



引用格式:宛宇,张春燕,李茂生,等.一种仿生多模式移动机构的设计与功能仿真[J].轻工学报,2019,34(5):78-87.

中图分类号:TP242 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.011

文章编号:2096-1553(2019)05-0078-10

一种仿生多模式移动机构的设计与功能仿真

Design and function simulation of a bionic multi-mode mobile mechanism

关键词:

仿生机构设计;多模式移动机构;螺旋理论;构型设计;虚拟样机技术;功能仿真

宛宇,张春燕,李茂生,刘香玉

WAN Yu,ZHANG Chunyan,LI Maosheng,LIU Xiangyu

上海工程技术大学机械与汽车工程学院,上海 201620

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Key words:

bionic mechanism design; multi-mode mobile mechanism; screw theory; configuration design; virtual prototype technology; function simulation

摘要:设计了一种其构造集滑行、爬行、滚动多种运动模式的仿生多模式移动机构;基于仿生原理,以四足步行、扑翼飞行、圆形滚动生物的运动方式为仿生对象,抽象出与仿生对象等效的运动结构单元,并通过螺旋理论进行构型设计分析,结合空间几何对称原理和变自由度思想将两个等效单元体对称布置组成多模式移动机构.仿真结果表明,该机构能够实现预期的运动模式,设计合理,具有良好的稳定性和机动性.

收稿日期:2019-04-29

基金项目:上海市研究生科研创新项目基金(18KY0122)

作者简介:宛宇(1994—),男,湖北省黄冈市人,上海工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为机器人机构设计.

通信作者:张春燕(1980—),女,安徽省淮北市人,上海工程技术大学教授,博士,主要研究方向为 CAD/CAM 机电一体化及机器人机构设计.

Abstract: A bionic multi-mode moving mechanism was designed, which can realize the sliding, crawling and rolling sports modes. Based on the principle of bionics, the four-legged walking, flapping wing, and circular rolling creatures were used as bionic objects to abstract the motion structural unit equivalent to the bionic object. Through the screw theory of configuration design analysis, combined with the spatial geometric symmetry principle and the variable degree of freedom idea, the two equivalent unit bodies were symmetrically arranged to form a multi-mode mobile mechanism. The simulation results showed that the mechanism could achieve the expected motion mode, reasonable design, good stability and maneuverability.

0 引言

自然界中生物的移动方式多种多样,每一种生物都有其特有的一种或多种移动方式,并可根据实际需要进行运动模式的切换,譬如马有慢走、小跑、奔跑、腾空4种运动模式,在平地与山坡运动时其四肢规律均不相同,却可随地形任意变换.所谓仿生机构设计就是借助仿生学原理,模仿某些动物的身体构造,将这些动物的一些行动优势再现于机构设计中.如何集成多种运动于同一机体从而形成多模式移动机构,是仿生机构设计的重点与难点^[1].相对于传统的轮式、腿式、履带式等单一模式移动机构,集多种运动模式于一体的多模式移动机构,具有良好的多重地形适应能力,可广泛应用于星球探索、灾后救援、军事作战等领域^[2],引起各国相关研究机构的密切关注^[3].近年来,研究者们从仿生的角度设计了许多典型的移动机构^[4-8].文献[4-6]根据“构型—功能—控制”的思路进行多模式移动机构设计,却忽略了机构构型设计与功能之间的密切联系.该设计仅仅着眼于控制,无法实现特殊环境的多模式转换.文献[7-8]仅根据生物物理结构进行仿生设计,形式和结构都比较单一,无法给出仿生设计的数学模型,且未形成一套系统的构型设计方法.因此,迫切需要找到既能满足实际应用要求,又运算简便、结构简单的机构构型设计方法.

鉴于此,本文拟从仿生原理和空间几何学出发,结合机构的构型综合理论,设计一种新型

仿生多模式移动机构,并运用螺旋理论对机构的构型设计进行分析^[9],以期实现集滑行、爬行、滚动多运动模式于一机,具有多重地形适应能力,且易于操控、结构可靠、行走稳定、便于制造的设计目标,为仿生机构设计提供一种新思路.

1 仿生多模式移动机构设计

1.1 设计思想与流程

自然界中不少动物的运动关节依据地形需要经过千百年的进化,已形成了各自的优势,这对于仿生机构运动关节的设计具有一定的借鉴意义.仿生多模式移动机构的设计,不仅根据生物的物理外形,还可以根据运动关节的构造机理进行,从中抽象出具有相同功能的运动关节,以此为基本结构单元,构造多模式移动机构^[10].研究发现,大多数生物的运动关节可看成是由转动副(R)通过不同的空间位置排列组合而成.转动副相对其他运动副具有全周转、空间范围广等优点.通过运动副轴线位置的变化,转动副关节连接的构型具有可在一定空间中任意活动的特点.一般的做法是,在多模式移动机构设计的过程中,由生物的运动关节抽象出等效的、由转动副组成的结构单元,并将其作为基础构造支链,然后利用螺旋理论对转动副形成的运动支链进行拓扑;根据并联机构的构型综合理论,结合仿生、对称、等效、阵列等设计思想^[11],合理布置运动副轴线位置关系,形成结构简单、容易控制的多模式移动并联机构.

