

doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S1.023

基于力控制模式的四足仿生机器人的动力学仿真

陈培华¹ 曹其新¹ 马宏绪²

(¹ 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

(² 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 针对四足仿生机器人, 研究了基于力控制模式下的四足仿生机器人的动力学仿真实现方法。首先利用虚拟现实建模语言对四足仿生机器人进行仿真模型的建立和有关参数的定义;然后对四足仿生机器人按照空间向量代数建立运动学方程;接着, 采用迭代牛顿-欧拉算法对四足仿生机器人进行逆动力学分析, 以求得在力控制模式下的动力学仿真所需的各关节驱动扭矩, 并建立了基于机器人中间件的动力学仿真系统。最后, 通过四足仿生机器人在对角小跑步态下的动力学仿真实验, 验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 力控制模式; 四足仿生机器人; 逆动力学; 动力学仿真

中图分类号: U459.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-0505(2013)增刊(I)-0107-05

Dynamics simulation of quadruped bionic robot based on force control

Chen Peihua¹ Cao Qixin¹ Ma Hongxu²

(¹ School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(² College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The realization method of the quadruped bionic robot dynamics simulation based on the force control mode is studied for the quadruped bionic robot. First, virtual reality modeling language (VRML) is used to build the quadruped bionic robot simulation model, and the relevant parameters of the robot are defined. Then the kinematics equations of the quadruped bionic robot are obtained according to the space vector algebra. Recursive Newton-Euler algorithm (RNEA) is used to analyze the inverse dynamics of the robot, in order to achieve the required driving torques of the robot for the dynamics simulation in the force control mode, and the dynamics simulation system based on robot middleware is realized. Finally, through the dynamics simulation experiment of the quadruped bionic robot in trotting gait, the dynamics simulation system based on force control is verified to be effective and practical.

Key words: force control mode; quadruped bionic robot; inverse dynamics; dynamics simulation

近年来, 高动态性、高适应性、高负载能力的四足仿生机器人技术是仿生机器人的研究热点与前沿方向之一^[1,2]。随着计算机技术的不断提高, 四足机器人技术有了很大的发展, 国内外许多研究单位和学者研究开发了原理样机和实验模型, 其中以 BigDog^[3]为代表的四足仿生机器人因其强大的运动性能和环境适应能力而在机器人学术界引起轰动。我国也于2011年开始了“高性能四足仿生机器

人”的研究, 旨在开发拥有自主知识产权的高性能四足仿生机器人, 但是距离其走出实验室达到实用程度还有很长的路要走。

四足仿生机器人的动力学仿真四是四足机器人研究领域的一个非常重要的课题。在四足机器人的研发过程中, 利用仿真技术可以在近乎物理世界的层面上, 帮助研究人员及时地改进机构设计, 进行算法验证, 简化并加快了开发进程。美国的

收稿日期: 2013-05-16。作者简介: 陈培华(1985—), 男, 博士生; 曹其新(联系人), 男, 博士, 教授, 博士生导师, qxcao@sjtu.edu.cn。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA040801, 2012AA041401)。

引文格式: 陈培华, 曹其新, 马宏绪. 基于力控制模式的四足仿生机器人的动力学仿真 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(S1): 107-111.

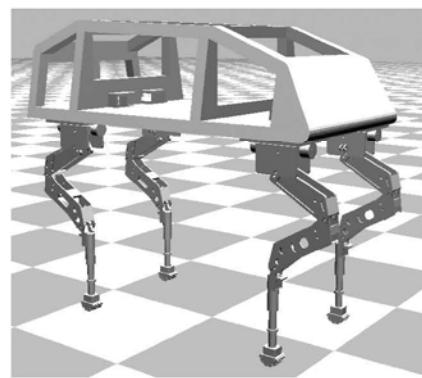
[doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S1.023]

