



基于路径边沿引导策略的蛇形机器人路径跟踪方法

张丹凤

(辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 为了控制蛇形机器人在路径边沿的引导下沿着期望路径运动, 在基于角度对称性调节的方向控制方法的基础上, 提出路径边沿引导策略. 随着蛇形机器人的运动, 路径的 2 个边沿交替作为有效边沿. 利用传感器检测有效边沿, 根据有效边沿获得临时目标点. 临时目标点随着机器人的运动沿有效边沿不断更新. 不断更新的临时目标点确定了路径的延伸方向. 将临时目标点引入方向控制参数, 从而使机器人根据路径边沿调节运动方向. 仿真显示蛇形机器人能够在摩擦系数未知的地面上根据路径边沿调整运动方向. 仿真结果验证该方法不仅能实现蛇形机器人跟踪期望路径, 而且能实现蛇形机器人跟踪期望路径的中心线.

关键词: 蛇形机器人; 蜿蜒运动; 期望路径; 路径跟踪; 边沿引导

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2021)-01-0036-08

A Path Tracking Method for the Snake Robot Based on the Path Edge Guidance Strategy

ZHANG Danfeng

(School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: In order to steer the snake robot along the desired path guided by path edges, a path edge based guidance strategy is proposed by applying a direction control method based on the angle symmetry adjustment. The effective edge is constantly exchanged between two path edges as the snake robot moves. The effective edge is detected by a sensor, and is utilized to obtain the temporary target point, which is updated along the effective edge as the robot moves. The path direction is determined by the constantly updated temporary target point. So the snake robot can adjust the locomotion direction according to path edges by introducing the temporary target point into the direction control parameter. Simulations show that the snake robot can adjust the locomotion direction on the ground with unknown friction coefficients according to the path edge. It is verified that the snake robot can not only follow the desired path, but also follow the centerline of desired path.

Keywords: snake robot; creeping; desired path; path tracking; edge guidance

1 引言 (Introduction)

蛇形机器人是一种多模块串联的机器人. 可以应用在厂区勘察等任务中. 实现该类应用需要解决的首要问题是控制蛇形机器人跟踪期望路径.

本研究面向的路径是宽度大于蛇形机器人摆动所需宽度、边沿具有一定高度的平面直线路径. 蛇形机器人具有多种步态形式, 如: 1) 适用于 3 维空间的 3 维运动步态^[1]. 2) 适用于平面和坡面的侧向运动和滚动步态^[2-3], 这两种步态是通过分别规划奇/偶关节角度产生的, 同时调节各个关节的参数可实现方向控制. 3) 适用于平面环境的蜿蜒步态, 各关节采用同一角度函数即可产生有效的蜿蜒步态, 因此文 [4] 提出控制身体关节动态跟随头部关

节产生蜿蜒步态, 设置头部方向参数即可调节运动方向, 与侧向蜿蜒和滚动相比更便于控制方向, 因此本研究采用的步态形式是蜿蜒步态.

现有蛇形机器人路径跟踪研究如下: 文 [5] 建立了蛇形机器人简单模型, 文 [6-7] 在该模型基础上提出视线 (line-of-sight, LOS) 引导策略, 通过调节关节偏移量控制蛇形机器人运动的方向角, 实现机器人直线路径跟踪任务. 文 [8] 基于蛇形机器人简化模型和采用 LOS 引导策略, 不仅设计了蛇形机器人直线路径跟踪器, 还实现了对蛇形机器人身体形态、运动速度的控制. 文 [9] 在该理论基础上控制蛇形机器人在恒定无旋洋流中跟踪期望的直线路径. 文 [10] 结合正弦步态模式和方向控制器, 设计了水下蛇形机器人的直线路径跟踪控制器. 文

[11] 利用摄像机实时测量蛇形机器人的位置, 计算期望角度, 将此角度作为关节控制参数, 控制机器人沿着期望的直线路径和圆形路径运动. 文 [12] 通过控制各方向的速度分量, 使蛇形机器人跟踪圆形路径. 文 [13] 建立了一个代价函数, 代价函数是关于期望路径和头部轨迹的函数, 机器人运动方向的不断调整使得该函数趋于 0, 最终实现任务跟踪. 文 [14] 提出了基于神经网络辨识器的路径跟踪算法, 控制蛇形机器人跟随期望的直线路径.

上述方法中期望路径是以一条忽略路径宽度的直线或曲线的形式给出的. 控制蛇形机器人跟踪期望路径就是控制机器人围绕着该直线或曲线左右摆动. 该直线或曲线可以是代表路径方向的、位于两边沿中间且与路径边沿有一定距离的线, 如路径中心线. 而实际路径都是具有一定宽度的, 因此现有方法在进行路径跟踪时首先要获得该忽略宽度的线. 但在实际应用中获得该直线或曲线的难度较大, 原因如下: 1) 该直线或曲线是规划出来的, 在实际应用中无法直接被检测; 2) 蛇形机器人蜿蜒运动时, 各个模块的运动轨迹是 S 形的, 利用自带传感器获得完整路径信息存在困难, 进而导致通过实时路径检测计算该直线或曲线存在困难.

为了解决上述问题, 本文直接利用检测到的路径信息作为期望路径的方向信息引导机器人的运动方向. 实际上, 路径的 2 个边沿约束着蛇形机器人的运动空间, 2 个边沿的延伸方向代表着路径的方向. 同时, 蛇形机器人在 S 形摆动过程中, 利用安装在头部连杆上的距离传感器可交替检测到 2 个路径边沿. 因此, 本文直接利用检测到的路径边沿信息作为路径的方向信息. 本文的控制目标 1: 蛇形机器人根据实时检测的路径边沿信息调整运动方向、跟踪期望路径.

