DOI: 10.3901/JME.2020.02.210

面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法*

周 坤¹ 李 川¹ 李 超¹ 朱秋国^{1,2}

(1. 浙江大学智能系统与控制研究所 杭州 310027;

2. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 针对四足机器人在非结构化环境下的自适应稳定行走问题, 提出一种面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法。采用爬行步态, 基于零力矩点(Zero moment point, ZMP)稳定性判据进行在线轨迹规划。通过摆动腿的落地规划和感知策略估计未知地形的参数, 实时调整各支撑腿的长度以控制机器人躯体的位置和姿态与当前地形相匹配, 实现四足机器人对于未知地形高度和坡度变化的自适应。试验结果表明, 四足机器人能够在满足稳定性的前提下, 对未知复杂地形具有良好的适应能力, 验证了该方法的有效性与可靠性。

关键词: 四足机器人; 未知复杂地形; 运动规划; 零力矩点

中图分类号: TG156

Motion Planning Method for Quadruped Robots Walking on Unknown Rough Terrain

ZHOU Kun¹ LI Chuan¹ LI Chao¹ ZHU Qiuguo^{1,2}

(1. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: To deal with the adaptive and stable walking problem in the unstructured environment for the quadruped robot, a motion planning method faced to the unknown rough terrain is proposed for the quadruped robot. The walk gait is adopted, and the online trajectory planning is carried out based on the stability criterion zero moment point (ZMP). The parameters of the unknown terrain are estimated through the touchdown planning of the swinging leg and the perception strategy. Then, the length of each support leg can be adjusted in real time to control the position and posture of the trunk according to the current terrain, in order that the quadruped robot can adapt to the change of height and slope of the unknown terrain. Experimental results show that the robot can obtain good adaptability to the unknown rough terrain and satisfy the stability, which proves the validity and reliability of the proposed method.

Key words: quadruped robot; unknown rough terrain; motion planning; zero moment point

0 前言

腿足机器人是一种模仿陆生哺乳动物步态运动的机器人类型, 与轮履式机器人和躯干式机器人相比, 腿足机器人具有优异的运动能力, 几乎可以达到陆地上的任何地方^[1]。其中, 四足机器人是腿足机器人中的主要形式之一, 综合了运动稳定性和快速性等优势, 具有较强的地形环境适应能力和负载能力, 在安防巡检、物资运输、勘探侦查、以及太空探索等非结构化环境下具有较好的应用前景。

自 20 世纪 80 年代以来, 国外先后诞生了一批先进的四足机器人。其中最为典型的机器人当属美国波士顿动力公司研制的四足机器人 BigDog^[2-3]。该机器人具有丰富的运动多样性和强大的环境适应性, 能够适应山地、丛林、斜坡以及冰雪路面等复杂地形。之后, 波士顿动力公司又推出了 LS3、WildCat、Spot 和 Spotmini 等更先进的四足机器人, 取得了举世瞩目的成就。此后, 在面向复杂环境地形的适应性成为了机器人领域的研究热点。

在此之前, 对四足机器人的研究主要集中在静态步态运动规划及其稳定性方面, 即机器人的重心(Center of gravity, CoG)总是落在支撑腿构成的多边形内。早在 1967 年, McGHEE^[4]研制了世界上首台采用计算机控制的四足机器人 Phony Pony, 精确描

* 国家自然科学基金(51405430, 61473258, U150921)和浙江省公益技术(2016C33G2010137)资助项目。20181215 收到初稿, 20190603 收到修改稿

述了四足机器人的静态步态数学模型, 分析了静态步态在采用不同摆腿顺序下的稳定性^[5]。然而, 这项研究只考虑了四足机器人在平整路面上的情况, 不能适用于复杂地形。在面向复杂地形下的四足机器人运动控制中, 为确保机器人运动的稳定性, 大多数研究主要采用静态步态以提升复杂地形通行的成功率, 因此运动规划大多依赖于地形的先验知识, 通过提前规划质心的轨迹和合适的落脚点来完成的。基于 CoG 静态稳定性判据, REBULA 等^[6]采用四足移动形式规划质心轨迹; PONGAS 等^[7]和 KOLTER 等^[8]分别采用数字“8”模式和支撑双三角形规划质心轨迹并实现爬行步态; BUCHLI 等^[9]采用关键斜对角线替代支撑双三角形实现执行轨迹规划; NEUHAUS 等^[10]提出一种准静态步态实现复杂地形下快速通行。相对于 CoG 静态稳定性判据, 零力矩点(Zero moment point, ZMP)是一种准动态的稳定性判据等^[16]。基于 ZMP 判据, KALAKRISHNAN^[11]采用凸二次型规划方法同时生成 ZMP 轨迹与质心轨迹实现了复杂地形的稳定通行; ZUCKER 等^[12]采用协变哈密顿优化与运动规划算法进行质心轨迹以及摆动腿轨迹优化实现了障碍翻越以及高台阶攀爬。

