

DOI: 10.7652/xjtuxb202003022

可折叠空间八转动副连杆捕获机构的设计

马艳¹, 张群², 李锐明³, 姚燕安¹, 周文勇²
(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 100044, 北京; 2. 中国航天科技集团有限公司北京
宇航系统工程研究所, 100076, 北京; 3. 北京航空航天大学机器人研究所, 100191, 北京)

摘要: 为实现几何形状未知与运动参数不确定的空间目标捕获,提出了一种由 8 个转动关节依次连接组成的可折叠空间连杆捕获机构。利用螺旋理论对该机构进行自由度分析,得到其在分岔位置的 3 个瞬时自由度;采用几何法对该捕获机构进行运动学分析,将其运动解耦为球面 4 转动副机构,建立了其在一般位置下的环路方程以及发生运动分岔的条件方程,进而得到捕获机构的包络空间;采用四元数法建立目标运动的数学模型并得到其运动包络范围,通过对比分析得到该机构实现目标捕获的条件并进行仿真验证;基于运动学模型设计原理样机并开展针对 3 种不同尺寸目标的捕获试验,验证了该捕获机构的功能。试验结果表明:该空间 8 个转动副连杆捕获机构能够利用折叠功能形成大包络空间以实现对目标的捕获,并具有控制系统可靠性高、对目标定位要求低的特点。

关键词: 空间连杆捕获机构;运动分岔;运动包络
中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0179-09

Design and Analysis of Foldable Capture Mechanism Based on Spatial 8-Rotation Linkages

MA Yan¹, ZHANG Qun², LI Ruiming³, YAO Yan'an¹, ZHOU Wenyong²
(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, China Aerospace Science and Technology Corporation,
Beijing 100076, China; 3. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To realize the space target capture with unknown geometry and uncertain motion parameters, a foldable spatial 8-rotation (8D) linkages capture mechanism is proposed. The spiral theory is used to analyze the degree of freedom (DOF) of the mechanism, and the mechanism has instantaneous 3-DOF in the bifurcation position. The kinematics of the capture mechanism is analyzed by using the geometry method. By decoupling its motion into spatial 4R mechanism, the loop equation of general position, the condition equation of motion bifurcation and the envelop space of the capture mechanism are obtained. The quaternion method is used to establish the mathematical model of target motion and obtain its motion envelope range. Through comparative analysis, the condition of the target acquisition is obtained and verified by simulation. Based on the kinematics model, the prototype is designed and the capture experiments are carried out for three targets of different sizes to verify the function of the capture mechanism. Experimental results show that the spatial 8R linkages capture mechanism can make use of the folding function to form a large envelope space to achieve the acquisition of the target, and has the characteristics of high reliability of the control system and low requirements for the

target positioning.

Keywords: spatial foldable capture mechanism; motion bifurcation; motion envelope

由于不受控制,空间故障目标呈现出运动参数不确定的复杂翻滚运动,对航天器和航天员存在重大的安全隐患,因此服务卫星通过空间机械臂对其进行清理及在轨维修成为了空间在轨服务技术的关键。目前,国内外典型的捕获方式分为刚性捕获和柔性捕获两种类型。刚性捕获的特点是能够实现对目标的主动消旋,从而实现精确的目标控制以提供空间在轨服务。美国的 FRENDS 系统^[1]、德国的 DEOS 系统^[2]以及英国的 ATLAS 系统^[3]采用串联机械臂的结构实现了对目标的刚性捕获,但是由于要求有固定的抓捕部位,因此通用性差。欧空局的 ROGER 系统^[4]采用飞网、飞爪两种柔性捕获的形式,对目标的定位要求低,但是不利于对捕获装置的控制,并难以实现对目标的主动消旋。由于两种捕获方式在空间非合作目标的捕获方面均存在局限性^[5-6],学者们提出了一些新的方案。Jia 等设计了一种以变胞机构为单元的大型可展捕获手,可用于空间中参数未知物体的捕获^[7]。刘洋等提出了一种具有大变形的变拓扑多面体对接捕获机构,采用外包络捕获的形式,降低了对接过程中的精度要求^[8]。

虽然目前已经开展了一些针对空间非合作目标的捕获研究,但是空间可展机构的应用研究较少。空间可展机构已经应用在大口径星载天线、太阳帆等多个领域^[9]。Chen 等提出了一种完全可展的 Bennet 机构^[10];Viquerat 等设计了一种由两种长度杆件构成的空间 6R 机构^[11];Chen 等提出了一种杆长相等、具有两个对称面的 Bricand 机构^[12]。然而,由于上述机构均为单自由度,展开形式单一、收口面积小,因此目前主要用于空间可展天线等领域。Zhang 和 Tang 等分别受折纸和万花筒启发提出了空间 8R 可展机构^[13-14],该机构具有收口面积大、多运动模式的特性,但是收展性能较差。

空间非合作目标具有外形不规则、惯性效应大以及运动参数未知等特点,要求捕获装置具有高刚度、高适应性且易于控制等特性,并具有折展功能以便于运输,因此提出空间可展机构用于捕获的新思路。由于空间可展机构中 4R 和 6R 机构不能满足捕获需求,已有的 8R 机构收展比小,本文提出了一种新型的可完全收展的空间 8R 连杆捕获机构,利用螺旋理论对机构进行自由度分析,推导出一般位置下的环路方程和产生运动分岔的条件方程。对模

型进行 Adams 软件动力学仿真,设计样机并进行地面功能演示试验。由于该机构采用拥抱式外包络捕获的形式,不需要固定的抓捕点,降低了对目标定位精度的要求,同时采用空间过约束单环机构,与传统的串联机械臂形式相比,空间 8R 连杆捕获机构在结构刚度方面的性能得到了提升。

