

一种仿婴儿欠自由度四足爬行机器人

张秀丽¹, 梁艳²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 北京康信知识产权代理有限公司, 北京 100098)

摘要: 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 BabyBot, 其脊柱为变截面通体柔顺结构, 膝关节为无自由度可变形被动关节. 利用伪刚体法对柔性脊柱和弹性膝关节的结构参数进行设计, 采用中枢模式发生器 (CPG) 运动控制模型生成对角爬行步态轨迹, 柔顺机构与仿生控制有机结合形成了 BabyBot 机器人“以膝着地、腰髋耦合”的仿婴儿爬行步态. 对欠自由度仿婴儿机器人的机构可行性, 以及柔性脊柱对机器人运动性能的影响进行仿真及实验, 结果表明, 具有弹性膝关节的欠自由度四足机器人可以实现平稳的爬行运动, 变截面柔性脊柱能够减小机器人行走时躯干在横滚及偏转方向的姿态波动程度, 提高了机器人运动的协调性和轨迹准确性, 并揭示出婴儿爬行时脊柱的柔顺运动对稳定视觉的潜在作用.

关键词: 四足机器人; 爬行; 柔性脊柱; 欠自由度; 中枢模式发生器

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-04-0458-09

A Baby-mimic Insufficient-DOF Quadruped Crawling Robot

ZHANG Xiuli¹, LIANG Yan²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Kangxin Partners, Beijing 100098, China)

Abstract: Inspired by the unique body configuration when a baby crawls, a quadruped crawling robot with flexible spine and elastic knees is designed, named BabyBot. The spine is a variable cross-section structure of elastic material and the knees are passively deformable joints without active DOFs (degrees of freedom). The flexible spine and elastic knees are designed using pseudo rigid body modeling approach. The central pattern generator (CPG) is employed to generate trot gait trajectories for BabyBot. Combining the compliant mechanical structure with the biologically-inspired control approach, the “supporting on knees and waist-hip motion coupling” gait in baby crawling is developed. The dynamic simulations and physical experiments are conducted to evaluate the feasibility of Babybot’s mechanical configuration and the influence of the flexible spine on its performance of the baby-mimic insufficient-DOF robot. The results show that the insufficient-DOF quadruped crawling robot with passive elastic knees is capable of crawling stably. Variable cross-section flexible spine can reduce the trunk’s postural instability in roll and yaw directions when the robot crawls. That means the flexible spine enables the robot to crawl naturally and to maintain its direction. And it implies the spine’s compliant swinging has active role on stabilizing the vision of a baby.

Keywords: quadruped robot; crawling; flexible spine; insufficient-DOF (degree of freedom); central pattern generator

1 引言 (Introduction)

爬行是婴儿在学会双足直立行走之前的特定运动形式, 见图 1. 婴儿爬行时双臂和双腿依次摆动, 推动躯体向前运动, 动作模式与自然界中的四足哺乳动物的行走步态具有相似性. 但是大多数婴儿在爬行时后腿以膝着地, 膝关节不产生推动躯体前进的运动, 这与四足动物前后腿运动相同、均以足着地的情况有明显区别. 另外, 婴儿爬行时脊柱/腰

部在偏转方向 (yaw) 有较大的摆动幅度, 而四足动物直线行走时, 脊柱在偏转方向几乎没有摆动. 而且, 婴儿爬行时髋部的俯仰摆动与脊柱/腰部的偏转摆动同向耦合, 由此形成有效的摆腿跨步运动. 婴儿为什么采用这样方式实现爬行是一个非常有趣的科学问题, 从仿生学角度研究婴儿爬行时的躯体形态、脊柱和膝关节的独特运动模式对于四足机器人的样机设计和移动理论发展具有启发意义.

目前, 国内外的仿婴儿机器人多数被设计为四

足机器人或小型仿人机器人, 如意大利研究人员设计的婴儿机器人“iCub”, 其机械本体采用尺寸较小的仿人机器人构型, 没有脊柱, 因此 iCub 的爬行运动中有非常不自然的划船式摆动, 远未达到真实婴儿爬行的连贯性和柔顺性^[1]. 日本学者 Narioka 模仿婴儿骨骼肌肉结构设计的气动肌肉驱动的四足爬行机器人“Pneuborn-7 II”, 对脊柱弯曲形态对运动的影响进行研究, 但是由于气动肌肉响应速度和位置控制精度较低, 很难真实模拟婴儿的爬行运动^[2]. 日本信息通信融合研究中心研制的“Infanoid”仿婴儿机器人^[3]和日本大阪大学研制的 M3-neony 和 M3-synchy 婴儿机器人^[4]则主要关注婴儿的学习机制和智能发展, 对婴儿爬行时特殊的躯体姿态和运动模式研究甚少.

