

# 空天智能应用挑战赛

题目一：空间机器人灵巧捕获

松江实验室

# 目录

- ① 竞赛题目
- ② 竞赛具体要求
- ③ 评分细则
- ④ 仿真示例

# 1 竞赛题目

## 竞赛背景

随着人类探索太空的步伐加快，空间机器人作为一种重要的工具，在太空科学研究、太空维修和太空资源开发等方面发挥着越来越重要的作用。本赛中采用的空间机器人为漂浮基七自由度机械臂，末端执行机构为4指12爪，执行在轨捕获的任务（目标为球体）。参赛者需要在三个指标中进行权衡，并优化机器人的性能，使其在能量消耗小、自主捕获时间短和碰撞冲击力小三个方面达到最优水平。

比赛工具及方法自定，举办方提供多体系统动力学软件MBDyn作为参赛示例，同时提供技术支持保障。

# 1 竞赛题目

## 竞赛题目

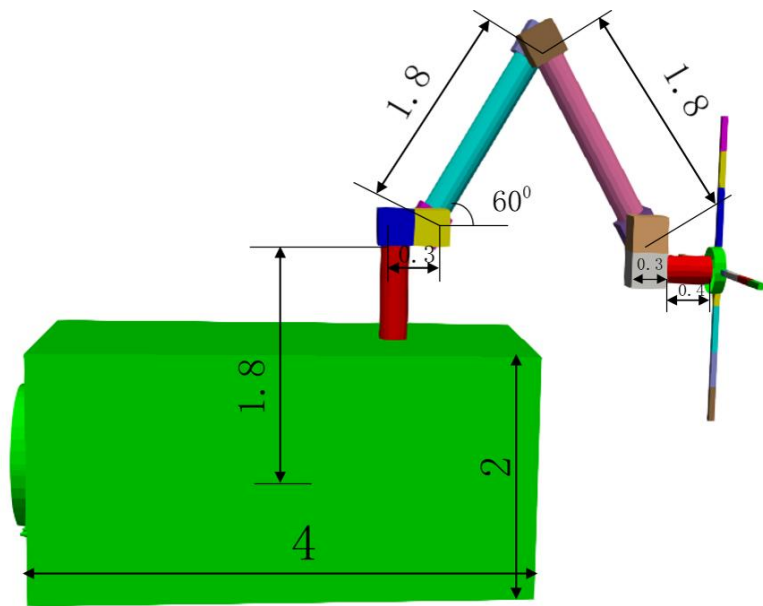
**竞赛题目：**参赛人员需基于所提供的urdf文件作为空间机器人的动力学模型，待捕获的目标为半径0.3m的小球（小球处于静止状态，材料属性在floating\_robot.mbs文件中给定），在此基础上自行设计捕获方案、轨迹规划和控制器，从能量消耗小、自主捕获时间短和碰撞冲击力小三个方面进行优化。模型介绍和各项优化指标得到的评分细则和要求后面介绍。

