

# 四足机器人刚柔耦合仿生脊柱研究进展

雷静桃, 张悦文, 饶进军

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

**摘要** 四足机器人的仿生脊柱对提高机器人非结构化环境的机动性和稳定性具有重要作用。系统分析了国内外四足机器人仿生脊柱的研究现状, 将仿生脊柱分为局部柔顺脊柱和整体柔顺脊柱两类, 对比分析不同四足机器人仿生脊柱的结构特点, 提出未来发展趋势。四足机器人仿生脊柱从传统的整体刚性结构向刚柔耦合结构方向发展, 具有类生物变刚度、可柔顺弯曲特性的新型仿生脊柱突破仿生驱动、神经元精细控制等关键技术, 向高效能量转换的类生物系统方向发展。

**关键词** 四足机器人; 刚柔耦合; 仿生脊柱; 生物力学

自然界的生物在 35 亿年的物竞天择中, 表现出完美的生物合理性和对自然环境的高度适应性, 是机器人研究工作取之不尽用之不竭的学习源泉。其中, 四足机器人凭借承载能力强、稳定性好、对凹凸不平的地形适应能力强的优点, 可广泛应用于抢险救灾、军事、工业及娱乐等领域, 具有很好的应用前景, 其研制工作一直受到国内外学者的高度重视。四足机器人机体大多采用刚性结构, 与生物结构合理性和精巧性相去甚远, 缺乏变刚度特性, 难以柔顺弯曲辅助仿生腿进行原地转向步态, 更难以满足四足机器人高速跑跳对机体柔顺弯曲的需要。通过对生物界的观察和研究可以发现, 四足哺乳动物具有灵活的脊柱结构和强劲的肌肉提供辅

助动力, 可以完成多种灵巧的运动姿态。以生物原型为灵感, 研究变刚度多向灵活弯曲仿生机体, 对提高四足机器人非结构化环境的机动性和动态稳定性有着重要作用。

Hilbert 通过高速摄像机记录了猎豹在捕食过程中的奔跑形态(图 1<sup>[1]</sup>), 显然, 猎豹的脊柱在奔跑过程中不是刚性的, 而是具有适应不同速度的变刚度特性。脊柱随着奔跑周期的变换不断进行着伸展和弯曲变化, 提高加速性能的同时, 为高速运动储存/释放能量。Hackert 对鼠兔脊柱的研究发现, 运动过程中脊柱的大幅度变化改变了身体的质量分布, 使质心保持在一个平稳轨迹上运动, 从而减少由于惯性而导致的身体失稳<sup>[2]</sup>。此外, 四足生物

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775323, 51375289)

作者简介: 雷静桃, 教授, 研究方向为仿生机器人, 电子信箱: jtlei2000@163.com; 张悦文(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为仿生机器人, 电子信箱: 17854252082@163.com

引用格式: 雷静桃, 张悦文, 饶进军. 四足机器人刚柔耦合仿生脊柱研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 35-49; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.02.005

常以原地转向步态避开障碍物或改变行进路线(图2<sup>[3]</sup>),其脊柱关节所提供的附加自由度,可以帮助提高生物运动的灵活性,通过脊柱侧向弯曲与腿的运动协调,使原地转向步态更快更平稳。

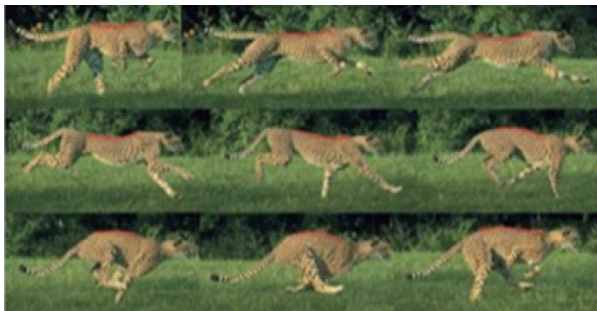


图1 高速摄像机记录的猎豹奔跑形态

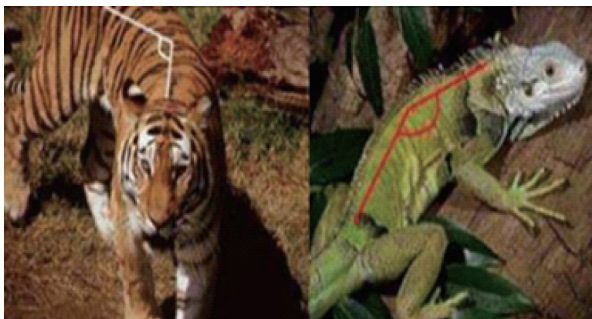


图2 四足生物转向步态下脊柱侧向弯曲

四足哺乳动物非结构环境下的高机动性是通过躯体变刚度特性、腿关节变刚度特性以及躯体与腿的协调运动实现的,可实现连续的加减速、原地转向、步态变换运动以平稳穿越复杂地形,其优雅和敏捷的运动是神经系统、肌肉骨骼系统协同工作并与环境相互复杂作用的结果。四足哺乳动物的超级运动能力为研制高性能四足机器人提供了很好的生物学模板。如何从生物中寻找灵感,研制具有精巧仿生结构的四足机器人,突破仿生脊柱类生物刚度特性、骨骼肌肉协调运动,提高四足机器人运动灵活性、机动性和稳定性,仍是机器人技术领域亟需解决的关键技术。

四足机器人研究者多关注仿生腿的机构设计与稳定步行控制方法,虽然可以通过增加腿部自由度方法,设计多自由度仿生腿机构来提高四足机器人的灵活性,以适应复杂地形,但仅通过增加腿自

由度,难以实现类似于四足生物那样的机动性和灵活性。

已有的四足机器人机体多为刚性整体结构,忽略了四足机器人的机体在其动态移动中所起的作用,难以实现类似于四足生物那样的适应非结构化环境的高速运动机动性和稳定性。四足机器人动态移动时,刚性机体结构由于不具有柔顺性,机体姿态动态调整比较困难,则不能快速响应以适应地形或移动速度变化。另外,机体的刚性结构难以吸收步行过程中来自地面的接触冲击,无法发挥吸收冲击能量的缓冲作用,从而易导致四足机器人失稳。这使得四足机器人非结构化环境下的复杂运动如奔跑、跳跃、转向等受到了较大限制,降低了四足机器人在复杂环境中的机动性与动态稳定性。

四足机器人仿生机体研究方面,国内外已开展了一些创新性研究工作,以提高机器人运动的机动性、灵活性和柔顺性。2005年,韩国庆北国立大学设计了一种四足仿生机器人ELIRO,机体上设计一个自由度,其前机体和后机体由一个主动旋转关节相连接<sup>[4-5]</sup>,以提高四足机器人的机动性(图3(a))。

2012年,瑞士联邦理工学院研制的四足仿生机器人StarLETH(图3(b)),每条腿具有侧摆髋关节、臀关节和膝关节3个自由度,该机器人最大特点是整个机体装有20根弹簧,模拟生物肌肉、肌腱和软骨在缓冲冲击和存储能量方面的特性。运动过程中,机器人机械能与弹簧弹性势能间频繁实现能量转换,减小与地面的冲击振动。该研究对四足机器人如何在颠簸、剧烈晃动的环境下高速运动,具有指导意义<sup>[6]</sup>。

2012年,美国麻省理工学院(MIT)机器人实验室研制的四足仿猎豹机器人,具有和生物极其相似的骨骼肌结构(图3(c))。机器人拥有12个自由度,脊柱采用绳索驱动的差动齿轮机构,绳索将后腿的运动和仿生脊柱的运动耦合起来。猎豹机器人在高速运动过程中,可以通过选择后腿的同相位或者不同相位来驱动脊柱弯曲。当后腿同相位且向后运动时,差动耦合使得脊柱向上弯曲,增加了MIT猎豹的运动幅度;当后腿同相位且向前运动时,差动耦合使得脊柱向下弯曲,带动后腿向前运

