

## 空间智能软体机械臂动力学建模与控制

张翔<sup>1,2</sup>, 刘红卫<sup>1</sup>, 刘卓群<sup>2</sup>, 闫振国<sup>2</sup>, 陈小前<sup>1</sup>, 黄奕勇<sup>1</sup>

(1. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071;

2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 空间智能软体机械臂因其结构轻巧、灵活可变、可折叠收缩等特性, 在航天器在轨服务任务中, 将具有广阔的应用前景。首先提出了一种全向驱动模块化软体机械臂设计方案, 利用刚柔耦合动力学理论建立了气控驱动的软体机械臂动力学模型, 基于深度回归卷积神经网络理论建立了空间非合作目标检测与识别算法, 为空间软体机械臂智能控制奠定了技术基础。进一步地, 设计并研制了软体机械臂地面原理样机及其试验系统, 通过地面试验, 对软体机械臂的自主运动控制和识别算法进行了初步验证。

**关键词:** 软体机械臂; 在轨服务; 动力学建模; 目标检测与识别; 智能控制

**中图分类号:** TP242.6

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-6652.201905

## Dynamical modeling and intelligent control of space soft manipulator

ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Hongwei<sup>1</sup>, LIU Zhuoqun<sup>2</sup>, YAN Zhengguo<sup>2</sup>, CHEN Xiaolian<sup>1</sup>, HUANG Yiyong<sup>1</sup>

1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Science, Beijing 100071, China

2. College of Aerospace Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** Space intelligent soft manipulator shows a broad prospect in the application of on-orbit service, due to its lightweight, dexterity and foldability. In this paper, a design of a modular soft manipulator with omnidirectional drivers was proposed. The dynamical model of the proposed soft manipulator was developed based on the rigid-flexible coupling system dynamics. The detection and recognition algorithm for space non-cooperative objects was designed based on deep regression convolution neural network. Both the dynamical model and the algorithm are the foundation for the intelligent control of the soft manipulator. Moreover, an experiment system of the soft manipulator was designed and developed, and the autonomous motion control and the recognition algorithm were validated.

**Key words:** soft manipulator, on-orbit service, dynamical modeling, object detection and recognition, intelligent control

### 1 引言

传统空间机械臂体积与重量大, 结构复杂, 发射难度大、成本高。随着空间操控技术的快速发展, 其对轻质化、灵巧化的空间柔性操控与空间机器人技术提出了迫切需求。充气式软体机械臂是一种主

要由气囊构成本体, 并用气囊结构作为驱动装置的柔性机械臂。通过调节臂内气囊压力, 实现对机械臂刚度的控制; 通过控制臂杆气囊和关节气囊内的压力, 可在改变机械臂形状的同时实现柔性机械臂的大维度控制。充气式软体机械臂因其质量轻、可压缩、控制灵活、安全性高等特性, 在未来空间柔

收稿日期: 2019-02-11; 修回日期: 2019-02-26

通信作者: 刘红卫, liuhw05@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.11702320); 军内科研项目 (No.JK20182A020256, No.JK20172A04234)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.11702320), Military Research Projects (No.JK20182A020256, No.JK20172A04234)

性操控任务中将具有广阔的应用前景。

目前, 软体机械臂研究已经成为国内外机器人领域的热点, 并已出现几款比较典型的软体机械臂。S.Voisembert<sup>[1]</sup>团队设计了一款线驱动气囊机械臂, 其由整条气囊结构组成, 通过褶皱设计构建单自由度关节; Siddharth Sanan<sup>[2]</sup>团队通过多气囊构型的复杂结构设计, 构建了一套仿手臂型软体机械臂; Ronghuai Qi<sup>[3-4]</sup>团队设计了一种通过线缆控制的软体气囊手臂结构; W. McMahan<sup>[5]</sup>团队基于仿生学, 设计了一款由互相独立的膨胀驱动单元控制的仿生象鼻机械臂, 能模仿象鼻实现对物体的缠绕抓捕。

在软体机械臂动力学建模方面, 早期如 Renda 等人<sup>[6-7]</sup>基于 Cosserat 梁理论建立了肌腱驱动的连接体机器人三维静力学模型; Zheng 等人<sup>[8]</sup>基于分布式的弹簧—阻尼模型, 建立了章鱼机械臂的三维动力学模型; Rone 等人<sup>[9]</sup>根据虚功原理建立了线驱连续体机器人的三维动力学模型; Webster 等人<sup>[10]</sup>总结了基于弹性理论、Cosserat 杆理论的力学建模方法和能量最小化建模方法; Tatlicioglu 等人<sup>[11]</sup>建立了平面连续型机械臂的动力学模型, 并在其中增加了重力势能项和弹性势能项, 使模型与机械臂的真实行为相一致。Trivedi 等人<sup>[12]</sup>将材料的非线性、分布式的重量和负载等因素考虑在内, 基于 Cosserat 杆理论和气动肌肉建立了气动机械臂模型。然而, 目前对连续体机器人的动力学建模尚处于探索阶段, 模型的准确性以及对于控制系统设计的作用均有待改善。