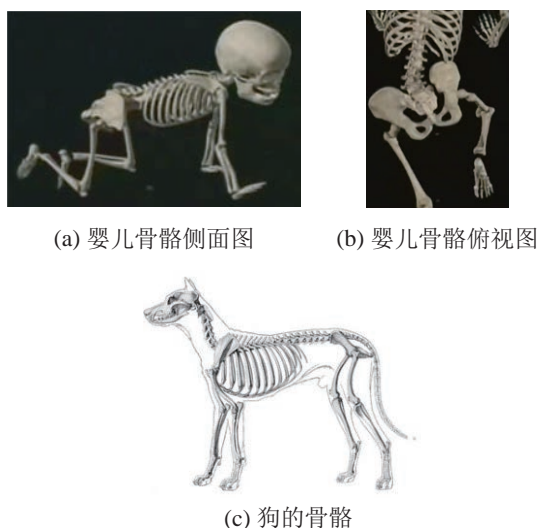


图 1 爬行婴儿与四足哺乳动物骨骼图

Fig.1 The skeletons of a crawling baby and a quadruped mammal

脊柱的柔顺性和欠自由度的膝部是婴儿爬行运动中最值得关注的特征. 随着足式机器人的运动向高速、高动态、高适应性方向发展, 将柔顺结构^[5-6]应用于足式机器人已经成为该领域的一个研究热点. 美国波士顿公司研制的实验室中的 Cheetah 四足机器人与 BigDog 最大的不同是 Cheetah 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, 猎豹机器人实现了高速奔跑^[7]. 韩国 Park 等人研制的四足机器人 ELIRO 具有 1 个偏转腰关节, 利用腰关节, 机器人能够实现静态转向、躲避障碍物, 且转向过程比传统步态更稳定^[8]. 早稻田大学的 Ishii 等人发明的新型仿生四足机器人 WR-2, 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^[9].

与利用腰部自由度实现的脊柱局部柔顺性不同, 全局柔顺是指脊柱整体为一个柔顺结构, 由可变形的柔性材料构成, 从仿生角度看全局柔性脊柱更接近动物的脊柱形态. 大阪工业大学的 Tsujita 等人模仿人体脊柱结构, 设计了包括椎骨和椎间盘的柔性脊柱, 椎骨及椎间盘通过钢丝串联在一起, 改变钢丝的拉力, 可以构成具有不同刚度的柔性脊柱^[10]. 德黑兰大学的 Kani 等人设计了双向弯曲、向外单向弯曲以及向内单向弯曲 3 种形式的柔性脊柱, 研究了不同结构的柔性脊柱对于机器人奔跑性能的影响, 实验结果表明可双向弯曲的柔性脊柱能够提高机器人奔跑的稳定性和地形适应性^[11]. Folkertsma 等人在 MIT 的 Cheetah 仿生机器人中设计了由软硬模块交替组合构成的柔顺脊柱, 并将脊柱的伸缩舒张运动与腿部运动耦合起来, 以降低机器人奔跑时的功耗^[12].

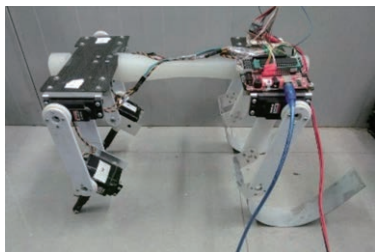
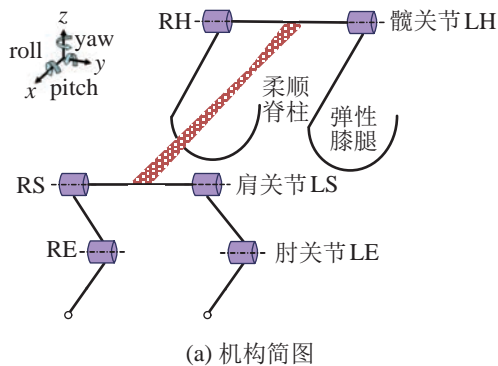
腿是足式机器人实现移动的功能部件, 四足机器人多采用关节式腿结构, 每条腿有 2~4 个关节, 前后腿一般具有相同的自由度. 婴儿“以膝着地”的爬行运动中, 膝关节并没有产生推动躯体前进的大运动, 而是只有微量转动^[13]. 类似的欠自由度腿关节在足式机器人中一般被设计为轮式腿或被动弹性缓冲关节, 如著名的 RHex 六足机器人^[14]采用 C 形轮式腿, 罗庆生等在其研发的四足机器人 Cheetah Robot 的后腿中采用了大曲率弧状弹性踝足^[15]. Xu 等基于轮壤动力学研究了弹性轮式腿的形状对速度、功耗等运动性能的影响^[16]. 虽然国内外并没有出现将弹性弧状结构用作膝关节的实例, 但是, 就婴儿爬行运动中膝关节的功能而言, 用弹性弧状结构来构造膝关节具有仿生学上的合理性.

本研究源于对婴儿爬行运动的兴趣, 旨在通过设计仿婴儿机器人, 探索婴儿爬行姿态所蕴藏的生物力学机理以及在机器人中的潜在应用价值. 通过对婴儿爬行时躯体形态及脊柱与四肢之间协调运动的观察, 设计了具有变截面全局柔性脊柱以及弧状弹性腿部的仿婴儿欠自由度四足爬行机器人 BabyBot, 通过仿真和实验验证了该欠自由度四足机器人的机构可行性, 并对刚性脊柱和全局柔性脊柱对机器人运动性能的影响进行了仿真分析和对比实验.

2 仿婴儿四足爬行机器人 (A baby-mimic quadruped crawling robot)

婴儿爬行过程中双臂肩关节、肘关节以及双腿髋关节依次摆动, 推动躯体前移; 膝部支撑在地面上, 膝关节在爬行过程中仅有微量转动; 脊柱随着

四肢的摆动呈现出周期性的偏转运动，腰椎部位摆动幅度最大，且脊柱与髋关节的运动具有同向耦合性^[17]。基于上述仿生学观察，提出了仿婴儿四足爬行机器人 BabyBot 的柔顺化结构方案，如图 2 所示，机器人分为躯干、前臂、后腿 3 部分，左右两臂及两腿的结构分别相同；躯干为工字型，由前后支撑板及中间的柔性脊柱构成。左右臂各有肩关节、肘关节 2 个主动自由度，左右腿髋关节有 1 个主动自由度，小腿为 C 形弧状弹簧钢片，与地面直接接触，作为可被动变形的膝关节。BabyBot 机器人总体尺寸为 400 mm × 315 mm × 271 mm，质量为 4.15 kg。



