

基于仿生蛇形机器人的智能蜿蜒运动控制方法

杜洪健, 郭鹏, 肖文煜, 殷竣

引用本文

杜洪健, 郭鹏, 肖文煜, 殷竣. 基于仿生蛇形机器人的智能蜿蜒运动控制方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220700060-5.

DU Hongjian, GUO Peng, XIAO Wenyu, YIN Jun. [Intelligent Winding Motion Control Method Based on Bionic Snake-like Robot](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220700060-5.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于分割注意力与边界感知的中文嵌套命名实体识别算法](#)

Chinese Nested Named Entity Recognition Algorithm Based on Segmentation Attention and Boundary-aware

计算机科学, 2023, 50(1): 213-220. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211100257>

[飞机机内无线通信网络架构与接入控制算法研究](#)

Study on Wireless Communication Network Architecture and Access Control Algorithm in Aircraft

计算机科学, 2022, 49(9): 268-274. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700220>

[基于节点兴趣和Q-learning的P2P网络搜索机制](#)

P2P Network Search Mechanism Based on Node Interest and Q-learning

计算机科学, 2020, 47(2): 221-226. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190400002>

[一种基于超图Markov链松弛的聚类学习方法](#)

Clustering Method Based on Hypergraph Markov Relaxation

计算机科学, 2019, 46(6A): 452-456.

[面向无人装置协同操作的安全认证协议](#)

Authentication Protocol for Cooperation of Unmanned Vehicles

计算机科学, 2016, 43(1): 178-180. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.01.040>

基于仿生蛇形机器人的智能蜿蜒运动控制方法

杜洪健¹ 郭鹏¹ 肖文煜² 殷竣²

¹ 广东省北江航道事务中心 广东 清远 511518

² 华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510641

摘要 蜿蜒步态控制是特种仿生蛇形机器人的基础运动控制之一。针对蜿蜒运动中蛇形机器人进行跟踪存在目标丢失、头部晃动及方向不稳定的问题,结合滑模变结构控制和 Canny 多级边缘检测算法,提出了一种智能蜿蜒运动控制方法。首先,基于滑模控制理论设计了直线跟踪控制器;其次,提出一种新的蜿蜒步态控制函数,解决了蛇形机器人的头部晃动问题;最后,结合 Canny 算法、直线跟踪控制器和蜿蜒步态控制函数,建立蛇形机器人完整的控制回路,实现机器人的定向控制。实验结果表明,所提出的智能蜿蜒步态控制方法相对于传统的蜿蜒运动更具稳定性和鲁棒性。

关键词:滑模变结构控制;蜿蜒运动;Canny 算法;步态控制

中图分类号 TP242.6

Intelligent Winding Motion Control Method Based on Bionic Snake-like Robot

DU Hongjian¹, GUO Peng¹, XIAO Wenyu² and YIN Jun²

¹ Guangdong Beijiang Channel Affairs Center, Qingyuan, Guangdong 511518, China

² School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract Winding gait control is one of the basic motion control of special bionic snake-like robots. The tracking of snake-like robots in winding motion has the problems of target loss, head shaking and unstable direction. Combining sliding mode variable structure control and the Canny multi-level edge detection algorithm, this paper proposes an intelligent winding motion control method. First, a linear tracking controller is designed based on sliding mode control theory. Second, a new winding gait control function is proposed to solve the problem of head shaking of the snake-like robot. Finally, combined with the Canny algorithm, linear tracking controller and the winding gait control function, a complete control loop of the snake-shaped robot is established to realize the directional control of the robot. Experimental results show that the proposed intelligent winding gait control method is more stable and robust than the traditional winding motion.

