

基于能量规划的崎岖地面四足机器人平面跳跃控制

柴 汇¹, 荣学文¹, 唐兴鹏¹, 李贻斌¹, 张 勤², 李岳炀²

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 济南大学 自动化与电气工程学院, 济南 250022)

摘要: 针对四足机器人传统奔跑控制方法中存在的俯仰角波动以及崎岖地形适应问题, 提出了一种基于 Trot 具有前后脚同时支撑步态的崎岖地形跳跃控制方法。建立了步态支撑相平面运动模型, 并通过虚拟模型控制, 实现了躯干平面运动控制解耦。对虚拟模型中躯干的运动过程进行了能量规划, 计算出纵向虚拟位置刚度, 实现了跳跃周期控制; 通过水平方向虚拟力的比例控制实现了机器人水平运动速度控制; 采用大位置误差增益的 PD 控制方法实现了躯干姿态控制, 保证了跳跃过程中躯干俯仰角的稳定。在虚拟物理仿真环境中建立了四足机器人的平面虚拟样机, 对控制方法进行了仿真实验以及在假设条件不满足情况下的鲁棒性测试, 仿真实验结果表明了该方法对跳跃控制的有效性。

关键词: 自动控制技术; 机器人控制; 平面跳跃控制; 能量规划; 虚拟模型; 主动阻抗

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2017)02-0557-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201702030

Gait based planar hopping control of quadruped robot on uneven terrain with energy planning

CHAI Hui¹, RONG Xue-wen¹, TANG Xing-peng¹, LI Yi-bin¹, ZHANG Qin², LI Yue-yang²

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Electrical Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: To make a quadruped robot run on rough terrain with less vibration on the pitch angle of the torso, a gait based hopping control approach with a passive joint is proposed. A planar kinematic model is built based on the supporting phase with at least one front stance leg and one rear stance leg, such as trotting gait. The control of 3-dof planar movements of the torso is decoupled by the virtual model and force distribution control. In the hopping control, the hopping cycle is controlled by the energy planning and active independence control on vertical direction, the horizontal velocity is controlled by a proportion control, and the pitch angle is held by a position control with high gain. The control approach and its robustness are verified by the experiments in virtual physical simulation environment.

Key words: automatic control technology; robot control; planar hopping control; energy planning; virtual model; active independence

收稿日期: 2015-09-28.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2015AA042201); 国家自然科学基金项目(61233014); 国家自然科学基金青年科学基金项目(61203083, 61503153); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM027).

作者简介: 柴汇(1983-), 男, 博士研究生。研究方向: 机器人控制。E-mail: pigging.chai@gmail.com

通信作者: 荣学文(1973-), 男, 高级工程师。研究方向: 液压传动, 机器人控制。E-mail: rongxw@sdu.edu.cn

0 引言

腿足动物经过了亿万年的进化,可以凭借它们的腿到达陆地上几乎任何地方,这一点证明了腿足移动方式所具有的运动灵活性与适应能力是轮式以及履带式移动方式所无法比拟的^[1]。而在腿足移动方式中,四足移动方式较之六足具备更加简单的结构,与双足以及单足相比,具备更加多样的运动形式以及更强的适应能力,成为了兼具灵活性与稳定性的腿足移动方式^[2]。

在过去的十年里,波士顿动力工程公司(Boston Dynamics, BDI)^[3,4]、意大利理工学院(Ionian Institute of Technology, IIT)^[5]、韩国工业技术学院(Korea Institute of Industrial Technology, KITECH)^[6]以及我国山东大学^[7]等一系列研发单位和团队推出了各具特色同时具备很强实用性的四足机器人平台。这些四足平台均为液压驱动,并具备了比较系统的控制方法以及室外动步态行走能力和一定的环境适应能力。目前针对四足机器人动步态行走的平衡能力以及适应能力已经存在很多系统且有效的理论和方法。如何进一步提高四足机器人的灵活性和机动性,成为了四足机器人研究面临的一个新的挑战。

为了进一步提高四足机器人的机动性,出现了很多针对真正意义上奔跑步态的控制方法研究。奔跑步态是指具备了四足腾空相、支撑相占空比 β 小于 0.5 的步态。其中,最为著名的当属 Raibert 提出的基于弹簧质量倒立摆模型的三段式控制方法。Raibert 基于此方法实现了单足、双足、四足机器人的动步态奔跑和跳跃^[8]。Ahmadi 与 Buehler 提出了一种基于具有髋关节与腿部柔顺的单腿模型的稳定奔跑控制方法^[9]。Sato 与 Buehler 在只有一个作动器的单腿机器人平台上实现平面跳跃控制^[10]。Smith 与 Poulakakis 在 SCOUT II 平台上实现了 Rotatoy Gallop 步态的控制^[11]。MIT 仿生机器人技术实验室研制的 MIT Cheetah 依靠出色的轻量化柔顺机构设计^[12]以及他们提出的 OSHP(Optimally scaled hip-force planning)方法^[13]实现了以 Gallop 步态达到 22 km/h 的奔跑速度。BDI 研制的 Cheetah 机器人更是以 17.6 m/s 的奔跑速度刷新了四足机器人的速度记录^[14],在此基础上,BDI 进一步研发了 WildCat,能以自身携带的动力源在室外实现 Gallop 和 Bounding 步态的奔跑^[15]。以上均

为在平坦地形或实验室环境中开展的研究工作。

在不平整地形适应方面,很多研究利用步态的腾空相进行攀爬、翻越垂直障碍。Robert 在 SCOUT II 平台上实现了利用 Bounding 步态爬越阶梯^[16]。Shkolnik, Levashov, Manchester 以及 Tedrake 提出的基于 RRT 与平面运动模型的 Bounding 步态控制方法,在 LittleDog 平台上实现了跨越台阶地形的功能^[17]。Hodgins 与 Raibert 基于三段式控制以及步长调节方法,实现了双足机器人崎岖地形奔跑^[18]。Palmer III 与 Orin 利用模糊控制以及力分配算法实现了四足机器人 Trot 步态的崎岖地形高速奔跑(5.25 m/s)^[19]。

