻运动规划对传感器测量值的依赖并避免观测约束限制机械臂对目标的接近,本文搭建了基于EKF的目标运动状态估计器,实时估计目标的运动速度及其误差,可以在无观测值时预测目标的运动状态。这样就可以在估计误差允许的情况下忽略视线遮挡约束以避免该约束限制机械臂对目标的接近。

机械臂抓捕静止目标时对抓捕时间要求不严格,而对于运动目标的抓捕问题,为了避免目标离开机械臂的工作范围,在设计规划方案时,要考虑机械臂对目标接近过程的时间约束。而适用于约束环境的避障运动规划方法输出的轨迹比较保守,难以满足对运动目标抓捕的时间约束。为此,本文针对空间中的运动状态未知的目标,考虑立体视觉相机对目标的观测约束,提出一种包含目标运动观测

器在内的在线运动规划方法. 整个运动规划方案使用 2 种运动规划方法和基于 EKF 的目标运动状态估计器, 兼顾立体视觉相机对目标的观测遮挡约束和对运动目标抓捕的时间约束.

## 2 问题描述 (Problem statement)

### 2.1 问题简化

本文主要关注机械臂的运动规划问题, 将目标简化成一个均质圆球, 末端执行机构简化为一个能够包络目标的手爪. 只研究使机械臂末端接近目标的运动规划方法, 而不考虑末端执行机构抓捕目标的机械捕获过程. 如图 1 所示, 6 自由度空间机械臂安装在平台上, 机械臂每个关节具有 1 个自由度. 平台上安装有立体视觉相机, 可以对目标进行观测. 抓捕开始时, 机械臂与目标的相对位置和机械臂各关节的状态如图 1 所示. 机械臂抓捕目标过程中, 不对平台姿态施加控制. 对于尺寸较小的自由漂浮机械臂, 可以认为机械臂对目标的抓捕过程很短, 在抓捕过程内忽略机械臂-平台组合体和目标受到的外力和外力矩. 要求任务过程中平台姿态角速度不超过 0.5°/s.

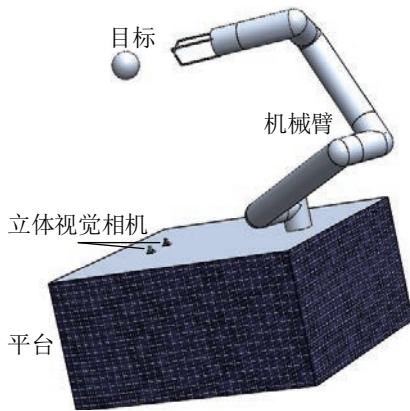


图 1 任务开始时刻机械臂与目标示意图

Fig.1 The original positions of the target and the manipulator

### 2.2 自由漂浮机械臂运动学模型

本节对 6 自由度自由漂浮机器人建立数学模型. 在此仅列出一些重要结论, 具体的推导过程见文 [18]. 机械臂末端执行机构的运动可以写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \boldsymbol{\omega}_e \end{bmatrix} = \mathbf{J}_b \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_e^0 \\ \boldsymbol{\omega}_e^0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式右侧第 1 项为平台运动  $\mathbf{v}_0$  和  $\boldsymbol{\omega}_0$  引起的机械臂末端牵连速度和角速度,  $\mathbf{J}_b$  是与平台相关的雅可比矩阵, 第 2 项为机械臂末端相对于平台的速度  $\mathbf{v}_e^0$  和角速度  $\boldsymbol{\omega}_e^0$ , 可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e^0 \\ \boldsymbol{\omega}_e^0 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_m \dot{\boldsymbol{\Theta}} \quad (2)$$

其中,  $\dot{\boldsymbol{\Theta}}$  是关节角速度,  $\mathbf{J}_m$  为与机械臂运动状态相关的雅可比矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_m &= \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_1) & \cdots & \mathbf{k}_6 \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_6) \\ \mathbf{k}_1 & \cdots & \mathbf{k}_6 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{mv} \\ \mathbf{J}_{m\omega} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \end{aligned} \quad (3)$$

$\mathbf{J}_m$  的 2 个子矩阵  $\mathbf{J}_{mv}$  和  $\mathbf{J}_{m\omega}$  分别描述末端线速度和角速度与机械臂关节角速度的关系.  $\mathbf{k}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) 为表征关节转动方向的单位矢量,  $\mathbf{p}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) 为各个关节转动中心的位置矢量,  $\mathbf{p}_e$  为机械臂末端执行器位置矢量.

用下面的比例方程描述自由漂浮机器人的角动量守恒和动量守恒方程.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} = -\mathbf{H}_b^{-1} \mathbf{H}_{bm} \dot{\boldsymbol{\Theta}} = \mathbf{J}_{bm} \dot{\boldsymbol{\Theta}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{bm,v} \\ \mathbf{J}_{bm,\omega} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\Theta}} \quad (4)$$

对于 6 自由度机械臂,  $\mathbf{J}_{bm}$  是一个  $6 \times 6$  阶的矩阵, 可以拆分成 2 个  $3 \times 6$  阶的子矩阵  $\mathbf{J}_{bm,v}$  和  $\mathbf{J}_{bm,\omega}$ .