(b) 样机

图 2 仿婴儿四足爬行机器人 BabyBot

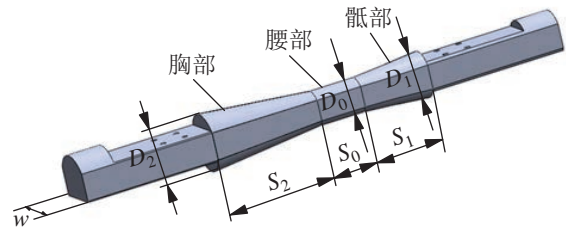
Fig.2 The baby-mimic quadruped crawling robot BabyBot

2.1 柔性脊柱设计

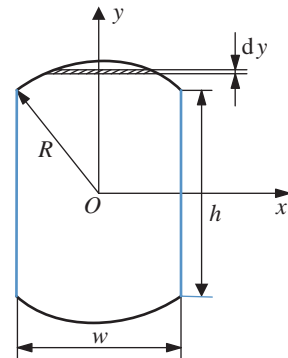
人体脊柱是躯体上半部和下半部的连接部分，由颈椎、胸椎、腰椎、骶椎等多段构成，每段的运动幅度及刚度不同，其中骶部完全不动，胸部运动范围很小，颈部和腰部则比较灵活。Tournier^[18]的研究发现，脊柱的偏转运动并不存在一个固定的旋转中心，只存在平均旋转中心，脊柱的平均旋转中心位于脊柱后 1/3 处，即腰部位置。另外，脊柱在横滚、俯仰和偏转 3 个空间方向的运动幅度也有差别，婴儿爬行时脊柱在偏转方向呈现较大幅度的周期性摆动，而在俯仰和横滚方向的摆动则很小。

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 个转动方向上的刚度不同的特点，

将 BabyBot 的柔性脊柱设计成变截面形状，直径最小处设在脊柱的后 1/3 处，脊柱的前端和后端由最小直径均匀增大而来。同时，为了实现偏转方向 (yaw) 较大的柔顺性，对脊柱两侧进行对称削边。脊柱前后两端设计有与机器人前后支撑板连接的平台结构，见图 3。



(a) 柔性脊柱 3D 模型



(b) 腰部截面图

图 3 BabyBot 的柔性脊柱

Fig.3 The flexible spine of BabyBot

BabyBot 的爬行运动采用模仿婴儿爬行的对角步态，任一时刻对角两腿处于支撑相，另外两腿处于摆动相。如图 4，建立机器人的简化受力图，支撑足 2 和 4 受到来自地面的竖直反力和水平方向的摩擦力。竖直力将引起柔性脊柱的扭转变形，水平力将引起脊柱的弯曲变形。

根据生物学家对四足动物运动的调查^[19]，对角步态行走时支撑足竖直方向所受的最大地面反力约为自身重量的 1.2 倍，两支撑腿所受的力近似相等，竖直支反力 F_z 与水平摩擦力 F_x 之间呈正切关系^[20]，即：

$$\begin{cases} F_z = 0.6Mg \\ F_x = F_z \tan \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中， M 为机器人质量， α 为足与髋关节转动中心连线与竖直方向的夹角。

婴儿爬行时腰部为脊柱弯曲摆动的转动中心，腰部至前肩段几乎不动，腰部至后髋段摆动幅度较

大, 这种运动形态相当于具有柔性片段的悬臂梁, 因此, 如图 5 所示, 将 BabyBot 的柔性脊柱建模为短臂柔铰伪刚体模型, 腰部至前肩段和腰部至后髋段近似为刚体, 腰部为柔性片段, 腰部中心位置简化为扭簧, 脊柱前段固定, 后段围绕扭簧转动。

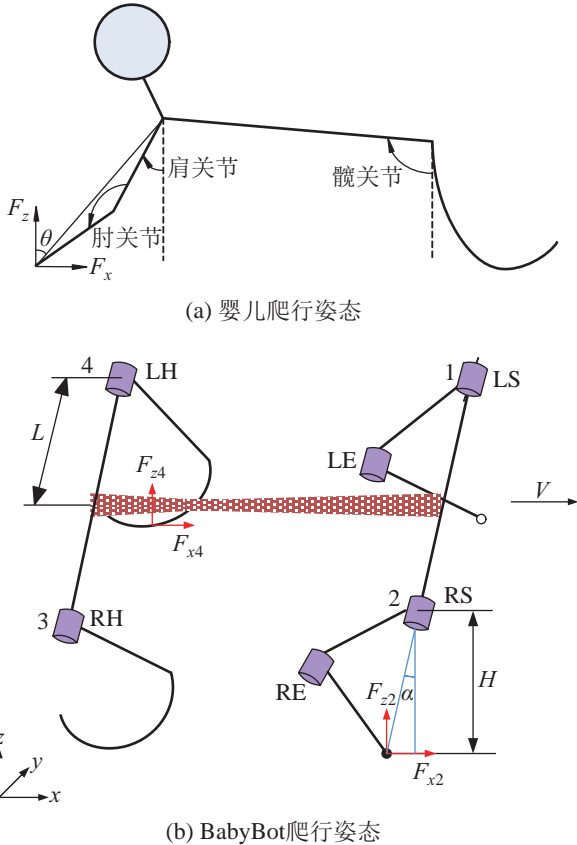


图 4 BabyBot 受力示意图
Fig.4 Forces on Babybot

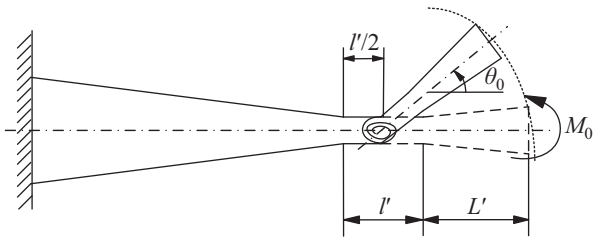


图 5 BabyBot 柔性脊柱伪刚体模型
Fig.5 Pseudo rigid body model of Babybot's flexible spine

支撑足的摩擦力 \$F_x\$ 在脊柱上产生转矩 \$M_0\$:

$$M_0 = 2F_x H \quad (2)$$

式中, \$H\$ 为足底至髋关节的垂直距离。

当脊柱的自由端受到转矩 \$M_0\$ 作用时, 其伯努利-欧拉方程为

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_0}{EI} \quad (3)$$

梁末端的变形角 \$\theta_0\$ 通过分离变量积分求得:

$$\int_0^{\theta_0} d\theta = \int_0^L \frac{M_0}{EI} ds \quad (4)$$

如图 3(b) 所示, BabyBot 机器人的腰部截面由 1 个矩形和 2 个弧形组成, 计算 \$x\$ 轴和 \$y\$ 轴的惯性矩:

$$\begin{cases} I_x = I_{x_1} + 2I_{x_2} \\ = \frac{2wh^3}{3} + \frac{R^4}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{h}{2R} + \frac{1}{4} \sin 4 \arcsin \frac{h}{2R} \right) \\ I_y = I_{y_1} + 4I_{y_2} \\ = \frac{R^4}{2} \left(\arcsin \frac{w}{2R} - \frac{1}{4} \sin 4 \arcsin \frac{w}{2R} \right) \end{cases} \quad (5)$$

则极惯性矩为

$$I = I_x + I_y \quad (6)$$

又,

$$R = \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \quad (7)$$

给定柔性脊柱在偏转方向的最大变形角, 令 \$\theta_0 \le \theta_{max}\$, 根据式 (1) ~ (7) 可求得 BabyBot 变截面柔性脊柱尺寸, 见附录表 3。

2.2 弹性小腿刚度设计

婴儿在爬行过程中, 小腿屈曲, 膝盖着地, 膝关节仅有微小转动, 可认为婴儿爬行时其双腿膝关节的主要功能是支撑体重, 而不是推进躯体前进。基于此将 BabyBot 的小腿部设计成弹性腿, 膝关节不设主动自由度, 而是通过弹性腿的被动变形适应地面, 支撑机体。

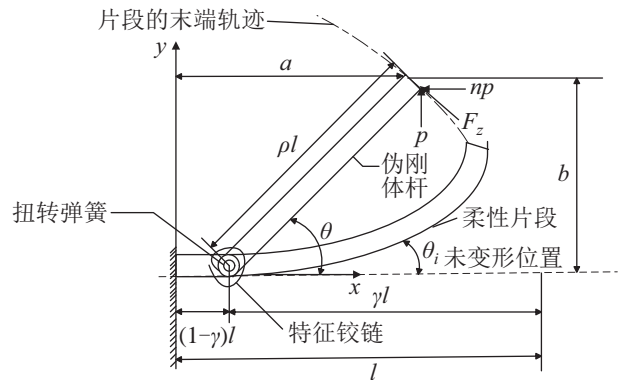


图 6 Babybot 小腿伪刚体模型
Fig.6 Pseudo rigid body model of Babybot's hind legs

小腿材料选择 1.4310C 不锈钢弹簧片, 形状设计为 C 形弧状, 上端与大腿固联。C 形腿的刚度是一个重要的设计指标, 采用伪刚体方法确定腿部的等效刚度。机器人爬行时 C 形弹性腿受到地面的支撑反力, 小腿相当于自由端受力的柔性悬臂梁, 其自由端的轨迹近似为沿梁长度方向以某一曲率为半

径的圆弧，建立梁变形轨迹的参数模型，如图 6 所示，用铰链连接的两段刚性构件来代替小腿 C 形弹簧钢片，后段梁具有初始弯曲，梁的变形能力通过铰接点处的扭簧来体现，弹簧常数为 K 。

F_z 为地面支撑反力，定义无量纲切向载荷系数 α_i^2 为

$$\alpha_i^2 = \frac{F_z l^2}{EI} \tag{8}$$

$$\alpha_i^2 = K_\theta(\theta - \theta_i) \tag{9}$$

特征铰链处的扭矩为

$$T = \rho l F_z \tag{10}$$

用扭簧常数与角变形的乘积来表示铰链扭簧的扭矩为

$$T = K(\theta - \theta_i) \tag{11}$$

由式 (8) ~ (11) 可得初始弯曲梁的扭簧常量为

$$K = \rho K_\theta \frac{EI}{l} \tag{12}$$

用无量纲参数 k_0 表示 C 形腿的初始曲率：

$$k_0 = \frac{l}{R_i} \tag{13}$$

小腿长度 $l = 140 \text{ mm}$ ，初始曲率半径 $R_i = 90 \text{ mm}$ ，根据文 [21]，线性插值可得伪刚体模型各系数 $\gamma = 0.8$ ， $\rho = 0.771$ ， $K_\theta = 2.83$ ，由式 (8) ~ (13) 可求得小腿弹簧等效刚度为 $K = 12.10 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。