然而,无论是基于弹性负载倒立摆(Spring-loaded inverse pendulum, SLIP)模型或者是其他平面模型的奔跑控制方法,最终并没有达到躯干三个方向运动解耦的效果,为了保证运动的稳定性,会在俯仰角上产生幅值较大的周期性波动,使得跑步步态很难应用于运输任务中。为了解决这一问题,本文基于 Trot 此类具有前后足同时支撑且具有矢状面稳定或暂态稳定的步态,建立了四足机器人平面模型,并使用虚拟模型实现躯干平面三个自由度的运动解耦控制;通过能量规划以及主动阻抗控制实现机器人在不平整地面的连续跳跃运动。

1 基于步态的支撑相平面模型

1.1 平面运动学模型

四足机器人以 Trot 步态行走或者奔跑时,具有稳定或者临界稳定的前后脚支撑相,在矢状面投影得到的平面简化模型如图 1 所示。当机器人腿足质量远小于躯干质量时,机器人质心近似等于躯干的质心。以机器人模型后脚与地面接触点为原点建立坐标系 O,机器人躯干的位姿可以由 $(x_b \quad y_b \quad \theta_b)^T$ 来描述,其中 x_b 和 y_b 为躯干质心的位置, θ_b 为躯干的俯仰角。 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 分别为机器人支撑腿的关节角。该模型中,地面为崎岖不平整路面,路面的倾斜角度用 ϕ_g 表示。

四足机器人支撑相的平面模型的自由度为 3。为了增强足端的支撑力并且减少与地面之间的静摩擦力,选取 q_1 、 q_2 、 q_4 关节作为主动关节, q_3 作为被动关节。对 q_1 、 q_2 、 q_4 关节位置的规划得到机器人躯干的位姿,以此作为机器人的正运动学。

如图 2 所示,四足机器人平面模型正运动学

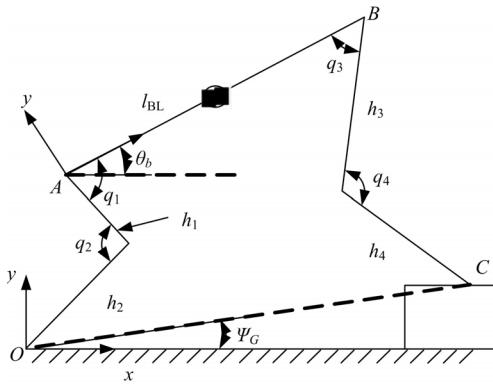


图 1 支撑相平面模型

Fig. 1 Planar model of supporting phase

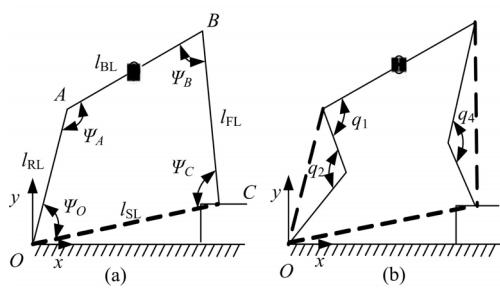


图 2 运动学建模流程

Fig. 2 Modeling flow of supporting phase kinematic 的求解过程分两步进行。

(1) 将模型由六连杆机构等效为四连杆机构, 由图 2(a)所示。此时变量为 ϕ_A 、 l_{RL} 、 l_{FL} 。

(2) 根据图 2(b)将第一步的模型中的变量 ϕ_A 、 l_{RL} 、 l_{FL} 转化为变量 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 。

根据图 2(a)的连杆模型, 可以得到如下矢量方程:

$$\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CB} \quad (1)$$

式中: 矢量 \overrightarrow{OA} 、 \overrightarrow{AB} 、 \overrightarrow{OC} 、 \overrightarrow{CB} 的模长分别为 l_{RL} 、 l_{BL} 、 l_{SL} 、 l_{FL} ; 在坐标系 O 中的矢量角分别为 ψ_{RL} 、 ψ_{BL} 、 ψ_{SL} 、 ψ_{FL} 。 l_{BL} 为机器人躯干的长度, 是一个常量, 当机器人支撑相模型固定后, 在无打滑等因素干扰下, l_{SL} 也是一个常量, 即机器人前后脚之间的距离; l_{RL} 、 l_{FL} 为步骤一中的变量。由几何关系, 各矢量角又可以表示为: $\psi_{RL} = \phi_O + \phi_G$, $\psi_{BL} = \theta_b$, $\psi_{SL} = \phi_G$, $\psi_{FL} = \phi_B + \theta_b$ 。

由步骤(1)可以得到机器人的正运动学方程:

$$\begin{cases} \theta_b = \phi_O + \phi_G + \phi_A - \pi \\ x_b = l_{RL} c_{O+G} + \frac{1}{2} l_{BL} c_b \\ y_b = l_{RL} s_{O+G} + \frac{1}{2} l_{BL} s_b \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s_{O+G} = \sin(\phi_O + \phi_G)$, $c_{O+G} = \cos(\phi_O + \phi_G)$, $s_b = \sin\theta_b$, $c_b = \cos\theta_b$ 。虽然 ϕ_O 无法直接测量, 但可以通过下式计算得到,

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_O = \phi_{O1} + \phi_{O2} \\ \phi_{O1} = \arccos \left(\frac{l_{RL} - 2l_{BL}c_A}{\sqrt{l_{BL}^2 + l_{RL}^2 - 2l_{BL}l_{RL}c_A}} \right) \\ \phi_{O2} = \arccos \left(\frac{l_{SL}^2 + l_{BL}^2 + l_{RL}^2 - l_{FL}^2 - 2l_{BL}l_{RL}c_A}{2l_{SL}\sqrt{l_{BL}^2 + l_{RL}^2 - 2l_{BL}l_{RL}c_A}} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: $c_A = \cos\phi_A$ 。

在步骤(2)中, 将变量 ϕ_A 、 l_{RL} 、 l_{FL} 转化为实际的关节变量 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 , 转换关系如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{RL} = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1h_2c_2} \\ l_{FL} = \sqrt{h_3^2 + h_4^2 - 2h_3h_4c_4} \\ \cos\phi_A = \frac{h_1c_1 - h_2c_{2-1}}{l_{RL}} \\ \cos\phi_B = \frac{h_3c_3 - h_4c_{4-3}}{l_{FL}} \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, $c_1 = \cos q_1$, $c_2 = \cos q_2$, $c_3 = \cos q_3$, $c_4 = \cos q_4$, $c_{2-1} = \cos(q_2 - q_1)$, $c_{4-3} = \cos(q_4 - q_3)$; 腿部连杆长度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 。将式(2)~(4)联立, 即为最终的运动学方程。