除此之外, FOCCHI 等^[13]采用中枢模式发生器(Central pattern generator, CPG)方法生成对角小跑步态, 并提出反射机制实现 HyQ 机器人的稳定通过未知台阶地形; GEHRING 等^[14]采用串联弹性驱动器(Serial elastic actuator, SEA), 提出虚拟力分配方法实现 StarlETH 机器人的对角小跑步态以适应未知地形; 张国腾等^[15]采用虚拟模型控制(Virtual modal control, VMC)进行对角小跑步态控制, 实现跨越不平坦地形的仿真。然而, 以上研究仍然面向较平坦的未知地形, 很难适应未知的复杂地形。

针对上述存在的问题, 本文提出一种面向未知复杂地形的四足机器人运动规划方法, 通过摆动腿试探落地感知未知地形, 最终通过爬行步态实现四足机器人在未知复杂地形中的自适应稳定行走。

1 四足机器人模型

本文采用的四足机器人简化模型如图 1 所示。该模型包括机器人的躯体和四条腿, 其中每条腿含有三个关节自由度, 分别是滚动髋关节、俯仰髋关节、以及俯仰膝关节。图中, L_x 为前后俯仰髋关节沿 x 轴的距离, L_y 为左右滚动髋关节沿 y 轴的距离, L_1 为髋部连杆长度, L_2 为大腿连杆长度, L_3 为小腿连杆长度。

图 1 四足机器人连杆关节模型

为了具体描述四足机器人面向未知复杂地形的运动规划方法, 首先定义如下几种坐标系。

(1) 世界坐标系 Σ_w 。 X_w 指向机器人初始时刻水平前向方向, Y_w 指向机器人初始时刻水平向左, Z_w 沿重力方向, 且方向相反。

(2) 躯体重心坐标系 Σ_{WB} 。坐标系固连在机器人躯体质心, 坐标轴平行于世界坐标系 Σ_w 。

(3) 躯体局部坐标系 Σ_B 。坐标系固连在机器人躯体质心, X_B 平行于躯体指向前向方向, Y_B 平行于躯体指向左侧方向, Z_B 垂直于躯体向上。则 Σ_B 相对于 Σ_{WB} 的旋转矩阵采用 Z-Y-X 欧拉角表示如下

$${}^{WB}_B R = R_Z(\theta_{Yaw}) R_Y(\theta_{Pitch}) R_X(\theta_{Roll}) \quad (1)$$

式中, θ_{Yaw} 、 θ_{Pitch} 、 θ_{Roll} 分别为 Σ_B 相对于 Σ_{WB} 绕着动坐标轴 Z 轴、 Y 轴、 X 轴的偏摆角、俯仰角、滚动角, R_Z 、 R_Y 、 R_X 分别为绕参考坐标系 Z 轴、 Y 轴、 X 轴的旋转矩阵。

(4) 髋关节世界坐标系 Σ_{WH} 。坐标系固连在机器人髋关节, 坐标轴平行于世界坐标系 Σ_w 。

(5) 髋关节躯体重心坐标系 Σ_{BH} 。坐标系固连在机器人髋关节, 坐标轴平行于躯体局部坐标系 Σ_B 。

2 身体轨迹规划方法

本文采用爬行步态开展面向复杂地形的四足机器人运动规划研究。按机器人的摆动腿动作时序, 可将一个完整的爬行步态运动周期划分为 6 个状态相。在每个状态相的开始时刻, 根据当前支撑足的位置进行实时轨迹规划。因此, 在一个完整的步态周期内可得到 6 段光滑、稳定的质心轨迹。由此可以得到机器人躯体相对于支撑足位姿信息, 从而生成支撑腿各关节的运动轨迹, 以驱动机器人质心沿着期望轨迹实现运动。

2.1 爬行步态

爬行步态在任意时刻至少存在三条腿支撑, 甚至四腿支撑, 所以一直有稳定支撑域存在, 属于静态步态。McGHEE 等^[5]分析指出爬行步态是 6 种静

态步态中最稳定的,其四条腿的摆腿顺序如下:前左腿(Front left, FL)→后右腿(Hind right, HR)→前右腿(Front right, FR)→后左腿(Hind left, HL)。考虑到当四足机器人处于前腿落地、后腿抬起时刻的支撑域由后侧三角形切换到斜对角前侧三角形,因此在斜对角两条腿的摆动相切换时增加四足支撑相以提高稳定性。同时,为消除不必要的四足支撑相时间,以兼顾快速性要求,同侧两条腿前腿摆动相紧跟后腿摆动相。由以上分析可知,作为一种静态稳定步态,爬行步态具有更加强大的地形适应能力,可以适用于更加复杂的崎岖地形。

图2所示为四足机器人爬行步态时序图,实线代表腿的支撑相,实线之间的空白代表腿的摆动相。红色虚线方框代表一个完整的步态周期。蓝色虚线箭头代表四条腿的摆动时序,结合加粗的实线表征一个完整的步态时序。

