

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.049

三构态驱动变胞并联球铰设计与分析

胡旭宇 刘宏昭

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要: 不同于现有利用约束奇异和支链奇异实现的变胞并联机构, 本文通过开启与锁死驱动副的方式, 利用有限旋量法提出了一种可以实现一维转动、二维转动和三维转动的三构态驱动变胞并联球铰。根据螺旋理论分析机构各构态的自由度, 利用机构的结构特征和几何约束关系分析其运动学。基于驱动变胞并联球铰(Sm), 通过串联P副和U副, 形成SmPU变胞支链, 提出一种八模式3-SPS/SmPU驱动变胞并联机构。此种通过开启与锁死驱动实现驱动变胞球铰的方法也适用于其他变胞运动副的综合, 变胞方式简便易行, 且该类变胞运动副可有效避免变胞过程中的约束奇异以及支链奇异。

关键词: 驱动变胞; 三构态; 变胞球铰

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0421-06

Design and Analysis of Actuated Metamorphic Parallel Spherical Joint of Three Configurations

HU Xuyu LIU Hongzhao

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Different from the existing methods by using constraint singularity or the chain singularity to synthesis metamorphic parallel mechanisms, an actuated metamorphic parallel spherical joint of full rotation of the one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional rotation by way of opening and locking actuated kinematic pair was presented through the method of finite screw. Using the screw theory, the degree freedom of three configurations of the actuated metamorphic parallel spherical joint was analyzed, the mechanism kinematics was studied according to the structure characteristics and geometric constraints of the actuated metamorphic parallel spherical joint. Finally, SmPU actuated metamorphic chain was obtained according to integrating the actuated metamorphic parallel spherical joint (Sm) with P kinematic pair and U kinematic pair serial limb. Based on the SmPU actuated metamorphic chain, 3-SPS/SmPU actuated metamorphic parallel mechanism of six motion modes was presented. The method of the type synthesis actuated metamorphic parallel spherical joint can also be applied to type synthesis other actuated metamorphic parallel joints, the metamorphic method was simple and effective, and constraint singularity and the chain singularity could be avoided effectively in the metamorphic process.

Key words: actuated metamorphic; three configurations; metamorphic spherical joint

0 引言

变胞并联机构由于具有随任务变化而变自由度、变拓扑结构的特点和高承载能力、高精度等优点, 已成为机构学与机器人学领域的研究热点之一。KONG等^[1]通过可锁运动副, 提出一种新型三维平

移和三维转动2模式变胞并联机构。TIAN等^[2]通过开启与锁死杆件, 基于变胞连杆, 综合出一类3R、1T2R、2T1R和3T4模式变胞并联机构。王冰等^[3]基于具有解耦特性的变胞球面五杆机构, 通过串联一个四自由度支链综合出变胞支链, 应用3条相同的变胞混联支链构造了一类变胞并联机构。GAN

收稿日期: 2019-03-20 修回日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275404)和陕西省13115科技重大专项(2009ZDKG-33)

作者简介: 胡旭宇(1989—), 男, 博士生, 主要从事机器人及机构学研究, E-mail: HXYsteel3@163.com

通信作者: 刘宏昭(1954—), 男, 教授, 主要从事机械动力学和机构学研究, E-mail: liu_hongzhao@163.com

等^[4-5]提出了一种变胞虎克铰 U_v , 并分析了 3-U v CU v 变胞并联机构的几何约束。YE 等^[6-7]基于一种三构态的平面五杆变胞机构, 通过构建混联支链, 综合出含约束奇异特性的变胞并联机构。ZHANG 等^[8]基于 Bennett 闭链构建混联支链, 提出一种新型变胞并联机构。于红英等^[9]通过锁住不同运动副的方式实现变胞支链的构态变换, 提出一种基于基本支链构型的变胞并联机构设计方法, 并应用所提出的综合方法, 综合了动平台为 Bricard 机构的变胞并联机构。刘伟等^[10]提出了一类 2 模式可转换变胞并联机构。文献[11-12]中通过将 3 个交于一点的转动副替换球铰, 提出了一种关节锁死的变胞球铰 S_v 。