支撑相平面运动学模型正解的计算流程如图 3 所示。其中, 在机器人进入稳定支撑后, 其前后支撑脚的间距 l_{SL} 以及与地面之间的夹角 ϕ_G 不会发生变化。关于 l_{SL} 与 ϕ_G 的计算, 则是在支撑相初期, 通过机器人的躯干姿态检测(θ_b)以及连杆

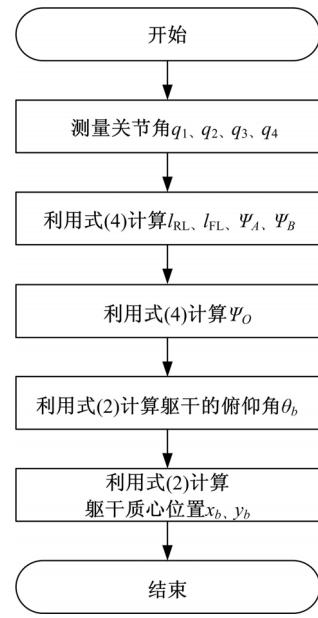


图 3 运动学模型计算流程

Fig. 3 Calculating flow of kinematic model

运动学获得,计算过程比较简单,本文不再赘述。

1.2 平面运动学的速度解及雅克比矩阵

四足机器人支撑相平面运动学模型的速度形式(关节速度求解躯干质心速度)分式(5)中的两部分进行计算。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} = \mathbf{J}_1 \begin{bmatrix} l_{RL} \\ l_{FL} \\ \psi_A \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{l}_{RL} \\ \dot{l}_{FL} \\ \dot{\psi}_A \end{bmatrix} = \mathbf{J}_2 \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在 \mathbf{J}_1 的求解过程中,首先在躯干坐标系 A 将平面模型的矢量方程改写为:

$$\overrightarrow{AO} + \overrightarrow{OC} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC}$$

式中: $\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{OC}, \overrightarrow{AB}, \overrightarrow{BC}$ 的矢量角分别为 $-\psi_A, \psi_G - \theta_b, 0$ 以及 $\psi_B - \pi$ 。因此以上矢量方程的复平面表达形式为:

$$l_{RL} e^{i\psi_A} + l_{SL} e^{i(\theta_b - \psi_G)} = l_{BL} + l_{FL} e^{i(\pi - \psi_B)}$$

将上式对时间求导,得到矢量方程的速度形式:

$$\begin{aligned} l_{RL} e^{i\psi_A} + il_{RL} e^{i\psi_A} \dot{\psi}_A + il_{SL} e^{i(\theta_b - \psi_G)} \dot{\theta}_b = \\ l_{FL} e^{i(\pi - \psi_B)} - il_{FL} e^{i(\pi - \psi_B)} \dot{\psi}_B \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)利用欧拉公式展开,即可得到含有 $\dot{\theta}_b$ 与 $\dot{\psi}_B$ 的方程组,通过求解可以得到:

$$\dot{\theta}_b = \frac{1}{l_{SL} s_{b+B-G}} (c_{A+B} - 1 - l_{RL} s_{A+B}) \begin{bmatrix} l_{RL} \\ l_{FL} \\ \dot{\psi}_A \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\begin{cases} s_{b+B-G} = \sin(\theta_b + \psi_B - \psi_G), \\ s_{A+B} = \sin(\psi_A + \psi_B), \\ c_{A+B} = \cos(\psi_A + \psi_B)。 \end{cases}$

方程组的求解过程必须满足以下条件: $s_A \neq 0$ 且 $s_{b+B-G} \neq 0$ 且 $l_{SL} \neq 0$ 。这一条件在机器人运动的时候,几乎在任一时刻都满足,因此上面的解满足一般情况。躯干质心的线速度 \dot{x}_b, \dot{y}_b 通过将式(2)对时间求导求得。求导结果结合式(7)可求得:

$$\mathbf{J}_1 = \frac{1}{l_{SL} s_{b+B-G}} \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} \\ j_{14} & j_{15} & j_{16} \\ c_{A+B} & 1 & -l_{RL} s_{A+B} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$\left\{ \begin{array}{l} j_{11} = -l_{RL} s_{G+O} c_{A+B} - l_{SL} s_{G-B-b} c_{G+O} - \frac{1}{2} l_{BL} s_b c_{A+B}, \\ j_{12} = -l_{RL} s_{G+O} - \frac{1}{2} l_{BL} s_b, j_{15} = l_{RL} c_{G+O} + \frac{1}{2} l_{BL} c_b, \\ j_{13} = l_{RL} \left(l_{RL} s_{G+O} s_{A+B} - \frac{1}{2} l_{SL} (c_{G-A-B} + c_{O+B+b}) + \right. \\ \left. \frac{1}{2} l_{BL} s_{A+B} s_b \right), \\ j_{14} = l_{RL} c_{G+O} - \frac{1}{2} l_{SL} (c_{G-A-B} + c_{O+B+b}) + \\ \frac{1}{2} l_{BL} c_{A+B} c_b, \\ j_{16} = -l_{RL} \left(l_{RL} s_{A+B} c_{G+O} + \frac{1}{2} l_{SL} (s_{G-A-B} + s_{O+B+b}) - \right. \\ \left. \frac{1}{2} l_{BL} s_{A+B} c_b \right). \end{array} \right.$$

以上公式中的符号表达分别为:

$$\begin{cases} s_{G-A-B} = \sin(\psi_G - \psi_A - \psi_B) \\ s_{G-B-b} = \sin(\psi_G - \psi_B - \theta_b) \\ c_{G-A-B} = \cos(\psi_G - \psi_A - \psi_B) \\ s_{O+B+b} = \sin(\psi_O + \psi_B + \theta_b) \\ c_{O+B+b} = \cos(\psi_O + \psi_B + \theta_b)。 \end{cases}$$

将式(4)对时间求导,可以得到第二部分的雅克比矩阵 \mathbf{J}_2 :

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{h_1 h_2 s_2}{l_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h_3 h_4 s_4}{l_{FL}} \\ \frac{h_1 s_1 + h_2 s_{2-1}}{l_{RL} s_A} & \frac{h_1 h_2 s_2 c_A - h_2 l_{RL} s_{2-1}}{l_{RL}^2 s_A} & 0 \end{bmatrix},$$

式中: $s_1 = \sin q_1, s_2 = \sin q_2, s_4 = \sin q_4, s_{2-1} = \sin(q_2 - q_1)$ 。

