

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0829

基于连续体模型的蛇形机器人质心速度跟踪控制方法

张丹凤^{1,2}, 李 斌², 王立岩¹

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001;
2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 基于连续体模型合理简化蛇形机器人的动力学方程, 基于该动力学描述获得无侧滑条件下使机器人质心速度稳定的关节角度参数集. 然后, 通过分析侧滑概率与控制参数之间的关系, 获得法向摩擦力有限时使质心速度稳定的控制参数. 在实现质心速度稳定的基础上, 基于连续体模型获得无侧滑时实现机器人速度跟踪的控制参数. 最后基于上述理论值设计控制器, 将上述理论值作为关节角度参数的初值, 利用速度反馈对关节角度进行微调, 消除模型近似和环境差异带来的速度误差. 基于 Open Dynamics Engine 进行仿真, 仿真结果显示蛇形机器人质心速度能够跟踪期望速度, 从而验证了所提方法的有效性.

关键词: 蛇形机器人; 质心速度; 跟踪; 连续体模型; 动力学

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-06-0829-09

Tracking Control Method of the Centre-of-Mass Velocity for a Snake-like Robot Based on the Continuum Model

ZHANG Danfeng^{1,2}, LI Bin², WANG Liyan¹

(1. School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The dynamics equations of the snake-like robot are reasonably simplified based on the continuum model. Based on the dynamics equations, the joint angle parameter set can be obtained to stabilize the centre-of-mass velocity in the case of no sideslip. Then, the parameter for stabilizing the centre-of-mass velocity with the limited normal friction is obtained by analyzing the relation between the probability of sideslip and the control parameter. On the basis of the stability of the centre-of-mass velocity, the parameter is acquired based on the continuum model to complete the velocity tracking when the robot doesn't sideslip. Finally, a controller is designed based on the above theoretical values. The above theoretical values are used as the initial values of the joint angle parameters, and the joint angle is adjusted by the speed feedback to eliminate the velocity error caused by the model approximation and the environment difference. The simulations are programmed based on Open Dynamics Engine. The simulation results show that the centre-of-mass velocity can track the expected speed, which verifies the validity of the proposed control method.

Keywords: snake-like robot; centre-of-mass velocity; tracking; continuum model; dynamics

1 引言 (Introduction)

蜿蜒步态是蛇形机器人的典型运动形式, 本文针对蛇形机器人蜿蜒步态展开研究. 蛇形机器人的蜿蜒运动步态生成方法有: 基于正弦曲线的关节角度控制方法^[1-3], 基于 CPG (中枢模式发生器) 的步态生成方法^[4-8], 基于动力学模型和非完整约束的步态生成方法^[9-10], 被动蜿蜒步态生成方法^[11-12]. 其中基于正弦曲线的关节角度控制方法具有控制方法简单、运动曲线流畅等优点, 因此本研

究采用该方法作为蜿蜒步态生成方法, 产生基本的蜿蜒运动.

在基于正弦曲线关节角度的蜿蜒步态生成方法中, 控制参数有幅值、相位和角频率, 选取不同的参数值将导致蛇形机器人蜿蜒运动速度存在差异. 以期望速度运动, 从而使蛇形机器人在期望时间内运动到达目的地对实现其应用价值具有重要意义. 郭宪从微分几何的观点对蛇形机器人进行动力学建模, 在此基础上建立动力学与控制统一模型, 从而实现无侧滑运动时蛇形机器人头部运动速度跟踪期

望值^[13]. Saito 等通过机器人离散模型进行动力学分析, 建立能量耗散与关节控制之间的关系, 在实现能量输入最小的同时使头部以期速度运动^[14]. Date 基于连续体模型动力学分析获得力矩与加速度间的关系, 将加速度转化为期望速度与头部运动速度的偏差, 机器人根据速度偏差调节关节控制量, 最终使头部达到期望速度^[15]. 文 [10,16] 也对头部运动速度进行了分析和控制. 基于现有研究可知, 对蛇形机器人速度的研究大多是针对头部速度展开的. 然而在蜿蜒运动时为了产生法向摩擦力, 蛇形机器人每一个模块的轨迹都呈现 S 形, 这一运动特点导致机器人身体上任意一点 (包括头部) 的速度与机器人整体移动速度之间呈现很大的差异, 从而影响蛇形机器人运动时间的可控性. 质心的运动情况能代表机器人整体的运动情况, 因此对质心速度的控制较头部速度的控制更有利于提高蛇形机器人运动时间的可控性. 基于现有研究中速度的控制目标可知, 控制速度的首要任务是使速度跟随期望速度, 因此本文以控制蛇形机器人质心速度跟随期望速度为目标提出一种蜿蜒步态控制方法.

为了实现质心速度跟踪期望速度, 需要解决 2 个问题: 一个是质心速度的稳定性, 即如何控制质心速度波动程度; 另一个问题是质心速度值 (速度大小), 即如何控制质心速度达到某一期望速度. 由于速度值与期望速度之间的误差是影响误差总量的主要原因, 所以本研究的具体目标是提出一种控制方法, 通过质心速度值的自适应调节使其达到期望速度, 并控制速度稳定性达到较优的状态, 从而实现质心速度跟踪期望速度.

速度稳定程度可量化为加速度, 因此需要进行动力学研究. 现有蛇形机器人蜿蜒运动的动力学分析方法有: (1) 考虑环境模型的动力学建模方法^[17], 该方法的复杂性随着蛇形机器人连杆数的增多而大幅度增加; (2) 基于非完整约束的动力学建模方法, 该方法不适用于蛇形机器人发生侧滑的情况^[18]; (3) 基于连续体的近似建模方法^[11,15,19], 这种建模方法能够简化动力学方程, 有利于分析运动性能与控制量之间的关系, 但现有的连续体建模方法没有考虑摩擦力, 而摩擦力是产生蛇形机器人运动的根本. 因此本研究为了获得运动性能与控制量之间的关系, 融合环境信息对蛇形机器人进行近似连续体建模.