Keywords Sliding mode variable structure control, Winding motion, Canny algorithm, Gait control

在最近几年,由于硬件设备的快速发展和软件算法的持续进步,智能机器人作为常见的智能化设备渐渐在人们的日常生活中广泛应用。仿生物机器人是智能机器人中的一大类。以生物界中的蛇为例,自然界中的生物蛇多数具备修长敏捷的身体结构以及遍布全身的鳞片,其运动灵敏、稳定性好,有着强大的适应能力,可以在多种复杂的环境中运动^[1]。因此许多国内研究人员以生物蛇的运动原理和身体结构为参照,希望制造出具有相同运动能力的蛇形机器人。目前,国内外在蛇形机器人的蛇身结构设计、运动学和动力学建模、控制方法等领域均取得了卓越成果^[2]。

在蛇形机器人概念被提出的 70 余年间,许多研究人员在蛇形机器人领域均做出了不小的贡献。Pettersen 等利用多种连接方式实现了不同机械结构的蛇形机器人;Komura 团队基于各种基础理论方法,分别建立了蛇形机器人的运动学与动力学模型^[3];而 Transeth 等利用简单或复杂的控制框架与控制函数实现了机器人的多种运动步态^[4];还有些学者通过结合现有的人工智能等先进技术将蛇形机器人投入到实际的场景中应用。总体看来,蛇形机器人在基础运动步态控制的理论和实际研究方面已经具备了坚实的基础。本文在现有研究的基础上,针对蜿蜒运动中机器人进行跟踪发送目标

丢失、头部晃动及方向不稳定的问题,结合滑模变结构控制和 Canny 算法,提出了一种新的蜿蜒运动控制方法。

1 蜿蜒步态

1.1 蜿蜒步态研究现状

蛇形机器人常常以固定规律改变偏航关节的角度摆动连杆来模仿生物蛇的蜿蜒运动,其中前进的推力由机器人与地面之间产生的各向异性的摩擦力来提供^[8]。对于以上的运动方式,当蛇形机器人进行蜿蜒运动时,其与连杆在法向的摩擦力应该大于与连杆在切向的摩擦力,即存在侧滑约束。因此针对蛇形机器人的力学研究往往分为两种^[9],一种存在无侧滑约束的蛇形机器人,另一类为无侧滑约束的蛇形机器人。例如,在光滑的平面上如果不存在其他的限制,蛇形机器人多数不存在侧滑约束。而当在进行侧滑约束的研究时,在连杆下方添加从动轮^[10]是目前的主要方法。

当前主要的蛇形机器人步态生成方法有骨干曲线法^[5]、基于中枢神经发生器的步态生成法^[6]以及控制函数法^[7]。其中控制函数法来源于 Hirose 团队提出的蛇形曲线,该团队通过对蛇形曲线的拟合简化得到了机器人在蜿蜒运动时的正弦波控制函数。当机器人的关节角度按正弦波变化时,机器人

整体能按照蛇形曲线蜿蜒前进。随后,控制函数法也被应用到其他基础步态,慢慢成为了主流的蛇形机器人步态生成方法。

由于蛇形机器人运动时按照蛇形曲线蜿蜒前进的特点,机器人跟踪目标或者识别目标任务的时候,往往头部关节的晃动幅度过大,从而会使得头部相机视野中的目标丢失。于是,为了完成蛇形机器人的定向运动,保证头部的稳定是重点研究的方向。2016年,来自新西兰的研究者Jin和Au提出了一种头部固定的方法。他们对机器人头部关节的控制函数进行了重新设计,采用分段控制,即通过添加补偿函数的方式使机器人头部在运动过程中始终朝向同一方向。但是,在使用这种方法时,补偿函数中参数的确定过程较为复杂,而且整体与蛇头之间的连接不流畅,必须对蛇头的舵机单独进行函数控制。

在蛇形机器人蜿蜒步态控制器设计领域,也有许多成果。2017年,来自日本的学者Ryo Ariizumi设计了头部位置控制器^[12],并将其应用于无侧滑约束的蛇形机器人的头部轨迹导航控制。他们分析了各向同性摩擦力下的机器人的运动情况,并且认为在奇异状态下的机器人具备可操作性,是进行控制的关键。不过,文章缺乏对各异性摩擦力下机器人的分析讨论。

