

# 空间机器人捕获运动目标的协调规划与控制方法

徐文福<sup>1,2</sup> 李成<sup>1</sup> 梁斌<sup>1</sup> 刘宇<sup>1</sup> 强文义<sup>3</sup>

**摘要** 针对目标以任意轨迹运动且其轨迹可能与“有保证工作空间”不相交的问题,提出了空间机器人捕获运动目标的协调规划与控制方法. 首先,根据手眼视觉测量数据,预测目标的运动路径,由此确定空间机器人对目标的最优交会姿态及最佳捕获臂型;其次,规划基座姿态及机械臂关节角的轨迹;最后,采用协调控制的方法,实现空间机器人系统对运动目标的最优捕获(以最优交会姿态及最佳捕获臂型对目标进行捕获). 仿真结果表明了该方法的有效性.

**关键词** 空间机器人, 路径规划, 协调控制, 目标捕获, 在轨服务  
**中图分类号** TP24

## Coordinated Planning and Control Method of Space Robot for Capturing Moving Target

XU Wen-Fu<sup>1,2</sup> LI Cheng<sup>1</sup> LIANG Bin<sup>1</sup> LIU Yu<sup>1</sup> QIANG Wen-Yi<sup>3</sup>

**Abstract** Aiming at the case that the target may move along an arbitrary trajectory, that may not cross the “guaranteed workspace” (GSW), we propose a coordinated planning and control (CP&C) method to generate the motions of the base attitude and manipulator joints for autonomous rendezvous with and capturing the moving target. Firstly, the target’s trajectory is predicted according to the measurements of the hand-eye camera, and the “optimal rendezvous attitude” of the base and the “optimal capturing configuration” of the manipulator are determined. Then, the trajectories of the base attitude and the joint angles are planned. Lastly, the coordinated controllers are designed to drive the base and the joints to follow the desired motions for capturing the moving target with the “optimal rendezvous attitude” and the “optimal capturing configuration”. Simulation results have verified the proposed method.

**Key words** Space robot, path planning, coordinated control, target capturing, on-orbit servicing

自主行为是空间机器人执行复杂而困难工作的必要条件<sup>[1]</sup>. 为实现对目标的自主交会与捕获,空间机器人需要执行笛卡尔空间连续路径的运动<sup>[2]</sup>. Umetani 等提出了基于广义雅可比矩阵 (Generalized Jacobian matrix, GJM) 及有保证工作空间 (Guaranteed workspace, GWS) 的路径规划方法<sup>[3]</sup>, Nagamatsu 等采用扩展 Kalman 滤波器预测目标的运动状态,规划空间机械臂对翻滚卫星进行自主捕获的运动<sup>[4]</sup>. McCourt 等开发了基于模型的预测控制算法,捕获以一定随机轨迹运动的目标卫星<sup>[5]</sup>. 王昊瀛等研究了目标捕获后的自适应控制问

题<sup>[6]</sup>,金飞虎等研制了平面双臂的实验系统,对基于视觉的目标捕获规划算法进行验证<sup>[7]</sup>. Xu 等也对合作目标的自主捕获进行了系统的研究,并研制了目标捕获地面实验系统<sup>[8]</sup>,开展了大量的地面实验<sup>[9]</sup>.

然而,除 Umetani 等的研究外<sup>[3]</sup>,大多数都是考虑目标在空间机器人的工作空间内缓慢运动的情况,而 Umetani 等也做了较多的假设. 为了获得无限的工作空间, Papadopoulos 等开发了同时控制基座位置、姿态以及机械臂关节角的控制方法<sup>[10]</sup>. 但将整个空间机器人系统(包括基座及机械臂)作为一个整体进行 12 自由度的多输入多输出控制是不现实的. 因而, Oda 提出了卫星姿态与机械臂关节进行协调控制的方法<sup>[11]</sup>,由机械臂控制系统和卫星姿态控制系统共同分担控制任务. 马保离等也提出了一种协调控制策略<sup>[12]</sup>,根据机械臂末端运动轨迹规划期望的载体运动轨迹,使机械臂总保持最佳臂型,但该方法需要消耗控制燃料.

本文考虑更加实际的情况,提出了空间机器人捕获运动目标的协调规划与控制方法,不要求目标一直处于空间机器人的可达工作空间 (Reachable workspace, RWS) 内,只要其轨迹与 RWS 相交,即  $GWS \subset RWS$ ,空间机器人就能以“基座最优交会

收稿日期 2008-04-17 收修改稿日期 2009-05-06  
Received April 17, 2008; in revised form May 6, 2009  
国家自然科学基金 (60805033), 中国博士后科学基金 (20080440116),  
和黑龙江省博士后资助项目 (LBH-Z08109) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of  
China (60805033), Chinese Postdoctoral Science Foundation  
(20080440116), and Postdoctoral Science Foundation of Hei-  
longjiang Province (LBH-Z08109)  
1. 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所 哈尔滨 150001 2. 深圳航  
天科技创新研究院 深圳 518057 3. 哈尔滨工业大学控制科学与工程  
系 哈尔滨 150001  
1. Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of  
Technology, Harbin 150001 2. Shenzhen Institute of Harbin  
Institute of Technology, Shenzhen 518057 3. Department of  
Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technol-  
ogy, Harbin 150001  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.01216

姿态”及“机械臂最佳捕获臂型”捕获运动目标.

## 1 空间机器人运动学基本方程

### 1.1 空间机器人微分运动学方程

空间机器人动力学建模和控制方面的重要研究成果见文献 [13–14]. 由  $n$  自由度机械臂和作为基座的航天器组成的空间机器人的微分运动学方程可写成

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \boldsymbol{\omega}_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{\boldsymbol{\Theta}} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{v}_0, \boldsymbol{\omega}_0 \in \mathbf{R}^3$  分别为基座质心处的线速度和角速度,  $\boldsymbol{\Theta} \in \mathbf{R}^n$  为关节角 ( $n$  为机械臂自由度数),  $J_b$  为与基座运动相关的雅可比矩阵, 而  $J_m$  为与机械臂运动相关的雅可比矩阵, 具体公式参见文献 [15]. 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, 运动学方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \boldsymbol{\omega}_e \end{bmatrix} = J_g (\boldsymbol{\Psi}_0, \boldsymbol{\Theta}, m_i, I_i) \dot{\boldsymbol{\Theta}} \quad (2)$$

其中  $J_g$  为空间机器人的广义雅可比矩阵<sup>[3]</sup>, 它是基座姿态、机械臂关节角、以及各刚体质量、惯量的函数.

