

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2017.07.008

# 基于 Canfield 型关节的蛇形机器人运动仿真研究<sup>①</sup>

卢振利<sup>②\*</sup> 谢亚飞<sup>\*\*\*</sup> 波罗瓦茨·布朗尼斯拉夫<sup>\*\*\*\*</sup> 李 斌<sup>\*\*</sup>

( \* 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500 )

( \*\* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110014 )

( \*\*\* 中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116 )

( \*\*\*\* 诺维萨德大学技术科学学院 诺维萨德 21000, 塞尔维亚 )

**摘 要** 应用虚拟机器人实验平台(V-REP)构建了一种基于 Canfield 关节型的运动机构,通过动力学仿真添加关节角度约束对其运动空间轨迹进行了观察与分析。利用该 Canfield 型机构作为关节模块组建成了蛇形机器人,并对该类蛇形机器人关节运动生成的蜿蜒、转弯和伸缩步态进行了实验研究和分析,为该类蛇形机器人设计提供了可行性。

**关键词** V-REP 仿真, Canfield 机构, 蛇形机器人, 蜿蜒运动, 转弯运动

## 0 引 言

关节可调少自由度并联机构是典型的一种机构类型,由于其运动空间可呈现出球面,涉及空间范围较广,因而在很多领域得到了应用,如应用于卫星定位装置、机械加工的回转工作台,尤其在机器人领域此机构应用更加广泛,可作为机器人的肩、髋、腰等关节<sup>[1-4]</sup>。

蛇形机器人的空间运动性能要求其机构的设计从只能实现二维空间运动的关节平行串联方式到能实现三维空间运动的关节正交串联方式,以及关节齿轮耦合设计的具有偏航和俯仰两个自由度的连接方式<sup>[5-8]</sup>。最有代表性的是 Hirose 教授团队研制的 ACM<sup>[9-11]</sup> 系列蛇形机器人,实现了从陆地到水陆两栖蛇形机器人的设计。

本文基于球面并联机构具有运动空间广泛的特点,选取了一种新型可调并联机构 Canfield<sup>[12]</sup> 机构作为蛇形机器人的关节来搭建蛇形机器人模型。该机构的原始设计来源于樱方上海智能科技有限公司。

司。本研究对此并关节机构搭建的蛇形机器人的典型运动步态蜿蜒运动、蜿蜒转弯和伸缩运动进行了试验仿真,以便为实用化此并联机构蛇形机器人提供技术储备。

## 1 Canfield 机构模型建立

Canfield 机构和传统的三自由度并联机构一样,包含一个动平台和一个静平台,动平台与静平台之间的连接有 3 个支链,不同在于每个支链上关节和连杆的数目及其组成方式不同。Canfield 机构每个支链互相之间成 120°角固定安置在静平台上,且每个支链上包含一个驱动转动副和 4 个从动转动副,通过组合控制三个驱动转轴副的转动来带动动平台的移动,动平台可绕空间一固定点相对于静平台做三维空间的转动。机构设计上驱动转动副的角度转动范围有一定的限制,不能盲目地增加角度偏转,如果转动角度超过一定的范围,机构会出现奇异状态。Canfield 机构单支链上关节分布如图 1 所示,机构整体如图 2 所示。

① 国家自然科学基金(61473283)和机器人学国家重点实验室开放基金(2014-008)资助项目。  
② 男,1974 年生,博士,硕士生导师;研究方向:机器人智能控制;联系人,E-mail: zhenlilu@cslg.cn  
(收稿日期:2017-02-27)