综上所述, 学者们通过研究机构的支链奇异特性实现变胞。一些机构需要在远离机架的关节上安装伺服电动机或关节锁死装置, 影响机构的动态性能, 并使机械结构变得复杂。通过驱动副的开启与锁死可有效避免变胞过程中的约束奇异以及支链奇异, 而现有文献中关于驱动变胞并联机构的研究较少, 特别是缺乏关于系统的包含一维、二维和三维转动的驱动变胞并联球铰的相关研究。

本文基于有限旋量法提出一种可以实现一维转动、二维转动和三维转动的三构态驱动变胞并联球铰。根据螺旋理论分析机构各构态的自由度, 利用矢量法和几何约束关系分析机构全构态运动学。最后基于驱动变胞并联球铰, 提出一种八模式 3-SPS/SmPU 变胞并联机构。

1 3-RRR 并联机构型综合

3R 球面并联机构动平台的有限旋量集合可表示为

$$\{s_{f,PM}\} = \{s_{f,c} \Delta s_{f,b} \Delta s_{f,a}\} \quad (1)$$

其中

$$s_{f,c} = 2 \tan \frac{\theta_c}{2} \begin{pmatrix} s_c \\ \mathbf{r}_o \times s_c \end{pmatrix}$$

$$s_{f,b} = 2 \tan \frac{\theta_b}{2} \begin{pmatrix} s_b \\ \mathbf{r}_o \times s_b \end{pmatrix}$$

$$s_{f,a} = 2 \tan \frac{\theta_a}{2} \begin{pmatrix} s_a \\ \mathbf{r}_o \times s_a \end{pmatrix}$$

式中 $\{s_{f,PM}\}$ ——动平台的有限旋量^[13]集合

$\{s_{f,c}\}$ ——转动副 R_c 的有限旋量集

θ_c ——转动副 R_c 从 1 位置绕其轴线 s_c 转到 2 位置所转过的角度(图 1)

\mathbf{r}_o ——转动副 R_c 的矢径

串联支链 $R_b R_c$ 表示为

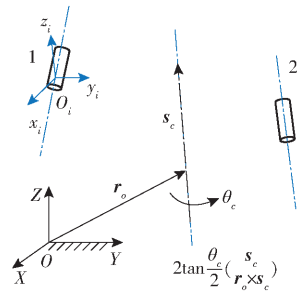


图 1 刚体有限转动示意图

Fig. 1 Sketch of rigid body finite rotation

$$s_{f,cb} = 2 \tan \frac{\theta_c}{2} \begin{pmatrix} s_c \\ \mathbf{r}_o \times s_c \end{pmatrix} \Delta 2 \tan \frac{\theta_b}{2} \begin{pmatrix} s_b \\ \mathbf{r}_o \times s_b \end{pmatrix} \quad (2)$$

而有限旋量三角积^[14-15]表示为

$$s_{f,ab} = s_{f,a} \Delta s_{f,b} = \frac{1}{1 - \tan \frac{\theta_a}{2} \tan \frac{\theta_b}{2} \frac{s_a^T s_b}{s_a^T s_b}} \left[s_{f,a} + s_{f,b} + \frac{1}{2} s_{f,b} s_{f,a} - \tan \frac{\theta_a}{2} \tan \frac{\theta_b}{2} \left(t_b \begin{pmatrix} \mathbf{O} \\ s_b \end{pmatrix} + t_a \begin{pmatrix} \mathbf{O} \\ s_a \end{pmatrix} \right) \right] \quad (3)$$

式中 \mathbf{O} ——零向量

由于动平台与所综合的三自由度支链自由度相同, 因此不需要在描述动平台的有限旋量因式末端添加线性无关的转动和移动因子。三自由度支链 $\{s_{f,il}\}$ 的标准型为

$$\{s_{f,il}\} = \left\{ 2 \tan \frac{\theta_c}{2} \begin{pmatrix} s_c \\ \mathbf{r}_o \times s_c \end{pmatrix} \Delta 2 \tan \frac{\theta_b}{2} \begin{pmatrix} s_b \\ \mathbf{r}_o \times s_b \end{pmatrix} \Delta 2 \tan \frac{\theta_a}{2} \begin{pmatrix} s_a \\ \mathbf{r}_o \times s_a \end{pmatrix} \right\} \quad (4)$$