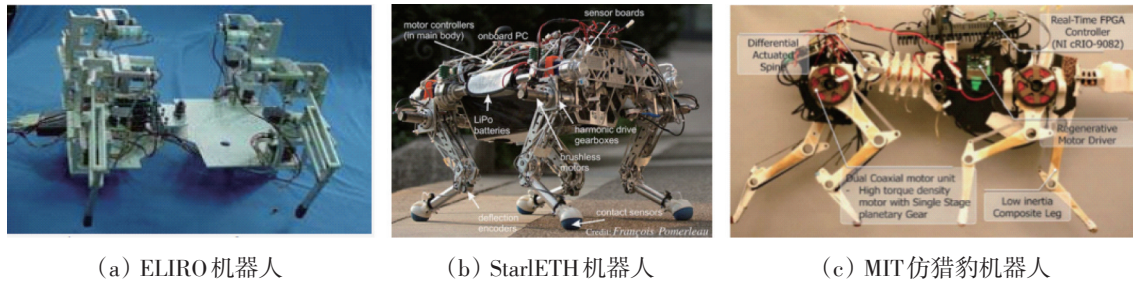


图3 四足机器人

动。当后腿不同相位时,脊柱将不会发生弯曲运动,保持水平无弯曲状态<sup>[7-8]</sup>。

本文基于四足生物脊柱生理结构及其运动机理分析,综述四足机器人可柔顺弯曲的仿生脊柱研究现状,分析国内外关于仿生机器的仿生柔顺结构、仿生驱动、运动控制等方面的研究进展,提出四足机器人仿生脊柱发展趋势及面临的挑战。

## 1 脊柱生理结构及其运动机理

从解剖学的角度看,四足哺乳动物的脊柱可分为颈椎、胸椎、腰椎、骶椎和尾椎5个部分,如图4所示,每部分椎节均由椎体和椎间盘组成。其中,腰椎部分的椎节要明显长于胸椎部分,但胸椎的节数要多于腰椎部分,因此腰椎的整体长度与胸椎相近。另外,胸椎部分由于需要保护心脏、肺等重要器官,其刚度较大,而腰椎部分没有类似胸椎的结构限制,具有较大的活动性,即刚度较小<sup>[9]</sup>。

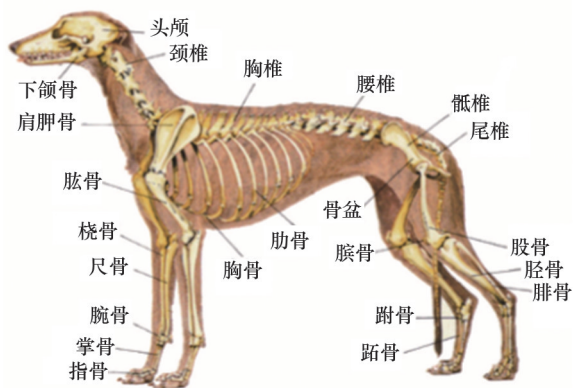


图4 生物狗的骨骼

### 1.1 脊柱负荷

四足动物的脊柱经常被误解为不像直立的两足动物那样承受轴向载荷,然而,由于高强度的肌肉和韧带拉力作用于四足动物的脊柱,使得它不仅承受轴向载荷,甚至可能比人类脊柱所承受的轴向载荷还要高<sup>[10]</sup>。四足动物的椎体骨密度是人类的2~4倍,这表明四足动物的椎体承受更高的轴向应力。这一结论得到了一些相关实验研究的支持,Reitmaier等<sup>[11-12]</sup>测量了绵羊和小母牛在不同活动期间的椎间盘内压力(IDP)并与人类的进行对比。实验结果表明,四足动物的椎间盘内压力普遍高于人类,如绵羊静态活动时的IDP水平是人类的4倍,动态活动时的IDP水平是人类的2~3倍。

### 1.2 脊柱的灵活性

比较功能性脊柱生物力学的最重要的参数之一是脊柱的灵活性。一些研究测量了动物模型的脊柱灵活性,并与人类脊柱进行比较,结果如图5~图7<sup>[13]</sup>所示。

从图5~图7可以看出,无论是人类还是其他四足动物,脊柱屈伸、侧弯、轴向旋转时,脊柱关节均有一定的活动度,其中腰椎区域的关节活动度(ROM)最小。羊和猪脊柱在腰椎区域与人类脊柱较为相似;牛脊柱在胸椎区域与人类脊柱较为相似;猪脊柱在颈椎区域与人类脊柱较为相似。此外,与人类相比,四足动物腰椎区域的关节活动度较小,尤其是在屈伸运动条件下。

### 1.3 椎体及椎间盘的解剖特性

不同物种椎体的解剖特性与其运动方式相关,以适应其特定的生物力学要求,主要动物模型椎体解剖特征见表1<sup>[10]</sup>。人类椎体通过显著增大上终板

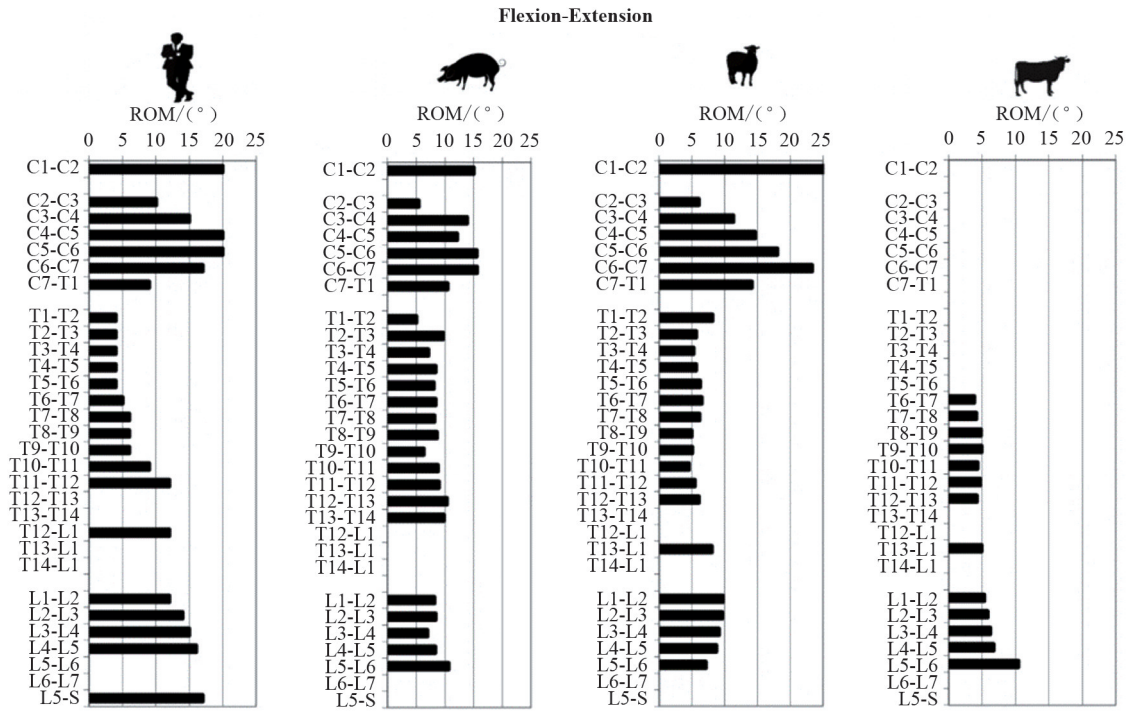


图5 人、猪、羊、牛脊柱屈伸的关节活动度(ROM)