速度大小取决于关节控制量, 基于连续体模型可获得无侧滑时速度到达某一期望值的控制参数 (即理想值), 但由于连续体模型建模的近似化以及

蛇形机器人运动过程中侧滑的不确定性, 直接采用理想值作为控制参数时质心实际运动速度与理论值之间会存在偏差. 本文将理想值作为控制参数初始值, 在此基础上通过速度反馈对该参数进行微调, 使得理论研究更适用于实际应用.

综上所述, 为了实现蛇形机器人蜿蜒运动时质心速度跟踪期望速度, 本研究首先获得机器人质心速度稳定性与控制参数之间的关系, 然后获得机器人质心速度大小与控制参数之间的关系, 最后利用上述控制参数设计控制器消除由于近似计算和实际环境差异带来的误差.

2 蛇形机器人连续体模型分析 (Analysis of the continuum model for a snake-like robot)

蛇形机器人是一种由多模块组成, 相邻模块通过电机连接而构成的串联机构. 蛇形机器人的模块数目为 n , 每个模块的长度为 l , 机器人总长度 $L = nl$, 机器人的位姿定义为 $\Psi_0 = (x_0, y_0, \theta_0, q_1, \dots, q_{n-1})$. (x_0, y_0) 是机器人尾部模块的坐标值, θ_0 是尾部连杆与 x 轴的夹角. 模块与模块间的夹角为关节角 q_i , $i = 1, \dots, n-1$, 其结构如图 1 所示.

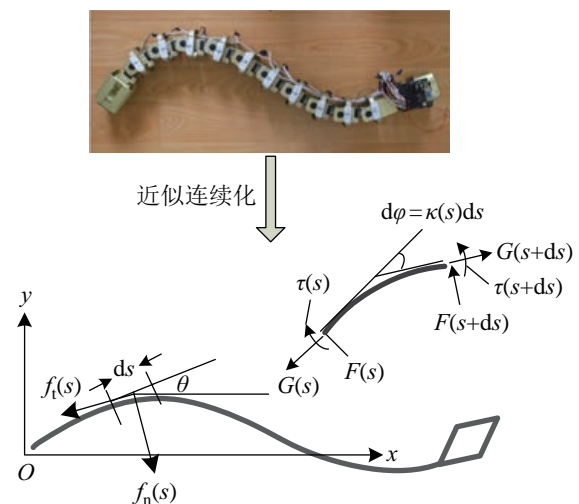


图 1 蛇形机器人及其连续体模型

Fig.1 The snake-like robot and its continuum model

蛇形机器人的连续化有利于简化其动力学分析^[11,18], 便于机器人控制器的设计. 对于总长度 L 固定的蛇形机器人, 进行连续化, 即 $n \rightarrow \infty$ 时, $l \rightarrow 0$, 此时蛇形机器人的身体近似为如图 1 所示的连续体. 以连续体模型运动起始时刻尾部的坐标为原点 O , 建立坐标系 xOy , 从蛇形机器人尾部指向头部的方向为 x 轴正方向, 垂直于 x 轴且向上的方向为 y 轴正方向. (在后边稳定性分析中验证坐标

系的选择不影响速度稳定性, 因此坐标的建立原则是便于运算)。

文 [20] 提出基于正弦曲线的关节角度控制方法, 产生蛇形机器人蜿蜒步态时, 蛇形机器人运动轨迹的曲率呈正弦变化. 运动轨迹的曲率函数为

$$\kappa(s_0, s) = -\frac{2K_n\pi a_0}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s_0 + \frac{2K_n\pi}{L}s\right) \quad (1)$$

式中, s 是连续体上的点距离尾部的曲线长度, s_0 是连续体模型尾部距离原点的曲线长度, a_0 是曲线切线与 x 轴夹角的最大值, K_n 是连续体含有 S 形状的个数. 那么, 连续体模型曲率式 (1) 对应的关节角度为

$$q_i = \int_{s_0+(i-1)l+0.5l}^{s_0+il+0.5l} \kappa(u)du = -2a_0 \sin \frac{K_n\pi}{n} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s_0 + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \quad (2)$$

式中, $i = 1, \dots, n-1$. 将式 (1) 和式 (2) 转化为 s 和时间 t 的函数:

$$\kappa(t, s) = -\frac{2K_n\pi a_0}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{T}t + \frac{2K_n\pi}{L}s\right) \quad (3)$$

$$q_i(t) = -2a_0 \sin \frac{K_n\pi}{n} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{T}t + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \quad (4)$$

式中, T 是关节角度 $q_i(t)$ 变化 K_n 个周期所需的时间, 因此关节角度的周期 $\bar{T} = T/K_n$. 根据图 1, 可获得点 s 处的切线与 x 轴正向的夹角 $\theta(s, t)$:

$$\theta(s, t) = \int_0^s \kappa(r, t)dr + \theta(0, t) \quad (5)$$

在距离尾部曲线长度为 s 处取连续体微元 ds , 文 [11,15] 对该蛇形机器人的连续化和受力情况进行了详细介绍, 本研究在文 [11] 基础上增加摩擦力, 对微元 ds 进行进一步的受力分析. 连续体微元 ds 的力矩平衡方程为

$$F(s+ds) \cdot \cos \frac{dq}{2} \cdot \frac{ds}{2} + F(s) \cdot \cos \frac{dq}{2} \cdot \frac{ds}{2} + \tau(s+ds) - \tau(s) = \rho I_z \frac{\partial^2 \theta(s, t)}{\partial t^2} ds \quad (6)$$

式中, F 是截面所受剪切力, τ 是截面所受力矩, $\rho(s)$ 是机器人的密度, $I_z(s)$ 是截面转动惯量, $dq = \kappa(s)ds$. 根据牛顿第二定律, 可知 y 轴方向的作用力与加速度之间的关系:

$$F(s+ds) \cdot \cos\left(\theta + \frac{dq}{2}\right) - F(s) \cdot \cos\left(\theta - \frac{dq}{2}\right) + G(s+ds) \cdot \sin\left(\theta + \frac{dq}{2}\right) - G(s) \cdot \sin\left(\theta - \frac{dq}{2}\right) - f_t(s)ds \sin \theta - f_n(s)ds \cos \theta = \rho A \frac{\partial^2 y(s, t)}{\partial t^2} ds \quad (7)$$