本文以航天器在轨服务任务需求为背景, 针对现有机械臂体积大、质量重等问题, 提出一种气控型空间智能软体机械臂设计方案; 利用刚柔耦合动力学理论建立了气控驱动的软体机械臂动力学模型, 并指导控制系统及控制算法设计; 基于深度回归卷积神经网络理论建立了空间非合作目标检测与识别算法, 并进行了相关测试, 为空间软体机械臂智能控制奠定了坚实的技术基础。最后, 搭建了空间智能软体机械臂地面试验系统, 对控制算法、图像感知与智能决策等进行了系统性验证, 为智能软体机械臂在空间操控任务中的应用打下了良好基础。

## 2 软体机械臂动力学建模

### 2.1 问题描述

软体机械臂由三段软体驱动器串联组成, 单个

软体驱动器由 3 个对称布置的波纹管并联组成, 其横截面如图 1 所示。软体驱动器之间采用刚性约束框连接, 软体驱动器内部并联的波纹管也由一系列刚性约束框连接。在机械臂运动过程中, 刚性约束框始终保持整体的空间运动, 不会发生弯曲变形。在相邻两个刚性约束框之间, 波纹管气囊可以伸缩或弯曲。每个波纹管采用单独的气压控制, 该机械臂共有 9 路独立的气压控制输入, 通过控制不同的气压组合实现机械臂复杂的空间运动。下面将建立输入气压组合与软体机械臂末端运动之间的动力学模型。

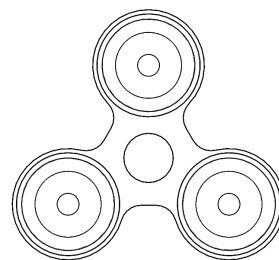


图1 并联波纹管的横截面

### 2.2 无约束单驱动器动力学建模

为便于数学建模, 首先考虑无刚性约束框下的单驱动器建模问题, 如图 2 所示。3 个气囊 A、B、C 对称并联, 相邻两个气囊中心之间的水平距离均为  $a$ , 下端固定, 上端由刚性框连接, 保证 3 个机械臂上端面具有相同的空间指向。除上下端面外, 气囊之间不存在约束和连接。在无充气状态下, 3 个气囊的长度均为  $L_0$ 。

当气囊充气时, 仅考虑沿气囊轴向的伸长变化, 不考虑沿径向的变化。设 3 个气囊的弹性系数均为  $k$ , 输入气压分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ , 每个气囊伸长产生的弹力分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , 伸长量分别为  $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ 、 $\Delta L_3$ , 在弹性变形假设下有

$$\begin{cases} F_1 = k\Delta L_1 = P_1 S \\ F_2 = k\Delta L_2 = P_2 S \\ F_3 = k\Delta L_3 = P_3 S \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $S$  是气囊内部的横截面积。如果不存在上端刚性框, 则 3 个气囊的长度分别为

$$\begin{cases} L_1 = L_0 + \Delta L_1 = L_0 + \frac{P_1 S}{k} \\ L_2 = L_0 + \Delta L_2 = L_0 + \frac{P_2 S}{k} \\ L_3 = L_0 + \Delta L_3 = L_0 + \frac{P_3 S}{k} \end{cases} \quad (2)$$

上端刚性约束框的力学效果有两个：1) 使 3 个气囊上端 A、B、C 三点仍然构成等边三角形，边长为  $a$ ；2) 使 3 个气囊上端面法向具有相同的空间指向。以固定端平面为  $xy$  平面，建立直角坐标系，如图 3 所示。A<sub>0</sub>、B<sub>0</sub>、C<sub>0</sub> 分别为 3 个气囊的固定端，三点构成等边三角形，边长为  $a$ 。以 B<sub>0</sub> 点为坐标原点， $x$  轴垂直于 A<sub>0</sub>C<sub>0</sub> 向下， $y$  轴水平向右， $z$  轴垂直于纸面向外，构成右手直角坐标系。在该坐标系中，A<sub>0</sub>、B<sub>0</sub>、C<sub>0</sub> 的坐标分别为

$$\begin{aligned} A_0 &: \left( \frac{\sqrt{3}}{2}a, -\frac{a}{2}, 0 \right) \\ B_0 &: (0, 0, 0) \\ C_0 &: \left( \frac{\sqrt{3}}{2}a, \frac{a}{2}, 0 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

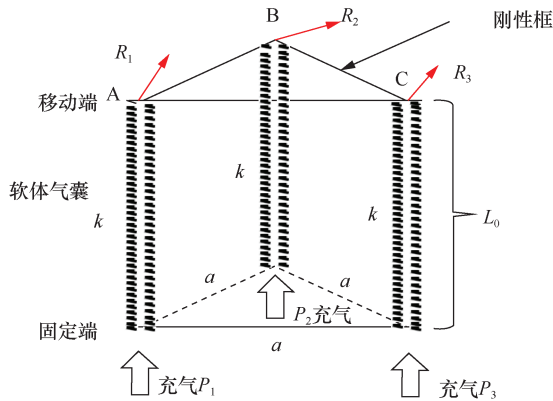


图2 无刚性约束框的单驱动器

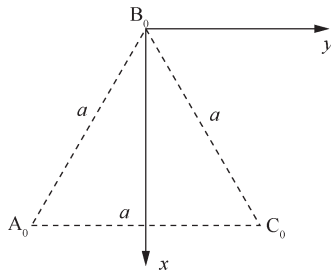


图3 直角坐标系

在未充气状态下，3 个气囊上端点 A、B、C 的坐标分别为 A:  $(\sqrt{3}a/2, -a/2, L_0)$ 、B:  $(0, 0, L_0)$ 、C:  $(\sqrt{3}a/2, a/2, L_0)$ 。设上端刚性框对 3 个气囊的作用力分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ，其方向位于约束框平面内。在  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的作用下，3 个气囊上端产生的挠度为

