

可变刚度的四足机器人被动柔顺脊柱设计与应用

张秀丽¹,谭小康²,吴海波³

(1.北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044;
2.武汉地铁运营有限公司,武汉 430030;3.华为海洋网络有限公司,北京 100085)

摘 要:为提高四足机器人的运动性能,从仿生学出发,通过对猎豹的脊柱结构和躯干运动特征进行研究,设计一款刚度可调的四足机器人被动柔顺脊柱——“四叶草”脊柱.在此基础上,为了研究“四叶草”脊柱对四足机器人运动过程中的速度、足端力和转弯半径的影响,搭建了具有“四叶草”脊柱的仿生四足机器人样机——DCat II,并进行了跳跃(bound)步态下的奔跑运动实验和转弯运动实验.实验结果表明,被动柔顺脊柱能够减小 DCat II 运动过程中的足端力;在脊柱整体刚度为 681 N/m 时,DCat II 的稳定运动速度最高,为 0.92 m/s;脊柱在偏转(yaw)方向的刚度值越大,DCat II 运动的转弯半径越大.

关键词:四足机器人;被动柔顺脊柱;伪刚体模型;可变刚度

中图分类号:TP242.6 **文献标志码:**A

Design and application of passive compliant spine of quadruped robot with variable stiffness

ZHANG Xiuli¹,TAN Xiaokang²,WU Haibo³

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;2. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., Wuhan 430030, China;
3. Huawei Marine Networks Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In order to improve the kinematic capability of quadruped robot, from the perspective of bionics, a passive compliant spine of quadruped robot with a variable stiffnet, Four-Leaf Clover spine, is designed by studying the characteristics of vertebral column structure and torso motion of cheetah. Based on that study, in order to study the influence of Four-Leaf Clover spine on the speed, foot force and turn radius of the quadruped robot during the movement, a prototype of bionic quadruped robot with Four-Leaf Clover spine is built, which is DCat II, and the experiments on running and turning movement under bound gait are carried out. The experimental results show that the passive compliant spine can reduce the foot force of DCat II during the movement. When the overall stiffness of Four-Leaf Clover spine is 681 N/m, the highest steady-state

收稿日期:2018-01-18

基金项目:国家自然科学基金(50905012);中央高校基本科研业务费专项资金(M15JB00250)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(50905012); Fundamental Research Funds for the Central Universities (M15JB00250)

第一作者:张秀丽(1975—),女,河南洛阳人,副教授,博士.研究方向为机器人学.email: zhangxl@bjtu.edu.cn.

引用格式:张秀丽,谭小康,吴海波.可变刚度的四足机器人被动柔顺脊柱设计与应用[J].北京交通大学学报,2018,42(6): 111—118.
ZHANG Xiuli, TAN Xiaokang, WU Haibo. Design and application of passive compliant spine of quadruped robot with variable stiffness [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 111—118. (in Chinese)

velocity of DCat II is achieved, which is 0.92 m/s. The greater the stiffness value of the spine in the direction of yaw is, the greater the turn radius of DCat II is.

Keywords:quadruped robot; passive compliant spine; pseudo-rigid-body model; variable stiffnes

仿生学研究发现脊柱的柔顺伸展自由度在四足动物的运动中发挥着重要的作用^[1].脊柱的运动增加有效步幅,为腿部提供辅助力量,并通过储存和释放来利用能量^[2-4].随着四足机器人向高速、高动态性、高适应性方向的发展以及仿生学中动物脊柱对运动重要性的发现,四足机器人学研究人员越来越关注四足机器人的脊柱结构设计.

在机器人的柔顺机构研究中,其柔顺性被分为主动柔顺和被动柔顺两类.主动柔顺是指机器人利用力的反馈信号,采用一定的控制策略主动控制力;被动柔顺是指机器人通过利用能够吸收或储存能量的弹性体,在与环境接触时对外部作用力产生自然顺从^[5].在主动柔顺脊柱研究方面,美国波士顿动力公司(Boston Dynamics)研制了一款名为 cheetah 的机器人,其与 Bigdog 最大的区别在于 cheetah 机器人拥有俯仰方向的主动铰接式柔顺腰部,借助柔性腰部在俯仰方向上的屈张变形,cheetah 机器人实现了高速奔跑^[6].麻省理工学院(MIT)研制的四足机器人 MIT cheetah 具有一款差分驱动式的主动柔顺脊柱,利用其左后腿和右后腿的电机进行差分驱动,实现了高速奔跑,并可以实现从小跑(trot)到奔驰(gallop)步态的转变^[7].Khoramshahi 等^[8]研制的四足机器人 Bobcat 的脊柱中间具有 1 个铰接式主动俯仰关节,通过与刚性脊柱机器人奔跑运动实验对比,Bobcat 的跨步长增加了 10%,且在能耗方面没有比刚性脊柱机器人高.雷静桃等^[9]研制设计了一款由气动人工肌肉驱动的仿生柔性机体,该机体由仿生脊柱和 4 根气动人工肌肉组成,通过控制每个人工肌肉的伸缩而实现仿生机体的上下及左右弯曲,实验证明该脊柱的最大弯曲角度可以达到 18°.在被动柔顺脊柱研究方面,Kani 等^[10]研制了一款具有柔性脊柱的被动行走式四足机器人 Fanari,脊柱由薄板及其上方依次排列的 13 块树脂玻璃组成,玻璃之间留有间隙,脊柱上下通过弹簧连接,同时脊柱与腿部之间通过一根弹簧连接,通过腿部摆动带动弹簧,从而使脊椎产生上下俯仰运动.Tsujita 等^[11]设计了一款肌肉骨骼四足机器人,该机器人的躯干由 1 个人工脊柱和 8 个气动驱动器构成,通过实验研究了躯干刚度和运动速度对机器人不同步态下运动稳定性的影响.Takuma 等^[12]设计了一款每条腿只有 1 个髋关节俯仰自由度的四足机器人,通