图2 四足机器人爬行步态时序图

根据爬行步态的步态特性,将它的一个周期划分为6个状态相:① FL摆动相,② 四足支撑相,③ HR摆动相,④ FR摆动相,⑤ 四足支撑相,⑥ HL摆动相。引入基于时间触发和事件触发相结合的状态机进行步态控制,在单腿摆动相,摆动腿落地触发下一状态相;在四足支撑相,以当前所规划的四足支撑相的时间触发下一状态相。通过监控四足机器人每条腿的状态,实时输出状态相切换信号,从而实现爬行步态。

2.2 稳定性判据

VUKOBRATOVIĆ 等^[16]提出零力矩点理论,并将其用作腿足机器人稳定性的判据。相对于传统的CoG,静态稳定性判据,ZMP判据是一种动态稳定性判据,充分考虑了机器人的重力和惯性力组成的合力对稳定性的影响。研究表明,如果ZMP始终位于机器人足底与地面所形成的支撑多边形内,机器人将保证其步行的稳定性,否则机器人将发生摔倒。

本文采用“桌子-小车”模型^[17]近似计算ZMP,考虑 x 方向的运动

$$x_{ZMP} = x - \frac{z}{g} \ddot{x} \quad (2)$$

式中, g 是重力加速度。

同理可得 y 方向的ZMP位置 y_{ZMP} 。

2.3 支撑域

图3所示为四足机器人的左侧腿摆动时形成的右侧支撑域,该过程中前右腿FR和后右腿HR均处于支撑状态。当后左腿HL摆动时,前左腿FL与右侧两支撑腿构成支撑三角形;当前左腿FL摆动时,后左腿HL与右侧两支撑腿构成支撑三角形,两个支撑三角形构成公有支撑三角形。

图3 爬行步态的右侧支撑域

为了降低四足机器人运动时摔倒的风险,ZMP应该落在支撑域的内部。本文考虑到稳定裕度,即ZMP离支撑域边沿需大于一定的距离,以留有足够的稳定余量,因此取缩小后的公有支撑三角形为支撑域,如图3所示。经实物机器人调试,缩放比例选取80%,在每时每刻,都需要保证ZMP位于支撑域内。

2.4 轨迹规划

四足机器人通过设计状态机以应对不同状态相的轨迹生成与运动控制,机器人的状态相一旦发生变化,如摆动腿落地或四足支撑相结束,则需立刻对当前新状态相进行轨迹规划。轨迹规划分为前向轨迹规划和侧向轨迹规划。

2.4.1 前向CoG轨迹规划

为提升四足机器人前向运动的稳定性,前向CoG轨迹采取匀速运动,则式(2)改为如下形式

$$x_{ZMP}(t) = x(t) = V_d \cdot t \quad (3)$$

式中, V_d 为期望速度。此时ZMP与CoG在 x 方向的运动轨迹重合,不仅ZMP位于支撑域内部,CoG也位于支撑域内部,充分保证了机器人的前向稳定性。

当四足机器人处于加速或减速阶段时,采用五次样条对当前前向CoG轨迹进行规划

$$x(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (4)$$

式中,多项式系数 $[a, b, c, d, e, f]$ 决定了轨迹的形状,且约束条件如下

$$\begin{cases} x_i(0) = x_{i-1}(T_{i-1}) \\ \dot{x}_i(0) = \dot{x}_{i-1}(T_{i-1}) \\ \ddot{x}_i(0) = \ddot{x}_{i-1}(T_{i-1}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, 下标 i 代表不同的状态相, T 代表状态相的持续时间。通过上述约束条件, 将严格保证样条段的位置、速度以及加速度的连续性。

2.4.2 侧向 CoG 轨迹规划

当四足机器人处于左侧腿摆动相时, 支撑域为右侧支撑三角形; 当四足机器人处于右侧腿摆动相时, 支撑域为左侧支撑三角形。爬行步态中四足机器人从一侧支撑三角形过渡到另一侧支撑三角形时稳定余量最小, 故引入了四足支撑相。作为最稳定的支撑相, 四足支撑相使得机器人能够在两侧支撑三角形之间实现平稳切换。

由于四足支撑相期间需要进行支撑三角形的侧向切换, 因此需要对侧向 CoG 进行轨迹规划, 而在四个单腿摆动相则不做侧向运动。通过引入侧向运动, 可有效增加单腿摆动相时 ZMP 距离斜对角线两支撑腿的稳定余量, 从而提高四足机器人在两侧支撑三角形之间过渡的稳定性。

以四足机器人从右侧支撑三角形过渡到左侧支撑三角形的侧向 CoG 轨迹为例, 规划如下

$$y(t) = \begin{cases} y_R & \text{左侧腿摆动} \\ \frac{6}{T^5}(y_L - y_R)t^5 - \frac{15}{T^4}(y_L - y_R)t^4 + \frac{10}{T^3}(y_L - y_R)t^3 + y_R & \text{四足支撑相} \\ y_L & \text{右侧腿摆动} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_R = y_{Rin} + (1 - k_y)(y_{Lin} - y_{Rin})/2 \\ y_L = y_{Lin} - (1 - k_y)(y_{Lin} - y_{Rin})/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, y_{Rin} 为右侧支撑三角形内心的 y 坐标, y_{Lin} 为左侧支撑三角形内心的 y 坐标, k_y 为侧向运动幅度调整参数。