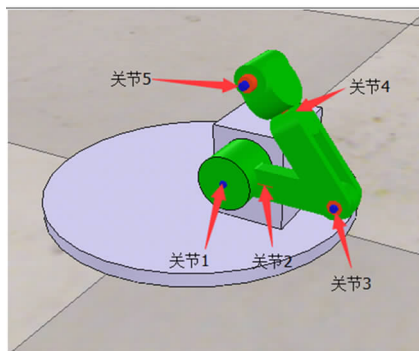


图1 单支链

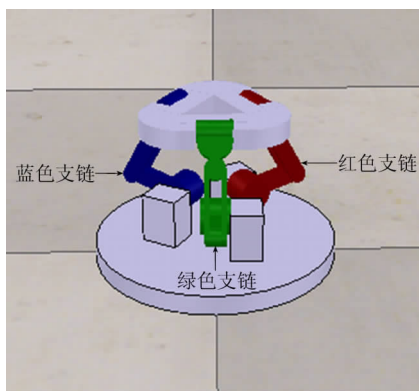


图2 Canfield 机构

## 2 平面扫动运动轨迹分析

Canfield 机构控制连杆运动相较于单舵机关节控制连杆运动较为复杂,其必须要三个驱动转动副同时协作组合运动才能控制动平台运动到预期的运动空间。Canfield 机构柔性较好,能实现收缩和伸长,此机构在三个驱动转动副协调运动时,在同一平面内动平台的运动轨迹可呈现出扫动的运动态势。其在3个驱动转动副处于合理转动范围、机构非奇异的状态时,动平台平行于静平台伸长到某个状态时的来回扫动运动轨迹如图3所示。

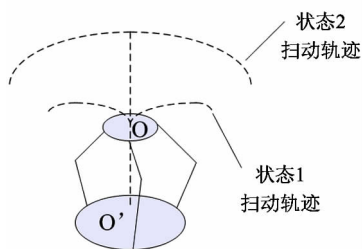


图3 不同状态扫动轨迹

图3给出了 Canfield 机构空间的一种扫动状态。其动平台几何中心 O 点扫动后的轨迹所在的平面垂直于静平台所在的平面。动平台平行于静平台伸缩长度不同,其左右扫动的轨迹则不同,主要呈现出两种类型的扫动状态,分别如图3中状态1、2所示。

### 2.1 状态1 扫动轨迹分析

图3中显示的扫动轨迹状态1的分析规定,转动副逆时针旋转角度为逐渐增加的,顺时针旋转角度为逐渐减少的。实现状态1中显示的运动,其三个驱动关节的控制方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{\text{green}}(t) = \begin{cases} \theta_0 + (\theta_1 - \theta_0) \cdot |\sin(\omega t)| & t \in \left[ \frac{2k}{\omega}\pi, \frac{2k+1}{\omega}\pi \right), k \in N \\ \theta_0 & t \in \left[ \frac{2k+1}{\omega}\pi, \frac{2k+2}{\omega}\pi \right), k \in N \end{cases} \\ \theta_{\text{red}}(t), \theta_{\text{blue}}(t) = \begin{cases} \theta_0 & t \in \left[ \frac{2k}{\omega}\pi, \frac{2k+1}{\omega}\pi \right), k \in N \\ \theta_0 + (\theta_1 - \theta_0) \cdot |\sin(\omega t)| & t \in \left[ \frac{2k+1}{\omega}\pi, \frac{2k+2}{\omega}\pi \right), k \in N \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中,  $\theta_{\text{green}}(t)$ 、 $\theta_{\text{red}}(t)$ 、 $\theta_{\text{blue}}(t)$  是三个支链驱动关节的控制函数,  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ ,  $i$  是运行次数,  $\Delta t$  是运行时间步长;  $\theta_0$  是动平台平行伸长到空间某个初始位置时三个驱动关节共同转动的角度。  $\theta_1$  是动平台向一侧摆动到预设位置时,驱动关节转动的最大角度。  $\omega$  是频率,可以改变动平台扫动的速率。

选取  $\theta_0 = 0^\circ$ ,  $\theta_1 = 60^\circ$ ,  $\omega = 1$ ,  $\Delta t = 0.01\text{s}$  带入虚拟机器人实验平台(virtual robot experimentation platform, V-REP)系统搭建的仿真平台进行扫动运动试验,运动过程中的三个位姿,如图4所示;一个周期运动过程中各支链转动关节的转角信息如图5、图6、图7所示。