过行走实验的对比来研究机器人步态和脊柱之间的合理匹配对于机器人行走速度的影响.目前,关于四足机器人的主动和被动柔顺脊柱对于运动性能的影响所做的研究工作还不太多,虽然国内外部分学者已经在四足机器人脊柱方面进行了一些探索研究,然而对于四足机器人脊柱的研究并没有取得系统性的成果.

本文作者受到猎豹等四足哺乳动物利用其柔顺的脊柱实现高速奔跑运动的启发,基于弹性材料受到轴向压缩时,其刚度会发生变化的原理^[13],设计了一款刚度可调的四足机器人被动柔顺脊柱——“四叶草”脊柱,并对该脊柱对四足机器人运动性能的影响进行了研究探索.

1 “四叶草”脊柱仿生学设计

1.1 猎豹解剖学知识

以猎豹为仿生对象,对四足机器人的脊柱结构进行设计.猎豹脊柱主要由颈椎、胸椎、腰椎等多段构成,其中胸椎部分 13 节,腰椎部分 7 节,骶椎部分 3 节^[14],见图 1.胸椎与胸骨、肋骨共同构成胸廓结构以保护心、肺等重要器官;骶椎负责连接髌骨和尾椎,因此这两部分具有较大的刚度.与胸椎和骶椎部分不同,腰椎部分比较灵活,可以实现上下、左右弯曲及轴向扭转等形式的运动,因此具有较小刚度.

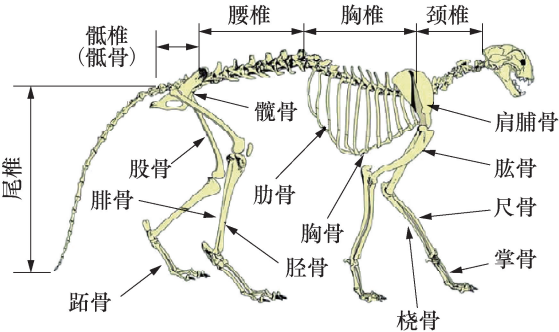


图 1 猎豹全身骨骼图

Fig.1 Systemic skeleton diagram of cheetah

为方便对猎豹的运动进行描述,结合解剖学中的方位术语,建立如图 2 所示的运动坐标系,详细解释见文献^[15].

在高速运动中,猎豹的躯干运动情况见图 3,可知,猎豹脊柱的弯曲主要发生在腰椎部分,即腰椎的运动幅度要比胸椎和骶椎大很多,文献^[16]指出接近胸椎的第 2 个腰椎关节的运动幅度是最大的.在

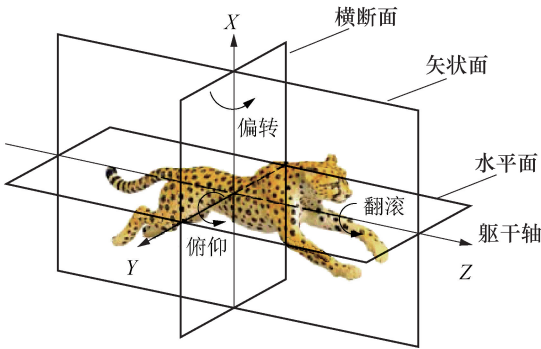


图 2 猎豹运动坐标系

Fig.2 Moving coordinate system of cheetah

直线疾驰过程中,猎豹躯干的弯曲主要发生于脊柱的矢状面,而横断面以及水平面内的运动则较小.猎豹在转弯运动过程中,脊柱的弯曲主要发生于脊柱的水平面内.

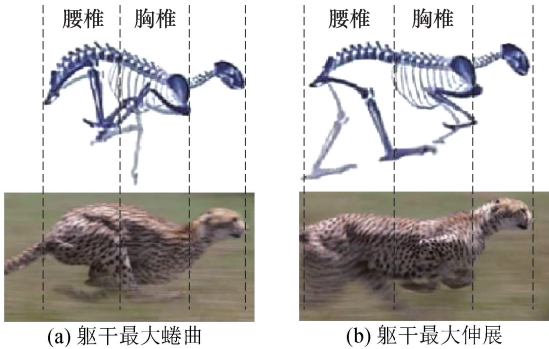


图 3 猎豹疾驰中躯干弯曲变化情况

Fig.3 Variation of cheetah spine bend when galloping

1.2 “四叶草”脊柱结构设计

Chalhoub 等^[13]研究发现弹性材料受到轴向压缩时,其刚度会发生变化.根据弹性材料的这种力学特性,参考猎豹脊柱的长度,胸椎、腰椎和骶椎的长度比例关系等解剖学结构参数^[13],设计 1 种由刚性材料和弹性材料相互串联组成的可变刚度脊柱结构——“四叶草”脊柱,脊柱的三维模型见图 4.

