

Design and Evaluation of the Compliant Structure for a Quadruped Robot*

Dongdong Li, Xiuli Zhang[#], Kunling Zhou, Jiaqing Gong

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing
Email: [#]zhangxl@bjtu.edu.cn

Received: Dec. 17th, 2012; revised: Jan. 10th, 2013; accepted: Jan. 17th, 2013

Abstract: It can cause large ground impact force and postural instability when a rigid quadruped robot walks on the ground. To improve walking performances, a bio-inspired compliant structure was designed for a quadruped robot, which features four elastic legs and two flexible waist joints. The elastic legs are composed of a linear sliding pair constrained by compression spring at the end of each leg. The flexible waist is constituted with two rotating joints in roll and yaw, which are constrained by torsion springs. A center pattern generator (CPG) model was established, used as the trajectory planner of the robot. Mechanical analysis and physical experiments were combined to determine the stiffness of all the springs. Comparative experiments show that the elastic legs can effectively reduce the ground impact force and the flexible waist can decrease the swing of the body, which contribute to achieve higher postural stability when the quadruped robot walks on the ground.

Keywords: Quadruped Robot; Compliant Structure; Dynamic Walking; Central Pattern Generator

四足机器人结构柔顺化设计与性能评价*

李冬冬, 张秀丽[#], 周坤玲, 龚加庆

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京
Email: [#]zhangxl@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2012年12月17日; 修回日期: 2013年1月10日; 录用日期: 2013年1月17日

摘要: 针对刚性四足机器人动态行走时的躯体姿态不平稳和地面冲击力大等问题, 通过借鉴哺乳类四足动物的躯体结构, 提出了一种以局部被动自由度为特征的四足机器人柔顺化结构, 即, 在刚性四足机器人腿部末端添加由压簧约束的直线移动副构成弹性腿部, 在腰部添加由扭簧约束的横滚、偏转两个方向的转动副, 形成柔性腰部。采用中枢模式发生器(CPG)方法建立了四足机器人的轨迹控制模型, 结合力学分析和样机试验确定柔顺结构各个弹性自由度的刚度系数。物理样机运动实验表明, 柔顺结构能够有效的降低四足机器人行走时的地面冲击力, 减小躯干姿态变化程度, 从而提高机器人行走的平稳性。

关键词: 四足机器人; 柔顺结构; 动态运动; 中枢模式发生器

1. 引言

四足机器人的躯体多为刚性结构, 即多个刚性杆

*基金项目: 国家自然科学基金“基于生物感知-运动融合机理的机器人自适应运动控制研究”No.50905012; 国家863主题项目“高性能四足仿生机器人原型系统研究”No.2011AA040801; 中央高校基本科研业务费专项资助项目 No.2012JBM088。

[#]通讯作者。

件通过转动副或移动副构成机器人的机械本体。这类刚性机器人能通过增加腿部自由度数目以及复杂的运动规划来实现足端的灵活运动, 适应复杂地形。机器人运动控制技术的发展趋势表明, 四足机器人的运动正由以往的静态行走, 向跳跃、奔跑等动态运动模式延伸, 刚性机体无法提供四足机器人实现跳跃或奔

跑等高速动态运动所需的力学条件,即足够的加速度以实现机体离地、腾空。

在刚性结构中添加弹性储能元件,提高机器人结构的柔顺性,是实现的高速动态运动的重要手段,也是目前足式机器人机构研究的热点之一。机器人结构的柔顺化主要集中在脊柱、腰部、腿部等重点运动部位。柔性脊柱方面,日本东京大学 JSK 实验室的 Matsuki^[1,2]和大阪工业大学的 Takuma^[3]分别制作了两款具有柔性脊柱的四足机器人,脊柱由交替排列的柔性块和刚性块构成,中间穿有钢丝绳, Matsuki 研究了柔性脊柱对机器人通过狭窄环境的作用, Takuma 研究了脊柱刚度对机器人步态转换的影响。德黑兰大学的 Kani 等人则将柔性脊柱应用在了被动行走的四足机器人中,设计了能够在俯仰方向双向弯曲的柔性脊柱,实验证明柔性脊柱对四足机器人被动跳跃的稳定性具有至关重要的作用^[4]。除了被动柔性脊柱,德国不莱梅大学的 Daniel Kuehn 等人研究了具有主动控制功能的柔顺脊柱,针对一款仿灵长类动物的四足机器人,设计了 6UPU 并联机构对被动柔顺脊柱的形状进行控制^[5]。

由于哺乳动物的脊柱的不同部位柔性差别很大,其中腰部柔顺性最大、运动最灵活。一些研究者对机器人躯干设计了腰部局部被动柔顺自由度。美国波士顿动力公司正在研制的“猎豹”新型四足机器人^[6],与 Bigdog^[7]相比最大的不同是该机器人拥有俯仰方向的铰接式柔性腰部,借助柔性腰部在俯仰方向上的屈张变形,猎豹机器人实现了快速奔跑,2012 年发布的最新消息称猎豹机器人的奔跑速度达到 18 英里/小时^[8]。京都大学 Shinya Aoi 等人通过数值模拟方法研究了柔性腰部对于机器人步态转换的影响,发现柔性横滚自由度能够促使四足机器人从爬行(Crawl)步态转换到对角(Trot)步态^[9]。Se-Hoon Park 等人制作了一款腰部具有偏转自由度的四足机器人 ELIRO^[10],并通过实验证明了腰部的偏转自由度有利于机器人的顺利转向^[11]。