式中 $\{s_{f,il}\}$ ——轴线交于 o 点的 3 个转动副 (R_a 、 R_b 、 R_c) 的串联支链集合

由于支链标准型中的 3 个转动副完全相同, 故支链 $R_a R_b R_c$ 无需进行运动副位置互换。可以通过运动副的替换综合三自由度支链标准型对应的所有可行衍生支链。

根据旋量三角积的运算法则可得

$$\{s_{f,il}\} = \{s_{f,il}\}_S \quad (5)$$

$$\{s_{f,il}\} = \left\{ 2 \tan \frac{\theta_c}{2} \begin{pmatrix} s_c \\ \mathbf{r}_o \times s_c \end{pmatrix} \Delta 2 \tan \frac{\theta_b}{2} \begin{pmatrix} s_b \\ \mathbf{r}_o \times s_b \end{pmatrix} \right\} \cdot \left\{ 2 \tan \frac{\theta_a}{2} \begin{pmatrix} s_a \\ \mathbf{r}_o \times s_a \end{pmatrix} \right\} = \left\{ 2 \tan \frac{\theta_c}{2} \begin{pmatrix} s_c \\ \mathbf{r}_o \times s_c \end{pmatrix} \right\} \left\{ 2 \tan \frac{\theta_b}{2} \begin{pmatrix} s_b \\ \mathbf{r}_o \times s_b \end{pmatrix} \right\} \Delta 2 \tan \frac{\theta_a}{2} \begin{pmatrix} s_a \\ \mathbf{r}_o \times s_a \end{pmatrix} = \{s_{f,il}\}_U \{s_{f,il}\}_R = \{s_{f,il}\}_R \{s_{f,il}\}_U \quad (6)$$

式中 $\{s_{f,il}\}_s$ ——球铰 S 的有限旋量集
 $\{s_{f,il}\}_U$ ——虎克铰 U 的有限旋量集
 $\{s_{f,il}\}_R$ ——转动副 R 的有限旋量集

综上可得所有可行三自由度支链,如表 1 所示。

表 1 三自由度支链

Tab.1 Three degrees of freedom branches chain

| 三自由度支链标准型 | 运动副的替换 | 运动副位置的变换 |
|---------------|--------|----------|
| $R_a R_b R_c$ | S UR | RU |

任取表 1 中 3 条支链,根据 3 条支链的等效转动副交点共点即可综合得到 3R 球面并联机构。如 3 条 $R_a R_b R_c$ 支链中 9 个转动副轴线交于一点。如图 2 所示,为避免杆件间的碰撞干涉设计成圆弧形杆,为使计算简单方便将每条支链的转动副轴线初始位置分布为两两垂直,且 3 个驱动副轴线两两垂直。

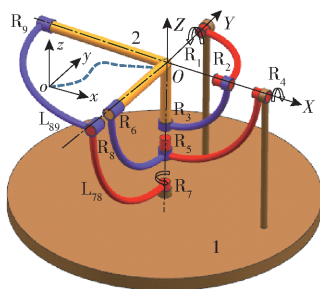


图 2 3-RRR 变胞并联机构

Fig.2 3-RRR metamorphic parallel mechanism

2 变胞并联机构的结构特性

如图 2 所示,3-RRR 变胞并联机构由定平台 1、动平台 2 以及 3 条相同的支链构成,每条支链由 3 个转动轴线两两垂直的转动副和圆弧形杆构成(支链 1 由 R_1 、 L_{12} 、 R_2 、 L_{23} 和 R_3 构成,支链 2 由 R_4 、 L_{45} 、 R_5 、 L_{56} 和 R_6 构成,支链 3 由 R_7 、 L_{78} 、 R_8 、 L_{89} 和 R_9 构成)。3-RRR 变胞并联机构具有 3 种转动构态:只驱动 R_1 、只驱动 R_4 或只驱动 R_7 的 3 种运动模式,定义为构态 1;同时驱动 R_1 和 R_4 、同时驱动 R_1 和 R_7 或同时驱动 R_4 和 R_7 的 3 种运动模式,定义为构态 2;同时驱动 R_1 、 R_4 和 R_7 ,定义为构态 3,包含 1 种运动模式。