式中, G 是截面所受拉力, A 是截面面积, $f_n(s)$ 是法向摩擦力, $f_t(s)$ 是切向摩擦力. x 轴方向的作用力与加速度之间的关系为

$$F(s) \cdot \sin\left(\theta - \frac{dq}{2}\right) - F(s+ds) \cdot \sin\left(\theta + \frac{dq}{2}\right) + G(s+ds) \cdot \cos\left(\theta + \frac{dq}{2}\right) - G(s) \cdot \cos\left(\theta - \frac{dq}{2}\right) - f_t(s)ds \cos \theta + f_n(s)ds \sin \theta = \rho A \frac{\partial^2 x(s, t)}{\partial t^2} ds \quad (8)$$

另外, 连续体模型的边界受力情况是 $F(0) = F(L) = G(0) = G(L) = 0$.

3 质心速度稳定性分析 (Stability analysis on the centre-of-mass velocity)

速度波动 (即稳定性) 实际上是由于存在不同大小的加速度, 而加速度的大小是由受力情况决定的, 但蛇形机器人运动过程中身体位姿不断变化, 导致侧滑情况的变化性和不确定性, 从而导致作用力复杂, 因此无法直接通过准确的受力分析获得使运动速度稳定的控制参数. 本研究提出如下解决方法: 首先分析无侧滑时使质心速度稳定的控制参数集 Ω , 然后在参数集 Ω 中寻找侧滑概率最小的控制参数, 从而获得在忽略法向摩擦力具体数值而又考虑环境因素的前提下使蜿蜒运动质心速度稳定概率最高的控制参数. 下面先对蛇形机器人无侧滑情况展开研究.

3.1 无侧滑时的质心速度稳定性

无侧滑是指运动过程中法向摩擦力足以支撑机器人运动过程中身体的摆动, 机器人模块无法向速度, 只有切向速度.

为了衡量速度波动与运动参数之间的关系, 将速度波动用速度波动幅值来描述. 速度波动幅值即一个周期内速度的最大值与平均值之差, 可近似描述为在 $\frac{1}{4}$ 周期内速度变化的绝对值, 即

$$F(x_m) = \int_{t_0}^{t_0+\bar{T}/4} |\dot{x}_m(t)|dt, \quad F(y_m) = \int_{t_0}^{t_0+\bar{T}/4} |\dot{y}_m(t)|dt$$

根据 F 的定义可知研究质心速度的波动实际是分析质心的加速度.

假设连续体模型密度均匀, 连续体模型质心坐标为 (x_m, y_m) , 则:

$$\begin{cases} x_m = \frac{\rho A \int_0^L x(s)ds}{\rho AL} \\ y_m = \frac{\rho A \int_0^L y(s)ds}{\rho AL} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)二次求导, 获得质心的加速度:

$$\begin{cases} \frac{d^2x_m}{dt^2} = \frac{\rho A \int_0^L \ddot{x}(s) ds}{\rho AL} \\ \frac{d^2y_m}{dt^2} = \frac{\rho A \int_0^L \ddot{y}(s) ds}{\rho AL} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(7)、(8)和(10), 利用相邻模块间作用力与反作用力间的关系, 可得:

$$\begin{cases} \frac{d^2x_m}{dt^2} = \frac{\int_0^L (f_n(s) \sin \theta(s) - f_t(s) \cos \theta(s)) ds}{\rho AL} \\ \frac{d^2y_m}{dt^2} = \frac{\int_0^L (-f_n(s) \cos \theta(s) - f_t(s) \sin \theta(s)) ds}{\rho AL} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可知, 加速度在 x, y 轴方向的分量只与切向摩擦力 f_t 、法向摩擦力 f_n 和身体形态 θ 有关. 其中, 由于无侧滑, 所以法向摩擦力是静摩擦力, 与身体摆动时产生的各种作用力有关; 切向摩擦力是滑动摩擦力, 与切向摩擦系数和机器人质量有关. 下面分析法向摩擦力.

由于 $dq = \kappa(s)ds$, $ds \rightarrow 0$, 所以 $dq \rightarrow 0$. 将式(6)~(8)简化得:

$$\frac{\partial \tau}{\partial s} + F = \rho I_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial s} \cos \theta + \frac{\partial G}{\partial s} \sin \theta - f_t \sin \theta - f_n \cos \theta = \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (13)$$

$$-\frac{\partial F}{\partial s} \sin \theta + \frac{\partial G}{\partial s} \cos \theta - f_t \cos \theta + f_n \sin \theta = \rho A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (14)$$

式(13)乘以 $\cos \theta$ 减去式(14)乘以 $\sin \theta$ 得:

$$\frac{\partial F}{\partial s} - f_n = \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cos \theta - \rho A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \sin \theta \quad (15)$$

根据式(12)得:

$$\frac{\partial F}{\partial s} = \rho I_z \frac{\partial^2 \kappa}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \tau}{\partial s^2} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得:

$$f_n = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cos \theta + \rho A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \sin \theta + \rho I_z \frac{\partial^2 \kappa}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \tau}{\partial s^2} \quad (17)$$

在前面的研究中已提出: 当连杆无侧滑时, 关节角度是动态跟随的, 因此力矩为 $\tau = \zeta \kappa'$ [12]. ζ 是力矩系数, ζ 的不同影响机器人的运动效率, 但 ζ 的不同对速度稳定性无影响, ζ 的具体数值在关

于速度稳定性的研究中不作分析. 将 τ 代入式(17)得:

$$f_n = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cos \theta + \rho A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \sin \theta + \rho I_z \frac{\partial^2 \kappa}{\partial t^2} - \zeta \frac{\partial^3 \kappa}{\partial s^3} \quad (18)$$

根据式(3)可知:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \kappa}{\partial s^2} = -\omega_0^2 \kappa \\ \frac{\partial^2 \kappa}{\partial t^2} = -\omega^2 \kappa \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\omega = \frac{2K_n \pi}{T}$, $\omega_0 = \frac{2K_n \pi}{L}$. 将式(19)代入式(18)得:

$$f_n = (\rho A v^2 - \rho I_z \omega^2) \kappa + \zeta \omega_0^2 \kappa' \quad (20)$$

将式(20)代入式(11)就可以获得无侧滑运动时加速度在 x, y 轴方向的分量.