文 [15] 采用了蛇形机器人头部传感器检测路径信息, 根据检测到的障碍物的边界点构建一个势函数, 辅助机器人头部避开障碍, 同时控制后边的各关节跟踪头部的运动轨迹完成避障. 在此基础上, 文 [16] 在机器人各关节处采用人工势场方法来控制其运动方向, 从而实现机器人在流场中有效避障. 在直线路径跟踪过程中, 不仅仅要控制蛇形机器人躲避路径边沿、避免发生碰撞, 还需考虑运动效率, 在路径边沿的引导下控制机器人沿着路径上的一条直线运动, 避免轨迹中心线出现折线或曲线形状. 当路径宽度大于机器人摆动所需宽度时, 将期望路径中心线作为蛇形机器人轨迹中心线, 可为蛇形机器人对称的蜿蜒运动提供最大的摆动空间. 基

于上述分析, 提出本文的控制目标 2: 蛇形机器人运动轨迹中心线与路径中心线一致.

为了实现上述目标, 在基于角度对称性调节的方向控制方法的基础上, 提出基于路径边沿引导策略的蛇形机器人路径跟踪方法. 该方法的核心思想如下: 首先, 采用基于角度对称性调节的方向控制方法^[17], 该方法利用目标点引导蛇形机器人在摩擦系数未知的平面上向着目标点方向运动; 其次, 提出边沿引导策略, 同一时刻在 2 个路径边沿中选取一个作为有效边沿, 在有效边沿上获取目标点, 在方向控制方法的作用下, 目标点引导机器人的运动方向. 随着机器人运动, 目标点沿着有效边沿不断更新, 控制蛇形机器人沿着期望路径延伸方向运动. 随着蛇形机器人运动, 有效边沿在 2 个路径边沿间不断交换, 目标点也随着有效边沿的交替在 2 个边沿上更新, 使蛇形机器人运动轨迹中心线与路径中心线一致.

2 运动方向分析 (Analysis of locomotion direction)

蛇形机器人有 n 个模块, 每个模块的长度为 l , 机器人总长度 $L = nl$. 蛇形机器人头部模块与地面间无被动轮, 其余模块通过被动轮与地面接触. 蛇形机器人的位姿定义为 $\Psi_0 = (x_0, y_0, \theta_0, q_1, \dots, q_{n-1})$, 其中, (x_0, y_0) 为头部的质心坐标, θ_0 为头部与 x 轴的夹角. q_j ($j = 1, \dots, n-1$) 为相邻两模块间的夹角. 蛇形机器人的简化模型如图 1 所示.

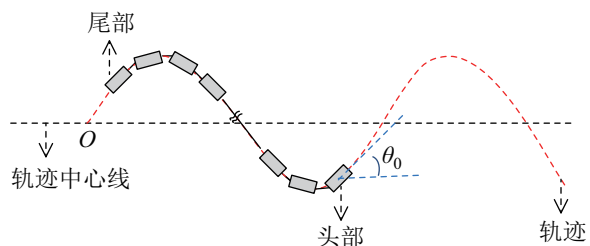


图 1 蛇形机器人简化模型
Fig.1 Simplified model of the snake robot

关节角度按一定规律变化使蛇形机器人产生蜿蜒运动. 根据文 [18] 可知, 蛇形机器人无侧滑蜿蜒运动轨迹的曲率函数为

$$\kappa(s) = -\frac{2K_n\pi A}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s\right) \quad (1)$$

式中 K_n 是身体曲线含有 S 形的个数, A 是关节角度幅值参数, s 是曲线上任意一点距 O 点的弧长. O 点是运动轨迹曲率为 0 的点.

运动方向的改变量用一个周期内头部模块转动的角度值 φ 来衡量.

$$\varphi = \int_0^{\frac{L}{2K_n}} -\frac{2K_n\pi A(s)}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s\right) ds \quad (2)$$

根据式 (2) 得:

$$\varphi = \int_0^{\frac{L}{2K_n}} \frac{2K_n\pi \left(-A(s) + A\left(s + \frac{L}{2K_n}\right) \right)}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s\right) ds \quad (3)$$

式中, $L/(2K_n)$ 是头部模块经过半个周期 $T/2$ (T 是蛇形机器人的关节摆动周期) 运动的曲线路径长度. $A(s) = A(s + L/(2K_n))$, 写成时间函数 $A(t) = A(t + T/2)$, 称 A 呈对称变化, 此时 $\varphi = 0$, 即机器人运动方向不改变; $A(s) \neq A(s + L/(2K_n))$, 称 A 呈不对称变化, 此时蛇形机器人运动方向可能发生改变, 方向改变量与 A 的不对称程度有关.

综上所述, 蛇形机器人关节角度的对称性影响其运动方向. 当关节角度依据期望路径调节其对称程度时, 蛇形机器人根据期望路径调节运动方向, 从而跟踪期望路径.

