

仿生四足机器人设计及运动学足端受力分析

常同立, 刘学哲, 顾昕岑, 郭志鹏

(东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 仿生四足机器人腿部结构与生物腿部实际结构存在差异, 足端与地面的刚性接触力对于控制其运动平稳和收敛会产生不利影响。为解决上述问题, 分析德国牧羊犬骨骼结构, 通过图像处理和分析手段获取牧羊犬对角小跑步态运动中四肢各关节的运动规律, 设计一款四足机器人。该机器人足端具有转化足端与地面刚性接触为柔性接触的机构。根据正运动学和逆运动学理论分析模型足端工作空间。将仿真获得的受力曲线与实际受力曲线进行对比, 结果表明, 运动控制函数和柔性机构更有助于四足机器人的运动平稳。

关键词: 四足机器人; 轨迹; 变化规律; 机械结构; 摆动角度

中文引用格式: 常同立, 刘学哲, 顾昕岑, 等. 仿生四足机器人设计及运动学足端受力分析[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 292-297.

英文引用格式: Chang Tongli, Liu Xuezhe, Gu Xincen, et al. Design of Bionic Quadruped Robot and Stress Analysis for Foot End with Kinematics[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 292-297.

Design of Bionic Quadruped Robot and Stress Analysis for Foot End with Kinematics

CHANG Tongli, LIU Xuezhe, GU Xincen, GUO Zhipeng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

[Abstract] The design structure on leg of bionic quadruped robot leg is different from the actual structure of the biological leg, and the rigid contact force between foot and ground has an adverse effect on the control of motion stability and convergence. To solve the problems above, after analyzing the bone structure of the German shepherd and through image processing and analysis, the movement law of each joint of limbs during diagonal trot is obtained, and a quadruped robot is designed. The foot end of the robot has a mechanism to converse the contact between the foot and ground from rigid to flexible. According to the theory of forward kinematics and inverse kinematics, the foot end workspace of the model is analyzed. The force curve gotten by simulation is compared with the actual force curve, and the result shows that the function of motion control can achieve smooth motion, and the existence of the flexible mechanism design is more helpful on stability of quadruped robot motion.

[Key words] quadruped robot; trajectory; change rule; mechanical structure; pendulum angle

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.04.050

0 概述

四足机器人 Bigdog 是一款液压驱动, 能灵活且平稳完成复杂地面运动的经典代表^[1-3], 自其问世以来四足机器人方向科学研究持续得到很高关注度^[4-6]。

在四足机器人机械结构设计与动力学分析方面, 存在一些问题, 例如: 1) 较多采用了与 Bigdog 类似的前后腿结构相同, 膝肘对顶的结构类型^[7-9], 这种机器人设计结构与四足动物的生物体骨骼进化结

果并不一致; 2) 在四足机器人步态研究方面, 较普遍的方式是首先设计足端轨迹, 进而逆向推导肢体各个关节的转角变化规律, 从而实现步态控制^[10-12]; 但从研究结果看, 所得到的四足机器人步态, 不及生物体步态自然流畅。本文按照仿生学原理, 仿生牧羊犬自然进化得到的腿部骨骼结构, 进行四足机器人模型设计和运动学分析。按照牧羊犬腿部和足端运动规律进行模型运动控制函数编写, 并在 ADAMS 中进行动力学分析。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL09CA03); 黑龙江省自然科学基金(C201030)。

作者简介: 常同立(1968—), 男, 副教授、博士, 主研方向为机器人研究; 刘学哲、顾昕岑、郭志鹏, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-07-04 **修回日期:** 2016-08-31 **E-mail:** changtl_nefu@126.com