腿部是足式机器人的重要运动部位,是机器人实现移动功能的基础,腿部结构对四足机器人的运动效果具有重要影响。为了研究适合高速运动的腿部结构,美国 HRL 实验室的 Lewis 等人模仿猎豹的腿部,制作了一款三自由度的单腿机构,采用电机和气缸并

行拉伸弹性带的方式驱动关节转动,由电机提供较精确的角度控制,气缸提供瞬时爆发力,该机构能够实现高速原地起跳^[12]。日本电气通信大学的 Toshiki Masuda 等人研制的四足机器人 Rush,其膝关节为弹簧约束的被动转动副,该机器人能够实现稳定的跳跃(Bounding)步态^[13]。瑞士洛桑联邦理工学院的仿生机器人团队设计了一款四足机器人“Cheetah”,腿部踝关节为被动转动自由度,由弹性橡胶带提供被动回复力^[14]。Francis Wyffels 等研制的“Reservoir Dog”四足机器人,踝关节由弹簧约束,实验证明腿部的弹性结构能够起到缓冲和储能的作用^[15]。伸缩式弹性腿结构最早出现在加拿大麦吉尔大学机器人实验室研制的 Scout II 四足机器人中^[16],利用弹性元件约束移动副构成被动关节,该结构具有非常明显的减振和储能效果,对于机器人实现跳跃运动起到至关重要的作用^[17,18]。2010 年哈尔滨工业大学国家机器人与系统重点实验室制作了一款类似的四足机器人,髋关节为电机驱动的转动副,腿部为弹簧和抽屈轨道构成的被动移动副,该机器人能够实现稳定的跳跃步态^[19]。

分析国内外研究现状可知,多数研究集中在柔顺结构的设计方面,而对于柔顺结构对机器人运动效果的影响缺乏定量的分析及评价。为了定量的研究柔顺结构对机器人运动效果的影响,本文设计了一种机体结构能进行刚性、柔性转换的四足机器人,腰部具有横滚、偏转两个被动柔顺关节,腿部具有弹性移动关节,所有的柔顺结构可以通过限位销钉实现结构的刚柔转换。在机器人中配置了高精度六维姿态仪和力传感器,通过柔性机体和刚性机体行走对比实验,定量的分析了柔顺结构对四足机器人足底受力和行走稳定性的影响。

2. 四足机器人结构柔顺化设计

课题组之前研制的四足机器人 Biosbot^[20]为一款 8 自由度的刚性机器人,行走时存在两大问题:其一,关节轴受力较大,磨损严重;其二,姿态平稳性较差,躯干出现绕空间横滚、偏转轴的大幅摆动。分析上述问题产生的主要原因是:足部落地时受到很大的地面冲击反力,地面反力通过刚性腿部的传递施加于关节轴,逐渐造成轴部结构损伤。另外,地面接触反力通过刚性腿部传递到躯干,由于各支撑足所受地面反力

存在差异,造成躯干受力不平衡而引起躯干偏摆,姿态稳定性差。

根据狗、猫等哺乳类四足动物的解剖学和生物力学文献调研^[21,22]可知:动物的运动系统是由骨骼、肌肉、韧带等组成的弹性系统,运动时软骨和韧带既可以使肢体(特别是腿部)保持合适的刚度,又可以缓冲吸收冲击,产生柔顺化的运动效果。脊椎动物的脊柱由多块椎骨相互嵌套构成,前后分别与肩胛骨与胯骨相连。脊柱通体具有柔性,能够使躯体产生空间偏转、俯仰、横滚三个方向的自由度。虽然脊柱具有通体柔顺性,但是局部柔性差别很大,其中腰部柔顺性最大、运动最灵活。

为了改善刚性四足机器人 Biosbot 的结构受力情况,并提高行走的协调性,借鉴四足动物的躯体结构,提出了四足机器人的柔顺化结构方案,如图 1 所示。四足机器人由躯干和四条结构完全相同的腿组成,躯干为工字形结构,每条腿有髌、膝两个主动关节,都为俯仰自由度。为了提高腿部的柔顺性,在小腿下部增加了被动弹性踝关节,采用移动副加压簧的结构。由于 Biosbot 躯干的不必要偏摆主要表现在横滚和偏转方向,因此,在躯干工字梁竖轴偏后部设计了局部柔顺腰部,包括横滚和偏转两个被动自由度,每个自由度由转动副和扭簧构成。

为了能够进行刚性机器人和柔顺机器人行走的对比实验,设计了被动柔顺自由度的锁死机构,即:腰部转动副径向加工出限位销孔,限位销钉可以限制转动副的转动,从而实现柔性腰部和刚性腰部之间的转换;小腿移动轴的外圆面加卡簧限制移动副的移动,从而实现由弹性腿部到刚性腿部的转换。柔顺四足机器人样机如图 2 所示,大腿和小腿长度分别为 120 mm