3 方向控制方法 (Direction control method)

方向调节是路径跟踪的基础. 为了便于进行方向控制, 采用头部引导运动方向、身体关节动态跟随头部关节的方式, 具体方向控制方法如下:

头部力矩:

$$\tau_1 = K_1 \left| \int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt + (E_{\text{ref}} - E) \right| \left[\ddot{q}_d + k_d (\dot{q}_d - \dot{q}_0) + k_p (q_d - q_0) + \delta \right] \quad (4)$$

身体力矩:

$$\tau_j = K_j \int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt \cdot (q_{j-1} - q_j) \quad (5)$$

式中, $j = 2, \dots, n-1$, δ 为补偿力矩, k_d 和 k_p 为头部关节力矩控制参数; $\mathbf{K} = [K_1, K_2, \dots, K_{n-1}]$ 为系数向量; E_{ref} 和 E 分别是蛇形机器人的期望运动动能和实际运动动能^[17], $\int_0^t (E_{\text{ref}} - E) dt$ 调节力矩幅值, 使蛇形机器人在运动过程中产生一定的角速度和线速度; q_d 是关于时间的正弦函数, $\ddot{q}_d$ 用于诱导头部关节持续摆动; 在 $q_{j-1} - q_j$ 的作用下, 第 j 个关节跟随第 $j-1$ 个关节转动, 头部的持续摆动和身体关节的动态跟随使整个身体呈现动态 S 形, 在摆动过程中机器人与地面产生的交互作用力推动机器人前进, 形成蜿蜒步态.

当 $\delta = 0$ 时, 力矩中没有路径方向信息, 蛇形机器人运动方向不受路径方向影响. 当 $\delta = (e^{c-a} - 1)q_d$ (c 是补偿参数, a 是方向控制参数) 时, 蛇形机器人运动方向与方向控制参数 a 有关, 具体关系如下: 1) 当 a 呈不对称变化时, τ_1 呈不对称变化, 产生的头部关节角度也是不对称的. 在 $q_{j-1} - q_j$ 的作用下, 身体关节按次序跟随头部关节摆动, 因此身体关节也是不对称变化的. 由于不对称的关节角度可能改变蛇形机器人的运动方向, 因此蛇形机器人运动方向可能发生改变. 2) 当 a 呈对称变化时, 产生的头部关节角度随时间是对称变化的. 身体关节在 $q_{j-1} - q_j$ 的作用下跟随头部关节摆动, 因此身体关节角度随时间也是对称变化的. 由于对称的关节角度不改变机器人的运动方向, 因此机器人的运动方向不发生改变.

4 路径边沿引导策略 (Guidance strategy based on the path edge)

蛇形机器人蜿蜒运动的特点: 蛇形机器人在蜿蜒运动过程中, 各个连杆的运动轨迹呈 S 形. 且受环境影响, 机器人在运动过程中可能发生侧滑, 因此蛇形机器人到达期望路径的位置无法被准确预测.

期望路径的特点: 期望路径的 2 个边沿确定路径可通行的区域, 路径边沿的延伸方向确定路径的方向. 本文中期望路径具有如下特点: 1) 有 2 个边沿的直线路径; 2) 路径边沿具有一定高度可供测距传感器采集; 3) 路径宽度大于蛇形机器人摆动所需宽度.

控制目标: 蛇形机器人根据路径的 2 个边沿调节运动方向, 使其沿着期望路径运动, 并实现运动轨迹中心线与路径中心线一致.

为了实现控制目标, 在式 (4) 和式 (5) 方向控制方法的基础上, 提出路径边沿引导策略, 其核心思想如下: 随着机器人运动, 在 2 个路径边沿中交替选择有效路径边沿, 在有效路径边沿上选择临时目标点, 不断更新临时目标点确定路径的延伸方向, 临时目标点影响方向控制参数, 使机器人根据路径边沿调节运动方向.

4.1 有效路径边沿

在期望路径 2 个边沿 L_1 和 L_2 中, 与蛇形机器人头部模块正延长线 (如图 2 中红色线) 相交的路径边沿称为有效路径边沿, 与头部模块负延长线 (如图 2 中蓝色线) 相交的路径边沿称为无效路径边沿.

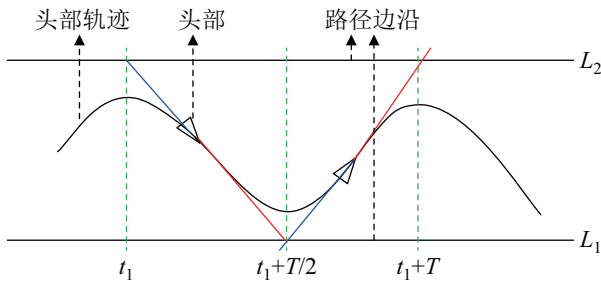


图 2 有效路径边沿示意图

Fig.2 Diagram of effective path edge

由于蛇形机器人蜿蜒运动的轨迹呈现动态 S 形, 所以随着蛇形机器人运动, 路径的 2 个边沿 L_1 和 L_2 不断交替作为有效路径边沿. 如图 2 所示, 在 t_1 时刻轨迹的切线与路径边沿平行, 当 $t \in (t_1, t_1 + T/2)$ 时, 有效路径边沿为 L_1 , 当 $t \in (t_1 + T/2, t_1 + T)$ 时, 有效路径边沿为 L_2 .

4.2 路径边沿引导策略

在头部关节的控制力矩中, 参数 $a(t)$ 是方向控制参数. 通过参数 $a(t)$ 建立蛇形机器人关节控制量与路径之间的联系. 在路径边沿引导策略中参数 $a(t)$ 的计算方法如下.