由式(6)可知, 侧向 CoG 运动轨迹光滑, 保证了轨迹的加速度是连续的。由式(7)可知, 侧向运动的幅度为 $k_y(y_{Lin} - y_{Rin})$, 改变参数 k_y 的大小, 可以调整侧向运动幅度。根据前向运动速度, 在运动规划阶段实时调整 k_y , 若提高前向速度, 则调小 k_y 以降低侧向运动幅度, 保证 ZMP 不超出支撑域的侧向边界。

图 4 所示为四足机器人在一个完整的爬行步态运动周期内的 CoG 轨迹与 ZMP 轨迹, 其中 Rin 表示右侧支撑三角形的内心, Lin 表示左侧支撑三角形的内心。由图可知, 在单腿摆动相阶段, CoG 轨迹与 ZMP 轨迹经过支撑三角形的内心; 在四足支撑相阶段, CoG 轨迹与 ZMP 轨迹在两侧支撑三角形之间实现平稳过渡。在整个爬行运动过程中, CoG 与 ZMP 均位于支撑域的内部, 且留有足够的稳定余量。

图 4 $k_y=1$ 时四足机器人 CoG 轨迹与 ZMP 轨迹示意图

3 未知复杂地形下自适应控制方法

3.1 未知地形感知策略

四足机器人通过离散落脚点与地面接触, 依靠支撑腿支撑躯体, 依靠腿部的摆动离开当前落脚点而进入下一个落脚点, 以此实现四足的移动行走。在不依赖于外部感知系统的情况下, 四足机器人可以通过规划摆动腿轨迹进行落脚点地形试探, 当机器人检测到触底之后即可计算出新落脚点相对于机器人躯体的位置, 并以此落脚点表征当前的未知地形, 实现四足机器人对未知地形的检测。

根据机器人的运动时序实时监控状态机, 一旦检测到摆动腿落地, 此时四足机器人便处于短暂的四足支撑相, 根据各关节角度以及躯体姿态信息, 通过计算摆动腿落地生成的落脚点相对于其余三个支撑腿落脚点的位置, 四足机器人即可获得当前支撑腿足端所处于的未知地形的参数。

在摆动腿落地之后的新状态相内, 根据获取的地形参数, 调整各支撑腿长度以控制四足机器人躯体质心高度与躯体姿态, 使得机器人能够被动适应地形高度以及坡度的变化, 实现四足机器人在未知复杂地形上的自适应稳定行走。

3.2 躯体质心高度自适应控制

地形的高度是表征地形信息的重要参数之一。

地形的高度变化将直接导致摆动腿的落脚点位置在垂直方向上的位置发生变化。四足机器人的腿运动空间受到物理限制, 假设机器人在世界坐标系下以恒定高度移动行走, 在遇到复杂地形时地面的高度变化容易造成机器人的腿部足端超过运动范围, 因此需要控制腿部工作空间的基准随着地形高度的变化而变化。也即, 四足机器人的质心高度需要自适应地形的高度变化。

本文定义四足机器人的质心高度即为躯体质心

相对于支撑腿足端在竖直方向的相对高度,则四足机器人的质心高度在躯体世界坐标系 Σ_W 下的表示为

$$H = \frac{i_{FL} \cdot {}^{WB}z_{FL} + i_{FR} \cdot {}^{WB}z_{FR} + i_{HL} \cdot {}^{WB}z_{HL} + i_{HR} \cdot {}^{WB}z_{HR}}{i_{FL} + i_{FR} + i_{HL} + i_{HR}} \quad (8)$$

式中,下标 FL、FR、HL 和 HR 分别表示四条腿的序号, ${}^{WB}z$ 表示该单腿的足端在躯体世界坐标系 Σ_{WB} 下沿 Z_{WB} 方向即竖直方向的位置, i 表示该单腿的当前状态, $i=1$ 表示该单腿处于支撑状态, $i=0$ 表示该单腿处于摆动状态。

本文将四足机器人躯体质心高度对于未知地形高度变化的自适应控制问题转化为四足机器人身体高度的恒值控制问题,通过控制四足机器人身体高度恒定,即四足机器人躯体质心相对于支撑腿足端的相对高度恒定,实现了四足机器人的躯体质心高度对于未知地形高度变化的自适应。

根据四足机器人腿部各连杆长度以及各关节角活动范围,可得到腿工作空间,考虑到面向未知地形存在摆动腿提前以及滞后落地的情况,合理设定期望的机器人身体高度 H_d 。

同样需要监控状态机,一旦检测到有摆动腿接触地面,四足机器人即处于瞬时的四足支撑状态相,计算此时四足机器人的身体高度 H ,则式(8)改写为

$$H = -\left({}^{WB}z_{FL} + {}^{WB}z_{FR} + {}^{WB}z_{HL} + {}^{WB}z_{HR}\right)/4 \quad (8)$$