1 空间 8R 连杆捕获的特点

1.1 空间 8R 连杆捕获系统

空间 8R 连杆捕获系统如图 1 所示,主要由捕获机构、贮箱和机组部段 3 个部分组成。贮箱用于存放控制系统以及动力燃料,机组部段可以实现对捕获机构的位置姿态控制,末端捕获装置使用阻尼系数较高的柔性材料,可以实现对目标的主动消旋并吸收捕获过程中由于剧烈碰撞产生的冲击力。在巡航状态下该捕获机构完全收缩为一束的状态,如图 1a 所示。当发现目标并完成远距离定位后,捕获机构一次折展关节展开,到达捕获工作状态,如图 1b 所示。一次折展关节的设计可用于减小捕获机构在储存和运输过程中的体积。

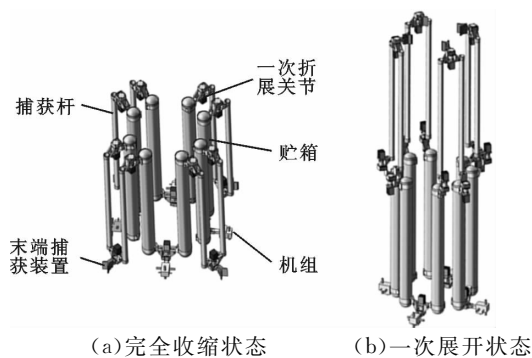


图 1 空间 8R 连杆捕获系统示意图

1.2 拥抱式外包络捕获概念

在生物界中变形虫为单细胞生物,利用细胞的流动性可以吞噬数倍于本身体积的草履虫,捕食过程如图 2a~2c 所示。受其启发,空间 8R 连杆捕获机构相比于传统的串联机械臂结构简单、易于控制,且能够利用折展功能形成大包络空间从而实现对不同形状、尺寸目标的捕获,其捕获过程与变形虫捕食过程相对应,如图 2e~2g 所示。

首先机构对目标进行远距离定位,如图 2e 所示,在一次展开状态下使用拥抱式外包络捕获的形式对目标进行捕获,即利用空间可展单环机构的展

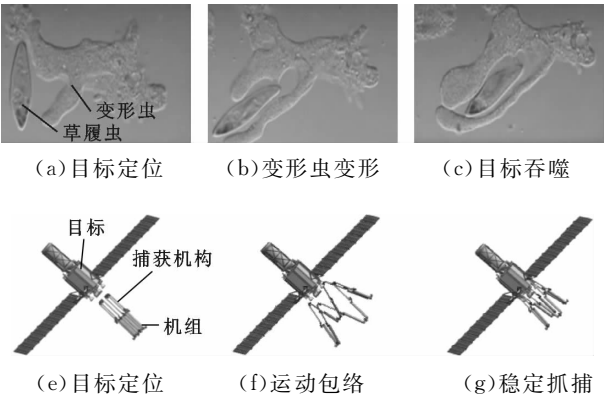


图 2 变形虫捕食与机构捕获过程示意图

开特性,形成大包络范围从而实现对目标的运动包络,如图 2f 所示,最后利用收缩特性实现对目标的稳定夹持,由机组部段对固接的整体进行位置、姿态的调整,如图 2g 所示。

2 结构设计与自由度分析

为实现完全折展功能,设计一种具有两个对称面(π_1, π_2)的空间 8R 机构,该机构的相关设计变量如图 3 所示,该机构由两种杆件(l_1, l_2)通过 8 个转动副依次连接而成。所有杆件的长度均为 L ,杆件 l_1, l_2 的扭角分别为 α_{12}, α_{23} 。根据几何关系可以得到 α_{12} 与关节变量 θ_1, θ_2 之间的关系

$$\alpha_{12} = \arccos \left[\sin \frac{\pi - \theta_2}{2} \left(\tan \frac{\pi - \theta_1}{2} \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

当机构完全展开时,所有杆件均位于同一平面上,此时由于关节轴线与杆件始终相互垂直,可以得到 $S_i (i=2, 4, 6, 8)$ 垂直于机构所在平面,且相邻杆件扭角和满足 $\alpha_{12} + \alpha_{23} = 2\pi$ 。当机构完全收缩为一束时,所有杆件平行, S_1, S_3 分别与 S_5, S_7 共线,关节轴线 1 和关节轴线 2 的关节变量到达最大的展开角度, $\theta_{1\max} = \theta_{2\max} = \pi$,代入到式(1)中得 $\alpha_{12} = \pi/4$ 。

由于机构具有两个对称面且相邻杆件之间的扭角和为 2π ,可以得到杆件的扭角

$$\alpha_{23} = 2\pi - \alpha_{12} = 7\pi/4 \quad (2)$$

式中: α_{ij} 表示关节轴线 i 和 j 之间的夹角。设计完

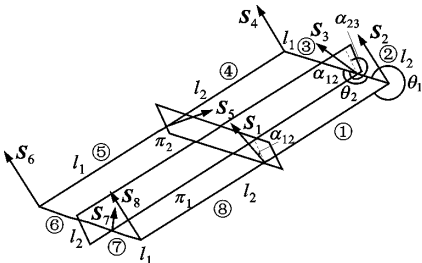


图 3 空间 8R 连杆捕获机构设计变量

成后的空间 8R 机构简图如图 4 所示。

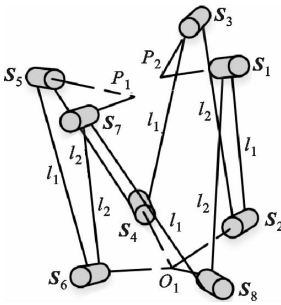


图 4 空间 8R 连杆捕获机构简图

空间 8R 连杆捕获机构可以实现折展功能,图 5a 给出了多连杆捕获机构完全收缩的状态,此时 8 个杆件折叠为平行的一束,便于存储和运输,图 5b、5c 为多连杆捕获机构通过输入角度的变化从中间状态到完全展开的状态,此时 8 个杆件位于同一个平面。通过折展功能,机构可以形成大包络空间,从而实现对空间运动目标的捕获。