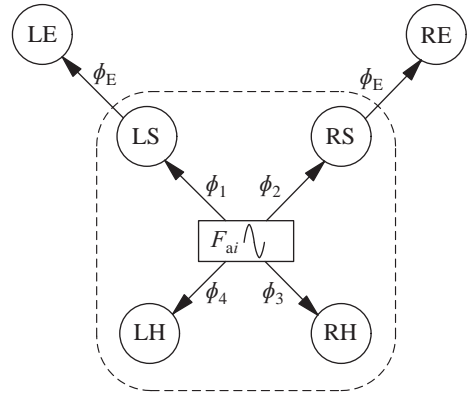


图 7 BabyBot 机器人的 CPG 模型
Fig.7 The CPG model of Babybot
(LE: 左肘, RE: 右肘, LS: 左肩, RS: 右肩, LH: 左髋, RH: 右髋)

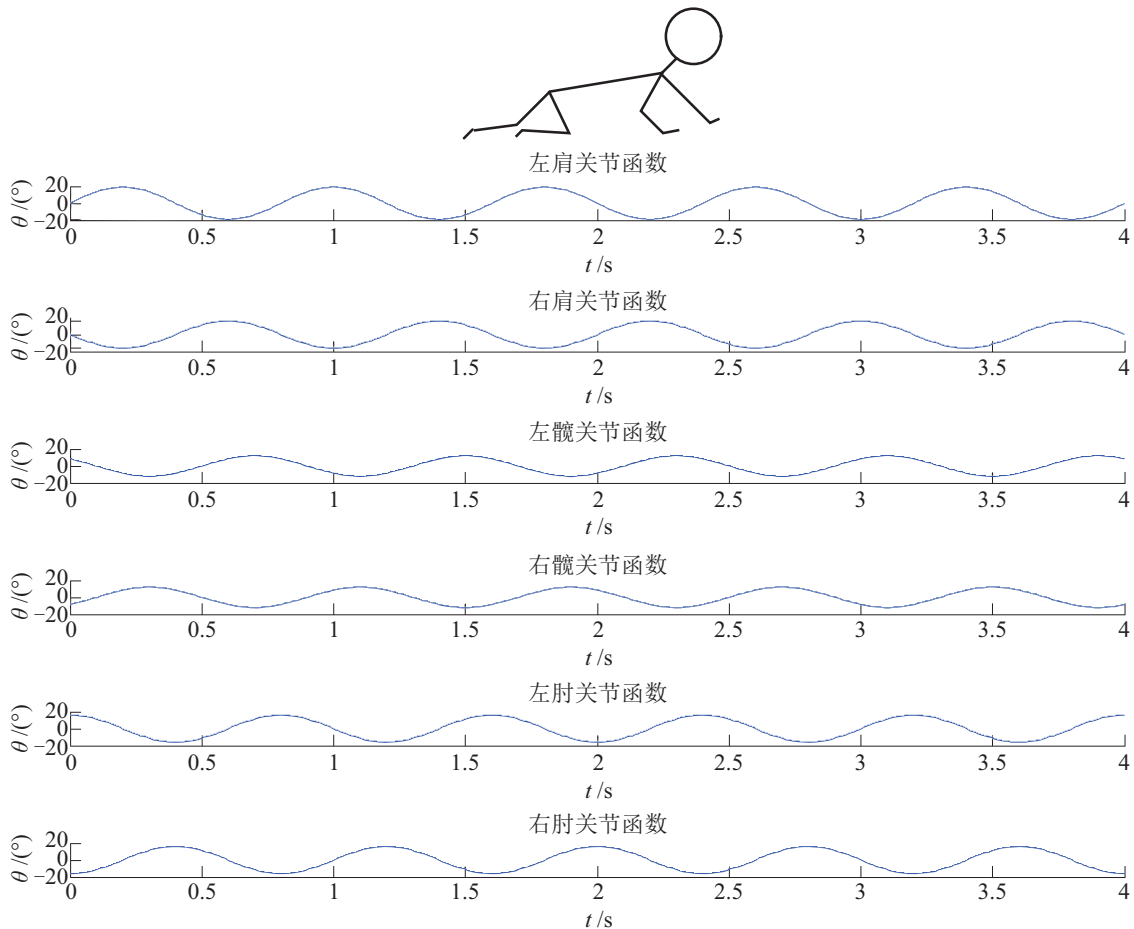


图 8 BabyBot 机器人的 CPG 控制器输出
Fig.8 The output of the Babybot's CPG controller

3 CPG 运动控制模型 (CPG-based motion control model)

熟练的婴儿爬行动作是一种节律性很强、各肢体之间具有明确稳定相位关系的运动, 为了实现这样的运动, 采用源于生物神经控制机理的 CPG 运动控制模型, 以振荡器分层耦合的方法建立 BabyBot 的节律运动控制器. BabyBot 属于欠自由度四足机器人, 只有双肩、双肘、双髋 6 个主动关节, 双腿膝关节没有自由度. 如图 7 所示, 将两个肩关节和两个髋关节耦合, 构成 CPG 网络的核心层, 以左前肩关节为基准, 其余关节与基准关节的相位差为 ϕ_i . 机器人的两个肘关节的神经振荡器与对应肩关节振荡器耦合, 具有固定的相位互锁关系 ϕ_E , 构成 CPG 的外层网络. 以正弦函数表达神经振荡器, 则整个 CPG 网络的数学模型见式 (14), 参数取值见附录表 4, CPG 控制器输出曲线见图 8, 可以看出各关节曲线符合对角步态的相位特征.

$$\begin{cases} \theta_{ij}(t) = A_j \sin(2\pi t/T + \phi_{ij}) \\ \theta_{iE}(t) = A_E \sin(2\pi t/T + \phi_{iS} + \phi_E) \end{cases} \quad (14)$$

$i = L, R; j = S, H$

式中, θ 为 6 个主动关节的关节角.