将其与期望的四足机器人身体高度 H_d 做比较,得到高度控制增量 ΔH 。在摆动腿落地之后的新状态相内,根据所得的高度控制增量 ΔH 调整各支撑腿的竖直高度以实现四足机器人的躯体质心高度对于未知地形高度变化的自适应,流程图如图 5 所示。

图 5 躯体质心高度自适应控制流程图

3.3 躯体姿态自适应控制

地形的坡度是表征地形信息的重要参数之一。

在面向具有坡度的地形时,四足机器人的躯体需要保持一定的姿态以适应坡度地形,一般可以采用水平的姿态或者平行于斜面的姿态。以上斜坡为例,若四足机器人的躯体采用水平姿态,会造成机器人的后腿的运动范围过大而前腿运动范围过小,当地形坡度变大,则更容易造成四足机器人后腿足端超出腿工作空间,而前腿各相邻连杆之间发生碰撞,若四足机器人的躯体采用平行于斜面的自适应姿态,则机器人前后腿的运动范围趋于一致,不仅能够保证腿部工作空间

内且保留有足够的余量,以应对可能出现的未知地形发生突变的情况。

本文通过躯体姿态自适应控制方法,使四足机器人的躯体以平行于地形斜面的自适应姿态爬行通过未知复杂地形。

图 6 所示为四足机器人在前右腿 FR 摆动腿落地之后的未知地形坡度估计示意图, n 为在躯体世界坐标系 Σ_{WB} 下当前支撑腿足端所处的地形斜面的单位法矢量,则有如下关系

$$n = R_Z(\theta_{Yaw_d}) R_Y(\theta_{Pitch_d}) R_X(\theta_{Roll_d}) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, $(\theta_{Roll_d}, \theta_{Pitch_d})$ 为待求解的未知地形的坡度估计值, θ_{Yaw_d} 为四足机器人期望的偏摆角。展开绕 Y 轴、 X 轴的旋转矩阵 $R_Y(\theta_{Pitch_d})$ 、 $R_X(\theta_{Roll_d})$ 可推导出未知地形的坡度估计方程

$$\begin{cases} \theta_{Roll_d} = -\arcsin \frac{\vec{N}_y}{\vec{N}} \\ \theta_{Pitch_d} = \arctan \frac{\vec{N}_x}{\vec{N}_z} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $N = R_Z(Yaw)^T n$ 。

图 6 未知地形的坡度估计示意图

当四足机器人面向近平坦的地形时,考虑到地形的坡度变化不大,四足机器人的躯体完全可以采用水平姿态。本文设置未知地形的坡度估计值 $(\theta_{Roll_d}, \theta_{Pitch_d})$ 的阈值为 4° , 只有当地形的坡度大于阈值时,四足机器人的躯体姿态才会进行自适应匹配坡度,否则将一直保持水平姿态。

同样需要监控状态机,一旦检测到有摆动腿接触地面,四足机器人根据式(11)进行未知地形的坡度估计。在摆动腿落地之后的新状态相内,根据所得的未知地形的坡度估计值 $(\theta_{Roll_d}, \theta_{Pitch_d})$ 调整各支撑腿的相对长度以实现四足机器人的躯体姿态对于未知地形坡度变化的自适应。

3.4 摆动腿足端轨迹规划

本文研究四足机器人面向未知地形的自适应行

走, 将摆动腿的摆动相前半段规划为上升阶段而把后半段规划为下落阶段, 摆动腿足端轨迹采用“竖直抬起-跨步-竖直下落”策略, 将四足机器人规划所得的摆动相期望持续时间设置为 T , 设置参数 α_1 、 α_2 为不同阶段时间系数: 当 $0 \leq t < \alpha_1 \cdot T$ 时, 摆动腿处于竖直抬起阶段, 此时摆动腿只做竖直抬起运动; 当 $\alpha_1 \cdot T \leq t < (1-\alpha_2) \cdot T$ 时, 摆动腿处于跨步阶段, 此时摆动腿的足端距离地面有一定的安全高度, 确保不会与地面发生碰撞, 进行前向和侧向的跨步运动; 当 $t \geq (1-\alpha_2) \cdot T$ 时, 摆动腿处于竖直下落阶段, 此时摆动腿只做竖直下落运动。进一步, 本文规划在竖直下落阶段进行摆动腿足端触地并结束摆动相, 考虑到当足端触地发生在 $(1-\alpha_2) \cdot T \leq t < T$ 即摆动腿提前着地, 或者足端触地发生在 $t > T$ 即摆动腿滞后着地, 需要对此阶段的轨迹规划做特殊处理。