本文采用机器人自带距离传感器检测路径边沿信息, 传感器安装在头部连杆质心 M 处. 蛇形机器人头部连杆延长线与期望路径有效边沿的交点为 D , 如图 3 所示. $\angle DMC = \eta$, η 为一个常数. l_{MD} (点 M 到点 D 的距离) 和 l_{MC} 是机器人头部自带传感器可实时测量的值. 根据三角形余弦公式可得 $l_{CD} = \sqrt{l_{MD}^2 + l_{MC}^2 - 2l_{MC}l_{MD}\cos\eta}$, 由于 l_{MD} 和 l_{MC} 已知, 再根据三角形余弦公式进一步可得 $\angle CDM$:

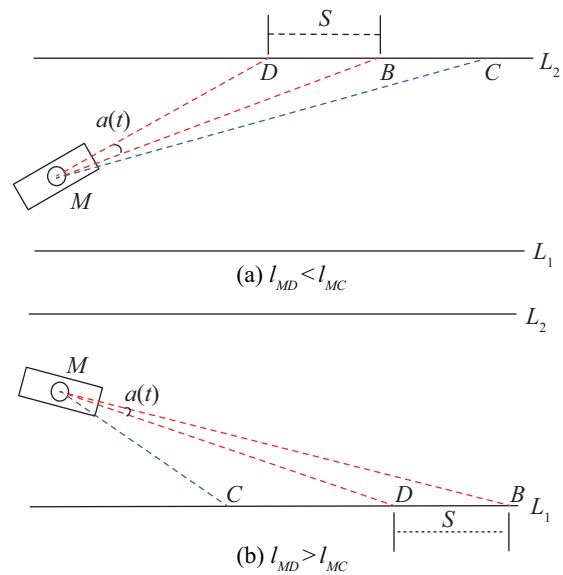
$$\angle CDM = \arccos \frac{l_{CD}^2 + l_{MD}^2 - l_{MC}^2}{2l_{CD}l_{MD}} \quad (6)$$

在期望路径的有效边沿上沿着机器人运动方向选择点 B 作为临时目标点, 点 B 满足 $l_{BD} = S$, S 是目标点选取参数, 为常数. $a(t)$ 是 MB 与 MD 的夹角, 即 $\angle DMB$. 根据三角形余弦公式可得:

$$a(t) = \arccos \frac{l_{MD}^2 + l_{MB}^2 - S^2}{2l_{MD}l_{MB}} \quad (7)$$

式中, $l_{MB} = \sqrt{S^2 + l_{MD}^2 - 2Sl_{MD}\cos\angle BDM}$. 当 $l_{MD} < l_{MC}$ 时, $\angle BDM = \angle CDM$, 如图 3(a) 所示; 当 $l_{MD} > l_{MC}$ 时, $\angle BDM = \pi - \angle CDM$, 如图 3(b) 所示.

临时目标点 B 的更新方法使蛇形机器人无需运动到临时目标点, 临时目标点的作用是引导机器人的运动方向. 临时目标点沿有效边沿更新, 并且有效边沿在 2 个路径边沿间交替, 因此不断更新的临时目标点能够引导机器人沿着期望路径运动.

图 3 参数 $a(t)$ 示意图Fig.3 Diagram of parameter $a(t)$

$a(t)$ 是随时间变化的, 机器人与路径的位置关系影响 $a(t)$ 的对称性, $a(t)$ 的对称性也影响机器人的运动方向, 具体如下:

1) 当蛇形机器人运动轨迹与路径边沿相交时, 如图 4(a) 所示, 可证明 $a(t_1) \neq a(t_2)$, $t_2 = t_1 + T/2$, 即 $a(t)$ 呈不对称变化. 当蛇形机器人在期望路径上运动, 但没有沿着路径中心线运动时, 如图 4(b) 所

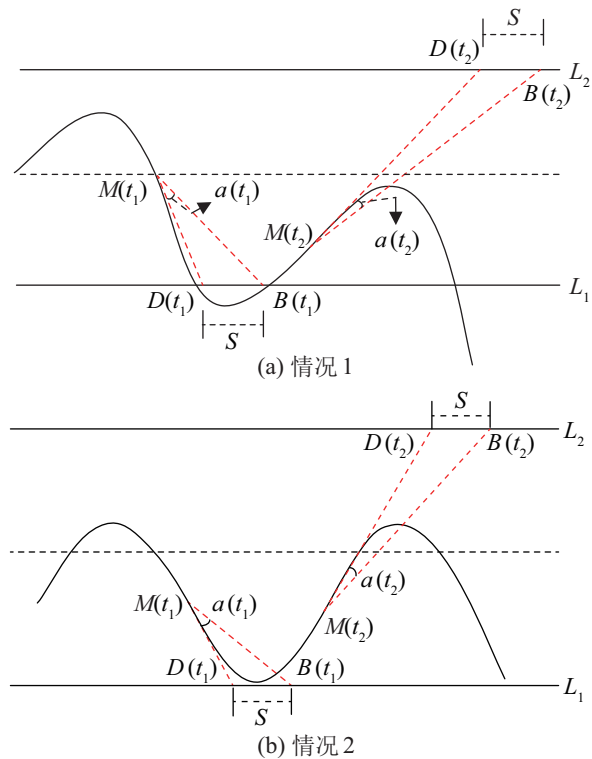


图 4 蛇形机器人不沿期望路径中心线运动时 $a(t)$ 的变化
Fig.4 Change of $a(t)$ when the snake robot does not move along the centreline of the desired path

示, 也可证明 $a(t_1) \neq a(t_2)$, 即 $a(t)$ 呈不对称变化. 当 $a(t)$ 不对称变化时, 蛇形机器人关节角度是不对称变化的, 此时运动方向发生改变. 在反馈控制下, $a(t)$ 的不对称程度逐渐减小, 直至对称. 当 $a(t)$ 呈对称变化时, 机器人沿着路径中心线运动.