根据式(5),平面模型的雅克比矩阵 $\mathbf{J} = \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_2$ 。平面运动学模型的速度形式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 基于虚拟模型及能量规划的跳跃控制

由于上一节中所建立的运动学模型具有三方向运动解耦的特点,因此对于机器人的运动控制可以在平面三个自由度上分别进行控制。本文中

使用虚拟模型对机器人生命周期进行控制，并通过对虚拟模型中躯干能量进行规划的方法控制机器人的跳跃过程。水平方向的运动速度则通过基于虚拟模型的比例控制实现。躯干姿态则采用了大位置误差增益的位置控制来保证在跳跃过程中姿态角稳定。

2.1 平面虚拟模型控制

由于平面简化模型的质量主要分布在躯干位置，因此对于模型姿态和运动的控制主要就是对躯干姿态和运动的控制。平面模型的躯干在平面中的运动由三个自由度组成（ x 方向平移、 y 方向平移和 z 方向旋转）。 (f_x, f_y) 、 τ_z 为作用在机器人躯干质心上的虚拟作动力及力矩，采用刚度-阻尼模型（见图4）生成其位置期望下的控制律：

$$\begin{cases} f_x = k_{sx}(x_{db} - \hat{x}_b) - k_{dx}\dot{\hat{x}}_b \\ f_y = k_{sy}(y_{db} - \hat{y}_b) - k_{dy}\dot{\hat{y}}_b \\ \tau_z = k_{sz}(\theta_{db} - \hat{\theta}_b) - k_{dz}\dot{\hat{\theta}}_b \end{cases} \quad (10)$$

式中： x_{db} 、 y_{db} 、 θ_{db} 为机器人躯干的位置期望， \hat{x}_b 、 \hat{y}_b 、 $\hat{\theta}_b$ 为机器人躯干质心的实时位置， $\dot{\hat{x}}_b$ 、 $\dot{\hat{y}}_b$ 、 $\dot{\hat{\theta}}_b$ 为机器人躯干质心的实时速度， k_{sx} 、 k_{dx} 、 k_{sy} 、 k_{dy} 、 k_{sz} 、 k_{dz} 为机器人躯干位置的刚度和阻尼系数。由于控制对象仅为单刚体，因此控制律收敛即可以达到闭环系统收敛。

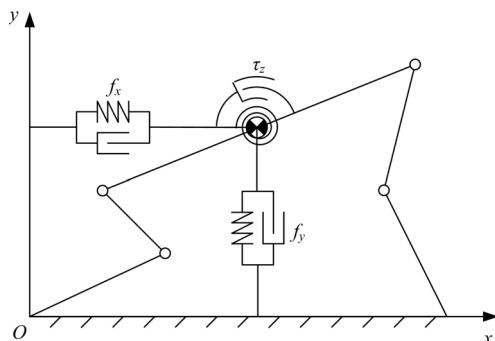


图4 平面虚拟刚度-阻尼模型

Fig. 4 Planar virtual stiffness-damping model

然而虚拟作动力 f_x, f_y, τ_z 并不能够直接施加在机器人躯干质心处对其运动进行控制，而是需要将其变换为关节力矩，通过关节驱动器施加出来。

前面提到了机器人的质量主要集中在躯干上，因此这里为了简化虚拟力与关节力矩的转化关系，提出如下假设：

假设：关节驱动腿部连杆独立运动的力矩远

小于支撑驱动躯干运动所需的力矩。

根据以上假设，腿部杆件的惯性与重力在运动时可以忽略不计，因此可以将躯干质心处的作用力与关节力矩可以看作是一个静力分配问题，其转换关系为：

$$\mathbf{T}_{\text{Joint}} = \mathbf{J}^T \mathbf{u}_b \quad (11)$$

式中： $\mathbf{T}_{\text{Joint}} = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3)^T$ 为关节驱动力矩； $\mathbf{u}_b = (f_x \ f_y \ \tau_z)^T$ 为作用在躯干质心处的虚拟作动力。

然而，机器人并不是固联在地面上的，因此机器人的足与地面之间会产生滑动，地面也无法对机器人足施加向下的拉力，即机器人所受到来自地面的作用力是有界且非线性的。同时，机器人所受外力即为地面对足的作用力与重力的合力，因此地面作用力的非线性特性会反映在躯干质心处的虚拟作动力 \mathbf{u}_b 上。为了防止由于模型与实际系统的差别而造成的足-地交互失败，本文模仿摩擦锥的形式，给虚拟作动力 f_x, τ_z 施加 f_y 的线性边界，约束给定值：

$$\begin{aligned} f_x &= \begin{cases} \mu_{xy} f_y, k_{sx}(x_{db} - \hat{x}_b) - k_{dx}\dot{\hat{x}}_b \geq \mu_{xy} f_y \\ -\mu_{xy} f_y, k_{sx}(x_{db} - \hat{x}_b) - k_{dx}\dot{\hat{x}}_b \leq -\mu_{xy} f_y \end{cases} \\ \tau_z &= \begin{cases} \mu_{zy} f_y, k_{sz}(\theta_{db} - \hat{\theta}_b) - k_{dz}\dot{\hat{\theta}}_b \geq \mu_{zy} f_y \\ -\mu_{zy} f_y, k_{sz}(\theta_{db} - \hat{\theta}_b) - k_{dz}\dot{\hat{\theta}}_b \leq -\mu_{zy} f_y \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： μ_{xy} 与 μ_{zy} 为约束系数，在运动过程中是一个常数； μ_{xy} 的调节可以参考地面摩擦因数； μ_{zy} 则需要根据运动所需的 f_y, τ_z 来进行调节。

2.2 基于能量规划的跳跃控制

机器人的一个跳跃周期可分成两个阶段，支撑相和腾空相，如图5所示。支撑相为平面模型双脚触地到双脚中有一只脚离地阶段；腾空相为

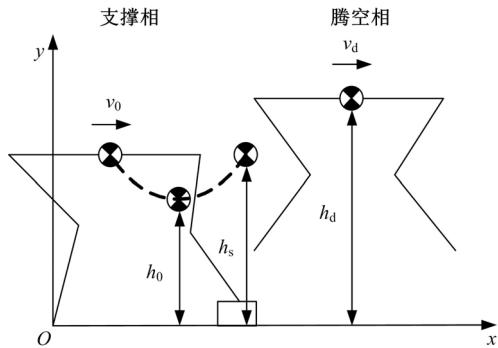


图5 跳跃控制过程及控制参考输入

Fig. 5 Process and reference inputs of hopping control

单脚离地到双脚触地这一时间段。

在支撑相中,可以将该过程分为两个阶段:压缩阶段和弹起阶段。压缩阶段是躯干质心向下运动的过程,即躯干质心位置高度由双脚触地时的高度下降到 h_0 位置;弹起阶段是躯干质心向上运动的过程,此时躯干质心位置由 h_0 运动到 h_s 。

