

湿吸仿生爬壁机器人分层控制系统

何斌, 周艳敏, 黎明和, 秦海燕

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

摘要: 湿吸原理的六足机器人具有结构相对复杂, 控制输出多, 动作协调困难等特点. 基于仿生学原理, 提出一种基于这种爬壁机器人的多层控制系统, 提出系统设计方案, 并对系统设计进行实验验证. 根据 Saridis 的分级递阶智能控制思想理论, 结合实际控制要求, 提出了适合湿吸仿生爬壁机器人的独特的分层控制系统, 并且从控制理论的角度详细介绍了该类系统各层次的设计要求及实现方法. 实验结果表明, 该控制系统设计不仅能够满足机器人爬壁行走的控制要求, 而且能控制机器人肢节末端良好的与壁面接触, 节律运动执行速度快, 多层次模块化的设计有利于控制系统的进一步扩展.

关键词: 爬壁机器人; 阻抗控制; 节律控制; 三角步态

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

Control System Design and Realization of Wet Adhesion Wall-climbing Bio-robot

HE Bin, ZHOU Yanmin, LI Minghe, QIN Haiyan

(College of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Hexapod wall-climbing bio-robot based on wet adhesion principle is characterized by a complex structure with more control outputs and being more difficult to coordinate the action. Based on bionic principles, a hierarchical control system and its design were proposed, the design was verified with experiments. Based on Saridis' hierarchical intelligent control theory in combination with practical control requirements, a special hierarchical control system suitable for this wet adhesion wall-climbing robot was established; then, control levels of this robot were precisely introduced, and designs of main levels were analyzed. Experiment results show that this system can meet the wall-climbing control requirements of the robots, and it can also control a good contact between the robot's limb ends and the climbing surface. Further more, rhythmic motion offers faster action implementations, and the

hierarchical modular design is conducive to the further expansion of the robot's control system.

Key words: wall-climbing robot; resistance control; rhythm control; tripod gait

六足仿生湿吸机器人是从壁虎、蚂蚁和竹节虫等具有超强爬壁能力的动物身上得到启示而研制出来的, 模仿该类生物的结构、功能、工作原理及控制机制的机器人系统, 它继承了足式移动机器人具有的大量自由度, 能够适应复杂地形的特点; 运动足可以选择离散的支撑点, 有更宽广的运动范围; 六条肢节的设计增加了机器人的稳定性, 使得其具有更高的行走能力^[1]. 同时, 该机器人采用湿吸附爬壁机理, 使其具有较好的爬壁性能. 这些优点使得它在科学研究、军事国防、生物医学、航空航天、工业农业等领域都有广泛的应用前景^[2]. 已往集中式的控制系统设计方式高度集中, 局部的故障就可能造成系统的整体失效, 降低了系统的可靠性和稳定性, 而仅仅模仿生物中枢模式发生器 (central pattern generator, CPG) 控制机器人运动的实现方式又增加了系统扩展的难度^[3], 因此, 近些年来人们常采用分布式方法构建仿生机器人的控制系统, 例如韩国的 KHR-2、清华大学的 THBIP-I 以及日本本田公司的 P2 等^[4]. 这种结构的各模块功能和关系非常清楚, 有利于系统的构成和各模块内算法的添加和更换; 具有全局规划和推理的能力, 对复杂的环境可以做出合理的反应, 适合该类仿生机器人的控制.

1 多层次体系结构思想

Saridis 的分级递阶智能控制 (hierarchically

收稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50405045); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2007AA04Z253)

作者简介: 何斌 (1975—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为微型机器人与智能系统, 传感图像处理. E-mail: hebin@tongji.edu.cn

intelligent control)是智能控制的最早理论之一,包括组织级、协调级和执行级^[5].其理论可以表述为:自上而下按照精度渐增、智能递减的原则建立分层递阶结构的系统.智能控制系统各层的共同要素涉及机器各种作用的不确定性,这就建议采用概率模型来描述这些具有共同度量的作用,即它们各自的熵(entropies).智能机器理论是以寻求系统的正确决策控制序列的数学(概率)问题为前提的.该系统是根据提高精度降低智能(IPDI)的原则建立的,使得总熵(total entropy)为最小.如果把证据理论引入具有判断能力的智能机器,那么可把熵的概念加以推广.根据 Stephnou 的观点,概率可由可能性来代替,而且熵就是可能性的度量.因此智能机理论将其表述为寻求正确的决策和控制序列,以使整个系统的总熵最小数学问题^[6-7].