4 BabyBot 爬行运动仿真分析 (Simulations of the BabyBot crawling)

对具有 C 形弹性腿和变截面柔性脊柱的 Baby-

Bot 四足机器人进行运动仿真, 虚拟样机模型如图 9 所示, 其中 C 形腿部和脊柱建模为弹性单元, 其它为刚性单元. 由于头部姿态的稳定性对于婴儿爬行的意义重大, 因此选取肩部连接板质心 COM-H (近似代替头部位置) 在横滚方向的位移和机器人整体质心 COM 在偏转和横滚方向上的位移作为判断机器人爬行协调性与姿态稳定性的指标. 设计结构相同但分别具有刚性脊柱和柔性脊柱的机器人进行对比实验, 结果如图 10 所示, 位移数据分析见表 1. 具有柔性脊柱的机器人整体质心在横滚方向和偏转方向的位移幅值相对于刚性机器人分别减小了 16.7% 和 30.7%, 肩部连接板质心在横滚方向的位移幅值相对于刚性机器人减小了 2.7%. 仿真视频也表明柔性脊柱机器人整体运动的节律性更强、步态更加协调自然.

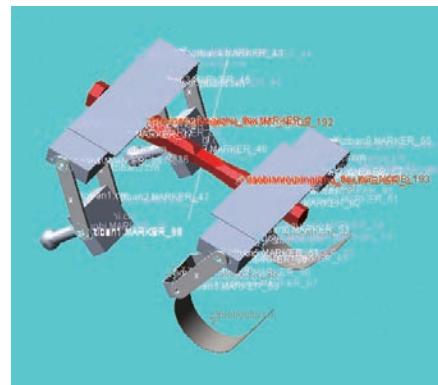
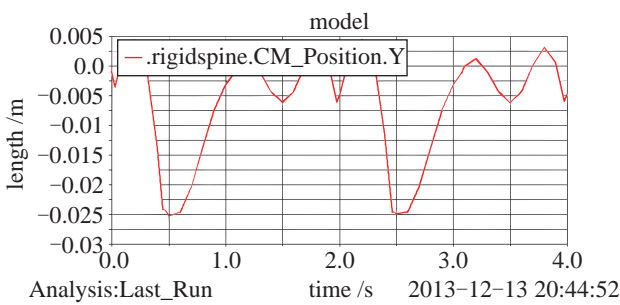
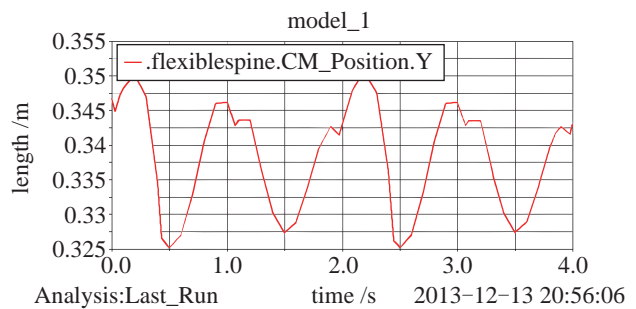


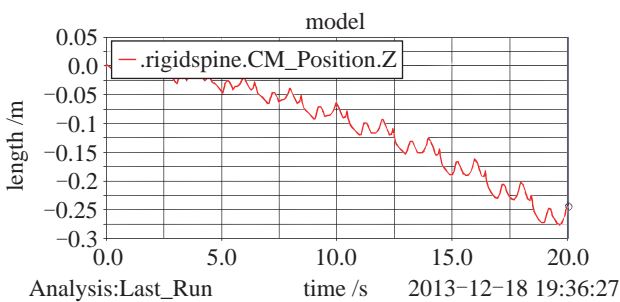
图 9 BabyBot 虚拟样机
Fig.9 Babybot virtual prototype