1.2 蜿蜒步态

1.2.1 蛇形机器人简化结构

本文蛇形机器人采用模块化结构,各关节模块相互独立,采用正交连接的方式串联而成。首先,对于具备 $2n$ 个关节的正交连接蛇形机器人,由于蜿蜒运动不涉及俯仰关节的控制,因此可以进一步简化为具备 $n+1$ 个连杆和 n 个关节的机器人模型。图1和图2分别给出蛇形机器人仿真模型以及简化结构。



图1 蛇形机器人仿真模型

Fig. 1 Snake-like robot simulation model

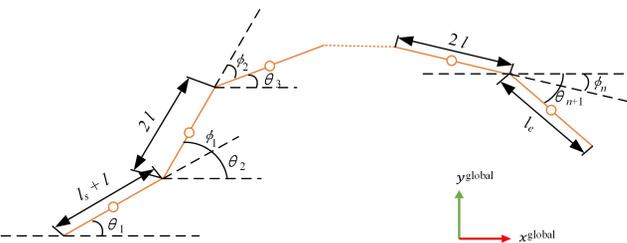


图2 蛇形机器人简化结构

Fig. 2 Snake-like robot simplified structure

针对机器人的简化结构图,给出机器人的相关参数定义。

(1) 连杆角 θ_i

蛇形机器人连杆角 θ_i 定义为连杆 i 与全局 x 轴之间的角度,且逆时针为正。

(2) 关节角 ϕ_i

蛇形机器人关节角 ϕ_i 定义为连杆 i 减去连杆 $i+1$ 连杆角差值。

1.2.2 蜿蜒步态控制函数

蜿蜒步态作为蛇形机器人最常见的二维步态,通常适用于平坦地面的运动,且在运动过程中,机器人整体呈波形曲线

状态。蜿蜒步态的控制函数最早来自对蛇形曲线的拟合^[11]。假设蛇形曲线如图3所示,其曲率方程如下:

$$\rho = -ab \sin(bs) \quad (1)$$

其中, s 表示蛇形曲线波形上任意点与波形起始点之间的弧长;参数 a 与参数 b 均为常数,两者共同影响蛇形曲线的幅值,并且参数 a 是曲线起始的幅值角,参数 b 还决定蛇形曲线在单位长度内包含的正弦波个数和波形运动方向。

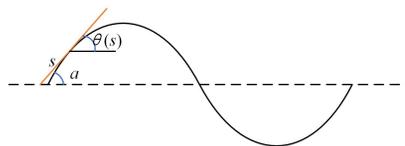


图3 蛇形曲线

Fig. 3 Serpentine curve

根据曲率定义,将式(1)的左右同时对弧长 s 积分,则可以得到曲线上某位置处的绝对转角公式:

$$\theta(s) = a \cdot \cos(bs) \quad (2)$$

根据上式可得到机器人两连杆之间的相对转动角度为:

$$\phi = -2a \cdot \sin(bl) \cdot \sin(bs) \quad (3)$$

其中, $2l$ 表示机器人单个连杆的长度。将上述公式改进为各个关节角关于时间的函数:

$$\begin{cases} \phi_n(t) = A \cdot \sin(\omega t + (n-1)k) \\ A = -2a \cdot \sin(bl), \omega t = bs, k = 2bl \end{cases} \quad (4)$$

式(4)则为机器人的蜿蜒运动步态控制函数。因蜿蜒运动存在于二维平面中,在运动过程中,所有俯仰关节都能够保持为零,只需设定偏航关节的关节角度。对于本文所建立的机器人模型,将关节从1开始编号,其中偶数为偏航关节,奇数为俯仰关节,则机器人蜿蜒步态的控制函数如下式:

$$\phi_n(t) = \begin{cases} A \sin(\omega t + kn) + \varepsilon, & n \text{ 奇数} \\ 0, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\phi_n(t)$ 表示第 n 个关节在 t 时刻的期望角度;而 ω 与电机的频率相关,常设为定值;其余参数 A, k 和 ε 则称为步态控制参数,取值均会影响机器人的整体形态。