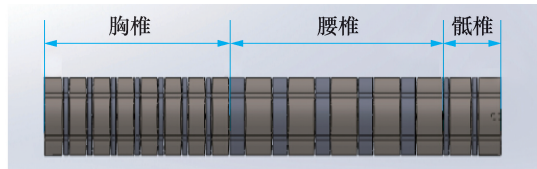


图 4 “四叶草”脊柱三维模型

Fig.4 3D model of Four-Leaf Clover spine

“四叶草”脊柱长度为 293 mm,结构分为胸椎、腰椎和骶椎 3 部分.脊柱各部分刚度大小不同,其刚度可以通过改变各部分椎骨和椎间盘的厚度比例大小来实现.脊柱各部分尺寸参数如表 1 所示.

仿生椎骨和椎间盘具有非均匀截面尺寸的“四叶草”结构形状,其具有 4 个叶瓣,并在 4 个叶瓣边

沿留有穿绳孔,上下 2 个穿绳孔调节“四叶草”脊柱在俯仰(pitch)方向上的弯曲刚度,左右 2 个穿绳孔调节“四叶草”脊柱在偏转(yaw)方向上的弯曲刚度.仿生脊柱结构中椎骨的边缘留有削边,以容纳脊柱中弹性材料受到轴向拉紧力时产生的挤压,其截面形状和三维模型如图 5 所示.

表 1 脊柱尺寸参数

Tab.1 Parameters of the spine

脊柱部位	长度/mm	椎骨个数	椎间盘个数	椎骨厚度/mm	椎间盘厚度/mm
胸椎	117	8	7	12	3
腰椎	140	5	5	21	7
骶椎	36	2	2	15	3

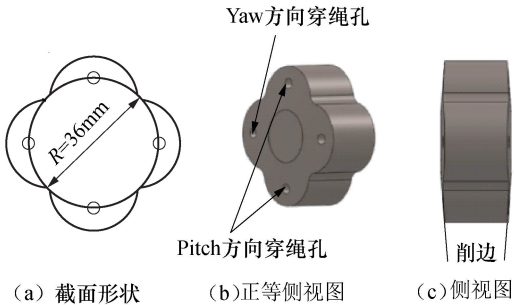


图 5 脊柱截面形状和椎骨三维模型

Fig.5 Cross section of spine and 3D model of vertebra

经过调研,确定椎骨的材料为 ABS 工程塑料,椎间盘的材料为聚氨酯弹性体(邵尔 A90),聚氨酯弹性体^[17]根据不同的加工工艺可以实现不同的弹性模量.ABS 工程塑料的弹性模量为 2 200 MPa,泊松比为 0.394;聚氨酯弹性体的弹性模量为 60 MPa,泊松比为 0.47,两者的弹性模量比值为 36.7.

1.3 “四叶草”脊柱力学特性分析

“四叶草”脊柱的刚度调节是通过对脊柱施加轴向拉压力,使脊柱中的弹性椎间盘发生形变来实现的,而弹性椎间盘的形变特性取决于其自身的材料特性和尺寸.“四叶草”脊柱的弯曲刚度为脊柱末端载荷与末端变形的比值,采用柔顺机构学^[18]中的伪刚体模型对柔顺脊柱进行建模.脊柱中的柔顺片段可以看成是 1 个伪扭簧和 2 个刚性杆组合的力学伪刚体模型,建立仿生柔顺脊柱的伪刚体模型,如图 6 所示,其中 l_i 为椎间盘的厚度, l_r 为椎间骨的厚度, γ 为伪刚体模型特征半径系数, F 为施加在脊柱末端的垂直载荷, K_1, K_2, \dots, K_{14} 为建立的伪刚体模型中的伪扭簧刚度.根据文献^[17],由线性插值可得在脊柱承受力和力矩时,柔顺片段的伪刚体模型的特征半径系数 $\gamma = 0.85$,参量角系数 $C_\theta = 1.238 5$,刚度系数 $K_\theta = 2.65$.