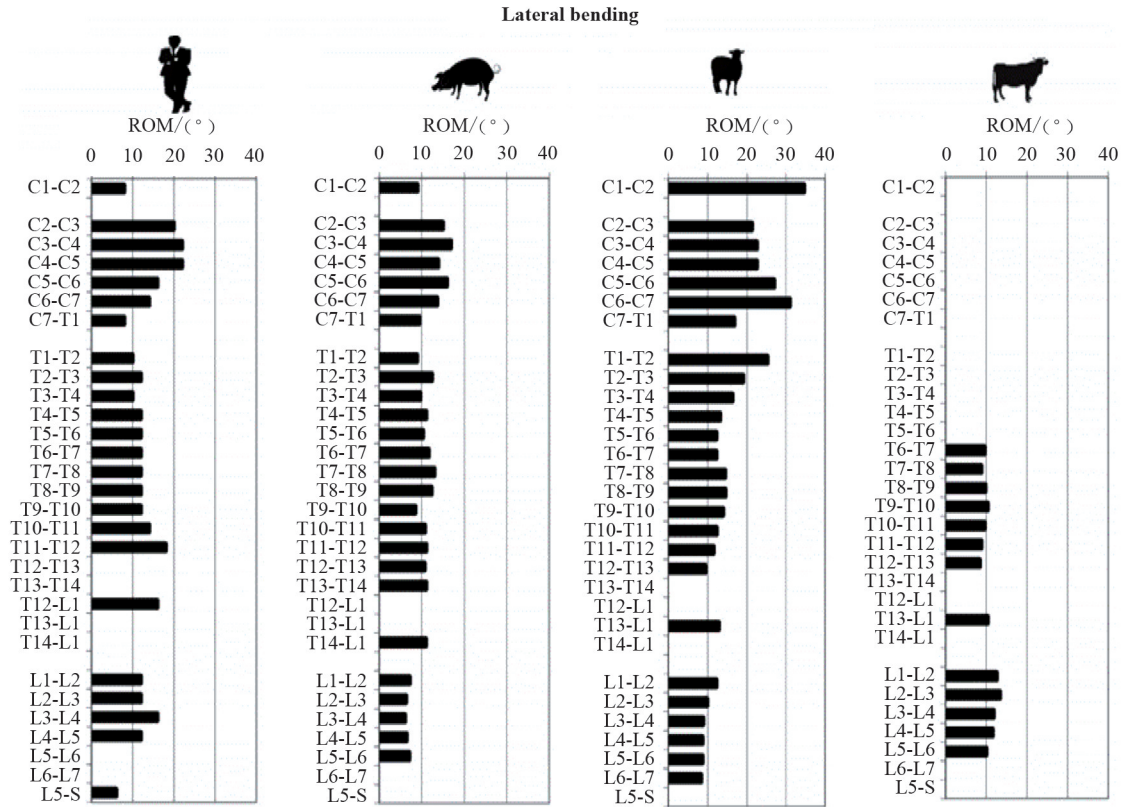


图6 人、猪、羊、牛脊柱侧弯的关节活动度(ROM)

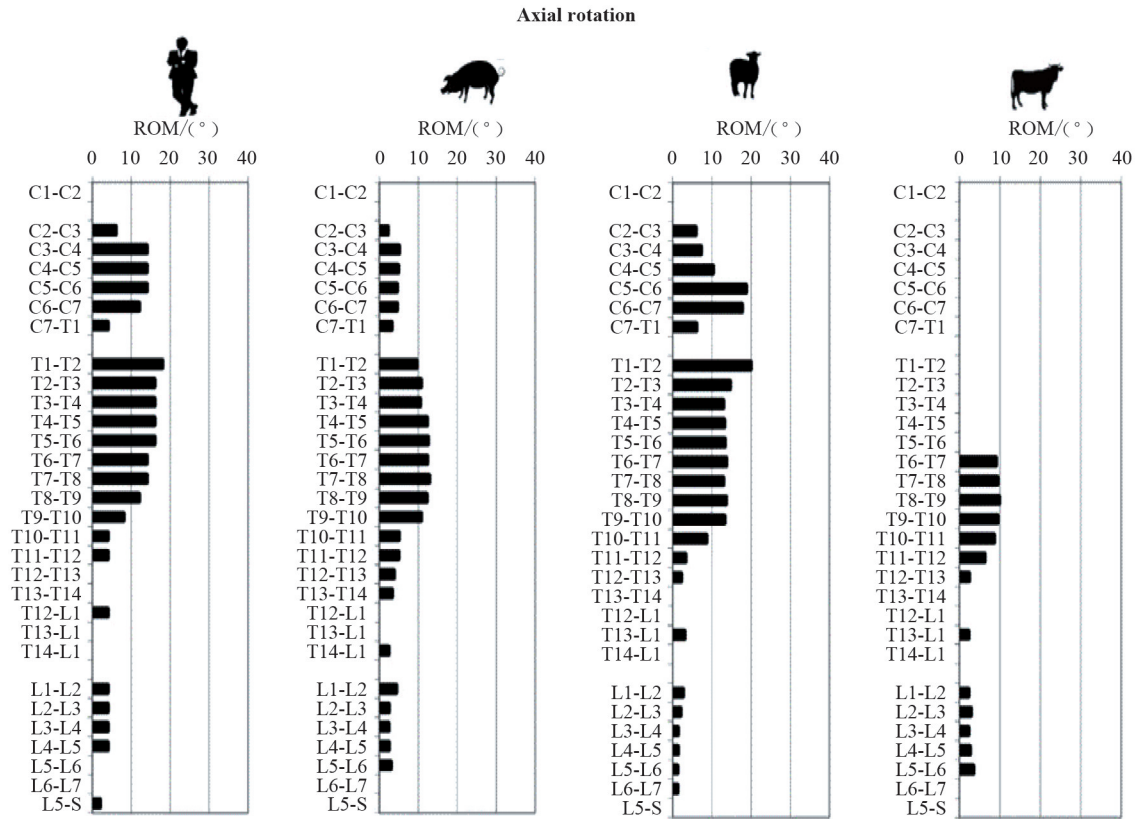


图7 人、猪、羊、牛脊柱旋转的关节活动度(ROM)

表1 主要动物模型椎体解剖特征<sup>[10]</sup>

动物椎体		椎体解剖特征/mm						
		终板宽度	终板深度	椎体高度	椎管宽度	椎管深度	椎弓根宽度	椎弓根高度
颈椎	人	19.1	15.6	—	26.1	27.3	5.5	11.2
	猪	33.3	17.8	—	22.1	28.2	11.1	17.9
	狒狒	10.6	10.6	10	14.8	10.5	2.8	7.0
腰椎	人	45.75	34.62	23.78	24.86	18.60	11.48	16.08
	绵羊	30.70	19.65	38.30	13.80	9.20	10.00	34.30
	猪	37.48	23.32	35.32	17.98	11.78	12.13	21.20
	小牛	31.20	24.80	26.40	19.60	15.70	8.50	—
	鹿	30.80	19.80	43.70	—	—	—	—

表面积,提供了一种适应高水平轴向载荷的能力;四足哺乳动物在运动过程中有明显的脊柱屈伸运动,主要表现为椎体在矢状面变窄。

椎间盘的解剖特性在不同物种间存在相当大的差异。首先是结构大小上存在差异,一般来说,人类椎间盘比动物椎间盘大(表2<sup>[10]</sup>)。然而,椎间

盘大小不同并不意味着产生的应力和应变不同,每个物种的几何特性必须与其所承受的载荷相关。小型动物如老鼠或兔子,脊柱所承受载荷小于大动物物种如绵羊或牛,但椎间盘内应力是相似的<sup>[14]</sup>。此外,考虑整个脊柱椎间盘解剖参数的变化也很重要。例如,人类椎间盘高度从腰椎到颈椎区域逐渐

