

# 柔索驱动仿生机体弯曲动力学建模与仿真<sup>①</sup>

雷静桃<sup>②</sup> 蒋运旗 吴启帆

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

**摘要** 基于四足生物躯体运动机理,提出一种柔索驱动的四足机器人仿生机体。它由前机体、后机体、仿生脊柱和柔索驱动组件组成,可实现仿生机体的侧向和上下俯仰弯曲。采用坐标变换法进行了该仿生机体的运动学分析;基于拉格朗日法和浮动坐标系法进行了仿生机体动态弯曲的刚柔耦合动力学分析,确定了仿生机体弯曲所需柔索驱动力,对比分析了不同刚度机体的动态弯曲特性。基于虚拟样机技术进行了仿生机体弯曲仿真分析,验证了理论分析的正确性,为提高四足机器人在非结构化环境中的机动性的研究奠定了理论基础。

**关键词** 四足机器人, 柔索驱动, 仿生机体, 变刚度, 刚柔耦合, 动力学

## 0 引言

自然界的生物为智能机器人研究提供了模板,人们可模仿生物的结构灵巧性、环境适应性、运动灵活性等研制仿生机器人。随着生物运动机理的深入研究,仿生机器人向着机电系统与生物性能融合方向发展即结构与生物特性一体化的方向发展,仿生机器人更具有生物的形态特征和运动方式<sup>[1]</sup>。四足机器人是仿生机器人研究的方向之一。与传统轮式、履带式等移动方式相比,四足机器人在非结构化环境下具有更好适应性,受到研究人员的广泛关注。国内外已对四足机器人仿生腿机构、步态规划和运动控制等进行了广泛深入研究。四足机器人的机体大都采用刚性机体结构,这种结构难以实现类似于四足生物那样的运动灵活性,当四足机器人奔跑、跳跃或转向时,特别在非结构化环境时,难以达到良好的机动性<sup>[2]</sup>。针对这种情况,本研究给出了一种能够由柔索驱动实现动态俯仰和侧向弯曲的四足机器人仿生机体,并进行了其弯曲运动学建模分析和弯曲仿真分析。

## 1 相关工作

四足生物的躯体与四肢间协调配合,实现更灵活的四足生物运动。其躯体具有一定的柔性,可俯仰或侧向弯曲,以适应不同的步态和地形。高速跑跳时躯体可上下俯仰弯曲,而原地转向时躯体可侧向弯曲,转向更灵活,柔性躯体还可降低生物非结构化环境奔跑或跳跃时与环境间冲击力,使得运动更加平稳<sup>[3,4]</sup>。基于四足生物的运动机理,开展具有高度灵活的仿生躯体研究有重要意义。目前柔性机体的研究,从结构方面和运动机理方面,与四足动物机体相比,均有一定差别,同时缺少对于柔性机体刚柔耦合动力学及运动学的分析。

近年来国内外学者开始关注四足机器人的仿生机体。2009年 Hiroyuki 等研发了由电机驱动的四足机器人,其机体设计了2自由度,可俯仰和左右弯曲,实现类似鼠类动物那样的机体弯曲<sup>[5]</sup>。2011年 Katsuyoshi 等设计了脊柱由椎骨及椎间盘构成的四足机器人,它通过钢丝将椎骨和椎间盘串接一起,由绞盘转动使脊柱间的钢丝拉力发生变化,脊柱的弯

① 国家自然科学基金(51375289)资助项目。

② 女,1970年生,副教授;研究方向:机器人技术;联系人,E-mail: jtlei2000@163.com  
(收稿日期:2017-05-03)

