

8-20-2020

Gait Planning and Control of Quadruped Robot with High Payload

Hu Nan

1. Department of Automation, Key Laboratory of System Control and Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;;

Shaoyuan Li

1. Department of Automation, Key Laboratory of System Control and Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;;

Huang Dan

2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;;

Gao Feng

3. School of Mechanical Engineering, State Key Laboratory of mechanical system and vibration Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Gait Planning and Control of Quadruped Robot with High Payload

Abstract

Abstract: A position controller for a quadruped robot with high payload was proposed. The robot was developed by the lab, and the high payload capacity was realized by the specific design of its actuation system, integrating novel high precision actuators, and by its legs, composed by a new family of parallel mechanisms. The foot trajectory was scheduled based on the Bezier curve in order to improve the stability of quadruped robot. The performance and efficiency of the proposed methods were verified by simulation and experiments.

Keywords

quadruped robot, gait planning, even terrain, trajectory planning

Recommended Citation

Hu Nan, Li Shaoyuan, Huang Dan, Gao Feng. Gait Planning and Control of Quadruped Robot with High Payload[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 529-533.

高负载四足机器人的步态规划与控制

胡楠¹, 李少远¹, 黄丹², 高峰³(1.上海交通大学自动化系系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240; 2.上海交通大学航空航天学院, 上海 200240;
3.上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200210)

摘要: 针对高负荷的四足机器人设计了位置控制器, 实现了机器人在平坦地面上的稳定行走。使用的四足机器人为自主研发, 该机器人设计有特殊的驱动系统和创新性的并联式腿结构, 实现了机器人的高负载能力。利用 Bezier 曲线为机器人设计了足尖运动轨迹, 提高了机器人的稳定性。仿真结果和实验验证了所设计控制器的有效性。

关键词: 四足机器人; 步态规划; 平坦地面; 轨迹规划

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 03-0529-05

Gait Planning and Control of Quadruped Robot with High Payload

Hu Nan¹, Li Shaoyuan¹, Huang Dan², Gao Feng³(1. Department of Automation, Key Laboratory of System Control and Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
3. School of Mechanical Engineering, State Key Laboratory of mechanical system and vibration Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A position controller for a quadruped robot with high payload was proposed. The robot was developed by the lab, and the high payload capacity was realized by the specific design of its actuation system, integrating novel high precision actuators, and by its legs, composed by a new family of parallel mechanisms. The foot trajectory was scheduled based on the Bezier curve in order to improve the stability of quadruped robot. The performance and efficiency of the proposed methods were verified by simulation and experiments.

Keywords: quadruped robot; gait planning; even terrain; trajectory planning

引言

目前, 我国火电发电占总发电量的 80% 左右, 而火电发电主要依靠燃烧传统的煤炭实现。但是由于煤炭是不可再生资源, 而且燃烧煤炭会给环境带来很大的污染, 所以我国亟需利用清洁能源进行发电。其中核电是高能量密度的能源; 输出功率稳定高效, 是比较清洁、低碳、环境友好的能源, 因此

我国目前在大力加快核电站建设。

核电虽然有如此多的优点, 但也不可避免的带来一些隐患。2011 年的福岛核事故给人们敲响了警钟。一旦发生核事故, 需要救援人员进入事故现场处理核燃料, 以免发生二次事故, 但是由于核燃料的高放射性, 即使人们身着抗辐射材料, 也只能在事故现场停留不到一分钟, 极大的限制了救援任务。因此, 考虑用机器人进行救援成了不二之选。由于四足机器人相较双足机器人具有更大的载荷, 清理灾害现场有很大的优势, 所以一般选用四足机器人作为救灾机器人。

当前有许多关于四足机器人的研究, 各国研究人员开发了各式各样的四足机器人。其中知名度较



收稿日期: 2014-04-15 修回日期: 2014-04-29;
基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划项目 (2013CB035500); 国家自然科学基金重点项目 (61233004, 61221003); 国家自然科学基金面上项目 (61374109); 国家自然科学基金青年基金项目 (61104091, 61304078);
作者简介: 胡楠(1986-), 男, 河南开封, 博士生, 研究方向为非线性控制, 机器人运动控制。

<http://www.china-simulation.com>

• - 529 - •

高的有 BigDog^[1], LittleDog^[2], HyQ^[3]。针对这些机器人, 研究人员开发了许多控制算法, 比如文献 [4-5] 就是利用 LittleDog 开发了控制算法, 实现了其在不同环境中的各种步态控制。根据救灾的要求, 我们自主开发了高负载的四足机器人。