减小,而大型动物如猪、羊和小牛,椎间盘高度则趋于稳定<sup>[14-15]</sup>。除了几何差异,不同物种椎间盘在结

构特征,例如椎间盘含水量、胶原蛋白含量、胶原纤维取向等方面也存在一些差异<sup>[16]</sup>。

表2 主要动物模型椎间盘解剖特征<sup>[10]</sup>

动物椎体	椎间盘解剖特征					
	椎间盘高度/mm	中径/mm	前后径/mm	椎间盘面积/mm <sup>2</sup>	髓核面积/mm <sup>2</sup>	髓核面积:椎间盘面积
颈椎 猪	7.8	33.3	17.8	—	—	—
胸椎 小牛	6.9	23.7	24.1	622	176	0.28
人	11.30	55.90	37.20	1727.00	479.00	0.28
狒狒	4.45	35.40	22.80	749.00	242.00	0.32
腰椎 绵羊	3.93	24.90	18.30	676.00	267.00	0.39
大鼠	0.93	5.79	3.48	20.40	5.00	0.24
小鼠	0.31	1.84	1.24	1.81	0.33	—

#### 1.4 脊柱运动机理

研究表明,四足哺乳动物的快速奔跑(如猎豹,最高时速可达 120 km/h)得益于奔跑过程中脊柱的屈伸运动,其主要作用表现为增加腿部运动步幅、提供额外助推力、储存并传递能量<sup>[17-18]</sup>。四足哺乳动物脊柱运动机理研究,对提高仿生机器人机动性、能效的研究具有借鉴作用。

四足哺乳动物在进化过程中,脊柱从解剖学和功能上被细分为 2 个不同的区域——胸椎和腰椎,胸椎作为胸腔的一部分,为了确保运动过程中的呼吸顺畅并抵消四肢传递到胸壁的负荷力,刚性较大。因此,脊柱的屈伸运动一般被认为局限于腰椎区域,是腰椎相邻椎关节间附加屈曲或伸展的结果<sup>[19]</sup>。

生物的脊柱不是一个独立单元,是生物系统的中心部件,通过肌肉、韧带与其他肌肉骨骼组织相连并协同工作。椎旁肌可改变脊柱姿势,影响脊柱的应力分布,在脊柱的屈伸运动中起着重要作用,一方面起到支撑作用,通过增加脊柱节段的刚度增强脊柱的稳定性<sup>[20]</sup>;另一方面,腿部运动与脊柱运动通过肌肉的作用相耦合,共同实现脊柱的屈伸效果。以猫科生物为例,背阔肌连接前腿和脊柱,腰大肌连接后腿和脊柱,当腿向内摆动时,脊柱弯曲,当腿向外摆动时,脊柱伸展(图 8)<sup>[21]</sup>。

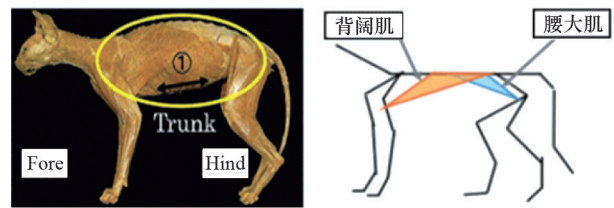


图8 猫的肌肉系统

## 2 四足机器人局部柔顺仿生脊柱

受四足生物高性能运动特性的启发,机器人研究者逐渐认识到仿生脊柱在提高四足机器人运动性能方面的重要作用,如果没有灵活的仿生脊柱,四足机器人难以实现非结构化环境的机动性、高速运动的柔顺性和灵活性。国内外研发的仿生脊柱,从仿生结构角度,分为局部柔顺脊柱和整体柔顺脊柱<sup>[22]</sup>;从可控性角度,分为主动柔顺脊柱和被动柔顺脊柱<sup>[23]</sup>。自 20 世纪 90 年代起,国外学者就局部柔顺脊柱开展了一系列研究(图 9)。

1996 年,美国麻省理工学院 Leaser 等研发出一款带有铰接式脊柱关节的平面四足机器人(图 9(a)),并通过原型实验研究了机器人脊柱关节的作用,主要表现在增加有效腿长、储存/传递能量和为腿提供辅助动力<sup>[24-25]</sup>等 3 个方面。同年,南加州大学 Lewis 等设计出一台可重构机器人“GEO”(图 9

(b)。“GEO”的主要特点在于一个3自由度的灵活脊柱,与其他刚性躯干机器人相比,它不仅能模拟四足动物的侧屈和背腹屈,还可以通过旋转调整髋

关节和锁骨之间的角度,以获得更大的步行灵活性<sup>[26]</sup>。

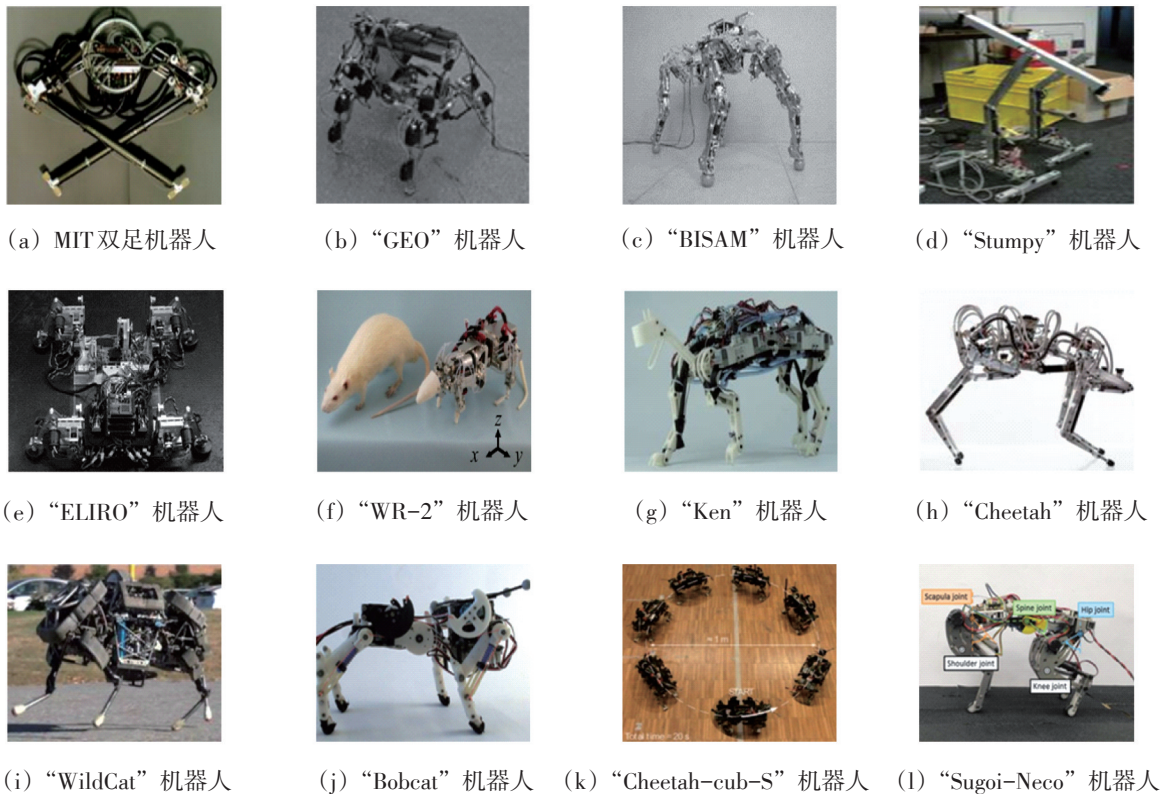


图9 局部柔顺仿生脊柱

1999年,受哺乳动物行走姿势的启发,德国卡尔斯鲁厄大学 Berns 等设计出一款四足行走机器人“BISAM”(图9(c))。该机器人主体由3段构成,肩膀和臀部分别通过2自由度关节与躯干相连,铰接式脊柱关节增加了行走的稳定性和灵活性<sup>[24,27]</sup>。