曲是通过脊柱两侧的气动驱动器来实现的,通过气动执行机构改变脊柱刚度,从而达到稳定行走<sup>[6]</sup>。2012年波士顿动力公司参考猎豹生物设计脊柱关节研制了四足仿生猎豹机器人,它能类似猎豹那样由脊柱弯曲,实现较高奔跑速度,可达29mph<sup>[7]</sup>。2012年MIT研发了仿猎豹四足机器人,它具有猎豹生物相似的骨骼结构,并设计了可弯曲的仿生脊柱结构,采用柔索驱动的差动齿轮脊柱机构,当后腿处于同相位运动时驱动脊柱弯曲,不同相位时脊柱不产生弯曲运动<sup>[8]</sup>。国内外研发的柔索驱动机器人系统由于采用柔索驱动的机器人,因而有柔顺性、惯性小、质量轻等优点。2012年Li等研制了一种柔索驱动的仿生鱼,脊椎骨有4个均布的肋板及4个穿线孔,脊椎骨相连处形成一个球铰,其缺点是弹性杆限制了脊椎骨绕轴线的转动,使其只绕着XY轴转动;柔索穿过线孔,当电机转动时,驱动柔索伸长或缩短,使得鱼尾沿着竖直和水平方向弯曲<sup>[9]</sup>。2012年Liao等研制了具有仿生脊柱的仿生机器蝌蚪,包括12个脊椎骨和2组柔索组成。脊柱分成两部分,第1条柔索与第1部分脊柱相连,第2条柔索穿过第1部分脊柱中心孔与第2部分的脊椎相连。两条柔索的一端连接驱动器,另一端与最后一个脊椎块相连。驱动器转动时,柔索伸长或缩短,使得脊柱产生弯曲变形<sup>[10]</sup>。2013年Zhong等研制了带有胸鳍的柔索驱动机器鱼。它由一个躯体、7个脊椎骨和2对柔索组成线缆。两条柔索分别水平穿过脊椎骨上的孔,弹性橡胶杆贯穿所有的脊椎骨。电机带动卷盘转动,卷盘通过柔索控制鱼体形状的变化。当两个卷线轮旋转时,由于旋转角度的不同,柔索控制的机器鱼的尾鳍会发生不同方向的弯曲或者扭转<sup>[11]</sup>。

关于柔索驱动系统的相关理论分析方面,Yang等采用解析法分析了一种平面完全约束柔索驱动并联机器人的运动学正解,将正解的求解问题转化为对高次方程的求解,通过符号法获得运动学求解的多项式<sup>[12]</sup>。Hiller则将6自由度欠约束柔索驱动并联机器人的运动学正解问题转换为投影空间的代数方程来进行求解<sup>[13]</sup>。Yamamoto等设计并分析完全约束机构和不完全约束机构,进而分析空间6自由度吊车型欠约束柔索驱动并联机器人的逆动力

学<sup>[14]</sup>。訾斌等基于并联机器人机构综合理论,设计了新型由普通速电机与伺服电机两种驱动结构组合形成混合驱动的并联机器人,应用牛顿欧拉法建立了并联机器人的动力学模型,并在其虚拟样机模型上,进行了动力学仿真分析,验证所建立理论模型的正确性<sup>[15]</sup>。Li等设计柔索驱动的可弯曲机械臂,分析了机械臂各单元的力及力矩,确定柔索驱动力<sup>[16]</sup>。

本研究为提高四足机器人仿生机体柔顺性和四足机器人的机动性,提出了由柔索驱动的仿生机体,它可动态侧向和上下俯仰弯曲,用于辅助四足机器人实现原地转向或高速运动步态;采用坐标变换法进行了仿生机体运动学建模分析;基于拉格朗日法和浮动坐标法,进行了仿生机体动态弯曲动力学分析,获得机体弯曲的柔索驱动力。另外创建了仿生机体虚拟样机模型,仿真分析了不同机体刚度下的动态弯曲特性,验证了理论分析的正确性。

## 2 四足机器人仿生机体

### 2.1 四足机器人

四足机器人的仿生机体由前机体、后机体、柔索驱动组件和仿生脊柱组成,仿生脊柱由两组柔索驱动组件驱动实现弯曲,如图1所示。通过柔索驱动仿生脊柱,可以进行动态侧向和俯仰弯曲,以协助腿机构实现原地转向步态或高速跑跳步态,提高其非结构化环境下的机动性。

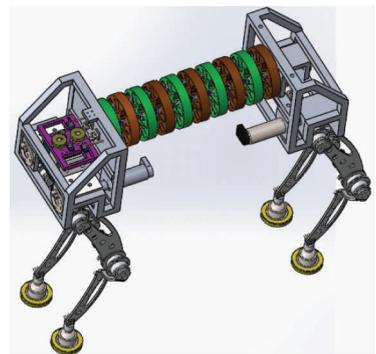


图1 四足机器人

## 2.2 仿生脊柱与柔索驱动组件

仿生脊柱与柔索驱动组件,如图2所示。仿生脊柱由若干个仿生脊椎单元组成,每个仿生脊椎单元由2个仿生脊椎骨和4根连接弹簧组成。前一个脊柱块中间的凹球面和后一个脊柱块的凸球面形成球副。相邻脊柱块由弹簧连接,由螺钉将弹簧固定到脊椎骨上,10块脊柱块由弹簧依次串联连接构成仿生脊柱,使得仿生机体具有一定柔性,可动态侧向和上下俯仰弯曲。