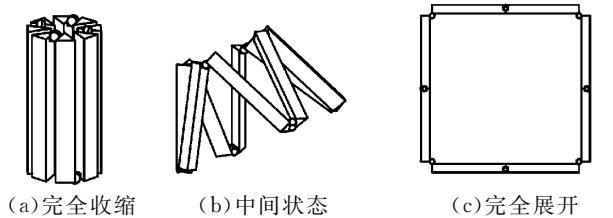


图 5 空间 8R 连杆捕获机构的运动特性

2.1 一般位置下的运动特性

图 6 给出了空间 8R 单环机构的一般位置,关节轴线 2、4、6、8 相交于 O_1 点,关节轴线 5、7 和 1、3 分别相交于 P_1, P_2 两点。

建立坐标系 $O_1 -xyz$,坐标原点为关节轴线的交点 O_1 ,已知在一般位置下,该可展机构具有两个对称面 π_1, π_2 , x 坐标轴位于对称平面 π_1 内, z 坐标轴

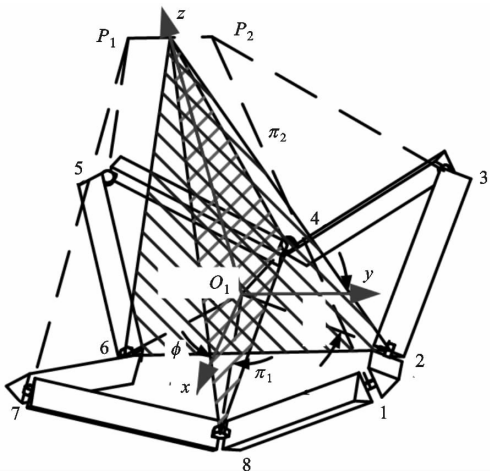


图 6 空间 8R 单环机构一般位置

位于对称平面 π_1 与对称平面 π_2 的交线上。为了表示关节轴线在空间中的位置和方向,根据螺旋理论可以写出各个关节轴线的运动螺旋,首先写出关节轴线 1、2 和 8 的运动螺旋

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= (l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad b \quad c) \\ \mathbf{S}_2 &= (0 \quad m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_8 &= (m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $m_1 = \cos\phi$; $n_1 = \sin\phi$; $m_2 = \cos\varphi$; $n_2 = \sin\varphi$ 。令 $\mathbf{S}_1 = (\mathbf{s}; \mathbf{s}_0)$, 其中 $\mathbf{s} = (l_3, m_3, n_3)$ 表示关节轴线的方向, $\mathbf{s}_0$ 表示关节轴线的直线方程, $\mathbf{s}_0 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{s} = (a, b, c)$, 其中 $\mathbf{r}_1$ 表示关节轴线 $\mathbf{S}_1$ 在坐标系中的位置矢量。

根据机构在运动过程中关于 π_1 、 π_2 两个面对称的运动特性,可写出其余各个关节轴线的运动螺旋

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_3 &= (-l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad -b \quad -c) \\ \mathbf{S}_4 &= (-m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_5 &= (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad -b \quad c) \\ \mathbf{S}_6 &= (0 \quad -m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_7 &= (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad b \quad c) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为了对该闭环机构进行自由度分析,将其看作具有两个支链的并联机构,则第 1 条支链的运动螺旋系可以写成

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{11} &= \mathbf{S}_1 = (l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad b \quad c) \\ \mathbf{S}_{12} &= \mathbf{S}_2 = (0 \quad m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{13} &= \mathbf{S}_3 = (-l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad -b \quad -c) \\ \mathbf{S}_{14} &= \mathbf{S}_4 = (-m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

第 2 条支链的运动螺旋系可以写成

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{21} &= \mathbf{S}_5 = (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad -b \quad c) \\ \mathbf{S}_{22} &= \mathbf{S}_6 = (0 \quad -m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{23} &= \mathbf{S}_7 = (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad b \quad c) \\ \mathbf{S}_{24} &= \mathbf{S}_8 = (m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

分别计算两条支链的反螺旋,可以得到

$$\mathbf{S}_1^r = \begin{cases} \mathbf{S}_{11}^r = \left(0 \quad -\frac{c}{b} \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0 \right) \\ \mathbf{S}_{12}^r = \left(-\frac{m_2 n_3 - m_3 n_2}{a m_2} \quad -\frac{l_3 n_1}{b m_1} \quad 0; \frac{n_1}{m_1} \quad -\frac{n_2}{m_2} \quad 1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_2^r = \begin{cases} \mathbf{S}_{21}^r = \left(\frac{c}{a} \quad 0 \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0 \right) \\ \mathbf{S}_{22}^r = \left(\frac{m_2 n_3 - m_3 n_2}{a m_2} \quad \frac{l_3 n_1}{b m_1} \quad 0; -\frac{n_1}{m_1} \quad -\frac{n_2}{m_2} \quad 1 \right) \end{cases} \quad (8)$$