令目标在惯性系内的速度矢量为  $\mathbf{v}_t$ , 而立体视觉相机测量值为目标相对于平台的位置在平台坐标系下的分量  ${}^0\mathbf{r}_{0t}$ , 其中矢量左上标的 0 表示该矢量在平台坐标系下的分量. 根据牛顿-欧拉方程,  ${}^0\mathbf{r}_{0t}$  对时间的导数为

$${}^0\dot{\mathbf{r}}_{0t} = -{}^0\boldsymbol{\omega}_0 \times {}^0\mathbf{r}_{0t} + \mathbf{C}(\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_0) \quad (5)$$

其中矩阵  $\mathbf{C}$  是从惯性坐标系到平台坐标系坐标变换矩阵, 可根据平台姿态传感器测量值计算.

## 3 基于 EKF 的目标运动状态估计 (Estimation of target motion states based on EKF)

选定状态量为  $\mathbf{x} = [{}^0\mathbf{r}_{0t}^T \ \mathbf{v}_t^T]^T$ , 根据机械臂运动学模型建立滤波方程, 得到如下所示的系统状态方程和观测方程:

$$\begin{cases} {}^0\dot{\mathbf{r}}_{0t} = -[{}^0\boldsymbol{\omega}_{0 \times}] {}^0\mathbf{r}_{0t} + \mathbf{C}(\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_0) \\ \dot{\mathbf{v}}_t = 0 \\ \mathbf{y} = {}^0\mathbf{r}_{0t} \end{cases} \quad (6)$$

其中  ${}^0\omega_{0\times}$  是向量  ${}^0\omega_0$  的叉乘矩阵, 定义为

$${}^0\omega_{0\times} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

严格来说, 上面的状态方程是一个时变系统, 平台的转动速度、平动速度和姿态都受到机械臂运动的影响. 然而, 由于一般情况下平台的质量相对于机械臂都较大, 平台的角速度、速度和姿态比较小且变化不快. 为了方便计算, 假设每次计算时平台的运动参数瞬时不变. 可以证明上面的系统状态是完全能观测的, 那么就可以搭建滤波器用以估计目标的运动速度. 将上述连续方程离散化, 基于扩展卡尔曼滤波建立如下所示的滤波方程:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k|k), t_k) \\ \mathbf{P}(k+1|k) &= \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{V}(k) \\ \mathbf{v} &= \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k+1|k), k+1) \\ \mathbf{S} &= \mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{W}(k+1) \\ \mathbf{R} &= \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{S}^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) &= \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{R}\mathbf{v} \\ \mathbf{P}(k+1|k+1) &= \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{R}^T \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{f}(\cdot)$  是上面的状态方程,  $\mathbf{F}$  为状态矩阵, 根据平台角速度的测量值计算,  $\mathbf{H}$  为观测矩阵,  $\mathbf{V}$  是系统噪声方差矩阵,  $\mathbf{W}$  是观测噪声方差矩阵, 分别根据平台惯性传感器精度和立体视觉相机精度选定. 在任务进行时, 将立体视觉相机对目标的观测值代入滤波器的状态更新步骤可以估计目标在惯性系内的速度. 当目标离开立体视觉相机的观测范围或者机械臂遮挡相机视线导致立体视觉相机无法观测目标时, 可以将估计的目标运动速度代入状态预测方程中估算目标相对于平台的位置.

#### 4 机械臂运动规划方法 (Motion planning method of the manipulator)

对于运动目标的抓捕问题, 由于目标可能自己离开机械臂的工作空间, 导致抓捕失败. 这样, 对于机械臂的运动规划问题来说, 相当于有一个未量化的时间约束, 对于已知运动速度的目标, 可以利用优化方法得到时间最优的机械臂关节运动轨迹. 而对于速度未知的目标, 需要利用立体视觉相机在线观测目标的运动状态, 这样在运动规划中就要考虑相机的视线遮挡约束, 并在相机观测视线被遮挡时估计目标的位置. 第3节中建立的目标运动状态

估计器可以利用持续的相机观测值估计目标的运动速度, 并据此在相机无法观测目标的情况下估算目标的位置. 但是 EKF 的收敛需要一定的时间, 这样在任务初期需要保证相机对目标的观测不受干扰, 采用基于 RRT 算法的避障运动规划方法在保证相机稳定观测目标的前提下接近目标, 但是该方法输出的机械臂运动轨迹接近目标的速度较慢, 不能满足抓捕运动目标任务对时间的约束. 为此, 在任务后期采用能够快速接近目标的比例导引方法计算关节角指令. 根据目标运动状态的估计精度在线自主进行运动段的切换. 规划方法的基本流程如图2所示.