为方便建立伪刚体模型,假设仿生脊柱在拉紧

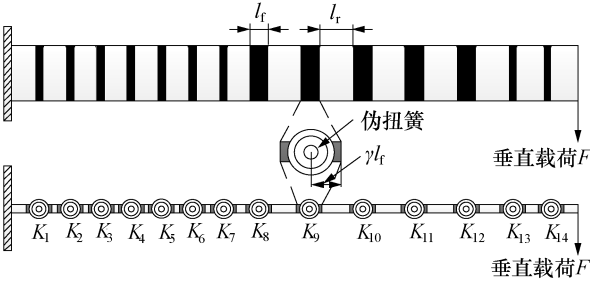


图 6 脊柱的伪刚体模型

Fig.6 Pseudo-rigid-body model of bionic spine

时,实际受力的区域为“四叶草”截面中 4 个穿绳孔形成的圆形,可得脊柱在受到轴向拉紧时,各个椎间盘的刚度 $H_i (i = 1, 2, \dots, 14)$ 为

$$H_i = (E + 2GS_i^2)I \quad (1)$$

$$S_i = R/2l_{fi} \quad (2)$$

式中: E 为聚氨酯的杨氏模量; G 为聚氨酯的剪切模量; I 为椎间盘横截面惯性矩; S_i 为第 i 个椎间盘的形状因子; l_{fi} 为第 i 个椎间盘的厚度.

每个伪刚体模型中的伪扭簧刚度 K_i 为

$$K_i = \gamma K_\theta H_i / l_{fi} \quad (3)$$

每个伪刚体模型的长度 L_i 为

$$\begin{cases} L_i = \gamma l_{fi} + l_{r(i+1)} + (1 - \gamma) l_{f(i+1)}, \\ i = 1, 2, \dots, 13 \\ L_i = \gamma l_{fi} + l_{r(i+1)}, \quad i = 14 \end{cases} \quad (4)$$

各伪刚体模型的弯矩平衡表达式为

$$\begin{cases} K_i \theta_i = K_{i+1} C_\theta \theta_{i+1} + FL_i C_\theta \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right), \\ i = 1, 2, \dots, 13 \\ K_i \theta_i = FL_i C_\theta \cos \left(\sum_{j=1}^i \theta_j \right), \quad i = 14 \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_i, θ_j 分别为第 i, j 个椎间盘的弯曲角度.

通过数值方法求解式(5),可得到每个点的角度,利用这些角度值,可以计算出脊柱的末端变形量

$$D = \sum_{i=1}^{14} (L_i \sin \sum_{j=1}^i \theta_j) \quad (6)$$

从而可得脊柱的整体弯曲刚度 K_s 为

$$K_s = \frac{F}{D} \quad (7)$$

2 “四叶草”脊柱刚度特性测试

为验证“四叶草”脊柱可实现刚度可调,搭建了测试平台,并设计 3 组测试实验,分别是脊柱的刚度特性、刚度大小可调和刚度方向可调测试实验.

2.1 刚度特性测试平台搭建

设计的刚度特性测试平台见图 7,由 40×40 铝型材架、pitch 和 yaw 方向的拉紧螺栓、固定板、调

节螺母和拉紧板组成.拉紧螺栓与脊柱的绳索相连,转动调节螺母即可改变施加在脊柱的轴向拉紧力,刚度调节机构见图 8.仿生脊柱一端固定在实验架上,另一端用于施加重力块,重力块会使脊柱的末端在竖直方向上出现变形位移,根据位移量和重力块的重量计算脊柱的弯曲刚度.同时在脊柱腰椎部分第 3 个弹性椎间盘处布置 4 个薄膜压力传感器.其中,1、4 测量脊柱 pitch 方向的轴向拉紧力,2、3 测量脊柱 yaw 方向的轴向拉紧力,见图 9.

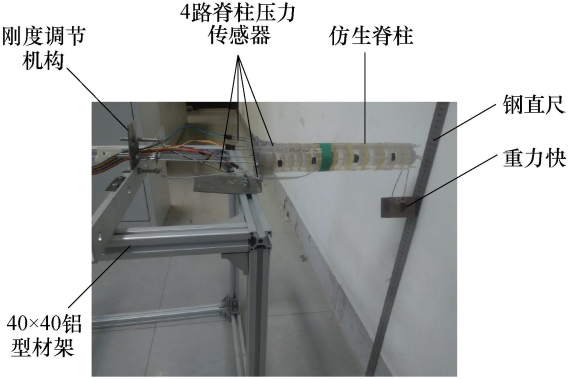


图 7 脊柱刚度特性测试平台

Fig.7 Test platform of spine rigidity characteristics

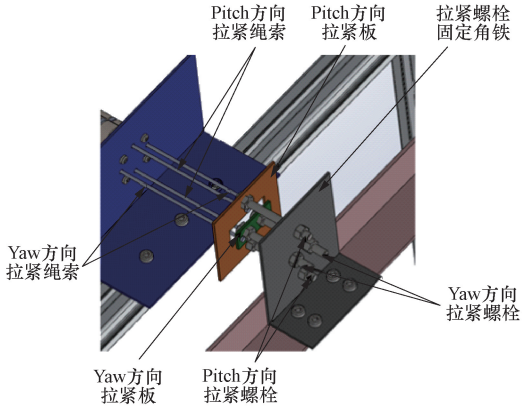


图 8 刚度调节机构

Fig.8 Stiffness adjustment mechanism

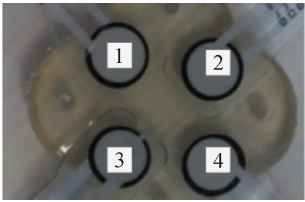


图 9 压力传感器布局

Fig.9 Pressure sensor layout

2.2 脊柱整体刚度特性实验

为得到脊柱整体轴向拉紧力为定值时脊柱的负载-变形关系,对脊柱进行了刚度特性测试实验.