可以得到空间 8R 连杆捕获机构的反螺旋的秩为 4。根据修正的 G-K 公式可以得到

$$M = (6 - \lambda)(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \nu =$$

$$6(8 - 8 - 1) + 8 = 2 \quad (9)$$

式中: M 表示机构自由度; λ 表示公共约束数; n 表示包括机架的构件数; g 表示运动副数; f_i 表示第 i 个运动副的自由度数; ν 表示并联冗余约束数。

所以在一般位置下,本文空间 8R 连杆捕获机构具有 2 个自由度。

2.2 分岔位置下的运动特性

在分岔位置下空间 8R 单环机构的特性如图 7 所示,其中关节轴线 2、4、6、8 相交于 O_1 点,关节轴线 1、3、5、7 相交于 O_2 点。由于 O_2 位于 z 轴上,则有 $\mathbf{r}_i = (0, 0, c)$, $i = 1, 3, 5, 7$ 。可以得到关节轴线 1、3、5、7 的运动螺旋为 $\mathbf{S}_i = (\mathbf{S}_i; \mathbf{S}_{0i})$, 其中 $\mathbf{S}_{0i} = \mathbf{r}_i \times \mathbf{S}_i = (a, b, 0)$, $i = 1, 3, 5, 7$ 。

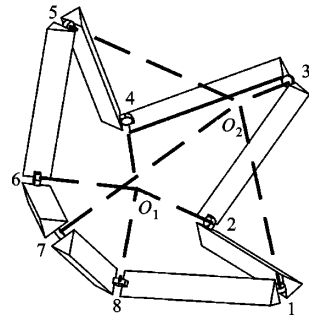


图7 空间 8R 单环机构的分岔位置

第 1 条支链的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{11} &= \mathbf{S}_1 = (l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad b \quad 0) \\ \mathbf{S}_{12} &= \mathbf{S}_2 = (0 \quad m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{13} &= \mathbf{S}_3 = (-l_3 \quad m_3 \quad n_3; a \quad -b \quad 0) \\ \mathbf{S}_{14} &= \mathbf{S}_4 = (-m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

第 2 条支链的运动螺旋系为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{21} &= \mathbf{S}_5 = (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad -b \quad 0) \\ \mathbf{S}_{22} &= \mathbf{S}_6 = (0 \quad -m_2 \quad n_2; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{23} &= \mathbf{S}_7 = (-l_3 \quad -m_3 \quad n_3; -a \quad b \quad 0) \\ \mathbf{S}_{24} &= \mathbf{S}_8 = (m_1 \quad 0 \quad n_1; 0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

分别计算两条支链的反螺旋,得到

$$\mathbf{S}_1^r = \begin{cases} \mathbf{S}_{11}^r = (0 \quad 0 \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{12}^r = \left(-\frac{m_2 n_3 - m_3 n_2}{a m_2} \quad -\frac{l_3 n_1}{b m_1} \quad 0; \frac{n_1}{m_1} \quad -\frac{n_2}{m_2} \quad 1 \right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{S}_2^r = \begin{cases} \mathbf{S}_{21}^r = (0 \quad 0 \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \mathbf{S}_{22}^r = \left(\frac{m_2 n_3 - m_3 n_2}{a m_2} \quad \frac{l_3 n_1}{b m_1} \quad 0; -\frac{n_1}{m_1} \quad -\frac{n_2}{m_2} \quad 1 \right) \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{S}_{11}^r = \mathbf{S}_{21}^r$, 所以在奇异位置下,反螺旋的秩为 3。

根据修正的 G-K 公式可以得到

$$M = (6 - \lambda)(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \nu = 6(8 - 8 - 1) + 8 + 1 = 3 \tag{14}$$

所以在分岔位置下,本文空间 8R 连杆捕获机构具有 3 个瞬时的自由度。

3 运动学分析与分岔特性

为了得到各关节角度之间的关系以及产生运动分岔的条件,建立辅助线 $a_1、a_3、a_5、a_7$,相邻两直线的夹角为 γ ,如图 8 所示。同时,引入运动参数 β_1 和 β_4 ,满足关系

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \theta_6 = \beta_1 \\ \theta_4 &= \theta_8 = \beta_4 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

将角度 γ 固定,则空间 8R 连杆捕获机构的运动可以解耦为球面 4R 机构。

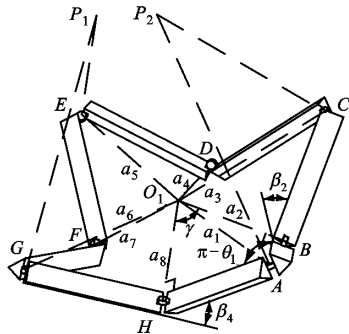


图 8 一般位型下的轴线位置

在相似直角 $\triangle O_1HA$ 和直角 $\triangle O_1BA$ 中可得

$$a_2 = a_8 \tag{16}$$

同理可以得到

$$a_2 = a_4 = a_6 = a_8 \tag{17}$$

选取典型结构中 θ_1 与 α 的几何关系进行分析,如图 9 所示。 $\angle AHO_1、\angle ABO_1$ 为直角,添加辅助线 $HB、HO_1、BO_1、O_1P$ 和 O_1O_1',P 为 HB 中点, $O_1'H、O_1'B$ 分别满足与 $AH、AB$ 垂直且共面。由于空间 8R 连杆捕获机构的关节之间的扭角关系满足