# 目录

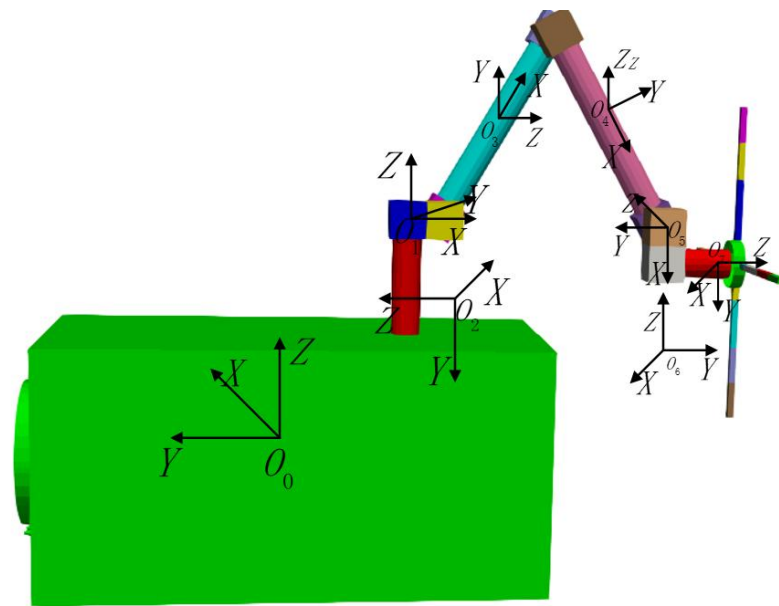
- ① 竞赛题目
- ② 竞赛具体要求
- ③ 评分细则
- ④ 仿真示例

## 2 竞赛具体要求

本竞赛采用的空间机器人为7关节机械臂/4指12关节手爪机构，目标为半径0.3m小球：



(a) 机械臂尺寸



(b) 机械臂坐标系

图1. 机械臂尺寸与坐标系

## 2 竞赛具体要求

表 1.2: 漂浮基座七自由度机械臂各项物理参数

| 坐标系 (关节坐标系) | 坐标系原点 (相对上一关节坐标系) /m      | 质心坐标系原点 (相对关节坐标系) /m                                  | 质量/kg  | 惯量 (相对质心坐标系) /m2 · kg                                                                                                                                                                                       |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                           |                                                       |        | $\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$                                                                                            |
| 0(base)     | [0,0,0]                   | <div>[-1.807E-19<br/>-0.00098368<br/>0.0019674]</div> | 969    | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 325 &amp; 3.0091E-15 &amp; -3.087E-15 \\ 3.0091E-15 &amp; 315 &amp; -1.5739 \\ -3.087E-15 &amp; -1.5739 &amp; 156 \end{bmatrix}</math></div>                     |
| J1          | [0 0 -1]                  | <div>[-0.00057307<br/>1.1008<br/>-1.4963E-17]</div>   | 67.05  | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 24.246 &amp; 0.066693 &amp; 1.7469E-17 \\ 0.066693 &amp; 1.4821 &amp; 4.273E-16 \\ 1.7469E-17 &amp; 4.273E-16 &amp; 24.238 \end{bmatrix}</math></div>            |
| J2          | [0.3 1.95 0]              | <div>[-0.0054979 0<br/>0.0054979]</div>               | 14.571 | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 0.43768 &amp; 2.1017E-17 &amp; -0.00086361 \\ 2.1017E-17 &amp; 0.4684 &amp; 1.0609E-18 \\ -0.00086361 &amp; 1.0609E-18 &amp; 0.43768 \end{bmatrix}</math></div>  |
| J3          | [-0.15 0 0]               | <div>[-0.15108 0.73107<br/>-0.52492]</div>            | 74.79  | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 31.046 &amp; -3.725E-15 &amp; 2.8701E-15 \\ -3.725E-15 &amp; 11.881 &amp; 14.11 \\ 2.8701E-15 &amp; 14.11 &amp; 20.846 \end{bmatrix}</math></div>                |
| J4          | [0.3 1.4621<br>-1.0498]   | <div>[-0.14892 -0.61315<br/>-0.65882]</div>           | 74.79  | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 31.046 &amp; -1.8878E-15 &amp; -1.9501E-15 \\ -1.8878E-15 &amp; 16.491 &amp; -14.59 \\ -1.9501E-15 &amp; -14.59 &amp; 14.236 \end{bmatrix}</math></div>          |
| J5          | [0.15 -1.2263<br>-1.3176] | <div>[-0.0054979<br/>-0.0054978<br/>3.4524E-05]</div> | 14.571 | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 0.43768 &amp; 0.00086359 &amp; -5.4229E-06 \\ 0.00086359 &amp; 0.43768 &amp; 0.00019287 \\ -5.4229E-06 &amp; 0.00019287 &amp; 0.46839 \end{bmatrix}</math></div> |
| J6          | [0 -0.29999<br>0.0018838] | <div>[0 0.0054633<br/>-0.0055323]</div>               | 14.571 | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 0.4684 &amp; 4.349E-17 &amp; -2.3355E-18 \\ 4.349E-17 &amp; 0.43767 &amp; -0.00086354 \\ -2.3355E-18 &amp; -0.00086354 &amp; 0.43769 \end{bmatrix}</math></div>  |
| J7          | [0 -0.00094191<br>-0.15]  | <div>[1.1102E-16<br/>-0.0013466<br/>-0.21444]</div>   | 7.919  | <div><math display="block">\begin{bmatrix} 0.25472 &amp; -2.096E-16 &amp; 1.5789E-16 \\ -2.096E-16 &amp; 0.25472 &amp; -0.00063745 \\ 1.5789E-16 &amp; -0.00063745 &amp; 0.15321 \end{bmatrix}</math></div> |