本研究采用关节角作为控制量, 根据式(4)可知, 关节角 q_i 的参数为 a_0 、 K_n 和 T . 根据式(11)和式(20)可知, 参数 a_0 与加速度呈现近似比例关系, 在满足运动需求的条件下尽量选择较小值, 本研究将在下一节中讨论参数 T 与速度大小之间的关系, 这里不作讨论. 为了分析无侧滑时速度波动与控制参数 K_n 之间的关系, 分别建立当切向摩擦系数 $\mu_t = 0.003$ 、 $\mu_t = 0.004$ 时 $F(x_m)$ 和 $F(y_m)$ 与控制参数 K_n 之间的关系, 如图2所示.

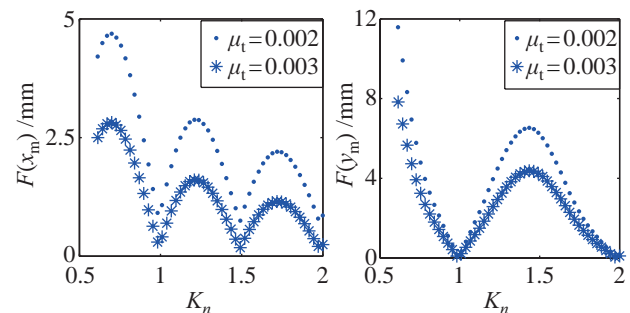


图2 $F(x_m)$ 、 $F(y_m)$ 与 K_n 的关系

Fig.2 The relationship between $F(x_m)$, $F(y_m)$ and K_n

从图2可知, 当 $K_n = 1, 1.5, 2$ 时, $F(x_m)$ 最小, 即质心速度在 x 轴分量的波动幅值最小; $K_n = 1, 2$ 时, $F(y_m)$ 最小, 即质心速度在 y 轴分量的波动幅值最小. 该结论在 $\mu_t = 0.003$ 和 $\mu_t = 0.004$ 时都成立, 因此 F 最小时所需的控制参数 K_n 与切向摩擦系数 μ_t 无关 (因此 μ_t 可视为未知).

由于质心速度 $v_m = \sqrt{\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2}$, 质心速度与 x 轴夹角 $\theta_m = \arcsin \frac{\dot{y}_m}{v_m}$, 所以当 \dot{x}_m, \dot{y}_m 波动最小时, v_m 波动最小. 根据上述分析得出结论1: 在无侧滑时, 控制参数 $K_n = 1, 2$ 使质心速度最稳定. 对这种现象

的原因进行分析: 质心加速度是由作用在连续体模型上的作用力合力决定的, 在计算质心加速度时作用力会产生抵消, 抵消的程度随着连续体模型对称程度的提高而提高, $K_n = 1, 2$ 时, 对称的结构导致作用力的抵消程度最大, 因此 $K_n = 1, 2$ 时速度波动最小.

重新建立一个新的坐标系 XOY , X 轴与原坐标系的 x 轴夹角为 φ , 则质心速度在新坐标的 X 轴的分量为 $\dot{X}_m = \dot{x}_m \cdot \cos \varphi + \dot{y}_m \cdot \sin \varphi$, 因此当质心速度在 x 轴方向分量和 y 轴方向分量都达到稳定时, 即 $K_n = 1, 2$ 时, 质心速度在坐标系 XOY 的 X 轴分量达到稳定, 同理, Y 轴的分量也达到稳定. 因此, 坐标系的选择不影响质心速度的稳定性.

3.2 基于侧滑概率的质心速度稳定性分析

结论 1 获得无侧滑时蛇形机器人稳定运动的控制参数. 而蛇形机器人在实际运动过程中, 地面法向摩擦力是有限的, 当蛇形机器人摆动激烈程度超过法向摩擦力的支撑能力时就会出现侧滑. 侧滑会改变机器人运动速度的稳定性, 而 K_n 不同时机器人侧滑情况也有所差异, 所以当考虑侧滑时, 控制参数 $K_n = 1, 2$ 会使机器人的质心速度有不同的稳定性.

考虑法向摩擦力有限的平面, 蛇形机器人的侧滑具有随机性, 为了避免侧滑随机性带来的运算复杂性, 将法向摩擦力 μ_n 视为未知量 (结合前面关于切向摩擦力的分析, 可将环境视为未知平面), 建立侧滑概率与控制参数之间的关系.

无侧滑运动所需法向摩擦力最大的部位为最易侧滑处, 该点无侧滑所需最大法向摩擦力越小, 则机器人发生侧滑的概率就越小, 相反, 则侧滑概率越大, 因此侧滑概率与无侧滑所需最大法向摩擦力成正比.

为了评价未知环境下蛇形机器人发生侧滑的概率, 提出评价函数 H .

$$H = \frac{f_{n\max}}{f_{N\max}} \quad (21)$$

式中, $f_{n\max}$ 是某一给定运动参数对应的蛇形机器人无侧滑所需的最大法向摩擦力. $f_{N\max} = \max f_{n\max}$, 即在允许的运动参数集中蛇形机器人无侧滑所需的最大法向摩擦力.

H 越小则侧滑概率越小, 相反, 侧滑概率越大. 设置运动曲率参数的范围为 $K_n \in [0.6, 2]$, $a_0 \in [0.3, 1.5]$. 图 3 显示了在法向摩擦力未知的情况下, 评价函数 H 与参数 K_n 之间的关系 (结论 2): 随着 K_n 的增大, 蛇形机器人侧滑的概率也增大.