本设计以四足步行、扑翼飞行、圆形滚动3

种生物运动方式为仿生对象,依据以转动副为基础构造运动副的原则,抽象出等效的单元机构;再根据空间几何对称关系,集成出一种具有滑行、爬行、滚动功能的仿生多模式移动机构.图1为基于等效单元体结构多模式移动机构设计示意图,设计流程如图2所示.

1.2 等效单元体结构设计

等效单元体是一个单环闭链机构,可用螺旋理论进行构型设计分析.一个螺旋包含轴线位置、方向、大小、节距4个因素.空间中运动副的轴线所在位置可以看成是节距为零的螺旋,即线矢量^[9].对于多个运动副形成的支链,通过螺旋理论可以判断各个运动副所在轴线的位关系,以及该支链受到的约束.因此,运用螺旋理论可以对运动支链的运动副不断地进行拓展,最终得到满足设计要求的运动支链.

在机构学中,运动支链相邻运动副之间的

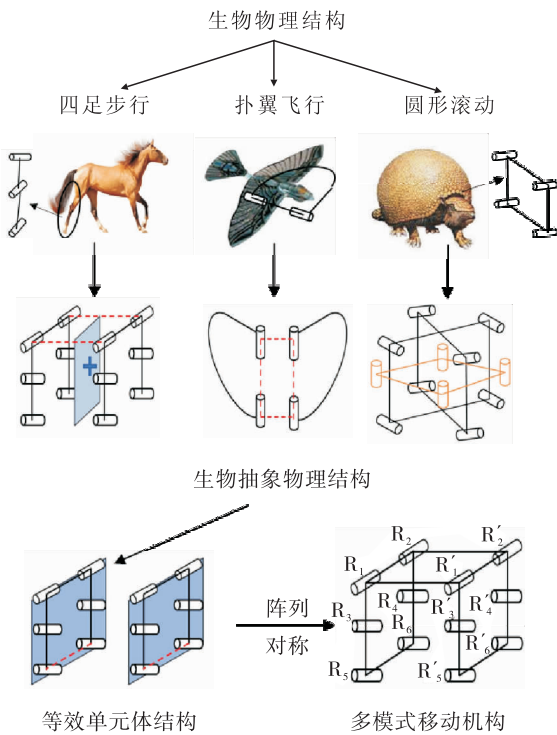


图1 基于等效单元体结构多模式移动机构设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-mode mobile mechanism based on equivalent unit structure

空间几何关系有共面和异面两种,而共面又分为平行和相交两种,其中转动副和螺旋副用运动轴线的螺旋表示,移动副用移动方向的螺旋表示.机构在运动过程中,相邻运动副轴线位置在空间中的几何关系不发生变化.为了实现串联运动支链的结构多样性,可以通过支链运动螺旋系不同的线性组合改变支链的结构,如改变支链运动螺旋系中螺旋的数目或者运动副的排列次序,将转动副与移动副相互转化,将单自由度运动副结合为多自由度运动副,或者将定平台与动平台互换等^[5].

两个空间邻接转动副2R轴线的空间几何关系如图3所示.以转动副R为基础运动副,在2R的基础上进行邻接扩展,构造包含3个转动副R的运动支链,并对这些3R运动分支进行分支约束系的计算.由空间线几何理论可知,3R在空间可形成7种不同约束几何条件的分支和结构位型,即7种空间姿态(见图4),图中

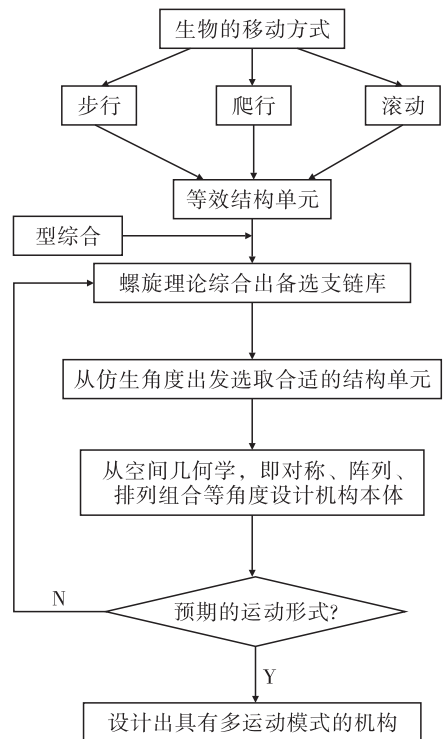


图2 多模式移动机构设计流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-mode mobile mechanism design

I 代表相交, S 代表交错,转动副 R 的单位螺旋 $\$ = (s; r \times s) = [L_i, M_i, N_i; P_i, Q_i, R_i]$,其中 $s = (L_i, M_i, N_i)$ 代表转动副轴线在 3 个坐标轴上的方向余弦, r 是螺旋轴线上任意一点的位置矢量.