3 机构自由度分析

由于 3-RRR 变胞机构构态 1 和构态 2 下的 3 种运动模式情况相似,故每种构态只分析其中一种。

3.1 构态 1 机构自由度分析

如图 2 所示,以动平台中心为原点,以 R_1 的转动轴线为 Y 轴, R_4 的转动轴线为 X 轴,建立定坐标系 OXYZ(固接于定平台)。在构态 1 下,设驱动副

R_4 和 R_7 锁定,只驱动 R_1 ,变胞并联机构等效为 2-RR/RRR,计算 2-RR/RRR 并联机构各支链在定坐标系下的运动螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} = (a_1 \ 0 \ c_1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13} = (d_1 \ e_1 \ f_1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{21} = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{22} = (d_2 \ e_2 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{31} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{32} = (d_3 \ 0 \ f_3; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中,设 (a_i, b_i, c_i) 和 (d_i, e_i, f_i) ($i=1,2,3$) 分别表示 R_2 、 R_5 、 R_8 和 R_3 、 R_6 、 R_9 的几何中心 A_j ($j=2,5,8,3,6,9$) 在固定坐标系的位置。根据运动螺旋与其约束螺旋互易求各支链的约束螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1^r = \begin{cases} (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \\ \mathcal{S}_2^r = \begin{cases} (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0; e_2 \ -d_2 \ 0) \end{cases} \\ \mathcal{S}_3^r = \begin{cases} (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 0; f_3 \ 0 \ -d_3) \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

自由度计算公式为^[16-17]

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi \quad (9)$$

其中 $d=6-\lambda$ $v=k-t$
 式中 M ——机构自由度 d ——机构阶数
 λ ——公共约束数
 n ——包括机架的构件数目
 g ——运动副数目
 f_i ——第 i 个运动副自由度
 v ——多环并联机构在去除公共约束的因素后的冗余约束数目
 t ——多环并联机构所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋数目
 k ——多环并联机构所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋系最大无关组数
 ξ ——机构中存在的局部自由度

根据构态 1 的约束螺旋式(8),可得公共约束数 $\lambda=3$,则机构阶数 $d=3$,并联机构所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋数目 $t=2$,并联机构

所有支链的反螺旋去除公共约束后的反螺旋系的最大无关组 $k=2$, 多环并联机构在去除公共约束的因素后的冗余约束的数目 $v=0$, 不是冗余机构。根据式(9), 2-RR/RRR 并联机构的自由度为

$$M=3(6-7-1)+7+0-0=1 \quad (10)$$

由此可知, 只驱动 R_1 时, 此变胞并联机构具有 1 个绕 y 轴转动的自由度。

3.2 构态 2 机构自由度分析

此构态下, 锁定 1 个驱动, 不妨设 R_7 锁定, 当 3-RRR 变胞并联机构只驱动 R_1 和 R_4 时, 其支链 1 和支链 3 的运动螺旋及其反螺旋分别为式(7)中第 1 式、第 3 式和式(8)的第 1 式、第 3 式, 计算 2-RRR/RR 并联机构的支链 2 在定坐标系下的运动螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{21} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{22} = (0 \ b_2 \ c_2; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{23} = (d_2 \ e_2 \ f_2; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (11)$$

根据运动螺旋与其约束螺旋互易求支链 2 的约束螺旋

$$\mathcal{S}_2^r = \begin{cases} (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (12)$$