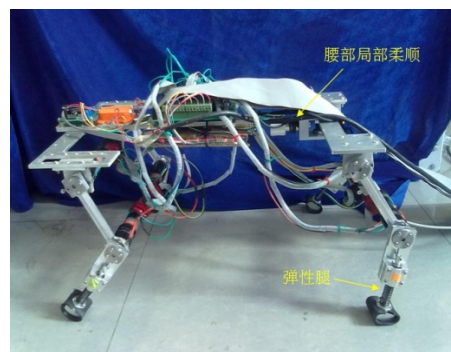


Figure 2. Prototype of the compliant quadruped robot
图 2. 柔顺四足机器人样机

和 125 mm,总体尺寸为 500 mm × 320 mm × 300 mm,机体采用轻质的铝合金材料,总重量为 6.0 Kg。

3. 四足机器人节律运动控制模型

3.1. CPG 控制模型

四足机器人为全肘式配置,对角步态行走。采用基于生物神经控制机理的 CPG 方法建立节律运动控制器,产生四足机器人 8 个主动关节的位置轨迹^[23]。CPG 建模分为两个层次:单关节振荡器模型和 CPG 网络模型。单关节振荡器采用正弦函数,能够产生稳定、平滑,且周期、幅值、相位可调的节律信号。多个振荡器之间,通过相位互锁构成 CPG 网络,如图 3 所示(L——左,R——右,F——前,H——后/髌,K——膝),4 个神经振荡器分别控制四足机器人的四个髌关节,以左前髌为基准,箭头表示各髌关节相对基准振荡器相位滞后,相位差为 ϕ_l ,膝关节相对于各自的髌关节具有固定的滞后相位 ϕ_k 。机器人节律运动控制器 CPG 模型的数学表达见(1),各参数的定义及取值见表 1。

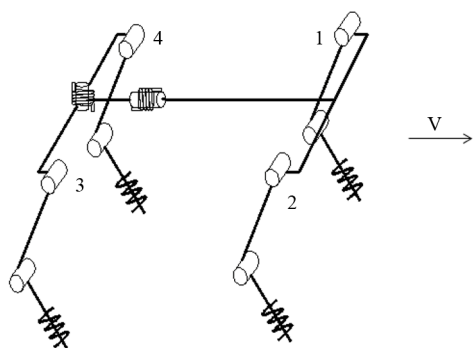


Figure 1. Compliant structure of the quadruped robot
图 1. 四足机器人柔顺化结构方案

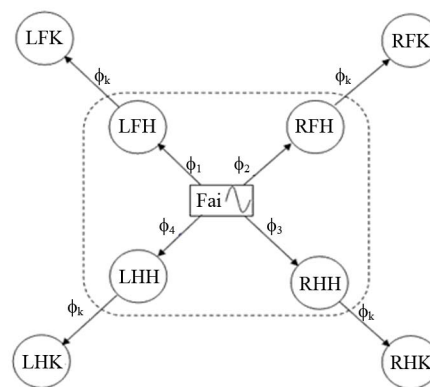


Figure 3. CPG model
图 3. CPG 模型

Table 1. Definitions and values of the parameters
表 1. 参数定义与取值

符号	定义	取值
θ	关节角	
A_h	髋关节 CPG 振荡幅值	12°
A_k	膝关节 CPG 振荡幅值	16°
T	CPG 振荡周期	1 s
Φ	各膝关节相对于参考振荡器相位	$[0, -\pi, 0, -\pi]$
ϕ_k	膝关节相位差	$-\pi/2$
F_k	膝关节波形模式	0
$\theta_h(0)$	髋关节初始角度	-135°
$\theta_k(0)$	膝关节初始角度	60°
n	腿数	4

$$\begin{cases} \Theta(t) = [\theta_{h,i}(t), \theta_{k,i}(t)], \\ \Phi = [\phi_i], \\ i = 1 - n. \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} \theta_{h,i}(t) = A_h \sin(2\pi t/T + \phi_i) \\ \theta_{k,i}(t) = \begin{cases} A_k \sin(2\pi t/T + \phi_i + \phi_k) (F_k = 0) \\ \max(0, A_k \sin(2\pi t/T + \phi_i + \phi_k)) (F_k = 1) \end{cases} \end{cases}$$

3.2. 腿部运动学分析

以髋关节为参考坐标系，建立单腿运动学模型如图 4 所示。

根据关节 CPG 函数，通过运动学正解求得单腿足端轨迹，其中足端的位置坐标为：

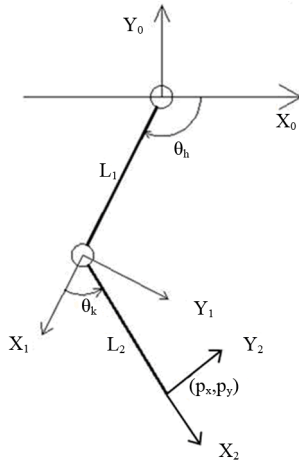


Figure 4. Kinematic model of a single leg
图 4. 单腿运动学模型

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos(\theta_h) + L_2 \cos(\theta_h + \theta_k) \\ L_1 \sin(\theta_h) + L_2 \sin(\theta_h + \theta_k) \end{bmatrix}$$