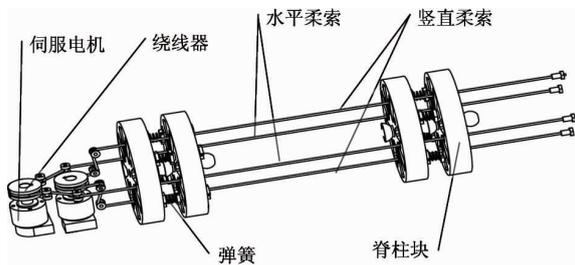


图2 仿生机体

柔索驱动组件由水平柔索、竖直柔索、2个电机、2个绕线器、8个导轮及支架等组成。电机转动时它带动滑轮转动,缠绕在绕线器上的柔索伸长或者缩短,当一侧柔索伸长而另一侧柔索缩短时,机体向柔索缩短侧弯曲。当电机反向转动时,柔索反向运动,机体恢复或向另一侧弯曲。

## 3 仿生机体弯曲运动学分析

仿生机体弯曲运动学建模分析是开展机体弯曲特性研究的基础。仿生机体的侧向弯曲示意图如图3所示,虚线表示机体处于初始状态,细实线表示机体处于弯曲 $\theta$ 角时的状态。

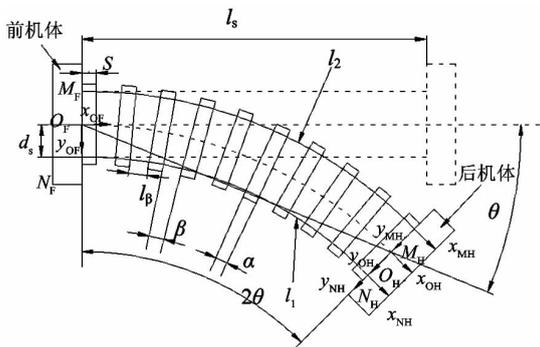


图3 仿生机体弯曲示意图

$\theta$  为机体弯曲角,前后机体间夹角为 $2\theta$ ;  $l_s$  为初始状态下前后机体间的距离;  $l_1$  为仿生机体弯曲后内侧柔索长度;  $l_2$  为外侧柔索长度;  $d_s$  为柔索与仿生脊柱中心线间的初始垂直距离;在柔索与前后机体连接处分别建立坐标系,  $O_F(x, y)$  为机体基坐标系,建立坐标原点在第一个脊椎单元的中心线处;  $(x_{MH}, y_{MH})$  为伸长侧柔索与后机体连接点坐标值;  $(x_{OH}, y_{OH})$  为仿生脊柱中心线与后机体的交点坐标值;  $(x_{NH}, y_{NH})$  为缩短侧柔索与后机体连接点坐标值。

采用坐标变换法进行仿生机体弯曲运动学分析,首先建立坐标系:  $\{O_F\}$  为机体基坐标系,坐标原点位于第一个脊椎单元y前机体接触处的中心线处,坐标系  $\{O_H\}$ , 坐标原点位于后机体与最后一个脊椎单元接触处的中心线上。机体弯曲时,则坐标系  $\{O_H\}$  相对于基坐标系  $\{O_F\}$  的空间位姿,可由齐次变换矩阵  ${}^{O_F}T_{O_H}$  表示为

$${}^{O_F}T_{O_H} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 & \frac{l_s \sin 2\theta}{2\theta} \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 & \frac{l_s(1 - \cos 2\theta)}{2\theta} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

外侧柔索伸长,内侧缩短,则伸长侧坐标系  $\{M_H\}$  和缩短侧坐标系  $\{N_H\}$  相对于坐标系  $\{O_H\}$  位姿为

$${}^{O_H}T_{M_H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -d_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{O_H}T_{N_H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则坐标系  $\{M_H\}$  和  $\{N_H\}$  相对于基坐标系  $\{O_F\}$  的位姿为

$${}^{O_F}T_{M_H} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 & \frac{(l_s + 2\theta d_s) \sin 2\theta}{2\theta} \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 & \frac{l_s - (l_s + 2\theta d_s) \cos 2\theta}{2\theta} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{N_H}^O F T = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 & \frac{(l_s - 2\theta d_s) \sin 2\theta}{2\theta} \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 & \frac{l_s + (2\theta d_s - l_s) \cos 2\theta}{2\theta} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 4 仿生机体动力学分析

对于刚柔耦合系统,动力学建模方法通常采用第二类拉格朗日法<sup>[17-19]</sup>及浮动坐标法<sup>[20]</sup>。由于浮动坐标法对于小变形和低速大范围运动情况,有比较高的计算效率和计算精度,使用较广泛;运用第二类拉格朗日法选取广义坐标,分析系统动能和势能,并由拉格朗日函数推导动力学方程。柔索驱动仿生机体动力学分析建立仿生机体动态弯曲过程中,柔索驱动力与机体弯曲角间的关系。