图2. 机械臂物理参数

## 2 竞赛具体要求

| 坐标系 (关节坐标系) | 坐标系原点 (相对上一关节坐标系) /m   | 质心坐标系原点 (相对关节坐标系) /m                    | 质量/kg   | 惯量 (相对质心坐标系) /m2 · kg                                                                                                                                  |
|-------------|------------------------|-----------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                        |                                         |         | $\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$                                       |
| E11         | [0 0.25295 -0.32659]   | [-5.5511E-17<br>0.17044<br>-0.0010703]  | 1.0039  | $\begin{bmatrix} 0.01032 & 1.2552E-18 & 2.8581E-20 \\ 1.2552E-18 & 0.00050764 & 6.2217E-05 \\ 2.8581E-20 & 6.2217E-05 & 0.010415 \end{bmatrix}$        |
| E12         | [0 0.34999 -0.0021978] | [-5.5511E-17<br>0.14544<br>-0.00091326] | 0.8539  | $\begin{bmatrix} 0.006575 & 7.7798E-19 & -9.5619E-21 \\ 7.7798E-19 & 0.00043125 & 3.9091E-05 \\ -9.5619E-21 & 3.9091E-05 & 0.0066561 \end{bmatrix}$    |
| E13         | [0 0.29999 -0.0018838] | [0 0.13504<br>-0.000848]                | 0.79952 | $\begin{bmatrix} 0.0051965 & 3.3241E-19 & -9.4852E-20 \\ 3.3241E-19 & 0.0.00038283 & 3.0599E-05 \\ -9.4852E-20 & 3.0599E-05 & 0.0052555 \end{bmatrix}$ |

图3. 末端手爪物理参数

| 目标     | 坐标系原点 (相对惯性系) /m   | 质心坐标系原点 (相对本体系) /m | 质量/kg | 惯量 (相对质心坐标系) /m2 · kg                                                                                            |
|--------|--------------------|--------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        |                    |                    |       | $\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$ |
| target | [0.3 1.8849 -6.55] | [0 0 0]            | 1     | $\begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$                                    |

图4. 目标状态参数

## 2 竞赛具体要求

竞赛提供urdf模型作为仿真的动力学模型：float.urdf。

```
[MBSIM_0_1]
```

```
URDF/1, RA, URDFNAME = float.urdf, QG= 0,0,0,1,0,0,0, COLLIDE = 1
```