Boston Dynamics 公司开发的 BigDog 的动力学仿真软件, 在测试实际机器人之前, 用于测试和开发四足机器人在斜坡和复杂地形情况下的步行算法^[1], 但未公开动力学仿真系统的实现方法; 美国 Stanford 大学研制的 KOLT 四足机器人利用动力学仿真平台 DynaMechs 进行建模和仿真^[2], Dynamechs 是一个实时动态和流体力学仿真系统; 日本的 Kimura 等^[3]对四足机器人 Tekken 利用商业软件 Webots^[4]进行动力学仿真研究, 利用生物反射建模适应位置环境, 已实现多种路面行走的复杂运动功能。目前国内对四足机器人的动力学仿真研究主要是利用基于 ADAMS 的动力学分析方法^[6-7], 其建模复杂、灵活性不高且不适应多种运动控制算法的验证。在此, 作者在之前工作的基础上^[8], 采用 VRML (virtual reality modeling language) 2.0 格式建立四足仿生机器人的仿真模型, 利用迭代牛顿-欧拉算法 (recursive Newton-Euler algorithm, RNEA)^[9] 实现四足机器人的逆动力学计算以获得机器人各关节的驱动力矩, 从而实现四足机器人的力控制模式下的动力学仿真。最后通过四足仿生机器人的动力学仿真和结果分析, 验证了本文提出的基于力控制模式下的四足仿生机器人的动力学仿真的有效性和实用性。

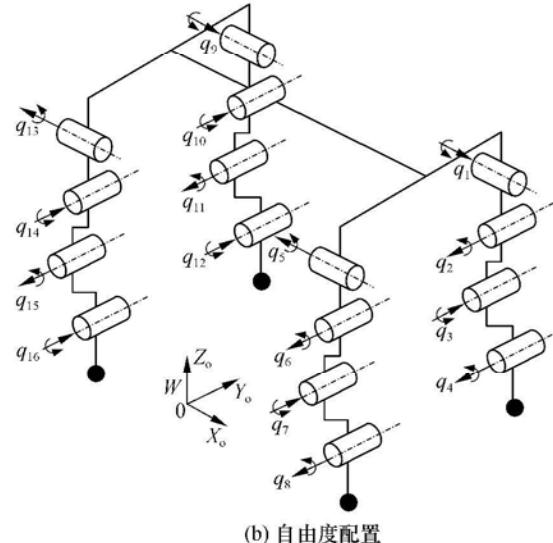
1 四足仿生机器人的仿真模型和参数

对于如图 1 所示的关节型四足仿生机器人, 本文采用文献 [8] 中提出的模型简化和装配方法, 生成了四足仿生机器人的 VRML 模型, 并导入到三维虚拟环境中。四足仿生机器人的每条腿包含 4 个自由度 (DoF, degree of freedom), 分别为髋部设计 1 个侧摆自由度和 1 个前摆自由度, 膝部设计 1 个前摆自由度, 踝部设计 1 个前摆自由度。本文分别用 LF, RF, LH 和 RH 代表四足仿生机器人的左前腿、右前腿、左后腿和右后腿, 每个关节角的编号用 q_i ($i = 1, 2, \dots, 16$) 表示, 分别表示 LF, RF, LH, RH 中各 4 个共 16 个关节的当前角度值。

机器人的运动学和动力学参数配置情况见表 1。就机器人的计算机仿真而言, 本文规定机器人中的每个连杆包含一个关节 (除身体外), 每个连杆具有速度、角速度、质量、质心、惯性张量等属性或参数, 而每个关节则具有关节角度、角速度、角加速度、位姿、关节轴等参数。



(a) 机器人



(b) 自由度配置

图 1 四足仿生机器人模型和自由度配置

表 1 四足机器人的参数定义

参数	意义
q	关节角
\dot{q}	关节角速度
\ddot{q}	关节角加速度
a	关节轴矢量 (相对母连杆)
b	相对位置 (相对母连杆)
p	关节在世界坐标系中的位置
R	关节在世界坐标系中的姿态
v	连杆在世界坐标系中的速度
ω	连杆在世界坐标系中的角速度
m	质量
c	连杆在世界坐标系中的质心位置
I	世界坐标系中的惯性张量