2) 当蛇形机器人沿期望路径中心线对称运动时, 如图 5 所示. 虽然运动过程中有效路径边沿发生交替, 但 $a(t_1)$ 和 $a(t_2)$ 所在的 2 个三角形可证明是全等的, 因此 $a(t_1) = a(t_2)$, t_1 可为任意值, 该结论可推广至 $a(t) = a(t + T/2)$, 即 $a(t)$ 呈对称变化. 当 $a(t)$ 呈对称变化时, 蛇形机器人关节角度是对称变化的, 此时运动方向不再改变, 因此机器人能够一直沿着期望路径中心线运动.

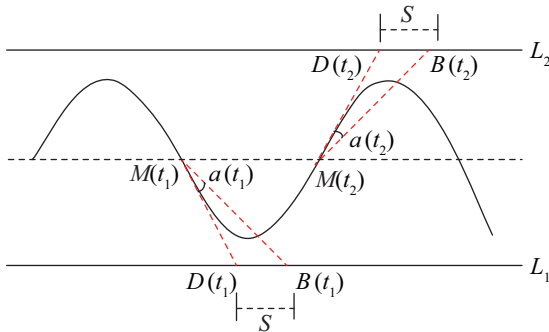


图 5 蛇形机器人沿着期望路径中心线运动时 $a(t)$ 的变化
Fig.5 Change of $a(t)$ when the snake robot moves along the centreline of the desired path

根据上述分析, 蛇形机器人能够通过检测路径边沿信息跟踪期望直线路径的中心线.

5 仿真与分析 (Simulation and analysis)

基于多平台下的自由开源刚体动力学函数库 Open Dynamics Engine 搭建仿真平台进行蛇形机器人运动仿真, 仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	符号	值
模块数	n	10
模块长度	l	0.08 m
单模块质量	m_i	0.5 kg
系数向量	$\mathbf{K}$	[0.01, 0.4, ..., 0.4]
激励信号	q_a	$0.3 \sin(2t + 2\pi i/n)$ rad
控制参数	c	1
目标点选取参数	S	0.5 m
初始位姿	Ψ_0	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)

期望路径边沿信息无需提前已知, 但机器人头

部到路径边沿上点 D 和 B 的距离随着运动会实时更新.

为了对比方向调节前后蛇形机器人的运动轨迹, 在 $(\mu_t, \mu_n) = (0.012, 0.3)$ 的地面上进行无方向控制的运动仿真, 地面的法向摩擦系数 μ_n 和切向摩擦系数 μ_t 只用于搭建仿真环境, 不影响控制参数. 蛇形机器人的运动轨迹不平行于 $y = 0$ m, 如图 6 所示.

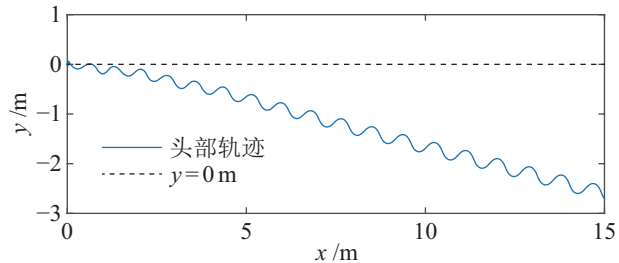


图 6 无方向控制时蛇形机器人的运动轨迹

Fig.6 Trajectory of the snake robot without directional control

5.1 路径跟踪

当蛇形机器人初始位置在期望路径中心线上时, 选择 2 组不同边沿的期望路径, 路径边沿平行于 x 轴, 2 个边沿分别用 y_1 和 y_2 表示, 运动轨迹如图 7(a)(b) 所示. 当蛇形机器人初始位置不在期望路径中心线上时, 选择 2 组不同边沿的期望路径, 机器人运动轨迹如图 7(c)(d) 所示. 4 条路径的摩擦系数相同 $(\mu_t, \mu_n) = (0.012, 0.3)$. 根据机器人运动轨迹可知, 蛇形机器人不仅在 2 个边沿内部向着路径延伸方向运动, 而且运动轨迹围绕着期望路径中心线波动.

5.2 参数分析

以图 7(c) 的运动为例分析参数 $a(t)$. 采集运动过程中 $0 \sim 20$ s 和 $60 \sim 80$ s 两个时间段内参数 $a(t)$ 的变化情况, 如图 8 所示. 由于 $t = 0$ s 时身体轴线不在期望路径的中心线上, $0 \sim 20$ s 内 $a(t)$ 呈不对称变化, 不对称的 $a(t)$ 会改变机器人运动方向. 随着运动方向的改变, $a(t)$ 的对称性发生变化, 不对称程度逐渐减小, 直至对称变化. 当 $a(t)$ 对称变化时, 从图 7(c) 的运动轨迹可知, 机器人沿着期望直线路径中心线运动. 由于机器人沿着路径中心线运动, $a(t)$ 持续呈对称变化, 如图 8 中 $60 \sim 80$ s 所示, 因此关节控制量呈对称变化, 运动方向保持不变, 机器人一直沿着路径中心线运动.