2002年,为了印证了“脊柱引擎”的生物假说,瑞士苏黎世大学 Iida 等通过在机器人“Stumpy”的腰关节上施加一个驱动力矩,实现了该机器人的简单跳跃,并研究了脊柱关节在四足机器人中的驱动作用<sup>[24]</sup>(图9(d))。

2005年,韩国庆北大学 Park 等研制的四足机器人“ELIRO”(图9(e))尽管以机器人自主进食机制为研究重点,其柔性腰关节的优越性也同样被证实。利用腰关节,机器人不仅能实现静态转向、躲

避障碍物,步态也较单一刚体行走机器人更加稳定,更加接近真实动物<sup>[5]</sup>。

2009年,日本早稻田大学 ISHII 等研发出了一款小型仿生四足机器人 WR-2(图9(f)),其腰部具有俯仰和偏转2个被动自由度,能够实现类鼠式的躯干弯曲和转动<sup>[28]</sup>。

2012年,日本大阪大学 Narioka 等研发出一款气动人工肌肉驱动四足机器人“Ken”(图9(g))。该机器人铰接式脊柱关节由 McKibben 气动人工肌肉和被动弹性元件驱动,可以在不增加温度的情况下实现快速运动<sup>[29]</sup>。

2012年,波士顿动力公司为美军研制了一款名为“Cheetah”的四足机器人(图9(h)),在跑步机上的奔跑速度高达45 km/h,远远刷新了之前四足

机器人的最快奔跑速度记录<sup>[30]</sup>,这在一定程度上要归功于其铰接式主动柔顺脊柱,柔性脊柱不仅能够储存一定的能量,还扩充了机器人躯干和四肢的运动空间,提高了机器人奔跑的协调性<sup>[31]</sup>。2013年波士顿动力公司研制的“WildCat”机器人(图9(i))同样有一个主动柔顺脊柱关节,可实现疾驰和跳跃步态,且可在高速运动中实现转弯<sup>[31]</sup>。

2013年,瑞士联邦理工学院 Khoramshahi 等研发出一款具有主动柔顺脊柱的四足机器人“Bobcat”(图9(j)),其脊柱中间有一个铰接式主动俯仰关节,运动幅值可以达到 $35^\circ$ 。通过设计实验将主动柔顺脊柱和刚性脊柱相比较,主动柔顺脊柱可以增加10%的机器人跨步长,从而提高机器人的整体运动速度。同时,由于具有主动柔顺脊柱的机器人将足端落地的冲击力转化成了前进运动的动力,在能耗方面也有所降低<sup>[32]</sup>。BioRob实验室之后继续致力于仿生脊柱的研究,2016年,在哺乳类动物运动特性的启发下,该实验室将一个电缆驱动的主动偏转关节集成到四足机器人“Cheetah-cub-S”(图9(k))中,希望利用主动柔顺脊柱提高机器人的转向能力,从而使其更接近于未来的野外应用。与刚性脊柱机器人相比,柔性脊柱将转弯半径减小到0.51 m,并且在运动过程中可以实现多种转弯半径的转弯运动<sup>[33]</sup>。

2016年,日本电气通信大学 Kawasaki 等为了研究猫科动物前肢、后肢和脊柱之间的耦合关系,设计了一款带有柔性耦合脊柱机构的小型四足机器人“Sugoi-Neco”(图9(l)),引入动物身体的柔性特征,驱动肩胛骨或髌关节并通过一个带扭簧的脊柱关节实现脊柱的屈伸。由于弹簧中储存的弹性能量可以释放到其他关节辅助运动,该机器人较刚性脊柱机器人可以跑得更快,跳得更远(或更高)<sup>[21]</sup>。

中国机器人研究学者也认识到刚性躯体无法更好地提高机器人运动速度,开始研究机器人的身体结构,给机器人机体上设计一个活动的脊柱关节,提高机器人的运动性能。

2012年,哈尔滨工程大学张群等<sup>[34]</sup>基于研究猎豹高速运动,提出一种具有灵活脊柱关节的新型四

足机器人模型,通过仿真实验研究脊柱关节对跳跃运动的影响,验证了脊柱关节在四足机器人跳跃过程中的3个主要作用:增加腿部运动步幅、提供额外的助推力以及能量的储存和传递。2014年,董立涛等<sup>[25]</sup>继续参考猎豹奔跑时脊柱的运动特点,提出一种带弹性元件的电机驱动方案,完成了脊柱关节的仿生结构设计,研制出一种新型含灵活脊柱关节的四足仿生机器人,模型及实物样机如图10所示,旨在通过改变传统的刚性机体结构来提高四足机器人的整体运动性能。

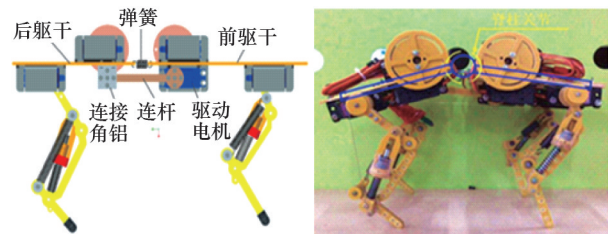


图10 含灵活脊柱关节的四足机器人模型及实物样机<sup>[25]</sup>

这些研究大多将机器人机体设计为前机体和后机体两部分,通过中间的被动或主动旋转关节来连接前机体和后机体,将运动关节视为增强运动的辅助元素,并没有具体研究其形态参数。属于局部柔顺的仿生机体,机体自身的运动灵活性和对四足机器人的移动机动性改善是有限的,脊柱形态在运动中的影响需要进一步研究和量化。

### 3 四足机器人整体柔顺仿生脊柱

与增加仿生机体的腰部自由度实现的局部柔顺脊柱不同,整体柔顺仿生脊柱是指脊柱为一个连续的整体柔顺结构,更接近动物的脊柱形态,在运动灵活性方面具有良好的仿生性能,国外学者开展了一系列研究(图11)。

#### 3.1 国外四足机器人整体柔顺脊柱研究进展

1999年,日本东京大学 Matsuki 等设计出第一款带有整体柔顺脊柱的机器人SQ43(图11(a)),其脊柱由多节具有自动恢复能力的泡沫椎间盘和刚性椎骨交替排列构成,外部包裹一层弹性塑料外



图11 国外整体柔顺仿生脊柱

壳,一根钢丝绳穿过脊柱中心,通过尾部电机和绕线轮放松或收紧钢丝绳实现脊柱的俯仰动作。经研究发现,整体柔顺脊柱使机器人运动变得更加协调,能够穿过一些狭窄的通道和不规则的地形,并且具有一定的减振效果<sup>[23,25]</sup>。

2010年,日本大阪工业大学 Takuma 等<sup>[35-36]</sup>设计制作了一款带有被动柔顺脊柱结构的四足机器人(图 11(b))。该机器人脊柱由聚氨酯制的刚性椎骨和弹性硅胶制的椎间盘间隔排列构成,中间穿有 2 根钢丝绳,通过调节钢丝绳的拉力对脊柱刚度进行调节,研究了机器人在不同步态和脊柱刚度条件下的行走性能。之后,该团队对脊柱结构进行了改进,研制出一款具有气动执行机构驱动的腿和可变刚度脊柱的 3D 四足机器人(图 11(c)),机器人脊

柱的椎骨和椎间盘均为圆形截面,这样可以实现脊柱向任意方向的弯曲和伸展<sup>[32]</sup>。2012年,Miki 等<sup>[20]</sup>研制出一款具有拮抗性气动执行机构的肌肉骨骼四足机器人(图 11(d)),并通过改变躯干在爬行、小跑等速度模式中的刚度来研究运动的稳定性。该机器人脊柱由 10 个椎骨和 9 个椎间盘串联而成,绞车调整脊柱中钢丝绳的拉力,气动执行机构用于改变躯干刚度。