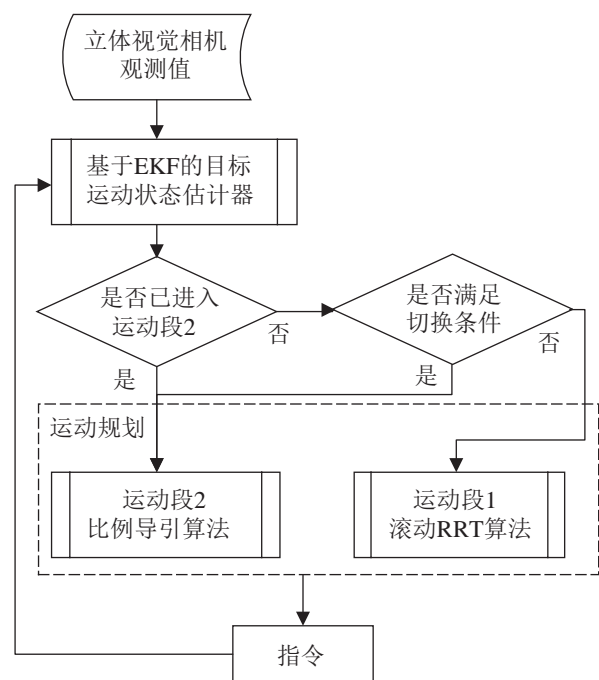


图2 规划方案流程

Fig.2 Scheme of the path planning

目标运动状态估计的精度随着立体视觉相机对目标的观测次数增加而提高, 任务开始时不能满足切换条件, 因此进入运动段1使用滚动 RRT 算法规划满足相机视线遮挡约束的安全路径. 随着对目标观测次数的增多, 状态估计器的精度足以在此后的抓捕过程中完全替代立体视觉相机, 在能够满足切换条件后进入运动段2, 采用比例导引方法尽快接近目标直至抓捕.

根据式(4)可知, 机械臂关节角速度会引起平台的姿态运动. 为了不影响航天器通讯系统和星敏感器的定向需求, 要避免产生过大的姿态扰动, 应对规划输出的关节角速度加以限制. 根据组合体的运动学模型(4)在2个运动段的运动规划中分别采取措施限制姿态扰动.

#### 4.1 视线遮挡约束建模

立体视觉相机由 2 个相机组成, 其位置在平台上固定, 目标位置由相机测得. 这样 3 个点可以确定 1 个平面, 将其定义为视线平面, 如图 3 所示. 假设任务开始时整个机械臂都位于视线平面的同一侧. 为保证机械臂不干涉立体视觉相机对目标的观测, 要求机械臂机体不能与视线平面相交, 为此, 在靠近机械臂一侧建立与视线平面平行的平面为边界平面, 两平面间距离为  $d_{\text{vision}}$ , 如图 3 所示. 假设机械臂各个臂杆均为半径相等的圆柱 (如果不是圆柱可以选取实际形状的外包络圆柱), 各个圆柱轴线连成的折线段定义为机械臂的中心线.  $d_{\text{vision}}$  根据机械臂臂杆半径和目标大小选定. 这样只要机械臂的中心线位于边界平面远离视线平面的一侧即可保证机械臂各部分与视线平面均不相交.

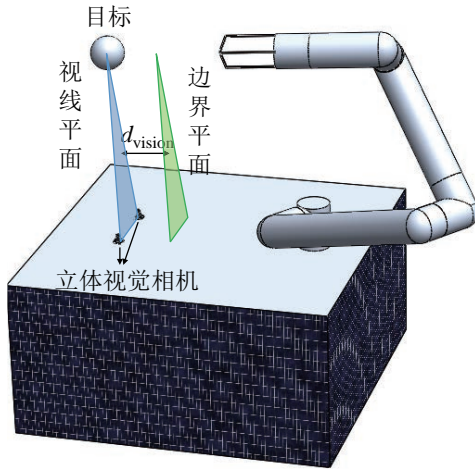


图 3 视线遮挡约束

Fig.3 The constraint of the sight-of-light blocking

把机械臂等效成在空间内的一根折线段, 根据立体几何原理, 只需要计算折线段各个端点与边界平面的位置关系就可以确定整条折线段与该平面的位置关系. 机械臂各关节及机械臂末端到视线平面的距离可由下式计算:

$$d_i = \frac{[({}^0\mathbf{r}_{\text{left}} - {}^0\mathbf{r}_t) \times ({}^0\mathbf{r}_{\text{right}} - {}^0\mathbf{r}_t)] \cdot ({}^0\mathbf{p}_i - {}^0\mathbf{r}_t)}{|({}^0\mathbf{r}_{\text{left}} - {}^0\mathbf{r}_t) \times ({}^0\mathbf{r}_{\text{right}} - {}^0\mathbf{r}_t)|}, \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6, e$$

其中:  ${}^0\mathbf{r}_{\text{left}}$  和  ${}^0\mathbf{r}_{\text{right}}$  为两立体视觉相机中心在平台体坐标系下的位置矢量,  ${}^0\mathbf{r}_t$  为目标质心在平台体坐标系下的位置矢量,  ${}^0\mathbf{p}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6, e$ ) 为机械臂各关节和机械臂末端在平台体坐标系下的位置矢量. 那么视线遮挡约束可以表示成下面的不等式约束:

$$d_i > d_{\text{vision}}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, e \quad (10)$$