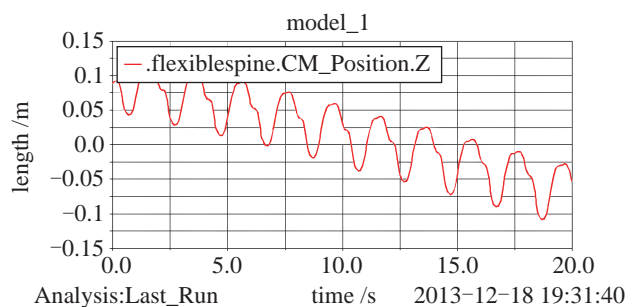
(a) 刚性脊柱机器人COM横滚方向位移



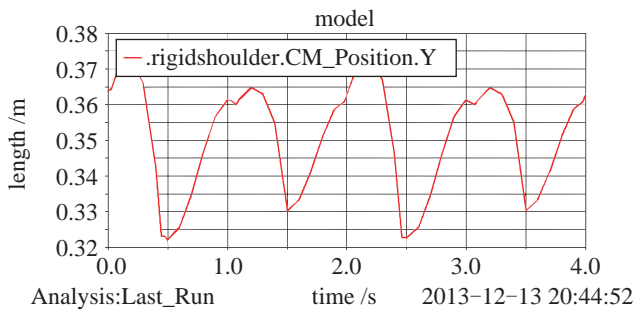
(b) 柔性脊柱机器人COM横滚方向位移



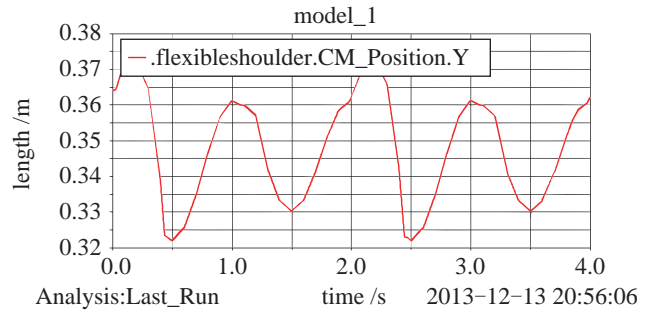
(c) 刚性脊柱机器人COM偏转方向位移



(d) 柔性脊柱机器人COM偏转方向位移



(e) 刚性脊柱机器人COM-H横滚方向位移



(f) 柔性脊柱机器人COM-H横滚方向位移

图 10 具有刚、柔脊柱的 Babybot 机器人运动仿真曲线

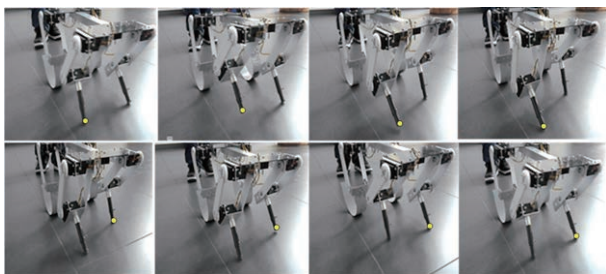
Fig.10 Crawling trajectories of Babybot with a rigid or flexible spine in simulations

表 1 刚、柔脊柱 Babybot 机器人运动仿真数据

Tab.1 Crawling data of Babybot with a rigid or flexible spine in simulations

	机器人整体质心位移幅值/mm		肩部连接板质心位移幅值/mm
	横滚方向	偏转方向	横滚方向
刚性	30.1	276.0	51.6
柔性	25.0	199.9	50.2
效果改善	-16.7%	-30.7%	-2.7%

图 12 所示, 黄色标记表示摆动足, 红色线条显示脊柱的偏转程度. 躯干在偏转方向以及前肩在横滚方向的位移曲线分别如图 13 和图 14 所示, 数据分析结果见表 2. 对比刚、柔脊柱机器人爬行姿态数据可知, 柔性脊柱机器人的躯干偏转相对于刚性脊柱机器人减小了 27.62%, 方差减小了 75.68%; 前肩在横滚方向的姿态角减小了 2.12%, 方差减小了 5.21%. 实验结果与仿真结果趋势相同, 均表明柔性脊柱对于稳定机器人躯干与头部姿态、保持机器人运动方向具有积极作用.



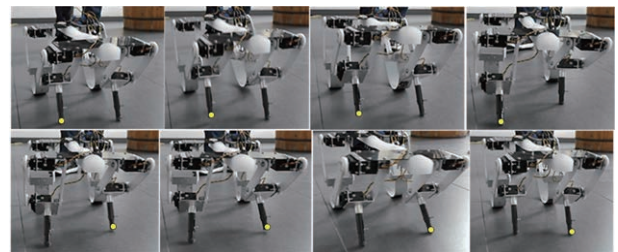
(a) 1个周期爬行运动前视图



(b) 5个周期爬行运动俯视图

图 11 刚性脊柱的 Babybot 机器人行走视频

Fig.11 Crawling video of Babybot with a rigid spine



(a) 1个周期爬行运动前视图



(b) 5个周期爬行运动俯视图

图 12 柔性脊柱的 Babybot 机器人行走视频

Fig.12 Crawling video of Babybot with a flexible spine

5 BabyBot 爬行运动实验 (Experiments of the BabyBot crawling)

建造了 BabyBot 仿婴儿爬行机器人样机, 分别以刚性脊柱和柔性脊柱连接机体, 进行爬行运动对比实验. 在脊柱中点以及肩连接板中点处安装 MTi 六维姿态仪, 实时采集被测点在空间横滚、俯仰和偏转 3 个方向的姿态角. 实验视频截图如图 11 和

表 2 刚、柔脊柱机器人爬行数据分析

Tab.2 Crawling data of the robot with a rigid or flexible spine

	刚性	柔性	效果改善
横滚方向最大角度 / (°)	6.320	6.186	-2.12%
横滚方向方差	2.482	2.352	-5.21%
偏转方向最大角度 / (°)	34.444	24.930	-27.62%
偏转方向方差	106.125	25.811	-75.68%

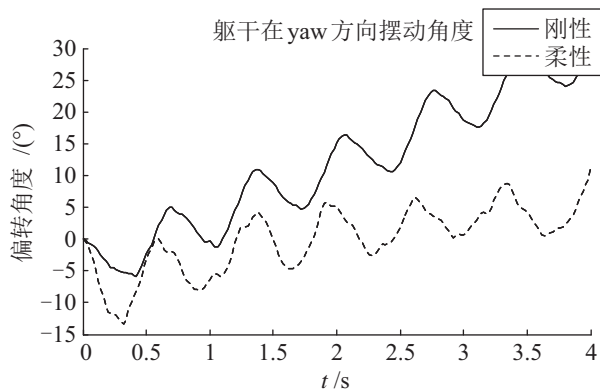


图 13 躯干在偏转方向姿态角

Fig.13 Yaw angles of the trunk

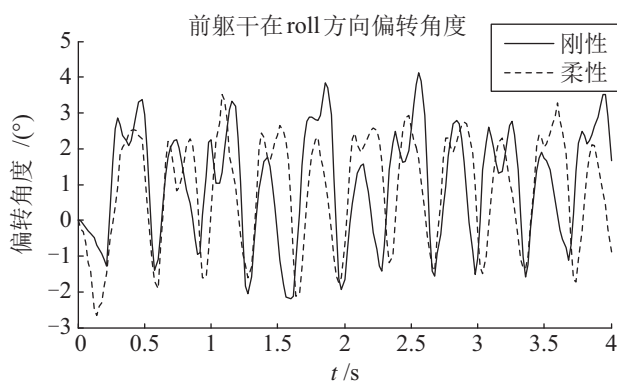


图 14 前肩在横滚方向的姿态角

Fig.14 Roll angles of the front shoulder

6 结论 (Conclusions)