2010年,德国不莱梅大学 Kuehn 等以黑猩猩为原型设计出一款具有被动柔顺脊柱结构的四足机器人——LittleApe(图 11(e))。脊柱的可调性,增加了机器人的灵活性和阻尼能力,可以适应不同种类的运动模式<sup>[37]</sup>。2011年,在深入研究四足生物原型的基础上,设计一种由颈椎、胸椎和腰椎 3 节组

成的仿生脊柱(图 11(f)),每节平台之间除脊柱外,外圈有多根由舵机驱动的连杆,连杆一端由球铰连接平台,另一端由转动副连接舵盘,舵机的转动驱动连杆摆动,从而驱动平台在偏转和俯仰方向转动,形成主动脊柱<sup>[31,38]</sup>。

2010年,伊朗德黑兰大学 Bidgoly 等<sup>[39]</sup>从老虎的生物原型汲取灵感,设计出一款脊柱刚度可调的四足机器人“Tiger”(图 11(g))。为了保证脊柱灵活性,使用柔软的金属片作为腰线,将一些轻质的树脂块以一定的水平间隙安装在金属片上表面,通过控制树脂块的间隙来控制脊柱向下弯曲的范围。同时,在脊柱的颈部和臀部间连接一个线性弹簧,使其刚度可调。研究发现,腿和脊柱间的相互作用可产生更高的能量效率和更快的奔跑速度,当后腿向前伸展时,脊柱向上弯曲,脊柱弹簧被拉伸,腿的动能储存在弹簧中,被用来抬起前腿并向前摆动。2011年,该实验室 Kani 等<sup>[40]</sup>在此基础上设计了3种不同类型的脊柱,一种只能向上弯曲,一种可以上下弯曲,以及一种没有任何灵活性的刚性脊柱,将它们分别应用在被动四足机器人 Fanari(图 11(h))上,研究了脊柱柔韧性对机器人快速运动稳定性、适应性和能效的影响。结果表明,脊柱上下均具有柔性的机器人在疾驰动作中具有最稳定、适应性最强、速度最快的特点。

2012年,在脊柱引擎生物学假说的启发下,瑞士苏黎世大学赵倩等<sup>[41-42]</sup>将一根柔顺的、多自由度的仿生脊柱植入了一个名叫 Kitty 的四足机器人(图 11(i))体内。脊柱的每一侧由2个或3个弹性硅块椎间盘和4个刚性塑料椎骨组成,通过从脊柱上移除一些硅块,可以研究非对称结构在运动中的作用,从而更好地理解脊柱的内在机制。2013年,赵倩等<sup>[43]</sup>继续开发了一款名为 Renny(图 11(j))的气动驱动四足机器人,为了研究脊柱肌肉驱动和刚度分布的影响,Benny 的脊柱被设计为完全可重构。为了便于实验过程中对人体动力学进行分析,脊柱设计采用单球窝简化关节,脊柱关节两侧安装有 ABS 圆盘,可在脊柱周围安装多达8个不同配置的气动执行机构。脊柱的长度和安装脊柱肌肉的位置可以轻易调整,也可以通过简单的调整将脊柱

变成一个刚性的、被动的或主动驱动的脊柱。

2012年,美国麻省理工学院仿生机器人实验室设计的 MIT Cheetah(图 11(k))奔跑速度可达到 22 km/h,运动过程中还可以实现从小跑(trot)到奔跑(gallop)灵活的步态转变。这得益于一款差分驱动式的主动柔顺脊柱,主要由环形聚氨酯弹性体和刚性工程塑料串联而成,利用机器人左后腿和右后腿的电机采用差分驱动而不需要额外的电机。此外,机器人还可利用在运动过程中环形聚氨酯弹性体储存的弹性能量实现快速奔跑<sup>[44-45]</sup>。

2014年,美国陆军研究实验室和宾夕法尼亚大学合作研制了一款独立的四足行走机器人平台“Canid”(图 11(l))<sup>[46]</sup>。“Canid”的独特之处在于它平行电缆驱动的弹性脊柱。脊柱由预浸渍玻璃纤维复合材料制成的平板构成,刚性板加固。通过仿真及实验,研究了驱动脊柱与刚性躯干四足机器人相比,步态速度和效率等方面的影响。

2015年,Eckert 等<sup>[47]</sup>研制一款具有模块化脊柱的四足机器人“Lynx”(图 11(m)),比较了直接驱动的单关节脊柱设计(SV1)和多关节脊柱设计(SV2和SV3)。其中,SV2、SV3是由ABS构建的多关节脊柱,SV2、SV3最大的区别在于脊柱的刚度,SV3的刚度是SV2的2倍。研究表明,不同的脊椎结构产生不同的运动模式,与多关节脊柱的自然稳定步态不同,单关节脊柱可能产生非稳定步态,引起机器人稳定性降低。

2018年,Sabelhaus 等<sup>[48]</sup>研究有仿生脊柱的四足机器人“Laika”(图 11(n)),其脊柱是主动驱动的整体柔顺结构,由5个椎骨组成,其中第2和第4椎骨是活动的,中间的第3椎骨可旋转,椎骨1和椎骨5分别与臀部和肩部相连,是被动运动的,椎骨由拉索网连接以保持整体结构的平衡和稳定。“Laika”的脊柱具有质量和力分布均匀的优点,可以进行复杂的多自由度运动,便于实现机器人在不平坦的非结构化地形移动。

### 3.2 中国四足机器人整体柔顺脊柱研究进展

中国的机器人研究学者在四足机器人整体柔顺脊柱方面,开展了创新研究工作(图 12)。

2013年,张秀丽等<sup>[49]</sup>为提高四足机器人的运动

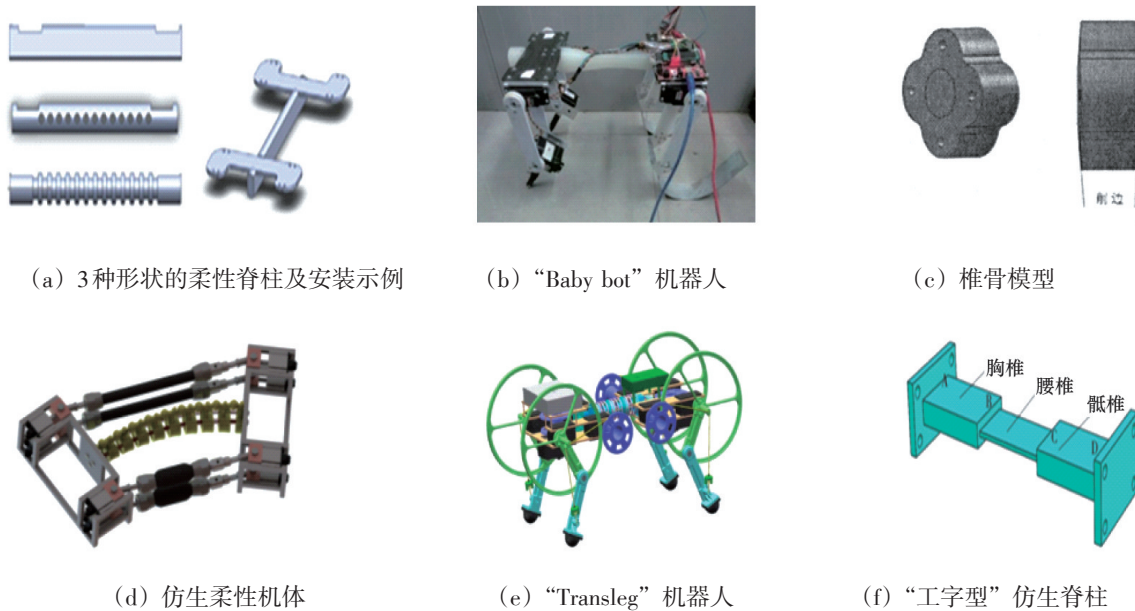


图12 中国整体柔顺仿生脊柱

协调性和姿态稳定性,设计了一种弹性材料的柔性脊柱来代替四足机器人的刚性躯干。根据弹性材料的变形机理和离散伪刚体理论,设计了3种不同形状的柔性脊柱(图12(a)),并对它们的应力应变分布进行了比较分析。2015年,该团队受婴儿爬行时独特的躯体形态的启发,设计了具有柔性脊柱和弹性膝关节的欠自由度四足爬行机器人“Baby-Bot”(图12(b))。为了模拟婴儿爬行时脊柱各段的轴向运动幅度以及在空间3个转动方向上刚度不同的特点,将“BabyBot”的柔性脊柱设计为变截面形状,同时,为实现偏转方向(yaw)较大的柔顺性,对脊柱两侧进行对称削边<sup>[22]</sup>。