#### 4.2 滚动 RRT 算法

快速搜索随机树 (RRT) 算法是一种常用的多约束环境运动规划方法. 参考文 [26] 中应用于移动机器人的滚动算法, 以反复的局部规划替代全局规划. 每次计算时从机械臂的当前状态出发建立局部搜索树  $T$ , 搜索树  $T$  上的每个节点  $N_i = \{\Theta, f_{\text{obj}}, p\}$  包含 1 组关节角  $\Theta$ 、节点的估价函数值  $f_{\text{obj}}$  及其父节点的指针  $p$ , 最后输出局部搜索树上最优节点中的关节角. 局部搜索树的建立步骤如下:

- (1) 以当前关节角  $\Theta_{\text{now}}$  为根节点初始化搜索树  $T$ ,  $T_{\text{root}} = N_{\text{now}} = \{\Theta_{\text{now}}, f_{\text{obj}}(\Theta_{\text{now}}), 0\}$ .
- (2) 选择一组随机关节角  $\Theta_{\text{random}}$ , 并在  $T$  上选择与  $\Theta_{\text{random}}$  最近的节点  $N_{\text{near}} = \arg \min_{N_i \in T} |N_i \cdot \Theta - \Theta_{\text{random}}|$ .
- (3) 利用平台姿态角速度限制  $\omega_{\text{lim}}$  根据式 (4) 确定最大关节角速度, 在  $\Theta_{\text{random}}$  和  $\Theta_{N_{\text{near}}}$  之间找到一个能够从  $\Theta_{N_{\text{near}}}$  到达的关节角  $\Theta_{\text{new}}$ .
- (4) 判断  $\Theta_{\text{new}}$  是否满足上述视线遮挡约束, 如果是, 继续步骤 (5); 如果否, 回到步骤 (2).
- (5) 创建新节点  $N_{\text{new}} = \{\Theta_{\text{new}}, f_{\text{obj}}(\Theta_{\text{new}}), p \rightarrow N_{\text{near}}\}$ , 并添加到搜索树  $T$  上, 如果树上节点数达到上限, 则停止计算; 否则, 回到步骤 (2).

参考人工势场法<sup>[27]</sup>的思想定义如式 (11) 所示的估价函数.

$$f_{\text{obj}}(\Theta) = \begin{cases} \lambda |\mathbf{r}_{\text{et}}| + (1 - \lambda) |\Phi_{\text{et}}|, & \text{if } |\mathbf{r}_{\text{obs}}| > d_{\text{dea}} \\ \lambda |\mathbf{r}_{\text{et}}| + (1 - \lambda) |\Phi_{\text{et}}| + \frac{k}{|\mathbf{r}_{\text{obs}}|}, & \text{if } |\mathbf{r}_{\text{obs}}| \leq d_{\text{dea}} \end{cases} \quad (11)$$

函数由引力和斥力 2 部分构成. 考虑运动的快速性, 仅在机械臂到约束平面的最近距离小于某一给定阈值  $d_{\text{dea}}$  时, 斥力部分才起作用. 在搜索树上找到最优节点, 再利用节点中的父节点指针上溯至根节点  $N_{\text{now}}$ , 即可得到当前窗口内的一条以当前关节角  $\Theta_{\text{now}}$  为起点的局部最优路径.

#### 4.3 比例导引算法

比例导引算法在一些文献中也称为笛卡儿规划方法. 计算过程如下所示:

$${}^0\mathbf{r}_{\text{et}} = {}^0\mathbf{r}_t - {}^0\mathbf{p}_e \quad (12)$$

$${}^0\Phi_{\text{et}} = \arccos \frac{{}^0\mathbf{k}_e \cdot {}^0\mathbf{r}_{\text{et}}}{|{}^0\mathbf{r}_{\text{et}}|} \times ({}^0\mathbf{k}_e \times {}^0\mathbf{r}_{\text{et}}) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} {}^0\mathbf{v}_{ed}^0 \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_{ed}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_t & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{r}_{et} \\ {}^0\boldsymbol{\Phi}_{et} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}}_d = \mathbf{J}_m^{-1} \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{v}_{ed}^0 \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_{ed}^0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  ${}^0\mathbf{r}_{et}$  为目标相对于机械臂末端的位置矢量;  ${}^0\boldsymbol{\Phi}_{et}$  为机械臂末端执行器相对于目标的指向偏差矢量,  ${}^0\mathbf{k}_e$  是描述机械臂末端执行机构轴线方向的单位向量;  $\mathbf{K}_t$ 、 $\mathbf{K}_r$  为比例导引系数矩阵. 根据组合体的运动学模型 (4), 可以估计关节角速度  $\dot{\boldsymbol{\Theta}}_d$  引起的平台姿态角速度为

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_0 = \mathbf{J}_{bm,\omega} \dot{\boldsymbol{\Theta}}_d \quad (16)$$