### 1.2 空间机器人运动学方程的简化

当空间机器人不受外力时 (如姿态受控模式, 即姿态受飞轮控制的情况; 自由漂浮模式, 即基座姿态及位置均不受控), 整个系统的线动量守恒, 利用此完整约束, 可消去三个独立变量, 基于此, Vafa 等提出了虚拟机械臂的建模方法<sup>[16]</sup>. 首先, 系统质心与每个杆件质心之间的关系如下:

$$M\mathbf{r}_g = \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i \quad (3)$$

则基座的质心位置矢量为

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_g - \frac{(m_1 + \cdots + m_n)(\mathbf{b}_0 + \mathbf{a}_1)}{M} - \cdots - \frac{m_n(\mathbf{b}_{n-1} + \mathbf{a}_n)}{M} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{r}_g$  是系统的质心, 则有

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_e &= \mathbf{r}_0 + \mathbf{b}_0 + \sum_{i=1}^n (\mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i) = \\ \mathbf{r}_g + \hat{\mathbf{b}}_0 + \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{a}}_i + \hat{\mathbf{b}}_i) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{b}}_i = \frac{\sum_{q=0}^i m_q}{M} \mathbf{b}_i, & i = 1, \dots, n \\ \hat{\mathbf{a}}_i = \frac{\sum_{q=0}^{i-1} m_q}{M} \mathbf{a}_i, \end{cases} \quad (6)$$

矢量  $\hat{\mathbf{a}}_i, \hat{\mathbf{b}}_i$  分别平行于  $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ , 且长度比为常数, 因而,  $\hat{\mathbf{a}}_i, \hat{\mathbf{b}}_i$  称为“虚拟连杆矢量”. 方程 (5) 为将“线动量守恒”这一完整约束消去后的空间机器人正运动学方程, 对其两边进行微分, 有如下结果:

$$\mathbf{v}_e = \boldsymbol{\omega}_0 \times \hat{\mathbf{b}}_0 + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\omega}_i \times (\hat{\mathbf{a}}_i + \hat{\mathbf{b}}_i) \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{v}_g$  为系统质心处的线速度, 对于初始线动量为  $\mathbf{0}$  的情况,  $\mathbf{v}_g = \mathbf{0}$ . 另外, 第  $i$  个杆件的角速度为:

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{k=1}^i \mathbf{k}_k \dot{\theta}_k \quad (8)$$

因而, 机械臂末端的线速度可简化为

$$\mathbf{v}_e = -\tilde{p}_{ge} \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{k=1}^n [\mathbf{k}_k \times (\mathbf{p}_e - \hat{\mathbf{p}}_k)] \dot{\theta}_k \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{p}_{ge} = \mathbf{p}_e - \mathbf{r}_g = \hat{\mathbf{b}}_0 + \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{a}}_i + \hat{\mathbf{b}}_i) \quad (10)$$

最后得到简化后的运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \boldsymbol{\omega}_e \end{bmatrix} = \hat{J}_b \boldsymbol{\omega}_0 + \hat{J}_m \dot{\boldsymbol{\Theta}} \quad (11)$$

其中,

$$\hat{J}_b = \begin{bmatrix} -\tilde{p}_{ge} \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{J}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \times (\mathbf{p}_e - \hat{\mathbf{p}}_1) & \cdots & \mathbf{k}_n \times (\mathbf{p}_e - \hat{\mathbf{p}}_n) \\ \mathbf{k}_1 & \cdots & \mathbf{k}_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

式 (12) 中, 矩阵  $E_3$  是单位矩阵.

## 2 运动目标自主交会与捕获的协调规划与控制问题

### 2.1 空间机器人系统的工作空间分析

由于机械臂与其基座之间存在动力学耦合, 使得空间机器人工作空间的分析变得更加复杂. Vafa 等将空间机器人的工作空间分为固定基座工作空间 (Fixed vehicle workspace, FVWS)、航天器姿态受限工作空间 (Vehicle attitude constrained workspace, VACWS) 以及自由工作空

间 (Free workspace, FWS)<sup>[16]</sup>. Umetani 等继承了该思想, 但将工作空间进行了更细的划分, 定义了五种类型的工作空间: 固定基座工作空间 (Fixed vehicle workspace, FVWS)、航天器姿态受限工作空间 (Vehicle attitude constrained workspace, VACWS)、可达工作空间 (Reachable workspace, RWS)、直线路径工作空间 (Straight-path workspace, SPWS) 及有保证工作空间 (Guaranteed workspace, GWS)<sup>[17]</sup>. 徐文福等也对 3D 情况下的工作空间进行了分析<sup>[18]</sup>. 本文采用了与文献 [17] 相同的定义, 但仅考虑三种重要的工作空间: 可达工作空间 (RWS)、航天器姿态受限工作空间 (CWS) 及有保证工作空间 (GWS).

以平面空间机器人为例, 其由航天器基座及 2 个自由度机械臂组成. 机械臂的连杆长度分别记为  $L_1, L_2$ , 质量特性如表 1 所示 (Sat 代表空间基座,  $B_i$  代表第  $i$  个刚体), 其中,  ${}^i\mathbf{a}_i, {}^i\mathbf{b}_i, {}^iI_i$  为相应变量在坐标系  $\Sigma_i$  中的表示. 机械臂末端及待捕获目标的位置矢量分别表示为  $\mathbf{P}_e, \mathbf{P}_t$ , 相应的虚拟机械臂模型如图 1 所示, 其中 VG 为虚拟地, 位于系统的质心;  $\mathbf{r}_g$  为系统质心坐标系;  $\hat{\mathbf{L}}_i = \hat{\mathbf{a}}_i + \hat{\mathbf{b}}_i$  为虚拟连杆矢量. 对于 2D 的情况, 平动部分表示为 2 维的矢量, 即  ${}^i\mathbf{a}_i, {}^i\mathbf{b}_i, \mathbf{P}_e, \mathbf{P}_t \in \mathbf{R}^2$ . 而基座姿态角、角速度及机械臂关节角分别记为  $\Psi_0 = \theta_0 \in \mathbf{R}, \omega_0 \in \mathbf{R}, \Theta = [\theta_1, \theta_2] \in \mathbf{R}^2$ .

表 1 空间机器人系统的运动学及动力学参数

Table 1 The kinematic and dynamic parameters of the space robotic system

	Sat	$B_1$	$B_2$
Mass (Kg)	400	10	10
$\mathbf{a}_i$ (m)	$\begin{bmatrix} - \\ - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$
$\mathbf{b}_i$ (m)	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix}$
$I_i$	30	1.2	1.2

从图 1 可知, 空间机器人的位置级运动学方程为 (不失一般性, 惯性系建立在系统质心  $\mathbf{r}_g = \mathbf{0}$ ):

$$\mathbf{p}_e = \hat{\mathbf{b}}_0 + \hat{\mathbf{L}}_1 + \hat{\mathbf{L}}_2 \quad (14)$$

相应的, 速度级运动学方程为

$$\mathbf{v}_e = \hat{\mathbf{J}}_{b2}\omega_0 + \hat{\mathbf{J}}_{m2}\dot{\Theta} \quad (15)$$

其中,

$$\hat{\mathbf{J}}_{b2} = \begin{bmatrix} -p_{ey} \\ p_{ex} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{J}}_{m2} = \begin{bmatrix} -\hat{L}_1 s_{01} - \hat{L}_2 s_{012} & -\hat{L}_2 s_{012} \\ \hat{L}_1 c_{01} + \hat{L}_2 c_{012} & \hat{L}_2 c_{012} \end{bmatrix} \quad (17)$$