在机器人的跳跃控制中,采用基于能量的变刚度控制方法。躯干质心虚拟力 f_y 仍采用式(10)中的刚度一阻尼的虚拟控制模型。令纵向虚拟阻尼系数 k_{dy} 为 0,产生连续跳跃效果,跳跃过程中的纵向虚拟位置刚度采用能量规划方法进行计算。

在跳跃过程中,躯干的俯仰角采用高增益位置控制,保证俯仰角不会有大幅度的变化,因此躯干的转动动能可以忽略不计。躯干纵向能量在重力势能、躯干运动动能和虚拟纵向弹性之间周期性转化。在支撑相阶段,躯干总的能量 E_d 包括动能 E_{ky} ,重力势能 E_{pg} 和虚拟弹性势能 E_{peg} ,其转换关系如下式所示:

$$E_d = E_{ky} + E_{pg} + E_{peg} \quad (13)$$

其中:

$$E_{ky} = \frac{1}{2} m_b b^2$$

$$E_{pg} = -m_b g y_b$$

$$E_{peg} = \begin{cases} 0, & y_b \geq h_s \\ -\frac{1}{2} k_{sy} (y_b - h_s)^2, & y_b < h_s \end{cases}$$

式中: m_b 为躯干的质量; g 为重力加速度; \dot{y}_b 为躯干质心沿 y 轴的速度。

在支撑相的压缩阶段过程中,根据该阶段期望位置 h_0 计算总的能量:

$$E_d = -\frac{1}{2} k_{sy} (h_0 - y_{b0}) - m_b g h_0 \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),求得压缩过程的纵向虚拟位置刚度 k_{sy} 如下:

$$k_{sy} = \frac{b^2 - 2g(y_b - h_0)}{(y_b + h_0 - 2y_{b0})(y_b - h_0)} m_b \quad (15)$$

在支撑相的弹起阶段过程中,该阶段的总能量由期望位置 h_s 得出:

$$E_d = -m_b g h_s \quad (16)$$

将式(16)代入式(13),计算出该阶段的纵向虚拟位置刚度如下:

$$k_{sy} = \frac{2g(y_b - h_b) + b^2}{(y_b - h_s)^2} m_b \quad (17)$$

将以上求得的纵向虚拟位置刚度代入式

(10),可求得 y 方向的虚拟作动力 f_y ,以此完成对跳跃周期的控制,控制框图如图 6 所示。

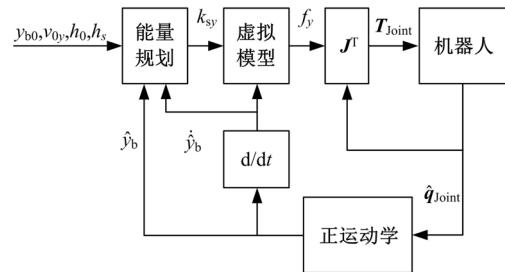


图 6 跳跃周期控制方框图

Fig. 6 Block diagram of hopping cycle control

2.3 水平方向速度控制

由于在跳跃过程中,期望对水平方向的运动速度进行控制,因此对水平方向虚拟作动力 f_x 的控制律由式(10)中的位置控制改为针对速度的控制,本文中采用速度比例控制生成跳跃控制 f_x :

$$f_x = k_v (v_d - \dot{x}_b) \quad (18)$$

其中: v_d 为躯干质心水平运动速度期望(见图 5); \dot{x}_b 为躯干质心水平方向的线速度; k_v 为力/速度增益, k_v 越大,机器人达到期望速度的时间越短,加速用的步数越少。

本文中的躯干俯仰角控制采用高位置误差增益的位置控制,控制律如式(10)所示,在运动过程中保持俯仰角为 0,以减小躯干的转动动能对能量规划的影响。

2.4 腾空相足端轨迹规划

为了完成连续跳跃,机器人腾空后,需要将足根据躯干运动速度移动到期望的位置。机器人腾空相的上升时间 t_f 可以根据离地时机器人躯干质心沿 y 轴的运动速度 v_{fy} 计算得到:

$$t_f = -v_{fy}/g \quad (19)$$

腾空相的理想持续时间等于 $2t_f$,然而由于机器人的双足末端接触地面的时间具有不确定性,因此需要在触地前就完成位置规划,所在足端轨迹规划在上升期 t_f 内完成。

足端摆动轨迹规划在躯干质心坐标系下进行,采用三次曲线:

$$\begin{cases} T(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 \\ \frac{dT(t)}{dt} = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为三次规划的参数,可以根据足端位置规划的初始位置、速度和规划结束时的期望位置和期望速度得到。

足端摆动的初始位置和速度可以由关节角位移传感器以及腿部正运动学得到,足端规划结束时的期望速度为0, y 方向为正常站立高度。

需要注意的是,在对足端轨迹进行规划时, x 方向上设定了步长参数,保证下一个支撑相对前进速度有足够的工作空间和稳定裕量。足端步长的计算方法如下:

$$T_x \left(\frac{t_f}{2} \right) = k_{SL} v_{tx} \pm \frac{l_{BL}}{2} \quad (21)$$

式中: v_{tx} 为躯干质心的腾空相水平方向初速度; k_{SL} 为位置/速度增益,通过调节其大小,可以得到不同的步长大小。式中“+”的计算结果为前足摆动轨迹的 x 坐标,“-”的计算结果为后足摆动轨迹的 x 坐标。

机器人进入腾空相之后,通过低位置误差增益 PD 力控制来实现足端的规划轨迹。根据 2.1 节的假设条件,PD 控制的增益可以调整到非常低。这样,足端在摆动时,即使与地面发生了意外碰撞,冲击也不会对躯干的运动造成影响。

2.5 跳跃周期的控制流程

整个跳跃周期的控制流程图如图 7 所示。该流程是一个不可逆的单向过程。流程一旦进入下一阶段,便绝不会出现再退回到上一阶段的情况。因此,在流程切换时,不会发生在相邻两状态之间来回震荡的情况。