调整穿在“四叶草”脊柱中 4 根绳索的拉力,当 4 个压力传感器的压力均为 24 N 时,脊柱缩短了 2

mm.忽略绳索和支撑板等刚性件的变形和脊柱的自身重力,在“四叶草”脊柱末端加上 10 组质量不同的重力块,测得脊柱在竖直方向的变形量见表 2.

表 2 实验数据

Tab.2 Experiment data

施加载荷 F/N	变形量 D/m	施加载荷 F/N	变形量 D/m
1.47	0.003	5.92	0.013
2.56	0.006	6.90	0.015
3.65	0.008	7.39	0.016
4.33	0.009	7.88	0.017
4.98	0.011	8.86	0.019

绘制出脊柱的负载-变形拟合曲线见图 10,由图 10 可知,脊柱的轴向拉紧力为定值时,其负载-变形关系近似为线性关系.线性拟合可得曲线方程为

$$F=463.3D+0.04 \tag{8}$$

式中的常数项相对较小,可忽略不计,结合式(7)可得柔顺脊柱的刚度 K_s 为 463.3 N/m,即脊柱在轴向拉紧力为定值时,脊柱的刚度为常数.

继续增加脊柱轴向拉力,使得脊柱的轴向压缩量 Δ_s 依次为 3,4,⋯,7 mm,此时施加的轴向压力 F_s 依次为 36 N、45 N、57 N、69 N、76 N,重复上述实验并绘制拟合曲线,如图 10 所示.线性拟合并求得每种情况下的脊柱刚度值,如表 3 所示.

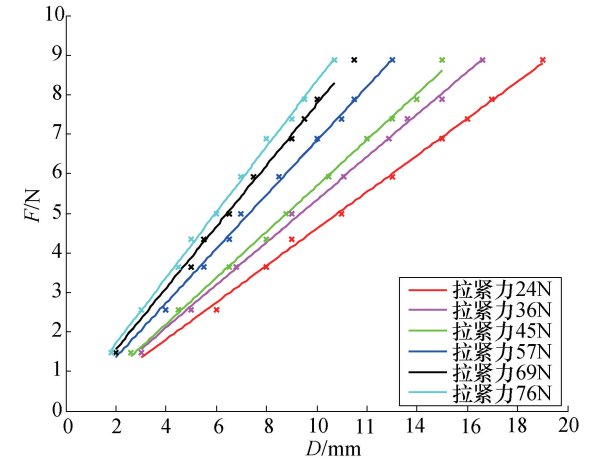


图 10 脊柱负载-变形拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of load-deformation of spine

表 3 不同轴向拉紧力时的脊柱整体刚度值

Tab.3 Stiffness value under different axial tensioning force of spine

轴向压缩量 Δ_s/mm	轴向拉紧力 F_s/N	整体刚度 $K_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
2	24	463
3	36	533
4	45	566
5	57	681
6	69	779
7	76	827

结合图 10 和表 3 分析可知,改变“四叶草”脊柱

的轴向拉紧力,脊柱的整体刚度大小也随之改变,且两者呈正相关.

2.3 脊柱刚度方向可调实验

为验证“四叶草”脊柱在 pitch、yaw 方向可具有不同刚度的功能,设计 2 个实验:1) 脊柱 pitch、yaw 方向的刚度 K_p 与 K_y 比值 K 与 2 个方向上的轴向拉紧力 F_p 与 F_y 差值 Δ 的关系实验;2) K 与 2 个方向上的轴向拉紧力比值 λ 的关系实验.实验以 $F_y=24\text{ N}$ 为基准,设计 Δ 为 6 N、7 N 和 8 N 3 种情况,脊柱在 pitch 和 yaw 方向的轴向拉紧力比值 λ 为 4/5、3/4、2/3 和 1/2 的 4 种情况,分别进行实验,测得每种情况下脊柱在 pitch、yaw 方向的刚度比值,实验数据曲线如图 11 所示.由图可知,2 个方向上的拉紧力 Δ 和 K 的曲线关系呈近似等位线簇变化.当 Δ 为定值时,即使 F_p 增大,其 K 变化也不大.但当 F_p 为定值时,随着 Δ 增大,其 K 也增大.

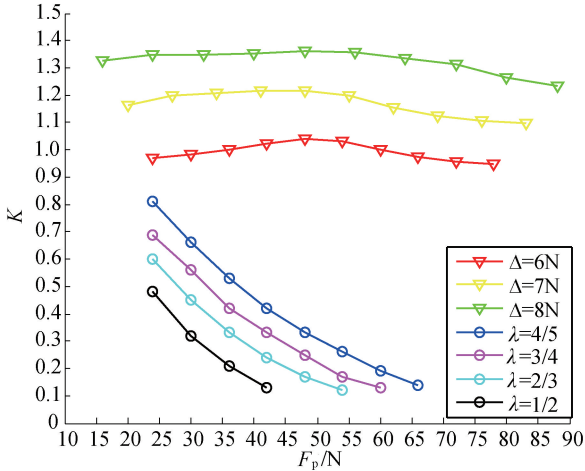


图 11 脊柱刚度方向可调实验曲线

Fig.11 Experimental curves of spine rigidity with adjustable direction

λ 与 K 的曲线关系呈近似反比线簇变化.当 λ 为定值时,随着 F_p 的增大,其 K 却越来越小.但当 F_p 为定值时,随着 λ 的增大,其 K 也随之增大.