根据结论 1 和结论 2 进行如下分析. (1) 对于无侧滑运动, $1 < K_n < 2$ 时速度波动幅值大于 $K_n = 1$ 时的波动幅值, 而侧滑概率随 K_n 的增加而增大, 因此对于控制质心速度稳定性, $K_n = 1$ 优于 $1 < K_n < 2$. (2) $K_n = 2$ 时侧滑概率大于 $K_n = 1$, 因此对于控制质心速度稳定性, $K_n = 1$ 优于 $K_n = 2$. (3) 当 $K_n = 1$ 发生侧滑时, 侧滑会影响运动的稳定性, 此时希望避免由于侧滑导致的质心速度波动, 根据图 3 可知避免侧滑就要减小 K_n , 但减小 K_n 会导致身体结构不对称, 由图 2 可知质心速度波动会增加. 所以, 如果 K_n 微调节到 $K_n = 1 - \varepsilon$ 速度稳定性得到改善, 那么 ε 是一个小量, 这是由于加速度引起的速度波动随 K_n 变化的敏感性很强, ε 过大, 则通过避免侧滑减小的速度波动会远小于由于结构不对称而增加的速度波动. 但由于环境未知以及侧滑对速度波动影响程度不确定, 所以 ε 无法定量分析. 由于侧滑概率随 K_n 变化的敏感性很弱, 又由于 ε 是一个小量, 所以 $K_n = 1 - \varepsilon$ 较 $K_n = 1$ 所对应的侧滑概率降低的程度很小, 对应到环境上, $K_n = 1$ 侧滑临界值的环境参数为 μ_n , $K_n = 1 - \varepsilon$ 侧滑临界值的环境参数为 $\mu_n - \delta$, δ 是一个小量. 从而可得机器人在未知平面上运动的质心速度波动幅值最小的情况发生在 $K_n = 1$ 时的概率要远远大于 $K_n < 1$ 时.

根据上述分析获得结论 3: 在未知摩擦系数的平面上, $K_n = 1$ 时, 质心速度波动幅值最小的概率最大.

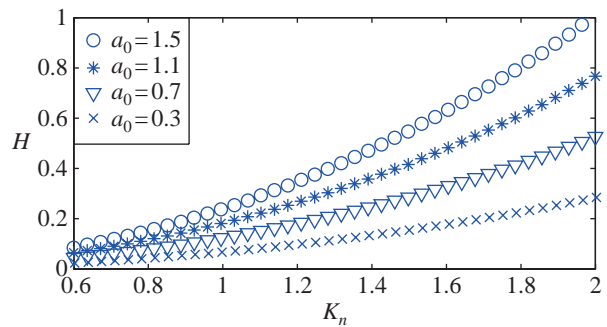


图 3 H 与 K_n 的关系

Fig.3 The relationship between H and K_n

4 质心速度跟踪控制方法 (Tracking control method of the centre-of-mass velocity)

本研究中, 蛇形机器人蜿蜒运动的步态生成方法采用关节角度控制方法. 实现质心速度跟踪期望速度要控制质心速度稳定性和质心速度值, 而这 2 个性能在自调节过程中会相互影响, 改变速度值的

过程中影响速度稳定性, 而调节速度稳定性又会影响速度值. 为了便于控制器设计, 本研究固定其中一个性能, 而使另外一个性能具有自调节能力. 由于质心速度能否到达期望速度(质心速度值)是影响误差总量的主要因素, 而且稳定性研究中已获得质心速度稳定概率最大的 K_n 值, 因此本研究将 K_n 作为常数, 即 $K_n = 1$, 而通过 ω 的自适应调节使质心速度达到期望速度. 因此, 需对 $K_n = 1$ 时的质心速度值进行控制方法设计.

4.1 基于连续体模型的质心速度控制方法

根据式(1)可知, 当无侧滑时, 头部的平均速度为

$$\bar{v}_h = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (22)$$

式中, $\omega = \frac{2K_n\pi}{T}$, $\omega_0 = \frac{2K_n\pi}{L}$.

$K_n = 1$ 时, 当头部在点 H 时, 质心在点 P , 尾部在点 O ; 当头部运动到 H' 时, 质心在点 P' , 尾部在点 H , 如图4所示. 由于 $K_n = 1$, 头部运动曲线长度为 $S_1 = L$. 由于 $K_n = 1$, 连续体为一个“S”整波, 根据式(9)可知质心始终在 X 轴上, 质心运动的距离 S_2 等于一个周期头部在 X 轴上的位移, 也等于当头部在点 H' 时头部与尾部在 X 轴的投影差, 因此

$$S_2 = x(S_1) = \int_0^{S_1} \cos\theta(r,t)dr \quad (23)$$

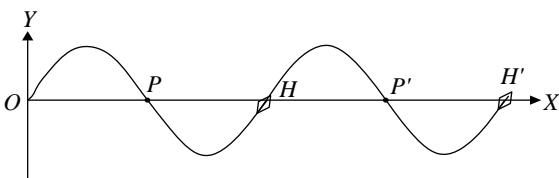


图4 运动轨迹简图

Fig.4 The sketch of trajectories

当运动参数确定时, $S_2 = \lambda S_1$, λ 可确定. 运动的时间为 T , 因此 $\frac{S_1}{\bar{v}_h} = \frac{\lambda S_1}{\bar{v}_m}$, 其中 \bar{v}_m 是质心平均速度, 从而 \bar{v}_h 和 \bar{v}_m 存在一个固定关系:

$$\bar{v}_m = \lambda \bar{v}_h \quad (24)$$

由于 $K_n = 1$ 时质心速度稳定, 所以 $\bar{v}_m = v_m$. 根据式(22)和式(24)得质心速度与控制参数间的关系:

$$v_m = \lambda \frac{\omega}{\omega_0} \quad (25)$$

式中, $\omega_0 = \frac{2\pi}{L}$ 为常值, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 存在可变参数 T , 因此可通过调节 T 改变质心运动速度 v_m , 从而可

得蛇形机器人无侧滑时质心以期望速度 v_{mref} 运动的控制参数 T 为

$$T^* = \frac{\lambda L}{v_{mref}} \quad (26)$$

4.2 质心速度跟踪控制律

根据前面的研究可知, $T^* = \frac{\lambda L}{v_{mref}}$ 使蛇形机器人连续体模型在无侧滑情况下质心速度跟踪期望速度. 但由于连续体模型的近似化, 以及实际运动侧滑的不确定性, 式(26)开环控制会导致实际运动出现误差. 为了减少误差, 基于上述理论分析设计闭环控制器.