其中:

$$\theta_h = A_h \sin(2\pi t/T + \phi_i),$$

$$\theta_k = A_k \sin(2\pi t/T + \phi_i + \phi_k).$$

机器人质心的运动是由支撑腿决定的，质心相对于足端的位移为：

$$\begin{bmatrix} x_{com} \\ y_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_x + \frac{C_L}{2} \\ -p_y + C_H \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， C_L 为机器人躯干长， C_H 为机器人初始状态身体高度，均为常数。

通过数值计算，求得四足机器人质心的水平位移如图 5 所示，竖直位移如图 6 所示。

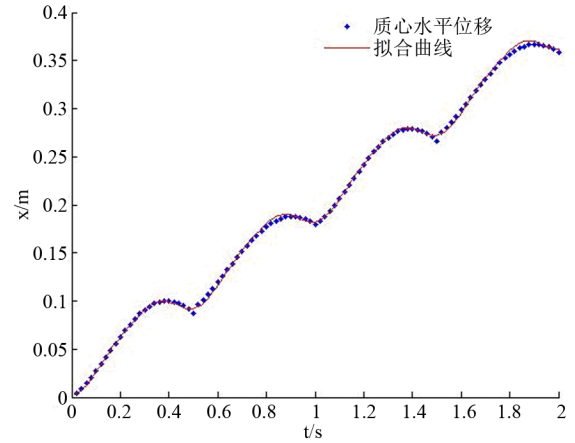


Figure 5. Horizontal displacement of COM
图 5. 质心水平位移

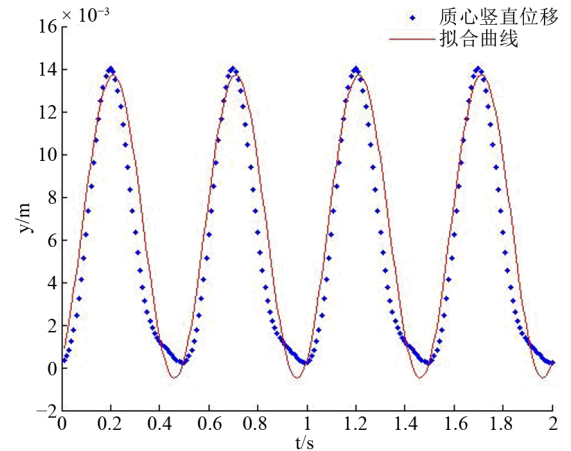


Figure 6. Vertical displacement of COM
图 6. 质心竖直位移

由图可以看出:

- 1) 四足机器人质心呈周期性波动, 在对角步态下, 波动周期为 CPG 周期的一半;
- 2) 质心水平方向位移随时间的变化近似呈波动性线性增加;
- 3) 质心竖直方向位移呈周期性变化, 近似正弦函数。

根据四足机器人对角步态下质心的运动规律, 定义如(4)所示的函数, 拟合质心的水平位移:

$$x_{com} = a_1 t + b_1 + c_1 \cos(w_1 t) + d_1 \sin(w_1 t) \quad (4)$$

利用 Matlab, 求得到该自定义函数的系数为:

$$\begin{aligned} & [a_1 \quad b_1 \quad c_1 \quad d_1 \quad w_1] \\ & = [0.18 \quad 0 \quad -0.016 \quad -0.009 \quad 12.45] \end{aligned} \quad (5)$$

用式(6)所示的函数拟合质心竖直位移:

$$y_{com} = a_2 + b_2 \cos(w_2 t) + c_2 \sin(w_2 t) \quad (6)$$

求得该函数的系数为:

$$\begin{aligned} & [a_2 \quad b_2 \quad c_2 \quad w_2] \\ & = [0.0066 \quad -0.0062 \quad 0.0035 \quad 12.54] \end{aligned} \quad (7)$$

4. 柔顺结构特性参数确定

4.1. 四足机器人受力分析

基于 CPG 轨迹控制模型对四足机器人节律运动进行受力分析。不计摩擦, 将机器人质量集中在躯干质心, 建立机器人行走时的简化受力模型, 如图 7 所示, 1、3 腿为摆动腿, 2、4 腿为支撑腿, 支撑腿足端受水平分力 F_x 和竖直分力 F_y 。

公式(4)对时间 t 二次微分, 得质心水平加速度为:

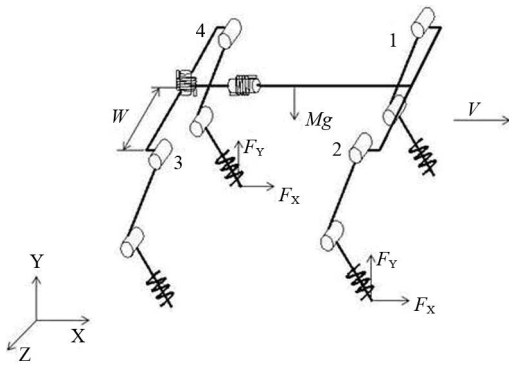


Figure 7. Dynamic model of the quadruped robot
图 7. 四足机器人受力模型

$$a_x = -w_1^2 c_1 \cos(w_1 t) - w_1^2 d_1 \sin(w_1 t) \quad (8)$$

机器人每条支撑腿足端所受水平方向最大分力为:

$$F_{x \max} = M a_{x \max} / 2 \quad (9)$$

公式(6)对时间 t 进行二次微分, 可得机器人质心竖直波动的加速度:

$$a_y = -w_2^2 b_2 \cos(w_2 t) - w_2^2 c_2 \sin(w_2 t) \quad (10)$$

机器人每条支撑腿足端所受竖直方向最大分力为:

$$F_{y \max} = M (g + a_{y \max}) / 2 \quad (11)$$

4.2. 弹簧刚度参数确定

设定: 行走中足端压簧的最大压缩量为小腿长度的 5%, 即 $\Delta L_2 = 6.25 \text{ mm}$; 腰部横滚自由度和偏转自由度最大扭转角度分别为 $\theta_{r \max} = 10^\circ$ 和 $\theta_{y \max} = 10^\circ$ 。