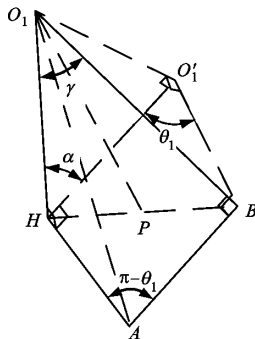


图 9 典型关节中 θ_1 与 α 的几何关系

式(2),所以 $\angle O_1HO_1' = \angle O_1'BO_1 = 45^\circ$ 。在直角三角形 $\triangle O_1O_1'B$ 中

$$a_2 = O_1B = \sqrt{2}L \tan \frac{\theta_1}{2} \tag{18}$$

同理可以得到

$$a_{i+1} = O_1B = \sqrt{2}L \tan \frac{\theta_1}{2}, i = 1, 3, 5, 7 \tag{19}$$

根据式(17)(19)可以得到

$$\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = \theta_7 \tag{20}$$

根据机构运动过程中满足面对称的条件可知

$$\theta_2 = \theta_6; \theta_4 = \theta_8 \tag{21}$$

如图 9 所示,在直角 $\triangle O_1AB$ 中

$$a_2 = O_1B = L \sin \frac{\theta_1}{2} / \sin \frac{\alpha}{2} \tag{22}$$

结合式(19)(22)可得出角度 γ 与 θ_1 的关系满足

$$\theta_1 = 2 \arccos(\sqrt{2} \sin \frac{\gamma}{2}) \tag{23}$$

同理可以得到

$$\theta_i = 2 \arccos(\sqrt{2} \sin \frac{\gamma}{2}) \tag{24}$$

文献[15]中已知球面 4R 机构的主要几何参数如图 10 所示,其环路方程为

$$c_{12}(c_{34}c_{41} - c_4s_{34}s_{41}) - s_{12}(-s_1s_{34}s_{41} + c_1(c_4c_{41}s_{34} - c_{34}s_{41})) - c_{23} = 0 \tag{25}$$

式中: $s_{ij} = \sin \gamma_{ij}; c_{ij} = \cos \gamma_{ij}; s_i = \sin \beta_i; c_i = \cos \beta_i$ 。

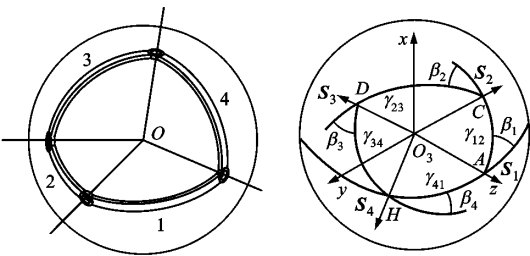


图 10 球面 4R 机构的主要几何参数示意图

将式(15)代入式(25)中,即可得空间 8R 可折展机构的环路方程为

$$(\sin \beta_1 \sin \beta_4 - (\cos \beta_1 + 1)(\cos \beta_4 + 1) \cos \gamma) \sin^2 \gamma = 0 \tag{26}$$

根据环路方程可以得到该机构的关节空间如图 11 所示。空间机构的运动分岔特性指的是机构在通过特殊位形之后发生自由度及运动特性的变化,这些特殊位形被称为运动分岔点或者运动分岔奇异点^[16]。本文空间 8R 单环机构具有分岔 1、分岔 2 两种运动模式,这两种运动模式相交于分岔位置 l 。

通过运动学分析可知,当机构处于分岔位置时,关节轴线 1、3、5、7 相交于空间一点,即点 $P_1、P_2$ 重

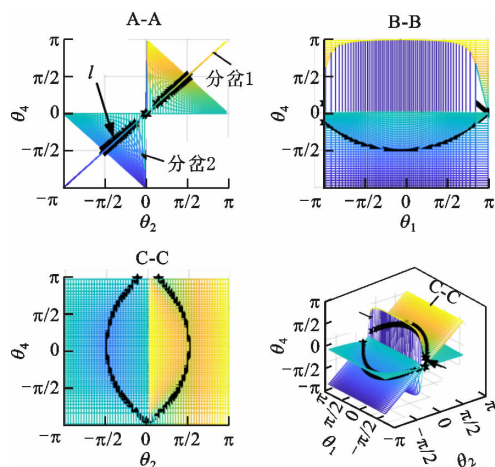
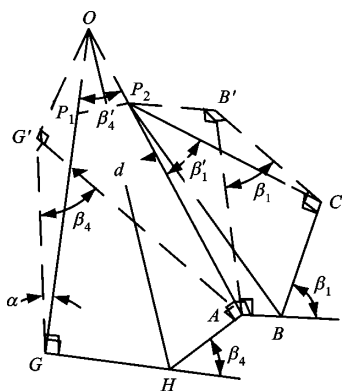


图 11 空间 8R 单环机构的关节空间

合,此时 P_1 、 P_2 两点的几何关系如图 12 所示。建立 P_1 、 P_2 两点间距 d 的方程, d 为 0 时,得到分岔位置的交线方程,即得到机构达到奇异位置的条件。

图 12 P_1 、 P_2 两点的几何关系

由式(24)可知

$$\beta'_1 = 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \frac{\beta_i}{2}\right), i = 2, 4 \quad (27)$$

在直角三角形 $\triangle OAH$ 和 $\triangle P_2AH$ 中可以得到

$$\left. \begin{aligned} AP_2 &= L \cot \frac{\beta'_1}{2} \\ AO &= L \cot \frac{\beta'_4}{2} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

在等腰三角形 $\triangle OP_1P_2$ 中

$$d = 2L \sin \frac{\beta'_4}{2} \left(\cot \frac{\beta'_4}{2} - \cot \frac{\beta'_1}{2} \right) \quad (29)$$