矩阵  $\mathbf{J}_{bm,\omega}$  与组合体的质量特性和机械臂的关节状态有关, 在瞬时可以认为平台姿态角速度与关节角速度成比例. 考虑到平台的姿态稳定需要, 这里对姿态角速度加以限制. 当平台姿态角速度超过最大姿态角速度限制  $\omega_{lim}$  时, 利用式 (17) 调整规划的关节角速度:

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}}_d = \dot{\boldsymbol{\Theta}}_d \frac{\omega_{lim}}{|\hat{\boldsymbol{\omega}}_0|}, \quad \text{if } |\hat{\boldsymbol{\omega}}_0| > \omega_{lim} \quad (17)$$

#### 4.4 切换策略

由于比例导引算法不能保证对目标的观测, 假设切换后立体视觉相机就无法对目标进行观测. 实际上, 此时机械臂未必能够遮挡视线, 该假设是保守的. 在立体视觉相机无法观测的情况下, 上文中的目标运动观测器将输出状态预测的结果. 而由于对目标速度的估计存在误差, 相对位置估计值  ${}^0\hat{\mathbf{r}}_{0t}$  的误差将随时间推移而逐渐累积. 希望切换时机满足下述条件: 从切换开始到对目标接近完成时, 速度估计误差累积的位置估计误差在末端执行机构的可控范围内. 利用上文中的目标运动状态估计结果可以确定切换时机.

首先计算速度估计误差. 目标运动状态观测器中的协方差矩阵  $\mathbf{P}$  可以表示系统状态的估计误差大小. 可以用速度矢量对应的方差项开平方得到近似的速度误差矢量:

$$\delta\hat{\mathbf{v}}_t = \begin{bmatrix} \sqrt{P_{44}} & \sqrt{P_{55}} & \sqrt{P_{66}} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

然后计算从当前时刻开始到完成对目标的接近所需的时间. 根据状态估计器中的状态方程能够估算相对位置的变化率  ${}^0\hat{\mathbf{r}}_{0t}$ , 再根据当前关节角速度利用式 (2) 可以计算当前机械臂末端的速度在平台体坐标系内的分量  ${}^0\mathbf{v}_e$ , 这样可以按式 (19) 估算完成抓捕任务所需的时间:

$$\hat{t}_{cap} = \frac{|{}^0\mathbf{r}_{et}|}{|{}^0\mathbf{v}_e - {}^0\hat{\mathbf{r}}_{0t}|} \quad (19)$$

如果在  $\hat{t}_{cap}$  时间内速度估计误差产生的位置误差在末端执行机构的可控范围内, 就进行切换. 切换条件的数学描述为

$$|\delta\hat{\mathbf{v}}_t| \hat{t}_{cap} < d_e \quad (20)$$

其中  $d_e$  要根据末端执行机构和目标的机械特性选取, 本文中选为 15 mm. 显然, 切换时机与速度估计误差、机械臂末端与目标的距离、目标运动速度和机械臂末端运动速度有关. 在运动段 1 的运动规划中, 每次调用运动规划算法都判断当前状态是否满足式 (21). 如果满足, 说明状态估计的结果足够精确, 足以在接下来的时间内不依赖传感器的观测值指引机械臂的运动, 那么切换到运动段 2; 否则, 继续运动段 1.

## 5 数学仿真 (Mathematical simulations)

关于自由漂浮机械臂的实验难以在地面模拟, 因此利用数学仿真验证上面的方法. 仿真回路如图 4 所示. 图中目标运动状态估计模块运行前文中的滤波器以估计目标的运动状态; 规划器模块运行前文设计的规划方法, 得到的角速度指令作为姿态解算模块的输入; 姿态解算模块根据角动量守恒定律和动量守恒定律计算平台由于机械臂运动而产生的姿态角和位移; 目标运动发生器模块输出目标在惯性系中的位置; 视觉系统观测值模拟器根据平台姿态角计算立体视觉相机在惯性系内的方位, 再结合目标在惯性系中的位置, 模拟目标在平台体坐标系下的位置.

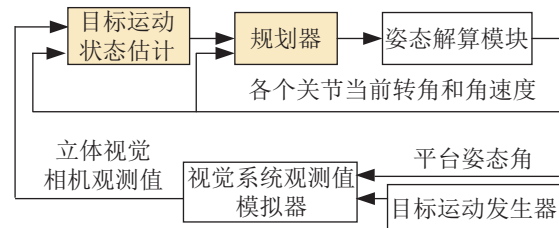


图4 仿真回路图

Fig.4 Chart of the simulation loop

选取目标的初始位置和速度如图 5 所示. 目标初始位置为机械臂前方 300 mm 处, 目标沿着机械臂与目标的连线方向远离机械臂运动, 速度大小为 10 mm/s. 立体视觉相机的测量误差服从  $\sigma = 2$  mm 的正态分布. EKF 状态量中相对位置的初值为首次观测的目标位置, 状态量中速度初值为  $[0, 0, 0]^T$ . 仿真中, 每隔 0.05 s 进行 1 次目标运动状态估计和机械臂运动规划.