5.3 适应性分析

5.3.1 不同摩擦系数地面的适应性

本节分析在摩擦系数未知的不同地面上蛇形机器人运动轨迹中心线与路径中心线之间的误差. 分

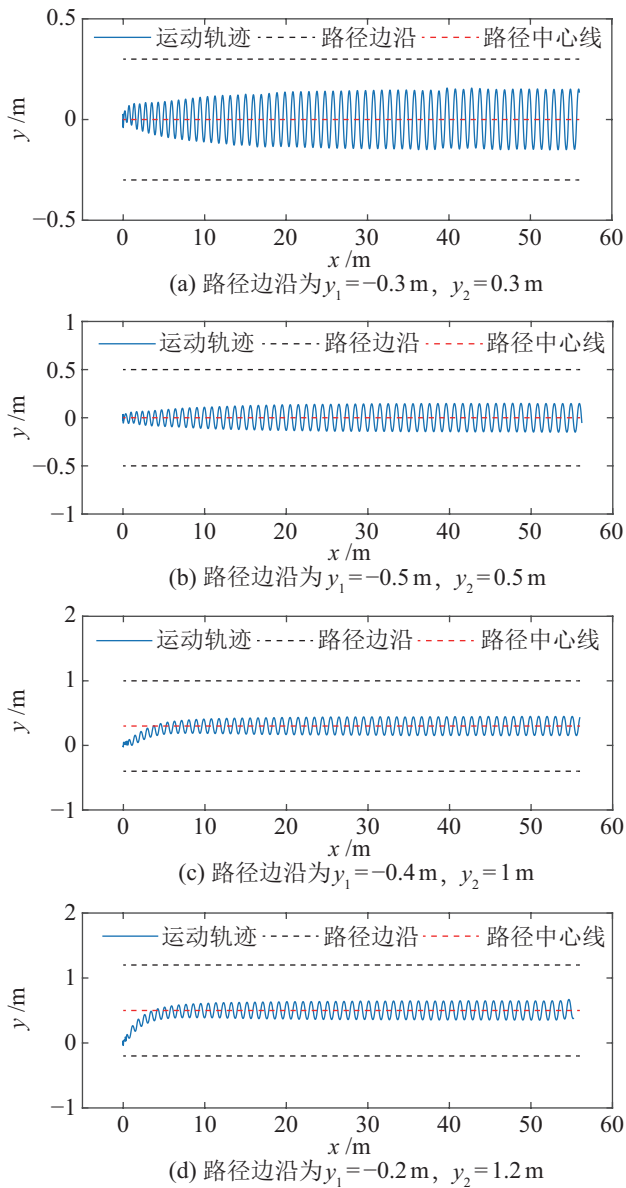
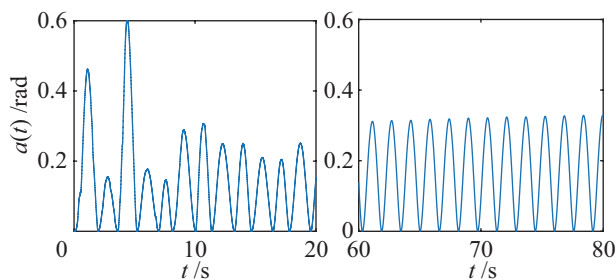


图 7 蛇形机器人的运动轨迹

Fig.7 Trajectories of the snake robot

图 8 当路径边沿为 $y_1 = -0.4 \text{ m}$, $y_2 = 1 \text{ m}$ 时参数 $a(t)$ 的变化情况Fig.8 Change of $a(t)$ when the path edges are $y_1 = -0.4 \text{ m}$, $y_2 = 1 \text{ m}$

别取 $(\mu_t, \mu_n) = (0.012, 0.4), (0.012, 0.3), (0.012, 0.2), (0.012, 0.1)$ 4 种摩擦系数的地面 (法向摩擦系数影响机器人侧滑程度, 切向摩擦系数对机器人侧滑影

响可忽略), 选择图 7(c) 中的路径作为期望路径进行运动仿真.

首先, 定义运动轨迹中心线, 以 t 为中间点, 求一个周期内头部运动轨迹的坐标均值 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$, 该均值随时间 t 形成的轨迹为运动轨迹中心线.

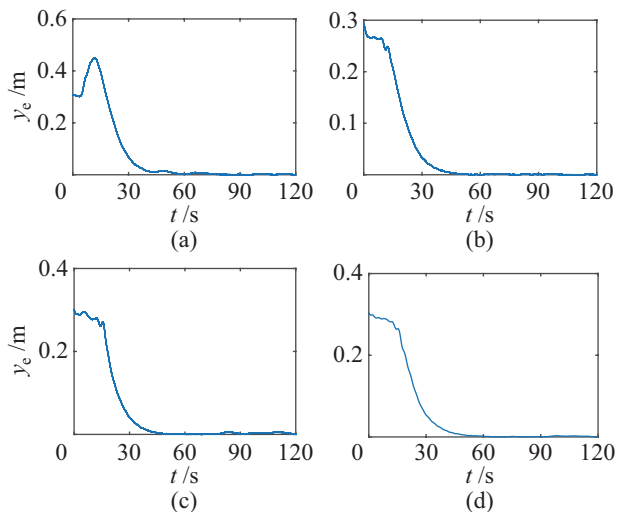
然后, 计算 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ 到期望路径中心线的距离. 从 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ 向期望路径中心线做垂线, 垂足坐标为 $(x_\perp(t), y_\perp(t))$. 图 7(c) 中期望路径平行于 x 轴, 因此 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ 到期望路径中心线的距离 y_e 为