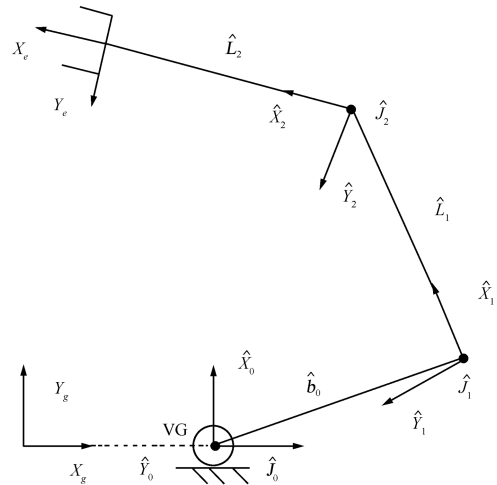


图 1 平面空间机器人系统的虚拟机械臂模型

Fig. 1 The virtual manipulator model of the planar space robotic system

式 (16) 和 (17) 中,  $p_{ex}$  及  $p_{ey}$  为机械臂末端位置矢量  $\mathbf{p}_e$  的元素, 即  $\mathbf{p}_e = [p_{ex}, p_{ey}]^T$ , 且

$$\begin{cases} s_0 = \sin(\theta_0), c_0 = \cos(\theta_0) \\ s_{01} = \sin(\theta_0 + \theta_1), c_{01} = \cos(\theta_0 + \theta_1) \\ s_{012} = \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \\ c_{012} = \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (18)$$

由式 (14) 可得,

$$\mathbf{p}_e = \hat{\mathbf{b}}_0 + \sum_{i=1}^n (\hat{\mathbf{a}}_i + \hat{\mathbf{b}}_i) = A_{0,2}{}^0\hat{\mathbf{b}}_0 + A_{1,2}{}^1\hat{\mathbf{L}}_1 + A_{2,2}{}^2\hat{\mathbf{L}}_2 \quad (19)$$

矩阵  $A_{i,2}$  为坐标系  $\Sigma_i$  到  $\Sigma_I$  的变换矩阵的  $2 \times 2$  分块矩阵 (对于平面运动的情况, 只考虑  $2 \times 2$  分块矩阵即可):

$$A_{0,2} = \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 \\ s_0 & c_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$A_{1,2} = \begin{bmatrix} c_{01} & -s_{01} \\ s_{01} & c_{01} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$A_{2,2} = \begin{bmatrix} c_{012} & -s_{012} \\ s_{012} & c_{012} \end{bmatrix} \quad (22)$$

根据定义, 可达工作空间的中心为系统质心, 半径为

$$R_{RWS} = \max_{\theta_0, \theta_1, \theta_2 \in [-\pi, \pi]} (\|\mathbf{p}_e\|) = \hat{b}_0 + \hat{L}_1 + \hat{L}_2 \quad (23)$$

$\hat{b}_0, \hat{L}_1$  及  $\hat{L}_2$  是相应连杆矢量  $\hat{\mathbf{b}}_0, \hat{\mathbf{L}}_1, \hat{\mathbf{L}}_2$  的长度. 而“航天器姿态受限工作空间”的含义即“对于航天器

姿态保持在某一给定值的情况, 机械臂末端的运动范围被限制在该工作空间内”。对于某个给定的基座姿态  $\theta_0 = q_0$ , CWS 的中心为  $A_{0,2}^0 \hat{b}_0$ , 半径为

$$R_{CWS} = \max_{\theta_1, \theta_2 \in [-\pi, \pi]} \left( \left\| \mathbf{p}_e - A_{0,2}^0 \hat{b}_0 \right\|_{\theta_0=q_0} \right) = \hat{L}_1 + \hat{L}_2 \quad (24)$$

其中,  $A_{0,2}$  为将  $\theta_0 = q_0$  代入式 (20) 得到的常数矩阵. 对于有保证工作空间, 其实际为所有可能的基座姿态对应的 CWS 的交集, 因而中心也为系统质心, 而半径为

$$R_{GWS} = \left| \hat{L}_1 + \hat{L}_2 - \hat{b}_0 \right| \quad (25)$$

不论基座姿态如何, 任何位于 GWS 的点都是空间机械臂末端“保证”所能达到的, 这就是“有保证工作空间”的含义.

三种工作空间的关系如图 2 所示, 满足

$$GWS \subset CWS \subset RWS \quad (26)$$

从上面的定义和分析可知, RWS 及 GWS 与基座姿态无关, 只要空间机器人的几何及质量参数确定, 它们就是固定的. 但 CWS 却依赖于基座的姿态, 可通过控制基座的姿态, 实现期望的 CWS (实际上, CWS 的半径大小是不变的, 控制基座姿态的目的是为了调整 CWS 的中心位置).

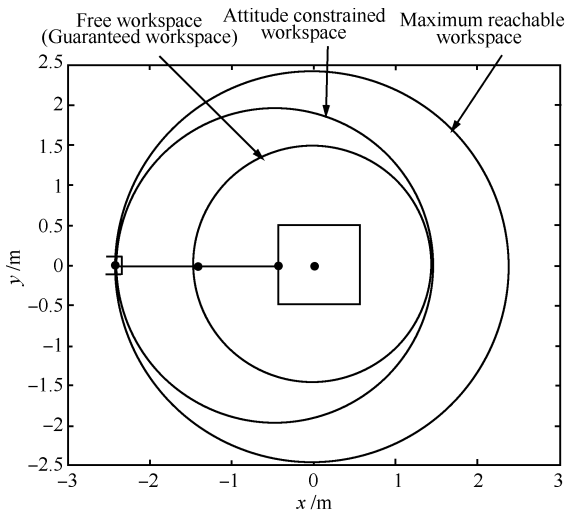


图 2 平面空间机器人系统工作空间的关系

Fig. 2 The relationship between workspaces of the planar space robotic system

## 2.2 空间机器人运动目标的自主交会与捕获问题

在捕获运动目标的研究中, 通常需要考虑如下四种情况 (如图 3 所示).

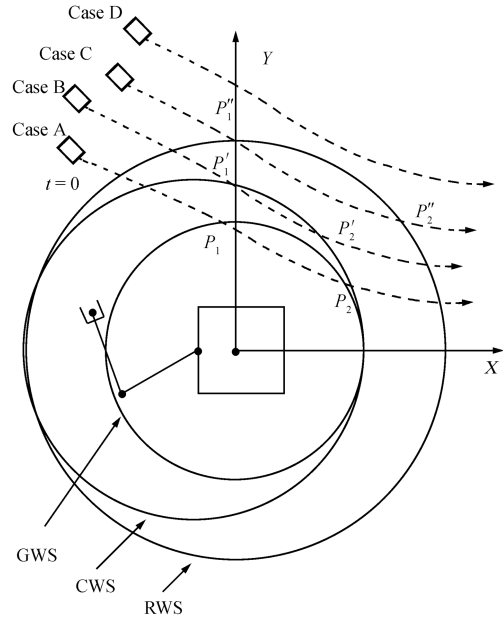


图 3 工作空间外运动目标的轨迹分析

Fig. 3 The analysis of the trajectories of target outside of the workspace

Case A: 目标运动轨迹与空间机器人的 GWS 相交, 则可使用 Umetani 等的方法<sup>[3]</sup> 规划空间机器人的运动, 在目标经过 GWS 时捕获目标. 由于捕获在 GWS (与基座姿态无关) 内完成, 因此无需控制基座的位置和姿态, 空间机器人可“自由漂浮”地捕获运动目标.

Case B: 目标运动轨迹不与空间机器人的 GWS 相交, 但与 CWS 相交, 此时基于广义 Jacobian 矩阵的分解运动速度控制方法<sup>[3]</sup>, 将有可能捕获不了运动目标, 因为某些位于 CWS 的点是无法“保证”在不考虑基座姿态的情况下, 机械臂末端仍能到达的. 如果使用反作用喷气或飞轮使目标保持基座当前的姿态, 虽然能在 CWS 内捕获目标, 但机械臂的灵巧度受到很大限制.