根据式(8)的第 1 式、第 3 式、式(12)和自由度计算式(9), 可得此构态下的自由度为

$$M=3(7-8-1)+8+0-0=2 \quad (13)$$

由此可知, 当驱动 R_1 和 R_4 时, 此变胞并联机构具有绕 x 轴和 y 轴转动的自由度。

3.3 构态 3 机构自由度分析

同时驱动 R_1 、 R_4 和 R_7 , 其支链 1 的运动螺旋及其反螺旋分别为式(7)中第 1 式和式(8)的第 1 式, 支链 2 的运动螺旋及其反螺旋分别为式(11)和式(12)。计算 3-RRR 并联机构支链 3 在定坐标系下的运动螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{31} = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{32} = (e_3 \ b_3 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{33} = (d_3 \ e_3 \ f_3; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (14)$$

根据各运动螺旋与其约束螺旋互易求得支链 3 的约束螺旋

$$\mathcal{S}_3^r = \begin{cases} (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (15)$$

根据式(8)的第 1 式、式(12)、式(15)和自由度计算式(9), 可得此构态下的自由度为

$$M=3(8-9-1)+9+0-0=3 \quad (16)$$

由此可知, 此构态下 3-RRR 并联机构具有绕

x 、 y 和 z 轴转动的自由度。

同样可以得到, 构态 1 中只驱动 R_4 (或 R_7) 运动模式下的自由度和构态 2 中同时驱动 R_4 和 R_7 (或 R_1 和 R_7) 时的自由度。通过对 3 种构态下自由度的计算可知, 3-RRR 变胞并联机构具有 3 种转动构态, 各构态下的自由度如表 2 所示。

表 2 驱动变胞并联球铰的运动模式

Tab.2 Motion mode of actuated metamorphic parallel spherical joint

| 构态 | 驱动 | 自由度 |
|----|--------------------------|--------------------------|
| 1 | R_1 | R_y |
| | R_4 | R_x |
| | R_7 | R_x |
| 2 | R_1, R_4 | R_x, R_y |
| | R_1, R_7 R_4, R_7 | R_z, R_y R_x, R_z |
| 3 | R_1, R_4, R_7 | R_x, R_y, R_z |

由于 3-RRR 机构具有一维、二维和三维 3 种转动构态, 其三维转动构态与球铰等效, 且通过驱动的锁死与开启实现机构的变胞, 故可称作三构态驱动变胞球铰。

4 运动学分析

如图 2 所示, 以动平台中心为原点, 以 R_1 的转动轴线为 y 轴, R_4 的转动轴线为 x 轴, 在动平台上建立动坐标系 $oxyz$ (初始状态时, 动坐标系与定坐标系重合)。

4.1 变胞并联机构运动学分析

已知动平台的姿态角(设动平台绕动坐标系 x 、 y 和 z 轴转动角分别为 α 、 β 和 γ) 和 3-RRR 变胞并联机构的各杆件长度, 求驱动副 R_1 、 R_4 和 R_7 转动角(分别设为 θ_1 、 θ_2 和 θ_3)。机构动平台坐标旋转矩阵 R 采用 $Y-X-Z$ 型欧拉角, 可得

$$R(\beta_y, \alpha_x, \gamma_z) = [R_{y\beta}] [R_{x\alpha}] [R_{z\gamma}] \quad (17)$$

与动平台相连的转动副 R_3 、 R_6 和 R_9 的各中心点在动坐标系的坐标矢量 A_j 为

$$[{}^oA_3 \quad {}^oA_6 \quad {}^oA_9] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -r_9 \\ 0 & -r_6 & 0 \\ -r_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

与动平台相连的转动副 R_3 、 R_6 和 R_9 的各中心点在定坐标系的坐标为

$$[A_3 \quad A_6 \quad A_9] = R [{}^oA_3 \quad {}^oA_6 \quad {}^oA_9] \quad (19)$$

根据定长杆 L_{23} 、 L_{56} 和 L_{89} 为转动副 R_3 、 R_6 和 R_9 中心坐标与中间转动副 R_2 、 R_5 和 R_8 中心坐标之差, 可得

$$\begin{aligned} |[A_3 \quad A_6 \quad A_9] - [A_2 \quad A_5 \quad A_8]| &= \\ |[L_{23} \quad L_{56} \quad L_{89}]| & \quad (20) \end{aligned}$$