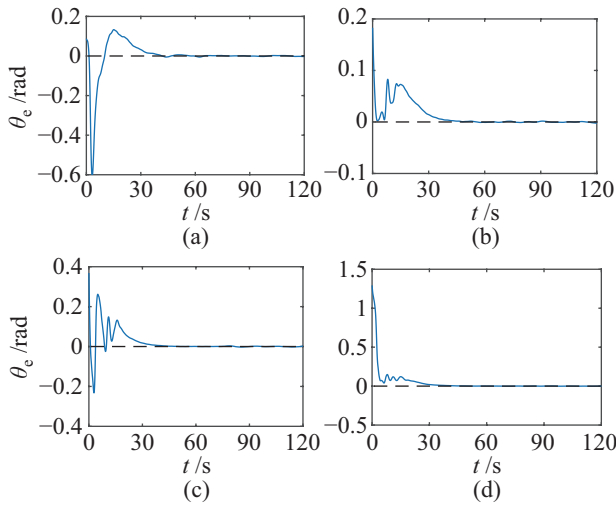
$$y_e(t) = \bar{y}(t) - y_\perp(t) \quad (8)$$

最后, 计算轨迹中心线与期望路径中心线之间的方向误差:

$$\theta_e(t) = \theta(t) - \theta_d(t) \quad (9)$$

式中, $\theta(t)$ 是轨迹中心线上点 $(\bar{x}(t), \bar{y}(t))$ 处的切线与 x 轴夹角; $\theta_d(t)$ 是期望路径中心线上点 $(x_\perp(t), y_\perp(t))$ 处的切线与 x 轴夹角. 蛇形机器人在 $(\mu_t, \mu_n) = (0.012, 0.4), (0.012, 0.3), (0.012, 0.2), (0.012, 0.1)$ 4 种地面上运动的误差 y_e 分别如图 9(a)(b)(c)(d) 所示, 误差 θ_e 分别如图 10(a)(b)(c)(d) 所示. 由于蛇形机器人起始位置不在路径中心线上, 因此运动开始时刻误差较大. 由于采用被动蜿蜒步态生成方法产生基本蜿蜒步态^[4], 蛇形机器人在摩擦系数未知的地面上通过自调节产生步态, 因此运动开始时刻误差减小、速度较慢, 且角度误差存在波动. 随着机器人运动, 误差逐渐减小, 直至趋向 0. 由图 9 和图 10 可知: 蛇形机器人能够在摩擦系数未知的不同平面上根据检测的路径边沿信息调整运动方向, 使其运动轨迹中心线与期望路径中心线的误差随着时间的增加而趋于 0.

图 9 跟踪误差 y_e Fig.9 Tracking error y_e

图 10 跟踪误差 θ_e Fig.10 Tracking error θ_e

当 $(\mu_t, \mu_n) = (0.012, 0.1)$ 时, 蛇形机器人在跟踪期望路径过程中头部和尾部的运动轨迹如图 11 所示. 对比头部轨迹和尾部轨迹可知, 在该摩擦系数的地面上蛇形机器人发生了侧滑. 但对比运动轨迹、路径边沿以及轨迹与路径中心线误差可知, 蛇形机器人在发生侧滑时仍可以通过边沿引导策略来跟踪期望路径. 原因如下: $a(t)$ 是根据蛇形机器人与有效路径边沿的关系实时更新的, 侧滑产生的误差会在实时更新 $a(t)$ 的过程中被新的方向调节消除, 因此可以避免侧滑对路径跟踪的影响, 也使蛇形机器人可以在 (μ_n, μ_t) 未知的地面上完成路径跟踪任务.

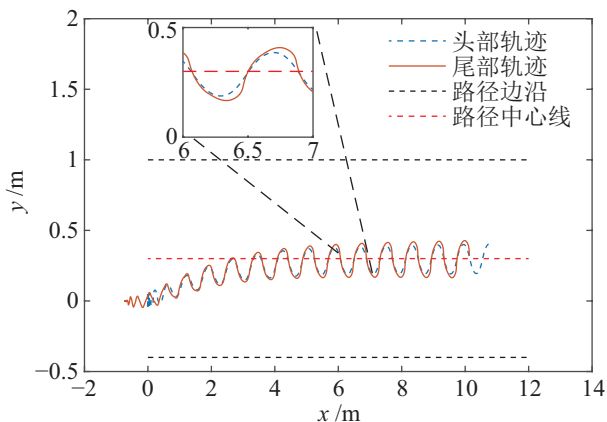


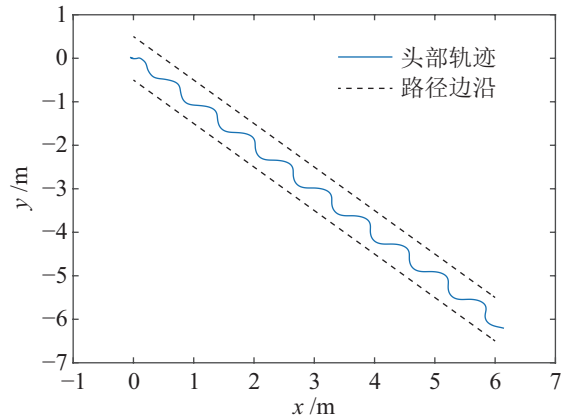
图 11 蛇形机器人头部和尾部的运动轨迹

Fig.11 Trajectories of the head and the tail of the snake robot

5.3.2 多种路径的适应性

当初始身体轴线与期望路径呈一定角度时, 以路径边沿与初始时身体轴线夹角为 $\pi/4$ 的情况为例, 机器人运动轨迹如图 12 所示. 从运动轨迹可知蛇形机器人可以跟踪初始身体轴线与期望路径中

心线呈一定角度的期望路径.