Case C: 目标运动轨迹不与空间机器人的 GWS 及 CWS 相交, 但与 RWS 相交, 即使控制基座姿态保持在当前位置, 空间机械臂也不能捕获目标. 此时只能开启位置控制, 以扩大机械臂的工作空间, 但位置控制将使用反作用喷气, 消耗宝贵的燃料, 缩短卫星的服务寿命.

Case D: 目标运动轨迹甚至不与空间机器人的 RWS 相交, 此时除非开启基座的位置控制, 对目标进行跟踪、接近, 使其位于空间机器人的工作空间内, 方可完成捕获. 该方法要比 Case C 消耗更多的燃料, 不在本文考虑之列.

本文中, 我们提出了用于捕获运动目标的协调规划与控制方法. 该方法具有如下特点:

- 1) 能处理 Case A ~ C 三种情况下的目标捕获

问题;

2) 无需使用反作用喷气对基座的姿态进行控制, 仅需要飞轮控制基座姿态, 因而节约了卫星的燃料, 对延长卫星的使用寿命有好处;

3) 空间机器人以最优的基座交会姿态及最灵巧的机械臂臂型捕获运动目标;

4) 使用了适合的方法进行奇异回避处理, 所规划的关节角连续且平滑.

### 3 运动目标最优交会与捕获的协调规划与控制方法

#### 3.1 基本思想与算法流程

本文提出的空间机器人系统协调规划与控制思想如图 4 所示. 首先利用手眼视觉相机测量目标相对于机械臂末端的位置和姿态 (视觉综述的具体算法参见综述文献 [19]), 并预测目标的运动轨迹, 然后根据目标运动轨迹, 确定空间机器人捕获目标的基座最优交会姿态, 以及机械臂最佳捕获臂型, 由此规划以“基座最佳交会姿态”及“机械臂最佳捕获臂型”捕获运动目标的基座姿态及机械臂关节角的轨迹, 即采用了协调规划的方法. 另外, 为控制空间机器人系统跟踪期望轨迹, 且考虑到现有星载机的实际处理能力, 采用协调控制的方法.

算法的主要步骤如下:

**步骤 1.** 设置算法停止判据, 即位置误差  $\epsilon_p = 10 \text{ mm}$  及允许的最大时间  $t_{\max}$ ;

**步骤 2.** 通过相应的传感器, 读取系统的当前状态, 即  $\theta_0, \omega_0, \theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ ;

**步骤 3.** 利用手眼相机测量目标相对于机械臂

末端的位置和姿态;

**步骤 4.** 计算相对位置误差  $e_p$ , 并判断目标是否位于捕获框内 (即手爪抓取区域,  $\|e_p\| \leq \epsilon_p$ ). 如果是, 控制机械臂闭合手爪并捕获目标; 否则, 转步骤 5;

**步骤 5.** 根据敏感器 (手眼相机、关节角、基座姿态) 测量数据预测目标的运动轨迹;

**步骤 6.** 判断目标轨迹与 RWS 的关系. 如果目标轨迹与 RWS 相交, 则计算交会区间 (目标轨迹与 RWS 相交的部分), 并确定基座最优交会姿态  $\theta_{0\_bst}$ , 及机械臂最佳捕获臂型  $p_{e\_bst}$ ;

**步骤 7.** 规划期望的基座姿态及机械臂关节角的轨迹, 即  $(\theta_{0d}, \dot{\theta}_{0d})$  和  $(\theta_{1d}, \theta_{2d}, \dot{\theta}_{1d}, \dot{\theta}_{2d})$ , 以实现空间机器人以基座最优交会姿态  $\theta_{0\_bst}$  及机械臂最佳捕获臂型  $p_{e\_bst}$  捕获目标;

**步骤 8.** 设计协调控制策略, 产生基座姿态及机械臂关节角的驱动力矩, 实现整个系统跟踪期望的轨迹, 即  $(\theta_{0d}, \dot{\theta}_{0d})$  和  $(\theta_{1d}, \theta_{2d}, \dot{\theta}_{1d}, \dot{\theta}_{2d})$ ;

**步骤 9.**  $t = t + \Delta t$ . 如果  $t < t_{\max}$ , 转步骤 2; 否则, 算法结束, 表明在给定的最大时间内空间机器人无法捕获目标.

#### 3.2 基座最优交会姿态的确定

如上所述, 基座姿态受限工作空间由基座姿态确定, 即不同的姿态将产生不同的 CWS, 因此可通过控制基座姿态实现期望的 CWS. 针对不同的目标轨迹, 可设计相应的 CWS, 使得目标轨迹与 CWS 的相交区域最大, 此时的 CWS 称为最佳受限工作空间, 相交区域称为最大交会区间, 相应的姿态即为“基座最佳交会姿态”. 这些定义描述如下:

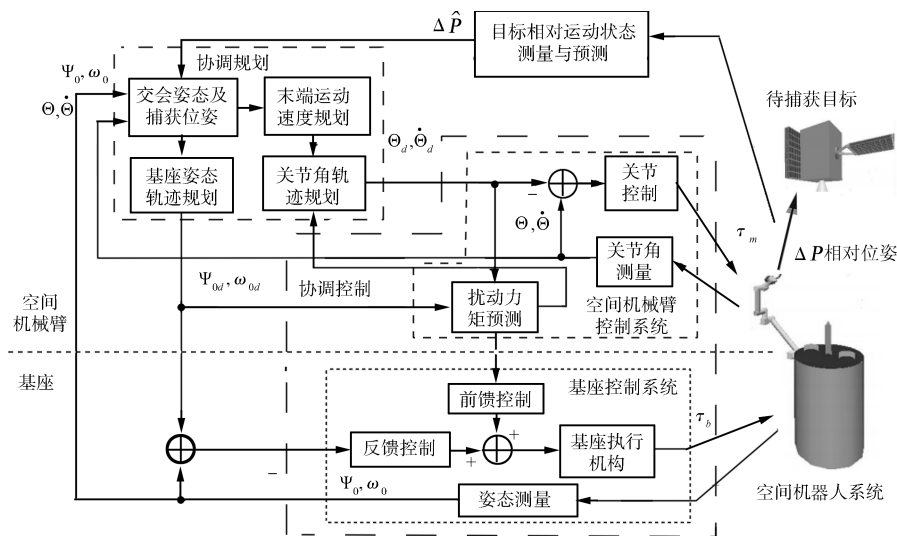


图 4 空间机器人系统协调规划与控制思想

Fig. 4 The concept of coordinated control for space robot

**定义 1.** 交会区间, 即目标轨迹与航天器基座姿态受控工作空间 CWS 的相交区域. 交会区间越大, 空间机器人捕获目标的机会就越多.

**定义 2.** 最优受限工作空间 (CWS.bst), 即与目标轨迹有最大交会区间的基座姿态受限工作空间.

**定义 3.** 最大交会区间 ( $P_1P_2$ ), 即目标轨迹与最优受限工作空间的交会区间.

**定义 4.** 基座最优交会姿态 ( $\theta_{0.bst}$ ), 即产生最优受限工作空间的基座姿态.

上述定义是针对一定的目标轨迹的, 不同的目标轨迹对应不同的“最优/最佳”. 这些概念可以用图 5 进行解释.

