爬壁蠕虫机器人构型初探

王 巍 王 坤 李大寨 宗光华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 根据松毛虫和尺蠖蠕动前行的特点以及仿生学原理,基于模块化思路分别提出了松毛虫和尺蠖爬壁机器人运动学构型.针对两种模型,讨论比较了它们的安全性和可用步态.通过分析松毛虫的蠕动步态和尺蠖步态,发现基于全主动关节驱动的松毛虫模型中存在冗余驱动问题.但由于松毛虫模型具有更多的可用步态,因此比尺蠖模型具有更高的安全性.这两种模型的样机由若干吸附模块和关节模块构成,以验证两种蠕虫机器人的爬壁能力.试验表明由于松毛虫机器人运动时存在冗余驱动,导致吸盘出现侧滑力,同时验证了尺蠖机器人在竖直壁面上的爬壁能力.为了进一步改进尺蠖机器人的吸附能力,采用了一种非对称的运动步态.

关 键 词: 爬壁机器人; 蠕虫; 模块; 构型

中图分类号: TP 206^{+}. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0251-05

Basic research on configuration of climbing worm robot

Wang Wei Wang Kun Li Dazhai Zong Guanghua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Two novel module climbing caterpillar kinematics models according to the vermicular motion of the pine caterpillar and inchworm were presented. The differences of two models were indicated after the analysis of the valid gaits and climbing safety of them. Although the pine caterpillar model with all active joints introduces the redundant actuating to its locomotion but it has higher security than the inchworm model because of its more valid gaits. Two prototypes following the above two models were respectively constructed from some newly developed real adhesion and actuation modules to testify the climbing abilities of two caterpillar-like robots. The experiments show the sideslip of the suckers on the pine caterpillar robot induced by the redundant actuating and the locomotion ability of the inchworm robot on vertical wall. Besides that, an unsymmetrical gait was adopted by the inchworm robot to improve its adhesion reliability on the wall.

Key words: climbing robot; worm; module; configuration

小型爬壁机器人具有轻巧、低功耗、低危险性等特点,因此被广泛应用于建筑检测、城市搜救以及对未知环境的探测等[1-4].但由于其工作表面大多为复杂曲面,并需要克服重力,已有的爬壁机器人很难兼顾结构轻巧和运动灵活.

前期工作中[1],在ZC-1爬壁蠕虫机器人中引入了模块化的概念.为了简化吸附机构,ZC-1采用了一种新的吸附方式——振动吸附.该蠕虫机器人的结构和步态与普通的地面蛇形模块化机器人类似,不同的是吸盘与吸附表面是固定约束.这使得该机器人的运动问题具有特殊性,应该在设计结构和控制中予以考虑.然而,由于蛇形机器人和蠕虫机器人与壁面的约束方式不同[5-7],它们之间又有如下主要不同点:①驱动力不同.蛇形机器人在地面上爬行,靠身体与地面的摩擦力推动机器人前进.蠕虫机器人在竖直壁面上爬行,必须

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50605001);国家863计划资助项目(2006AA04Z250)

作者简介: 王 巍(1973-),男,湖北宜昌人,副教授,wangweilab@buaa.edu.cn.

吸附在壁面上,否则会从壁面上脱落.因此蠕虫机器人的驱动力来自于固定约束. ②运动步态不同.蛇形机器人可以采用多种步态爬行,例如蜿蜒和翻转等,而蠕虫机器人只可采用蠕动方式前进. ③模块不同.蠕虫机器人需要吸附模块,而蛇形机器人不需要.

为了简化问题,本文在如何简化吸附模块上不作深入讨论,而重点分析如何从众多的蠕虫构型中抽象出蠕虫机器人的运动规律,并对其特点进行分析.此项研究具有开拓性,目前尚没有类似的可在壁面上蠕动爬行的机器人.

1 2种蠕虫构型的运动学分析

从运动学的角度看,蠕虫有 2种运动构型,典型代表是尺蠖和松毛虫.引入模块化概念,这 2种构型可以看成吸附模块和关节模块的组合,不同的数量和连接方式决定了不同的运动构型.为了分析其运动,将吸附模块简化成图示△,关节模块简化成—.2个吸附模块之间至少含有 1个关节模块,否则 2个吸附模块可简化为 1个吸附模块.

1.1 松毛虫及其运动构型

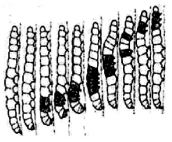
松毛虫主要由头部、尾部、躯干以及一些假足构成.爬行时头部与尾部协调保持整体的平衡,躯干起着推进器的作用,图 1所示为松毛虫的照片及其构型.