通过螺旋理论对这 7 种不同的 3R 运动分支进行分析,每一分支的运动螺旋、约束螺旋、约束类型如表 1 所示,其中, F 表示力; C 表示力偶; H 表示偶量;运动螺旋和约束螺旋中的小写字母表示标量常数,在同一坐标系中,它们的大小决定空间中运动轴线的位置.

由 3R 运动分支在空间中形成的 7 种不同的运动支链类型,可构造出不同空间邻接关系的运动副的备选支链库,分析这些分支的约束螺旋进行单环机构的构造,并作为多模式移动机构的构造单元.

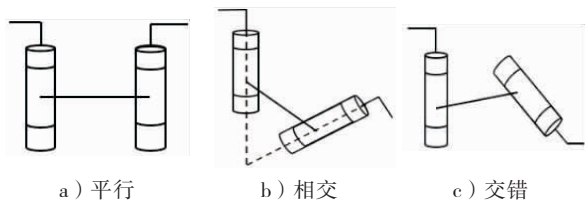


图 3 两个空间邻接转动副 2R 轴线的空间几何关系

Fig. 3 The axial relationship between two spatially adjacent rotating pairs 2R

考虑构造多模式移动并联机构的对称性,对这些分支约束螺旋系两两组合取交集,研究分支组合能够得到的公共约束类型和个数(见图 5).通过约束螺旋的交集关系,得到不同约束类型、不同杆件数、不同配置的单环机构组成方案^[16].

为了使形成的多模式移动机构结构简单、易于控制且有良好的机动性能,组成机构的单环构型应具有结构对称、运动副之间的运动关系简单等优点.结合图 1 所示的等效单元体结构,从仿生的角度出发,在表 1 备选支链库 a—g 中选取图 4d)所示的 3R 运动分支(轴线关系为 $R//R(S)R$)为构造支链,结合对称、阵列的思想,使得螺旋 $\$1$ 与 $\$2, \4 与 $\$3$ 轴线平行, $\$3$ 与 $\$6$ 轴线相互平行且与 $\$2$ 法平面共面,综合出一种由 6R 组成的平面单环机构,该机构为等效单元体. 3R 运动支链及组成单环机构轴线关系如图 6 所示.图 7 为等效单元体机构简图及运动副表达.