根据该智能控制理论,本机器人控制系统设计为四层,从上到下依次为:总控层、管理层、执行层和驱动层,如图 1 所示.图中,PWM 指脉宽调制.



图 1 控制系统层次图

Fig.1 Hierarchical graph of control system

驱动层是该控制层中最接近执行器的一层,确切地说,该层应该归为硬件部分,但是,为了叙述的方便以及整体控制层的完整性,也将其归于此.驱动层选用飞思卡尔公司的集成 H 桥驱动芯片 MC33886,直接驱动直流减速电机.

2 机器人控制系统的实现

2.1 总控层设计

总控层是该机器人的最高控制层,负责整体机器人的步态规划,该层的作用主要是模仿人的行为功能^[8].由于爬行机器人要求关节末端与壁面良好接触,因此关节末端应具有适当的柔顺性能,即在需要力控制的方向(垂直壁面的方向)呈现较大的柔顺性,而在需要位置控制的方向(平行于壁面的方向)具有较大的刚性.根据上述的特殊控制要求,在设计中引入阻抗控制.本设计中采用基于位置的阻抗控制方法,结构图如图 2 所示.图中: S_e 为环境的弹性变形; S_d 为机器人关节末端正常时的自由位置; J 为雅可比矩阵; K_p 为描述机器人关节末

端刚性的正定对角阵; K_e 为描述环境刚性的正定对角阵.

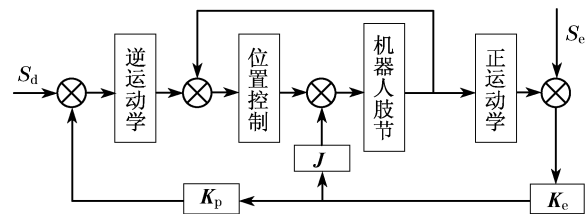


图 2 阻抗控制结构图

Fig.2 Structure diagram of resistance control

该控制结构由内环的位置反馈控制环和外环的力反馈控制环组成.外环力反馈根据对机器人关节末端柔顺性能的要求而变换成相应的内环位置控制的设定值.设计中采用的力传感器能直接获得接触力的信息,控制方法上采用独立关节的分散控制,符合机器人控制要求.

2.2 管理层设计

管理层实现每一个关节运动的时序调节,即步态问题,用以确定多条步行足之间的迈步次序.在本设计中,将反馈系统阈值的设定也放置在该层——根据不同的控制子任务,确定不同的实现方式,预测实现过程中的行走状态及各传感器的检测范围,作为下一层控制的依据.

节律运动是指具有时间和空间对称性的周期性运动,如走、跑、跳、泳、飞等.这些动物界最常见的运动方式具有规则的表现形式、高度稳定性和适应性,是简单与实用的完美结合.因此,节律运动也常用来实现足式机器人的移动功能^[9].而“六足纲”昆虫(蟑螂、蚂蚁等)步行时,采用的三角步态行走法就是一种典型的节律运动形式.因此,本机器人的仿生控制中,选用以“三角步态”作为节律运动单元的节律运动方式.这种行走方式可以使得机器人的重心总是落在三角支架之内,确保行走稳定性,且具有很好的自组织和适应性,实现简单方便.

为实现该运动方式,首先模仿六足纲昆虫三角步态爬行的特点,将机器人的 6 个关节分为两组:身体左侧的前、后足及右侧的中足为一组,右侧的前、后足和左侧的中足为另一组,分别组成两个三角形支架.接下来,模仿六足昆虫三角步态周期爬行特点,将一个周期的爬行动作分解为 6 个位姿,位姿内容及步态转换流程如图 3 所示.然后,建立以三角步态为节律运动单元的节律运动控制,该控制流程如

图 4 所示.