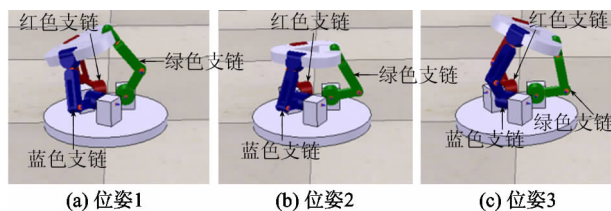


图4 扫动运动

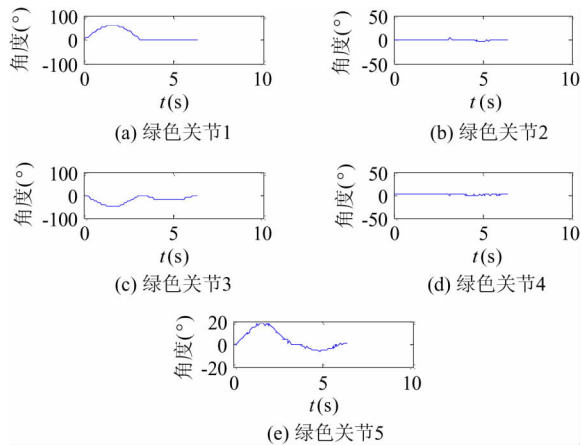


图5 绿色支链转动关节转角

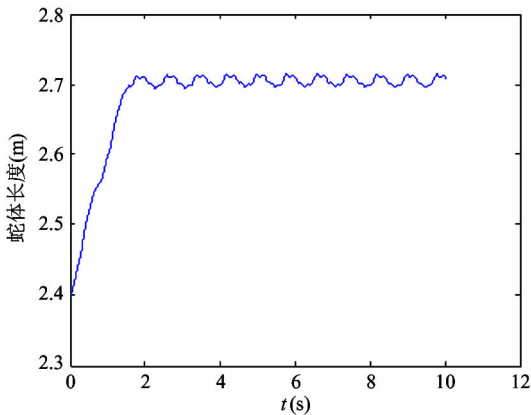


图6 红色支链转动副转角

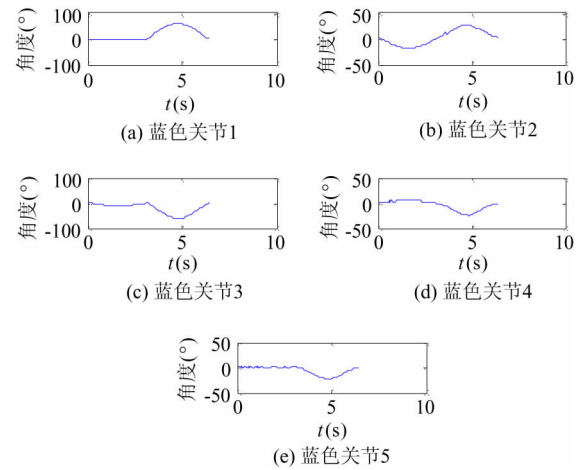


图7 蓝色支链转动副转角

动平台几何中心扫过的轨迹如图8所示,扫动的轨迹是往复振荡的扫动过程,运动轨迹验证了扫动运动中此控制方式的可行性。

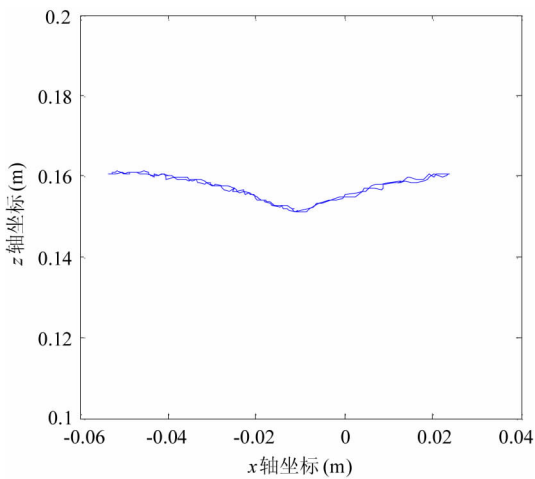


图8 动平台扫动轨迹

2.2 状态2 扫动轨迹分析

图3中扫动轨迹状态2分析研究得出扫动轨迹的运动的三个驱动关节控制方程如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{\text{green}}(t) &= \begin{cases} \theta_0 \mid \cos(\omega t) \mid & t \in \left[ \frac{2k}{\omega}\pi, \frac{2k+1}{\omega}\pi \right), k \in N \\ \theta_0 & t \in \left[ \frac{2k+1}{\omega}\pi, \frac{2k+2}{\omega}\pi \right), k \in N \end{cases} \\ \text{red}(t), \theta_{\text{blue}}(t) &= \begin{cases} \theta_0 & t \in \left[ \frac{2k}{\omega}\pi, \frac{2k+1}{\omega}\pi \right), k \in N \\ \theta_0 \mid \cos(\omega t) \mid & t \in \left[ \frac{2k+1}{\omega}\pi, \frac{2k+2}{\omega}\pi \right), k \in N \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, $\theta_{\text{green}}(t)$ 、 $\theta_{\text{red}}(t)$ 、 $\theta_{\text{blue}}(t)$ 是三个支链驱动关节的控制函数, $\theta_0$ 是动平台平行伸长到空间某个位置时三个驱动关节共同转动的角度。