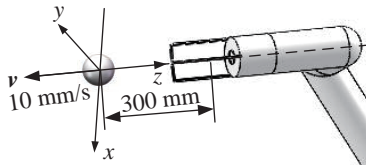


图 5 目标初始状态

Fig.5 The initial state of the target

经过仿真计算, 机械臂在 9.35 s 时从运动段 1 切换到运动段 2, 得到的目标速度估计值为  $[-0.148, -0.536, -8.455]$  mm/s, 速度估计误差为  $[0.144, 0.536, -1.455]$  mm/s. 在 14 s 时机械臂末端接近到目标附近 20 mm 范围内.

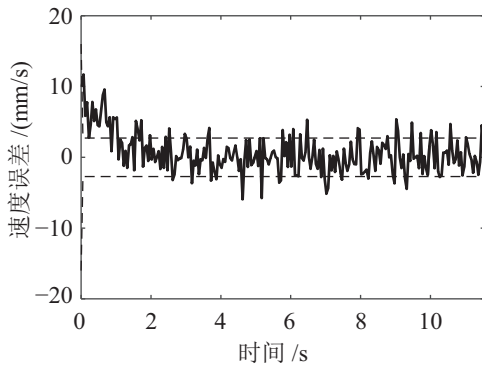


图 6 沿着 z 轴的速度估计误差曲线

Fig.6 Velocity estimation error in z axis

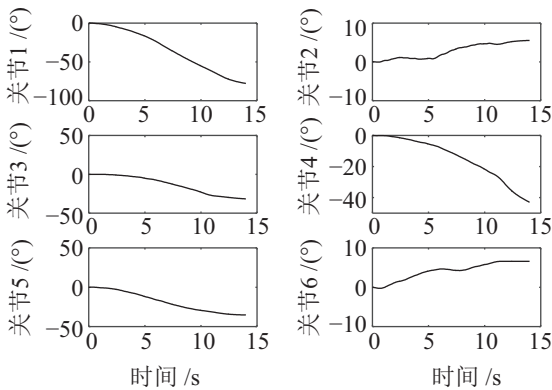


图 7 关节角曲线

Fig.7 Angles of the joints

图 6 中的实线是 z 轴方向上速度估计误差曲线, 其中虚线表示协方差矩阵对应项的平方根  $\sqrt{P_{66}}$ , 仿真开始时, 估计器中速度估计的初值为 0, 而目标以 10 mm 的速度运动, 因此初始估计误差为 10 mm/s, 随着相机对目标的持续观测, 估计误差逐渐减小. 目标在另外 2 个方向上的运动速度为 0, 因此估计误差一直在 0 附近. 图 7 是运动规划得到的机械臂关节角曲线, 图 8 是机械臂关节角速度曲线, 图 9 是由机械臂运动引起的平台姿态扰动角速度和姿态扰动角曲线, 图 10 是机械臂末端与目标

的相对位置曲线. 由图可知, 上文的运动规划方法能够输出平滑的关节角轨迹, 机械臂运动过程中对平台的姿态扰动角不超过  $5^\circ$ , 姿态扰动角速度不超过  $0.5^\circ/s$ .

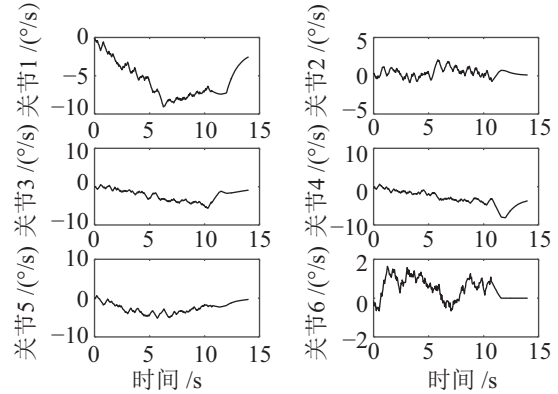


图 8 关节角速度曲线

Fig.8 Angular velocity of the joints

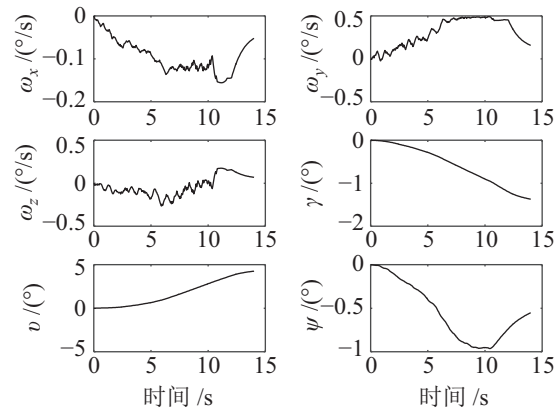


图 9 扰动角速度和姿态角曲线

Fig.9 Disturbed angular velocity and attitude angles

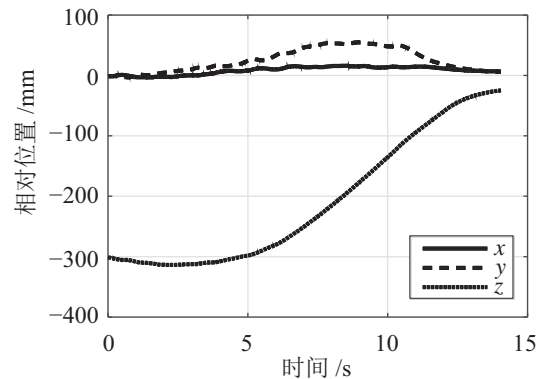


图 10 机械臂末端与目标的相对位置

Fig.10 Relative position between the end-effector of the manipulator and the target