可知腿部垂直支撑力达到最大时, 压簧达到最大压缩量, 将腿部垂直支撑力分解到小腿方向, 可得腿部压簧的刚度 k_v 为:

$$k_v = \frac{F_{y \max} \cos 30^\circ}{\Delta L_2} \quad (12)$$

机器人横滚自由度扭簧的刚度 k_r 为:

$$k_r = \frac{F_{y \max} W}{\theta_{r \max}} \quad (13)$$

腰部偏转方向的扭簧刚度 k_y 为:

$$k_y = \frac{F_{x \max} W}{\theta_{y \max}} \quad (14)$$

代入数据可得: $k_v = 4.5 \text{ N/mm}$, $k_r = 459.1 \text{ Nmm}/^\circ$, $k_y = 108.3 \text{ Nmm}/^\circ$ 。

考虑到以上理论计算是基于质量集中在躯干质心的简化模型, 且计算中忽略了摩擦力, 在实际样机制作中, 基于理论计算, 通过试验调试最终确定弹簧特性参数值为: 腿部压簧的刚度 $k_v = 3.6 \text{ N/mm}$, 腰部横滚自由度扭簧刚度 $k_r = 393 \text{ Nmm}/^\circ$, 偏转自由度扭簧刚度 $k_y = 143 \text{ Nmm}/^\circ$ 。实验值与理论值相符性达到 75%~86%, 说明理论分析对于实验具有较大的指导意义。

5. 柔顺结构运动效果评价

为评价柔顺结构对改善四足机器人足底接触反

力、提高运动平稳性的效果，在机器人足底安装薄膜压力传感器 FSR，检测其行走时的足端正压力；在脊柱中点位置安装了六维姿态仪 MTi，实时输出躯干在空间的横滚、俯仰和偏转三轴的姿态角度。

5.1. 弹性腿部对机器人运动的影响评价

针对弹性腿部设计对比实验，首先装上卡簧限制弹性腿部移动副的移动，使机器人腿部变成刚性，完成 4 个周期的行走实验，图 8 所示为机器人一个步行周期内的实验录像截图。对比实验中去掉卡簧，使弹性移动副起作用，构成弹性腿部，完成同样的行走实验，如图 9 所示为机器人弹性腿部行走的视频截图，小腿压簧交替压缩。

记录机器人右前腿足端的受力如图 10 所示。分析结果可知，刚性行走的支撑相足端压力的平均值为 67.68 N，柔性行走的支撑相足端压力的平均值为 56.08 N，较刚性行走减小 17.1%，说明弹性腿部对于减小机器人足端所受的地面冲击力有明显的效果。

行走时躯干姿态角度变化如图 11 所示，数据统计分析见表 2，柔性腿部行走较刚性腿部行走，躯干横滚、俯仰、偏转角度峰值分别减少 40.1%、32.5%、35.9%，方差分别减少 74.1%、68.2%、51.6%，说明弹性腿部使四足机器人躯干摆动幅度明显减小，机器人姿态更加稳定。