2 基于力控制模式的四足仿生机器人动力学仿真系统

基于力控制模式的四足仿生机器人动力学仿真系统, 主要依靠计算四足机器人各关节的驱动力矩来使机器人按照规定的轨迹运动。而计算机器人各关节力矩通常使用 PID 控制和逆动力学计算方法。本文采用了计算复杂度为 $O(n)$ 的迭代牛顿-欧拉算法, 实现了四足仿生机器人的快速力矩求解。

2.1 迭代牛顿-欧拉算法求力矩

根据牛顿-欧拉方程, 描述四足机器人中一个连杆 i 的动力学方程如下:

$$f_{\Sigma i} = m_i \ddot{c}_i \quad (1)$$

$$\tau_i^{(c)} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i I_i \omega_i \quad (2)$$

式中, $f_{\Sigma i}$ 为作用在质心上的合外力; $\tau_i^{(c)}$ 为绕质心的外力矩。

根据 $v_i = \dot{c}_i - \omega_i c_i$, 可得其微分后的结果为

$$\dot{v}_i = \ddot{c}_i - \dot{\omega}_i c_i - \omega_i \times \dot{c}_i$$

所以

$$f_{\Sigma i} = m_i (\dot{v}_i - c_i \times \dot{\omega}_i + \omega_i \times (v_i + \omega_i \times c_i)) \quad (3)$$

另外, 作用于质心上的合力 f 和 $\tau_i^{(c)}$ 产生的世界坐标系下的合力矩为

$$\tau_{\Sigma i} = \tau_i^{(c)} + cf = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i I_i \omega_i + mc \cdot (v_i - c_i \times \dot{\omega}_i + \omega_i (v_i + \omega_i \times c_i)) \quad (4)$$

将式(3)和式(4)整理成矩阵形式, 并用空间速度 \dot{X}_i (根据正运动学方程可求得) 来表示, 即

$$\begin{bmatrix} f_{\Sigma i} \\ \tau_{\Sigma i} \end{bmatrix} = I_i^S \dot{X}_i + \dot{X}_i \times I_i^S \dot{X}_i \quad (5)$$

式中, I_i^S 为 6×6 的对称阵, 称为空间惯性矩阵, 计算如下:

$$I_i^S = \begin{bmatrix} m_i E & m_i \hat{c}_i^T \\ m_i \hat{c}_i & m_i \hat{c}_i \hat{c}_i^T + I \end{bmatrix} \quad (6)$$

在四足机器人的连杆系统中, 作用于连杆 i 上的合力和合力矩可由下式表示:

$$\begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_i^E \\ \tau_i^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{i+1} \\ \tau_{i+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, f_i , τ_i 为连杆 i 上来自母连杆的力和力矩; f_i^E 和 τ_i^E 表示来自外界环境的作用力和力矩(如冲击力或重力等); f_{i+1} 和 τ_{i+1} 表示来自其子连杆的反作用力和力矩(如果存在子连杆)。将式(7)代入式(5)并整理, 可得到关于力和力矩的递归方程:

$$\begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} = I_i^S \dot{X}_i + \dot{X}_i \times I_i^S \dot{X}_i - \begin{bmatrix} f_i^E \\ \tau_i^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{i+1} \\ \tau_{i+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

如果连杆 i 为四足机器人某条腿的末端连杆, 那么计算 f_i , τ_i 时, 令 f_{i+1} 和 τ_{i+1} 等于零。当该连杆所在的腿为摆动腿时, 则 f_i^E 和 τ_i^E 仅指重力和重力矩(不考虑外部施加力的情况下); 反之, 当其所在的腿为支撑腿时, 则 f_i^E 和 τ_i^E 包括重力项和连杆与地面的接触力项。因此, 可以从足端连杆开始向身体端计算所有关节上的力和力矩, 而关节轴上的扭矩计算如下:

$$u_i = s_i^T [f_i \ \tau_i]^T \quad (9)$$

通过计算得出四足机器人各关节的驱动力, 就可实现对四足仿生机器人的快速和高精度的运动控制。

2.2 四足仿生机器人的动力学仿真系统

本文采用基于机器人中间件技术(robot technology middleware, RTM)^[10] 的模块化思路开发了四足仿生机器人的动力学仿真系统。系统框图如图2 所示, 每个模块的功能如下:

① 利用模型加载模块加载机器人模型和工作场景模型到系统仿真界面, 并将模型的运动学和动力学参数发送到动力学引擎模块, 将各模型的几何学信息发送到碰撞检测模块供碰撞检测使用。

② 虚拟传感模型根据系统仿真界面按照虚拟传感模型进行感知与理解。

③ 运动控制器采集虚拟传感信息进行决策控制。

④ 运动控制器和动力学引擎模块计算各执行机构的受力情况和各自的状态更新。

⑤ 在动力学引擎中的正动力学运算过程中, 实时调用碰撞检测模型来进行高效、快速的碰撞检测, 检测更新的距离信息。

⑥ 运动控制器模块将控制数据发送给动力学引擎模块。

⑦ 系统仿真界面获取动力学引擎计算的当前状态, 并实时地以 3D 图像进行显示。

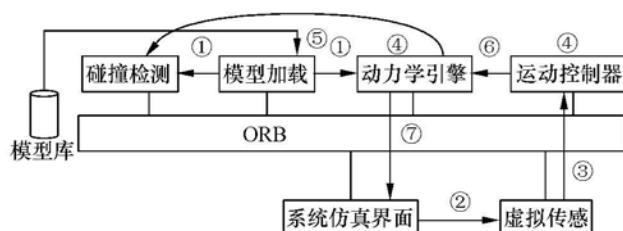


图 2 四足仿生机器人的动力学仿真系统框图

本文在运动控制器模块中集成了上述 RNEA 算法, 以求得四足仿生机器人在运动过程中实时的关节驱动力矩, 进而控制仿真系统中的四足机器人按规定轨迹运动。

3 四足仿生机器人的动力学仿真

本文以四足机器人的对角小跑步态(trot)为例来进行四足仿生机器人的动力学仿真研究。机器人初始位置为: $q_1 = q_5 = q_9 = q_{13} = 0$, $q_2 = q_6 = q_{10} = q_{14} = 1.0472$, $q_3 = q_7 = q_{11} = q_{15} = 2.0944$, $q_4 = q_8 = q_{12} = q_{16} = 1.0472$ 。步态频率为 1.5Hz, 小跑步态