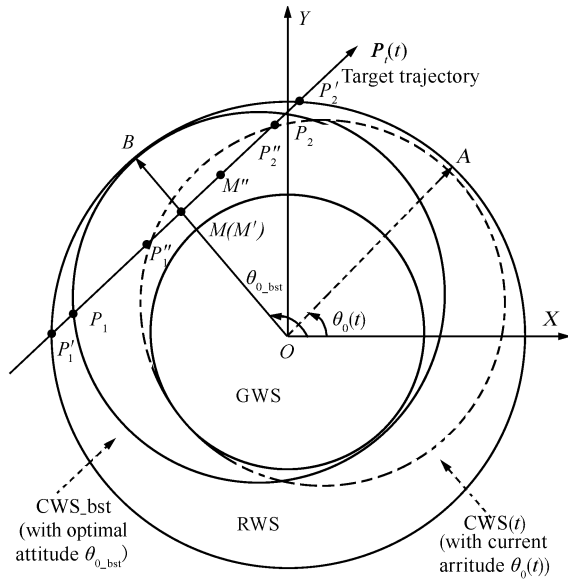


图 5 运动目标捕获的基座最佳姿态

Fig. 5 The best attitude of the base for capturing a moving target

假定目标运动轨迹为  $P_t(t)$ ,  $t$  时刻基座的姿态为  $\theta_0(t)$ , 对应的受限工作空间表示为  $CWS(t)$ .  $CWS(t)$  与  $RWS$  内切于点  $A$ . 目标轨迹  $P_t(t)$  与  $CWS(t)$  及  $RWS$  的相交区间分别为  $P_1'P_2'$  及  $P_1''P_2''$ . 当基座姿态从  $\theta_0(t)$  调整到  $\theta_{0.bst}$  时,  $CWS(t)$  即变化到  $CWS.bst$ , 受限工作空间与可达工作空间的切点即由  $A$  变到  $B$ , 此时有

$$OB \perp P_1'P_2' \tag{27}$$

可知,  $P_1P_2 > P_1'P_2'$ , 即此时的交会区间到达了最大值, 相应的受限工作空间即为最优受限工作空间 (CWS.bst), 交会区间的中点从  $M''$  移到  $M$ , 与  $P_1'P_2'$  的中点  $M'$  重合, 因此, 可按下式计算基座的最优交会姿态:

$$\theta_{0.bst} = a \tan 2(y_m, x_m) \tag{28}$$

其中,  $(x_m, y_m)$  是  $M'$  点的坐标. 当目标的运动轨迹具有一定的随机性时, 可根据测量数据 (当前的及历史的测量数据) 实时估计目标的运动轨迹、计算最大交会区间及相应的最优交会姿态.  $t$  时刻的最优交会姿态记为  $\hat{\theta}_{0.bst}(t)$ . 上述“实时”的过程一直持续到目标成功捕获.

### 3.3 机械臂最佳捕获臂型的确定

在 3.2 节中, 为了使空间机器人有最多的机会捕获目标, 我们设计了“基座最优交会姿态”以获得“最大的交会区间”. 从空间机器人的捕获能力来讲, 目标运动到最大交会区间  $P_1P_2$  的任一点, 空间机器人都能捕获目标. 然而, 在不同的位置上捕获目标, 空间机器人的可操作性 (或灵巧度) 不一样. 例如, 当捕获位于  $P_1$  或  $P_2$  点附近的目標时, 空间机器人的可操作性最差. 从控制的观点来讲, 希望空间机器人以最灵巧的臂型捕获目标, 这种臂型即“最佳捕获臂型”.

**定义 5.** 最佳捕获臂型 ( $\Theta_{bst}$ ), 即在潜在的可捕获点 (交会区间  $P_1P_2$  的任一点) 上, 空间机器人具有最大可操作性测度的臂型.

最佳捕获臂型可以通过下面的方法来确定. 首先, 用 3.2 节的方法确定最大交会区间, 并将交会区间分成  $N$  个子区间 (实际中, 可根据交会区间的大小确定  $N$ ; 本文的仿真中  $N = 100$ ), 然后根据几何关系确定机械臂末端到达潜在捕获点时的臂型, 这些臂型表示为:

$$\text{Configurations\_All} = \{(\theta_1, \theta_2)_1, (\theta_1, \theta_2)_2, \dots, (\theta_1, \theta_2)_N\} \tag{29}$$

实际中, 机械臂的关节可能受到机械限制, 到不了某些臂型, 因此必须将不能到达的臂型去除. 假设机械臂关节角受到如下限制

$$\begin{cases} \theta_{1.min} \leq \theta_1 \leq \theta_{1.max} \\ \theta_{2.min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2.max} \end{cases} \tag{30}$$

则式 (29) 中所列出的臂型中应该去除超出式 (30) 范围的臂型, 得到有效臂型组合, 表示如下 (假设有  $N'$  个有效臂型,  $N' \leq N$ ):

$$\text{Configurations\_Feasible} = \{(\theta_1, \theta_2)_1, (\theta_1, \theta_2)_2, \dots, (\theta_1, \theta_2)_{N'}\} \tag{31}$$

最佳捕获臂型即上述有效臂型中, 灵巧度最高的臂型. 其中, 灵巧度  $D(\theta_1, \theta_2)$  按下式计算:

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{k_m(\theta_1, \theta_2)} \times 100\% \tag{32}$$

其中,  $k_m(\theta_1, \theta_2)$  为机械臂雅可比矩阵的条件数, 即:

$$k_m(\theta_1, \theta_2) = \text{cond}(J_{m2}|_{\theta_{0,\text{bst}}}) \quad (33)$$

$J_{m2}|_{\theta_{0,\text{bst}}}$  表示将基座姿态  $\theta_0 = \theta_{0,\text{bst}}$  代入式 (17) 得到的机械臂雅可比阵. 最后可得机械臂最佳捕获臂型  $\Theta_{\text{bst}}$ :

$$D((\theta_1, \theta_2)_{\text{bst}}) = \max_{1 \leq i \leq N'} (D(\theta_1, \theta_2)_i) \Rightarrow \Theta_{\text{bst}} = (\theta_1, \theta_2)_{\text{bst}} \quad (34)$$

对应于最佳捕获臂型的机械臂末端位姿称为最佳捕获位姿, 记为  $\mathbf{p}_{\text{bst}}$ . 在实际中, 由于目标轨迹未知, 最佳捕获位姿或最佳捕获臂型无法离线确定. 在本文中, 首先根据手眼视觉测量数据预测目标的运动轨迹, 然后计算对应的最佳捕获位姿  $\mathbf{p}_{\text{bst}}$  和最佳捕获臂型  $\Theta_{\text{bst}}$ .  $t$  时刻计算的值记为  $\hat{\mathbf{p}}_{\text{bst}}(t)$  和  $\hat{\Theta}_{\text{bst}}(t)$ .

### 3.4 基座姿态及机械臂关节角轨迹的规划

当基座最优交会姿态  $\hat{\mathbf{p}}_{\text{bst}}(t)$  及机械臂最佳捕获臂型  $\hat{\Theta}_{\text{bst}}(t)$  确定以后, 即可规划基座姿态及机械臂关节角的轨迹, 以实现运动目标的最优捕获 (以基座最佳交会姿态及机械臂最佳捕获臂型对目标的捕获). 主要的步骤包括: 机械臂末端运动速度的规划、基座姿态角轨迹的规划、机械臂关节角轨迹的规划等. 下面分别进行详细介绍.