1 仿生学研究

1.1 仿生学研究对象

德国牧羊犬,体重 43.8 kg,其骨骼结构如图 1 所示。

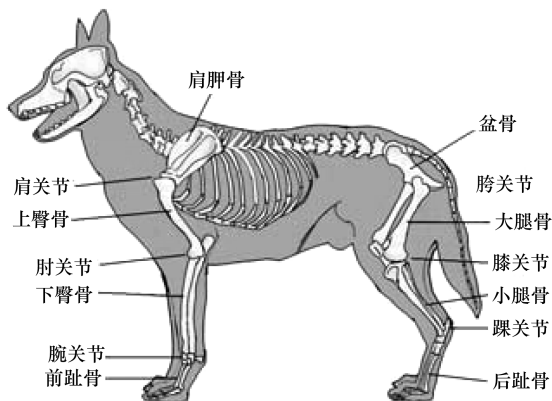


图 1 德国牧羊犬骨骼结构

采用直线尺实际测量牧羊犬主要骨骼尺寸,见表 1。

表 1 主要几何尺寸测量

测量项目	数据/cm	说明
前足跖骨(含前腕骨)至腕关节转轴长度	8.5	
腕关节转轴至肘关节转轴长度	31.5	
肘关节转轴至肩关节转轴长度	21.0	
肩关节转轴长度至脊柱转轴长度	24.0	需在身体纵向铅锤面内投影
后足跖骨(含前腕骨)至踝关节转轴长度	16.0	
踝关节转轴至膝关节转轴长度	28.0	
膝关节转轴至胯关节转轴长度	21.0	
胯关节转轴至脊柱转轴长度	20.0	需在身体纵向铅锤面内投影

1.2 生物体步态分析

通过对牧羊犬运动过程中骨骼活动规律的分析,研究各个骨块活动对步态的影响规律。为了便于跟踪分析牧羊犬跑动过程中其骨骼运动变化规律,对胸椎、肩关节、肘关节、腕关节、前趾骨、盆骨、胯关节、膝关节、踝关节、后趾骨等处标记荧光定点。采用德国 PCO 公司生产的 PCO. dimaxHD 高速高清摄像机对其跑动过程进行跟踪摄像,并采用 Kistler 测力系统测得四足足端受力曲线。

选取清晰展现牧羊犬对角小步跑(trot 步态)完整过程的视频片段。采用图像处理软件包 HALCON 对牧羊犬的 trot 步态视频进行处理,通过分析牧羊犬身上荧光标记点的运动规律。获知哪些骨块对牧羊犬 trot 步态影响较大,进而通过骨骼活动规律分析获得一个运动周期内,各个主要关节的转动规律。例如左后腿各个关节转动规律如图 2 所示。

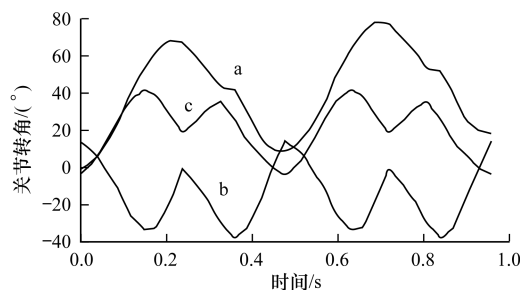


图 2 左后腿各关节运动规律

图 3 则对左后腿膝关节与右前腿肩关节的变化规律进行了对比。

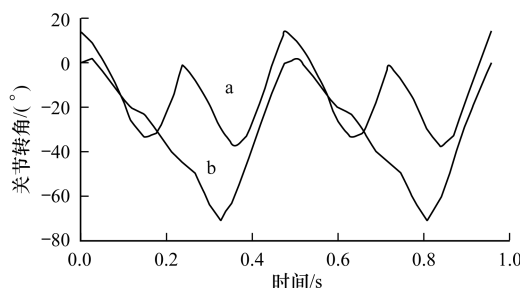


图 3 左后腿膝关节与右前腿肩关节变化

1.3 生物体骨骼分析

牧羊犬 trot 运动过程中,全身的骨骼都在不同程度发生相对运动。相比较,前肢及相关区域的肩胛骨、上臂骨、下臂骨运动范围较大,后肢及相关区域的大腿骨、小腿骨和后趾骨的运动范围较大。脊柱与盆骨构成了相对固定的支撑框架。足及足部各关节主要起到柔性接触与缓冲作用。