2 蜿蜒步态智能控制方法

2.1 直线路径跟踪控制器设计

通常,在平坦的地面中,蛇形机器人采用蜿蜒步态。此时机器人整体呈波形曲线状态在二维平面上运动。由于蛇形机器人工作环境复杂,通常需穿越带有障碍物的复杂场地,且其在蜿蜒运动时的速度缓慢,因此对采用蜿蜒步态运动的机器人进行速度控制并不是重点。在机器人的路径跟踪过程中,通常着重研究机器人的方向控制,随后只要以非零的前进速度进行路径跟踪^[13]即可。

本小节将依据蛇形机器人的蜿蜒运动性质,采用滑模控制理论对蛇形机器人进行直线路径跟踪的控制器设计。

(1) 方向控制目标和系统模型

方向控制的要求是机器人在路径跟踪控制器的作用下,无论其初始时刻处于何种姿态下,其经过有限的时间后都能够沿着全局坐标系的 x 轴正方向前进。

设定蛇形机器人的质心全局位置坐标为 (p_x, p_y) ,前进的方向角为 $\bar{\theta}$ 。故本控制器的控制目标即为 p_y 和 $\bar{\theta}$,使得它们最终收敛于 $p_y=0, \bar{\theta}=0$ 的极限环。

为将 $\bar{\theta}_{ref}$ 与 p_y 联系起来,通常采取在船舶的路径跟踪控制

中广泛应用的视线角控制率法^[14]。为使得机器人朝着理想的直线路径(全局坐标系 X 轴方向)方向前进,根据视线角控制率法定义参考方向角:

$$\bar{\theta}_{\text{ref}} = -\arctan(p_y/\Delta) \quad (6)$$

其中, p_y 表示路径误差; Δ 为一个大于 0 的设计参数,其决定机器人运动至期望路径的速度,通常设置为机器人总长度的两倍以上。

根据式(6)可给出机器人运动过程中的误差函数:

$$e = \bar{\theta}_{\text{ref}} - \bar{\theta}_T \quad (7)$$

其中, $\bar{\theta}_T$ 表示 $\bar{\theta}$ 在一个运动周期内的算术平均值。

由于转弯角和控制参数 ΔA 之间存在定量关系,因此对平均方向角 $\bar{\theta}_T$ 以及幅值调整因子 ΔA 的关系可进行简单推测,其具备以下关系:

$$\Delta A = b \dot{\bar{\theta}}_T = u(t) \quad (8)$$

(2) 滑模控制器设计

根据滑模控制器设计的基本步骤,首先选取切换函数为:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (9)$$

其中, $c > 0$, 跟踪误差为 $e = \bar{\theta}_{\text{ref}} - \bar{\theta}_T$, $\dot{e} = \dot{\bar{\theta}}_{\text{ref}} - \dot{\bar{\theta}}_T$, $\bar{\theta}_{\text{ref}}$ 为理想参考方向角信号。

选择幂次趋近律为系统的趋近律:

$$\dot{s} = -k |s|^\alpha \text{sgn}(s), k > 0, 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

其中,参数 k 和 α 均由多次实验得来。

结合切换函数以及趋近律,可以求得蛇形机器人方向控制器的控制率为:

$$\Delta A(t) = \frac{b}{c} \ddot{e}(t) + b \dot{\bar{\theta}}_{\text{ref}}(t) + \frac{b}{c} * k * |s(t)|^\alpha \text{sgn}(s(t)) \quad (11)$$

(3) 控制器稳定性分析

取李雅普诺夫函数 $V = s^2/2$, 则 $V \geq 0$ 。且可得:

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (12)$$

结合式(10)可以得到:

$$\dot{V} = -k |s|^{a+1} \quad (13)$$

显然 $\dot{V} \leq 0$, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$, 并当且仅当 $e = 0$, $\dot{e} = 0$ 时, $s = 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性判据,可知 \dot{V} 半负定而 V 半正定,故设计的控制器稳定。