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{R_1 L_1^3}{3E_1 I} = \frac{R_1 L_1^2 S'}{3kI} \\ v_2 &= \frac{R_2 L_2^3}{3E_2 I} = \frac{R_2 L_2^2 S'}{3kI} \\ v_3 &= \frac{R_3 L_3^3}{3E_3 I} = \frac{R_3 L_3^2 S'}{3kI} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $E$  为弹性模量， $I$  为惯性矩， $EI$  为弯曲刚度， $S'$  为气囊壁的横截面积，即承受轴向拉压的有效面积。

对于外半径为  $R$ 、内半径为  $r$  的圆环截面，其惯性矩为

$$I = \int y^2 dA = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4} \quad (5)$$

在  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的作用下，3 个气囊上端产生的转角为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{R_1 L_1^2}{2E_1 I} = \frac{R_1 L_1 S'}{2kI} \\ \theta_2 &= \frac{R_2 L_2^2}{2E_2 I} = \frac{R_2 L_2 S'}{2kI} \\ \theta_3 &= \frac{R_3 L_3^2}{2E_3 I} = \frac{R_3 L_3 S'}{2kI} \end{aligned} \quad (6)$$

3 个气囊上端点 A、B、C 具有相同的法向指向，意味着

$$\begin{aligned} \{\theta_1 = \theta_2; \theta_1 = \theta_3\} \Rightarrow \\ \{R_1 L_1 = R_2 L_2; R_1 L_1 = R_3 L_3\} \end{aligned} \quad (7)$$

A、B、C 具有相同的法向指向也意味着，具有挠度的 3 个气囊在  $xy$  平面内的投影方向平行。设从  $x$  轴沿逆时针到投影的角度为  $\alpha$ ，则充气后 3 个气囊上端点的坐标分别为

$$\begin{cases} A': \left( v_1 \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}a, v_1 \sin \alpha - \frac{a}{2}, L_1 \right) \\ B': (v_2 \cos \alpha, v_2 \sin \alpha, L_2) \\ C': \left( v_3 \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}a, v_3 \sin \alpha + \frac{a}{2}, L_3 \right) \end{cases} \quad (8)$$

根据约束条件  $A'B' = B'C' = C'A' = a$ ，得到

$$\begin{aligned} \left( \frac{S'}{3kI} \right)^2 (R_1 L_1^2 - R_2 L_2^2)^2 + \frac{(R_1 L_1^2 - R_2 L_2^2) a S'}{3kI} \\ (\sqrt{3} \cos \alpha - \sin \alpha) + (L_1 - L_2)^2 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left(\frac{S'}{3kl}\right)^2 (R_3 L_3^2 - R_2 L_2^2)^2 + \frac{aS'}{3kl} (R_3 L_3^2 - R_2 L_2^2) (\sqrt{3} \cos \alpha + \sin \alpha) + (L_3 - L_2)^2 = 0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{S'}{3kl}\right)^2 (R_3 L_3^2 - R_1 L_1^2)^2 + \frac{2aS'}{3kl} (R_3 L_3^2 - R_1 L_1^2) \sin \alpha + (L_3 - L_1)^2 = 0 \quad (11)$$

联立方程 (7) 和方程 (9) ~ (11), 得到角度  $\alpha$  为

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{3}(L_1 - L_3)}{2L_2 - L_3 - L_1} \quad (12)$$

角度  $\alpha$  满足如下关系:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}, & L_1 \geq L_2 \geq L_3; & \frac{2\pi}{3} \leq \alpha \leq \pi, & L_1 \geq L_3 \geq L_2 \\ 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}, & L_2 \geq L_1 \geq L_3; & \frac{5\pi}{3} \leq \alpha < 2\pi, & L_2 \geq L_3 \geq L_1 \\ \pi \leq \alpha \leq \frac{4\pi}{3}, & L_3 \geq L_1 \geq L_2; & \frac{4\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{3}, & L_3 \geq L_2 \geq L_1 \end{cases} \quad (13)$$

同时, 根据方程 (7) 和方程 (9) ~ (11), 有

(i) 当  $\Delta L_1 \neq \Delta L_3$  时, 得到  $W$  为

$$W = \frac{a \sin \alpha}{M(\Delta L_1 - \Delta L_3)} \pm \frac{1}{M} \text{sign}(\Delta L_1 - \Delta L_3) \times \sqrt{\frac{3a^2 - 3(\Delta L_1 - \Delta L_3)^2 - (2\Delta L_2 - \Delta L_3 - \Delta L_1)^2}{3(\Delta L_1 - \Delta L_3)^2 + (2\Delta L_2 - \Delta L_3 - \Delta L_1)^2}} \quad (14)$$

(ii) 当  $\Delta L_1 = \Delta L_3 \neq \Delta L_2$  时, 得到  $W$  为

$$W = \frac{-\sqrt{3}a \cos \alpha}{M(\Delta L_1 - 2\Delta L_2 + \Delta L_3)} \pm \frac{1}{M} \text{sign}(\Delta L_1 - 2\Delta L_2 + \Delta L_3) \times \sqrt{\frac{3a^2 - 3(\Delta L_1 - \Delta L_3)^2 - (2\Delta L_2 - \Delta L_3 - \Delta L_1)^2}{3(\Delta L_1 - \Delta L_3)^2 + (2\Delta L_2 - \Delta L_3 - \Delta L_1)^2}} \quad (15)$$