选取  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $\omega = 1$  时,机构运动过程中三个位姿状态如图9所示。各支链关节转角与时间关系图如图10、图11、图12所示。动平台的几何中心在扫动过程中的运动轨迹如图13所示。

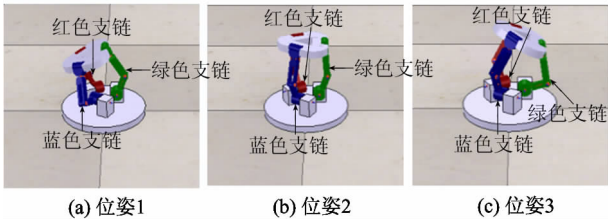


图9 扫动运动

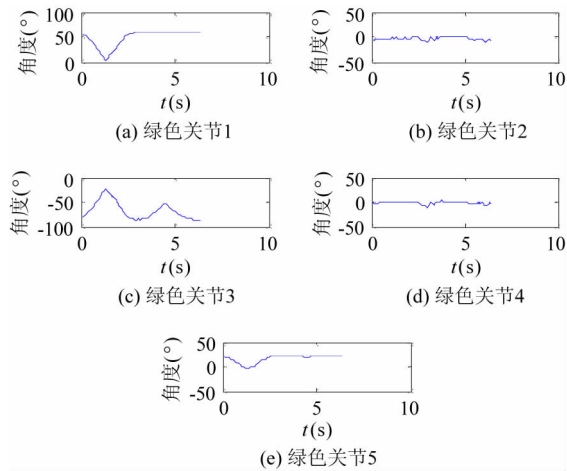


图 10 绿色支链转动副转角

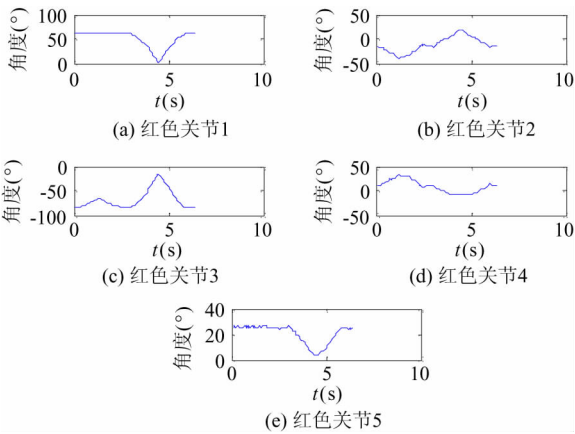


图 11 红色支链转动副转角

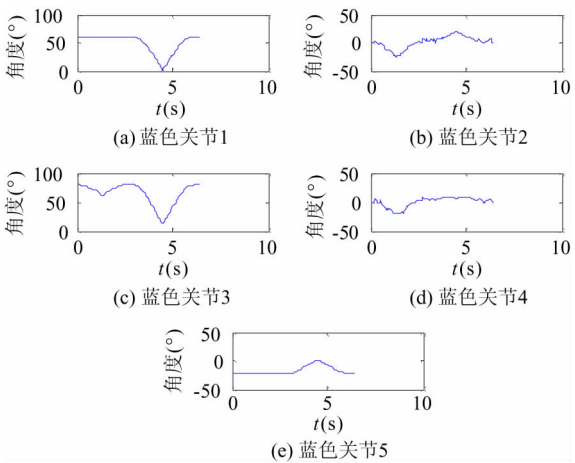


图 12 蓝色支链转动副转角

图 13 动平台扫动的轨迹与图 3 中状态 2 扫动运动态势一致,验证了图 10、图 11、图 12 中对各支链驱动关节的控制规律实现 Canfield 机构扫动运动

的可行性。

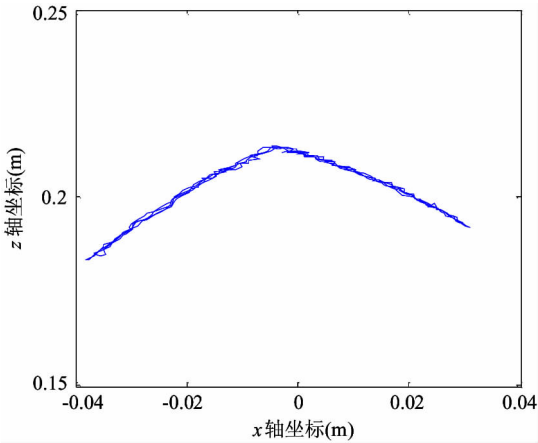


图 13 动平台扫动轨迹

### 3 Canfield 机构实现蜿蜒运动仿真实验

从蛇形机器人完成蜿蜒运动其舵机带动连杆转动的轨迹分析可见,Canfield 机构应用在蛇形机器人上完成蜿蜒运动,其动平台运动的轨迹应与图 14 中连杆来回扫动的运动态势一致。