为方便描述摆动腿足端轨迹的规划方法, 定义足端世界坐标系 Σ_{WF} , 坐标系的原点位于摆动腿的抬脚点, 坐标轴平行于世界坐标系 Σ_w 。本文在足端世界坐标系 Σ_{WF} 下沿 x 方向、 y 方向、 z 方向分别进行摆动腿足端轨迹的规划。其中, x 方向的轨迹规划实现摆动腿在前向方向的摆动, y 方向的轨迹规划实现了摆动腿在侧向方向的摆动, 而 z 方向的轨迹规划实现了摆动腿在竖直方向的跨步。轨迹规划的数学方程如下。

(1) 前向方向

$$x_F(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \alpha_1 \cdot T \\ \frac{6}{T_x^5} \cdot S_x \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^5 - \frac{15}{T_x^4} \cdot S_x \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^4 & \alpha_1 \cdot T \leq t < (1-\alpha_2) \cdot T + \\ \frac{10}{T_x^3} \cdot S_x \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^3, & \\ S_x & t \geq (1-\alpha_2) \cdot T \end{cases} \quad (12)$$

式中, $T_x = (1-\alpha_1-\alpha_2) \cdot T$, S_x 表示摆动腿在前向方向的跨步步长。

(2) 侧向方向

$$y_F(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \alpha_1 \cdot T \\ \frac{6}{T_y^5} \cdot S_y \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^5 - \frac{15}{T_y^4} \cdot S_y \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^4 & \alpha_1 \cdot T \leq t < (1-\alpha_2) \cdot T + \\ \frac{10}{T_y^3} \cdot S_y \cdot (t - \alpha_1 \cdot T)^3, & \\ S_y & t \geq (1-\alpha_2) \cdot T \end{cases} \quad (13)$$

式中, $T_y = (1-\alpha_1-\alpha_2) \cdot T$, S_y 表示摆动腿在前向方向的跨步步长。

(3) 竖直方向

$$z_F(t) = \begin{cases} \frac{6}{(T/2)^5} \cdot H \cdot t^5 - \frac{15}{(T/2)^4} \cdot H \cdot t^4 + \frac{10}{(T/2)^3} \cdot H \cdot t^3 - \frac{0.5}{T_z^3} \cdot v_d \cdot (t - \frac{T}{2})^4 + \frac{1}{T_z^2} \cdot v_d \cdot (t - \frac{T}{2})^3 + H & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ v_d \cdot [t - (1-\alpha_2) \cdot T] + \frac{1}{2} \cdot v_d \cdot T_z + H, & \frac{T}{2} \leq t < (1-\alpha_2) \cdot T \\ \frac{1}{2} \cdot v_d \cdot T_z + H, & t \geq (1-\alpha_2) \cdot T \end{cases} \quad (14)$$

式中, H 表示摆动腿的跨步高度, $T_z = \left(\frac{1}{2} - \alpha_2\right) \cdot T$,

$$v_d = -\frac{4}{1+2 \cdot \alpha_2} \cdot \frac{H}{T}。$$

本文在摆动腿竖直下落阶段规划足端触地并结束整个摆动相。在此阶段, 摆动腿做竖直下落运动, 且足端轨迹规划为匀速运动, 即足端以恒定的速度 v_d 进行竖直下落直至触地完成摆动相。通过改变时间参数 α_2 , 可以调整足端触地时的速度, 使得足端以合适的速度落地以减少与地面碰撞产生的冲击造成对稳定性的影响。

由式(12)~(14)可知, 摆动腿足端轨迹的位置、速度以及加速度均连续, 图 7 所示的足端世界坐标系 Σ_{WF} 下面向未知复杂地形的 $X_{WF}Z_{WF}$ 平面内的摆动腿足端轨迹示意图, 类似可以得到 $Y_{WF}Z_{WF}$ 平面内的摆动腿足端轨迹示意图。图中 A 点为抬脚点, D 点为期望落脚点, 其竖直高度与抬脚点一致, AD 表示摆动腿在前向方向的跨步步长, AB 段轨迹表示摆动腿竖直抬起阶段, BC 段轨迹表示摆动腿跨步阶

图 7 $X_{WF}Z_{WF}$ 平面内摆动腿足端轨迹示意图

段, CE 段轨迹表示摆动腿竖直下落阶段, 其中 CD 段轨迹考虑了摆动腿提前落地的情况, DE 段轨迹考虑了摆动腿滞后落地的情况。

4 试验

为验证本文运动规划方法的有效性, 本文在四足机器人“赤兔”上开展了试验。该四足机器人采用电机驱动方式, 每条腿有 3 个关节自由度, 分别为髋俯仰、髋滚动和膝俯仰。躯干装有惯性单元 Xsens IMU, 运动控制主机通过 EtherCAT 总线与各关节的驱动器进行通讯。机器人主要参数如表 1 所示。试验测试的地形选用单个台阶和楼梯, 以此表征典型的复杂地形。

表 1 四足机器人的结构参数

参数	定义	数值/m
L_x	前后俯仰髋关节距离	0.6
L_y	左右滚动髋关节距离	0.178
L_1	髋部连杆长度	0.068
L_2	大腿连杆长度	0.3
L_3	小腿连杆长度	0.276