根据式(20), 可得 3 - RRR 变胞并联机构的运动学逆解

$$\begin{cases} \theta_1 = \beta \\ \theta_2 = \arctan \frac{\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma}{\cos\alpha\cos\gamma} \\ \theta_3 = \arctan \frac{\cos\alpha\sin\gamma}{\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\beta\cos\gamma} \end{cases} \quad (21)$$

对式(21)两边求导, 可得构态 3 机构雅可比矩阵为

$$\dot{\theta} = J \dot{Q} \quad (22)$$

其中 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T$ $\dot{Q} = [\dot{\alpha} \quad \dot{\beta} \quad \dot{\gamma}]^T$

式中 J ——机构雅可比矩阵

同理可求得驱动变胞并联球铰构态 1 和构态 2 下机构的运动学逆解。

4.2 变胞并联机构运动仿真

设机构结构参数为 $r_2 = r_3 = 50 \text{ mm}$, $L_{12} = L_{23} = 50\sqrt{2} \text{ mm}$, $r_5 = r_6 = 75 \text{ mm}$, $L_{45} = L_{56} = 75\sqrt{2} \text{ mm}$, $r_7 = r_8 = 100 \text{ mm}$, $L_{78} = L_{89} = 100\sqrt{2} \text{ mm}$, 给定机构动平台输出参数为 $\alpha = \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi t}{180}$, $\beta = \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi t}{180}$, $\gamma = \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi t}{180}$ 。其构态 3 运动学 Matlab 计算结果如图 3a 所示, 其 ADAMS 仿真结果如图 3b 所示。