根  $W$  中包含两个正数解, 取较小者为方程的实际解, 它对应较小的挠度。其中,

$$\begin{aligned} W &= R_1 L_1 = R_2 L_2 = R_3 L_3 \geq 0 \\ M &= S' / 3kl > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

根据式(2), 由 3 个气囊的输入气压  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ , 得到气囊伸长后的长度  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 。由方程 (12) ~ (16) 可以得到  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $\alpha$ , 然后由式 (4) 得到 3 个气囊的挠度  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ , 进而由式 (8) 计算得到气囊上端  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$  的空间位置, 这样就建立了从气囊输入气压  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  到气囊上端  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$  位移之间的数学模型。

### 2.3 带约束单驱动器动力学建模

对于带有刚性约束框的单驱动器, 其仍然由 3 个气囊对称并联组成, 但是沿气囊长度方向均匀布置了  $N$  个刚性约束框, 保证该位置处的 3 个气囊中心点组成边长为  $a$  的等边三角形。  $N$  个刚性约束框将气囊划分为等距离的各个小段, 这些小段是完全相同的, 具有相同的输入气压。

从固定端开始, 自下而上考虑每一小段在刚性约束框下的力学行为。由对称性可知, 每一小段相对其底端刚性约束框的运动轨迹均是相同的。不妨考虑建立在固定端和第一个刚性约束框上的直角坐标系。与图 3 中直角坐标系建立规则相同, 分别取  $B_0$ 、 $B_1$  为原点, 原点指向三角形对边中点的方向为  $x$  轴, 取固定端和刚性约束框平面为  $xy$  平面,  $x$  轴逆时针转动  $90^\circ$  为  $y$  轴,  $xyz$  构成右手直角坐标系, 如图 4 所示。

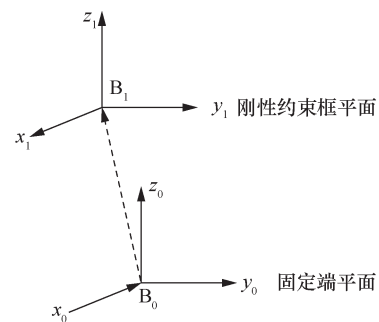


图 4 相邻两个面上的直角坐标系

在图 4 中, 固定端平面和刚性约束框平面之间存在一段气囊, 设气囊的弯曲方向为  $\alpha$ , 气囊末端弯曲角度为  $\theta$ , 则由  $x_0 y_0 z_0$  到  $x_1 y_1 z_1$  的旋转矩阵为  $H$ 。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = M_3(\alpha) M_2(\theta) M_3(-\alpha) \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

从而

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \mathbf{H}^T \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1} \quad (18)$$

其中,  $\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1}$  是在  $x_0y_0z_0$  坐标系中表示的。假设带刚性约束框的单驱动器末端中心在其刚性约束框坐标系中的坐标为  $\mathbf{r}^*$ , 该软体机械臂共有  $N$  节, 则  $\mathbf{r}^*$  在固定端坐标系  $x_0y_0z_0$  中的坐标表示为

$$\mathbf{r}_N^* = (\mathbf{H}^T)^{N-1} \mathbf{r}^* + \left[ (\mathbf{H}^T)^{N-2} + (\mathbf{H}^T)^{N-3} + \cdots + (\mathbf{H}^T)^1 + (\mathbf{H}^T)^0 \right] \overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1} \quad (19)$$

其中,  $\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1} = (v_2 \cos \alpha \quad v_2 \sin \alpha \quad L_2)^T$ 。  $\mathbf{r}^*$  是无刚性约束框下的单驱动器末端位移, 可以由第 2.2 节模型计算得到。根据第 2.2 节模型得到气囊弯曲方向  $\alpha$ 、弯曲角度  $\theta$ 、挠度  $v_2$ 、充气后长度  $L_2$ , 进而根据式 (19) 得到在  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  输入气压组合下带有刚性约束框的单驱动器末端位移。

#### 2.4 带约束多驱动器动力学模型

以 3 节带有刚性约束框的驱动器串联为例, 建立软体机械臂的动力学模型。串联部位采用刚性约束, 约束部件厚度分别为  $T_{1-2}$ 、 $T_{2-3}$ 。设 3 节驱动器中的气囊外半径分别为  $r_{\text{out},1}$ 、 $r_{\text{out},2}$ 、 $r_{\text{out},3}$ , 内半径分别为  $r_{\text{in},1}$ 、 $r_{\text{in},2}$ 、 $r_{\text{in},3}$ , 单节气囊的原始长度分别为  $L_{0,1}$ 、 $L_{0,2}$ 、 $L_{0,3}$ , 弹性系数分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ , 相邻两个气囊中心之间的水平距离分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 。第一节驱动器中施加的气压分别为  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{13}$ , 第二节中施加的气压分别为  $P_{21}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{23}$ , 第三节中施加的气压分别为  $P_{31}$ 、 $P_{32}$ 、 $P_{33}$ , 3 个驱动器的节数分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 。