2 直行四足机器人结构设计

2.1 研究对象

研究主要目的是探索一种基于仿生学和逆动力学仿真的机器人机械系统设计方法。突出主题,清晰表述设计方法实施与验证过程,仅需要直线行走的四足机器人设计案例,略去 4 条腿侧向摆动自由度。步态方面则以 trot 步态为例。

2.2 机械机构设计

与机械机构相比,牧羊犬骨骼结构是一副完美的机构。动物骨块具有较大的刚度。骨块之间多可以发生或多或少的相对运动,因此骨架结构是刚柔相济的超多自由度机构。与之相对比,仿牧羊犬设计的四足机器人却只能采用相对很少的多自由度机械机构。

参考牧羊犬的骨骼结构,设计多刚体系统的四足机器人的机械结构。为了进一步降低机器人机械机构的复杂程度,减少运动机构的自由度,将头、颈、脊柱、盆骨和尾骨看作一个刚体。

牧羊犬在 trot 步态中,肩胛骨摆动范围达到 32°,且肩胛骨骨块较长,它在牧羊犬行走步态中发挥较大作用,因此,在四足机器人脊柱与肩胛骨之间设计主动转动自由度。肩关节和肘关节处也设计主

转动自由度,转动范围分别是 29° 和 57° 。前跖骨较短,在前足与地面接触过程中,前跖骨相对与下臂骨之间转动幅度相对较小,因此,将前跖骨、前腕骨与下臂骨设计为一个刚体构件,减少一个运动关节。

四足机器人后腿主动自由度分别设计在胯关节、膝关节和踝关节处。它们的运动范围分别是 78° , 62° 和 63° 。仿生设计四足机器人机械结构如图 4 所示。

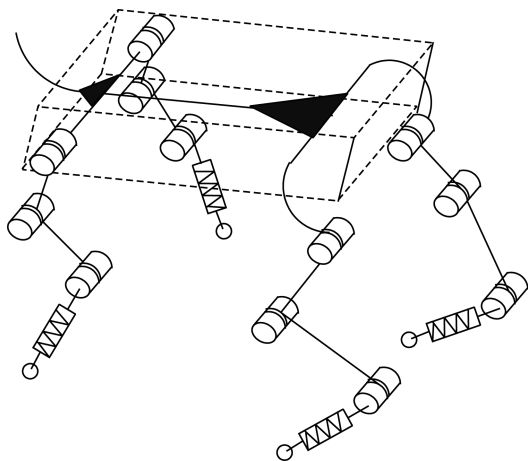


图 4 四足机器人机械结构

主要结构参数见表 1。显然上述仿生学设计不只是对动物体骨骼的模仿。另一方面,上述仿生设计四足机器人的机械机构也不同于 Bigdog。

2.3 缓冲机构设计

在牧羊犬骨架结构中,既存在能够完成微小幅度缓冲的关节间软组织结构和脚底肉垫,也存在能够完成大幅度缓冲的足掌结构。不仅如此,相对被动缓冲作用,足掌是主动缓冲结构。为了提高所设计四足机器人的运动平顺性,同时不至于造成其机械结构和运动控制过于复杂,在四足机器人的腿部末端设计了被动柔顺结构。即将牧羊犬的足部简化为单自由度被动缓冲机构,它是直线运动的弹簧阻尼机构。经查阅文献[13-15]和大量仿真实验,取前腿刚度参数为 1.2×10^4 N/m,粘性阻尼参数为 300 Ns/m。后腿刚度参数为 2.3×10^5 N/m,粘性阻尼参数为 2 000 Ns/m。