图5. 在MBDyn中导入urdf

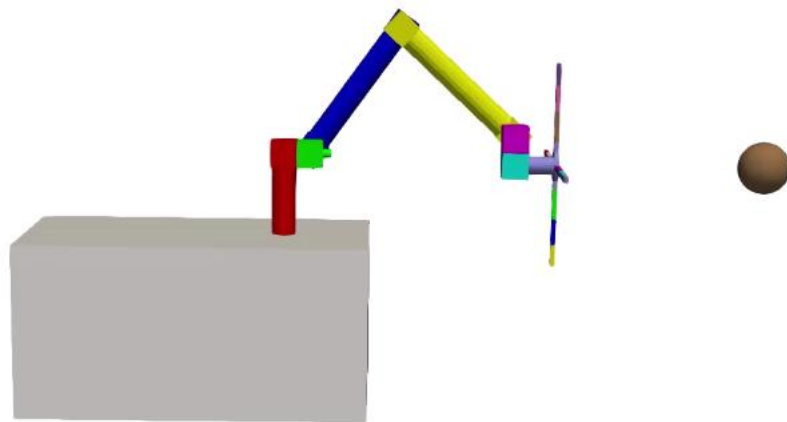


图6. 在MBDyn中显示urdf模型

# 目录

- ① 竞赛题目
- ② 竞赛具体要求
- ③ 评分细则**
- ④ 仿真示例

### 3 评分细则

#### 评分标准

**标准总述：**从能量消耗小、自主捕获时间短和碰撞冲击力小三个指标来评价空间机器人捕获目标的性能，并进行优化。

**能量消耗角度：**评分标准包括机器人移动速度和机器人运动轨迹等，评估机器人在捕获目标过程中的能耗情况。

**捕获耗时角度：**评分标准包括机器人定位精度、机器人响应速度和机器人抓取精度等，评估机器人在自主捕获目标的过程中所需的时间。

**碰撞冲击角度：**评分标准包括目标捕获过程中的碰撞力、机器人捕获精度和目标损坏情况等，评估机器人在捕获目标过程中对目标和机器人本身的影响。

### 3 评分细则

#### 评分标准

漂浮基空间机器人在运行过程中总的能量消耗为：

$$C = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_e} |T_{mi} \theta'_{mi}| dt + \sum_{j=1}^3 \int_0^{t_e} |T_{mj} \theta'_{mj}| dt + \sum_{k=1}^3 \int_0^{t_e} |F_{mk} v_{mk}| dt$$

式中： $T_{mi}$ 为第*i*个电机的关节力矩， $\theta'_{mi}$ 为电机输出的角速度，*i*代表电机序号， $T_{mj}$ 代表基座控制力矩， $\theta'_{mj}$ 为基座角速度， $F_{mk}$ 代表基座控制力， $v_{mk}$ 代表基座速度。

**最终评价函数：**  $Score = w_1 C + w_2 t_e + w_3 F_{max}$  （总分越小越好）

其中C为空间机器人执行任务过程能耗； $t_e$ 为自主捕获的总耗时； $F_{max}$ 为捕获过程中最大碰撞力； $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 为这三项评价的权重，大小分别为4、1.5、2。

### 3 评分细则

#### 评分标准

**要求及目标：**设计如下所示的漂浮基七自由度空间机器人，设计控制器并进行轨迹规划抓捕目标，基座控制力在50N范围内，基座控制力矩在 $10\text{N} \cdot \text{m}$ 范围内，关节控制力矩在 $50\text{N} \cdot \text{m}$ 范围内，按照上文构建的评价函数优化轨迹、降低能耗、减小碰撞冲击。在手爪处于抓取状态（关节力矩平方和不为零）下，基座与目标在xyz轴的相对速度（绝对值）小于 $0.001\text{m/s}$ ，即判定捕获成功。

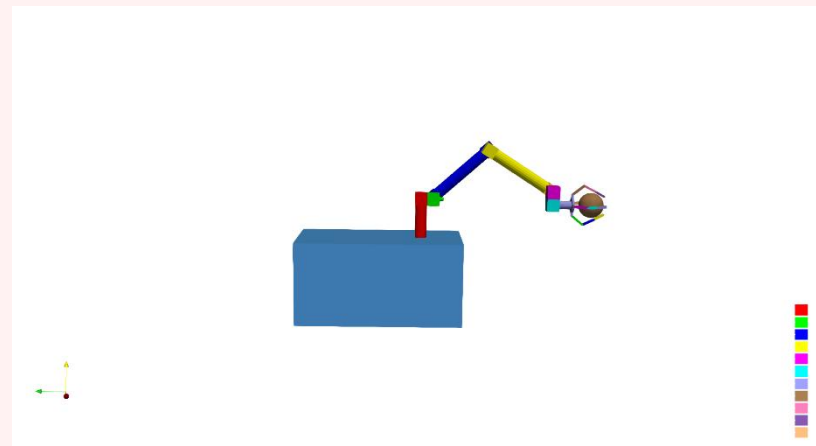
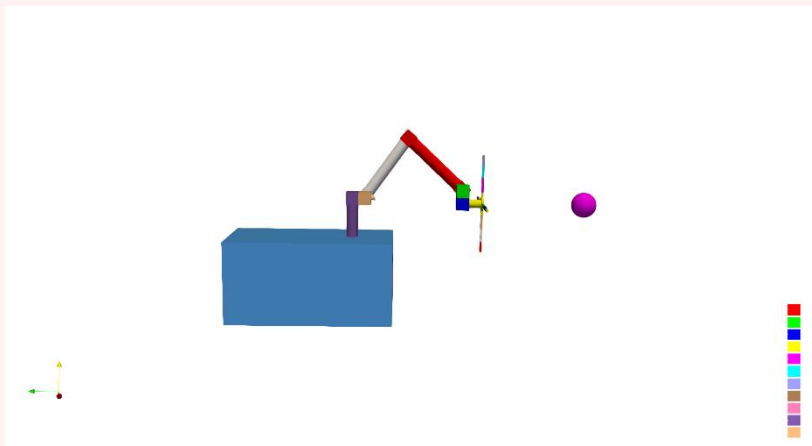