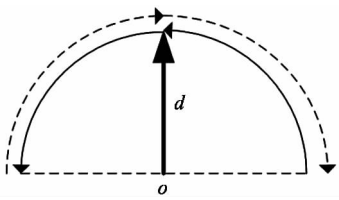


图 14 连杆摆动过程

图 3 中表明了 Canfield 机构在不同伸缩长度时其动平台来回扫动的轨迹是不一样的。当动平台逐渐伸长到某个点,其来回扫动轨迹和图 14 中连杆来回摆动态势一致时,这时基于 Canfield 机构设计的蛇形机器人在理论上就有实现蜿蜒运动的可能。

#### 3.1 蛇形机器人机构搭建及控制分析

基于 V-REP 机器人仿真平台应用 Canfield 机构设计搭建蛇形机器人仿真模型,如图 15 所示。

图 15 中设计的 Canfield 单关节机构收缩时最小长度为 12cm,伸长时最大长度能达到 30cm。图中设计的蛇形机器人有 9 个模块,模块长 10cm,分别各个模块上均匀分布了 6 个被动轮。在仿真试验过程中,由于蛇形机器人机构关节较多,若仿真步长设置较长的话,蛇形机器人会出现运动迟滞,不连

贯现象。蜿蜒运动仿真过程中,仿真步长设为 10ms,仿真平台如图 16 所示。



图 15 蛇形机器人仿真模型

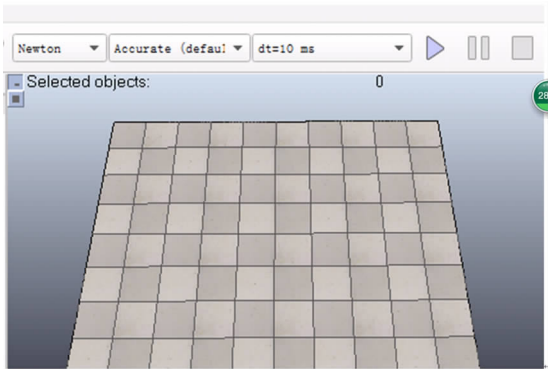


图 16 仿真平台

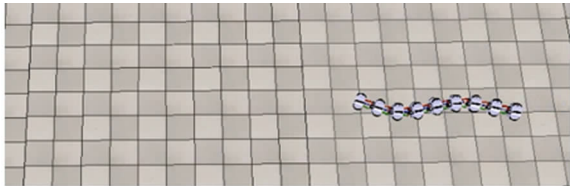
相较于用蛇形曲线<sup>[13,14]</sup>控制蛇形机器人实现蜿蜒运动,基于 Canfield 机构设计的蛇形机器人则不能利用文献[13、14]中的蛇形曲线函数来实现。它可以采用角度传递方法来实现蜿蜒运动:即蛇头关节来回摆动,经过延时把首关节的运动依次向蛇尾方向传递,带动整个机器人实现运动。

3.2 蜿蜒运动仿真

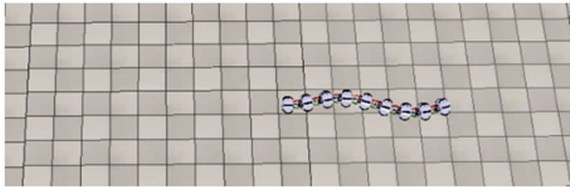
在 V-REP 仿真平台中基于 Canfield 机构设计的蛇形机器人选取三驱动关节初始共同转动角度为 60°时的动平台扫动运动(扫动过程见图 9)来进行蜿蜒运动试验,运动过程中三个时刻蛇形机器人位姿情形如图 17 所示。

记录蜿蜒运动过程中蛇形机器人头部模块质心的运动轨迹如图 18 所示。试验过程中发现,通过关节角度时延传递、模块分布式控制的蛇形机器人,其各模块运动轨迹具有很好的一致性。这种控制方式只要设计好首模块关节的运动轨迹和选择适当的时延,各个模块的运动就能保持同一性,蛇形机器人蜿