综合以上 2 个实验结果可知,当在“四叶草”脊柱 pitch、yaw 方向施加不同的轴向压力时,脊柱 2 个方向的刚度不同,且各个方向上的刚度大小可调.

3 四足机器人运动实验

为研究“四叶草”脊柱对四足机器人运动性能的影响,建造了具有“四叶草”脊柱的仿生四足机器人 DCat II,如图 12 和图 13 所示.DCat II 样机物理参数如表 4 所示.DCat II 的运动控制采用源于生物神经控制机理的中枢模式发生器(CPG)运动控制模型,去除 DCat^[19]的运动控制模型中的头部和尾部

耦合即可用于 DCat II 的控制,在此不做详述.

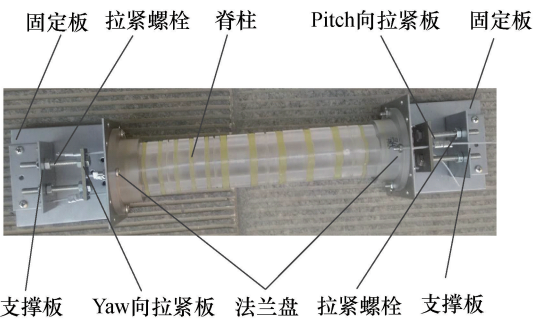


图 12 “四叶草”脊柱实物图

Fig.12 Photo of Four-Clover Leaf Spine

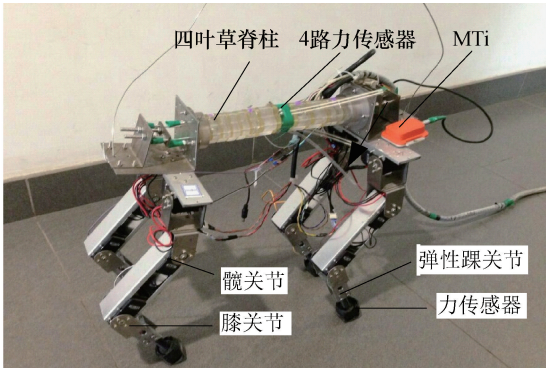


图 13 DCat II 样机

Fig.13 Quadruped robot DCat II prototype

表 4 DCat II 样机物理参数

Tab.4 Physical parameters of DCat II prototype

名称	质量/kg	尺寸/mm
仿生脊柱	1.60	335×150
大腿	0.50	150
小腿	0.23	180
机体	4.50	335×150×41

3.1 脊柱刚度对速度和足端力的影响

设计 DCat II 脊柱整体刚度值 K_s 为 463 N/m、533 N/m、566 N/m、681 N/m、779 N/m、827 N/m 6 种情况下的 bound 步态运动对比实验.每种情况进行 10 次行走实验,求得每种情况下的机器人平均运动速度,并用 MTi 姿态仪记录行走过程中脊柱在 pitch 方向角度变化的幅度 φ_p ,如图 14 所示,数据分析结果见表 5.

由图 14 可知,机器人在运动过程中,脊柱 pitch 方向的弯曲角度呈现周期性的变化.且随着脊柱整体刚度值的增加,脊柱在 pitch 方向的弯曲角度变化幅值越来越小.由表 5 可知,当脊柱整体刚度值为最小时,脊柱的 pitch 方向弯曲幅值最大,但此时机器人的运动速度反而最小.当 F_s 为 681 N/m 时,机器人运动速度最快,达 0.92 m/s.随着 F_s 的继续增大,运动速度开始减小.所以机器人的运动速度并不

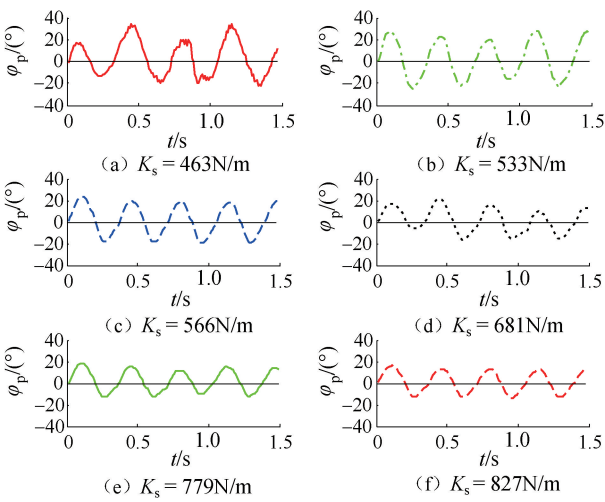


图 14 脊柱 pitch 方向弯曲角度曲线

Fig.14 Bending angle curves on spinal pitch direction

是随着脊柱刚度的增大而一直增大,要想提高机器人的运动速度必须选择合适的刚度.