图7. 漂浮基空间机器人捕获目标

# 目录

- ① 竞赛题目
- ② 竞赛具体要求
- ③ 评分细则
- ④ 仿真示例

## 4 仿真示例

**示例：操控漂浮基机械臂捕获目标小球**

**仿真内容示例：**操作漂浮基七自由度机械臂捕获目标小球，示例中小球位于机械臂末端 $[0 \ 0 \ -1.5]$ 的位置处，控制基座位移 $[0 \ 0 \ -1]$ 、机械臂末端位移 $[0 \ 0 \ -0.5]$ ，之后收拢手爪完成对小球的捕获。

### 示例程序

**MBDyn配置文件：**`floating_robot.txt`

**关节空间轨迹规划参考示例程序：**`traj_hope.txt`

**联合仿真程序(计算力矩法控制器)：**`CalController.slx`

## 4 仿真示例

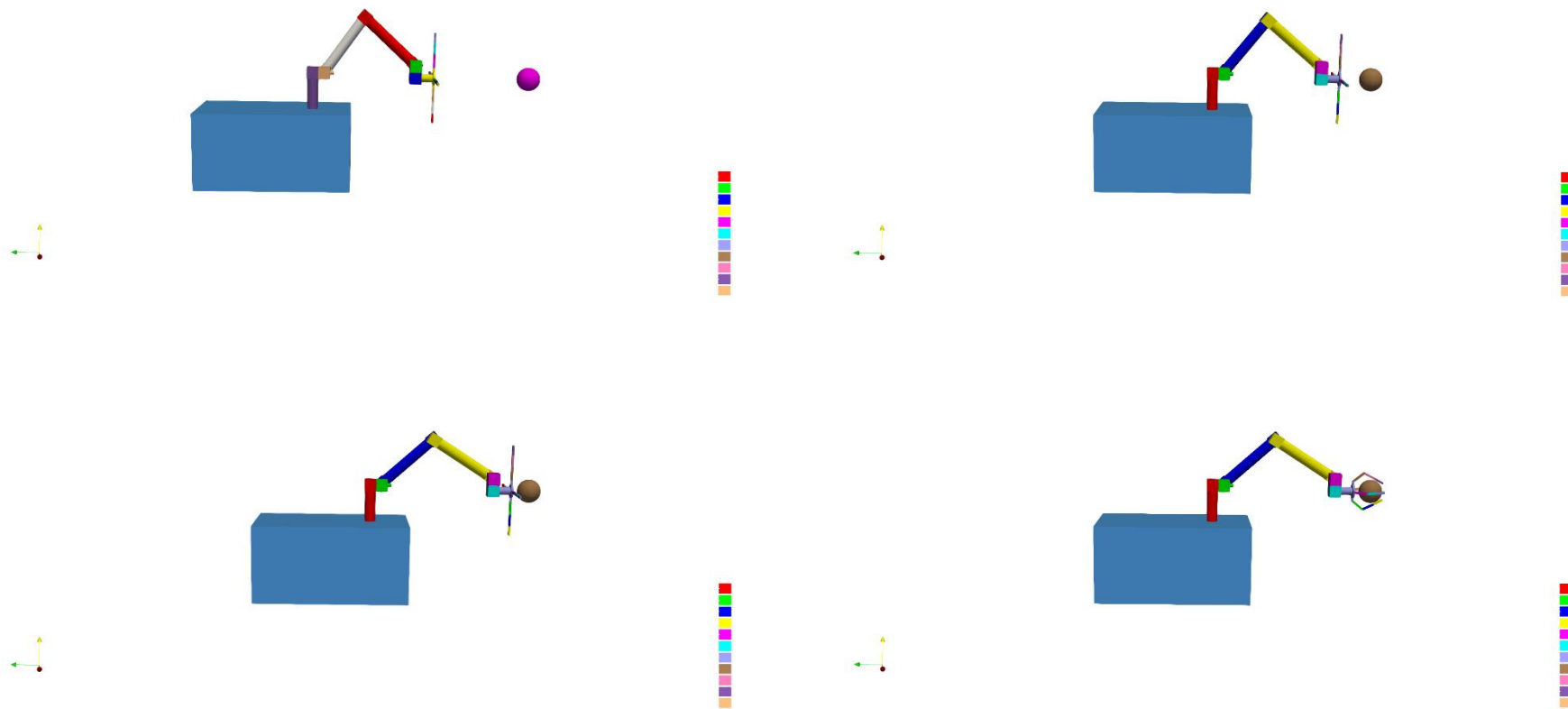
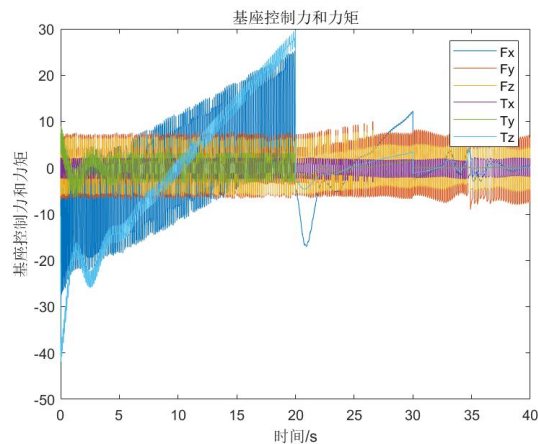
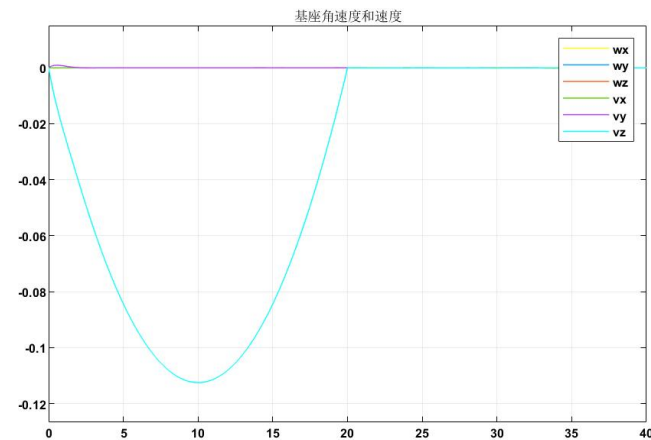