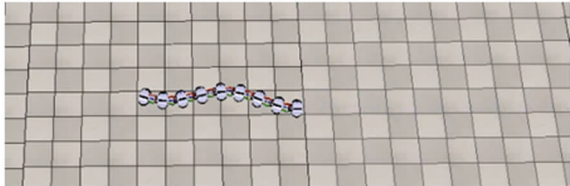
蜒运动则更便于灵活地控制。



(a)  $t=2s$



(b)  $t=4s$



(c)  $t=6s$

图 17 蜿蜒运动

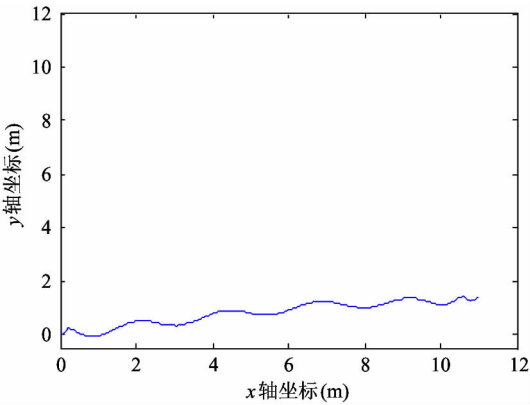


图 18 蜿蜒运动轨迹

3.3 蜿蜒转弯运动

机构动平台来回等角度的对称扫动就能让蛇形机器人保持直向的蜿蜒运动,经过对关节来回转动的分析,发现当机构动平台来回扫动的轨迹不对称时,即动平台转动在一边扫过的角度较多,在另一边扫过的角度较少,这时蛇形机器人在运动过程中就会向扫过角度较多的一侧偏移运动,从而实现转弯。机构动平台来回不对称的扫动轨迹如图 19 所示,图中动平台向左扫动的角度范围较大,把此时状态下的来回扫动运动应用到蛇形机器人的蜿蜒运动中,