本文针对开发的四足机器人设计了位置控制器, 利用 Bezier 曲线为机器人设计了足尖运动轨迹。最后的仿真和实验证明了本文所设计控制器的有效性。

1 机器人系统描述

考虑到我们的实际任务是核电站救灾, 因此我们的机器人对高负载能力有很高的要求。我们开发的机器人平台如下图 1。



图 1 四足机器人平台

机器人的长为 1.2 m, 宽为 0.5 m。当机器人的腿伸长到最长时, 高约为 1 m。机器人的自身重量大约为 115 kg, 其中每条腿重大约 20 kg。该四足机器人的最大载荷约为 70 kg。机器人自带动力源, 无外接动力和通讯线缆, 满载续航能力为 1 h, 可实现步行, 对角小跑等步态, 最高速度约为 4 km/h。最大行走坡度约为 10°。机器人具有抗惯性力, 抗侧向冲击的平衡自恢复能力。

图 2 是机器人腿的模型图。从图中我们可以看出每条腿具有 3 个自由度, 一个在冠状面, 两个在矢状面。腿的摇摆运动由上面一个液压缸控制, 和下边的液压缸是解耦的。机器人的腿是平行四边形

机构, 这种对称的设计能够使机器人的腿具有更好的动态平衡性能和更大的工作空间^[6]。我们把这两个液压缸并排放在腿的上部提升了机器人的平衡, 同时也减小了机器人行走时腿的惯性。

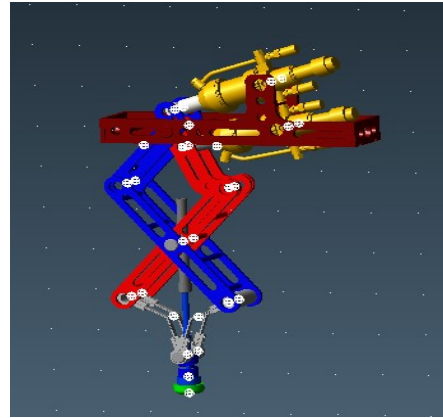


图 2 机器人腿模型

所有的液压缸都由电机驱动, 通过 PID 来控制电镀阀的开合来调节液压缸中液压油的流动。液压缸通过特殊的设计, 可以利用机械反馈来精确的控制液压缸的位置。所有的控制器和液压执行器都通过无线的方式连接到外部的计算机控制台, 可以实时对他们进行控制。机器人安装有陀螺仪和加速度传感器, 可以实时测量出机器人的位姿。机器人的控制框图如下图 3 所示。

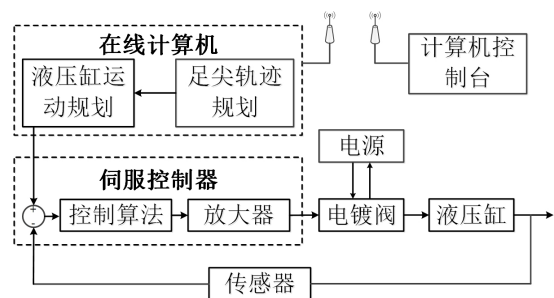


图 3 机器人系统的控制框图

2 机器人的步态和足尖轨迹规划

2.1 机器人的步态选择规划

机器人的步态分为静态步态和动态步态。静态步态主要是爬行步态, 这种情况下机器人的重心投影总是落在由支撑腿组成的多边形中。动态步态包

括对角, 骝蹄和疾驰步态, 这种情况下重心投影不需要一定落在由支撑腿组成的多边形中, 只要维持动态平衡即可。

选择对角步态作为机器人的行走步态, 因为对角步态是一种十分高效的步态, 而且速度范围较大, 可快可慢, 广泛应用于自然界中^[7]。对角步态是一种对称步态, 处于对角位置的两条腿总是同时抬起和落地。对角步态一个周期的序列图如下图 4 所示。