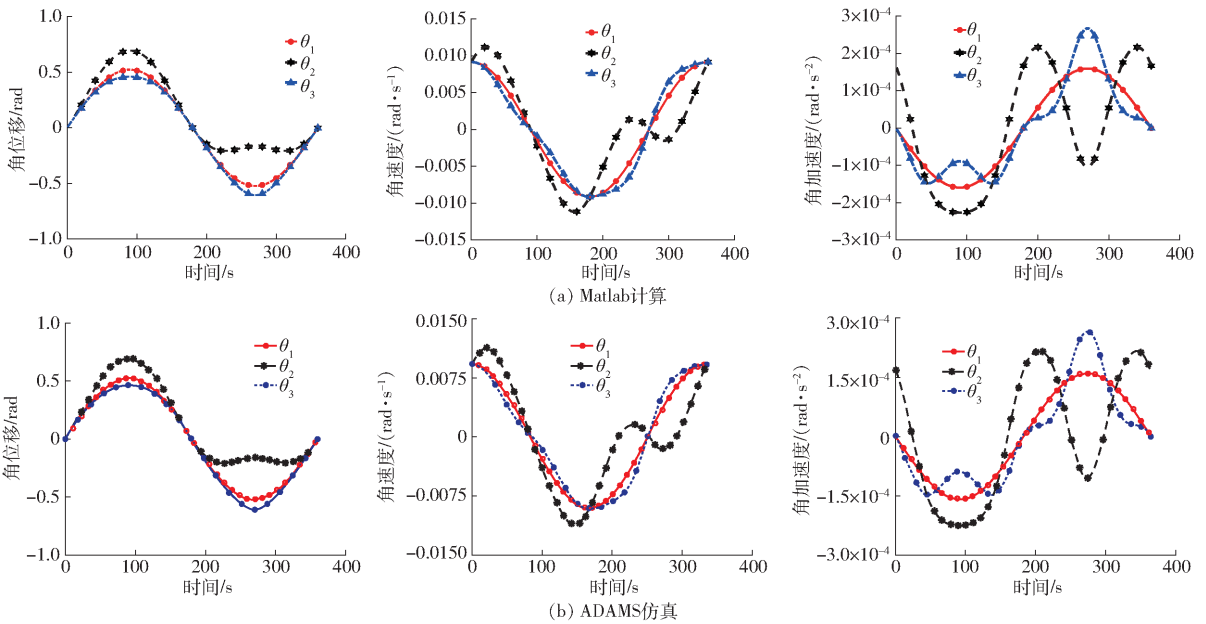


图 3 3 - RRR 并联机构运动曲线

Fig. 3 Motion curves of 3 - RRR parallel mechanism

从图 3 可以看出, 运动学模型的计算结果与 ADAMS 仿真结果一致, 验证了所建运动学模型的正确性^[18-20]。同样的方法可验证构态 1 和构态 2 下机构的运动学。对三构态驱动变胞并联球铰运动学的分析为机构的实际工业应用奠定了一定的理论基础。且由于运动学是研究机构的输入输出之间的映射关系, 故同时也验证了驱动变胞并联球铰运动的可行性。

5 应用

基于 3 - RRR 驱动变胞并联球铰, 通过在动平台上串联 P 副和 U 副, 构成 SmPU 驱动变胞支链。由于驱动 Sm 后驱动变胞支链的自由度为 3, 结合驱动选取原则, 通过与 3 条包含 3 个驱动副的自由度支链组合, 提出了一种多模式 3 - SPS/SmPU 驱动变胞并联机构。初始状态下, 3 - SPS/SmPU 变胞并联机构中 U 副转动轴线分别平行于定坐标系的 y

轴和 x 轴。

如图 4 所示, 图中带箭头的运动副表示驱动副。当变胞球铰无驱动, 3 - SPS/SmPU 变胞并联机构具有绕 y 轴和 x 轴转动和沿 z 轴移动的 3 个自由度; 当变胞球铰处于构态 1: 只具有绕 y (或 x) 轴转动时, 3 - SPS/SmPU 变胞并联机构具有绕 y 轴和 x 轴转动和沿 z 轴和 x (或 y) 轴移动的 4 个自由度; 变胞球铰只具有绕 z 轴转动时, 3 - SPS/SmPU 变胞并

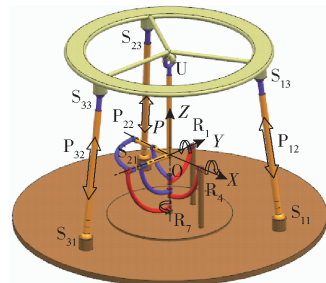


图 4 3 - SPS/SmPU 变胞并联机构

Fig. 4 3 - SPS/SmPU metamorphic parallel mechanism

机构具有绕 y 轴、 x 轴和 z 轴转动和沿 z 轴移动的 4 个自由度;当变胞球铰处于构态 2:具有绕 y 轴和 x 轴转动时,3-SPS/SmPU 变胞并联机构具有绕 y 轴和 x 轴转动和沿 z 、 x 、 y 轴移动的 5 个自由度;变胞球铰具有绕 z 轴和 x (或 y) 轴转动时,3-SPS/SmPU 变胞并联机构具有绕 x 、 y 、 z 轴转动和沿 z 轴和 y (或 x) 轴移动的 5 个自由度;当变胞球铰处于构态 3 (即具有三维转动自由度) 时,3-SPS/SmPU 变胞并联机构具有 6 个自由度。即 3-SPS/SmPU 变胞并联机构具有 8 种运动模式。

6 结论

(1) 提出了一种驱动位于定平台的 3-RRR 驱动变胞并联球铰,通过便捷的开启与锁死驱动即可实现机构的变胞。

(2) 建立了 3-RRR 驱动变胞并联球铰的运动学模型,其与 ADAMS 仿真结果一致,验证了所建运动学模型的正确性。

(3) 基于 3-RRR 变胞并联球铰,通过串联 P 副和 U 副,构成 SmPU 变胞支链。并将变胞支链 SmPU 应用于八模式 3-SPS/SmPU 变胞并联机构。