当 $d=0$ 时,可以得到 $\beta_1 = 2k\pi$ 或者 $\beta_4 = \beta_1$,将其代入一般位置下的环路方程式(26)可以得到分岔位置的环路方程,即得到分岔位置的交线方程

$$(\sin^2 \beta_1 - (\cos \beta_1 + 1)^2 \cos \gamma) \sin^2 \gamma = 0 \quad (30)$$

根据式(15)(26)可以得到,在一般位置下, θ_1 、 θ_2 和 θ_4 这 3 个关节变量中有 2 个变量相互独立。

选定 3 个变量中任意 2 个为驱动,当其关系满足分岔位置的条件方程式(30)时,机构到达分岔位置,可以进行不同构型间的切换,同时也可以根据条件方程避免运动分岔的产生。

4 捕获分析与仿真

空间非合作目标多呈现为自由翻滚运动,空间 8R 连杆捕获机构利用折展功能形成大包络空间,从而实现对目标的捕获。这种捕获方式受目标姿态参数影响小、对目标的定位精度要求低。

4.1 目标运动分析

为保证捕获机构能够实现对目标的捕获,需要满足目标的运动包络范围位于捕获机构的工作空间内,因此首先对目标的翻滚运动进行分析。

参考坐标系的建立如图 13、图 14 所示,目标本体坐标系 $O_b-x_b y_b z_b$ 的原点 O_b 位于质心,始终与目标相关联。惯性坐标系 $O-XYZ$ 的轴始终与世界坐标系平行。 P_b 表示目标上任意点在本体坐标系中的位置。为了便于进行分析,需要将目标的运动转换到惯性坐标系中。

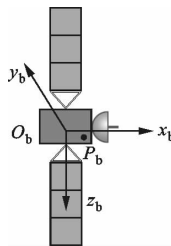


图 13 本体坐标系示意图

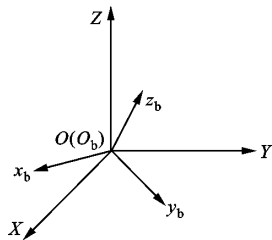


图 14 惯性坐标系示意图

四元数法计算量小、精度高,并可避免奇异性的问题,常用于描述目标的姿态方程,通常表示为

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \quad (31)$$

式中: $q_0 = \cos \frac{\theta}{2}$; $q_1 = l \sin \frac{\theta}{2}$; $q_2 = m \sin \frac{\theta}{2}$; $q_3 = n \sin \frac{\theta}{2}$ 。

由 Euler 动力学方程得到目标的姿态运动方程

$$\left. \begin{aligned} I_{xt} \dot{\omega}_{xt} - (I_{yt} - I_{zt}) \omega_{yt} \omega_{zt} &= 0 \\ I_{yt} \dot{\omega}_{yt} - (I_{xt} - I_{zt}) \omega_{xt} \omega_{zt} &= 0 \\ I_{zt} \dot{\omega}_{zt} - (I_{xt} - I_{yt}) \omega_{xt} \omega_{yt} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中: $I_t = [I_{xt}, I_{yt}, I_{zt}]^T$ 是目标的惯性参数; $\omega_t = [\omega_{xt}, \omega_{yt}, \omega_{zt}]^T$ 是目标的角速度; $\dot{\omega}_t = [\dot{\omega}_{xt}, \dot{\omega}_{yt}, \dot{\omega}_{zt}]^T$ 是目标的角加速度。

目标本体坐标系到惯性坐标系的变换矩阵

$$C_b^R =$$

$$\begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2-q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2+q_0q_3) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_0q_1-q_2q_3) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix}$$

(33)

使用四元数法表示目标的姿态更新方程

$$q(t+\Delta t)=q(t)+\frac{\mathrm{d} q}{\mathrm{d} t} \Delta t$$

(34)

$$\frac{\mathrm{d} q}{\mathrm{d} t}=\left[\begin{array}{cccc} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{array}\right]$$

(35)

由式(33)~(35)可知,已知目标惯性参数 I_l 、初始角速度 ω_l 以及初始姿态四元数 q_0 时,可得目标上任意一点 P_b 在惯性坐标系下对应的位置

$$P=C_b^R P_b$$

(36)

根据空间目标的几何特性,将其抽象为立方体。已知在一般情况下,对接轴线与目标的翻滚轴线相交,假定目标的主要性能参数见表 1。

表 1 目标的主要性能参数

参数	数值
尺寸/ $\mathrm{m} \times \mathrm{m} \times \mathrm{m}$	$0.4 \times 0.4 \times 0.4$
惯性参数(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})/ $(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2)$	$[13, 13, 13]^T$
初始姿态四元数 q_0	$[1, 0, 0, 0]^T$
初始角速度($\omega_{xt}, \omega_{yt}, \omega_{zt}$)/ $((^{\circ}) \cdot \mathrm{s}^{-1})$	$[5, 2, 2]^T$

根据目标的数学模型,可以得到目标上的任意点 P_b 在翻滚运动中所处的空间位置,即目标的运动范围,如图 15 所示。其中定义目标的运动包络范围直径为 $d_{\max}$,用于衡量目标的最大运动范围。

$$d_{\max}=\max \left(2 \sqrt{x_b^2+y_b^2+z_b^2}\right)=1$$

(37)