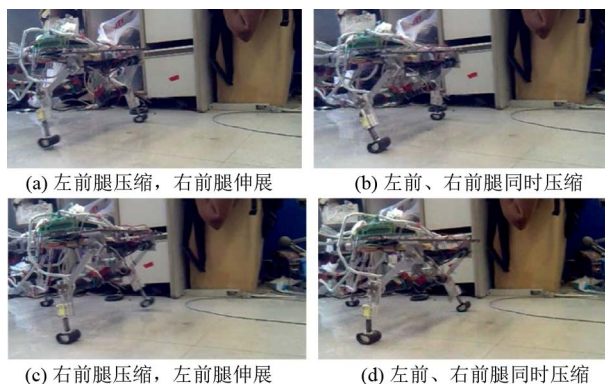


Figure 9. Images when walking with elastic legs
图 9. 弹性腿部行走实验截图

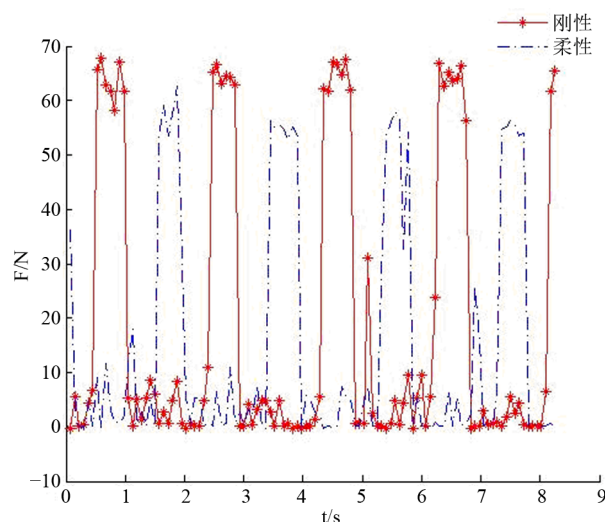


Figure 10. Foot-ground contact force
图 10. 足端压力

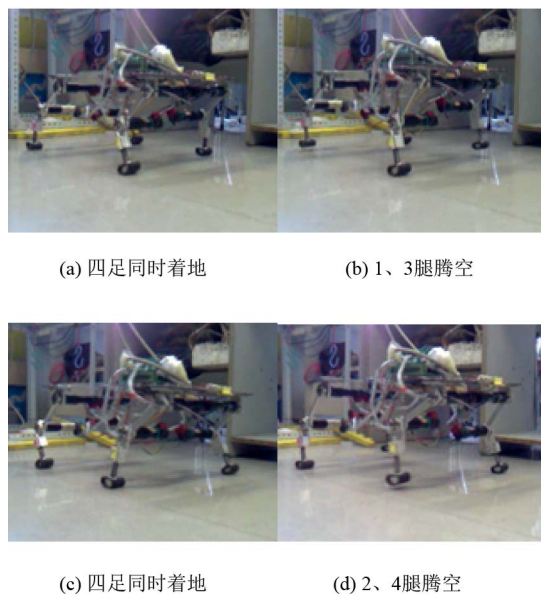


Figure 8. Images when walking rigidly
图 8. 刚性行走实验截图

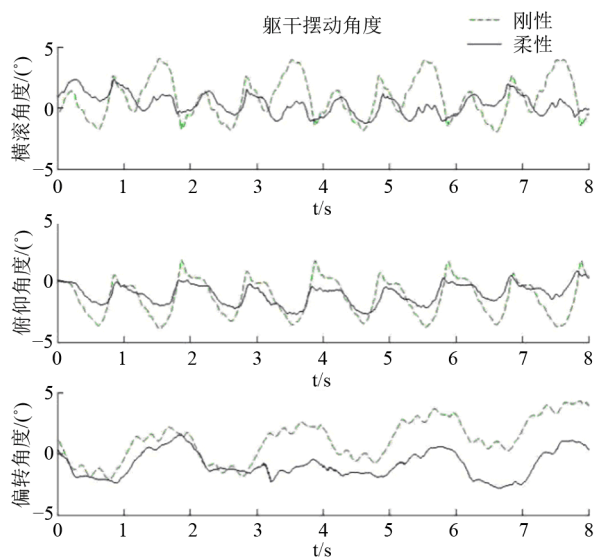


Figure 11. Walking posture with elastic legs
图 11. 弹性腿部行走躯干姿态

Table 2. Walking posture analysis with elastic legs
表 2. 弹性腿部行走数据分析

摆动角度	方向	刚性行走		柔性行走	
		峰值(°)	方差	峰值(°)	方差
度	横滚	4.01	2.66	2.40	0.69
	俯仰	-4.03	2.23	-2.72	0.71
	偏转	4.35	2.87	-2.79	1.39

5.2. 腰部横滚自由度对机器人运动的影响评价

为了评价腰部横滚自由度的效果，将机器人弹性腿部的移动副和腰部的偏转自由度锁死，进行只有腰部横滚自由度起作用的行走实验，图 12 显示随着腿的摆动，后躯干绕横滚轴周期性转动，但前躯干和前脊柱的姿态几乎保持不变。

记录 4 个周期的躯干姿态角度数据如图 13 所示，统计结果见表 3，机器人躯干横滚、俯仰、偏转方向的摆动角度峰值分别减少 33.9%、77.7%、-6.4%，方差分别减少 74.1%、68.2%、4.1%。说明腰部弹性横滚自由度减小了横滚和俯仰两个方向的摆动幅度，但对偏转方向摆动影响较小。另外，图 13 也反映出添加腰部弹性横滚自由度后，躯干横滚方向的偏摆频率有所降低。

5.3. 腰部偏转自由度对机器人运动的影响评价

为了评价腰部偏转自由度的效果，将机器人弹性腿部的移动副和腰部的横滚自由度锁死，进行只有腰部偏转自由度的行走实验，图 14 显示随着机器人行走后躯干绕偏转轴出现周期性转动。