参 考 文 献

- [1] KONG Xianwen, JIN Yan. Type synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 323-333.
- [2] TIAN Chunxu, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Structure synthesis of reconfigurable parallel mechanism with closed-loop metamorphic linkages [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 232(7): 1-14.
- [3] 王冰,方跃法.基于球面五杆机构的变胞并联机构构型综合[J].机械工程学报,2018,54(19):18-26.
- [4] GAN Dongming, DAI Jiansheng, LIAO Qizheng. Constraint analysis on mobility change of a novel metamorphic parallel mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45: 1864-1876.
- [5] GAN Dongming, DAI Jiansheng, SENEVIRATNE L. Unified kinematics and optimal design of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with a reconfigurable revolute joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 239-254.
- [6] YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng. Design and analysis of a reconfigurable parallel mechanism for multidirectional additive manufacturing [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 112: 307-326.
- [7] YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng. Reconfigurable parallel mechanism with planar five-bar metamorphic linkages [J]. SCIENCE China Technological Science, 2014, 57(1): 210-218.
- [8] ZHANG Ketao, DAI Jiansheng. Screw-system-variation enabled reconfiguration of the Bennett plano-spherical hybrid linkage and its evolved parallel mechanism [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2015, 137(6): 062303.
- [9] 于红英,曾重元,郭震.少自由度变胞并联机构综合设计方法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(1):42-49.
- [10] YU Hongying, ZENG Zhongyuan, GUO Zhen. Type synthesis method of lower-mobility metamorphic parallel mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(1): 42-49. (in Chinese)
- [11] 刘伟,刘宏昭.具有 2T1R 与 2R1T 运动模式 3 自由度并联机构构型综合[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):401-409. LIU Wei, LIU Hongzhao. Type synthesis of 3-DOF parallel mechanism with 2T1R and 2R1T motion mode [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 401-409. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180750&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.050. (in Chinese)
- [12] ZHANG Ketao, DAI Jiansheng, FANG Yuefa. Geometric constraint and mobility variation of two 3SvPsV metamorphic parallel mechanism [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2013, 135(1): 011001.
- [13] CARBONARI L, CALLEGARI M, PALMIERI G, et al. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 79: 173-183.
- [14] YANG Shuofei, SUN Tao, HUANG Tian, et al. A finite screw approach to type synthesis of three-DOF translational parallel mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 104: 405-419.
- [15] SUN Tao, YANG Shuofei, HUANG Tian, et al. A way of relating instantaneous and finite screws based on the screw triangle product [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 108: 75-82.
- [16] 杨朔飞,孙涛,黄田,等.线变换刚体运动矩阵的群表示方法[J].机械工程学报,2015,51(13):81-85. YANG Shuofei, SUN Tao, HUANG Tian, et al. Group representation of line transformation matrix of a rigid body [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 81-85. (in Chinese)
- [17] 王庚祥,原大宇,刘宏昭,等.空间 4-SPS/CU 并联机构运动学分析[J/OL].农业机械学报,2012,43(3):207-212. WANG Gengxiang, YUAN Daning, LIU Hongzhao, et al. Kinematics analysis of spatial 4-SPS/CU parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 207-212. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120337&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.037. (in Chinese)
- [17] 黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].北京:高等教育出版社,2014.
- [18] 周少瑞,刘宏昭.一种 3-CRCR/RPU 对称并联机器人机构工作空间及运动学分析[J].中国机械工程,2017,28(20):2500-2508.
- [19] 赵星宇,赵铁石,云轩,等.3-P(4S)并联机构分析与多目标性能优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(10):390-400. ZHAO Xingyu, ZHAO Tieshi, YUN Xuan, et al. Mechanism analysis and multi-target performance optimization of 3-P(4S) parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 390-400. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171050&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.050. (in Chinese)
- [20] 杨继东,万彪刚,高俊东,等. Tripod 并联机器人运动学分析与样机实验[J/OL].农业机械学报,2016,47(10):390-397. YANG Jidong, WAN Biaogang, GAO Jundong, et al. Kinematic analysis and experiment of Tripod parallel robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 390-397. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161051&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.051. (in Chinese)