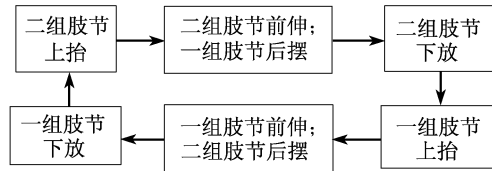


图 3 步态转换流程图

Fig.3 Flow chart of gait change

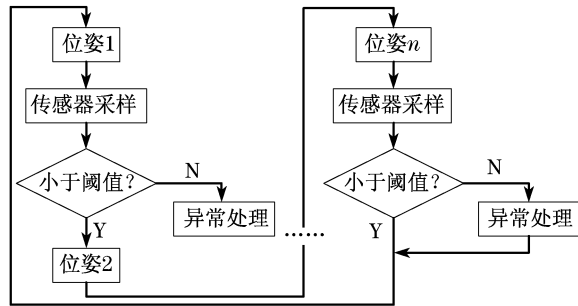


图 4 节律控制执行流程图

Fig.4 Flow chart of rhythm control implementation

在图 3 所示的步态转换流程图中,初始状态为各个肢解均位于上下和前后的中间位置.节律运动过程为:首先,第二组肢节上抬,此时第一组肢节作为支撑和吸附肢解组;然后,第二组肢节前伸,第一组肢节后摆,用以实现机器人向前爬行的动作;接下来,第二组肢节下放,替换第一组肢节作为支撑和吸附肢节组;然后,第一组肢节上抬,为向前爬行动作做准备;接下来,第一组肢节前伸,第二组肢节后摆,完成一个周期内的第二次向前爬行动作;然后,第一组肢节下放作为支撑和吸附肢节组.这样便完成了一个节律周期内的爬行动作.由如图 4 所示的节律控制流程图中可知:在每两个位姿转化中间,都需要采集外部传感器信息,用以判断当前机器人运行状态,来确定位姿安全转换的可能性.

根据图 3 所示的步态转换流程图,建立控制电机逻辑表(见表 1).

表 1 控制电机逻辑表
Tab.1 Logic table of motor control

肢节	步骤					
	1	2	3	4	5	6
左前	0	-1	0	0	1	0
右前	0	1	0	0	-1	0
左中	0	1	0	0	-1	0
右中	0	-1	0	0	1	0
左后	0	-1	0	0	1	0
右后	0	1	0	0	-1	0
组一拉绳	0	0	0	1	0	-1
组二拉绳	1	0	-1	0	0	0

控制肢节向前/向上转动给电机施加正向电压,在表 1 中定义为 1;反之,控制肢节向后/向下转动给电机施加反向电压,在表中定义为 -1;电机不施加电压定义为 0. 根据表 1 设计程序控制矩阵式见式 (1),程序执行时,根据图 4 所示的节律控制执行流程图不断循环调用矩阵 T ,从而实现机器人爬壁行走的节律控制.

$$T_{8 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 执行层设计

执行层根据上层的控制要求计算机器人各肢节电机的运动角度,同时通过传感器实时检测各个关节的运行情况.作为控制信号(PWM 波)的直接产生层和传感器信号的数据采集层,该层的设计将决定机器人步行的质量,同时,控制的实时性要求很强,在整个控制系统层次中占据着十分重要的地位^[10].

执行层的根本任务是对电机的速度控制,可以说是整个行走控制系统的根本任务.在机器人设计中,共选用了 8 个直流减速电机.每个直流电机需要两路 PWM 波作为控制信号来控制,因此,多电机的控制是本机器人控制中的一个重要问题.为了尽可能降低硬件复杂度,本文采用 IO 口模拟 PWM 波输出的控制方式,即采用定时器(中断时间为 10 ms),结合 IO 口模拟输出产生的 PWM 波,控制电机运行. PWM 波输出程序如下:

```
byte PWM(int n){
    if((count%10) == 0) pwm = 1;
    else if((count%10) == n) pwm = 0;
    else pwm = pwm;
    return pwm;
}
```

程序中,可以根据上层控制策略的要求,调整输出 PWM 波的占空比.其中,单个电机的控制方式如图 5 所示.

其中,预设速度为执行层与管理层的连接信息,即管理层传达给执行层的任务信息.执行层检测速度传感器输入的实际速度信息,据预设速度计算出来的期望速度一起输入控制调节器,通过 PI 调节计

算,输出控制 PWM 波的占空比,以控制电机运行.

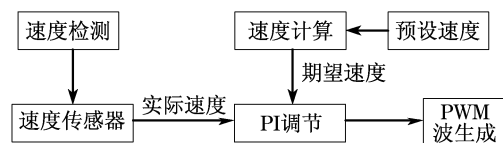


图 5 单个电机控制流程图

Fig.5 Control flow chart of each motor

机器人传感器的设计既要实现机器人关节运动的角度和关节末端受力的检测,也要尽量小且轻,以降低机器人的重量.实现中,采用机械实现和传感器设计相配合的方式.将单圈贴片旋转电位器安装在机器人关节上,采用机械联动的方式实现手臂运动时带动电位器旋转.在电位器固定端施加 5V 电压,将滑动端信号引入单片机 AD 采样口进行采样,即可获得各个关节旋转的角度信号.