1.3 等效单元体运动螺旋分析

为了分析等效单元体运动螺旋,建立如图 7 所示的等效单元体的固定坐标系 $O-XYZ$,坐标原点 O 与转动副中心点 A 点重合.图中单向

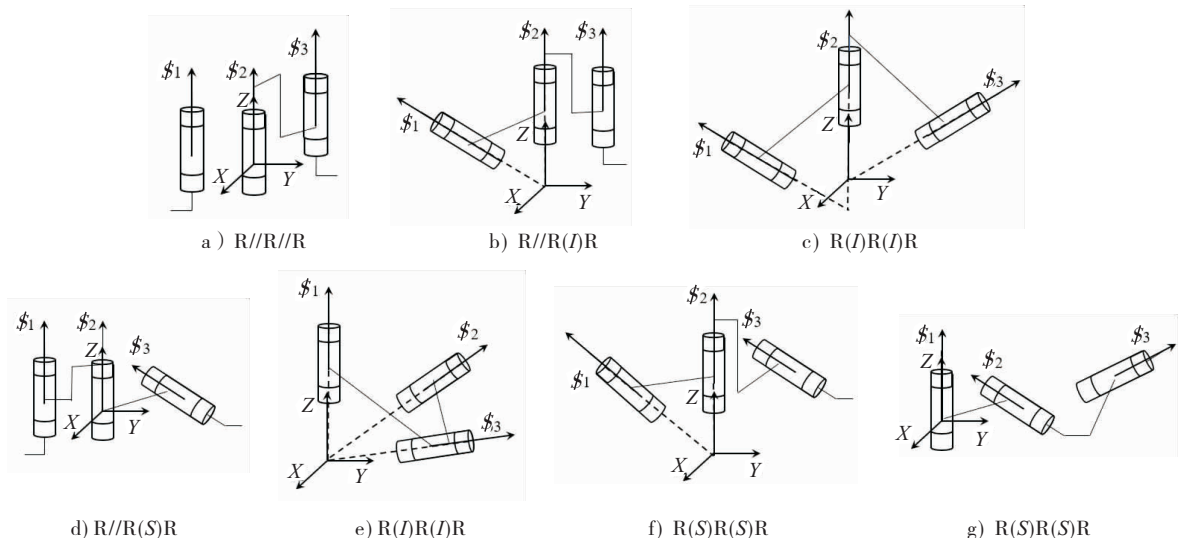


图 4 3R 分支的 7 种空间姿态

Fig. 4 7 postures in space 3R branch

表1 7种运动支链螺旋表达

Table 1 Screw expressions of 7 kinematic branched chains

空间姿态	运动螺旋	约束螺旋	约束类型
a	$\$1 = [a, b, c; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [d, e, f; r, p, q]^T$	$\$1 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 0; 0, 1, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 0; 1, 0, 0]^T$	2F1C
b	$\$1 = [a, b, c; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 0; p, q, 0]^T$	$\$1 = [0, 0, 0; -\frac{b}{a}, 1, 0]^T$ $\$2 = [-\frac{q}{p}, 1, 0; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$	2F1C
c	$\$1 = [a, b, c; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [d, e, f; -er, dr, 0]^T$	$\$1 = [-\frac{d}{a}, 1, 0; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [-\frac{bd-ae}{aer}, 0, 0; -\frac{b}{a}, 1, 0]^T$ $\$3 = [1, 0, 0; 0, 0, 0]^T$	2F1C
d	$\$1 = [0, 0, 1; p, q, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [a, b, c; s, t, r]^T$	$\$1 = [0, 0, 1; -\frac{b}{a}, 0, 0]^T$ $\$2 = [-\frac{q}{p}, 1, 0; -\frac{-qs+pt}{ap}, 0, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 0; -\frac{b}{a}, 1, 0]^T$	1F1C1H
e	$\$1 = [a, b, c; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [d, e, f; 0, 0, 0]^T$	$\$1 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 0; 0, 1, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 0; 1, 0, 0]^T$	2F1C
f	$\$1 = [a, b, c; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$3 = [d, e, f; p, q, r]^T$	$\$1 = [0, 0, 1; -\frac{br}{bd-ae}, \frac{ar}{bd-ae}, 0]^T$ $\$2 = [0, 1, 0; -\frac{bq}{bd-ae}, \frac{aq}{bd-ae}, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 1; -\frac{bp}{bd-ae}, \frac{ap}{bd-ae}, 0]^T$	1F2H
g	$\$1 = [0, 0, 1; 0, 0, 0]^T$ $\$2 = [a, b, c; p, q, r]^T$ $\$3 = [d, e, f; s, t, u]^T$	$\$1 = [0, 0, 1; -\frac{er-bu}{-bd+ae}, \frac{du-dr}{bd-ae}, 0]^T$ $\$2 = [0, 1, 0; -\frac{qq-bt}{-bd+ae}, \frac{at-dq}{bd-ae}, 0]^T$ $\$3 = [0, 0, 1; -\frac{ep-bs}{-bd+ae}, \frac{as-dp}{bd-ae}, 0]^T$	1F2H

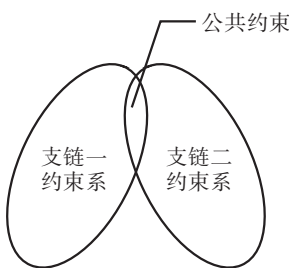


图5 单环机构的公共约束

Fig. 5 Common constraints of a single ring mechanism

箭头代表空间单环四杆机构的运动副螺旋, $\$A$, $\$B$, $\$C$ 和 $\$D$ 轴线平行于 X 轴, $\$E$ 轴线与 $\$F$ 轴线重合且沿着 Y 轴方向. 杆 AB 和杆 CD 的长度相等且定义为 r_1 , 杆 BC 和杆 AD 的长度定义为 r_2 . 视杆 BC 为机构运动平台, 则连杆 AD 通过两条支链与杆 BC 相连. $\$F$, $\$A$ 和 $\$B$ 构成支链一, $\$E$, $\$D$ 和 $\$C$ 构成支链二.

在初始位形下, 支链一的运动螺旋系为

$$\$A = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

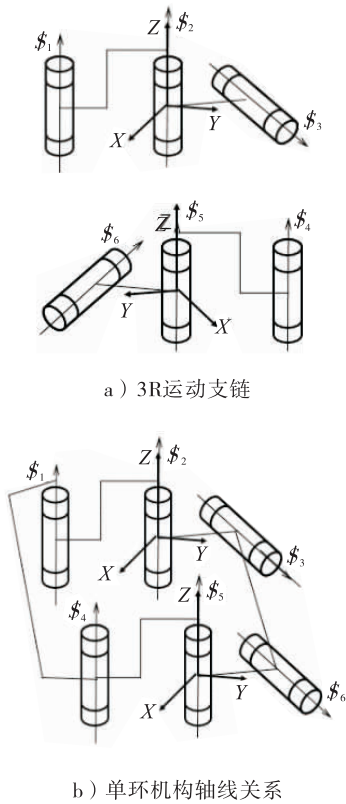


图6 3R运动支链及组成单环机构轴线关系
Fig.6 The relation between the motion branch of 3R and the axis of the motion pair of the component body