根据第 2.3 节模型, 计算得到每节驱动器中各段相对底部坐标系的三维坐标, 其中 3 节驱动器底部坐标系分别为  $x_{01}y_{01}z_{01}$ 、 $x_{02}y_{02}z_{02}$ 、 $x_{03}y_{03}z_{03}$ 。已知第二节驱动器上各段在  $x_{02}y_{02}z_{02}$  坐标系上的坐标表示为  $\mathbf{r}_2^*$ , 将其转换到  $x_{01}y_{01}z_{01}$  坐标系中, 得到

$$\mathbf{r}_{2-1}^* = (\mathbf{H}_1^T)^{N_1} \left[ \mathbf{r}_2^* + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{1-2} \end{pmatrix} \right] + \left[ (\mathbf{H}_1^T)^{N_1-1} + (\mathbf{H}_1^T)^{N_1-2} + \cdots + (\mathbf{H}_1^T)^1 + (\mathbf{H}_1^T)^0 \right] (\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1})_1 \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_1(\alpha_1, \theta_1)$ ,  $(\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1})_1$  括号外面的下标“1”表示是在第一节驱动器中计算得到的。同理, 得到第三节驱动器上的坐标  $\mathbf{r}_3^*$  转换到  $x_{02}y_{02}z_{02}$  上的坐标为

$$\mathbf{r}_{3-2}^* = (\mathbf{H}_2^T)^{N_2} \left[ \mathbf{r}_3^* + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{2-3} \end{pmatrix} \right] + \left[ (\mathbf{H}_2^T)^{N_2-1} + (\mathbf{H}_2^T)^{N_2-2} + \cdots + (\mathbf{H}_2^T)^1 + (\mathbf{H}_2^T)^0 \right] (\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1})_2 \quad (21)$$

其中,  $\mathbf{H}_2 = \mathbf{H}_2(\alpha_2, \theta_2)$ ,  $(\overline{\mathbf{B}_0\mathbf{B}_1})_2$  括号外面的下标“2”表示是在第二个驱动器中计算得到的。这样, 根据式 (20) 和式 (21), 得到了带有刚性约束框的 3 节驱动器串联后末端中心位移与气囊输入气压之间的数学关系, 从而建立了气囊型软体机械臂的动力学模型。

假设气囊型软体机械臂每节均有 10 个刚性约束框, 气囊内半径为 4 cm, 外半径为 4.2 cm, 相邻两个刚性约束框的原始距离为 5 cm, 弹性系数为 1200 N/m, 两个气囊中心之间的间距为 10 cm。在输入气压的驱动下, 得到 3 节串联气囊臂的运动轨迹, 如图 5 所示。测试数据表明, 该动力学模型基本可以反映软体机械臂的运动规律, 进行数据校正后可作为机械臂开环或闭环控制的动力学模型。

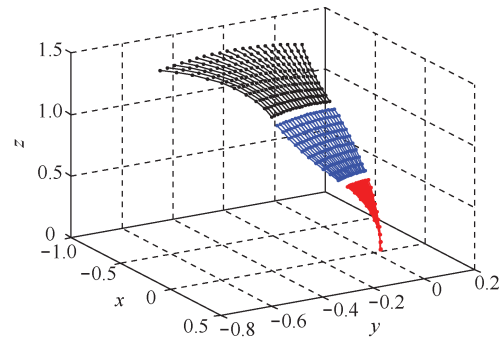


图 5 气囊型软体机械臂运动轨迹

### 3 目标检测与识别

目标检测与识别是计算机视觉领域研究的热点问题, 它能解决图像中是否包含该目标以及该目标在哪、尺寸多大的问题, 是姿态提取与机械臂抓取必不可少的前提。图像目标的准确感知能够极大地帮助计算机理解图像, 是后续目标姿态提取与机械臂抓取的基础。传统的目标检测识别



卷积层上都添加了批量归一化。此外,为了使特征更适合小尺寸的物体,增加了一个直通层。直通层把高低两种分辨率的特征图做了一次连结,连接方式是叠加特征到不同的通道而不是空间位置。这个方法把  $26 \times 26 \times 512$  的特征图连接到  $13 \times 13 \times 2048$  的特征图,这个特征图与原来的特征相连接。该方法可以拥有更好的细粒度特征,该层通过将特征叠加到不同的通道中来连接不同分辨率的特征。具体而言,倒数第二个  $26 \times 26 \times 512$  特征映射变成  $13 \times 13 \times 2048$  特征映射,其与最后一个卷积层的  $13 \times 13 \times 1024$  特征映射连接。因此,用于检测的目标特征是细粒度的,并且非常适用于小尺寸的物体。最后  $1 \times 1$  的卷积层用来输出空间目标坐标和类似物体的分数,为姿态提取和机械臂抓取提供必不可少的条件。

### 3.2.2 模型训练

本节提出的目标检测与识别系统把输入的图片分成  $13 \times 13$  的网格。如果真值中心落入网格单元格中,这个单元格就负责检测该对象,即定义  $Pr(\text{Object})=1$ 。否则,如果没有对象位于网格单元格中,则定义  $Pr(\text{Object})=0$ 。