同时,为了实现机器人关节末端的受力检测,在机器人关节末端设计有微小弹簧连接的柔性机构,在柔性机构上安装霍尔传感器 SS495A,通过检测磁场强度的变化来检测肢解末端相对运动的距离,从而间接得到肢解末端受力的情况.该传感器的输出特性曲线如图 6 所示:传感器输出电压与磁场强度呈良好的线性关系,并且其输出电压 V_{out} 为 0.5~4.5 V,方便单片机利用 AD 采样口直接采集信号.根据末端受力的不同,小弹簧将产生大小不同的形变,霍尔传感器输出电压将根据形变的不同而变化,根据末端受力与霍尔传感器输出电流的关系,得到关节末端受力的变化情况.因为传感器的电压输出与磁场强度有直接的关系,为了检测该传感器与选用的小磁铁位置(即关节末端小弹簧形变)的关系,设计实验进行测试.实验中,在传感器两端设计两个相同的小磁铁,尺寸为 4 mm×1.5 mm,传感器尺寸为 4 mm×3 mm,磁铁之间的距离为 4 mm.在此范围内传感器的输出特性如图 7 所示.

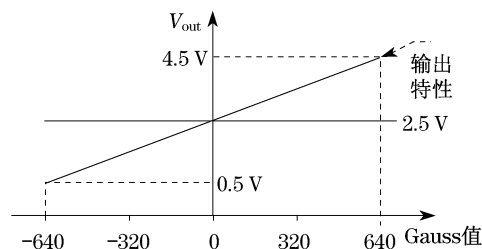


图 6 输出电压与磁场强度关系图

Fig.6 Diagram of output voltage and magnetic field strength

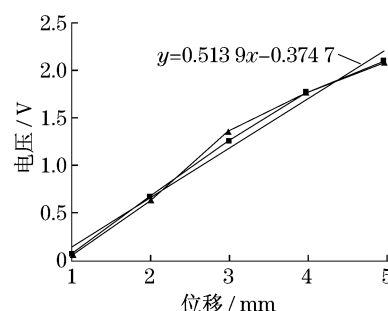


图 7 霍尔传感器位移特性

Fig.7 Displacement characteristics of Hall sensor

从图 7 可以得到,两次测量实验显示:传感器输出电压信号与传感器移动位移之间有良好的线性关系,并且传感器输出信号重复性好.利用 excel 拟合得到传感器输出特性曲线为

$$y = 0.8139x - 0.3747 \quad (2)$$

利用式(2),可以方便地根据传感器输出电压得到机器人关节末端的移动距离,继而间接得到关节末端的受力情况.

3 实验验证

3.1 实验系统结构介绍

研究采用的机器人为本课题组自行研制的湿吸仿生爬壁机器人.该机器人的整体结构设计见图 8,它由 1 个躯干骨架、6 个腿部机构、6 个吸附机构(足垫)及两个拉绳传动机构组成.躯干骨架是整体结构的基础,所有其他部件均安装在躯干骨架上;腿部实现机器人的行走动作;足垫提供机器人爬壁所需的吸附力;拉绳传动机构则实现机器人的抬腿动作.该机器人设计为瘦长形:总长度约 300 mm,宽度约 160 mm,重量约为 600 g,重心离壁面距离为 15 mm.

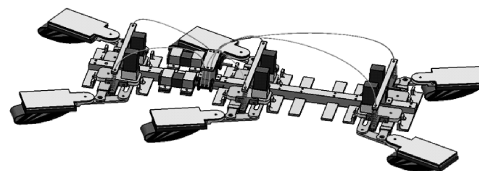


图 8 机器人整体结构

Fig.8 Mechanical structure of the robot

3.2 控制系统硬件平台

为实现控制性能,自行设计搭建控制系统硬件平台,其中,单个执行部件控制系统框图见图 9.