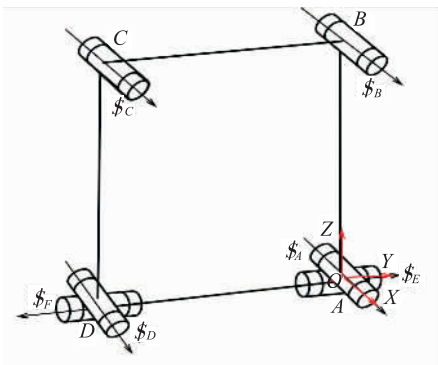


图7 等效单元体机构简图及运动副表达
Fig.7 Schematic diagram of equivalent element body and motion pair expression

$$S_F = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$$

$$S_B = [1, 0, 0; 0, r_1, 0]$$

取反螺旋,可得支链一的约束螺旋系为

$$S_{r11} = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$S_{r12} = [0, 0, 1; 0, 0, 0]$$

$$S_{r13} = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$$

支链二的运动螺旋为

$$S_D = [1, 0, 0; 0, 0, r_2]$$

$$S_E = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$$

$$S_C = [1, 0, 0; 0, r_1, r_2]$$

取反螺旋,支链二的约束螺旋系为

$$S_{r21} = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$S_{r22} = [0, 0, 1; -r_2, 0, 0]$$

$$S_{r23} = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$$

故可得单环四杆机构的公共约束为

$$S_{c1} = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$$

$$S_{c2} = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$$

公共约束数 $\lambda = 2$, 机构的介数为 $d = 6 - \lambda = 4$, 由修正的 G-K 公式可以计算空间四杆机构的瞬时自由度

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi = 4(4 - 4 - 1) + 6 + 0 - 0 = 2$$

式中, M 是机构的自由度, n 为机构中包含机架在内的总的构件数目, g 为运动副的数目, f_i 为第 i 个运动副的自由度。

综上, 得出机构的自由度为 2, 验证了该方法设计出等效单元体的正确性。

1.4 机构结构设计

多模式移动机构在变模式过程中自由度会发生变化; 在运动过程中, 机构出现约束奇异或机构的约束系在奇异位形发生降秩, 也会使机构自由度发生变化, 从而改变机构运动模式。如非邻接转动副共线、移动副方向相同等, 均会使机构原约束螺旋奇异位形和运动螺旋系发生改变, 机构在该瞬时具有不同自由度数或者不同类型的 1 个以上的运动模式。

本文基于上述思想, 从仿生多模式移动角度出发, 根据目标机构所需的各运动模式(滑行、滚动、爬行)的自由度个数, 推出机构整体

的约束螺旋系,得到组成机构的多种运动分支的约束螺旋.根据支链约束需要满足的几何条件等要求,进行运动支链的空间分布配置,采用两个等效单元体对称布置组成多模式移动并联机构(见图8).

由于机构完全对称布置,螺旋轴线共轴,所以机构总体自由度即为两个等效单元体机构的自由度之和,建立如图9所示的机构物理模型,机构具有滑行、爬行、滚动3种运动模式,3种模式下机构具有的自由度数目分别为2,2,4.

为实现机构的3种运动模式,依据机构各模式下运动步态布置电机,并进行电机分时控制.多模式移动机构仿生步态和电机分布如图10所示.在机构每个转动副处各装一个电机,通

过电机控制来实现不同运动模式及运动模式之间的切换.滑行模式下,电机 M_3 和 M_9 或者 M_4 和 M_{10} 工作;爬行模式下,电机 $M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9$ 和 M_{10} 工作;滚动模式下,电机 M_1 和 M_{11} 或 M_3 和 M_9 工作.未工作的电机都被锁定,旨在使该处的运动副失效,二者是对应关系.

2 可行性分析与仿真验证

2.1 可行性分析

通过电机分时控制实现不同运动模式及运动模式之间的相互切换.当机构处于滑行和滚动状态时,电机 M_5, M_6, M_7 和 M_8 被锁定, M_3 和 M_9 为主动副进行驱动,其余转动副为被动副,此时机构只有8个转动副在运动,其中2个为