在对卷积层进行下采样之后,  $416 \times 416$  像素的输入图像会得到  $13 \times 13$  像素的输出特征图。对于特征图上的每个网格单元,提出了 5 个锚点和相应的置信度分数(图 6 中的黄色框)。每个锚点对应于原始图像上的预测框,置信度分数定义为式(22)。

$$\text{score}_{\text{confidence}} = Pr(\text{Object}) \times IoU \quad (22)$$

这里,  $IoU$  定义为式(23)。

$$IoU = \frac{\text{area}(B_p \cap B_g)}{\text{area}(B_p \cup B_g)} \quad (23)$$

其中,  $\text{area}(B_p \cap B_g)$  代表空间目标提取框与真值的交点,  $\text{area}(B_p \cup B_g)$  表示它们的联合。如果一个预测盒的  $IoU$  大于 0.7,则将其视为训练的正样本。这些分数既表示对象出现在盒子中的概率,也表示预测盒适合对象的程度。

### 3.3 实验结果

本节将对提出的检测方法进行评估验证。将收集制作的增强数据集分成两个独立的子集:2500 个用于训练的图像,以及 300 个用于测试的图像。所有的实验都在深度学习框架 TensorFlow 的基础上实现,并在具有英特尔单核 Core i7 CPU、NVIDIA GTX-1080 GPU (8GB GPU 内存) 和 16GB RAM 的

个人电脑上进行。PC 操作系统是 Ubuntu 16.04。

首先,将在制作的非合作目标数据集上对 YOLO、SSD 以及 YOLOv2 这 3 种方法的性能进行评估,图 8 给出了不同  $IoU$  阈值下 3 种方法的召回率。该图显示,随着  $IoU$  阈值的增加,YOLO 和 SSD 的召回曲线比本文所提方法下降得更厉害。而且,本文所提方法在各种  $IoU$  下的召回率均最高。

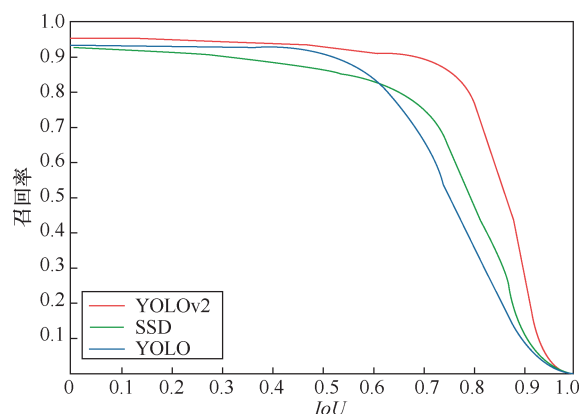


图 8 不同  $IoU$  阈值下 3 种方法的召回率

表 1 给出了 3 种方法的平均精度值 (mAP),及每幅图像平均运行时间的定量比较结果,图 9 则显示了本文所提方法的检测识别结果。从中可以看出:1) 本文所提方法在 mAP 方面取得了最好的性能,且在测试集上达到了 97.80% 的检测率;2) 在相同的计算成本下,本文所提方法的检测速度相当快,它可以在 0.011 s 内检测一幅图像,且 mAP 为 80.60%,因此它可以用于空间非合作目标视频中的实时航天器检测;3) 利用在简单场景中获得的训练样本,本文所提方法能够检测到更复杂、没有出现过的场景中的航天器。对于隐藏大部分主体的航天器,在没有相应的训练样本下也可以检测到。这些结果证明了本方法的有效性。

表 1 目标检测方法的 mAP 和平均运行时间

| 方法     | mAP    | 平均运行时间 (s) |
|--------|--------|------------|
| SSD    | 75.50% | 0.031      |
| YOLO   | 69.80% | 0.046      |
| YOLOv2 | 80.60% | 0.011      |

针对传统空间非合作目标检测算法的不足,本节创新性地将深度学习应用于空间非合作目标的检测上。与传统的空间非合作目标检测算法相比,该方法是一个端到端的检测过程,只需输入目标图像即可快速准确地定位空间目标的位置,为空间

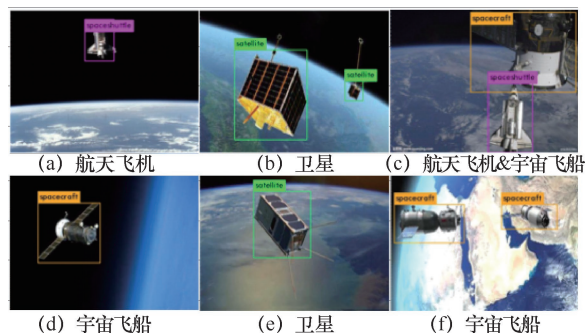


图 9 对空间目标的检测结果

目标的姿态提取与机械臂抓取创造了条件。该方法能够适应目标形状和尺度的变化，并对光照条件和旋转具有较好的顽健性。实验结果表明，该方法的精度高、速度快，能够满足空间目标检测的实时处理。

#### 4 地面试验系统

空间智能软体机械臂地面试验系统由软体机械臂、气动控制分系统、目标检测与识别分系统三部分组成。其中，软体机械臂采用模块化设计思路，由多个软体驱动器以串联方式堆叠而成，每个软体驱动器由 3 个可变形软体波纹管并联而成。通过 3 个软体波纹管的充放气，控制软体波纹管进行不同程度的拉伸与收缩，从而实现软体驱动器的三维运动指向，多个软体驱动器配合可完成指定动作。气动控制系统由减压阀、压力传感器、比例减压阀、气瓶等部件组成，主要用于精确控制各个软体波纹管内部的气压变化，通过气压调节实现对软体机械臂的运动控制。软体机械臂设计方案如图 10 所示。