2016年,张秀丽等<sup>[31]</sup>通过观察猎豹身体结构和躯干运动特征,提出一种具有可变刚度的四足机器人仿生脊柱(图12(c)),由胸椎、腰椎和骶椎3部分组成,每部分均由不同厚度的刚性椎骨和弹性椎间盘组成,通过改变脊柱3个组成部分中弹性块和刚性块的厚度比例,保证可变刚度脊柱结构中腰椎部分的刚度最小,胸椎和骶椎部分的刚度较大。椎骨和椎间盘采用四叶草结构形状,并在4个叶瓣边沿留有穿绳孔。上、下两组穿绳组件用于调节可变刚

度脊柱在俯仰方向的弯曲刚度,左、右两组穿绳组件用于调节可变刚度脊柱在偏转方向的弯曲刚度,另外,采用螺旋传动的仿生脊柱的刚度调节机构,开展了仿生脊柱的静刚度特性测试实验。

2014年,雷静桃等<sup>[50]</sup>研究采用气动肌腱驱动的刚柔耦合仿生机体(图12(d)),由气动肌腱、仿生脊柱、弹簧等组成。其中,仿生脊柱由若干节仿生椎骨单元串联而成,每一节仿生椎骨单元包括仿生椎骨和仿生椎间盘,前一节的椎骨下关节面和后一节的椎骨上节突构成一个球副,并由3根弹簧连接两相邻椎骨形成仿生椎间盘,由不同的气动肌腱驱动,仿生机体可实现一定范围内的侧向弯曲或上下弯曲。

2016年,钟伟等<sup>[51]</sup>在腿轮式机器人“Transleg”(图12(e))中采用柔顺脊柱,脊柱由执行机构、导线和一组脊柱关节等构成,每个脊柱关节由球关节、螺杆、螺母、压缩弹簧等组成,脊柱关节采用可扩展结构,理论上可以有任意数量的关节。关节中的压缩弹簧用来保持脊柱处于直线状态,使其弯曲具有一定柔顺性。

2018年,马宗利等<sup>[52]</sup>设计了一种仿猎豹四足机

器人脊柱,由胸椎、腰椎和骶椎组成,呈工字型变截面结构(图 12(f)),胸椎和骶椎分别与前、后机体相连。

## 4 四足机器人仿生脊柱研究亟需解决的问题及发展趋势

四足机器人仿生脊柱研究方面,已经取得了一系列十分有价值的研究成果。但由于仿生机器人涉及机械、材料、生物、电子等多学科交叉,发展至今依然存在着“形似而神不似”、达不到生物系统精巧程度、实际应用有限等诸多问题。究其原因,主要是由于生物骨骼肌肉的协调运动机理、骨骼肌肉能量转换机理、生物自适应控制机理等不甚清楚,仿生机器人在仿生结构、仿生材料、仿生驱动与控制等方面,都还与生物特性存在较大差距。未来四足机器人仿生脊柱的发展趋势如下。

### 4.1 生物机理研究由宏观向微观发展

通过对生物机理研究,可以揭示脊柱原型的功能特性,为仿生脊柱的研究提供理论依据。随着生物学、材料学、物理学等多学科在生物机理研究上的应用,生物机理研究将跨越宏观、微观乃至纳米尺度的多层次结构和功能<sup>[53]</sup>,由表及里逐渐深入,从而建立更为逼真的数学模型。

### 4.2 由刚性整体结构向刚柔耦合类生物变刚度结构发展

仿生刚柔耦合结构成为仿生机器人机构创新关键,仿生脊柱的结构将逐步从刚性整体结构向刚柔耦合结构发展,既可具有刚性的支撑结构又可具有柔性的自适应结构,其柔性元件吸收冲击力的同时储存并传递能量,使运动更加高效、平稳。这一点是与技术系统的进化法则一致的。

### 4.3 由传统驱动方式向新型仿生驱动发展

采用电机驱动的仿生脊柱,导致脊柱的结构比较大,重量较重。而自然界中的脊柱生物依赖于骨骼及其周围的肌肉群,通过肌肉的协调运动,只需消耗少量的能量,结合生物转换方式,便可产生巨大的能量<sup>[53]</sup>,实现柔顺协调的运动方式。未来仿生机器人的仿生脊柱将向着具有更多自由度、更大灵

活性的类生物仿生驱动方向发展。

### 4.4 由传统控制方式向神经元精细控制发展

未来将在现有研究基础上进一步深入研究生肌电信号采集与控制、类生物神经元控制等仿生控制方式<sup>[54]</sup>,通过神经元进行仿生脊柱的精细控制,实现更精确、适应性更高、响应速度更快的控制过程及良好的环境感知能力,从而实现更为逼真的运动仿生。

### 4.5 由低效的机械能转换方式向高效的类生物能量转换方式发展

移动类机器人系统的电源问题日益突出,发展高效率、低能耗的移动仿生机器人成为发展趋势之一。需研究移动生物的能量转换方式、能量的传递和转换机理及其与生物组织之间的关系;机器人的能量转换方式通过模仿生物的能量转换方式,达到提高能量利用率、降低能耗的效果。

## 5 结论

基于四足生物脊柱生物结构和特性分析,从局部柔顺脊柱和整体柔顺脊柱两个方面,综述了国内外四足机器人仿生脊柱的研究现状,并分析了未来发展趋势及面临的挑战。仿生机器人研究是基于对自然界中生物运动机理的深刻认识和对机器人技术的系统掌握,涉及机器人学、仿生材料学、生物学及解剖学等多学科交叉与融合,深入揭示生物的生理结构特征及其运动机理,将机器人学、材料学的新方法、新技术与复杂的生物特性相结合,实现仿生机器人的结构仿生、材料仿生、功能仿生、控制仿生的统一。未来仿生机器人系统有望集生命体的优点(如高能量效率、高功率质量比和高能量密度)和机电系统的优势(如高精度性、高强度、良好的可重复性和可控性)于一体,具备类生物的性能,以适应更加复杂多变的非结构化环境。

## 参考文献(References)

- [1] Hibert E. "Cheetahs on the Edge", a short movie by Greg Wilson[EB/OL]. (2013-04-26)[2019-02-12]. <http://www.>