#### 4.1 仿生机体弯曲动能

仿生机体动态弯曲动力学分析,以获得驱动力与机体弯曲角的关系。仿生机体弯曲过程中,每个脊柱单元运动产生动能,弹簧等弹性元件因受压或受拉变形产生弹性势能。采用拉格朗日法和浮动坐标法分析单个仿生脊柱单元的动能。

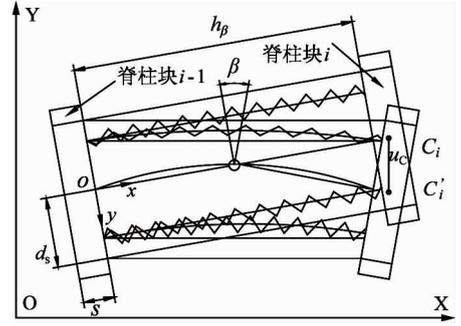
仿生脊柱弯曲后,两相邻仿生脊柱单元间的夹角为 $\beta$ ,如图4(a)所示,图中矩形表示仿生脊柱单元在 $OXY$ 面内的投影。仿生脊柱单元 $i-1$ 建立浮动坐标系 $oxy$ 。

浮动坐标系的 $x$ 轴位于仿生脊柱未弯曲前中心轴线上。 $C_i$ 为变形前仿生脊柱单元 $i$ 的质心点, $C'_i$ 为变形后脊柱单元 $i$ 的质心点。 $\alpha$ 是穿过仿生脊柱单元的柔索所对应的圆心角, $\beta$ 是仿生脊柱单元关节内部分的柔索所对应的圆心角,则有

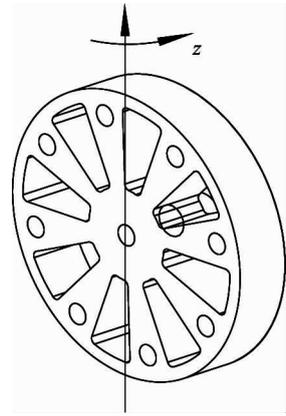
$$\beta = \frac{2\theta - n\alpha}{n-1} = \frac{2\theta(l_s - 2\theta d_s - ns)}{(n-1)(l_s - 2\theta d_s)}$$

设 $u_c$ 为质心 $C_i$ 点在浮动坐标系下的位移向量, $u_c = [u \ v]^T$ ,其中 $u, v$ 分别对应于在浮动坐标系中,质心点从位置 $C_i$ 到 $C'_i$ 的位移,则有

$$u_c = [h_0 - h_0\beta \sin\beta \quad h_0\beta - h_0\beta \cos\beta]^T \quad (2)$$



(a) 脊柱单元



(b) 脊柱块

图4 仿生脊柱单元分析

式(2)两边对时间求导得 $C_i$ 点速度向量 $\dot{u}_c$ 。则仿生脊椎骨 $i$ 的动能为

$$E_i = \frac{1}{2} m_i \cdot \dot{u}_c^2 + \frac{1}{2} J_{C_i} \dot{\beta}^2 \quad (3)$$

式中, $m_i$ 为仿生脊柱单元 $i$ 的质量, $\dot{u}_c = \dot{u} + \dot{v}$ 。仿生脊柱单元,如图4(b)所示,绕旋转轴的转动惯量为

$$J_z = \int r^2 dm = \frac{\pi}{4} \rho h_i r_i^4 = \frac{1}{4} m_i r_i^2 = \frac{1}{16} m_i d^2$$

则仿生柔性机体单个脊柱单元的动能为

$$E_{k_i} = \frac{1}{2} m_i (h_0^2 \dot{\beta}^2 (2 + 2\beta^2 \cos^2\beta - 2\beta \cos^2\beta - 2 \cos\beta + 2\beta \cos\beta + \beta \sin 2\beta) + \frac{1}{16} d^2 \dot{\beta}^2)$$

机体弯曲的总动能为

$$E_k = \sum_{i=1}^{n-1} E_{k_i} \quad (4)$$

#### 4.2 仿生机体弯曲弹性势能

系统的弹性势能主要是弹簧因压缩或者伸长而产生的弹性势能 $E_p$ 。仿生脊柱单元的柔索与弹簧的

布置,如图5所示,是沿着脊柱单元中心线的方向看到的结构示意图。 $a_0, a_1$ 与 $b_0, b_1$ 分别是水平柔索穿孔与竖直柔索穿孔;沿圆周对称分布4个弹簧,弹簧一端分别与 $c_0, c_1, d_0, d_1$ 四个孔相连。弹簧前后两端分别与前后脊柱块相连。当仿生脊柱水平弯曲的时候,即 $b_0$ 一侧柔索缩短, $b_1$ 一侧柔索伸长,同时脊柱内侧的两根弹簧 $c_0, d_0$ 压缩,外侧两根弹簧 $c_1, d_1$ 伸长。