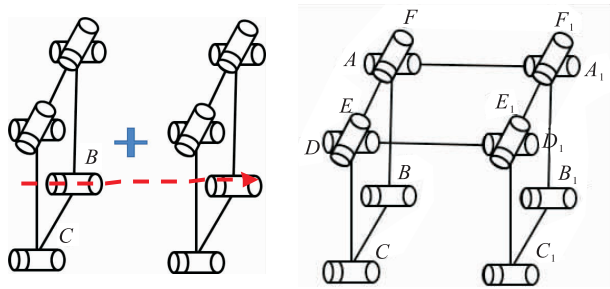


图8 多模式移动并联机构

Fig. 8 Schematic diagram of multi-mode mobile parallel mechanism

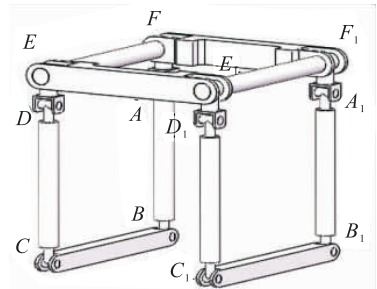


图9 仿生多模式移动机构

Fig. 9 Bionic multi-mode mobile mechanism

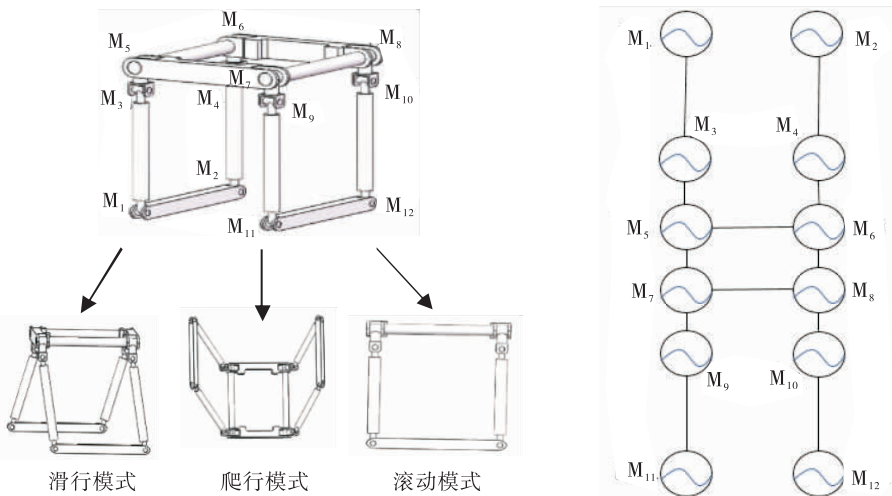


图10 多模式移动机构仿生步态和电机分布

Fig. 10 Bionic gait and motor distribution of multi-mode mobile mechanism

主动副,6个为被动副,机构自由度为2;当机构处于爬行状态时,电机 M_3, M_5, M_6, M_7, M_8 和 M_9 工作, M_3 和 M_9 为主动副,其余转动副为被动副,此时机构的自由度为4.机构中心平面对称,每种运动模式下机构运动螺旋和自由度可

由等效单元体表示.为验证机构在不同模式下的自由度是否符合设计要求,建立3种运动模式下机构的螺旋模型(见图11),对各种模式下机构自由度进行验算,结果见表2.由表2可见,各运动模式下的自由度都能实现预期运动.

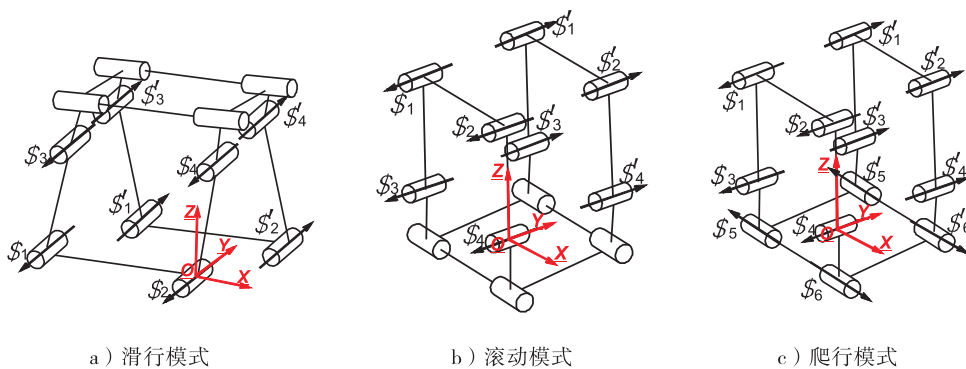


图 11 3种运动模式下机构的螺旋模型

Fig. 11 Spiral model of the mechanism under three motion modes

表 2 多模式移动机构各运动模式下运动螺旋及自由度

Table 2 Movement spirals and degrees of freedom of multi-mode mobile mechanism in each movement mode