3 动力学分析与 ADMS 仿真

3.1 正运动学分析

所谓正运动学分析是指已知各个关节长度、变化角度等基本参数来计算躯体和左前肢的位置姿态。本文研究在进行运动学正解分析前用 D-H 建模法,为各个杆件建立了坐标系,并用变换矩阵完成了各个坐标系之间的坐标转换运算,从而建立起运动学方程。但根据杆坐标系固定位置不同,可以将变换矩阵划分成 2 种形式:第 1 种是杆坐标系固定在每个杆的上关节处,称之为“第 1 种 A 矩阵方法”;第 2 种是把杆件 j 的坐标系原点定在 $j-1$ 号杆的结合点处,坐标原点定在 j 号杆件上,这种方法称之为

“第 2 种 A 矩阵方法”。根据本文研究的实际情况,第 1 种 A 矩阵方法适用于牧羊犬左前肢着地状态下的运动学分析,第 2 种 A 矩阵方法适用于牧羊犬左前肢腾空状态下的运动学分析。将着地阶段和腾空阶段分开来进行运动学分析虽然看似过程繁琐,但在计算量和计算方法上更容易做到,而且分析效果与实际情况贴近。

以着地阶段运动学正解为例:将着地阶段模型各个杆件建立坐标系如图 5 所示。

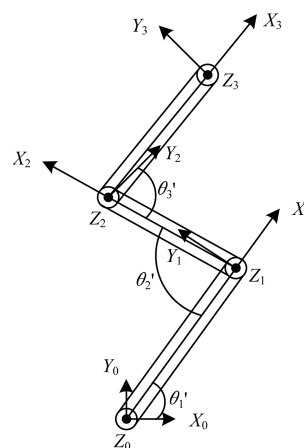


图 5 左前肢着地阶段模型坐标系划分

$O_0x_0y_0z_0$ 固定在杆件 0 的上关节 1 处,原点所在的直线与关节 1 的轴线重合。同理分别将坐标系 $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$ 固定在杆件 1、杆件 2 和杆件 3 上。如图 2 所示所有关节处在同一个平面内,显而易见, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$; 因为所有坐标系的原点在同一平面内,所以 $d_1 = d_2 = d_3 = 0$ 。

因此,将标系 $\{1\}$ 向坐标系 $\{0\}$ 转化其实就是先将坐标系 $\{0\}$ 绕 z_0 轴旋转 θ_1 角度,然后再向 x_1 轴方向将坐标系 $\{0\}$ 移动杆件 0, l_0 的长度。同理可以进行其他坐标系之间转化。这样得到左前腿 D-H 参数如表 2 所示。

表 2 类牧羊犬四足机器人左前腿着地阶段 D-H 参数

杆件编号	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / mm	a_i / mm	$\alpha_i / (^\circ)$
1	θ_1'	0	l_1	0
2	θ_2'	0	l_2	0
3	θ_3'	0	l_3	0

可以得到矩阵 0T_1 , 1T_2 和 2T_3 :

$${}^0T_1 = \text{Rot}(z, \theta_1') \text{Tran}(0, 0, 0) \text{Tran}(l_1, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, 0^\circ) \quad (1)$$

$${}^1T_2 = \text{Rot}(z, \theta_2') \text{Tran}(0, 0, 0) \text{Tran}(l_2, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, 0^\circ) \quad (2)$$

$${}^2T_3 = \text{Rot}(z, \theta_3') \text{Tran}(0, 0, 0) \text{Tran}(l_3, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, 0^\circ) \quad (3)$$