图 12 当路径边沿与初始身体轴线夹角为 $\pi/4$ 时蛇形机器人的运动轨迹Fig.12 Trajectory of the snake robot when the angle between the path edge and the initial body axis is $\pi/4$

当期望路径两边沿不平行时, 运动轨迹如图 13 所示, 蛇形机器人从 A 点出发, 蓝线为路径边沿, 从运动轨迹可知蛇形机器人不仅沿着期望路径运动, 而且沿着期望路径中心线运动.

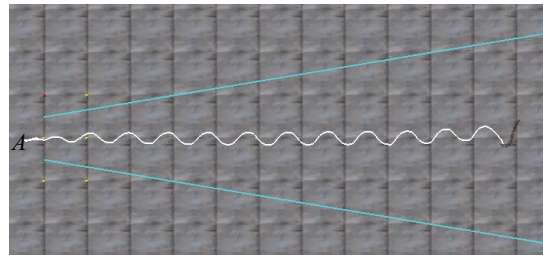


图 13 期望路径边沿不平行时蛇形机器人的运动轨迹

Fig.13 Trajectory of the snake robot when the edges of the desired path are not parallel

6 结论 (Conclusion)

为了控制蛇形机器人跟踪具有一定宽度的直线路径, 并且使轨迹中心线与路径中心线一致. 本文在原有方向控制方法的基础上提出路径边沿引导策略, 随着蛇形机器人做 S 形蜿蜒运动, 在期望路径的 2 个路径边沿中交替选择有效路径边沿, 利用有效路径边沿上不断更新的临时目标点引导蛇形机器人运动方向.

该方法通过实时检测到的路径边沿信息引导机器人运动方向, 因此无需提前知道路径边沿信息. 通过 2 个边沿的交替引导使机器人轨迹中心线与路径中心线一致, 因此无需已知或采集路径的中心线信息.

未来研究方向: 蛇形机器人跟踪具有一定宽度的曲线路径.

参考文献 (References)

- [1] Yamada H, Hirose S. Study on the 3D shape of active cord mechanism[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2006. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642140.
- [2] Hatton R L, Choset H. Sidewinding on slopes[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509875.
- [3] Hatton R L, Choset H. Generating gaits for snake robots: Annealed chain fitting and keyframe wave extraction[J]. Autonomous Robots, 2010, 28(3): 271-281.
- [4] 王智锋, 马书根, 李斌, 等. 基于能量的蛇形机器人蜿蜒运动控制方法的仿真与实验研究[J]. 自动化学报, 2011, 7(5): 604-614.
Wang Z F, Ma S G, Li B, et al. Simulation and experimental study of an energy-based control method for the serpentine locomotion of a snake-like robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(5): 604-614.
- [5] Liljeback P, Pettersen K Y, Stavdahl Ø, et al. A simplified model of planar snake robot locomotion[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/IROS.2010.5649110.
- [6] Liljeback P, Pettersen K Y. Waypoint guidance control of snake robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979565.
- [7] Liljeback P, Haugstuen I U, Pettersen K Y. Path following control of planar snake robots using a cascaded approach[C]//49th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/CDC.2010.5717823.
- [8] Rezapour E, Pettersen K Y, Gravdahl J T, et al. Formation control of underactuated bio-inspired snake robots[J]. Artificial Life and Robotics, 2016, 21(3): 282-294.
- [9] Kohl A M, Pettersen K Y, Kelasidi E, et al. Planar path following of underwater snake robots in the presence of ocean currents[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(1): 383-390.
- [10] Kelasidi E, Liljeback P, Pettersen K Y, et al. Integral line-of-sight guidance for path following control of underwater snake robots: Theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(3): 610-628.
- [11] Hasanabadi E, Mahjoob M J. Trajectory tracking of a planar snake robot using camera feedback[C]//2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011. DOI: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356780.
- [12] Mohammadi A, Rezapour E, Maggiore M, et al. Maneuvering control of planar snake robots using virtual holonomic constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3): 884-899.
- [13] Ariizumi R, Takahashi R, Tanaka M, et al. Head-trajectory-tracking control of a snake robot and its robustness under actuator failure[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(6): 2589-2597.
- [14] Wang J, Qiu X L, Liu Z Z, et al. Path tracking of snake-like robot based on neural network identifier[C]//IEEE 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICARM.2019.8834017.
- [15] 李东方, 邓宏彬, 潘振华, 等. 基于改进蛇形曲线的蛇形机器人在流场中避障的轨迹跟踪控制律[J]. 机器人, 2019, 41(4): 433-442.
Li D F, Deng H B, Pan Z H, et al. Trajectory tracking control law for obstacle avoidance of a snake-like robot in flow field based on an improved serpentine curve[J]. Robot, 2019, 41(4): 433-442.
- [16] Li D F, Pan Z H, Deng H B, et al. 2D underwater obstacle avoidance control algorithm based on IB-LBM and APF method for a multi-joint snake-like robot[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 98(1): 771-790.
- [17] 张丹凤, 李斌, 常健. 基于角度对称性调节的蛇形机器人路径跟随方法[J]. 机器人, 2019, 41(6): 788-794, 833.
Zhang D F, Li B, Chang J. Path following method for snake robot based on the angle symmetry adjustment[J]. Robot, 2019, 41(6): 788-794, 833.
- [18] Ma S G. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot[J]. Advanced Robotics, 2001, 15(2): 205-224.

作者简介:

张丹凤 (1984-), 女, 博士, 讲师. 研究领域: 机器人建模, 机器人控制.