记录躯干姿态角度数据，并与刚性机体行走进行对比(图 15)，统计结果见表 4，机器人躯干横滚、俯

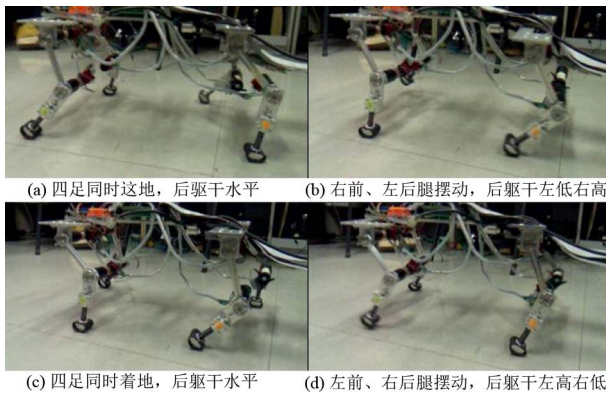


Figure 12. Images when walking with flexible waist in roll
图 12. 横滚腰部行走实验截图

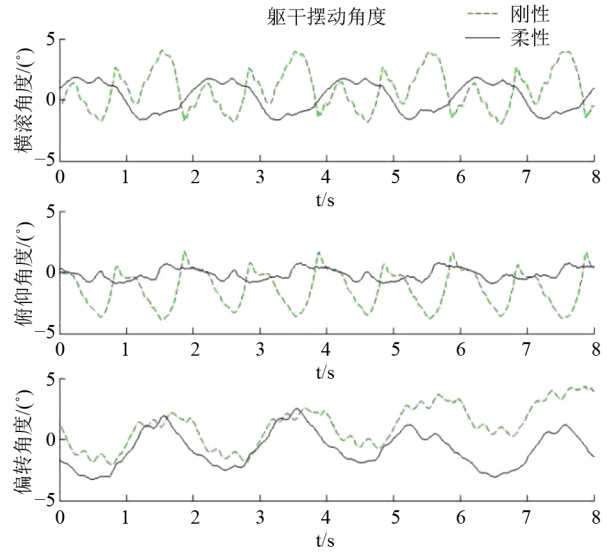


Figure 13. Walking posture with flexible waist in roll
图 13. 横滚腰部行走躯干姿态

Table 3. Walking posture analysis with flexible waist in roll
表 3. 横滚腰部行走数据分析

摆动角度	方向	刚性行走		柔性行走	
		峰值(°)	方差	峰值(°)	方差
度	横滚	4.01	2.66	2.65	1.80
	俯仰	-4.03	2.23	-0.90	0.22
	偏转	4.35	2.87	-4.63	2.75

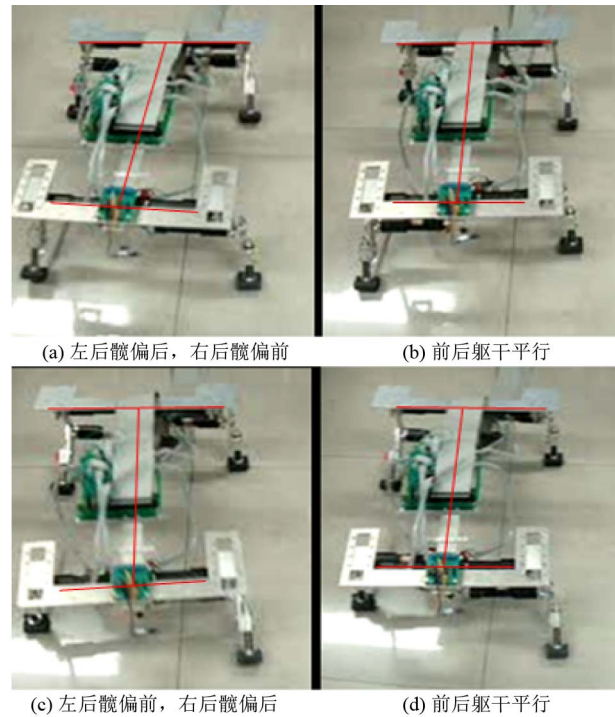


Figure 14. Walking images with flexible waist in yaw
图 14. 偏转腰部行走实验截图

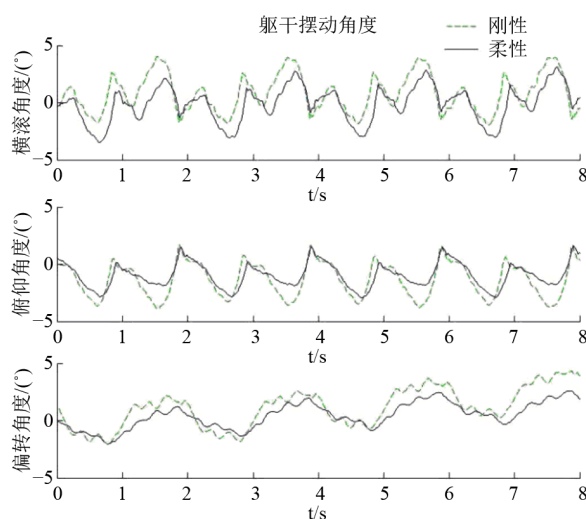


Figure 15. Walking posture with flexible waist in yaw
图 15. 偏转腰部行走躯干姿态

Table 4. Walking posture analysis with flexible waist in yaw
表 4. 偏转腰部行走数据分析

摆动角度	方向	刚性行走		柔性行走	
		峰值(°)	方差	峰值(°)	方差
角度	横滚	4.01	2.66	-3.85	2.35
	俯仰	-4.03	2.23	-2.92	1.69
	偏转	4.35	2.87	-3.72	1.89

仰、偏转角度峰值分别减少 4%、27.5%、14.5%，方差分别减少 11.6%、24.2%、34.1%，说明腰部弹性偏转自由度减小了偏转和俯仰两个方向的摆动幅度，但对横滚方向的摆动影响较小。