表 5 DCat II 运动速度和弯曲幅值

Tab.5 Speed and bending amplitude of DCat II

脊柱整体刚度 $K_s / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	运动速度 $V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	脊柱弯曲幅度 $\varphi_p / (^\circ)$
463	0.74	34.4
533	0.79	27.9
566	0.89	23.3
681	0.92	20.9
779	0.85	18.5
827	0.79	16.1

同时设计脊柱刚度为 681 N/m 时与刚性脊柱在 bound 步态下的运动对比实验.每种情况行走 4 个周期,记录机器人足端所受的地面反力 F_r ,如图 15 所示,数据分析结果见表 6.

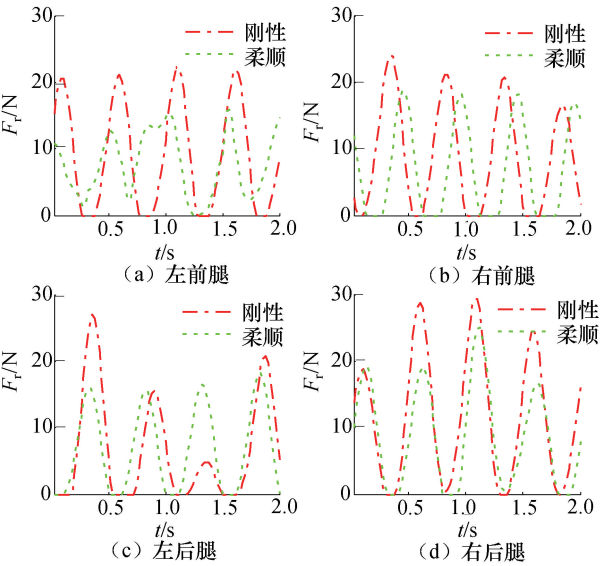


图 15 机器人的足端力

Fig.15 Foot force of robot

表 6 bound 步态机器人足端力

Tab.6 Foot force of robot under bound gait N

机器人腿	足端力峰值		足端力平均值	
	刚性脊柱	柔顺脊柱	刚性脊柱	柔顺脊柱
左前腿	23.60	15.90	13.30	9.90
右前腿	25.10	21.40	14.70	12.80
右后腿	30.80	27.10	17.50	14.70
左后腿	26.70	21.70	13.40	11.40
平均值	26.55	21.53	14.73	12.20

对比刚、柔脊柱机器人 bound 步态足端数据可知,具有柔顺脊柱的机器人以 bound 步态运动时四条腿的足端力的峰值比具有刚性脊柱的机器人平均减小了 18.9%,足端力平均值平均减小了 17.2%。结果表明:“四叶草”脊柱通过自身的弹性椎间盘的被动柔顺作用减小了四足机器人运动过程中的足端力。

3.2 脊柱 yaw 向刚度对转弯运动的影响

设计 DCat II 脊柱 yaw 方向刚度值 K_y 为 463 N/m、533 N/m、566 N/m、681 N/m、779 N/m 和 827 N/m 6 种情况下的 bound 步态转弯对比实验。每种情况行走 3 个周期,用 MTi 姿态仪记录行走过程中脊柱在 yaw 方向角度变化 φ_y ,如图 16 所示,数据分析结果见表 7。

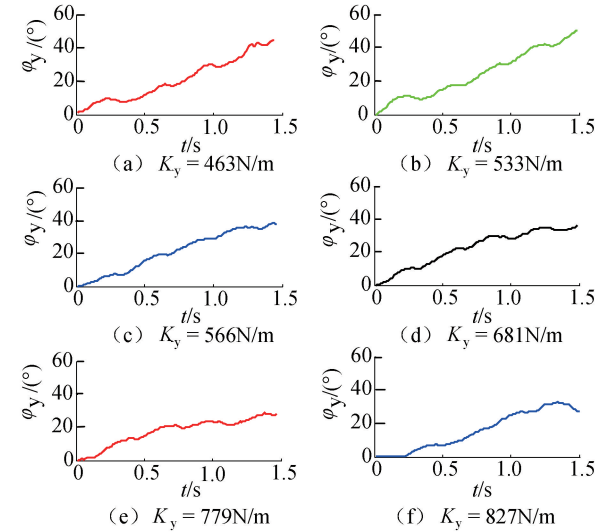


图 16 脊柱 yaw 方向转弯角度曲线

Fig.16 Bending angle curves of different spinal yaw direction

表 7 脊柱 yaw 方向刚度值和转弯角度

Tab.7 K_y and φ_y of spinal yaw direction

yaw 方向 刚度值/(N/m)	转弯角 度/(°)	yaw 方向 刚度值/(N/m)	转弯角 度/(°)
463	54.5	681	39.4
533	48.9	799	36.6
566	42.2	827	32.3

机器人转弯运动过程中,机器人偏转角度变化的快慢是转弯半径的表征.转弯半径越大,机器偏转

角度变化越慢;反之,则越快.通过图 16 和表 7 可知,在脊柱 yaw 方向刚度为 463 N/m 时,机器人运动 3 个周期实现了 54.5°的转弯;但脊柱 yaw 向刚度值为 827 N/m,机器人运动 3 个周期只实现了 32.3°的转弯,脊柱 yaw 向刚度值越大,机器人 yaw 向偏航角变化越慢,四足机器人在转弯运动时的转弯半径越大。