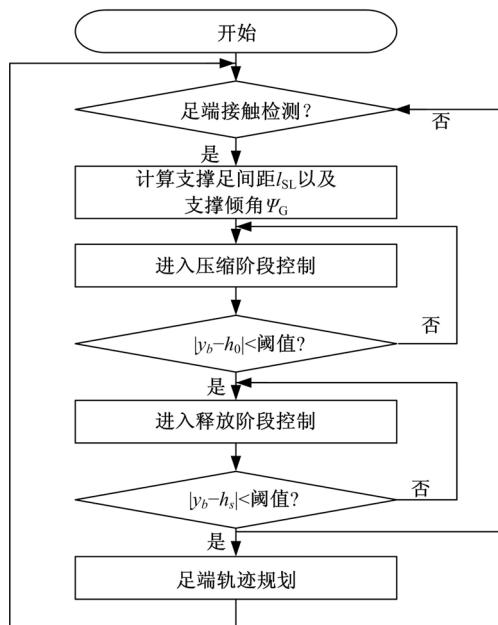


图 7 跳跃周期的控制流程

Fig. 7 Control flow of a single hopping cycle

在单个跳跃周期中,控制流程将一个周期分

为腾空相以及支撑相的压缩阶段、释放阶段。通过足端的接触力传感器来判断机器人处于支撑相还是腾空相。接触检测只在腾空相有效,当且仅当前后脚同时达到接触力阈值时,流程才会进入支撑相。

在进入支撑相后,需要首先根据躯干的俯仰角检测值以及支撑线平面模型的正运动学计算出机器人在支撑相中的支撑足间距 l_{SF} 。进入稳定支撑后,足端与地面相对静止, l_{SF} 成为一个常数。同样,在支撑相中结合姿态检测与运动学模型的姿态输出,也可以达到足端打滑检测的效果。

需要注意的是,在跳跃控制中,运动并不是基于时间序列进行控制,而是通过状态机进行相间切换。在支撑相向腾空相切换时,利用的是五连杆模型的躯干质心高度作为切换条件,一旦条件满足,腿的控制方法便会切换为低刚度的位置控制来摆动足端。

在腾空相向支撑相切换时,采用足底接触状态切换,只有当两只脚都接触地面时,状态才会从腾空相切换至支撑相。当遇到前后脚无法同时着地的情况,比如地面不平坦或者躯干俯仰角大幅度波动,先接触地面的腿会保持腾空相时的低位置刚度不变,直到另一只脚着地,才进入支撑相。

支撑相和腾空相作用在腿上的负载量级差别很大,因此支撑相和腾空相的位置刚度参数差别亦非常大,因此不会因为脚的意外触地而给躯干带来很大冲击的情况。

3 仿真与实验

为了验证文中方法的有效性,基于虚拟物理仿真环境 Webots 6.4.1 建立了虚拟测试环境,如图 8 所示。通过一个三自由度(x 方向和 y 方向的平动, z 方向的转动)的支架构成平面约束,

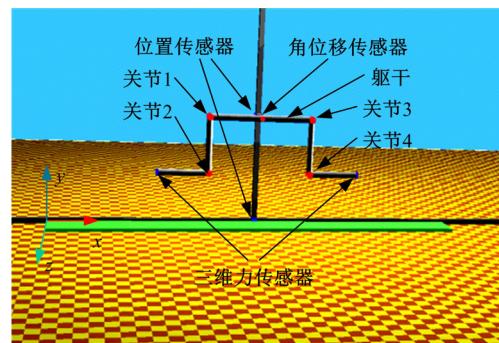


图 8 虚拟样机与仿真测试环境

Fig. 8 Virtual prototype and simulating environment

与简化为平面五连杆机器人的躯干质心位置相联接。为了满足 2.1 节的假设条件,在仿真中,躯干杆件的长度 l_{BL} 为 0.5 m,质量设定为 5 kg;其他腿部杆件的长度(h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4)为 0.25 m,质量均为 0.005 kg。支架通过两条轨道上的位移传感器以及与躯干联接转轴处的角度移传感器对机器人躯干质心的实际位置进行检测,作为实际值与实验中运动学计算结果的比较,同时角度移传感器作为躯干俯仰角的检测,参与 l_{SF} 的计算。两个安装在机器人足端的三维力传感器对足端进行与地面的接触检测。地面由落差分别为 2、3、4 cm 的不连续起伏构成崎岖地形。

3.1 不平整地形跳跃实验

在跳跃实验中,本文将水平期望速度 v_d 设为 1 m/s。在支撑相的压缩阶段,由于存在支撑足的着地冲击,因此压缩阶段与释放阶段的参数略有不同。跳跃控制的具体参数设置为: k_{xz} 为 500 N · m/rad, k_{dz} 为 20 N · m/(rad · s⁻¹), μ_{xy} 为 0.1, μ_{zy} (压缩阶段)为 0.1, μ_{zy} (释放阶段)为 0.195, k_v 为 25 N/(m · s⁻¹), k_{SL} 为 0.08 m/(m · s⁻¹)。

机器人质心在地面坐标系 O 中(见图 8)沿 x 方向的运动速度,以及沿 y 方向和 z 方向的位移与角位移曲线如图 9 所示。图中红色曲线为期望输入,蓝色曲线为实测曲线,小窗口为 4~4.5 s 约一个跳跃周期的细化图。由于地形不平整的原因, y 方向的中期性跳跃波动会伴随着地形起伏,沿 x 轴方向的水平速度也会因为地形变化时,受到一定影响,但是很快便会恢复。

在沿 x 方向的速度曲线图中,可以看出机器人通过四步,将速度提高到期望的 1 m/s。由于躯干俯仰角的控制采用高增益的位置控制,因此曲线并不算平滑,但是波动幅度很小。

仿真平台 4 个关节的关节力矩如图 10 所示。在腾空相时,4 个关节同时作用控制摆腿,进入支撑相后,只有 3 个关节有力矩输出,另一个关节力矩为 0,成为被动关节。由于躯干质量与腿部杆件质量差别很大,因此支撑相和摆动向的关节输出力矩差别也非常大,这样也保证了足端在接触地面时是足够柔顺的,躯干不会因为接触力而受到很大冲击。图中力矩曲线的不连续是由于刚度突变产生的,但是从运动曲线(图 9)可以看出,并没有导致运动的突变。