#### 3.4.1 机械臂末端运动速度的规划

首先, 根据预测的最优捕获位姿  $\hat{\mathbf{p}}_{\text{bst}}(t)$  及目标的位置  $\hat{\mathbf{p}}_t(t)$ 、速度  $\hat{\mathbf{v}}_t(t)$ , 预测机械臂末端与目标交会尚需的时间  $t_{\text{left}}$ , 即

$$t_{\text{left}}(t) = \frac{\|\hat{\mathbf{p}}_{\text{bst}}(t) - \hat{\mathbf{p}}_t(t)\|}{\|\hat{\mathbf{v}}_t(t)\|} \quad (35)$$

则机械臂末端的速度按下式规划

$$\mathbf{v}_{ed}(t) = K_p \frac{\Delta \hat{\mathbf{p}}(t)}{t_{\text{left}}(t)} + K_t \hat{\mathbf{v}}_t(t) \quad (36)$$

增益  $K_p = \text{diag}\{k_{p1}, k_{p2}\}$ 、 $K_t = \text{diag}\{k_{t1}, k_{t2}\}$ , 用于保证机械臂的平滑启动 ( $t_s$  为启动过程的上升时间, 本文设  $t_s = 2$ ,  $k_{p0} = k_{t0} = 1$ ):

$$k_{pi} = \begin{cases} k_{p0} \left( \frac{3}{t_s^2} - \frac{2t}{t_s^3} \right) t^2, & t \leq t_s \\ k_{p0}, & t > t_s \end{cases} \quad (37)$$

$$k_{ti} = \begin{cases} k_{t0} \left( \frac{3}{t_s^2} - \frac{2t}{t_s^3} \right) t^2, & t \leq t_s \\ k_{t0}, & t > t_s \end{cases} \quad (38)$$

其中  $i = 1, 2$ .

### 3.5 基座姿态角轨迹的规划

当  $\hat{\theta}_{0,\text{bst}}(t)$  估计出来后, 基座的姿态角速度按下式进行规划:

$$\omega_{0d}(t) = K_b \frac{\hat{\theta}_{0,\text{bst}}(t) - \theta_0(t)}{t_{\text{left}}(t)} \quad (39)$$

$\theta_0(t)$  为当前的基座姿态角, 即基座姿态传感器测量值,  $K_b$  是用来保证基座姿态控制的平滑启动的增益值, 也按下式进行调整 ( $k_{b0} = 1$ ):

$$K_b = \begin{cases} k_{b0} \left( \frac{3}{t_s^2} - \frac{2t}{t_s^3} \right) t^2, & t \leq t_s \\ k_{b0}, & t > t_s \end{cases} \quad (40)$$

则期望的姿态角为

$$\theta_{0d}(t + \Delta t_b) = \theta_0(t) + \omega_{0d}(t) \Delta t_b \quad (41)$$

其中,  $\Delta t_b$  为基座姿态的控制周期.

#### 3.5.1 奇异回避的关节角轨迹规划

当期望的基座姿态角速度及机械臂末端线速度确定以后, 即可规划期望的关节角速度. 根据式 (15), 当所有矢量、张量在基座坐标系  $\sum_0$  中表示时, 有如下关系:

$${}^0\mathbf{v}_{ed} = ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{b2}) \omega_{0d} + ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2}) \dot{\Theta}_d \quad (42)$$

由于基座姿态  $\theta_0$  可通过传感器实时测出, 根据式 (42), 有

$${}^0\mathbf{v}_{ed} - ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{b2}) \omega_{0d} = ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2}) \dot{\Theta}_d \quad (43)$$

${}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2}$  为机械臂运动相关的雅可比矩阵, 与相应的地面固定基座机器人有相同的表达式, 即完全由机械臂的运动学参数决定, 因此,  ${}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2}$  的奇异是运动学奇异. 可按下式规划期望角速度  $\dot{\Theta}_d$ :

$$\dot{\Theta}_d = ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2})^{-1} [{}^0\mathbf{v}_{ed} - ({}^0\hat{\mathbf{J}}_{b2}) \omega_{0d}] \quad (44)$$

其中,

$$({}^0\hat{\mathbf{J}}_{m2})^{-1} = \frac{1}{\hat{L}_1 \hat{L}_2 s_2} \begin{bmatrix} \hat{L}_2 c_{12} & \hat{L}_2 s_{12} \\ -\hat{L}_1 c_1 - \hat{L}_2 c_{12} & -\hat{L}_1 s_1 - \hat{L}_2 s_{12} \end{bmatrix} \quad (45)$$

如果  $s_2 = 0$ , 即  $\theta_2 = 0$  或  $\theta_2 = \pi$ , 按式 (42) 计算的关节角速度将无限大, 因此  $s_2$  称为“奇异参数”, 并表示为  $k_s = s_2$ . 本文将使用基于“阻尼倒

数”的方法进行奇异回避处理<sup>[20]</sup>, 即

$$\begin{pmatrix} {}^0\hat{J}_{m2} \end{pmatrix}_{\text{damped}}^{-1} = \frac{1}{\hat{L}_1\hat{L}_2 k_s^2 + \lambda_s^2} \times \begin{bmatrix} \hat{L}_2 c_{12} & \hat{L}_2 s_{12} \\ -\hat{L}_1 c_{12} - \hat{L}_2 c_{12} & -\hat{L}_1 s_{12} - \hat{L}_2 s_{12} \end{bmatrix} \quad (46)$$

其中,  $\lambda_s$  为阻尼系数, 按文献 [20] 的方法自主进行调整. 对于实际的情况, 机械臂的关节角速度不允许超出一定的范围, 如

$$\|\dot{\Theta}\| \leq \dot{\Theta}_{\max} \quad (47)$$

另一方面, 基座通常采用反作用飞轮进行姿态控制, 而飞轮所能提供的控制力矩和所能吸收的角动量有限, 因此, 在规划中通过限制机械臂运动产生的角动量 (小于飞轮最大可吸收角动量/安全系数) 来满足飞轮控制的要求.

机械臂运动产生的角动量为  $H_{\Theta}\dot{\Theta}$ , 增加角动量约束

$$H_{\Theta}\dot{\Theta}_d \leq L_{\max} \quad (48)$$

其中  $L_{\max}$  为飞轮最大角动量乘以一定的系数 (考虑余量, 取安全系数为 1.5). 因此, 机械臂最大允许角速度限制为:

$$\dot{\Theta}_{\text{Limit}} = \min \left( \dot{\Theta}_{\max}, \left| \frac{L_{\max}}{H_{\Theta}(t)} \right| \right) \quad (49)$$

则机械臂关节角速度按以下两式规划:

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_{d,\text{damped}} &= \begin{pmatrix} {}^0\hat{J}_{m2} \end{pmatrix}_{\text{damped}}^{-1} ({}^0\mathbf{v}_{ed}^0) \quad (50) \\ \dot{\Theta}_d(t) &= \begin{cases} \dot{\Theta}_{d,\text{damped}}, & \|\dot{\Theta}_{d,\text{damped}}\| \leq \dot{\Theta}_{\text{Limit}} \\ \frac{\dot{\Theta}_{\text{Limit}} \dot{\Theta}_{d,\text{damped}}}{\|\dot{\Theta}_{d,\text{damped}}\|}, & \|\dot{\Theta}_{d,\text{damped}}\| > \dot{\Theta}_{\text{Limit}} \end{cases} \quad (51) \end{aligned}$$

期望的关节角可通过数值积分得到:

$$\Theta_d(t + \Delta t_m) = \Theta(t) + \dot{\Theta}_d(t) \Delta t_m \quad (52)$$

其中  $\Delta t_m$  为关节控制器的采样周期.