根据运动学分析结果得到捕获机构的工作空间,如图 16 所示,定义 $D_{\max}$ 为工作空间的最大直径,用于

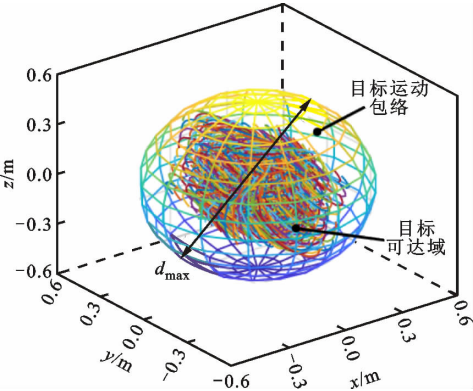


图 15 目标的运动范围

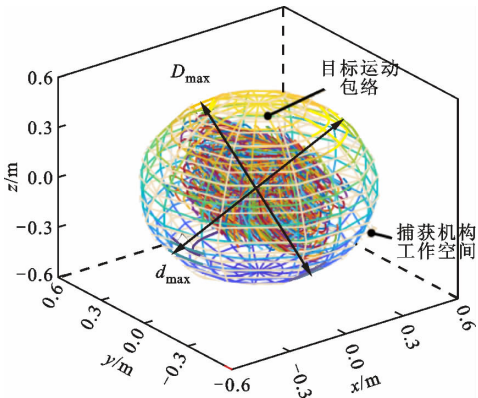


图 16 捕获机构的工作空间与目标的运动包络

衡量其对目标的捕获能力。为实现对目标的稳定捕获,需要满足 $d_{\max} < D_{\max}$ 。

给定机构的杆长 $L=0.3 \mathrm{~m}$,根据运动学分析的结果可以得到,捕获机构工作空间的最大直径 $D_{\max}=1.2 \mathrm{~m} > d_{\max}$,即该机构的工作空间能够实现对目标的运动包络,从而实现对目标的捕获。

4.2 捕获过程仿真分析

在 Adams 仿真软件中对理论分析的结果进行仿真验证,根据表 1 分别设定目标的惯性参数 I_l 、角速度 ω_l ,使目标按照预设参数呈现翻滚状态。

根据运动学分析的结果可知,捕获机构的输入驱动参数为 θ_1 、 θ_2 以及 θ_m 。各个输入驱动参数的变化曲线如图 17 所示。

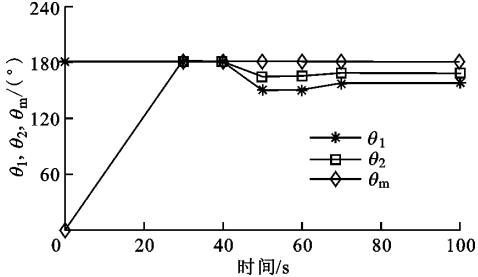
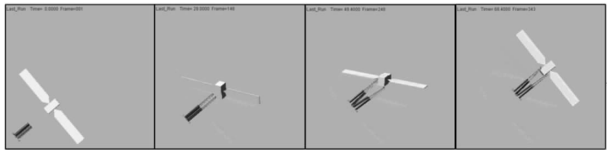


图 17 各输入驱动参数变化曲线

完成目标主要性能参数及捕获机构输入驱动参数设置后进行仿真,结果如图 18 所示。首先捕获机构发现目标并且进行远距离定位,到达初始捕获状态,如图 18a 所示。机构一次展开到达图 18b 所示的捕获准备状态后,利用折展功能二次展开实现对目标的运动包络,如图 18c 所示。最后机构末端收缩直至与目标之间产生稳定接触力,实现对目标的夹持捕获,固接后形成的整体,如图 18d 所示。

经过理论分析及 Adams 仿真验证可以得到,当目标的运动包络范围直径 $d_{\max}$ 小于机构工作空间的最大直径 $D_{\max}$ 时,能够实现对目标的捕获。



(a)元距离定位 (b)一次展开 (c)二次展开 (d)捕获目标
图 18 捕获过程仿真

5 样机试验

为了验证空间 8R 连杆捕获机构的功能,设计功能演示样机并进行演示试验,根据理论分析的结果可知,样机的杆长 $L=0.3\text{ m}$,最大包络直径 $D_{\max}=1.2\text{ m}$ 。样机共使用 8 个舵机完成对空间 8R 过约束机构的冗余驱动,为充分模拟其在空间中折展、捕获的功能,使用悬吊装置进行吊装试验。样机的主要性能参数见表 2。

表 2 样机的主要性能参数

参数	数值
总质量/kg	12
杆长 L/m	0.3
收缩体积/ m^3	$0.2\times0.2\times0.3$
展开面积/ m^2	1.2×1.2
最大运动包络直径 $D_{\max}/\text{m}$	1.2

首先进行空间 8R 连杆捕获机构折展功能试验,如图 19 所示,样机在初始状态,即完全收缩为一束的状态下,由中间驱动电机进行驱动,完成一次展开后锁定,即机构到达目标捕获准备状态。



(a)完全收缩状态 (b)展开状态 (c)捕获目标状态
图 19 折展功能试验

在目标捕获试验中,针对不同的目标形状,设置了立方体,圆柱体两种典型的目标形状并且进行了捕获试验。给定边长分别为 0.2 m 和 0.4 m 的正方体,以及直径为 0.2 m 的圆柱体进行地面捕获试验。两种不同尺寸的立方体目标捕获试验如图 20、图 21 所示,机构利用折展功能分别形成 $D=0.2\text{ m}$ 和 $D=0.4\text{ m}$ 的末端包络范围以实现对两种目标的捕获。试验结果表明,功能演示样机对不同尺寸的目标可以实现稳定捕获。