4.1 面向台阶地形的自适应行走

本试验选取的台阶作为测试地形高 6 cm。初始时刻四足机器人处于水平地面, 四足机器人的身体控制高度恒为 0.4 m, 躯体以水平姿态平稳通过台阶地形, 最终停止在水平地面上。在爬行运动过程中, 机器人左侧两条腿始终行走在水平地面上而右侧两条腿行走在台阶地形上。图 8 所示为四足机器人面向台阶地形的自适应行走试验过程。

图 9 所示为在面向台阶地形的自适应行走试验过程中四足机器人的身体高度。根据四足机器人的身体高度 H 的定义, 当摆动腿踏上 6 cm 高的台阶, 该条腿的竖直支撑高度减少了 6 cm, 则四足机器人的身体高度降低了 6/4 即 1.5 cm; 当摆动腿走下 6 cm 高的台阶, 该条腿的竖直支撑高度增加了 6 cm, 则四足机器人的身体高度增大了 6/4 即 1.5 cm。由图可知, 四足机器人的身体高度发生了两次突变, 代表了右侧的前腿和后腿依次通过台阶地形, 且每轮突变包括突然降低 1.5 cm 以及突然增大 1.5 cm, 分别代表了摆动腿踏上以及走下台阶的瞬间时刻。当四足机器人的摆动腿落地, 身体高度会因为未知地形高度的变化而发生突变, 在摆动腿落地之后的新状态相内, 四足机器人的身体高度能快速收敛到期望的恒定高度 0.4 m, 从而实现了四足机器人身体高度的恒值控制。换言之, 实现了四足机器人躯体质心高度对于台阶地形高度变化的自适应。

图 8 四足机器人面向台阶地形的自适应行走试验

图 9 四足机器人面向台阶地形的身体高度

图 10 和图 11 所示为在面向台阶地形的自适应行走试验过程中四足机器人的滚动角与俯仰角。本文为未知地形的坡度估计值 ($\theta_{Roll_d}, \theta_{Pitch_d}$) 设置了 4° 的阈值, 只有当地形坡度大于阈值, 四足机器人的躯体姿态才会进行自适应, 否则一直保持水平姿态, 所以在面向台阶这种坡度变化不大的地形行走试验过程中, 一直控制四足机器人躯体的滚动角与俯仰角均为 0° 。由图可知, 四足机器人的躯体姿态随着爬行步态的周期运动在期望的水平姿态附近来回波动, 机器人俯仰角的偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内, 而滚动角则因为四足机器人侧向齿轮间隙的存在造成偏差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内, 四足机器人实现了以水平姿态平稳通过台阶地形。

图 10 四足机器人面向台阶地形的滚动角

图 11 四足机器人面向台阶地形的俯仰角

4.2 面向楼梯地形的自适应行走

本试验选取五级台阶楼梯作为测试地形, 每级台阶高 6 cm、宽度 30 cm, 坡度为 11.3° 的。初始时刻四足机器人处于水平地面, 四足机器人的身体高度控制恒定为 0.45 m, 躯体以平行于地形斜面的自适应姿态平稳通过楼梯地形, 最终停止在水平高台上。图 12 所示为四足机器人面向楼梯地形的自适应行走试验过程。

图 12 四足机器人面向楼梯地形的自适应行走试验

图 13 所示为在面向楼梯地形的自适应行走试验过程中四足机器人的身体高度。当四足机器人的摆动腿落地, 身体高度会因为未知地形高度的变化而发生突变, 在摆动腿落地之后的新状态相内, 四足机器人的身体高度能快速收敛到期望的恒定高度 0.45 m, 从而实现了四足机器人身体高度的恒值控制。换言之, 实现了四足机器人躯体质心高度对于楼梯地形高度变化的自适应。

图 13 四足机器人面向楼梯地形的身体高度

图 14 所示为在面向楼梯地形的自适应行走试验过程中四足机器人的滚动角。本试验为未知地形的坡度估计值($\theta_{\text{Roll}_d}, \theta_{\text{Pitch}_d}$)设置了 4° 的阈值, 只有当地形坡度大于阈值, 四足机器人的躯体姿态才会进行自适应, 否则一直保持水平姿态, 所以在面向楼梯地形的自适应行走试验过程中, 一直控制四足机器人躯体的滚动角为 0° 。由图可知, 四足机器人躯体的滚动角姿态随着爬行步态的周期运动在期望的水平姿态附近来回波动, 因为四足机器人侧向齿轮间隙的存在造成滚动角偏差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内, 四足机器人实现了以水平滚动角姿态平稳通过楼梯地形。