- everseradio.com/cheetahs-on-the-edge/.
- [2] Schilling N, Hackert R. Sagittal spine movements of small therian mammals during asymmetrical gaits[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(10): 3925–3939.
- [3] Hackert R, Schilling N, Fischer M S. Mechanical self-stabilization, a working hypothesis for the study of the evolution of body proportions in terrestrial mammals[J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2006, 5(3/4): 541–549.
- [4] Park S H, Kim D S, Lee Y J. Discontinuous spinning gait of a quadruped walking robot with waist-joint[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB, Canada, 2005: 2744–2749.
- [5] Park S, Lee Y J. Discontinuous zigzag gait planning of a quadruped walking robot with a waist-joint[J]. *Advanced Robotics*, 2007, 21(1): 143–164.
- [6] Hutter M, Gehring C, Höpflinger M A, et al. Toward combining speed, efficiency, versatility, and robustness in an autonomous quadruped[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(6): 1427–1440.
- [7] Seok S, Wang A, Michael Chuah 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] Hyun D J, Seok S, Lee J, et al. High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(11): 1417–1445.
- [9] 董长生. 家畜解剖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [10] Galbusera F, Wilke H J. *Biomechanics of the Spine*[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2018: 279–296.
- [11] Reitmaier S, Schmidt H, Ihler R, et al. Preliminary investigations on intradiscal pressures during daily activities: An in vivo study using the merino sheep[J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e69610.
- [12] Buttermann G R, Beaubien B P, Saeger L C. Mature runt cow lumbar intradiscal pressures and motion segment biomechanics[J]. *Spine*, 2009, 9(2): 105–114.
- [13] Wilke H J, Krischak S, Claes L. Biomechanical comparison of calf and human spines[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 1996, 14 (3): 500–503.
- [14] Alini M, Eisenstein S M, Ito K, et al. Are animal models useful for studying human disc disorders/degeneration [J]. *European Spine Journal*, 2008, 17(1): 2–19.
- [15] Sheng S R, Xu H Z, Wang Y L, et al. Comparison of cervical spine anatomy in calves, pigs and humans[J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): 1–10.
- [16] Reid J E, Meakin J R, Robins S P, et al. Sheep lumbar intervertebral discs as models for human discs[J]. *Clinical Biomechanics*, 2002, 17(4): 312–314.
- [17] Gambaryan P P. *How mammals run*[M]. Jerusalem: Krieger Press, 1974.
- [18] Gary J. *How animals move*[M]. London: Cambridge University Press, 1960.
- [19] Schilling N, Hackert R. Sagittal spine movements of small therian mammals during asymmetrical gaits[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(10): 3925–3939.
- [20] Miki K, Tsujita K. A study of the effect of structural damping on gait stability in quadrupedal locomotion using a musculoskeletal robot[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway NJ: IEEE, 2012: 1976–1981.
- [21] Kawasaki R, Sato R, Kazama E, et al. Development of a flexible coupled spine mechanism for a small quadruped robot[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 71–76.
- [22] 张秀丽, 梁艳. 一种仿婴儿欠自由度四足爬行机器人[J]. *机器人*, 2016, 38(4): 458–466.
- [23] 李冬冬. 柔顺四足机器人的设计与控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [24] Brooke M H. Investigation of an articulated spine in a quadruped robotic system[D]. Michigan: University of Michigan, 2011.
- [25] 董立涛. 含脊柱关节四足机器人仿生结构设计及跳跃运动仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [26] Lewis M A. Self-organization of locomotory controllers in robots and animals[D]. Los Angeles: University of Southern California, 1996.
- [27] Berns K, Ilg W, Deck M, et al. Mechanical construction and computer architecture of the four-legged walking machine BISAM[J]. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 1999, 24(1): 32–38.
- [28] Ishii H, Masuda Y, Miyagishima S, et al. Design and development of biomimetic quadruped robot for behavior of rats and mice[C]. *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Piscataway NJ: IEEE, 2009: 7192–7195.
- [29] Narioka K, Rosendo A, Sproewitz A, et al. Development

- of a minimalistic pneumatic quadruped robot for fast locomotion[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 307-311.
- [30] Jason D. Boston dynamics robot Cheetah outruns swiftest human[EB/OL]. (2012-09-10)[2019-03-02]. <https://singularityhub.com/2012/09/10/boston-dynamics-robot-cheetah-outruns-swiftest-human/>.
- [31] 吴海波. 具有可变刚度的四足机器人仿生脊柱设计与应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [32] 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. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 3329-3334.
- [33] Weinmeister K, Eckert P, Witte H, et al. Cheetah-cub-S: Steering of a quadruped robot using trunk motion[C]//IEEE International Symposium on Safety. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 3021-3026.
- [34] 张群. 含脊柱关节驱动机构四足机器人跳跃机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [35] Takuma T, Ikeda M, Masuda T. Facilitating multi-modal locomotion in a quadruped robot utilizing passive oscillation of the spine structure[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 4940-4945.
- [36] Takuma T, Izawa R, Inoue T, et al. Mechanical design of a trunk with redundant and viscoelastic joints for rhythmic quadruped locomotion[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 745-764.
- [37] Kuehn D, Bernhard F, Grimminger F, et al. Development of passive spine and actuated rear foot for an ape-like robot[C]//International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support technologies for Mobile Machines. London: Springer Press, 2010: 237-244.
- [38] Kuehn D, Grimminger F, Beinertsdorf F, et al. Additional DOFs and sensors for bio-inspired locomotion: Towards active spine, ankle joints, and feet for a quadruped robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 2780-2786.
- [39] Bidgoly H J, Vafael A, Sadeghi A, et al. Learning approach of study effect of flexible spine on running behavior of a quadruped robot[C]//13th International Conference On Climbing and Walking Robots. Hackensack: World Scientific Press, 2010: 146-152.
- [40] Kani M H H, Derafshian 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. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 2793-2798.
- [41] Zhao Q, Nakajima K, Sumioka H, et al. Embodiment enables the spinal engine in quadruped robot locomotion [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2449-2456.
- [42] Zhao Q, Nakajima K, Sumioka H, et al. Spine dynamics as a computational resource in spine-driven quadruped locomotion[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1445-1451.
- [43] Zhao Q, Ellenberger B, Sumioka H, et al. The effect of spine actuation and stiffness on a pneumatically-driven quadruped robot for cheetah-like locomotion[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1807-1812.
- [44] Seok S, Wang A, Chuah M Y, et al. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 3307-3312.
- [45] Folkertsma G A, Kim S, Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2210-2215.
- [46] Pusey J L, Yoo J H. Validation and verification of a high fidelity computational model for a bounding robot's parallel actuated elastic spine[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2014, 9084(7): 1-14.
- [47] Eckert P, Sprowitz A, Witte H, et al. Comparing the effect of different spine and leg designs for a small bounding quadruped robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 3128-3133.
- [48] Sabelhaus A P, Joshi A, Zhu E, et al. Design, simulation, and testing of a flexible actuated spine for quadruped robots[J]. *arXiv preprint*, 2018, arXiv: 1804.06527.
- [49] Zhang X L, Yu H B, Liu B Y, et al. A bio-inspired quadruped robot with a global compliant spine[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.

- Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1312–1316.
- [50] 雷静桃, 俞焯颖. 四足机器人气动人工肌肉驱动的仿生柔性机体动力学分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(12): 1688–1699.
- [51] Wei Z, Song G M, Zhang Y, et al. Transleg: A wire-driven leg-wheel robot with a compliant spine[C]//IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 7–12.
- [52] 马宗利, 吕荣基, 刘永超, 等. 仿猎豹四足机器人结构设计与分析[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(1): 33–39.
- [53] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27–44.
- [54] Nicolelis M A L. Actions from thoughts[J]. Nature, 2001, 409(6818): 403–407.

## Research progress of rigid-flexible coupling bionic spine of quadruped robot

LEI Jingtao, ZHANG Yuewen, RAO Jinjun

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** The bionic spine of a quadruped robot plays an important role in improving the mobility and the stability of the robot in an unstructured environment. This paper reviews the research progress of the bionic spine of quadruped robots at home and abroad. The bionic spine is divided into two categories in the bionics: the local flexible spine and the overall flexible spine. The structural characteristics of different bionic spines of the quadruped robot are compared and the development trends are discussed. The bionic spine of quadruped robots is developed from the traditional rigid structure to the rigid-flexible coupling structure. The new bionic spine has a bio-variable stiffness with flexible bending, and some key technologies such as the bionic driving and the neuron fine control need to be developed. It is developed toward a biological system for high-efficiency energy-conversion.

**Keywords** quadruped robot; rigid-flexible coupling; bionic spine; biomechanics ●



(责任编辑 王志敏)