为验证算法的可靠性, 对不同速度的目标进行蒙特卡洛打靶仿真. 选定初始条件如下: 目标在机械臂末端执行器正前方 300 mm 处. 立体视觉相机测量的目标 3 维位置误差服从  $\sigma = 2$  mm 的正态

分布. 分别使用本文的运动规划方法和文[18]中采用的基于比例导引方法的目标抓捕运动规划方法进行1000次数学仿真. 仿真中目标运动速度按下面的方式随机选取: 目标的运动速度大小服从均值为10 mm/s、标准差为1 mm/s的正态分布, 目标的运动方向角 $\alpha$ 和 $\beta$ 的定义如图11所示, 在 $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ ,  $0 \leq \beta \leq 360^\circ$ 范围内按均匀分布随机选择. 统计结果如表1所示.

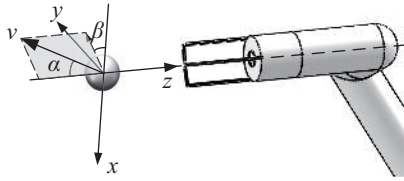


图11 目标运动方向定义

Fig.11 Direction of target motion

表1 仿真结果

Tab.1 Simulation results

运动段切换时间	3.2s~18.15s
运动段切换平均时间	7.78s
抓捕完成时间	7.85s~28.6s
抓捕完成平均耗时	13.08s
速度估计误差大小平均值	1.343 mm/s
平均姿态扰动角 $[\gamma, \theta, \psi]$	$[-0.92^\circ, 3.72^\circ, -0.17^\circ]$

根据仿真结果, 上述方法能够在19s内得到目标运动状态较为准确的估计结果, 足以在接下来的运动规划中不采用传感器的观测值. 目标速度估计误差的大小约为1.3 mm/s, 该数值主要受限于立体视觉相机的测量精度, 对于更高精度的传感器, 可以得到更为精确的速度估计和更早的切换时间. 机械臂末端在29s内接近到目标附近20mm范围内, 平均耗时为15.33s. 机械臂运动引起的平均姿态扰动角各轴均不超过 $5^\circ$ .

作为对比, 对上面1000个仿真条件使用文[18]中的比例导引方法不考虑相机视线遮挡约束对运动目标进行路径规划仿真. 在运动过程中, 采用EKF估计目标位置. 抓捕成功条件为末端执行器距离目标小于20mm, 并将仿真时间限定在70s内, 如果70s内机械臂末端未能抓捕目标则视为抓捕失败. 在1000次仿真中, 有143次抓捕失败. 可见比例导引方法对于大部分仿真情况都能成功抓捕, 因此该方法被广泛用于机械臂运动规划研究和工程实践中. 但是由于算法中未考虑相机的视线遮挡约束, 机械臂可能在滤波器收敛之前遮挡相机视线, 降低此后对目标位置的预测精度, 致使机械臂不能朝向

正确的方向运动. 相比之下, 本文利用RRT算法规划了考虑相机视线遮挡约束的运动轨迹, 并根据滤波器的收敛情况在线进行运动段切换保证了滤波器收敛之前机械臂都不会遮挡相机对目标的观测, 在1000次仿真中机械臂均能成功抓捕目标, 有效避免了机械臂遮挡相机观测导致的抓捕失败.

## 6 结论 (Conclusion)

本文建立了空间自由漂浮机械臂的运动学模型和立体视觉相机的视线遮挡约束, 基于EKF提出了空间中自由运动目标的运动状态估计方法, 利用滚动RRT算法和比例导引方法提出了一种分段运动规划方法, 并设计了一种基于状态估计精度的运动段自主切换策略. 从数学仿真中可以看出, 运动状态估计器能够快速准确地估计目标的运动状态, 分段运动规划方法能够快速可靠地抓捕朝各个方向运动的目标, 且产生的平台姿态扰动角不超过 $5^\circ$ . 通过与比例导引方法的对比仿真, 本文引入RRT算法建立的分段规划方法解决了机械臂遮挡相机导致抓捕失败的问题. 本文利用对目标运动状态的估计精度在线进行运动段切换, 使运动规划方法具有对未知运动目标的鲁棒性. 本文研究针对空间中自由运动的球状目标进行, 下一步将扩展到针对自旋非合作卫星的在线抓捕运动规划问题.