LF, RF 和 RH, LH 相位相差 $\pi^{[1]}$ 。

假设足端的运动轨迹为椭圆,且 q_1 和 q_3 设定为不变角度,根据四足机器人的逆运动学规划出来的角度曲线(以 LF 和 RF 各两个关节为例)如图 3

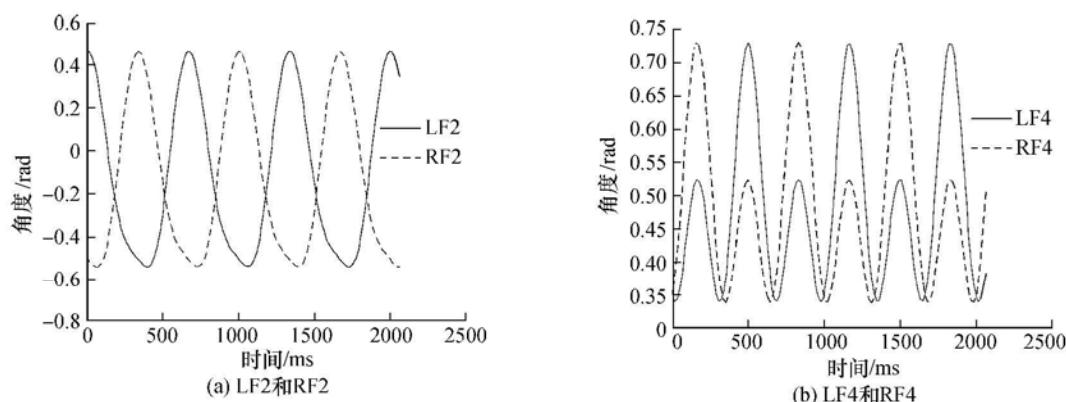


图 3 四足仿生机器人小跑步态的角度曲线

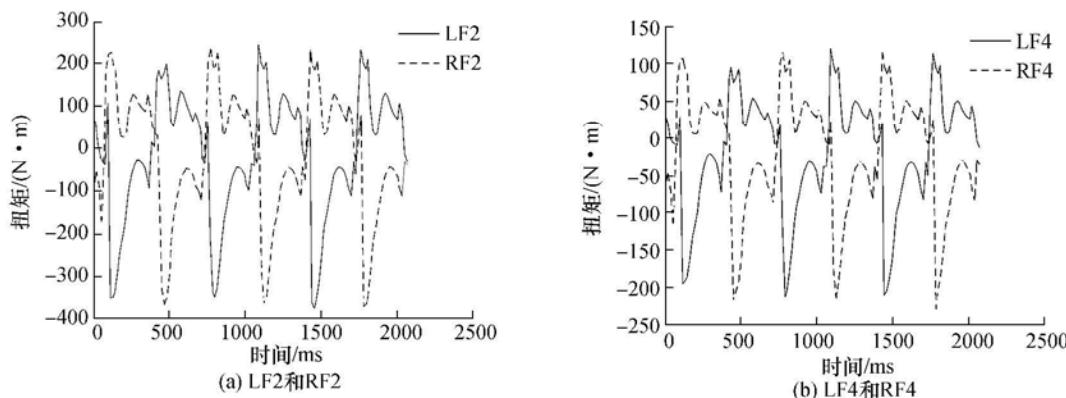


图 4 四足仿生机器人小跑步态的扭矩曲线

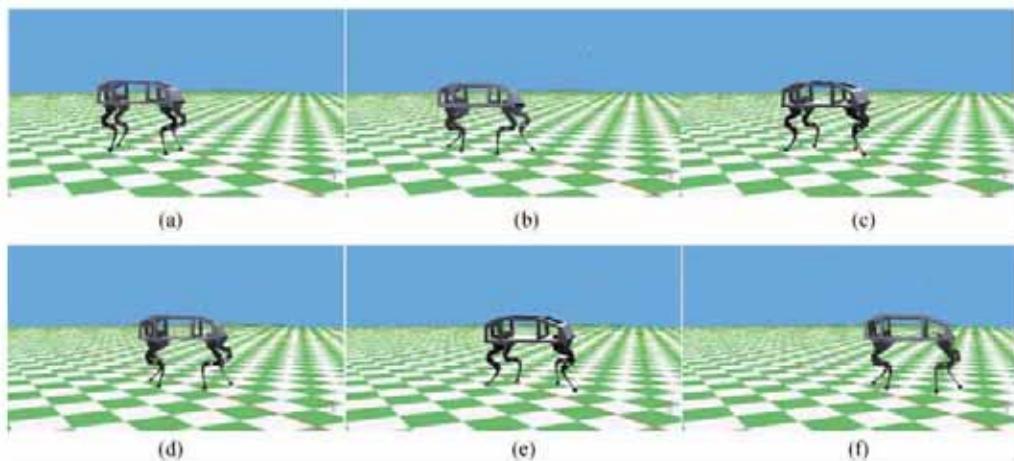
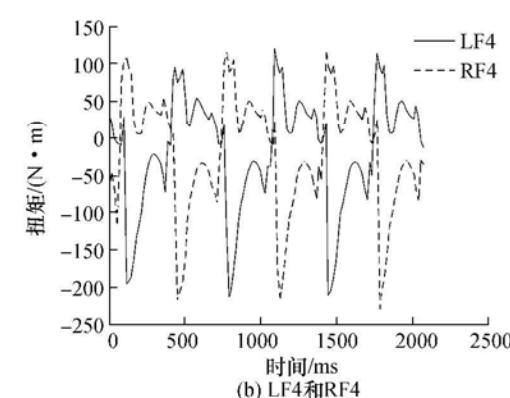
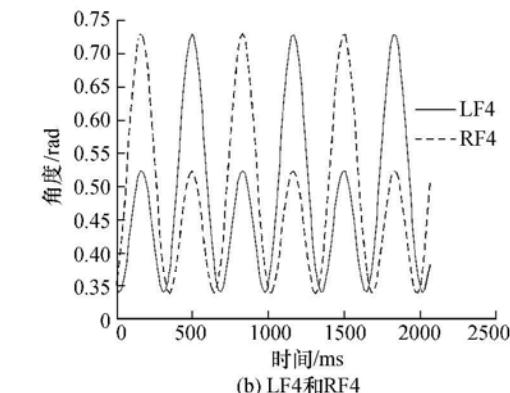