具体控制算法设计如下: 1) 将 K_n 设为常数, 设置原则是使蛇形机器人稳定概率最高, 即 $K_n = 1$; 2) 以理想值 ω^* 为 ω 的初始值, 通过速度反馈使 ω 随实际运动情况而左右调节, 如式(27)所示.

$$\omega = \omega^* + \int \Gamma(v_{mref}, v_m) dt \quad (27)$$

式中, $\Gamma(v_{mref}, v_m) = \begin{cases} 0.01, & v_{mref} > v_m \\ 0, & v_{mref} = v_m \\ -0.01, & v_{mref} < v_m \end{cases}$, 角频率

调整时间间隔为 $\Delta\epsilon$, 大于控制量 $q_i(t)$ 输入的时间间隔, $\omega^* = \frac{2K_n\pi}{T^*}$, $K_n = 1$, $T^* = \frac{\lambda L}{v_{mref}}$.

根据正弦曲线理论可知 ω 的改变会使关节角度发生突变, 为了避免角度突变, 采用相位差进行补偿调节, 既不影响 $K_n = 1$, 又不影响后续运动的 ω , 因此相位差不会影响质心速度跟踪期望速度.

综上所述, 提出蛇形机器人蜿蜒运动质心速度跟踪期望速度的关节角度控制方法为

$$q_i(t) = -2a_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{n}i - \phi(t))\right) \quad (28)$$

式中, $\phi(t)$ 是相位差, 用于消除角频率变化带来的角度突变. 设连续3次角频率调整分别发生在 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻, 当 $t_1 \leq t < t_2$ 时, $\phi(t) = \phi(t_1)$, 当 $t_2 \leq t < t_3$ 时, $\phi(t) = \phi(t_2)$, 其中 $\phi(t_2) = \omega(t_2)t_2 - \omega(t_1)t_2 + \phi(t_1)$, 而初始值 $\phi(0) = 0$, 因此 $\phi(t)$ 可由递推方法获得.

上述控制律通过设定常值 $K_n = 1$ 保证在摩擦系数未知的平面上机器人运动过程中质心速度稳定概率最大. 通过设定 ω 初值为 $\omega^* = \frac{2\pi}{T^*}$ 保证机器人质心速度在形成第1个运动波形时质心速度的理论值达到期望速度, 为机器人质心速度快速达到期望速度奠定基础. 通过控制参数 $\Gamma(v_{mref}, v_m)$ 消除模型近似和侧滑概率等因素带来的速度误差. 最终实现蛇形机器人蜿蜒运动的质心速度跟踪期望速度.

5 仿真实验 (Simulation)

基于 ODE (Open Dynamics Engine) 仿真实验平台对控制方法进行仿真验证. 仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数
Tab.1 The parameters in simulations

参数	符号	值
模块数	n	10
模块长度	l	0.08 m
模块质量	m_i	0.50 kg
初始关节角度	$q_i(0)$	0 rad
控制参数	a_0	0.3 rad

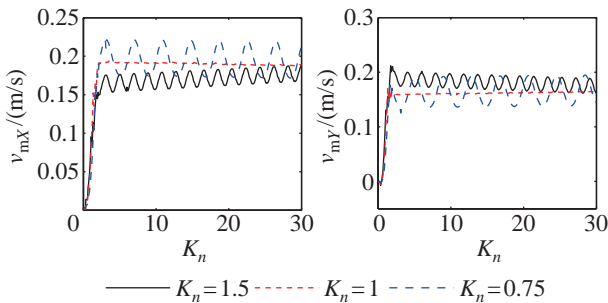


图 5 $v_{mref} = 0.25$ m/s、 $K_n = 1.5, 1, 0.75$ 时质心速度在 X 轴和 Y 轴方向的分量

Fig.5 The centre-of-mass velocity components along X axis and Y axis when $v_{mref} = 0.25$ m/s and $K_n = 1.5, 1, 0.75$

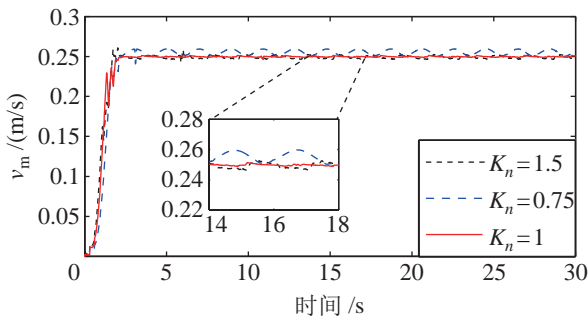


图 6 $v_{mref} = 0.25$ m/s、 $K_n = 1.5, 1, 0.75$ 时蛇形机器人的质心速度

Fig.6 The centre-of-mass velocity of the snake-like robot when $v_{mref} = 0.25$ m/s and $K_n = 1.5, 1, 0.75$

首先, 将环境参数设为 $\mu_n = 0.5$, $\mu_t = 0.0012$ (摩擦系数用于搭建仿真环境, 不用于设置控制参数), $v_{mref} = 0.25$ m/s, K_n 设置为 1.5、1、0.75, 蛇形机器人的质心速度在 X 轴、Y 轴方向的分量和质心速度随时间变化情况分别如图 5、6 所示. 质心速度的变化过程: 由于机器人初始形状呈直线, 运动开始时刻速度为 0, 在 1 个周期内, 随着身体形状接近控制参数初始值, 质心速度也接近期

望速度, 再经过控制参数 Γ 的微调节最终使质心速度达到期望速度 v_{mref} . v_m 曲线说明: 1) ω 的自调节方法能够使蛇形机器人质心速度达到期望速度; 2) 对于不同的 K_n , 蛇形机器人的质心速度都能达到期望速度, 但质心速度的波动幅值 A_v 存在差异: $A_v(K_n = 0.75) > A_v(K_n = 1.5) > A_v(K_n = 1)$, 这一关系与理论分析相符合; 3) $K_n = 1$ 时速度的方向 $\theta_m = \arcsin \frac{\dot{y}_m}{v_m}$ 在稳定运动后基本不变, 即质心轨迹接近于直线形, 说明研究质心速度较研究头部速度更有利于提高运动时间的可控性.