### 3.6 空间机器人系统的协调控制

当期望的基座姿态角及机械臂关节角轨迹规划出来后, 需要设计相应的控制策略, 控制基座姿态及机械臂关节角跟踪所规划的轨迹. 传统的方式是将基座及机械臂两部分各自独立进行控制, 即独立设计各自的控制器, 如基座姿态和关节角分别按如下 PD 控制律进行控制:

$$\begin{cases} \tau_b = k_{p0}(\theta_{0d} - \theta_0) + k_{d0}(\omega_{0d} - \omega_0) \\ \tau_m = k_p(\Theta_d - \Theta) + k_d(\dot{\Theta}_d - \dot{\Theta}) \end{cases} \quad (53)$$

然而, 这种控制方式下, “机械臂控制系统”与“基座控制系统”各自为政, 很难实现整个系统控制性能的优化, 如所规划的机械臂的运动可能产生超出基座控制能力的干扰, 导致基座姿态控制器无法实现期望的姿态变化, 反过来又影响机械臂末端的定位. 同时, 在现有条件下, 设计能同时控制基座姿态及机械臂关节角的控制器是不可能的, 因此, 本文考虑采用协调控制的方法, 从硬件上虽然仍分为“机械臂控制系统”和“基座控制系统”, 但它们的控制行为是“相互协调”的. 其中机械臂控制系统控制机械臂的运动, 并且估计机械臂运动对于卫星的反作用, 以力矩或者角动量的形式传给卫星基座的姿轨控系统 (Attitude and orbit control system, AOCS), 由 AOCS 对该反作用进行补偿, 使卫星的姿态保持稳定, 同时姿态测量元件将姿态控制状态 (姿态角、姿态角速率、飞轮和喷气的状态) 又传给机械臂控制系统, 机械臂系统根据这些状态判断运动规划, 以决定是否重新规划, 如果姿态角、角速度超出预设的范围, 说明规划的路径不好, 需要重新规划. 基座的控制系统除了根据姿态测量状态进行常规的反馈控制以外还根据估计出的机械臂运动对卫星的反作用进行前馈补偿. 这样就实现了卫星姿态和机械臂运动的协调控制, 这是一种分布式和协作式的控制方法. 协调控制的思想如图 4 所示.

## 4 仿真研究

为了验证本文所提出的协调规划与控制方法, 我们利用 Simulink 建立了系统的动力学模型. 模型由五个模块组成: 协调规划器、协调控制器、空间机器人系统动力学模型、目标动力学模型及测量模型. 假定各敏感器的测量噪声为零均值白噪声, 不同敏感器的测量标准差如下

$$\sigma_{\theta_0} = \sigma_{\theta_1} = \sigma_{\theta_2} = 0.1^\circ \quad (54)$$

$$\sigma_{\dot{\theta}_0} = \sigma_{\dot{\theta}_1} = \sigma_{\dot{\theta}_2} = 0.1^\circ/\text{s} \quad (55)$$

$$\sigma_{p_t} = 5 \text{ mm} \quad (56)$$

其中,  $\sigma_{\theta_i}, \sigma_{\dot{\theta}_i}$  分别为  $\theta_i, \dot{\theta}_i$  的测量标准差;  $\sigma_{p_t}$  为  $p_t$  的测量标准差.

仿真中, 基座姿态及机械臂关节角的初值为

$$[\theta_{00}, \theta_{10}, \theta_{20}]^T = [120^\circ, 150^\circ, -90^\circ]^T \quad (57)$$

目标的初始位置为 (惯性系下)

$$p_{t0} = [-4, -1]^T \quad (58)$$

目标按由下述方程确定的直线轨迹运动

$$f(x, y) = x - y + 3.0 = 0 \quad (59)$$



假定目标的运动速度为

$$\mathbf{v}_t = [0.0495, 0.0495]^T \quad (60)$$

采用上面提出的协调规划与控制方法, 驱动空间机器人系统按基座最优交会姿态及机械臂最佳捕获臂型捕获运动目标. 仿真结果如图 6 ~ 8 所示. 捕获过程中, 基座姿态及机械臂关节角的变化如图 6 所示, 目标相对于机械臂末端的位置如图 7 所示, 捕获过程如图 8 所示. 上述结果表明, 即使目标的运动轨迹与“有保证工作空间”并不相交, 但采用协调规划与控制策略后, 空间机器人能以基座最优交会姿态 ( $\theta_{0\_bst} = 135.02^\circ$ ) 及机械臂最佳捕获臂型 ( $\Theta_{bst} = [34.93 - 65.64^\circ]^T$ ) 捕获运动目标.

### 5 结论

目标捕获是空间机器人执行在轨服务的前提, 已有的大多数方法均是考虑目标在工作空间内运动的情况. 本文提出了协调规划与控制的方法, 能实现对目标的最优捕获. 该方法具有如下特点: 1) 能产生基座姿态与机械臂关节角的协调运动, 以“基座最佳交会姿态”及“机械臂最佳捕获臂型”捕获目标; 2) 不使用反作用喷气, 大大节约了燃料, 有利于延长卫星的寿命; 3) 采用了实用的奇异回避方法规划机械臂的关节角, 产生的关节角轨迹连续且平滑; 4) 设计了协调控制策略, 既考虑了整个空间机器人系统的控制性能, 又适应了当前的星载处理器的控制能力. 本文中, 虽然以平面运动的情况为例进行说明, 但该方法可以扩展到三维运动的情况.

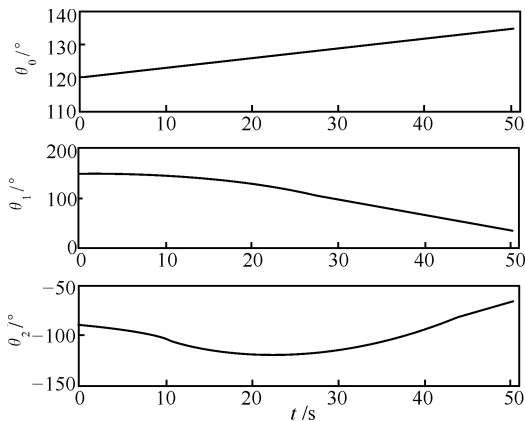


图 6 捕获过程中基座姿态及机械臂关节角的变化  
Fig. 6 The variation of the base attitude and manipulator joint angles during capturing

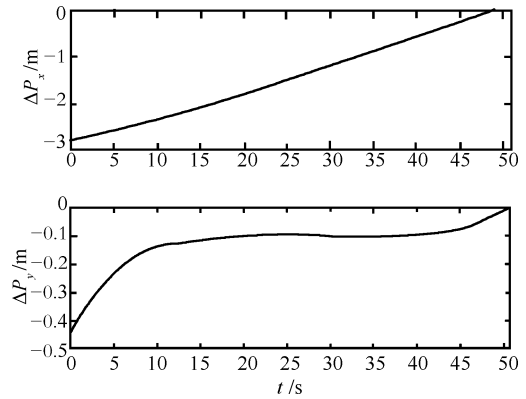


图 7 捕获过程中目标相对于机械臂末端的位置变化  
Fig. 7 The variation of the target position with respect to the end-effector