图 14 四足机器人面向楼梯地形的滚动角

图 15 所示为在面向楼梯地形的自适应行走试

验过程中四足机器人的俯仰角。由图可知,四足机器人通过摆动腿的落地规划与未知地形感知策略获取未知地形的信息,所得的未知地形坡度估计值正确地表征了楼梯地形的坡度变化情况,当四足机器人完全行走在楼梯地形上,由于楼梯地形不是斜面,所以得到的俯仰角估计值与楼梯斜面坡度偏差约 $\pm 2^\circ$ 。由四足机器人俯仰角姿态的变化可以看出整个试验过程:四足机器人从水平地面逐步走上楼梯,直至第三个步态周期四足机器人才开始完全行走在楼梯上(躯体姿态从水平姿态逐步调整到平行于楼梯斜面的姿态);在第四到第五个步态周期内,四足机器人完全行走在楼梯上(躯体姿态平行于楼梯斜面);在第六到第七个步态周期内,四足机器人从楼梯逐步走上水平高台直至停止(躯体姿态从平行于楼梯斜面的姿态逐步调整到水平姿态),该试验过程一共经历了七个完整的步态周期。由图可知,四足机器人躯体的俯仰角姿态随着爬行步态的周期运动在期望的自适应姿态附近来回波动,四足机器人俯仰角的偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内,四足机器人实现了以自适应俯仰角姿态平稳通过楼梯地形。

图 15 四足机器人面向楼梯地形的俯仰角

5 结论

(1) 本文采用静态稳定的爬行步态以适应复杂地形,基于零力矩点动态稳定性判据,根据当前支撑域在线实现了四足机器人的身体轨迹规划,且生成的身体轨迹光滑稳定。

(2) 本文提出了一种感知策略获取地形信息以适应位置地形,基于感知检测所得的未知地形的高度和坡度信息,提出了四足机器人的躯体质心高度以及躯体姿态对未知复杂地形的自适应控制方法。为确保四足机器人顺利跨越未知复杂地形上,本文提出了一种摆动腿足端轨迹规划方法。

(3) 面向台阶地形的自适应行走试验结果验证了四足机器人躯体质心高度对未知地形高度变化的有效适应性,面向楼梯地形的自适应行走试验结果进一步验证了四足机器人躯体姿态对未知地形坡度变化的有效适应性,从而证明了本文所提的四足机器人运动规划方法能够有效应对未知复杂地形。本文方法也可应用于其他复杂地形,对于四足机器人从室内试验环境走向室外应用具有潜在价值。

参 考 文 献

- [1] RAIBERT M H. Legged robots that balance[M]. Cambridge: MIT Press, 1986.
- [2] BUEHLER M, PLAYTER R, RAIBERT M. Robots step outside[C]//International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines. Tokyo, Japan: Springer-Verlag, 2005: 1-4.
- [3] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[C]//Proceedings of the 17th International Federation of Automation Control, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008: 10822-10825.
- [4] McGHEE R B. Finite state control of quadruped locomotion[J]. Simulation, 1967, 9(3): 135-140.
- [5] McGHEE R B, FRANK A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits[J]. Mathematical Biosciences, 1968, 3: 331-351.
- [6] REBULA J R, NEUHAUS P D, BONNLANDER B V, et al. A controller for the littledog quadruped walking on rough terrain[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1467-1473.
- [7] PONGAS D, MISTRY M, SCHAAAL S. A robust quadruped walking gait for traversing rough terrain[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1474-1479.
- [8] KOLTER J Z, RODGERS M P, NG A Y. A control architecture for quadruped locomotion over rough terrain[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 811-818.
- [9] BUCHLI J, KALAKRISHNAN M, MISTRY M, et al. Compliant quadruped locomotion over rough terrain[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 814-820.
- [10] NEUHAUS P D, PRATT J E, JOHNSON M J. Comprehensive summary of the institute for human and machine cognition's experience with LittleDog[J]. The

- International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 216-235.
- [11] KALAKRISHNAN M, BUCHLI J, PASTOR P, et al. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 236-258.
- [12] ZUCKER M, RATLIFF N, STOLLE M, et al. Optimization and learning for rough terrain legged locomotion[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 175-191.
- [13] FOCCHI M, BARASUOL V, HAVOUTIS I, et al. Local reflex generation for obstacle negotiation in quadrupedal locomotion[C]//IEEE International Conference on Climbing Walking Robots. Singapore: World Scientific Publishing, 2013: 443-450.
- [14] GEHRING C, COROS S, HUTTER M, et al. Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 3287-3292.
- [15] 张国腾, 荣学文, 李贻斌, 等. 基于虚拟模型的四足机器人对角小跑步态控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(1): 64-74.
- ZHANG Guoteng, RONG Xuwen, LI Yibin, et al. Control of the quadrupedal trotting based on virtual model[J]. Robot, 2016, 38(1): 64-74.
- [16] VUKOBRATOVIĆ M, STEPANENKO J. On the stability of anthropomorphic systems[J]. Mathematical Biosciences, 1972, 15(1-2): 1-37.
- [17] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 1620-1626.

作者简介: 周坤, 男, 1992 年出生。主要研究方向为四足机器人运动规划与控制。

E-mail: zhokun586@126.com

朱秋国(通信作者), 男, 1982 年出生, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为仿生机器人, 机器智能。

E-mail: qgzhu@zju.edu.cn