为了进一步验证所提方法中 K_n 设置的有效性, K_n 分别设置为 0.6, 0.7, ..., 1.9, 2 共 15 个值, $v_{mref} = 0.28$ m/s, $\mu_n = 0.3$, $\mu_t = 0.0012$, 质心速度与期望速度的误差 $A_{err} = |v_{max} - v_{mref}| + |v_{mref} - v_{min}|$ 如图 7 所示, 数据变化显示: 1) 当 $K_n \leq 1.5$ 时 A_{err} 随着 K_n 的变化趋势接近于结论 1; 2) 当 $K_n > 1.5$ 时 A_{err} 大于 $1 < K_n < 1.5$ 时的 A_{err} , 出现这种现象的原因是, 对于法向摩擦力有限的地面, K_n 的增加导致连杆侧滑, 侧滑影响了质心速度的稳定性, 即与结论 2 相符合; 3) A_{err} 的最小值出现在 $K_n = 1$ 时, 与结论 3 相符合.

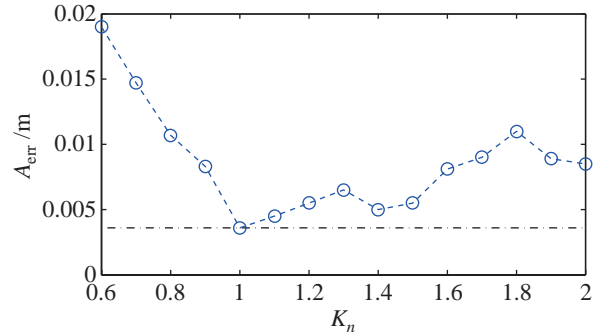


图 7 $v_{mref} = 0.25$ m/s、 $K_n \in [0.6, 2]$ 时蛇形机器人的质心速度误差

Fig.7 The centre-of-mass velocity error of the snake-like robot when $v_{mref} = 0.25$ m/s and $K_n \in [0.6, 2]$

适应性体现在机器人在不同的平面上运动时质心速度能够跟踪期望速度. 由于切向摩擦系数远小于法向摩擦系数, 因此法向摩擦力对机器人的运动起主要作用. 图 8 显示了在不同的法向摩擦系数的平面上, $v_{mref} = 0.25$ m/s、 $K_n = 1$ 时机器人质心速度达到期望速度后 30 s 内质心速度的平均值 v_{mave} 和质心速度与期望速度的误差 A_{err} . 图中曲线显示: 当法向摩擦系数大于 0.2 时, 误差 A_{err} 在 [0.0029, 0.0032] 范围内, 而当法向摩擦系数小于 0.2 时, 速度平均值无明显变化而误差却增大. 这是因为: 当法向摩擦力太小而无法支撑连杆摆动时, 机器人产

生侧滑, 侧滑影响了速度的稳定性, 误差是由速度稳定性降低导致的, 而质心速度仍然可以达到期望速度.

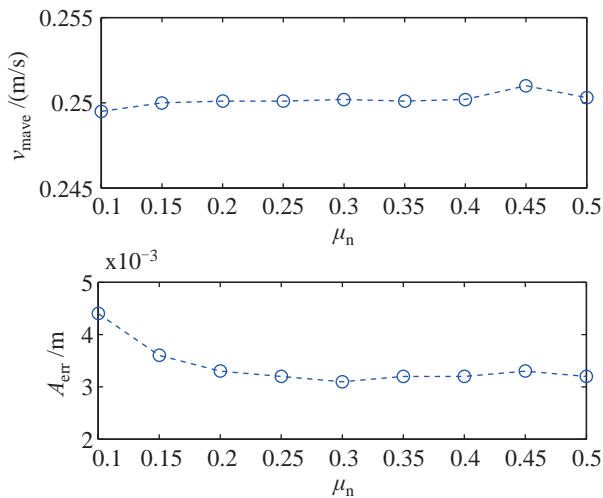


图 8 当 $v_{mref} = 0.25$ m/s、 $K_n = 1$ 时蛇形机器人在不同地面上运动的质心速度平均值和速度误差

Fig.8 The average value of centre-of-mass velocity and the velocity error when $v_{mref} = 0.25$ m/s, $K_n = 1$, and the friction coefficient is different

同时, 适应性也体现在控制方法能够使机器人的质心速度跟踪不同的期望速度. 图 9 显示了 v_{mref} 不同时, 蛇形机器人质心速度随时间的变化情况. 质心速度的变化情况显示该方法能使蛇形机器人质心速度跟踪不同的期望速度. 综上所述, 本研究提出的控制方法实现了在未知平面上蛇形机器人蜿蜒运动的质心速度跟踪期望速度.