圆柱体目标的捕获试验如图 22 所示,机构利用



(a)完全收缩状态 (b)展开状态 (c)捕获目标状态
图 20 小立方体捕获试验



(a)完全收缩状态 (b)展开状态 (c)捕获目标状态
图 21 大立方体捕获试验

折展功能形成 $D=0.2\text{ m}$ 的末端包络范围以实现对目标的捕获。综合本节试验结果表明,该空间 8R 连杆捕获机构具有可折展功能,能够采用外包络的形式实现对目标的稳定捕获,对不同尺寸、形状的目标适应性强,可用于目标参数未知的空间目标捕获。



(a)完全收缩状态 (b)展开状态 (c)捕获目标状态
图 22 圆柱体捕获试验

同时,在试验过程中分别测得捕获机构在实现对目标捕获的状态下各个输入驱动参数 θ_1 、 θ_2 ,并与其相对应的理论值进行对比,见表 3。理论值与测量值的相对误差均不超过 3%,这种误差是由样机的装配误差以及舵机的控制精度引起的,因此可以验证理论分析的正确性。

表 3 输入驱动参数的测量值与理论值对比

数据类型	$\theta_1/(^{\circ})$			$\theta_2/(^{\circ})$		
	小	大	圆	小	大	圆
理论值	27.27	56.25	27.27	26.53	50.68	26.53
测量值	27.65	56.70	26.95	27.23	50.40	26.25
相对误差/%	1.39	0.80	1.17	2.64	0.55	1.06

6 结 论

本文针对空间自由翻滚目标的捕获问题,在机构设计和捕获功能分析两个方面进行了深入研究,得出以下主要结论。

(1)提出一种 8R 连杆捕获机构,该机构可完全

收缩为一束,工作状态下可按照面对称的运动特性展开,为解决运动参数未知的空间目标捕获问题提出了一种新思路。

(2)通过运动学分析得到了该空间捕获机构的运动分岔特性,建立了该类机构环路方程及发生运动分岔条件方程的求解方法,可为驱动位置的选择及对机构的完全控制提供理论依据。

(3)采用四元数法建立了目标运动的数学模型并得到其运动包络范围,分析得到该机构实现目标捕获的条件方程并进行仿真验证。分析结果表明,在进行捕获机构设计时,需要满足条件 $d_{\max} < D_{\max}$ 。

(4)基于理论分析的结果设计原理样机并开展地面折展功能试验及捕获试验,试验结果表明,该机构能够实现对目标的捕获,同时驱动参数的测量值与理论值一致,从而验证了理论分析方法的正确性。

参考文献:

- [1] BOSSE A B, HENSHAW C G, PIPITONE F, et al. SUMO: spacecraft for the universal modification of orbits [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004: 36-46.
- [2] FLORES-ABAD A, MA O, PHAM K, et al. A review of space robotics technologies for onorbit servicing [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68: 1-26.
- [3] ELLERY A. A robotics perspective on human spaceflight [J]. *Earth Moon & Planets*, 1999, 87(3): 173.
- [4] 李成, 梁斌, 徐文福. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 1-13.
LI Cheng, LIANG Bin, XU Wenfu. Research status and development trend of on-orbit service technology in geostationary orbit [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 1-13.
- [5] FENG Fei, LIU Yiwei, LIU Hong, et al. Design schemes and comparison research of the end-effector of large space manipulator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(4): 674-687.
- [6] 刘昊, 魏承, 田健, 等. 空间充气展开绳网捕获系统动力学建模与分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(22): 145-152.
LIU Hao, WEI Cheng, TIAN Jian, et al. Modeling and analysis of dynamics of space inflatable rope net capture system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(22): 145-152.
- [7] JIA Guanglu, HUANG Hailin, LI Bing, et al. Synthesis of a novel type of metamorphic mechanism module for large scale deployable grasping manipulators [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 128: 544-559.
- [8] 刘洋, 姚燕安, 何妍颖. 变拓扑 3-RSR 多面体对接机构的设计与研究 [J]. *载人航天*, 2018, 24(1): 61-66.
LIU Yang, YAO Yan'an, HE Yanying. Design and research of variable topology 3-RSR polyhedron docking mechanism [J]. *Manned Space Flight*, 2018, 24(1): 61-66.
- [9] 彭福军, 谢超, 张良俊. 面向空间应用的薄膜可展开结构研究进展及技术挑战 [J]. *载人航天*, 2017, 23(4): 427-439.
PENG Fujun, XIE Chao, ZHANG Liangjun. Research progress and technical challenges in thin film deployable structures for space applications [J]. *Manned Space Flight*, 2017, 23(4): 427-439.
- [10] CHEN Yan, YOU Zhong. Two-fold symmetrical 6R foldable frame and its bifurcations [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(25/26): 4504-4514.
- [11] VIQUERAT A D, HUTT T, GUEST S D. A plane symmetric 6R foldable ring [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 63: 73-88.
- [12] CHEN Yan, CHAI W H. Bifurcation of a special line and plane symmetric Bricard linkage [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(4): 515-533.
- [13] ZHANG Ketao, DAI Jiansheng. A kirigami-inspired 8R linkage and its evolved overconstrained 6R linkages with the rotational symmetry of order two [J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2014, 6(2): 021007.
- [14] TANG Zhao, DAI Jiansheng. Bifurcated configurations and their variations of an 8-bar linkage derived from an 8-kaleidocycle [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 121: 745-754.
- [15] 何士龙, 王世恩. 球面 4R 机构的输入输出方程研究 [J]. *图书情报导刊*, 2011, 21(2): 191-192.
HE Shilong, WANG Shien. Research on input and output equations of spherical 4R mechanism [J]. *Journal of Library and Information Technology*, 2011, 21(2): 191-192.
- [16] GALLETTI C, FANGHELLA P. Single-loop kinematotropic mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(6): 743-761.

(编辑 武红江)