3.2 腿部质量的影响测试

以上方法完全基于 2.1 节提出的假设。而该

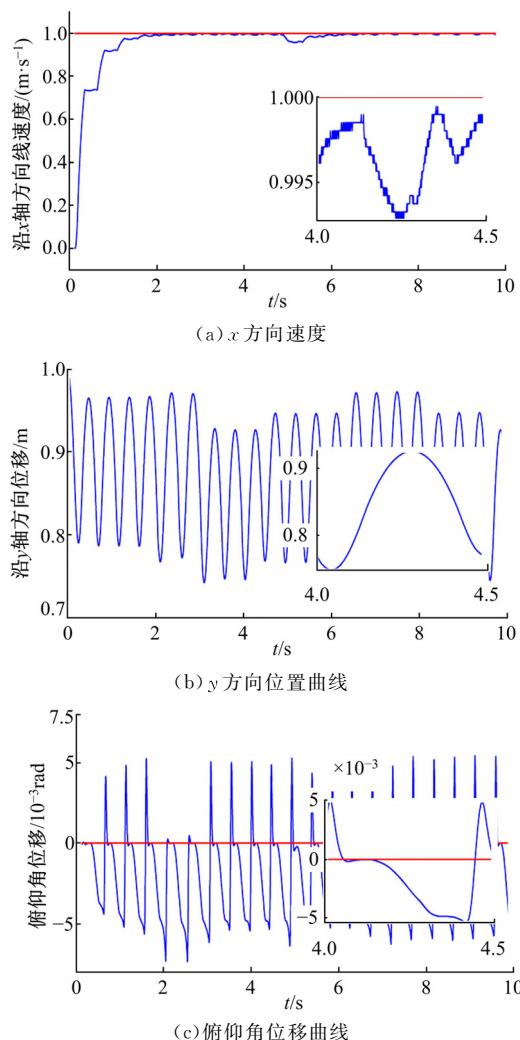
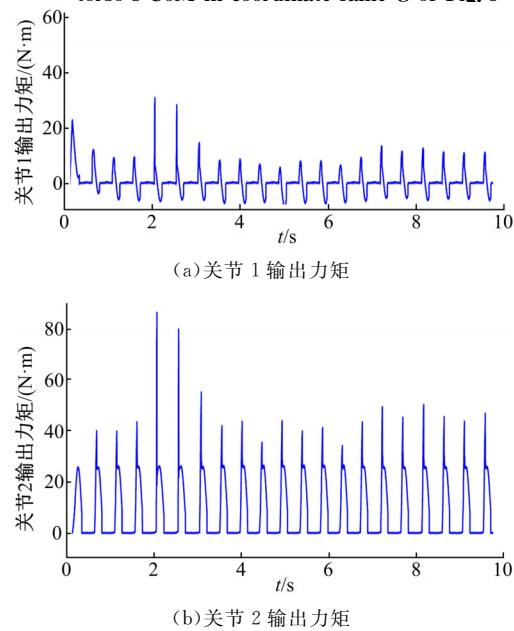


图 9 躯干质心在图 8 坐标系 O 中 x 方向速度、 y 方向的位置曲线以及俯仰角位移曲线

Fig. 9 Velocity, position, pitch angle curves of robot torso's CoM in coordinate fame O of Fig. 8



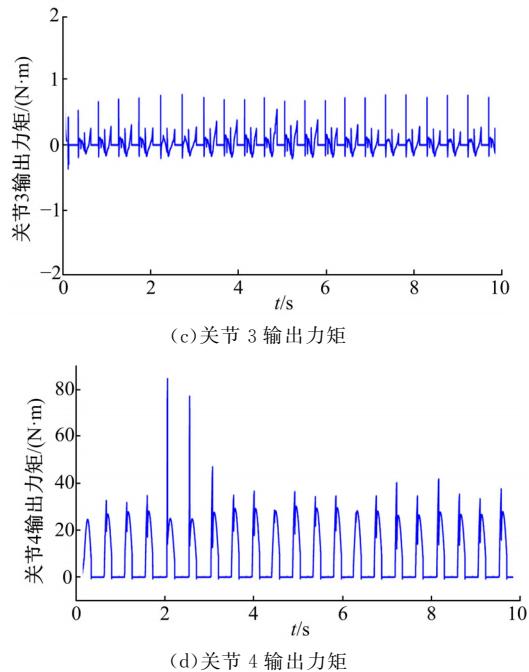


图 10 实验过程中 4 个关节的力矩曲线, 其中关节 3 在支撑相时作为被动关节而在腾空相时作为主动关节

Fig. 10 Torques on four joints, Joint 3 is a passive joint during supporting phase and an active joint in flying phase

假设意味着躯干与腿的质量比必须非常大, 实验中仿真模型躯干与腿的质量比达到了 500 : 1。

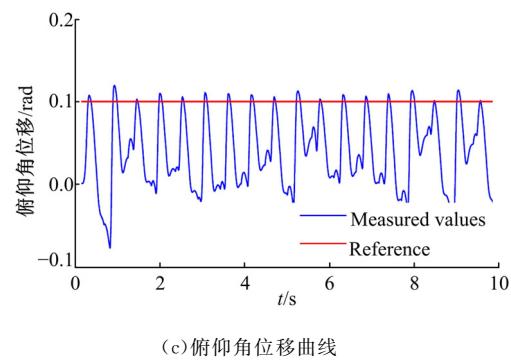
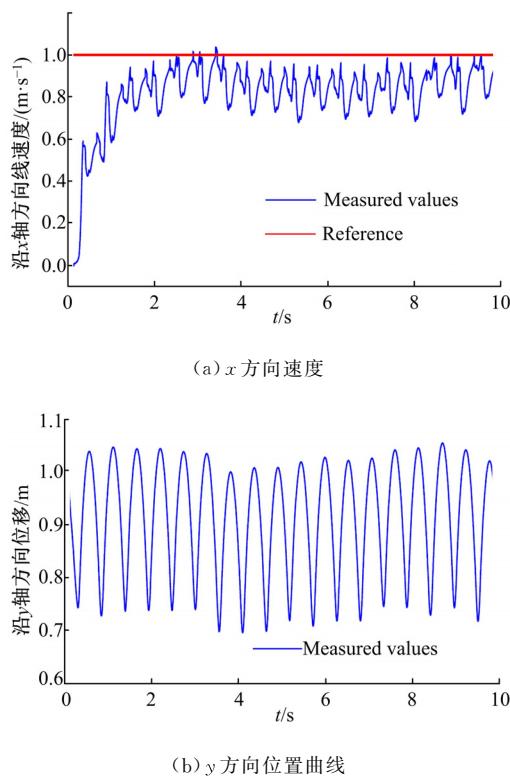