2.2 头部固定方法研究

将蜿蜒步态下的蛇形机器人与传统的目标识别算法结合的难点之一,在于怎么获得有效并且稳定的图像数据。Johanna 等提出了一种针对蛇形机器人拍摄视频的数字图像稳定算法^[15]。该方法通过对采集的图像进行帧间补偿和运动估计,使获取图像稳定且连贯。但受限于机器人控制函数和基础图像,经过处理后的视频信息依然存在视野范围大、目标物难以识别与定位等问题。Au 则提出了另一种稳定图像数据的新思路。他们从机器人本身入手,通过在机器人的头部控制加入补偿函数的方法来调整机器人头部与身体关节之间的相对角度,使得相机的视野稳定。但是采用该方法获取蛇头补偿函数的最佳优化参数的过程比较复杂,而且对单个蛇头关节补偿会破坏机器人整体的连贯性。

同样,本文参考 Au^[16]的思路,为解决蛇形机器人蜿蜒运动中因头部的晃动导致图像数据难以获取的问题,针对正交连接的蛇形机器人,提出一种新的蜿蜒步态控制函数,实现蛇形机器人的头部固定,以此来获得相对稳定且有效的图像信息。

2.2.1 步态控制函数设计

传统的步态控制函数如式(5)所示,对于偏航关节,控制参数 A 影响了蛇形机器人的整体姿态, A 值越大,则整体的振动幅度越大,反之亦然。当 $A = 0$ 时,机器人整体呈一条直线,不进行摆动。

对于蛇形机器人蜿蜒运动特性,为了使得其在运动过程中能够稳定地识别目标并且能够确定目标位置,应该控制蛇头的摆动角度尽可能小,而蛇体中后部的摆动幅度需要尽可能大,以此来给机器人提供前进的动力。为此,引入 Sigmoid 函数^[17]对偏航关节进行解耦处理,使机器人的头部摆动角度稳定在 0 附近,中后部关节的摆动幅度逐渐增加,而在某个关节之后的摆动幅度稳定为定值。

传统的 Sigmoid 函数表达式如下:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (14)$$

为了使 Sigmoid 曲线在上升阶段的斜率以及幅值改变的关节数目可控,对式(14)改进如下:

$$S(i) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(n-\beta)}} \quad (15)$$

其中,参数 α 控制曲线上升阶段的速率, β 为期望限幅的关节数目, n 为当前关节编号。

结合式(5)与式(15),可以得到头部固定式蜿蜒运动步态的偏航关节控制函数如下:

$$\phi_n(t) = \frac{A \cdot \sin(\omega \cdot t + k \cdot n)}{1 + e^{-\alpha(n-\beta)}} + \epsilon, n = 1, 3, 5, 7, \dots; k \neq \pi/2 \quad (16)$$

因为蛇形机器人在进行蜿蜒运动时,其前进的动力源自于各个偏航关节摆动所产生的各向异性的摩擦力,而在引入新的偏航关节控制公式之后,头部的连杆摆动幅度变小,会导致前进的动力变小,因此应当调整新增的控制参数 β 以在保证前进速度的同时达到头部固定的效果。

2.2.2 步态控制参数仿真分析

由于在头部固定蜿蜒运动步态控制函数中,对于偏航环节新增了控制参数,因此需要对其进一步分析。本文利用 Matlab 对步态控制函数中的参数 α 和 β 进行分析。

首先保证控制参数 β 不变,对新增的控制参数 α 进行分析。选择传统的控制参数分别为 $A = 1.0$, $k = 1.0$, $\epsilon = 0$, 而控制参数 α 选为 0.1 和 0.5, 仿真结果如图 4 所示。