蛇形机器人会出现连续向左逆时针转弯的运动步态。

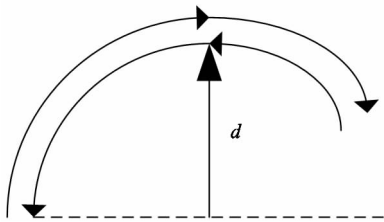


图 19 不对称扫动运动轨迹

选取动平台向左扫动角度范围大于向右扫动范围一组控制策略应用到蛇形机器人的蜿蜒运动中，其在仿真中的转弯运动过程如图 20 所示。

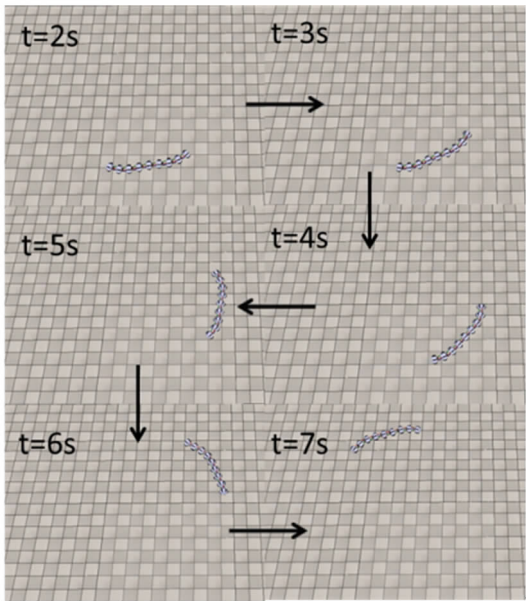


图 20 转弯运动

根据转弯运动实验,蛇形机器人头部模块三驱动关节的角度控制规律如图 21 所示,转弯运动轨迹如图 22 所示。

4 伸缩运动

Canfield 机构动平台平行于静平台实现水平伸缩,只需给三个驱动关节同时转动相同的角度就可实现,伸长过程如图 23 所示。

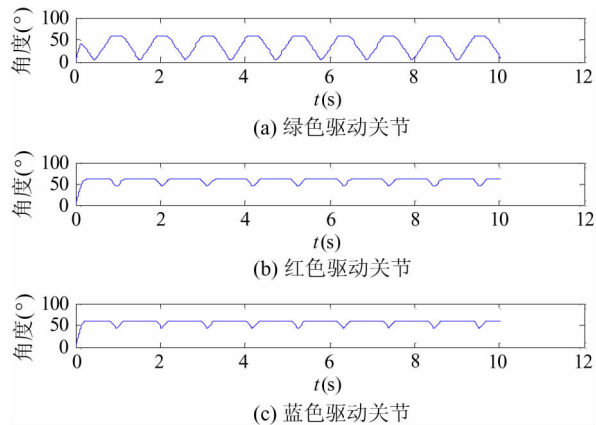


图 21 头部模块驱动关节转角

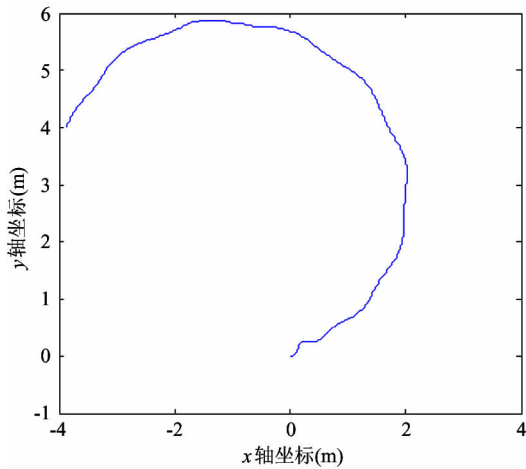


图 22 转弯轨迹

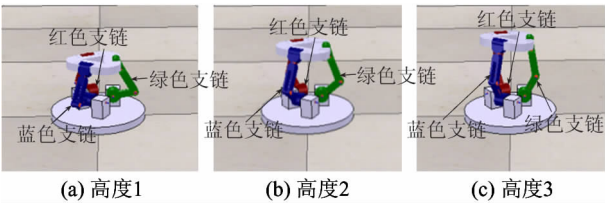


图 23 机构伸长过程

给定角度增减控制规律,可实现连续的伸缩运动。驱动关节角度在 $[0, \pi/3]$ 之间连续伸缩的控制规律如图 24 所示;应用到模块间关节角度传递时延为 0.2s 的蛇形机器人伸缩运动中,其伸缩过程如图 25 所示;伸缩中蛇形机器人体的变化规律如图 26 所示。