4 结论

1)以猎豹为生物蓝本,运用仿生学和材料学相关知识设计了一款可变刚度的四足机器人被动柔顺脊柱——“四叶草”脊柱,脊柱具有胸椎、腰椎和骶椎 3 部分,每部分均由不同厚度的刚性椎骨和弹性椎间盘组成.利用柔顺机构学知识建立脊柱的伪刚体模型,分析了其力学特性。

2)设计了“四叶草”脊柱刚度调节机构,搭建了“四叶草”脊柱刚度特性测试平台,并完成了脊柱的刚度特性、整体刚度大小可调和刚度方向可调实验.实验结果表明“四叶草”脊柱整体刚度大小可调,在不同方向上的刚度不同且大小可调。

3)搭建 Dcat II 四足机器人平台,并开展“四叶草”脊柱对机器人运动性能影响的研究实验,实验结果表明,仿生柔顺脊柱可以减小机器人运动过程中的足端压力,合理选择柔顺脊柱的刚度可以提升四足机器人的运动速度;调整“四叶草”脊柱 yaw 方向的刚度大小可以实现机器人不同半径大小的转弯运动。

参考文献 (References):

[1] LEESER K F. Locomotion experiments on a planar quadruped robot with articulated spine[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.

[2] ALEXANDER R M, BENNETCLARK H C. Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues[J]. Nature, 1977, 265(5590):114—120.

[3] ALEXANDER M N. Elastic energy stores in running vertebrates[J]. American Zoologist, 1984, 24(1):85—94.

[4] ALEXANDER R M, DIMERY N J, KER R F. Elastic structures in the back and their rôle in galloping in some mammals[J]. Proceedings of the Zoological Society of London, 2010, 207(4):467—482.

[5] 殷跃红,尉忠信,朱剑英. 机器人柔顺控制研究[J]. 机器人, 1998,20(3):232—240.

YIN Yuehong,WEI Zhongxin,ZHU Jianying. Compliant control of robot an overview[J]. Robot, 1998,20(3):

- 232—240.(in Chinese)
- [6] GUIZZO E. Boston dynamics building fast-running robot cheetah, new agile humanoid[EB/OL](2011-02-28)[2018-01-18].<http://spectrum.Ieee.org/automaton/robotics/military-robots/boston-dynamics-building-fast-running-robot-cheetah-new-agile-humanoid>.
- [7] SEOK S, WANG A, MICHAEL C M Y, et al. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1117—1129.
- [8] KHORAMSHAHI M, SPROWITZ A, TULEU A, et al. Benefits of an active spine supported bounding locomotion with a small compliant quadruped robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation.Karlsruhe, 2013: 3329—3334.
- [9] LEI J T, YU H Y, WANG T M. Dynamic bending of bionic flexible body driven by pneumatic artificial muscles(PAMs) for spinning gait of quadruped robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1):11—20.
- [10] KANI M H H, DERAFFSHIAN M, BIDGOLY H J, et al. Effect of flexible spine on stability of a passive quadruped robot: Experimental results[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Phuket, 2011:2793—2798.
- [11] TSUJITA K, MIKI K. A study on trunk stiffness and gait stability in quadrupedal locomotion using musculo-skeletal robot[C]// 15th International Conference on Advanced Robotics. Tallinn,2011:316—321.
- [12] TAKUMA T, IKEDA M, MASUDA T. Facilitating multi-modal locomotion in a quadruped robot utilizing passive oscillation of the spine structure [C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,Taipei,2010: 4940—4945.
- [13] CHALHOUB M, KELLY J M. Effect of bulk compressibility on the stiffness of cylindrical base isolation bearing [J]. International Journal of Solids & Structures, 1990, 26(7): 743—760.
- [14] 陈代贤. 虎、豹及其类似动物骨骼比较解剖图志[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1995.
- CHEN Daixian, Comparative anatomical atlas of tiger, leopard and similar animal bones [M]. Beijing: China Medical Science Press, 1995.(in Chinese)
- [15] 周元军. 动物解剖[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- ZHOU Yuanjun, Animal anatomy [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.(in Chinese)
- [16] HILDEBRAND M. Further studies on locomotion of the cheetah[J]. Journal of Mammalogy, 1961, 42(1): 84—91.
- [17] 刘厚钧. 聚氨酯弹性体手册[M].2 版.北京:化学工业出版社, 2012.
- LIU Houjun. Polyurethane elastomer manual [M].2nd ed, Beijing: Chemical Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [18] HOWELL L L. 柔顺机构学[M].余跃庆译.北京:高等教育出版社,2007.
- HOWELL L L. Compliant mechanisms [M]. YU Yueqing trans. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [19] ZHANG X L, GONG J Q, YAO Y A. Effects of head and tail as swinging appendages on the dynamic walking performance of a quadruped robot[J]. Robotica, 2016, 34(12):2878—2891.