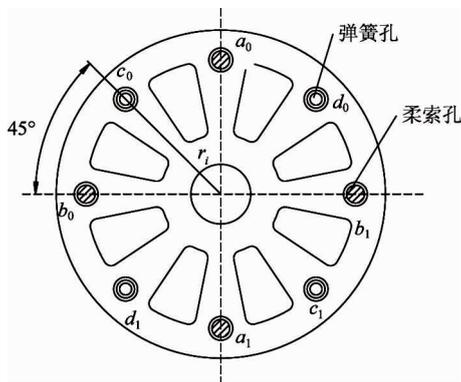


图5 仿生脊柱块

动力学分析,当内侧柔索缩短 $\Delta l'_\beta = h_\beta - l_\beta$ 时,弹簧的压缩量是 $\Delta l'_k = \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta l'_\beta$ 。拉伸和收缩侧弹簧长度变化量为 $\Delta l'_k$ 。则仿生脊柱单元中4根连接弹簧的弹性势能为

$$\begin{aligned} E_{pi} &= 4 \times \frac{1}{2}k(\Delta l'_k)^2 = 2k(\Delta l'_k)^2 \\ &= k\left(h_0 - \frac{l_s - 2\theta d_s - ns}{n-1}\right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

则仿生机体总势能为

$$E_p = \sum_{i=1}^{n-1} E_{pi} \quad (6)$$

则仿生脊柱弯曲动力学方程为

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} + \frac{\partial E_p}{\partial \theta} \quad (7)$$

### 4.3 柔索驱动力

设柔索驱动力分别为 $F_1, F_2$ ,当柔索驱动仿生机体发生侧向弯曲, $F_2$ 为伸长一侧的柔索拉力, $F_1$ 为缩短侧柔索的拉力,则有 $F_1 > F_2$ 。当仿生机体处于初始状态时,柔索是预紧的,预紧力为 $F_p$ ,则有

$F_1 = F_2 = F_p$ 。当电机旋转驱动柔索,两侧柔索长度和柔索驱动力改变,后机体受到柔索驱动力和仿生机体力矩,使得机体弯曲。后机体进行力分析,如图6所示,其中 $\tau/2$ 为仿生脊柱作用于后机体的力矩,设后机体质心为点 $C$ , $H_1, H_2$ 分别为柔索拉力 $F_1, F_2$ 在后机体上的力作用点;在初始状态下,柔索与仿生脊柱中心线间的垂直距离为 $d_s$ 。

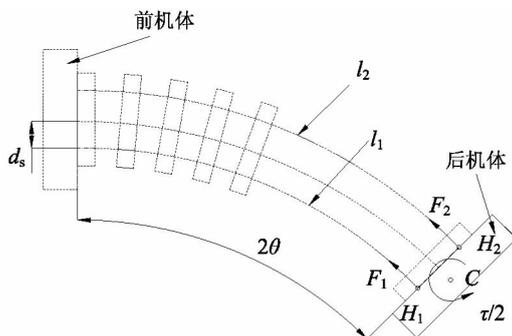


图6 后机体受力分析

根据动量矩定理,质点系相对于质心的动量矩对时间的导数,等于作用于质点系的外力对质心的主矩,则有

$$J_H \frac{d^2\theta}{dt^2} = \sum M_E(F_i) \quad (8)$$

式中, $J_H$ 为后机体转动惯量,后机体质量为 $m_H$ ,长为 $a$ ,宽为 $b$ ,则 $J_H = \frac{1}{12}m_H(a^2 + b^2)$

外力作用于后机体力矩之和为

$$\sum M_E(F_i) = F_1 d_s - F_2 d_s - \tau/2 \quad (9)$$

仿生机体弯曲时,假设柔索相对绕线器不发生滑动,有 $F_2 = F_p$ (柔索预紧力),而 $F_1$ 表示为

$$F_1 = \left( \frac{1}{12}m_H(a^2 + b^2) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \tau/2 \right) / d_s + F_p \quad (10)$$

设弹簧最大压缩量为5mm,柔性机体最大弯曲角为 $40^\circ$ ,设机体在5s内匀加速到最大弯曲角,弯曲角为 $\theta = 0.028t^2$ 。仿生机体驱动力计算的参数,如表1所示。