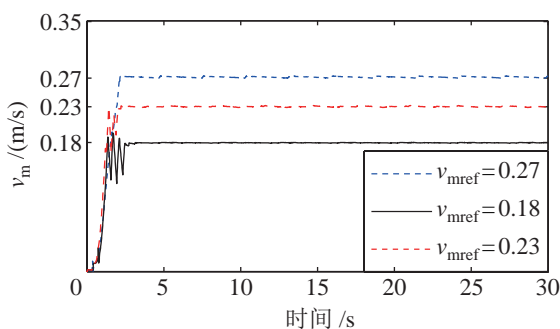


图 9 蛇形机器人质心速度

Fig.9 The centre-of-mass velocity of the snake-like robot

6 结论 (Conclusion)

本文为了实现蛇形机器人在蜿蜒运动时质心速度跟踪期望速度, 提出一种关节角度控制方法. 该方法结合基于连续体模型的动力学方程和侧滑概率, 获得在摩擦系数未知的平面上使机器人蜿蜒运动质心速度稳定概率最大的控制参数; 通过连续体

模型分析, 获得当蛇形机器人进行无侧滑蜿蜒运动时质心速度跟踪期望速度的控制参数, 并通过速度反馈对该控制参数进行微调节, 最终实现蛇形机器人在未知摩擦系数的平面上通过调节关节角度使质心速度达到期望速度, 并以较小的误差跟踪期望速度. 未来将基于连续体模型研究蛇形机器人蜿蜒运动的其他运动性能, 如运动方向, 并搭建机器人平台进行实验研究与分析.

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Yu S M, Ma S G, Li B, et al. An amphibious snake-like robot with terrestrial and aquatic gaits[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 2960-2961.
- [3] Zhang A F, Ma S G, Li B, et al. Adaptive controller design for underwater snake robot with unmatched uncertainties[J]. Science China: Information Sciences, 2016, 59(5): No.052205.
- [4] Nor N M, Ma S G. A simplified CPGs network with phase oscillator model for locomotion control of a snake-like robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 75(1): 71-86.
- [5] 唐超权, 马书根, 李斌, 等. 具有环境适应能力的蛇形机器人仿生控制方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 647-663.
- [6] Tang C Q, Ma S G, Li B, et al. The study of snake robots biomimetic control method with the environments adaptability [J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(5): 647-663.
- [7] 卢振利. 基于循环抑制 CPG 的蛇形机器人运动控制方法 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2007.
- [8] Lu Z L. CI-CPG based locomotion control methods for snake-like robots[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [9] Yang G Z, Ma S G, Li B, et al. A hierarchical connectionist CPG controller for controlling the snake-like robot's 3-dimensional gaits[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 822-827.
- [10] Nor N M, Ma S G. Body shape control of a snake-like robot based on phase oscillator network[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 274-279.
- [11] Date H, Takita Y. An electricity-free snake-like propulsion mechanism driven and controlled by fluids[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 3637-3642.
- [12] 郭宪, 王明辉, 李斌, 等. 基于最小无穷范数的蛇形机器人最优力矩控制 [J]. 机器人, 2014, 36(1): 8-13.
- [13] Guo X, Wang M H, Li B, et al. Optimal torque control of a snake-like robot based on the minimum infinity norm[J]. Robot, 2014, 36(1): 8-13.
- [14] 王智锋. 蛇形机器人的动力学模型与其蜿蜒运动控制方法研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2011.
- [15] Wang Z F. Dynamic model of snake-like robots and control method of serpentine locomotion[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2011.

- [12] 张丹凤. 基于能量平衡的蛇形机器人被动蜿蜒步态研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2015.
Zhang D F. Study on the passive creeping of a snake-like robot based on energy balance[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [13] 郭宪, 马书根, 李斌, 等. 基于动力学与控制统一模型的蛇形机器人速度跟踪控制方法研究 [J]. 自动化学报, 2015, 41(11): 1847-1856.
Guo X, Ma S G, Li B, et al. Velocity tracking control of a snake-like robot with a dynamics and control unified model[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(11): 1847-1856.
- [14] Saito M, Fukaya M, Iwasaki T. Serpentine locomotion with robotic snakes[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(1): 64-81.
- [15] Date H, Takita Y. Control of 3D snake-like locomotive mechanism based on continuum modeling[C]//ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. New York, USA: ASME, 2005: 1351-1359.
- [16] Liljeback P, Pettersen K Y, Stavdahl O, et al. Fundamental properties of snake robot locomotion[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 2876-2883.
- [17] Guo Z V, Mahadevan L. Limbless undulatory propulsion on land[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(9): 3179-3184.
- [18] Watanabe K, Iwase M, Hatakeyama S, et al. Control strategy for a snake-like robot based on constraint force and verification by experiment[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 1618-1623.
- [19] Yamada H, Hirose S. Steering of pedal wave of a snake-like robot by superposition of curvatures[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 419-424.
- [20] 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: 仿生机器人, 机器人控制方法与路径规划.
- 李斌 (1963-), 男, 硕士, 研究员. 研究领域: 仿生机器人, 移动机器人, 机器人控制.
- 王立岩 (1980-), 女, 博士, 讲师. 研究领域: 优化算法.

(上接第 828 页)

- [5] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
- [6] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[M]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, USA: MIT Press, 2012: 1097-1105.
- [7] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [8] Varley J, Weisz J, Weiss J, et al. Generating multi-fingered robotic grasps via deep learning[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 4415-4420.
- [9] Johns E, Leutenegger S, Davison A J. Deep learning a grasp function for grasping under gripper pose uncertainty[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 4461-4468.
- [10] Lenz I, Lee H, Saxena A. Deep learning for detecting robotic grasps[J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34(4/5): 705-724.
- [11] Ren S Q, He K M, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [M]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, USA: MIT Press, 2015: 91-99.
- [12] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 580-587.
- [13] Uijlings J R R, van de Sande K E A, Gevers T, et al. Selective search for object recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 104(2): 154-171.
- [14] Girshick R. Fast R-CNN[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1440-1448.
- [15] Zeiler M D, Fergus R. Visualizing and understanding convolutional networks[C]//13th European Conference on Computer Vision. Berlin, German: Springer, 2014: 818-833.
- [16] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[A/OL]. (2015-04-10) [2017-04-18]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556v6>.

作者简介:

- 杜学丹 (1991-), 女, 硕士生. 研究领域: 控制工程, 计算机视觉.
- 蔡莹皓 (1983-), 女, 博士后, 副研究员. 研究领域: 机器学习, 模式识别, 计算机视觉.
- 鲁涛 (1979-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 智能机器人, 机器学习, 机器人控制.