其中,矩阵 $\text{Rot}(z, \theta_i)$ 表示绕坐标轴 z 轴旋转 θ_i 角度;矩阵 $\text{Rot}(x, \theta_i)$ 含义相同;矩阵 $\text{Trans}(d_x, d_y, d_z)$ 表示对坐标系在不同坐标轴方向上进行定量平移。

$$\text{Rot}(z, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Rot}(x, \theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{Tran}(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(4)~式(6)带入式(1)~式(3)根据表2中的参数变量,整理后可以得到:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & c_1 \times l_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 \times s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & c_2 \times l_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 \times s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & c_3 \times l_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3 \times s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, s_i 和 c_i 分别为 $\sin\theta_i$ 和 $\cos\theta_i$, 则第一关节(腕关节)运动学正解为矩阵 T_1 和向量 P_1 :

$$T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & c_1 \times l_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 \times s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} c_1 \times l_1 \\ l_1 \times s_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

第二关节(膝关节)运动学正解矩阵 T_2 和向量 P_2 :

$$T_2 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & 0 & n_3 \\ n_4 & n_5 & 0 & n_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} n_3 \\ n_6 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $n_1 = c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2$; $n_2 = -c_1 \times s_2 - c_2 \times s_1$; $n_3 = c_1 \times l_1 + c_1 \times c_2 \times l_2 - l_2 \times s_1 \times s_2$; $n_4 = c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1$; n_5

$= c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2$; $n_6 = l_1 \times s_1 + c_1 \times l_2 \times s_2 + c_2 \times l_2 \times s_1$ 。

第三关节(肩关节)运动学正解为矩阵 T_3 和向量 P_3 :

$$T_3 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 = \begin{bmatrix} n_7 & n_8 & 0 & n_9 \\ n_{10} & n_{11} & 0 & n_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} n_9 \\ n_{12} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $n_7 = c_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2) - s_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1)$; $n_8 = -c_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1) - s_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2)$; $n_9 = c_1 \times l_1 - l_3 \times s_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1) + c_1 \times c_2 \times l_2 - l_2 \times s_1 \times s_2 + c_3 \times l_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2)$; $n_{10} = c_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1) + s_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2)$; $n_{11} = c_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2) - s_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1)$; $n_{12} = l_1 \times s_1 + l_3 \times s_3 \times (c_1 \times c_2 - s_1 \times s_2) + c_1 \times l_2 \times s_2 + c_2 \times l_2 \times s_1 + c_3 \times l_3 \times (c_1 \times s_2 + c_2 \times s_1)$; $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0$ 。

腾空阶段运动学正解与着地阶段运动学正解类似,但差别在于将建立 D-H 坐标系时按照从上而下的顺序,这样一来按照上述方法即可得到腾空阶段正运动学分析结果。

通过正运动学分析可知,设计模型尺寸合理,其足端能够达到预期运动范围要求。

3.2 逆运动学分析

逆运动学分析过程与正运动学分析过程相反,所谓逆运动学是指,给定足端所能达到的某一位置,推导出关节摆动角度。如果逆运动学推导出的关节角度与仿生的牧羊犬同一关节摆动范围类似,那么可以认为所建立的模型合理。

由于前文已经得到了运动学求解方程和各个关节之间的转化矩阵,因此此过程中只需求解 T 的逆解,带入公式计算,并与已知条件一一对应,递推求解便可。但值得注意的是,也应该将着地阶段和落地阶段分开来分析,其目的意义类似也是为了更能贴合实际情况。由于篇幅原因,在此也不做详细阐述。经运动学逆解分析可知,上述模型设计合理,并按照逆解过程设计出在 ADAMS 中使用的 STEP 控制函数。

3.3 ADAMS 仿真模型

步行机器人行走过程是非常复杂的,不仅包含构件的运动,也包括机构类型的变化。直接对四足机器人开展建模与模型求解工作都是困难的,而 ADAMS 动力学仿真软件提供了较为便利的动力学建模与仿真分析环境,成为一种实用方法。

依据四足机器人机械结构设计,采用 SolidWorks 建立三维立体模型,导入到 ADAMS 软件中,建立四足机器人动力学仿真模型的机械机构基本机件,如图6所示。在 ADAMS 软件环境中设置各个关节的运动