## 参考文献 (References)

- [1] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 68(8): 1-26.
- [2] Donald M W. On-orbit servicing of space systems[M]. Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 1993.
- [3] Miller R, Minsky M, Smith D. Space applications of automation, robotics and machine intelligence systems (ARAMIS), vol.1: Executive summary[R]. Washington DC, USA: NASA, 1982.
- [4] Dubowsky S, Torres M A. Path planning for space manipulators to minimize spacecraft attitude disturbances[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 1991: 2522-2528.
- [5] Huang P, Chen K, Xu Y. Optimal path planning for minimizing disturbance of space robot[C]//International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [6] Ioannis T, Evangelos P. On point-to-point motion planning for underactuated space manipulator systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(2): 122-131.
- [7] Devendra P G, Manish K. Optimization techniques applied to multiple manipulators for path planning and torque minimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002, 15(3/4): 241-252.
- [8] Gasparetto A, Zanotto V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(4): 455-471.



- [9] Xu W, Li C, Liang B, et al. The Cartesian path planning of free-floating space robot using particle swarm optimization[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(3): 301-331.
- [10] Liu Y, Tan C, Sun H, et al. Multi-objective trajectory optimization for space manipulator with multi-constraints[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1542-1547.
- [11] 夏红伟, 翟彦斌, 马广程, 等. 基于混沌粒子群优化算法的空间机械臂轨迹规划算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(2): 211-216.
- Xia H W, Zhai Y B, Ma G C, et al. Path planning algorithm of space manipulator based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(2): 211-216.
- [12] 李岩, 蔡远文. 基于遗传算法的空间自由漂浮机械臂系统运动规划[J]. 航天控制, 2012, 30(1): 40-48.
- Li Y, Cai Y W. The motion planning for free flying space manipulator based on genetic algorithm[J]. Aerospace Control, 2012, 30(1): 40-48.
- [13] 郭闯强, 倪风雷, 刘宏. 多目标位姿约束下空间机器人载体姿态扰动优化[J]. 空间科学学报, 2015, 35(2): 230-236.
- Guo C Q, Ni F L, Liu H. Spacecraft attitude disturbance optimization of space robot under multi-position restraint[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(2): 230-236.
- [14] 祁若龙, 周维佳, 王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J]. 机器人, 2014, 36(3): 263-270.
- Qi R L, Zhou W J, Wang T J. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J]. Robot, 2014, 36(3): 263-270.
- [15] Zhang Q, Wang L, Zhou D S. Trajectory planning of 7-DOF space manipulator for minimizing base disturbance[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(2): No.44.
- [16] Liu H, Liang B, Wang X, et al. Autonomous path planning and experiment study of free-floating space robot for spinning satellite capturing[C]//13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1573-1580.
- [17] Lampariello R, Hirzinger G. Generating feasible trajectories for autonomous on-orbit grasping of spinning debris in a useful time[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 5652-5659.
- [18] Xu W, Liu Y, Liang B, et al. Autonomous path planning and experiment study of free-floating space robot for target capturing[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2008, 51(3): 303-331.
- [19] Wang H S, Guo D J, Xu H, et al. Eye-in-hand tracking control of a free-floating space manipulator[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(4): 1855-1865.
- [20] Liu S, Zhang Q, Zhou D. Obstacle avoidance path planning of space manipulator based on improved artificial potential field method[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C (Mechanical, Production, Aerospace and Marine Engineering), 2014, 95(1): 31-39.
- [21] Zhou D, Wang L, Zhang Q. Obstacle avoidance planning of space manipulator end-effector based on improved ant colony algorithm[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1-13.
- [22] Rybus T, Seweryn K. Application of rapidly-exploring random trees (RRT) algorithm for trajectory planning of free-floating space manipulator[C]//International Workshop on Robot Motion and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 91-96.
- [23] 谢碧云, 赵京, 刘宇. 基于快速扩展随机树的7R机械臂避障达点运动规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 63-69.
- Xie B Y, Zhao J, Liu Y. Motion planning of researching point movements for 7R robotic manipulators in obstacle environment based on rapidly-exploring random tree algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 63-69.
- [24] 杨明远, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 七自由度空间机械臂避障路径规划方法[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 65-71.
- Yang M Y, Sun H X, Jia Q X, et al. Research on path planning for 7-DOF space manipulator to avoid obstacle[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 65-71.
- [25] 王悦, 贾英宏, 徐世杰. 冗余空间机械臂粗捕获段无碰撞轨迹规划算法[J]. 中国空间科学技术, 2012(3): 49-56.
- Wang Y, Jia Y H, Xu S J. Collision-free motion planning algorithm for redundant space manipulators during coarse target capturing[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012(3): 49-56.
- [26] 康亮, 赵春霞, 郭剑辉. 基于模糊滚动RRT算法的移动机器人路径规划[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 642-648.
- Kang L, Zhao C X, Guo J H. Path planning based on fuzzy rolling rapidly exploring random tree for mobile robot[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 34(5): 642-648.
- [27] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1985, 1(5): 500-505.

### 作者简介:

关英姿 (1968-), 女, 博士, 教授. 研究领域: 航天器动力学建模与仿真, 光学目标仿真与测试.

宋春林 (1990-), 男, 博士生. 研究领域: 机械臂运动规划, 无人机导航与控制.

董惠娟 (1968-), 女, 博士, 教授. 研究领域: 油井监测技术及石油机械设备, 光学目标仿真与测试.