(1) 模仿婴儿爬行时独特的躯体形态, 设计了具有弹性腿部和柔顺脊柱的欠自由度仿婴儿四足爬行机器人 BabyBot, 其中脊柱采用变截面通体柔顺材料制作, 腿部采用 C 形弹簧钢片, 膝关节为被动关节, 利用伪刚体模型方法对柔顺脊柱和 C 形腿的结构参数进行了设计。

(2) 基于生物神经控制机理, 建立了 BabyBot 四足爬行机器人 6 个主动自由度的 CPG 运动控制模型, 用于机器人的对角爬行步态轨迹生成。

(3) 对具有柔性脊柱和刚性脊柱的仿婴儿四足爬行机器人分别进行了虚拟样机仿真和物理样机对比实验, 结果表明欠自由度仿婴儿四足机器人可以实现平稳协调的爬行运动; 变截面柔性脊柱可使机器人在横滚方向和偏转方向的姿态波动幅度减小, 提高了机器人运动轨迹的准确性和躯体姿态的平稳性。研究揭示出婴儿以膝着地、以柔顺脊柱配合腿部的运动方式对于减小头部姿态波动、稳定视觉具有潜在作用。

附录:

表 3 变截面柔性脊柱结构尺寸表

Tab.3 Structural parameters of the variable cross-section flexible spine

项目	变量	尺寸/mm
腰部直径	D_0	30
髋部直径	D_1	40
肩部直径	D_2	50
腰部长度	S_0	100
后段长度	S_1	40
前段长度	S_2	60
脊柱宽度	W	24

表 4 CPG 模型参数值

Tab.4 Parameters of the CPG model

参数	符号	取值
CPG 振荡周期	T	0.8 s
肩关节幅值	A_S	20°
髋关节幅值	A_H	12°
肘关节幅值	A_E	16°
左肩与基准的相位差	ϕ_{LS}	0
右肩与基准的相位差	ϕ_{RS}	$-\pi$
左髋与基准的相位差	ϕ_{LH}	$-5\pi/4$
右髋与基准的相位差	ϕ_{RH}	$-\pi/4$
肘关节与肩关节的相位差	ϕ_E	$\pi/2$

参考文献 (References)

- [1] Righetti L, Ijspeert A J. Design methodologies for central pattern generators: An application to crawling humanoids[C]//Proceedings of Robotics: Science and Systems II. Cambridge, USA: MIT Press, 2007: 191-198.
- [2] Narioka K, Hosoda K. Motor development of a pneumatic musculoskeletal infant robot[C]//IEEE International Conference of Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 963-968.
- [3] Kozima H, Yano H. A robot that learns to communicate with human caregivers[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Epigenetic Robotics. 2001: 47-52.
- [4] Sci-Tech, Associated Press. Neony, Japan's latest offering in robot baby series[EB/OL]. [2010-07-16]. <http://www.ndtv.com/article/sci-tech/m3-neony-japan-s-latest-offering-in-robot-baby-series-37776>.
- [5] 陈知泰. 柔顺机构的动力学研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
Chen Z T. Study on the dynamics of compliant mechanisms[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [6] Ananthasuresh G K, Kota S. Designing compliant mechanisms [J]. Mechanical Engineering, 1995, 117(11): 93-96.
- [7] Guizzo E. Boston dynamics building fast-running robot cheetah, new agile humanoid[EB/OL]. [2011-02-28]. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/boston-dynamics-building-fast-running-robot-cheetah-new-agile-humanoid>.

- [8] Park S H, Lee Y J. Turning gait planning of a quadruped walking robot with an articulated spine[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. 2004: 1929-1933.
- [9] 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 Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 7192-7195.
- [10] Tsujita K, Miki K. Stability analysis on quadrupedal gaits according to body's flexibility using musculoskeletal robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1609-1614.
- [11] 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, USA: IEEE, 2011: 2793-2798.
- [12] 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, USA: IEEE, 2012: 2210-2215.
- [13] Adolph K E, Vereijken B, Denny M A. Learning to crawl[J]. Child Development, 1998, 69(5): 1299-1312.
- [14] Moore E Z, Campbell D, Grimminger F, et al. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'RHex'[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 2222-2227.
- [15] 罗庆生, 周晨阳, 贾燕, 等. 基于 CPG 的四足机器人抗侧向冲击的动态稳定性研究[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 384-390.
- Luo Q S, Zhou C Y, Jia Y, et al. CPG-based control scheme for quadruped robot to withstand the lateral impact[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(4): 384-390.
- [16] Xu L C, Zhang S W, Jiang N, et al. A hybrid force model to estimate the dynamics of curved legs in granular material[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 59: 59-70.
- [17] Liu C, Zhang X L, Li D D, et al. A flexible-waist quadruped robot imitating infant crawl[C]//2nd ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. Berlin, Germany: Springer, 2012: 455-463.
- [18] Tournier C, Aunoble S, Le Huec J C, et al. Total disc arthroplasty: Consequences for sagittal balance and lumbar spine movement[J]. European Spine Journal, 2007, 16(3): 411-421.
- [19] Lee D V, Bertram J E A, Todhunter R J. Acceleration and balance in trotting dogs[J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(24): 3565-3573.
- [20] Gray J. Studies in the mechanics of the tetrapod skeleton[J]. Journal of Experimental Biology, 1944, 20(2): 88-116.
- [21] 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 Y Q, trans. Beijing: Higher Education Press, 2007.

作者简介:

张秀丽 (1975-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 仿生机器人.

梁艳 (1988-), 女, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人, 知识产权技术.