该控制系统中:① 控制器作为系统的 CPU 是控制程序的载体,负责控制的主要部分,本文选用飞思

卡尔半导体公司生产的 MC9S12DG128B 单片机来实现;② 执行机构为 8 个深圳华创升公司生产的微型减速电机,是控制指令执行的直接部件,带动机器人仿生肢节运动;③ 被控对象为机器人仿生肢节末

端的位置及仿生肢节末端与接触面的接触力(吸附力);④ 反馈机构包括力传感器和位置传感器,直接反馈执行末端的实际执行情况,作为控制策略决策的依据。

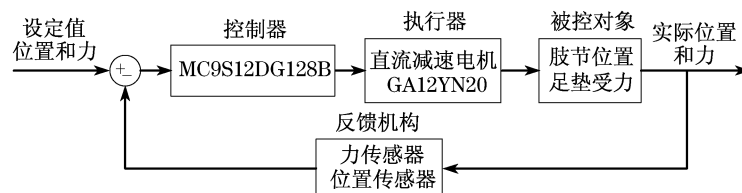


图 9 控制系统框图

Fig.9 Block diagram of control system

3.3 爬壁性能实验

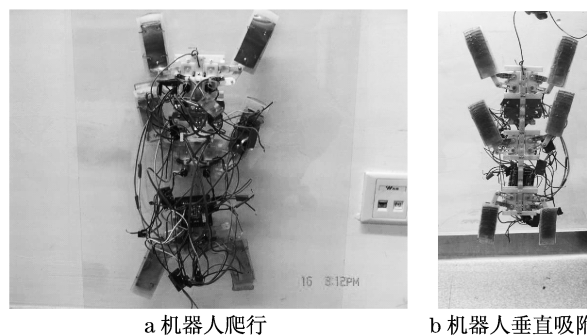
为了验证所设计的爬壁机器人控制系统的性能,本文对该仿生机器人的爬壁性能进行了测试.实验分为三个部分:

(1) 测试机器人三角步态节律运动的稳定性.该部分实验时,机器人竖直放置,足垫不与壁面接触,只观察测试机器人的步态.

(2) 测试机器人在光滑壁面爬行时吸附壁面的性能.该部分为机器人爬壁运行性能检测的主要环节,实验步骤及内容为:①在洁净的玻璃表面上均匀的涂上纯净水,等待约 2 min,让玻璃表面的水分自然蒸发减少,使得水膜厚度最适合机器人足垫吸附^[11];②接通机器人外部电源,进行爬壁实验;③首先尝试在低坡度坡面爬行,然后慢慢将坡度加大;④每次实验完成后,都将实验初始条件恢复到与第一次实验时相同,再进行下一次测量;⑤由于水膜的厚度很难控制,因此,采用多次实验求平均值的方法得到测试结果.

(3) 测试机器人异常状态处理的能力.该部分主要测试机器人足垫处于异常状态,即足垫未能完全与壁面接触,以及机器人在爬行过程中,足垫打滑的情况.

图 10a 为机器人爬行时,由左前、右中和左后组成的一组肢节后蹬,由右前、左中和右后组成的一组肢节前摆的运动状态.图 10b 为机器人稳定吸附在垂直玻璃表面上.实验结果显示,在该控制系统的控制下,机器人具有稳定地节律运动形式;能够稳定地吸附在垂直玻璃表面上;在 80°斜坡上面行走时步态稳定,可以很好地模仿动物的“三角步态”;可以很好地处理足垫未与壁面完全吸附或者足垫打滑等异常状况.



a 机器人爬行

b 机器人垂直吸附

图 10 机器人爬壁实验

Fig.10 Wall-climbing experiment of the robot

4 结论

本文提出了一种六足仿生湿吸爬壁机器人控制系统.它采用层次化的结构,不仅满足了机器人爬壁行走的控制要求,还从仿生的角度对机器人控制层进行设计;引入了阻抗控制、节律控制和“三角步态”等仿生控制理念.实验表明,该控制系统具有很好的执行能力,在足垫吸附力满足的情况下,对于壁面坡度的变化具有很好的适应能力;肢节末端(足垫)与壁面接触良好且没有明显接触冲撞;节律运动执行速度快,重复性好;设计方案切实可行,且该层次化设计方法有利于机器人系统的模块化应用和扩展.

参考文献:

- [1] Hoeg H D, Slatkin A B, Burdick J W. Biomechanical modeling of the small intestine as required for the design and operation of a robotic endoscope[C] // Proceedings of the 2000 IEEE, International Conference on Robotics & Automation. San Francisco: IEEE Press, 2000: 1599 - 1606.

(下转第 1827 页)