约束。合理配置零件模型质心、质量、惯量等动力学参数。完成足端与地面之间的接触约束设置,完成足端缓冲装置约束施加与参数设置等。

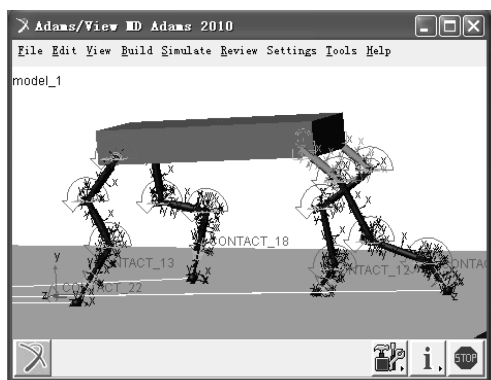


图 6 ADAMS 仿真模型

3.4 动力学仿真

采用 step 函数描述仿生学分析得到的各个关节运动规律,通过 ADAMS 软件的运动约束控件,将其施加在相应关节部位,参见图 6。

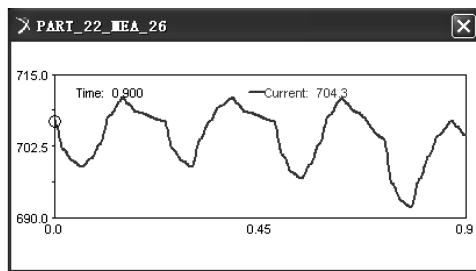
运行仿真模型,可以动态观看四足机器人进行 trot 步态动画过程。限于篇幅,这里不便展示。仿真过程中输出的步态动画与实际牧羊犬视频采集图像一致,验证了采用仿生运动学分析方法规划四足机器人关节运动方法的可行性。

3.5 仿真结果分析

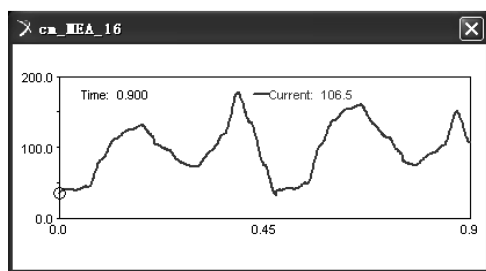
考虑到仿真过程中第一个周期为启动周期,由于惯性作用可能会出现一些偏离真值而导致的发散