图 11 躯干与腿质量比为 5 : 1 的情况下, 跳跃控制实验中 x 方向速度、y 方向的位置曲线以及俯仰角位移曲线

Fig. 11 Velocity, position and pitch angle curves of robot torso's CoM with torso/leg ratio of 5 : 1

然而这一点在实际系统中非常难以实现。为了使研究更加接近实际情况, 将仿真模型中躯干与腿的质量比减小到了 10 : 1, 即躯干质量为 5 kg, 腿部每个杆件的质量为 0.5 kg。在这种情况下, 腾空相时腿的摆动对躯干的影响便无法被忽略。为了应对摆动腿导致的躯干转动而导致机器人着地时俯仰角过大, 将机器人起跳的俯仰角(θ_b)设为 0.1 rad。

另外, 腿部的质量增加带来的另一个影响是在运动过程中分散在腿部的能量无法忽略。因此我们提高了跳跃过程的总能量输入(h_d)来补偿分散在腿部的能量。测试地形与上节相同, 由垂直落差 2、3、4 cm 的起伏构成。仿真实验中所使用的参数值为(躯干与腿的质量比为 5 : 1): k_{sz} 为 1100 N · m/rad, k_{dx} 为 29 N · m/(rad · s⁻¹), μ_{xy} 为 0.1, μ_{zy} (压缩阶段) 为 0.195, μ_{zy} (释放阶段) 为 0.195, k_v 为 80 N/(m · s⁻¹), k_{SL} 为 0.11 m/(m · s⁻¹)。机器人质心在地面坐标系 O 中(图 8)沿 x 方向的运动速度, 以及沿 y 方向和 z 方向的位移与角位移曲线如图 11 所示。从图中的俯仰角曲线可以看出, 机器人在连续跳跃过程中, 躯干在节律性俯仰, 这是由于躯干与腿部质量接近, 在腾空相时腿的摆动造成的。机器人前进方向的速度也有了较为明显的波动。不过机器人的运动仍然可以收敛到周期性运动, 没有出现发散的情况。该实验也证明了, 文中的方法在基本假设得不到满足的情况下, 仍然具有较强的鲁棒性。

仿真实验的视频可以访问以下链接进行观看: http://v.youku.com/v_show/id_

XMTQxNDEzNjQ3Ng==.html。

4 结束语

提出了一种基于虚拟模型以及能量规划的崎岖地形四足机器人平面跳跃控制方法。该方法通过对 Trot 步态的支撑相进行平面运动学建模，并通过虚拟模型实现躯干质心平面内三个方向运动的解耦控制。这一方法具备以下特点：①在支撑相中，利用了支撑腿四个关节中的三个关节作为主动关节，一个作为被动关节，及前腿髋关节处于放松状态，可以有效降低了由于控制不精确带来的系统内耗，降低了特定关节的输出力矩，因此也可以作为特定关节故障发生时的容错控制策略。另外，基于主动变阻抗控制的方法，可非常方便地与被动储能环节实现对接，以实现低能耗的奔跑运动；②在跳跃过程控制中无需对步态的支撑相运动做出具体的规划，而是通过控制律生成运动，自主适应地形。因此，在遇到地形突变时，步态周期会自动发生变化；③最后打破躯干/腿质量比极大的假设，对文中所提方法进行了鲁棒性验证，在调整部分参数后，该方法依然能够控制机器人进行跳跃运动和地形适应，这也证明了该方法具有很高的工程可实现性。

参考文献：

- [1] Kajita S, Espiau B. Legged Robots [M]. Berlin: Springer, 2008: 361-389.
- [2] Li Yi-bin, Li Bin, Ruan Jiu-hong, et al. Research of mammal bionic quadruped robots: a review[C]// IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Qingdao, China, 2011: 166-171.
- [3] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Big-dog, the rough-terrain quadruped robot[C]// Proceedings of the 17th World Congress. Seoul: International Federation of Automatic Control, 2008, 17 (1): 10822-10825.
- [4] Bloss R. Robot walks on all four legs and carries a heavy load[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2012, 39(5): 524-525.
- [5] Semini C. HyQ-Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot[D]. Genoa, Italy: University of Genoa, 2010.
- [6] Cho J, Kim J T, Park S, et al. Dynamic walking of JINPOONG on the uneven terrain[C]// The 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Jeju, 2013: 468-469.
- [7] 柴汇, 孟健, 荣学文, 等. 高性能液压驱动四足机器人 SCalf 的设计与实现[J]. 机器人, 2014, 36(4): 385-391.
- [8] Raibert M H. Legged Robots that Balance [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1986.
- [9] Ahmadi M, Buehler M. Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg compliance[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(1): 96-104.
- [10] Sato A, Buehler M. A planar hopping robot with one actuator: design, simulation, and experimental results [C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, 2004: 3540-3545.
- [11] Smith J A, Poulakakis I. Rotary gallop in the untethered quadrupedal robot scout II [C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, 2004.
- [12] Ananthanarayanan A, Azadi M, Kim S. Towards a bio-inspired leg design for high-speed running[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(4): 913-929.
- [13] Valenzuela A K, Kim S. Optimally scaled hip-force planning: a control approach for quadrupedal running [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), St Paul: IEEE, 2012: 1901-1907.
- [14] Boston Dynamics. CHEETAH-Fastest legged robot [EB/OL]. [2012-09-05]. http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html.
- [15] Ackerman E. Whoa: Boston Dynamics announces new wildCat quadruped robot [EB/OL]. [2013-10-04]. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/whoa-boston-dynamics-announces-new-wildcat-quadruped>.
- [16] Robert F. Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary Stair-Climbing[D]. Montréal, Canada: McGill University, 1999.
- [17] Shkolnik A, Levashov M, Manchester I R, et al. Bounding on rough terrain with the LittleDog robot [J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 30(2): 192-215.
- [18] Hodgins J K, Raibert M. Adjusting step length for rough terrain locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 289-298.
- [19] Palmer L R, Orin D E. Quadrupedal running at high speed over uneven terrain[C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), San Diego: IEEE, 2007: 303-308.