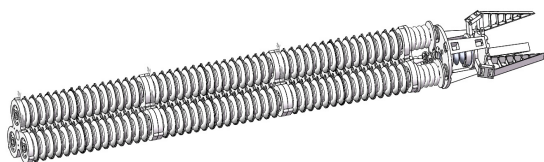
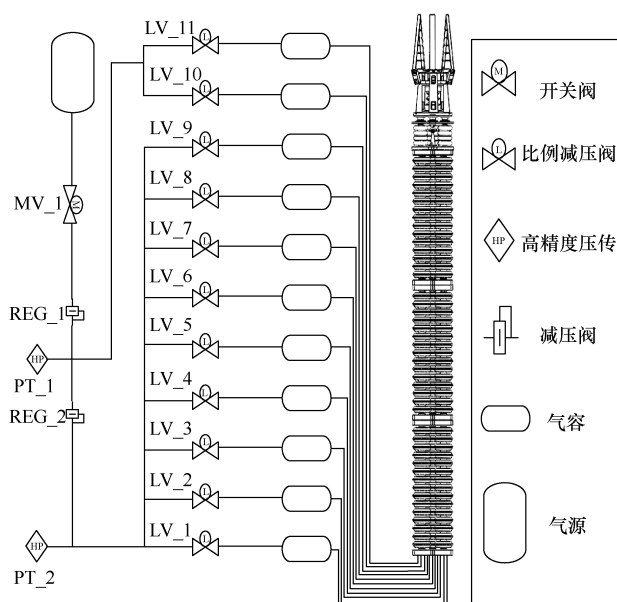


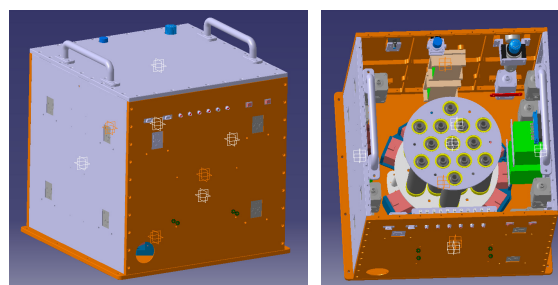
图 10 气囊型软体机械臂总体设计方案

软体机械臂由 3 节软体驱动器及软体抓手组合而成。3 节驱动器总共包含 9 个软体波纹管，因此气动控制系统需要提供 9 路独立的气压控制。软体抓手由 3 个对称分布的手指组合而成，每个手指可根据抓取物体表面的不同形貌产生适应性变形，从而实现柔性抓取。软体抓手由气缸进行运动驱动，需要气动控制系统提供 2 路独立的气压控制，实现

气缸的正反向运动，从而驱动软体抓手的开合操作。根据上述总体方案，气动控制系统需要至少提供 11 路独立气压控制，其系统原理图及三维设计图如图 11 所示。



(a) 原理图



(b) 三维设计图

图 11 气动控制系统原理图及三维设计图

气动控制分系统整体集成安装于服务星模拟器内部，服务星外部尺寸为  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ，设计质量约  $100\text{ kg}$ ，气动控制系统所有元器件的总质量控制在  $10\text{ kg}$  以内。通过前期地面原理试验可知，软体波纹管的安全承压范围在  $0 \sim 2\text{ bar}$  之间，软体抓手的安全承压范围在  $0 \sim 5\text{ bar}$  之间。因此，气动控制系统在向软体波纹管 and 软体抓手供气时，采用两种不同的进气压力。9 路软体波纹管的进气压力设置为  $2\text{ bar}$ ，2 路软体抓手的进气压力设置为  $5\text{ bar}$ ，总的气源进气压力设置为  $5\text{ bar}$ 。

目标检测与识别分系统主要由双目相机、机械臂末端相机，以及相应的目标检测与识别算法

组成。其中,双目相机采用 Kinect 传感器,最高分辨率为  $1920 \times 1080$ ;机械臂末端相机采用 OBS-1S 摄像头模块,最高分辨率为  $1920 \times 1080$ ;目标检测与识别算法主要基于本文提出的深度学习模型。