现象,因此,在使用 ADAMS 进行仿真时模拟了 2 个 trot 周期。其机械机构内部动力学参数可以通过软件实时在线输出,这样可以进行整体或局部分析。

例如,仿真过程中躯体重心出铅垂方向位移变化如图 7(a)所示。左前足端轨迹曲线如图 7(b)所示。



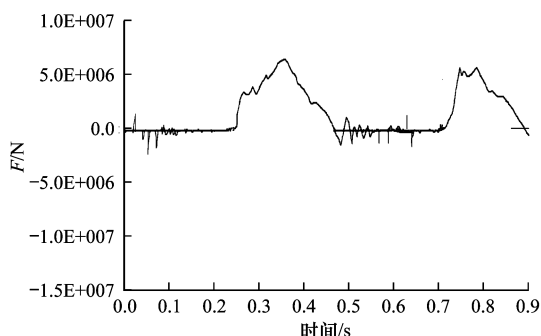
(a) 躯体重心铅垂方向位移



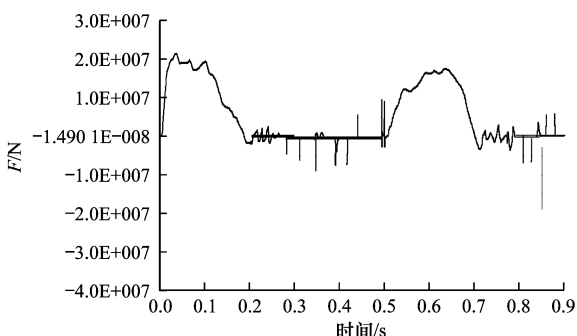
(b) 左前足端轨迹曲线

图 7 机体姿态图

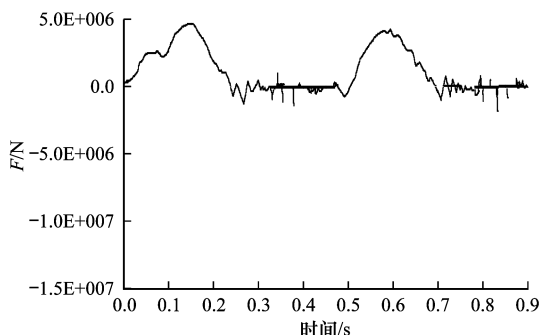
图 7(a)体现出四足机器人行走过程中,躯体在铅垂方向上小幅度波动,符合足类机器人运动特点。以左前足为例,其足端轨迹符合图像分析规律。足端缓冲弹簧的受力曲线如图 8 所示。



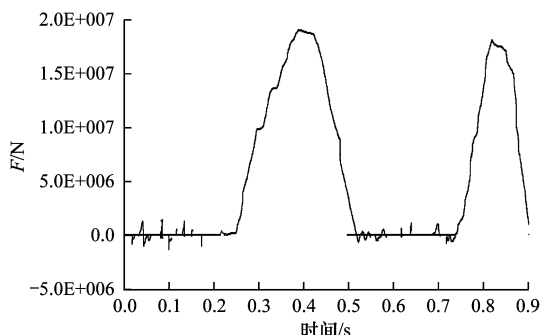
(a) 右前腿弹簧受力曲线



(b) 右后腿弹簧受力曲线



(c) 左前腿弹簧受力曲线



(d) 左后腿弹簧受力曲线

图 8 足端弹簧受力曲线

图8中曲线正向数值表达的地面对足端反作用力。从曲线图看,2个trot周期的作用力幅值合理,四足间作用力相位关系符合trot步态特征。验证了通过给定四足机器人关节运动规划,研究四足机器人动力学系统的方法可行性,为后续生产实际样机提供有力参考。

以右前腿为例,用Kistler测力系统测得牧羊犬右前腿在trot步态行走过程中足端受力曲线如图9所示。

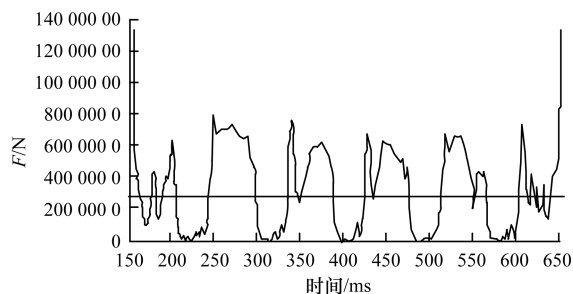


图9 牧羊犬右前腿足端受力曲线

图9中,0 s~0.2 s为牧羊犬trot起步阶段,步态不完整,造成足端受力曲线不具有规律性,因此,参考价值不大,同图8(a)开始阶段类似。图9从0.2 s开始牧羊犬trot步态逐渐稳定,本文取0.25 s~0.52 s范围作参考。图9中0.25 s~0.3 s,0.34 s~0.39 s,0.43 s~0.48 s为着地,即离地过程,腿部接触地面瞬间由于刚性冲击受力出现尖顶,但整个过程受力曲线成抛物线趋势,且着地过程占空系数都在0.5左右。由于设计模型过程中增加了足端缓冲机构,因此在图8(a)中,接触地面瞬间的冲击过程被有效控制,在0.24 s~0.48 s和0.72 s~0.9 s过程中与图9相比的受力尖顶降低为局部细小震动,且受力也大致成抛物线形状。图9中0.3 s~0.34 s,0.39 s~0.43 s,0.48 s~0.52 s为离地-着地过程,足端悬空,在理论上受力为0,但由于测力系统末端固定在牧羊犬腿部,在摆动过程中会有震动、惯性以及腿部肌肉发力等因素的干扰,导致受力曲线出现小范围波动情况。这种情况同样在图8(a)中0.48 s~0.72 s范围内存在,这些系统内部力可作为零部件强度校核参考,对运动影响很小,可忽略。2条曲线在运动周期和受力的极值上存在差异,但考虑到生物测试过程中存在一定误差,而且拉长周期有利于运动过程分析和消除部分惯性冲击影响,因此,认为仿真得到的曲线具有合理。综上所述,认为模型进行的ADAMS仿真较为合理。