图8. 漂浮基空间机器人捕获目标

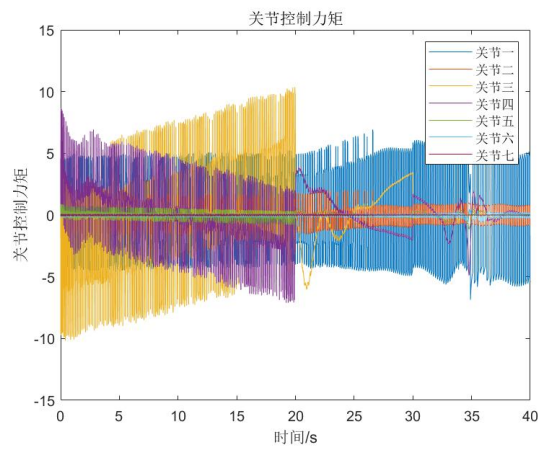
# 4 仿真示例



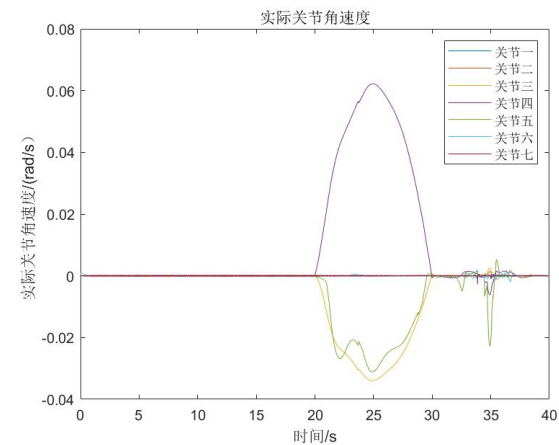
(a) 基座控制力和力矩



(b) 基座速度和角速度



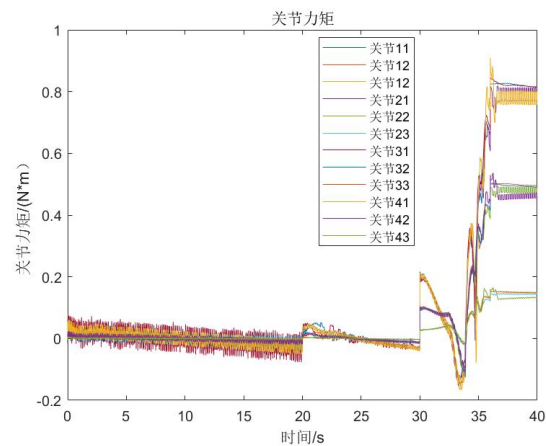
(c) 机械臂关节力矩



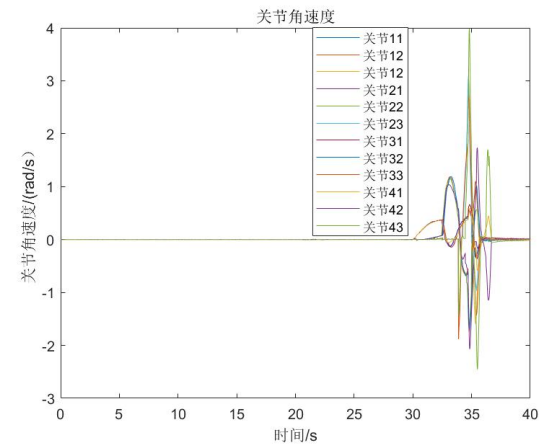
(d) 机械臂关节角速度

图9. 仿真结果

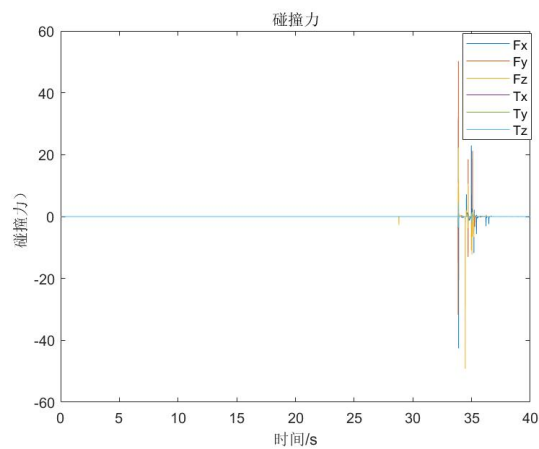
# 4 仿真示例



(a) 末端手爪关节力矩



(b) 末端手爪关节角速度



(c) 碰撞力

图10. 仿真结果

## 4 仿真示例

### 仿真与评分结果

耗能总和:  $C=17.1586\text{J}$

捕获时长:  $t_e=40\text{s}$

最大碰撞力:  $F_{max}=54.0571$

总评分:  $\text{Score}=4 * C + 1.5 * t_e + 2 * F_{max}=236.74865$