运动模式	运动螺旋	公共约束螺旋	自由度	运动方式
滑行模式	$\$1 = [0, 1, 0; 0, 0, r_2]$ $\$2 = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$ $\$3 = [0, 1, 0; r_1, 0, r_2]$ $\$4 = [0, 1, 0; r_1, 0, 0]$ $\$'_1 = [0, 1, 0; 0, 0, c_1]$ $\$'_2 = [0, 1, 0; 0, 0, d_1]$ $\$'_3 = [0, 1, 0; f_1, 0, e_1]$ $\$'_4 = [0, 1, 0; g_1, 0, 0]$	$\$1^r = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$ $\$2^r = [0, 0, 0; 1, 0, 0]$ $\$3^r = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$	$M = 3(7 - 8 - 1) + 8 + 0 - 0 = 2$	绕Y轴转动,沿X轴移动
滚动模式	$\$1 = [0, 1, 0; r_1, 0, r_2]$ $\$2 = [0, 1, 0; r_1, 0, 0]$ $\$3 = [0, 1, 0; 0, 0, r_2]$ $\$4 = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$ $\$'_1 = [0, 1, 0; f_1, 0, e_1]$ $\$'_2 = [0, 1, 0; g_1, 0, 0]$ $\$'_3 = [0, 1, 0; 0, 0, c_1]$ $\$'_4 = [0, 1, 0; 0, 0, d_1]$	$\$1^r = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$ $\$2^r = [0, 0, 0; 1, 0, 0]$ $\$3^r = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$	$M = 3(7 - 8 - 1) + 8 + 0 - 0 = 2$	绕Y轴转动,沿X轴移动
爬行模式	$\$1 = [0, 1, 0; c, 0, d]$ $\$2 = [0, 1, 0; d, 0, 0]$ $\$3 = [0, 1, 0; 0, 0, a]$ $\$4 = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$ $\$5 = \$6 = [1, 0, 0; 0, 0, 0]$ $\$'_1 = [0, 1, 0; f_1, 0, e_1]$ $\$'_2 = [0, 1, 0; g_1, 0, 0]$ $\$'_3 = [0, 1, 0; 0, 0, c_1]$ $\$'_4 = [0, 1, 0; 0, 0, d_1]$ $\$'_5 = [1, 0, 0; 0, 0, c_1]$ $\$'_6 = [1, 0, 0; 0, 0, d_1]$	$\$1^r = [0, 0, 0; 0, 0, 1]$ $\$2^r = [0, 1, 0; 0, 0, 0]$	$M = 2(10 - 12 - 1) + 10 + 0 - 0 = 4$	绕X,Y轴转动和移动

2.2 虚拟样机仿真验证

为验证分析结果,在 ADAMS 环境下建立机构滑行、爬行、滚动模式的运动学模型并进行仿真,结果如图 12—17 所示。

2.2.1 滑行模式仿真分析 在滑行模式下,电机 M_3 和 M_9 为主动副,进行驱动,其余转动副为被动副,利用地面与两足之间的摩擦力交替运动保持前进.图 12 为该机构直线滑行一周期内的各运动阶段的状态:在 a) —e) 阶段,机构先以右前方的趋势向前滑行,但在 Y 轴方向有少量偏移;在 f) —j) 阶段,机构再以左前方的趋势向前滑行,在 Y 轴方向得到恢复,最终实现机构直线滑行模式。

图 13 为直线滑行模式下机构重心在 X, Y, Z 轴方向的位移曲线.从图 13 可以看出,机构

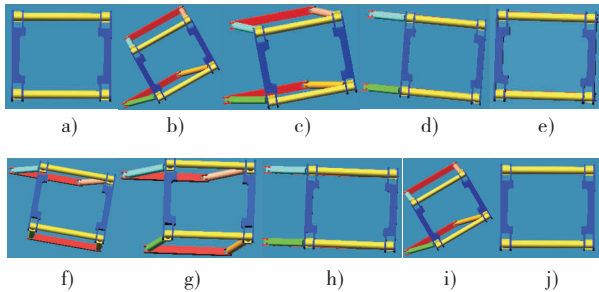


图 12 机构直线滑行一周期内各运动阶段的状态

Fig. 12 The motion states of the mechanism in a period of linear silding

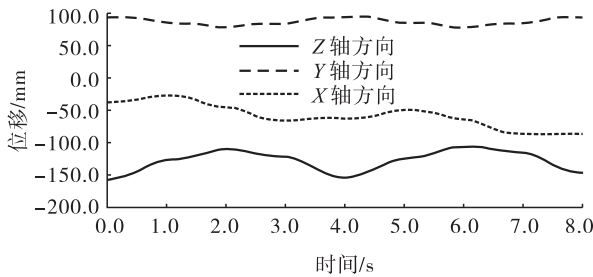


图 13 直线滑行模式下机构重心在 X, Y, Z 方向的位移曲线

Fig. 13 Displacement of center of gravity in the X, Y and Z directions in linear silding mode

在 Z 轴方向无位移;在 X 轴方向以一定周期向前移动;在 Y 轴方向有较小位移,为误差累积.因此,在直线滑行模式下,机构沿 Y 轴, Z 轴方向的移动可忽略不计,机构可以沿着 X 轴方向作稳定的直线滑行。

2.2.2 爬行模式仿真分析 当机架上电机 M_5, M_6, M_7 和 M_8 同步输入, M_9 和 M_{10}, M_3 和 M_4 同步转动,其余运动副为被动副时,机构实现爬行模式.图 14 为该机构直线爬行一周期内的各运动阶段的状态,通过仿真验证了该机构沿直线运动的爬行模式。

图 15 为直线爬行模式下机构重心在 X, Y, Z 轴方向的位移曲线.从图 15 可以看出,一个周期内机构在 Z 轴方向无位移; X 轴方向以一定的周期向前移动,即机构整体向前翻滚;在 Y 轴方向呈周期性变换,即机构质心在做周期性变化.这说明机构在直线爬行过程中具有很好的稳定性。