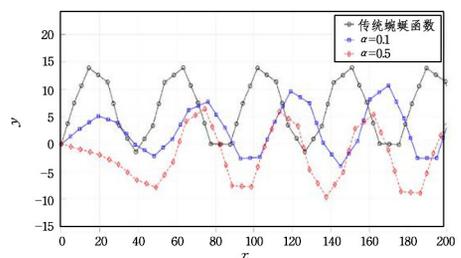


图 4 控制参数 α 对蛇形机器人的影响

Fig. 4 Influence of control parameter α on snake robot

分析图 4 可知,本文所设计的步态控制函数确实有固定机器人头部的作用,而且当控制参数 β 不变时,控制参数 α 越大,头部与后续的机体之间的过渡更为平滑,头部前端更趋近于一条直线,同时机器人的后半段恢复到正常摆动幅值时的关节数也越多。不过由于机器人是依靠连杆摆动提供的动力来实现前进运动的,因此在实际的应用中,控制参数 α 不宜过大。

其次,对控制参数 β 进行仿真实验,机器人的传统控制参数同上述实验,参数 $\alpha=0.5, \beta$ 依次选取为 5 和 10,获得的实验结果如图 5 所示。

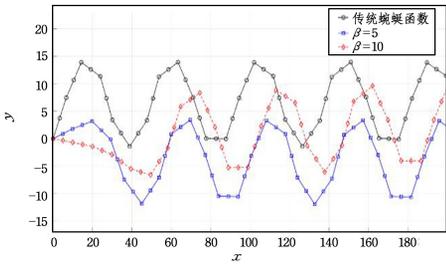


图 5 控制参数 β 对蛇形机器人的影响

Fig. 5 Influence of control parameter β on snake robot

由上述的实验结果可知,前端固定关节的个数由控制参数 β 决定,当控制参数 β 越小时,前端保持直线运动的关节数越少,反之则头部固定的关节数越多。在实际应用中,对控制参数 β 的选取应该结合实际关节个数,在保证机器人前进动力足够的情况下,保证蛇头稳定。

2.3 蜿蜒步态设计与仿真

在对蛇形机器人的蜿蜒运动进行步态控制函数改进以及方向控制器设计之后,可以结合成熟的目标定位算法实现蛇形机器人的定向运动。

首先,通过蛇头搭载的深度相机来获得机器人运动环境的图像数据,采取头部固定式的蜿蜒步态前进运动。而后利用 Canny 边缘检测算法^[18]对目标进行边缘提取,以此来计算机器人头部相机与跟踪目标质心坐标系之间的位置转换关系。根据机器人安装在各个关节处的角度传感器反馈的数据^[19],可以获得任意时刻机器人上任意点相对于基座坐标系(蛇头)的转换矩阵,配合蛇头的 GPS 定位数据,可获取整个机器人上任意位置相对于世界坐标系的位姿数据。最后,滑模控制器会根据期望角度对机器人进行方向控制,完成蛇形机器人基于目标定位算法的定向运动控制。

基于目标定位算法的蛇形机器人头部固定式的智能蜿蜒运动控制原理框图如图 6 所示。

其中针对方向控制器(滑模控制器),更为具体的控制框图如图 7 所示。

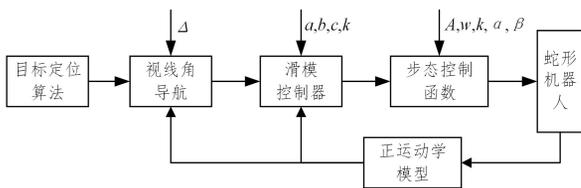


图 6 蜿蜒运动控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of meandering motion control

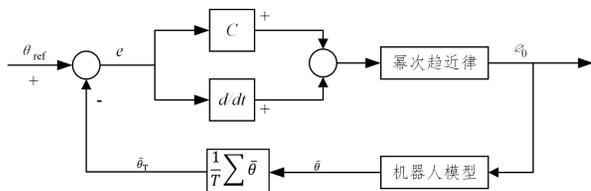


图 7 蜿蜒运动控制原理图

Fig. 7 Schematic diagram of meandering motion control

为验证上述控制器以及框图的正确性,利用 Matlab 与 CoppeliaSim 平台对建立的机器人进行仿真分析。由于机器人

在仿真平台中初始时刻各个关节均为零值,因此通常保持一条直线。

选取步态控制参数为 $A=40^\circ, k=60^\circ, \omega=70^\circ/s$,新增控制参数 $\alpha=1, \beta=3$ 以及控制周期 $T=0.05s$,并设定最初时刻机器人质心坐标为 $(0, -5m)$,方向角为 $\theta=45^\circ$,滑模控制器中控制参数 $\alpha=0.5, c=1500, k=120$ 。同时根据多次测试获得 $b=0.8$,设置 $\Delta=3m$,为 3 个蛇形机器人的长度。最终进行运动仿真的结果如图 8—图 11 所示。