6. 结论

本文针对刚性四足机器人行走时地面冲击大，躯体运动不协调、躯干姿态稳定性差的问题，设计了一种具有弹性腿部和柔性腰部的柔顺四足机器人，并通过刚性机体和柔性机体行走对比实验，定量的分析了柔顺结构对于机器人运动性能的影响。研究发现：腿部增加弹性结构可以明显减小机器人行走时的地面冲击力，并使机器人行走时的躯体姿态更加稳定；腰部横滚自由度可以有效改善躯体绕横滚和俯仰轴的摆动程度，但对偏转方向摆动影响较小；腰部偏转自由度对机器人躯体的俯仰和偏转摆动有一定程度改善，但对横滚方向的摆动影响较小。研究结果说明：柔顺结构依靠弹性体的变形，可以削弱构件间的作用力改善机器人在环境接触力和重力作用下局部冲击

力大以及运动不平稳等问题。本文提出的柔顺结构对四足机器人的结构设计具有借鉴意义，为足式机器人跳跃、奔跑等高动态性运动功能的实现提供了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] T. Matsuki, I. Mizuuchi, S. Kagami, et al. Quadruped robot with spine structure and simulation environment. Proceedings of the 16th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, Sapporo, 18-20 September 1998: 85-88.
- [2] T. Matsuki, I. Mizuuchi, S. Kagami, et al. Motion generation and action control of a walking quadruped robot with flexible spine structure. Proceedings of 1999 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMEC'99), 1999, IP2-42-063.
- [3] T. Takuma, M. Ikeda and T. Masuda. Facilitating multi-modal locomotion in a quadruped robot utilizing passive oscillation of the spine structure. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 4940-4945.
- [4] M. Hasan, H. Kani, M. Derafshian, H. J. Bidgoly, et al. Effect of flexible spine on stability of a passive quadruped robot: Experimental results. International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket, 7-11 December 2011: 2793-2798.
- [5] D. Kuehn, F. Grimminger, F. Beinertsdorf, et al. Additional DOFs and sensors for bio-inspired locomotion: Towards active spine, ankle joints, and feet for a quadruped robot. International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket, 7-11 December 2011: 2780-2786.
- [6] E. Guizzo. Boston dynamics building fast-running robot cheetah, new agile humanoid, 2011. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/boston-dynamics-building-fast-running-robot-cheetah-new-agile-humanoid>
- [7] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, et al. Big dog, the rough terrain quadruped robot. Proceeding of 17th IFAC World Congress, Seoul, 6-11 July 2008: 10822-10825. http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html
- [8] S. Aoi, T. Yamashita, A. Ichikawa, et al. Hysteresis in gait transition induced by changing waist joint stiffness of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 18-22 October 2010: 1915-1920.
- [10] S. H. Park, Y. J. Lee. Turning gait planning of a quadruped walking robot with an articulated spine. Proceeding of the ICCAS, 25-27 August 2004: 1926-1930.
- [11] S.-H. Park, D.-S. Kim and Y.-J. Lee. Discontinuous spinning gait of a quadruped walking robot with waist-joint. Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2005: 2744-2749.
- [12] M. A. Lewis, M. R. Bunting, B. Salemi, et al. Toward ultra high speed locomotors: Design and test of a cheetah robot hind limb. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, 9-13 May 2011: 1990-1996.
- [13] T. Masuda, H. Kimura and K. Takase. Emergence of a quadruped bound gait as interaction among the brain, body and environment. SICE Annual Conference, Tokyo, 20-22 August 2008: 2501-2506.
- [14] S. Rutishauser, A. Sprowitz, L. Righetti, et al. Passive compliant quadruped robot using central pattern generators for locomotion control. IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics Scottsdale, Arizona, 19-22 October 2008: 710-715.
- [15] F. Wyffels, M. D'Haene, T. Waegeman, et al. Realization of a passive compliant robot dog. IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, To-

- kyo, 26-29 September 2010: 882-886.
- [16] S. Talebi, M. Buehler and E. Papadopoulos. Towards dynamic step climbing for a quadruped robot with compliant legs. International Conference on Climbing and Walking Robots, Madrid, 2-4 October 2000: 441-446.
- [17] J. A. Smith, I. Poulakakis. Rotary gallop in the untethered quadruped robot scout II. Proceedings of IEEE IRSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004: 556-2561.
- [18] I. Poulakakis, J. A. Smith and M. Buehler. Modeling and experiments of untethered quadruped running with a bounding gait: The scout II robot. The International Journal of Robotics Research, 2005, 24(4): 239-256.
- [19] X. Wang, M. T. Li, P. F. Wang, et al. Running and turning control of a quadruped robot with compliant legs in bounding gait. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai International Conference Center, 2011: 511-518.
- [20] 曾翔宇, 鄂明成, 李冬冬等. 沟壑类非连续地形下的四足机器人运动控制[J]. 机器人, 2011, 33(6): 700-705.
- [21] M. Nordin, V. H. Frankel, 著. 邝适存, 郭霞, 译. 肌肉骨骼系统基础生物力学(第3版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
- [22] 多恩等, 著. 林德贵, 陈耀星, 译. 犬猫解剖学彩色图谱[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [23] 郑浩俊, 张秀丽等. 足式机器人生物控制方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 2-5.