3.6 机器人设计方法

机构动力学仿真输出参数(如足端受力)可以为机器人机械零件设计和运动控制系统设计提供了支撑。

基于仿生学的四足机器人机械机构和步态设计,与在其上开展的逆动力学仿真研究,以及后续可以开展的机械零件设计等构成了一种机器人机构设计方法。

4 结束语

针对四足机器人腿部结构多为膝肘对顶式等类型,以及足端与地面刚性接触产生冲击对平衡控制产生不利影响的现象,本文运用仿生学原理,设计一款四足机器人,并在其腿部末端引入了具有缓冲作用的被动自由度。通过仿生学手段进行模型设计、理论分析后,在ADAMS软件中对模型进行了运动学仿真。将仿真结果与实际测量结果的图像进行对比分析,结果表明,该设计能够在虚拟样机环境下行走,且有效将足端与地面的刚性接触转化为柔性接触。今后将研究成果转化为实体样机,争取设计出一款现实环境中稳定行走的四足机器人。

参考文献

- [1] Semini C, Nikos G T, Emanuele G, et al. Design of HyQ—A Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(5): 831-849.
- [2] Thiago B C, Claudio S, Emanuele G, et al. Gain Scheduling Control for the Hydraulic Actuation of the HyQ Robot[C]//Proceedings of ABCM Symposium Series in Mechatronics of Congress of Mechanical Engineering. Gramado, Spain; [s. n.], 2009: 673-682.
- [3] Bhatti J, Plummer A R. Hydraulic Running Robots: The Prospects for Fluid Power in Agile Locomotion [C]//Proceedings of the 12th Scandinavian International Conference on Fluid Power. Tampere, Finland; [s. n.], 2011: 1-17.
- [4] 李满天,蒋振宇,郭伟,等. 四足仿生机器人单腿系统[J]. 机器人, 2014, 36(1): 21-28.
- [5] Bruno S, Oussama K. Springer Handbook of Robot[M]. Berlin: Germany, Springer-Verlag, 2008.
- [6] Rong Xuewen, Li, Yibin, Ruan Jinhong, et al. Design and Simulation for a Hydraulic Actuated Quadruped Robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4): 1171-1177.
- [7] 胡胜心,王浩,戴振东. 机电液一体化仿真在腿式液压机器人设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2015(1): 152-156.
- [8] 赵晓东. 基于步态的骨架识别技术的研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [9] 于靖军,郝广波,陈贵敏,等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 53-68.
- [10] 徐凯宏,刘喜玲,刘振生,等. 基于识别技术的岩羊步态分析[J]. 经济动物学报, 2011, 15(4): 193-197.
- [11] 田兴华,高峰,陈先宝,等. 四足仿生机器人混联腿构型设计及比较[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 81-88.
- [12] 冯李航,张为公,龚宗洋,等. Delta系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人, 2014, 39(3): 375-384.
- [13] 毛伟伟,周烽,梁青,等. 基于自抗扰控制的机器人小腿减振研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(7): 293-298.
- [14] 袁春元,周孔亢,吴琳琪,等. 车用空气弹簧有限元分析方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 262-266.
- [15] 张冰蔚,王笛. 双筒减震器数学模型的建立与仿真测试[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, 23(3): 225-229.

编辑 刘冰