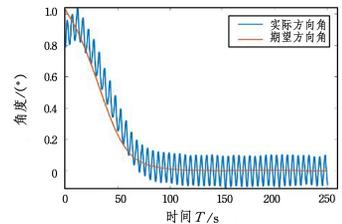


图 8 期望方向角曲线与实际方向角曲线

Fig. 8 Expected steering angle curve and actual steering angle curve

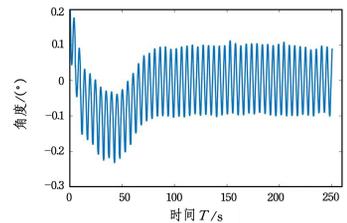


图 9 机器人方向角误差曲线

Fig. 9 Robot direction angle error curve

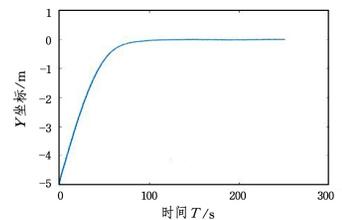


图 10 机器人质心 Y 轴坐标

Fig. 10 Robot centroid Y-axis coordinate

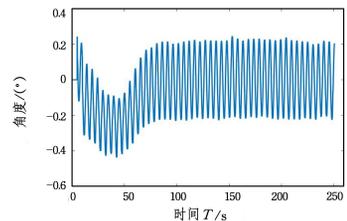


图 11 控制率 ΔA

Fig. 11 Control rate ΔA

可以看出,在 80 s 时蛇形机器人稳定在了 X 轴上,而且方向角也在零值左右跳动。由定义可知方向角是所有连杆角的平均值,而关节角和连杆角是线性关系,关节角则呈现为正弦波形。因此,当最后理想的方向角是 0 时,机器人的方向角将在 0 左右波动。实验结果也验证了该理论。

同时为研究基于滑模理论的方向控制器的准确性,将其与传统的 PI 控制进行对比,当机器人在稳定过后(100 s 以后),计算每 20 s 内的机器人质心的 Y 坐标和理想值之间的误差。将 PI 控制器的参数设置为 $K_P=1.2, K_I=0.2$,最后两种控制方法的误差结果如表 1 所列。

表1 两种控制方法的误差对比

Table 1 Error comparison of two control methods

(单位:s)		
时间	滑模控制误差	PI控制误差
100~120	-0.8396	2.4238
120~140	0.4522	-4.0522
140~160	-0.2761	-2.8910

随后,将头部固定式的机器人头部视角与传统的机器人头部视角进行对比实验。在机器人前方摆放有3个相互间隔0.8m的立方体,其长和宽均为0.3m,高为1m。传统蜿蜒步态控制参数为 $A=40^\circ$, $k=60^\circ$, $\omega=60(^{\circ}/s)$, $\epsilon=0$,传统步态的运动截图与相机视角截图如图12所示,而控制参数为 $\alpha=0.1$, $\beta=3$ 的头部固定蜿蜒运动截图与相机视角截图如图13所示。