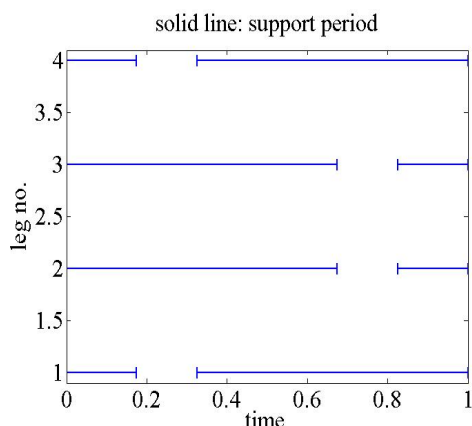


图 4 机器人对角步态的时序图

为了增加机器人的稳定性, 我们选择机器人的置空因子为 0.85。这种情况下, 机器人存在 4 个脚同时支撑的情况。

2.2 机器人的足尖轨迹规划

在设计机器人的足尖轨迹的时候, 需要考虑 2 个因素。(1) 机器人的脚落地的时候不能造成很大冲击; (2) 机器人的足尖轨迹应该尽可能的和四足动物的轨迹相似。在图 4 中, 如果我们设 T 是机器人一个运动周期的时间, 从图中我们可以看出一个脚的移动只需要 $0.15 T$ 的时间。

为了使机器人有更高的稳定性, 我们设计的足尖轨迹必须满足下列条件: 机器人的足尖轨迹必须连续; 当脚离地和落地的时候, 脚尖的速度和加速度必须为 0。所以我们使用 Bezier 曲线来设计脚的轨迹, 它可以很好的满足我们提出的要求。设计脚

轨迹的方法还有很多, 比如正弦曲线和三次曲线, 但这些方法都没有考虑机器人的加速度, 这样在机器人脚落地的时候可能会造成碰撞, 引起机器人的不稳定。Bezier 曲线由公式(1)定义^[8]。

$$B(t) = \sum_{i=0}^n C_n^i P_i (1-t)^{n-i} t^i \quad (1)$$

根据公式(1)我们可以得到一个 5 次的 Bezier 曲线来定义机器人足尖在 X 轴方向上的轨迹如下:

$$\begin{aligned} X(t) = & P_0(1-t)^5 + 5P_1(1-t)^4t + \\ & 10P_2(1-t)^3t^2 + 10P_3(1-t)^2t^3 + \\ & 5P_4(1-t)t^4 + P_5t^5 \end{aligned} \quad (2)$$

公式(2)必须满足下列条件:

$$\text{足尖位置: } \begin{cases} X(0) = X_0 \\ X(0.15T) = X_0 + \Delta X \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{足尖速度: } \begin{cases} \dot{X}(0) = 0 \\ \dot{X}(T) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{足尖加速度: } \begin{cases} \ddot{X}(0) = 0 \\ \ddot{X}(T) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中: X_0 是机器人在 X 轴方向的初始位置, ΔX 是机器人行走一步的步长。根据公式(2)~(5)我们可以计算出 $P_0 \sim P_5$ 。设 $X_0 = 0.5 \text{ m}$, $\Delta X = 0.33 \text{ m}$, $T = 0.65 \text{ s}$, 我们可以计算出 ΔX 。

$$\begin{aligned} X(t) = & 0.5 + 3560.41t^3 - 54775.55t^4 + \\ & 224720.2t^5 \quad (0 \leq t \leq 0.0975) \end{aligned} \quad (6)$$

类似的方法, 我们可以计算出机器人的足尖在 Z 轴方向的轨迹如下:

$$Z(t) = \begin{cases} 17262.6t^3 - 531156.84t^4 + \\ 4358209.93t^5 \quad (0 \leq t \leq 0.04875) \\ -17262.6(t - 0.04875)^3 + \\ 531156.84(t - 0.04875)^4 - \\ 4358209.93(t - 0.04875)^5 + \\ 0.2(0.04875 \leq t \leq 0.0975) \end{cases} \quad (7)$$