图 5 四足仿生机器人小跑步态的动力学仿真

4 结语

本文采用迭代牛顿-欧拉算法计算四足仿生机器人的逆动力学问题以实现机器人的力控制模式,并且将其应用在四足仿生机器人的动力学仿真中。

所示。根据 2.1 节中所提到的 RNEA 算法,可求得相应关节的驱动力矩如图 4 所示。将计算得到的关节扭矩通过动力学仿真系统作用于四足仿生机器人,其动力学仿真结果如图 5 所示。



四足仿生机器人的动力学仿真系统基于机器人中间件技术,利于开发和集成四足仿生机器人更多的功能模块,比如更多的步态规划算法和增加力/位置反馈的控制等模块。本文已将四足仿生机器人的力控制模式集成到模块化的四足仿生机器人的动

力学仿真系统中,并结合 trot 步态规划,对四足仿生机器人实现了力控制模式,达到了四足仿生机器人按照规定的步态和路径运动的目的。

参考文献 (References)

- [1] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot [C] //Proceedings of the 17th World Congress' The International Federation of Automation Control. Seoul, Korea, 2008: 10822-10825.
- [2] Semini C. HyQ—design and development of a hydraulically actuated quadruped robot [D]. Genoa, Italy: Italian Institute of Technology and University of Genoa 2010.
- [3] Palmer L R III, Orin D E. 3D control of a high-speed quadruped trot [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2006, 33(4): 298-302.
- [4] Maufroy C, Kimura H, Takase K. Integration of posture and rhythmic motion controls in quadrupedal dynamic walking using phase modulations based on leg loading/unloading [P]. Autonomous Robots, 2010, 28(3): 331-353.
- [5] Michel O. Webots TM: professional mobile robot simulation [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2004, 1(1): 39-42.
- [6] 张秀丽,曾翔宇,郑浩峻. 四足机器人高速动态行走中后腿拖地问题研究 [J]. 高技术通讯, 2011, 21(4): 404-410.
- Zhang Xiuli, Zeng Xiangyu, Zheng Haojun. Resolution of the hind leg dragging problem of a quadrupedal robot in high-speed dynamic walking [J]. High Technology Letters, 2011, 21(4): 404-410. (in Chinese)
- [7] 庄明,俞志伟,龚达平,等. 基于 ADAMS 的液压驱动四足机器人步态规划与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2012(7): 100-102.
- Zhuang Ming, Yu Zhiwei, Gong Daping, et al. Gait planning and simulation of quadruped robot with hydraulic drive based on ADAMS [J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(7): 100-102. (in Chinese)
- [8] Chen P, Cao Q, Lo C, et al. Robot virtual assembly based on collision detection in Java3D [C] //Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009, 5855: 270-277.
- [9] Featherstone R, Orin D. Robot dynamics: equations and algorithms [C] //Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA, USA, 2000: 826-834.
- [10] Ando N, Suehiro T, Kotoku T. A software platform for component based RT-system development: open-RTM-aist [C] //Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2008, 5235: 87-98.
- [11] Alexander R M N. Locomotion of animals [M]. Glasgow, UK: Blackie, 1982.