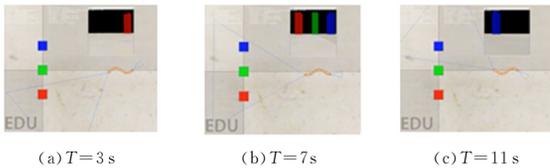


图12 传统蜿蜒运动

Fig. 12 Traditional meandering motion

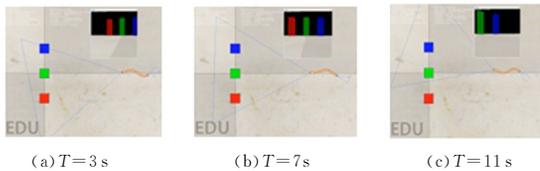


图13 头部固定式蜿蜒运动

Fig. 13 Head-fixed zigzag motion

由上述仿真结果可见,设计的头部固定蜿蜒运动视角相对于传统蜿蜒运动更加稳定,在运动过程中相机视野中的目标不会发生丢失。

结束语 本文主要在蛇形机器人的现有理论基础开展先进步态的研究工作。主要思想是立足于基础的运动步态,结合当前其他领域的成熟技术,对其运动步态进行了改进。针对蛇形机器人的蜿蜒步态,设计了基于滑模变结构控制理论的直线路径跟踪控制器,随后提出一种新的步态控制函数解决了蜿蜒运动中蛇头固定的问题,结合以上两点及多级边缘检测算法,完成蛇形机器人在蜿蜒步态下运动的定向运动控制。最后利用仿真实验对比分析验证了所提出方法的稳定性和鲁棒性。

参考文献

- [1] ZHANG L X, YAO J W, DENG B W. A review of bionic robots [J]. Shanxi Electronic Technology, 2013(3): 94-96.
- [2] LILJEBÄCK P, PETTERSEN K, STAVDAHL Ø, et al. A review on modelling, implementation, and control of snake robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 60(1).
- [3] KOMURA H, YAMADA H, HIROSE S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel [J]. Advanced Robotics, 2015, 29(17): 1081-1094.
- [4] JIANG L. Research on Gait Tracking Method of Snake Robot for Bridge Detection Based on Video Sequence [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] OHASHI T, YAMADA H, HIROSE S. Loop forming snake-like

robot ACM-R7 and its Serpenoid Oval control [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2010.

- [6] HIROSE S. Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators [M]. Oxford University Press, 1993: 220.
- [7] LU Z L, MA S G, LI B, et al. 3D Motion of Snake Robot Based on Cyclic Suppression CPG Model Control [J]. Acta Automatica Sinica, 2007.
- [8] TRANSETH A A, LEINE R I, GLOCKER C, et al. 3-D Snake Robot Motion: Nonsmooth Modeling, Simulations, and Experiments [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 361-376.
- [9] KE X X, XIN J Z, YANG Y. Research Status of Movement and Connection Mode of Snake Robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015(4): 192-196.
- [10] MENG L S, WU S, WANG Y J, et al. Research on Traveling Wave Motion and Dynamics of a Snake-like Peristaltic Robot [J]. Machinery & Electronics, 2017, 303(12): 68-71.
- [11] LILJEBÄCK P. Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control [M]. Springer, 2013.
- [12] ARIIZUMI R, TANAKA M. Manipulability analysis of a snake robot without lateral constraint for head position control [J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(6): 2282-2300.
- [13] LI H Y. Path Planning Strategy Research of Coal Mine Snake Search Robot [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [14] JIANG Y, SUN C Z, WANG K. Research on Guidance Technology of Carrier-borne UAV Collision Net Recovery Based on Line of Sight Angle [C] // Navigation and Control Academic Conference. 2014.
- [15] FLOREZ J, CALDERON F, PARRA C. Video stabilization taken with a snake robot [C] // Image, Signal Processing, & Artificial Vision. IEEE, 2013.
- [16] AU C K, JIN P. Investigation of serpentine gait of a snake robot with a wireless camera [C] // 2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2016: 1-6.
- [17] SHAO X L, WANG H L. Nonlinear Tracking Differentiator Based on Improved sigmoid Function [J]. Control Theory and Applications, 2014, 31(8): 1116-1122.
- [18] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [19] NI C. Introduction to Robotics: Analysis, Control and Application (2nd Edition) [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [20] LE B, ZENG X B. Research on Remote Control Method of V-REP Robot Simulation [J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(9): 41-43.



DU Hongjian, born in 1990, mechanical engineer. His main research interest is intelligent manufacturing.