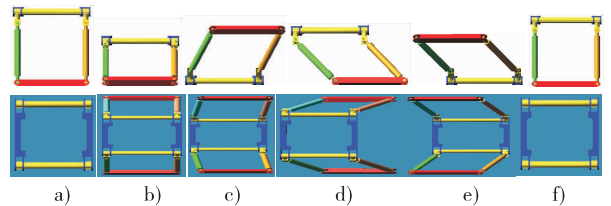


图 14 机构直线爬行一周期内各运动阶段的状态

Fig. 14 The motion states of the mechanism in a period of linear crawling

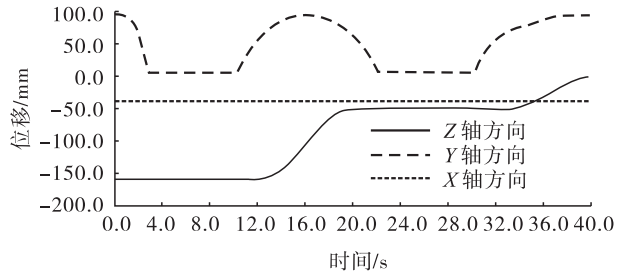


图 15 直线爬行模式下机构重心在 X, Y, Z 方向的位移曲线

Fig. 15 Displacement of center of gravity in the X, Y and Z directions in linear crawling mode

2.2.3 滚动模式仿真分析 当电机 M_3 和 M_4 同步输入时,机构可以等效为平面四杆模型,机构输出为滚动模式.图 16 所示为该机构直线滚动一周期内的各运动阶段的状态,通过仿真验证了该机构在 XOZ 平面可实现滚动模式.

图 17 为直线滚动模式下机构重心在 X, Y, Z 轴方向的位移曲线.从图 17 可以看出,一个周期内机构在 Z 轴方向无位移; X 轴方向以一定的周期向前移动,即机构整体向前翻滚;在 Y 轴方向呈周期性变换,即机构质心在做周期性变化.这说明机构能够以一定的规律进行直线翻滚运动,且具有很好的机动性.

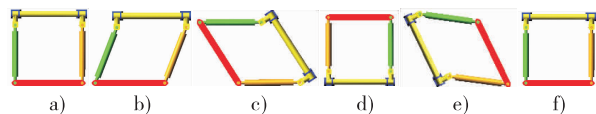


图 16 机构直线滚动一周期内各运动阶段的状态

Fig. 16 The motion states of the mechanism in a period of linear rolling

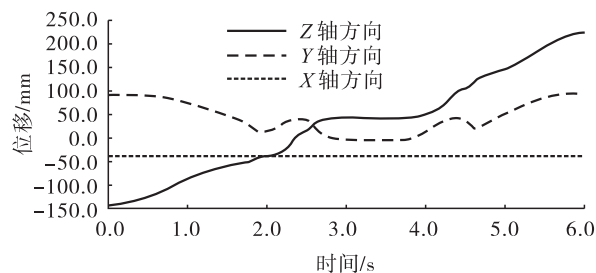


图 17 直线滚动模式下机构重心在 X, Y, Z 方向的位移曲线

Fig. 17 Displacement of center of gravity in the X, Y and Z directions in linear rolling mode

3 结语

本文根据不同生物的运动特性和运动关节的结构特征,提取出等效单元体结构;基于螺旋理论,以 $2R$ (转动副) 为基础,拓扑出空间 $3R$ 运动支链,依据空间 $3R$ 运动支链的运动副轴线的位置关系,综合出空间单环 $6R$ 机构;结合

空间几何对称原理和变自由度思想,模仿生物外形,采用两个平面单环机构在空间对称布置组成多模式移动机构.仿真结果表明,该机构能够实现预期的运动模式,设计合理,运动稳定可靠,具有良好的机动性能.

参考文献:

- [1] 罗仕鉴,张宇飞,边泽,等.产品外形仿生设计研究现状与进展[J].机械工程学报,2018,54(21):138.
- [2] 卢孔宝,陈华勇.灾后救援机器人的机械结构设计[J].浙江水利水电学院学报,2018,30(2):54.
- [3] WANG Z, TIAN Y, YAO Y. A novel underactuated tetrahedral mobile robot [J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2018, 10(4):044506.
- [4] HU Y, GUO W Z, GAO F, et al. The design of legged mobile welding robot [C] // Proceedings of the 22nd CISM IFToMM Symposium. Heidelberg: Springer, 2018: 102.
- [5] 田耀斌.多模式移动连杆机构理论研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [6] 苗志怀.多模式步滚移动两足并联机构的研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [7] 王丹,赵强,尹伟萌.仿生可重构式机器人移动平台机构及动态特性分析[J].机械设计,2018,35(11):61.
- [8] 陶俊杰,臧红彬,蔡勇.新型仿生猎豹机器人的机构设计与功能仿真[J].机械设计与制造,2015(4):214.
- [9] 黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].2版.北京:高等教育出版社,2014.
- [10] 王乃玥.单环过约束机构的设计及运动分岔特性研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [11] 刘超.空间单闭链两足步行连杆机构的研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [12] 孔宪文,戈斯林.并联机构构型综合[M].北京:机械工业出版社,2013.