图 1 松毛虫及构型

松毛虫在爬行时,首先抬起尾部,收缩尾部肌肉,使尾部前进一定距离后放下尾部;紧接着,抬起与尾部相邻躯干上的假足,收缩躯干肌肉,放下假足.假足按一定序列抬起和落下,即可将波形沿着毛虫躯干向头部传递.当波形传递到头部,一个运动周期就完成了,毛虫向前爬行了一个步距.图 2所示为上述运动过程及其运动构型.

如图 2所示,松毛虫的运动特点包括以下 2方面:①运动中任一时刻都有 2个以上吸附模块(假足)与壁面吸附;②运动中有明显的波形传递过程.



色部分表示肌肉为自由状态,黑色部分表示肌肉为拉伸状态.

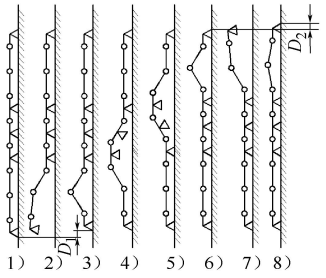


图 2 松毛虫运动步态

1.2 尺蠖及其运动构型

尺蠖也由头部、尾部和躯干组成,与松毛虫不同的是,它的躯干部分并没有假足.图 3所示为尺蠖的照片及其构型.

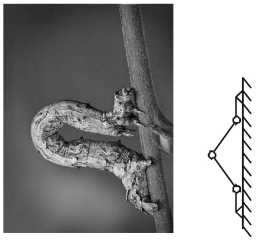
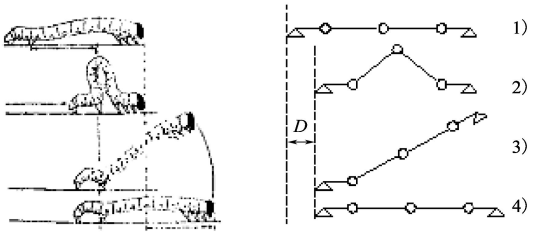


图 3 尺蠖及其构型

由于身体结构比较简单,尺蠖的爬行也相对简单些.在爬行时,它先抬起尾部,收缩躯干,使尾部前进一定的距离后放下尾部,再抬起头部,伸展躯干,使头部前进一定的距离后放下头部,如此实现前行.图 4所示为尺蠖的运动构型.其步态特点如下:①运动时只有单个吸附模块与壁面吸附;②没有沿躯体的完整波形传递过程.



a 尺蠖行走 b 运动构型

图 4 尺蠖运动步态

2 2种运动构型的特点

2.1 运动链

松毛虫的运动步态如图 2所示.运动初始,尾

部被 3个关节模块抬起和放下,产生一个驱动步距 D_1,此时这几个关节模块处于开链状态. 运动结束,3个关节模块驱动头部运动,使之产生最终步距 D_2,同样是一个开链状态. 而当头部和尾部同时与壁面接触时,其余关节模块处于闭链状态,如图 2的 3)～6). 由图 2可知,闭链运动中自由度数为 2,而主动关节数为 5,所以闭链状态存在冗余驱动. 由于结构和控制上的误差,会在机器人内部产生内力,其大小与关节转矩有关. 这些内力最终会作用在吸盘上,使吸盘产生侧滑趋势. 冗余驱动不利于机器人的可靠吸附,这将在后续的试验中得以验证.

如图 4所示,尺蠖没有中间假足,所以它的步态比松毛虫简单. 只要 2个吸附模块和 3个关节模块即可实现尺蠖机器人在壁面上的单向连续爬行,因此图 3所示为最简单的尺蠖构型. 与图 2的松毛虫构型对比可知,尺蠖构型只是松毛虫构型的一部分.

尺蠖构型具有 3个自由度,运动中它始终处于开链状态,由于没有冗余驱动和内力的影响,控制相对简单.

2 2　步态安全性

对于爬壁机器人来说,安全可靠是最重要的因素. 由于松毛虫机器人具有较多的有效吸附模块,因此它的可选步态比尺蠖机器人多,吸附能力也比尺蠖机器人更加可靠. 这一点由图 5即可看出. 在图 5所示的简化松毛虫构型中,中间躯干部分只有 1个吸附模块. 图 5所示为与图 2中 4)和 7)两步对应的 2个危险状态.