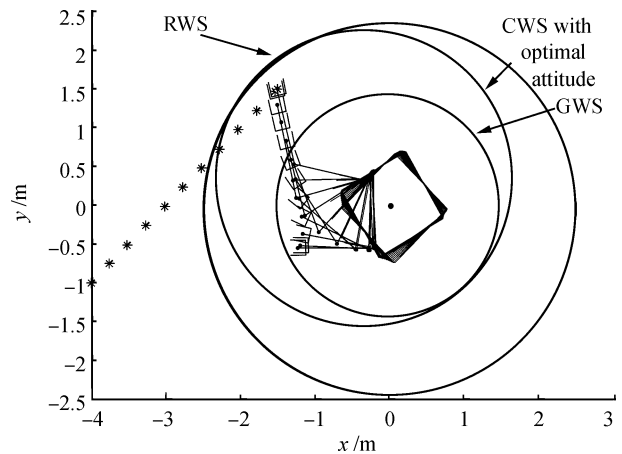


图 8 直线运动目标捕获过程

Fig. 8 The process of capturing a target moving with a linear trajectory

### References

- 1 Rekleitis I, Martin E, Rouleau G, Régent L, Kourosh P, Eric D. Autonomous capture of a tumbling satellite. *Journal of Field Robotics*, 2007, **24**(4): 275–296
- 2 Xu Wen-Fu, Liu Yu, Qiang Wen-Yi, Liang Bin, Li Cheng. Cartesian continuous-path planning for free-floating space robot. *Control and Decision*, 2008, **23**(3): 278–282, 287 (徐文福, 刘宇, 强文义, 梁斌, 李成. 自由漂浮空间机器人的笛卡尔空间连续路径规划. *控制与决策*, 2008, **23**(3): 278–282, 287)
- 3 Umetani Y, Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, **5**(3): 303–314
- 4 Nagamatsu H, Kubota T, Nakatani I. Autonomous retrieval of a tumbling satellite based on predictive trajectory. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, New Mexico: IEEE, 1997. 3074–3079
- 5 Mccourt R A, de Silva C W. Autonomous robotic capture of a satellite using constrained predictive control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, **11**(6): 699–708
- 6 Wang Hao-Ying, Wang Jing, Wu Hong-Xin, Liang Bin. Object capture adaptive control for space robot. *Chinese Space*

- Science and Technology*, 2000, **20**(5): 3–11  
(王昊瀛, 王景, 吴宏鑫, 梁斌. 空间机器人的目标捕获自适应控制. 中国空间科学技术, 2000, **20**(5): 3–11)
- 7 Jin Fei-Hu, Hong Bing-Rong, Liu Chang-An. Experiment research of a dual-arm free-flying space robot capturing a target. *Journal of Astronautics*, 2002, **23**(1): 64–68  
(金飞虎, 洪炳熔, 柳长安. 双臂自由飞行空间机器人捕捉目标实验研究. 宇航学报, 2002, **23**(1): 64–68)
- 8 Xu W F, Liang B, Xu Y S, Li C, Qiang W Y. A ground experiment system of free-floating space robot for capturing space target. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, **48**(2): 187–208
- 9 Xu W F, Liu Y, Liang B, Xu Y S, Qiang W Y. Autonomous path planning and experiment study of free-floating space robot for target capturing. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2008, **51**(3): 303–331
- 10 Papadopoulos E, Dubowsky S. Coordinated manipulator/spacecraft motion control for space robotic systems. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Autanatim. Sacramento, USA: IEEE, 1991. 1696–1701
- 11 Oda M. Motion control of the satellite mounted robot arm which assures satellite attitude stability. *Acta Astronautica*, 1997, **41**(11): 739–750
- 12 Ma Bao-Li, Huo Wei. Coordinated motion control of free-flying space robot system. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(1): 50–55  
(马保离, 霍伟. 自由飞行空间机器人系统的协调运动控制. 自动化学报, 1998, **24**(1): 50–55)
- 13 Liang Bin, Liu Liang-Dong, Li Geng-Tian, Xu Yang-Sheng. Dynamically equivalent manipulator for a space manipulator. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(6): 761–767  
(梁斌, 刘良栋, 李庚田, 徐扬生. 空间机器人的动力学等价机械臂. 自动化学报, 1998, **24**(6): 761–767)
- 14 Xu Y S, Kanade T. *Space Robotics: Dynamics and Control*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1992
- 15 Xu Wen-Fu. Path Planning and Experiment Study of Space Robot for Target Capturing [Ph. D. dissertation], Harbin Institute of Technology, China, 2007  
(徐文福. 空间机器人目标捕获的路径规划方法与实验研究 [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2007)
- 16 Vafa Z, Dubowsky S. The kinematics and dynamics of space manipulators: the virtual manipulator approach. *International Journal of Robotics Research*, 1990, **9**(4): 3–21
- 17 Umetani Y, Yoshida K. Workspace and manipulability analysis of space manipulator. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2001, **E-1**(1): 116–123
- 18 Xu Wen-Fu, Li Li-Tao, Liang Bin, Li Cheng, Qiang Wen-Yi. Workspace analysis of space 3R robot. *Journal of Astronautics*, 2007, **28**(5): 1389–1394  
(徐文福, 李立涛, 梁斌, 李成, 强文义. 空间 3R 机器人工作空间分析. 宇航学报. 2007, **28**(5): 1389–1394)
- 19 Hou Zhi-Qiang, Han Chong-Zhao. A survey of visual tracking. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(4): 603–617  
(侯志强, 韩崇昭. 视觉跟踪技术综述. 自动化学报, 2006, **32**(4): 603–617)
- 20 Xu Wen-Fu, Liang Bin, Liu Yu, Li Cheng, Qiang Wen-Yi. A novel approach to avoid singularities of PUMA-type manipulators. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(6): 670–675  
(徐文福, 梁斌, 刘宇, 李成, 强文义. 一种新的 PUMA 类型机器人奇异回避算法. 自动化学报, 2008, **34**(6): 670–675)



**徐文福** 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所讲师. 主要研究方向为空间机器人、视觉伺服控制. 本文通信作者.

E-mail: wfxu@robotsat.com

(**XU Wen-Fu** Lecturer at the Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology. His research interest covers space robots and visual serving control. Corresponding author of this paper.)



**李成** 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所副教授. 主要研究方向为空间机器人、控制理论及运用.

E-mail: cli@robotsat.com

(**LI Cheng** Associate professor at the Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology. His research interest covers space robots, control science and application.)



**梁斌** 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所教授. 主要研究方向为空间机器人、控制理论及运用.

E-mail: bliang@robotsat.com

(**LIANG Bin** Professor at the Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology. His research interest covers space robots, control science and application.)



**刘宇** 哈尔滨工业大学空间智能系统研究所讲师. 主要研究方向为机器人路径规划与标定.

E-mail: yliu@robotsat.com

(**LIU Yu** Lecturer at the Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology. His research interest covers path planning and calibration

of the robot.)



**强文义** 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授. 主要研究方向为智能机器人、控制理论及运用.

E-mail: wyqiang@hit.edu.cn

(**QIANG Wen-Yi** Professor in the Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology. His research interest covers intelligent robots, control science and application.)