我们假设机器人的行走路线为直线, 即在 Y 轴方向位移为 0, 我们可以得到机器人的足尖在 X, Y, Z 轴上的位移和速度分别如下图 5 和 6 所示。

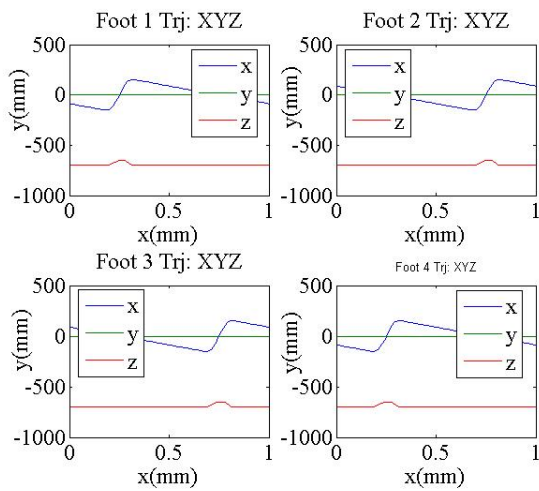


图 5 机器人足尖的位移曲线

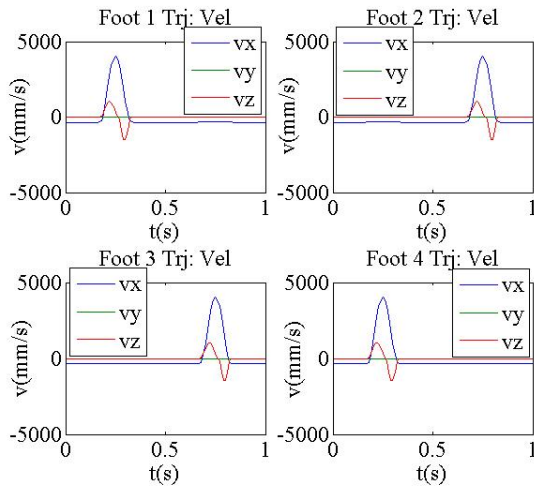
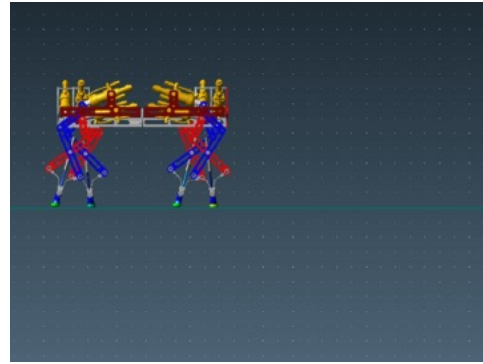


图 6 机器人足尖的速度曲线

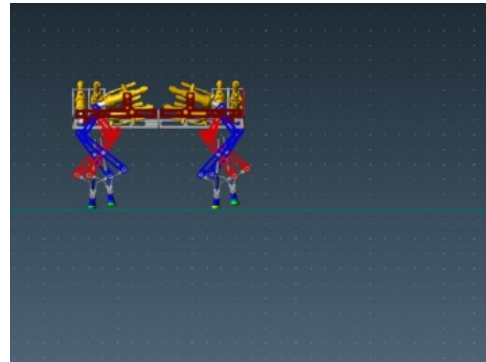
3 仿真和实验

3.1 RecurDyn 仿真

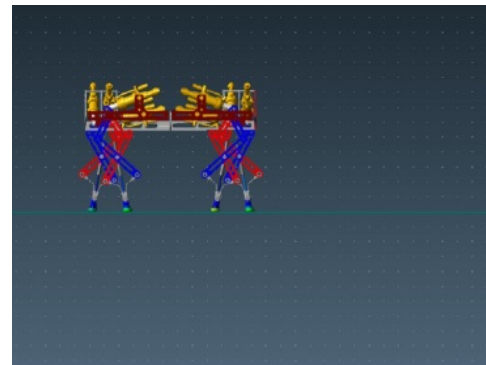
为了验证我们所提出的方法的有效性,我们在动力学仿真软件 RecurDyn 中做了仿真。联合仿真分为两部分,首先我们在 RecurDyn 中建立了四足机器人的模型。然后,我们设计了相应位置控制器来驱动机器人模型。我们在 RecurDyn 中实现了机器人对角走的步态。我们把机器人对角走分为 5 步:四脚支撑;左后腿和右前腿同时向前摆动;左后腿和右前腿落地;右后腿和左前腿向前摆动。图 7 中的(a)~(d)是 RecurDyn 仿真视频的截图,展示了上面的过程。