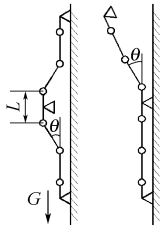


图 5　松毛虫构型的危险状态

假设松毛虫机器人和尺蠖机器人采用相同的吸附模块和关节模块,其重量分别由 G_a 和 G_j 表示,L 为模块长度,θ为最大关节转角. 对处于吸附状态的吸附模块来说,最危险的负载是侧滑力和翻转力矩.

图 5所示的 2种状态,吸附模块上承受的侧滑力 F_p 由式 (1)确定,承受的翻转扭矩 M_{p1}和 M_{p2} 分别由式 (2)和式 (3)确定.

$$F_p = 3G_j + 1.5G_a \quad (1)$$

$$M_{p1} = (1.5G_j + 0.5G_a)/(L\sin\theta) \quad (2)$$

$$M_{p2} = (G_j + 1.25G_a)/(L\sin\theta) \quad (3)$$

图 4b所示的尺蠖机器人运动构型中,一端抬起的状态为危险状态. 侧滑力和翻转扭矩 F_i 和 M_i 分别由式 (4)和式 (5)确定.

$$F_i = 3G_j + 2G_a \quad (4)$$

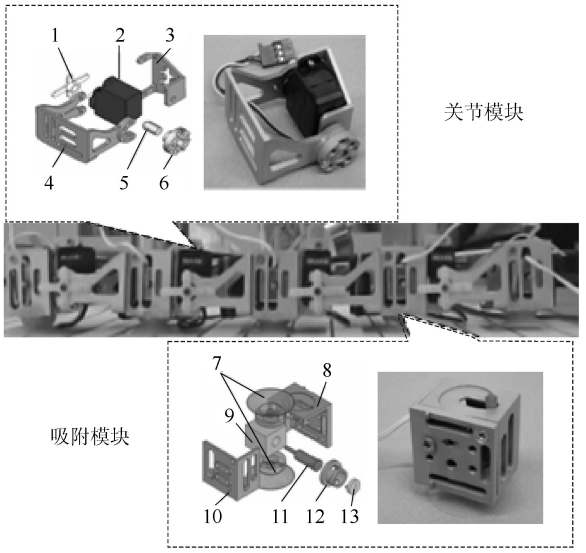
$$M_i = (2G_j + 2.5G_a)/(L\sin\theta) \quad (5)$$

显然,F_i 和 M_i 的值分别大于 F_p,M_{p1}和 M_{p2}的值.

图 5所示的松毛虫构型中,躯干部分只含有 1个吸附模块,图 2所示的松毛虫构型中,躯干部分的吸附模块较多,因此图 2所示的步态更安全. 对于尺蠖机器人来说,它的躯干部分没有吸附模块,且只有一种可选步态,因此其安全性完全受吸附能力的限制. 根据以上分析,可以得出如下结论:①松毛虫机器人可实现比尺蠖机器人更安全的运动步态;②尺蠖机器人不存在冗余驱动,因此控制简单;③尺蠖构型是松毛虫构型的头部或尾部,是最简单的松毛虫构型.

3　模块化机器人样机

为了验证以上分析的正确性,本文利用吸附模块和关节模块构造了 2台机器人样机,2种模块的结构如图 6所示. 关节模块由舵机驱动,吸附模块由被动吸盘和放气机构组成. 其各项特性如表 1所示.



1—舵盘;2—舵机;3—支架 Ⅰ;4—支架 Ⅱ;5—短轴;6—轴套;7—吸盘;8—外壳 Ⅰ;9—电磁铁;10—外壳 Ⅱ;11—铁芯;12—套筒;13—挡片.

图 6　松毛虫机器人躯干部分

按照前述分析,尺蠖构型为松毛虫构型的头部或尾部,按照这一原则装配了 2台样机. 图 6所示的松毛虫机器人躯干部分,由 4个关节模块和

5个吸附模块组成,用来测试波形沿松毛虫躯干向前传递时所产生的位移,以及冗余驱动对机器人的影响.图 7所示的尺蠖构型是松毛虫构型的最简形式,2个吸附模块分别为头部和尾部,3个关节模块串联组成躯干部分.