表1 仿生机体参数

参数	符号	数值	单位
脊柱块外圆直径	$d$	110	mm
脊柱块厚度	$s$	20	mm
脊柱块间距	$h_0$	20	mm
仿生脊柱块数	$n$	10	
关节间柔索的初始长度	$h_\beta$	20	mm
柔索与脊柱中心线垂直距离	$d_s$	45	mm
单个脊柱单元的质量	$m_i$	117.92	g
柔索最大的压缩量	$l_k$	5	mm
后机体质量	$m_H$	0.46	kg
后机体长度	$a$	150	mm
后机体宽度	$b$	150	mm
柔索预紧力	$F_P$	5	N

仿生机体刚度与脊柱块弹簧刚度密切相关,通过改变弹簧刚度可调整仿生机体刚度。取弹簧刚度系数  $k$  分别为4.12, 5.52, 6.02, 7.63N/mm。仿生机体弯曲相关理论计算结果瞬态值,如表2和表3所示。

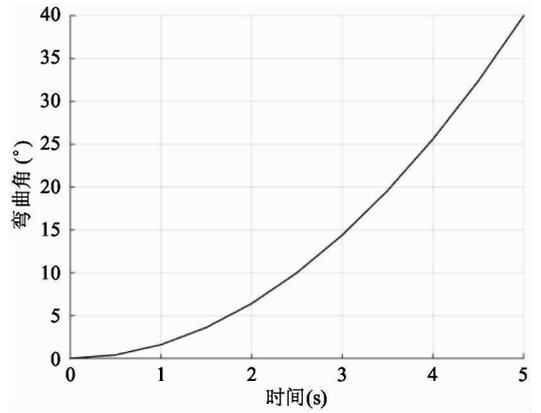
表2 仿生机体总势能

时刻 $t$ (s)	弹簧刚度 $k$ (N/mm)			
	4.12	5.52	6.02	7.63
1	2.9	3.9	4.2	5.4
2	46.5	62.3	68	86.1
3	235.5	315.5	344.1	436.1
4	744.2	997.1	1087.4	1378.2
5	1816.9	2434.3	2654.8	3364.8

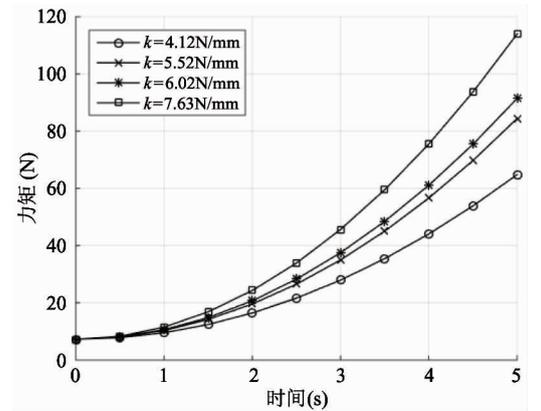
表3 作用于后机体的力矩

时刻 $t$ (s)	弹簧刚度 $k$ (N/mm)			
	4.12	5.52	6.02	7.63
1	107.7	143.0	155.6	196.2
2	418.5	559.7	610.1	772.4
3	936.8	1254.3	1367.7	1732.9
4	1662.5	2226.9	2428.5	3077.7
5	2595.7	3477.7	3792.7	4807.0

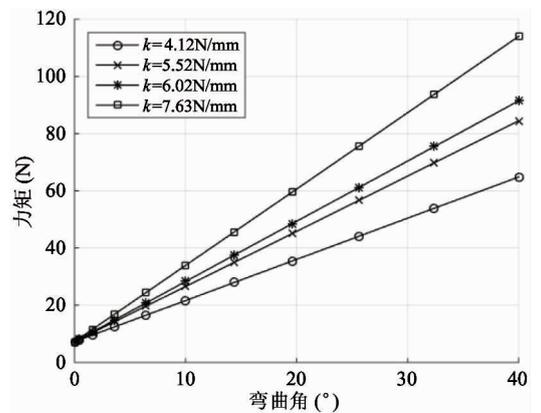
仿生机体弯曲角度规划,如图7(a)所示;理论计算结果,如图7(b)和7(c)所示。仿生机体弯曲所需驱动力随弹簧刚度增大而增大。



(a) 机体弯曲角



(b) 驱动力随时间变化



(c) 驱动力随弯曲角变化

图7 理论计算结果

## 5 仿生机体弯曲仿真分析

采用虚拟样机技术进行仿生机体弯曲动力学仿真分析。将 SolidWorks 中创建的仿生机体模型导入多体动力学建模与仿真分析软件 ADAMS 中,添加

运动约束, 每个脊柱单元上添加位移函数  $(-0.28t^2)$ , 仿生机体虚拟样机仿真模型, 如图 8 所示, 柔索简化, 进行仿生机体的弯曲运动学及动力学仿真分析, 可直观反映仿生机体动态弯曲情况。