通过有效整合软体机械臂、气动控制、目标检测与识别等各分系统,成功研制了空间智能软体机械臂地面试验系统,如图 12 所示。

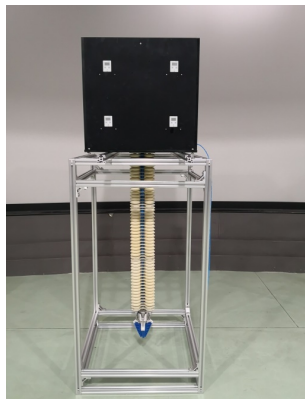


图 12 气囊型软体机械臂地面试验系统

基于本文提出的软体机械臂动力学模型,设计并实现了几种常见的运动控制,分别为前后摆动、左右摆动以及盘旋运动,如图 13 所示。

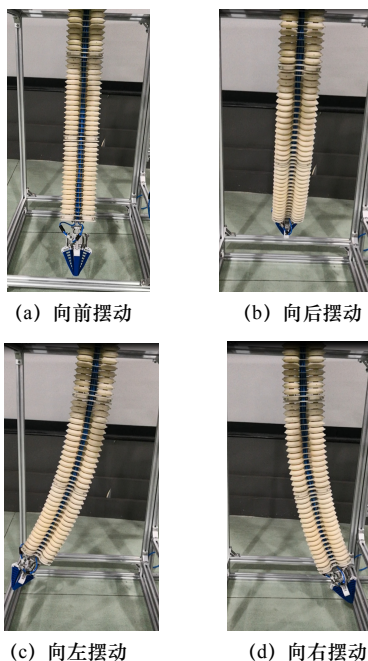


图 13 软体机械臂气控运动

从图 13 中可以看出,软体机械臂在加载相应的控制算法后,能够按照预先设定的方式进行运

动。加入目标检测与识别算法后,实现了对试验小球的成功抓捕与释放,如图 14 所示。

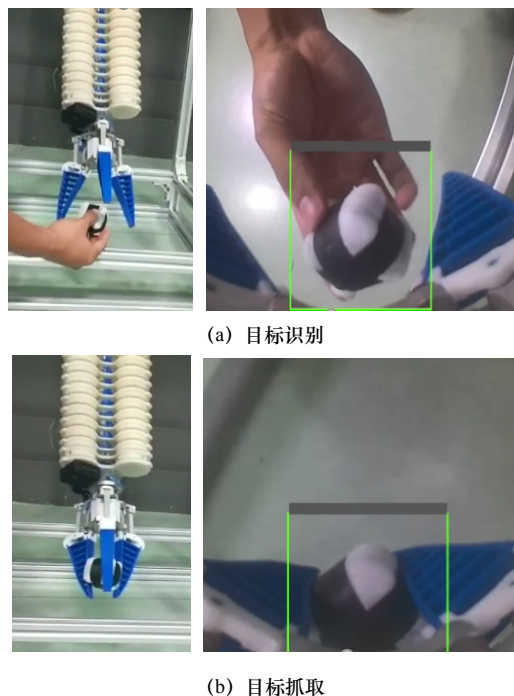


图 14 目标识别与抓取

从图 14 中可以看出,目标检测与识别分系统能够同机械臂气控系统相互配合,实现对小球的抓捕与释放操作。以上试验结果表明,空间智能软体机械臂地面试验系统已经初步具备了实施目标识别、自主运动、柔性抓捕的服务能力,为其空间应用打下了良好的技术基础。

## 5 结束语

本文主要面向航天器在轨服务任务背景,提出了一种空间软体机械臂设计方案。针对该方案,利用刚柔耦合动力学理论建立了软体机械臂动力学模型,为控制算法设计提供了理论支撑。基于深度回归卷积神经网络理论,提出了一套空间非合作目标检测与识别算法,并对算法进行了初步测试及评估,为软体机械臂智能控制提供了技术支撑。在此基础上,研制了空间软体机械臂原理样机,并搭建了一套地面试验系统。通过地面试验,对软体机械臂自主运动控制和目标识别算法进行了测试评估。试验结果表明,动力学模型有效支撑了软体机械臂自主运动控制,目标检测与识别算法实现了软体机械臂对空间目标的智能感知与抓捕。

## 参考文献:

- [1] VOISEMBERT S, RIWAN A, MECHBAL N, et al. A novel inflatable robot with constant and continuous volume[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011: 5843-5848.
- [2] SANAN S, LYNN P S, GRIFFITH S T. Pneumatic torsional actuators for inflatable robots[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2014, 6(3): 031003.
- [3] QI R H, LAM T L, XU Y. Mechanical design and implementation of a soft inflatable robot arm for safe human-robot interaction[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2014: 3490-3495.
- [4] QI R H, LAM T L, XU Y. Kinematic modeling and control of a multi-joint soft inflatable robot arm with cable-driven mechanism[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2014: 4819-4824.
- [5] MCMAHAN W, CHITRAKARAN V, CSENCITS M, et al. Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2006: 2336-2341.
- [6] RENDA F, CIANCHETTI M, GIORELLI M, et al. A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 025006.
- [7] LIPOMI D J, MARTINEZ R V, WHITESIDES G M. Use of thin sectioning (nanoskiving) to fabricate nanostructures for electronic and optical applications[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2011, 50(37): 8566-8583.
- [8] ZHENG T, BRANSON D T, GUGLIELMINO E, et al. A 3D dynamic model for continuum robots inspired by an octopus arm[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011: 3652-3657.
- [9] RONE W S, BEN-TZVI P. Continuum robot dynamics utilizing the principle of virtual power[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1): 275-287.
- [10] WEBSTER III R J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(13): 1661-1683.
- [11] TATLICIOGLU E, WALKER I D, DAWSON D M. Dynamic modeling for planar extensible continuum robot manipulators[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007: 1357-1362.
- [12] TRIVEDI D, LOTFI A, RAHN C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(4): 773-780.

## [作者简介]



张翔(1988-), 男, 湖北孝感人, 军事科学院国防科技创新研究院博士后, 主要研究方向为空间软体机器人、航天器在轨服务等。



刘红卫(1986-), 男, 河北邢台人, 军事科学院国防科技创新研究院副研究员, 主要研究方向为飞行器动力学与控制、空间智能软体机器人、卫星重力场测量等。



刘卓群(1993-), 男, 山东招远人, 博士, 主要研究方向为空间柔性机械臂。



闫振国(1993-), 男, 江苏丰县人, 博士, 主要研究方向为空间目标检测与识别。



陈小前(1975-), 男, 湖南双峰人, 军事科学院国防科技创新研究院研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、航天器在轨服务、微纳卫星设计与应用。



黄奕勇(1972-), 男, 湖南郴州人, 军事科学院国防科技创新研究院研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、航天器在轨服务等。