表 1 模块特性

模块	规格	参数
关节模块	尺寸:长×宽×高	35 mm×37 mm×30 mm
	质量	19.2 g
	最大输出扭矩	0.2 N·m
	转角	0～180°
吸附模块	尺寸:长×宽×高	26 mm×32 mm×20 mm
	质量	27.8 g
	最大吸附力	40 N
	最大允许侧滑力	15 N
	最大允许翻转扭矩	0.1 N·m

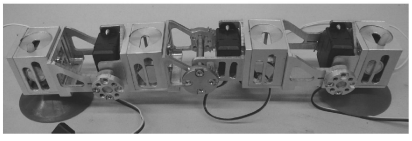


图 7 尺蠖机器人样机

4 试 验

4.1 松毛虫构型躯干部分试验

试验时,使松毛虫躯干部分与壁面处于非吸附状态,以便更好地观察吸盘滑动现象.运动初始时,躯干处于开链状态,所有关节按正弦步态[1]驱动以产生运动波形.当由开链变成闭链时,即首尾两端吸盘吸附时,各个关节模块开始采用闭链运动算法进行控制,其目的是为了减小冗余驱动对躯干部分的影响.

图 8所示为躯干部分的闭链运动模型,为了阐述的方便,图中只画出首尾 2个吸盘,中间部分的吸盘没有画出.因为中间吸盘虽然参与运动,但它们的运动不影响各个关节的转角变化,并不对关节的运动产生约束关系.随着关节的转动,中间吸盘一旦与壁面接触,则立刻与壁面吸附.中间吸盘逐次与壁面吸附,由此可以将波形向前传递.

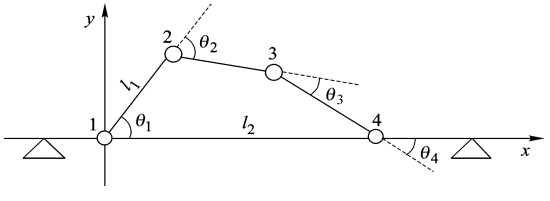


图 8 闭链运动模型

假设左侧吸盘为尾部,关节 1为主动关节,它按照式 (6)的正弦波控制.为了避免右侧头部吸盘发生滑动,一旦尾部吸盘与壁面接触,其它 3个关节按照闭链运动模型进行控制,其控制函数为式 (7)～式 (9).

$$\theta = \sin\omega t \tag{6}$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \arctan\frac{l_1\sin\theta_1}{l_2 - l_1\cos\theta_1} - \arccos\frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2\cos\theta_1}}{2l_1} \tag{7}$$

$$\theta_3 = 2\arccos\frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2\cos\theta_1}}{2l_1} \tag{8}$$

$$\theta_4 = \arctan\frac{l_1\sin\theta_1}{l_2 - l_1\cos\theta_1} + \arccos\frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2\cos\theta_1}}{2l_1} \tag{9}$$

图 9所示为试验照片,从中可得出以下结论:

1) 松毛虫躯干部分可以传递一个完整波形,并向前蠕动产生一个步距.

2) 状态 ②～④为躯干的闭链状态,且尾部吸盘固定.在状态 ③头部吸盘向前移动,在状态 ④又回到原始位置,即头部吸盘在闭链运动中发生了滑动现象.这表示内力或吸盘滑动现象并没有完全消除.

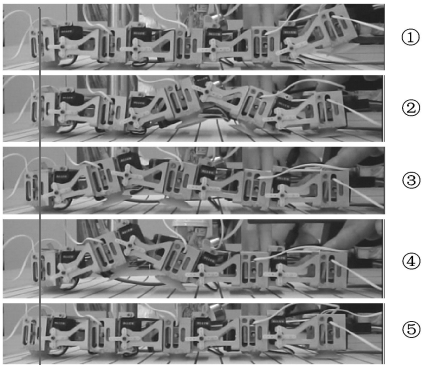


图 9 松毛虫躯干部分样机试验

4.2 尺蠖样机试验

图 4所示为尺蠖的运动步态.在试验中,为了确保机器人可靠地吸附,本文采用了一种非对称关节控制方法.在详细叙述之前,定义关节的 2个运动状态:抬起相,此时吸盘被抬起;下压相,吸盘被压向壁面.

当关节处于抬起相时,尺蠖机器人处于单吸盘吸附状态.为了减小抬起吸盘时的关节加速度,提高单吸盘吸附状态下的安全性,抬起相速度应较低.

为了减小落地冲击,在步行机器人中通常会采用减小落地速度的关节控制方法.因此,似乎尺

蠖机器人也可采用较低的下压相速度放下吸盘.但是分析发现,对于采用被动吸盘的爬壁尺蠖,吸盘与壁面接触时的冲击力却利于有效压缩吸盘,具体分析如下.