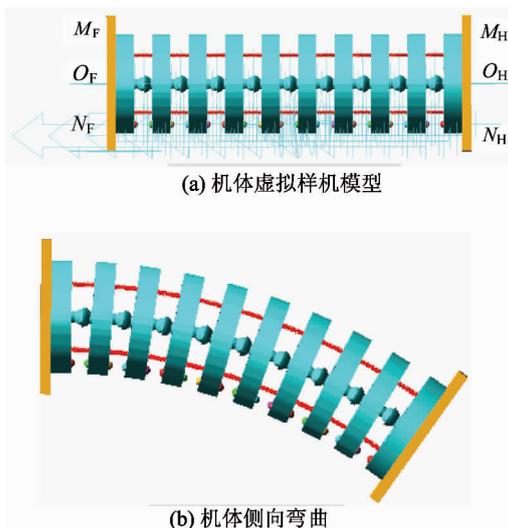


图 8 虚拟样机模型

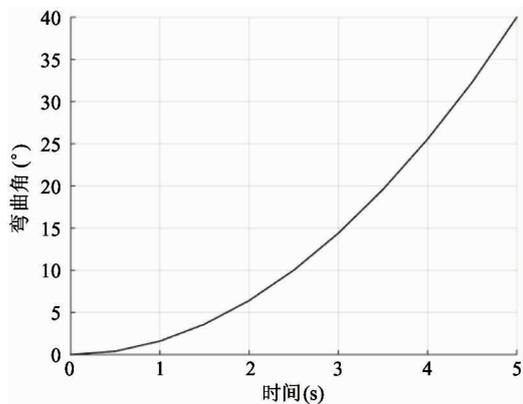
表 4 虚拟样机模型弯曲前后的坐标值

各坐标系原点	弯曲前	弯曲后
$M_F$	$(-45, 0, 0)$	$(-45, 0, 0)$
$O_F$	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)$
$N_F$	$(45, 0, 0)$	$(45, 0, 0)$
$M_H$	$(-45, -380, 0)$	$(210, -310, 0)$
$M_H$	$(0, -380, 0)$	$(220, -270, 0)$
$M_H$	$(45, -380, 0)$	$(230, -220, 0)$

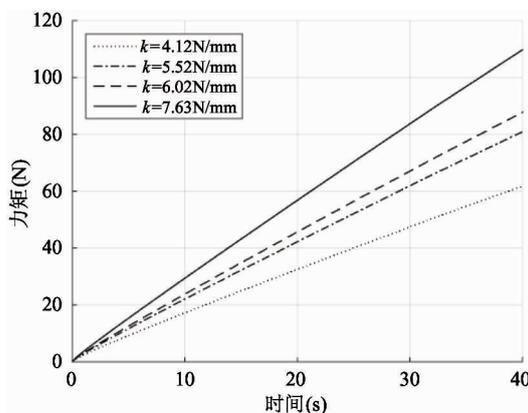
设定不同的弹簧刚度, 仿生机体弯曲仿真结果, 如图 9 所示。

由图 9(a) 可看出, 机体弯曲角为  $40^\circ$ , 与理论分析一致。由图 9(b) 驱动力随时间变化曲线看出, 随着弹簧刚度增大, 所需驱动力逐渐增大。

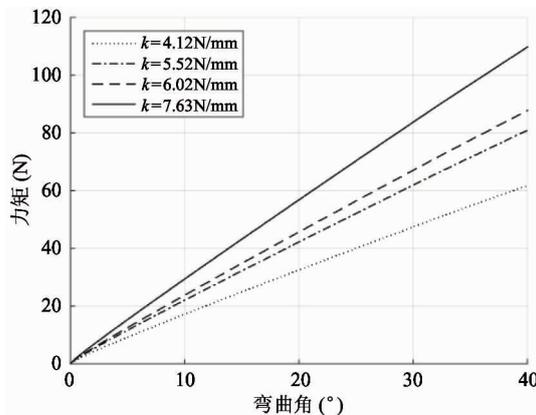
图 7(c) 和图 9(c) 是驱动力随弯曲角变化曲线, 当仿生机体弯曲同样角度, 弹簧刚度越大, 所需驱动力越大, 理论分析与仿真结果基本一致。