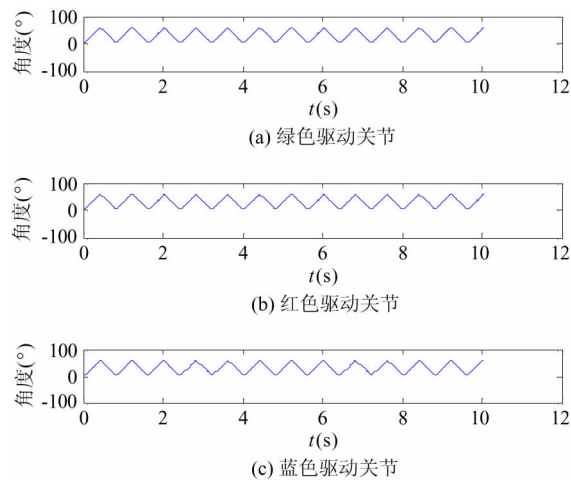


图 24 驱动关节角度

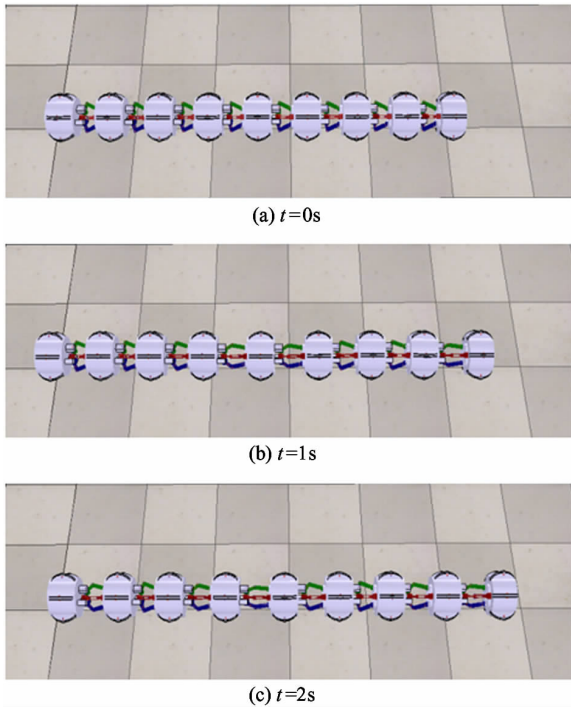


图 25 伸缩运动

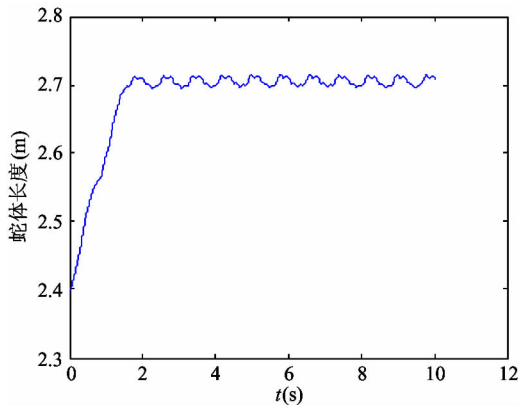


图 26 蛇体长度

## 5 结 论

本文基于 Canfield 并联机构设计搭建了蛇形机器人仿真模型,应用扫动运动控制该蛇形机器人实现蜿蜒运动。应用扫动运动基础上的不对称轨迹扫动转弯控制策略,实现了蛇形机器人的转弯运动。进而设计了该 Canfield 机构型蛇形机器人的伸缩运动步态。

### 参考文献

- [ 1 ] 姚翔, 林光春, 豆依玲. 三自由度可调并联机构的位置与运动学分析. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 3: 59-61
- [ 2 ] 王超群, 高踔, 陈柏等. 3-RRR 球面并联机构的工作空间分析及结构优化. 机械设计与制造, 2015, 4: 55-58
- [ 3 ] Lee J J, Dong Y, Yong H J, et al. Design of a planar 3-DOF parallel micromanipulator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(10):2985-2990
- [ 4 ] Wang M, Ceccarelli M. Topology search of 3-DOF translational parallel manipulators with three identical limbs for leg mechanisms. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(4):666-675
- [ 5 ] 黄恒, 颜国正, 丁国清等. 一类蛇形机器人系统的运动学分析. 高技术通讯, 2002, 12(5):90-94
- [ 6 ] 张占. 正交关节蛇形机器人典型运动方式的控制函数实现及其优化:[硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学自动化科学与工程学院, 2011
- [ 7 ] 张玲玲. 蛇形机器人的机构设计和运动研究:[硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学控制科学与工程学院, 2009
- [ 8 ] 郭燕. 蛇形机器人的运动控制及步态优化:[硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学自动化科学与工程学院, 2011
- [ 9 ] Endo G, Togawa K, Hirose S. Study on self-contained and terrain adaptive active cord mechanism. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1999. 1399-1405
- [ 10 ] Chigisaki S, Mori M, Yamada H, et al. Design and control of amphibious snake-like robot “ACM-R5”. *Nippon Kikai Gakkai Robotikusu*, 2005: ALL-N-020

- [11] Komura H, Yamada H, Hirose S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel. *Advanced Robotics*, 2015, 29(17):1081-1094

[12] Canfield S L, Soper R R, Reinholtz C F. Velocity analysis of parallel manipulators by truss transformations. *Mechanism & Machine Theory*, 1999, 34(3):345-357
- [13] 李斌, 马书根, 王越超等. 一种具有三维运动能力的蛇形机器人的研究. *机器人*, 2004, 26(6):506-509

[14] 叶长龙, 马书根, 李斌等. 蛇形机器人的转弯和侧移运动研究. *机械工程学报*, 2004, 40(10):119-123

# Simulation study on the motion of a Canfield joint type-based snake-like robot

Lu Zhenli<sup>\*\*\*</sup>, Xie Yafei<sup>\*\*\*\*</sup>, Borovac Branislav<sup>\*\*\*\*</sup>, Li Bin<sup>\*\*</sup>

(<sup>\*</sup> School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(<sup>\*\*</sup> State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110014)

(<sup>\*\*\*</sup> School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(<sup>\*\*\*\*</sup> Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad 21000, Serbia)

## Abstract

A motion mechanism model based on Canfield joints was established by using the dynamic simulation software of the virtual robot experimentation platform (V-REP), and the trajectory in its motion space was observed and analyzed by adding joint degree constraints. The Canfield mechanism model was taken as a joint module to establish a snake-like robot model. The gaits of serpentine, turning and concertina gaits created by controlling the joint motion of the snake-like robot, were studied and analyzed through gait experiments, with the aim of providing the feasibility of designing this type of snake-like robots.

**Key words:** V-REP simulation, Canfield mechanism, snake-like robot, serpentine locomotion, turning locomotion