首先,定义 2种关节控制方法: ①对称相控制:关节下压相速度等于抬起相速度; ②非对称相控制:关节下压相速度远大于抬起相速度. 2种方法中抬起相速度相等,且为慢速运动,可忽略抬起相运行中的冲击力.

当采用对称相方法时,吸盘被慢速压下,如图 4中的状态 3)和 4),壁面作用在吸盘上的冲量几乎为 0,则吸盘变形力为 F_1完全来自于关节转矩,如式 (10)所示.

$$F_1 = M/L \qquad (10)$$

其中 M为舵机额定转矩.

当采用非对称相方法时,吸盘与壁面接触所受的力 F由式 (11)确定.

$$F = F_1 + F_2 = M/L + J\omega/t \qquad (11)$$

其中, F_2为吸盘所受的冲力; J为所有运动模块的转动惯量;ω为关节角速度; t为冲击时间.

显然,当冲击时间 t很小的时候, F远远大于 F_1. 对被动吸盘来说,较大的正压力意味着更大的形变量和更稳定的吸附. 图 10所示为试验中使用对称相和非对称相两种方法时的关节控制曲线.

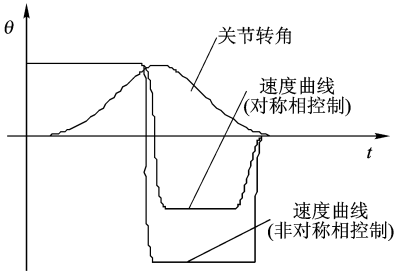


图 10　关节控制曲线

试验中,采用对称相控制时,尺蠖机器人不能在壁面上连续爬行,原因是吸盘没有达到足够的形变量. 当采用非对称相控制时,尺蠖机器人可以连续爬行. 图 11所示为尺蠖机器人采用非对称相控制时,向上爬行一个步距的试验照片.

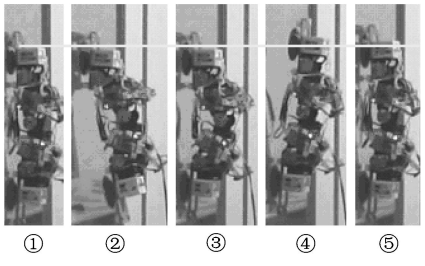


图 11　尺蠖非对称步态试验照片

5　结　论

1) 通过对 2种构型的分析发现,松毛虫构型具有运动中结构稳定、安全裕度高的优点,但是爬行过程中有严重的冗余驱动和力干涉现象,增加了步态控制的难度;

2) 三自由度的尺蠖构型是一种结构最简的爬壁蠕虫构型,同时也是松毛虫构型的首尾单元,其在运动中始终处于开式链状态,不存在力干涉现象,易于实现稳定爬行,但是运行中只有一组吸盘吸附,安全裕度低;

3) 试验验证了松毛虫构型躯干部分在运动中力干涉造成的吸盘打滑现象,也验证了尺蠖构型实现稳定直线爬行的能力,同时利用非对称步态有效提高了尺蠖机器人的吸附可靠性.

在后续工作中,需要讨论如何利用被动关节构造无冗余驱动的松毛虫构型,讨论关节配置方法和相应的步态,以及运行过程中吸盘上侧滑力变化情况. 利用试验验证被动关节在松毛虫构型中的可行性;同时将本文中的松毛虫躯干运动与尺蠖步态综合,形成完整的松毛虫步态,并进行试验验证. 另外,需要讨论转向关节的配置方法,实现可全向运动的蠕虫构型.

参考文献 (References)

[1] Zhang Houxiang, Gonzalez-Gomez J, Chen S Y, et al. A novel modular climbing caterpillar using low-frequency vibrating passive suckers[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 4412523

[2] Wu Shanqiang, Li Mantian, Xiao Shu, et al. A wireless distributed wall climbing robotic system for reconnaissance purpose [C]//2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1308 - 1312

[3] Pack R T, Christopher J L Jr, Kawamura K. Rubbertuator-based structure-climbing inspection robot[C]//Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1997, 3: 1869 - 1874

[4] Zhang Houxiang, Zhang Jianwei, Liu Rong, et al. Realization of a service robot for cleaning spherical surfaces[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005, 2(1): 53 - 58

[5] Hirose S. Biologically inspired robots (snake-like locomotor and manupultor) [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993

[6] Klaassen B, Paap K L. GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, 4: 3014 - 3019

[7] Ijspeert A J. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander[J]. Biological Cybernetics, 2001, 85(5): 331 - 348