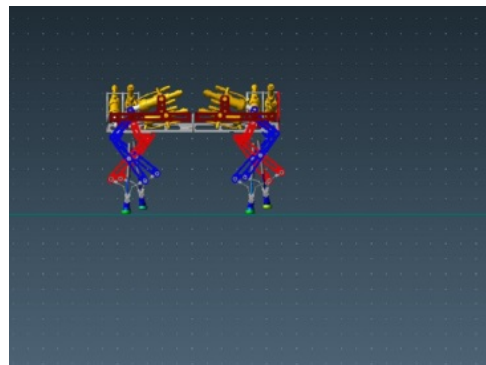
(a) 四脚支撑阶段



(b) 左后腿和右前腿同时摆动



(c) 左后腿和右前腿落地



(d) 右后腿和左前腿同时摆动

图 7 RecurDyn 中对角走的仿真实验

图 8 中的实验数据描述了四足机器人质心在垂直地面方向的位移, 我们可以利用此位移来衡量机器人的稳定性。从图中我们可以看出机器人行走平稳后质心的最大波动不超过 4 mm, 几乎可以被忽略, 所以机器人是行走中是十分平稳的。

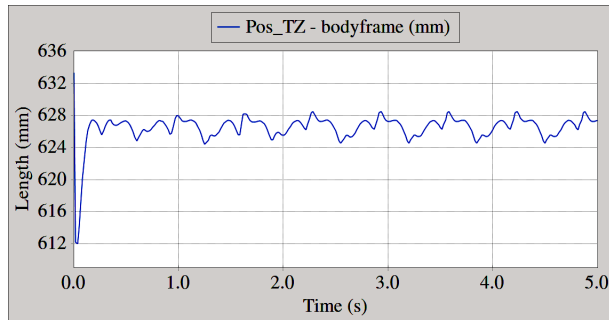


图 8 机器人质心在垂直地面方向上的位移

图 9 中的实验数据描述了机器人的脚和地面在 X, Y, Z 轴上的力。从图中我们可以看出这些力是稳定的, 说明机器人的行走是平稳的。

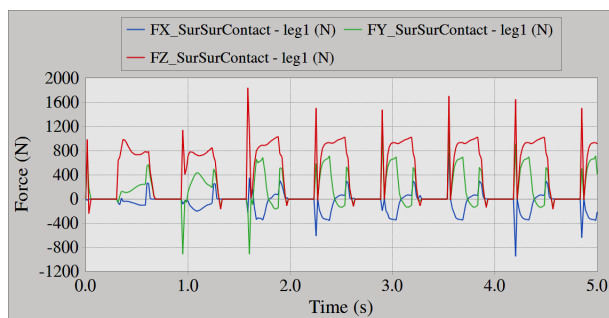


图 9 机器人脚和地面在 X,Y,Z 轴上的力

3.2 实验

我们将本文提出的算法在机器人平台中做了实验。实验中, 我们一个体重约为 50 Kg 的实验人员坐在机器人的身上, 来证明我们机器人的高负载能力。实验过程中机器人行走十分平稳, 坐在机器人身上的实验人员感觉很舒适, 说明我们所提出的算法是有效的, 提高了机器人的稳定性能。我们拍摄了一些实验视频, 图 10 是视频的截图。机器人行走的速度是 0.2 m/s。



图 10 实验截图

4 结论

针对核电救灾机器人设计了位置控制器, 规划了机器人的足尖轨迹, 实现了机器人的对角步态行走, 仿真和实验结果验证了本文提出方法的有效性。为进一步开展四足机器人在复杂路况中的步态规划问题打下了基础。

参考文献:

- [1] Boaventura T, Semini C, Buchli J, *et al.* Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot [C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, Brazil. USA: IEEE, 2012: 1889-1894.
- [2] Raibert M, Blankspoor K, Nelson G, *et al.* Bigdog, the rough-terrain quadruped robot [C]// Proceedings of 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea. USA: IFAC, 2008: 10822-10825.
- [3] Kalakrishnan M, Buchli J, Pastor P, *et al.* Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain [J]. International Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2011, 30(2): 236-258.
- [4] Shkolnik A C, Levashov M, Manchester I R, *et al.* Bounding on rough terrain with the littledog robot [J]. International Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2011, 30(2): 192-215.
- [5] Kolter J Z, Ng A Y. The stanford littledog: A learning and rapid replanning approach to quadruped locomotion [J]. International Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2011, 30(2): 150-174.
- [6] 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.
- [7] L R Palmer III, O E David. Force Redistribution in a Quadruped Running Trot [C]// 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 2007: 4343-4348.
- [8] E Matthias. Least squares degree reduction of Bezier curves [J]. Computer-Aided Design (S1686-4360) 1995, 27(11): 845-851.