(a) 机体弯曲角



(b) 驱动力随时间变化



(c) 驱动力随弯曲角变化

图 9 仿真结果

## 6 结论

本文提出一种四足机器人仿生机体, 由柔索驱动实现动态俯仰和侧向弯曲。采用坐标变换法开展

了仿生机体弯曲运动学建模分析。采用拉格朗日法和浮动坐标系法开展了仿生机体动力学分析,获得机体弯曲所需驱动力与机体弯曲角关系。基于虚拟样机技术进行仿生机体弯曲仿真分析,验证理论分析正确性。新型仿生机体有助于四足机器人原地转向或跑跳步态。

### 参考文献

[ 1 ] 王国彪,陈殿生,陈科位等. 仿生机器人研究现状与发展趋势. 机械工程学报, 2015, 51(13):27-44

[ 2 ] Liu C, Zhang X L, Li D D, et al. A flexible-waist quadruped robot imitating infant crawl. In: Proceedings of the 2nd ASME/IEEE International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, Tianjin, China, 2012. 455-463

[ 3 ] Park S H, Kim D S, Lee Y J. Discontinuous spinning gait of a quadruped walking robot with waist-joint. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Alberta, Canada, 2005. 2744-2749

[ 4 ] 王鹏飞,黄博,孙立宁. 四足仿生机器人稳定性判定方法. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(7):1063-1066

[ 5 ] Ishii H, Masuda Y, Miyagishima S, et al. Design and development of biomimetic quadruped robot for behavior studies of rats and mice. In: Proceedings of the IEEE Conference on Medicine and Biology Society, Minnesota, USA, 2009. 7192-5

[ 6 ] Tsujita K, Miki K. A study on trunk stiffness and gait stability in quadrupedal locomotion using musculoskeletal robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics, Tallinn, Estonia, 2011. 316-321

[ 7 ] Boston Dynamics. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_cheetah.html](http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html); Boston Dynamics, 2012

[ 8 ] Dong J H, Seok S, Lee J, et al. High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(11): 1417-1445

[ 9 ] Li Z, Zhong Y, Du R X. A novel underactuated wire-driven robot fish with vector propulsion. In: Proceedings

of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 2013. 941-946

[ 10 ] Liao B, Li Z, Du R. Robot tadpole with a novel biomimetic wire-driven propulsor. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China, 2012. 557-562

[ 11 ] Zhong Y, Li Z, Du R X. The design and prototyping of a wire-driven robot fish with pectoral fins. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenzhen, China, 2013. 1918-1923

[ 12 ] Yang G, Yeo S H, Pham C B. Kinematics and singularity analysis of a planar cable-driven parallel manipulator. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004. 3835-3840

[ 13 ] Hiller M, Fang S, Mielczarek S, et al. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism & Machine Theory*, 2005, 40(4): 429-445

[ 14 ] Yamamoto M, Yanai N, Mohri A. Trajectory control of incompletely restrained parallel-wire-suspended mechanism based on inverse dynamics. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(5):840-850

[ 15 ] 警斌,朱真才,曹建斌. 混合驱动柔索并联机器人的设计与分析. 机械工程学报, 2011, 47(17):1-8

[ 16 ] Li Z, Du R, Yu H, et al. Statics modeling of an underactuated wire-driven flexible robotic arm. In: Proceedings of the IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, Sao Paulo, Brazil, 2014. 326-331

[ 17 ] 雷静桃,俞煌颖. 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. 上海交通大学学报, 2014, 48(12):1688-1693

[ 18 ] Dwivedy S K, Eberhard P. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism & Machine Theory*, 2006, 41(7):749-777

[ 19 ] 洪嘉振,刘铸永. 刚柔耦合动力学的建模方法. 上海交通大学学报, 2008, 42(11):1922-1926

[ 20 ] Likins P W. Finite element appendage equations for hybrid coordinate dynamic analysis. *International Journal of Solids & Structures*, 1972, 8(5):709-731

# Bending dynamic modeling and simulation of the bionic body driven by wires

Lei Jingtao, Jiang Yunqi, Wu Qifan

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072)

## Abstract

Based on the movement mechanism of quadruped organisms, a kind of bionic body of wire driven quadruped robots is proposed. It is composed of the front body, rear body, bionic spine and two groups of cable driving components, with the ability to achieve the lateral or up/down bending. The coordinate transformation method is adopted to analyze the bionic body's kinematics. The Lagrange method and the floating coordinate system method are used to analyze the coupled dynamics modeling of the dynamic bending of the bionic body, and the driving force for bending the bionic body is determined. The dynamic bending characteristics of the body of different stiffness are analyzed. Based on the virtual prototype technology, a body dynamic bending simulation is performed to verify the correctness of the theoretical analysis, with the aim of laying the theoretical foundation for the research on improving the mobility of quadruped robots walking in unstructured environments.

**Key words:** quadruped robot, wire driving, bionic body, variable stiffness, rigid flexible coupling, dynamic