

◎ 博士论坛 ◎

欠驱动两足步行机器人侧向稳定控制方法研究

绳涛,王剑,马宏绪

SHENG Tao, WANG Jian, MA Hong-xu

国防科技大学 机器人实验室,长沙 410073

Robot Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

E-mail: shengtao-2002@163.com

SHENG Tao, WANG Jian, MA Hong-xu. Lateral stabilization control of underactuated biped robot. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(3): 1-4.

Abstract: Lateral stabilization control of underactuated biped robot is presented in this paper. The main reason causing the instability of lateral motion is periods of sagittal and lateral motion are not identical. Then two strategies are brought out to stabilize the lateral motion. Step width control is adjusting the lateral period by controlling the lateral step position, then the periods of frontal and lateral tend to coincident and the robot gets stable. Lateral moment control is adding lateral moment at ankles to tracking the planning trajectory which makes the movement of frontal and lateral coincident. Simulations show that the underactuated biped robot realizes stably 3D dynamical walking and the two strategies are all effective.

Key words: underactuated system; biped robot; 3D-LIPM; gait planning; stabilization control

摘要: 以欠驱动两足步行机器人为对象研究其侧向运动稳定控制问题。首先分析引起机器人侧向运动不稳定的原因,然后提出步宽控制和侧向力矩补偿两种控制策略。步宽控制通过控制机器人侧向落脚位置,使其侧向运动周期与前向周期趋于一致实现侧向运动稳定。力矩补偿控制通过在踝关节引入侧向控制力矩,使侧向运动与前向运动协调一致实现侧向运动稳定。仿真实验表明,机器人实现了稳定的 3D 动态行走,达到了预期的控制效果。

关键词: 欠驱动系统; 两足步行机器人; 三维线性倒摆; 步态规划; 稳定控制

文章编号: 1002-8331(2008)03-0001-04 文献标识码: A 中图分类号: TP24

1 引言

欠驱动两足步行机器人是在被动式机器人基础上研究的一种新型机器人系统。被动式机器人可以在无驱动状态下沿斜坡行走,具有极高的能效,上世纪 80 年代后期 McGeer 首先对此展开研究^[1],其研制的平面四连杆被动机器人实现了沿斜坡稳定行走^[2]。在 McGeer 的启发下,科研人员对被动机器人及其稳定性进行了深入研究^[3,4]。被动机器人动作自然、能效高,但系统没有主动关节,不能直接控制,于是 Grizzle 等开始在其基础上研究欠驱动两足机器人^[5]。欠驱动指机器人驱动少于自由度,系统存在被动关节。目前欠驱动主要指机器人踝关节处于被动状态,但其它关节为主动关节。Grizzle 从理论上证明了欠驱动两足机器人前向运动存在复杂零动态子系统,给出了稳定极限环存在条件,并通过 Rabbit 实现了稳定的动态行走^[6]。Catherine E^[7], J. Maxwell^[8] 等从不同角度证明两足运动中侧向运动不具收敛性,需要主动控制。Kuo 采用侧向运动补偿策略实现了被动式机器人的 3D 行走^[9]。Song 等设计鲁棒控制器对离线规划轨迹跟踪实现了 3D 欠驱动机器人的稳定控制^[10]。

侧向不稳定主要是由于侧向运动周期与前向周期不匹配

引起的^[9]。针对这一原因,本文提出步宽控制和侧向力矩补偿两种控制策略,通过调整侧向运动使之与前向运动周期一致,实现侧向运动稳定,最终实现欠驱动两足机器人 3D 动态行走。

2 机器人模型及其控制策略

2.1 机器人模型

欠驱动两足机器人(图 1(a))由两个相同的大腿和小腿、髌部、躯干组成,躯干和髌部固联在一起。用 D-H 坐标描述机器人姿态(图 1(b)),关节坐标为 $q=[q_1, q_2, \dots, q_8]^T$,其中 q_1, q_2 为被动关节,描述机器人与地面之间的绝对姿态; q_3, \dots, q_8 为主动关节,描述机器人连杆之间的相对姿态。

假设机器人是对称的,行走过程中支撑点不对机器人产生力矩作用;双脚支撑期瞬间完成,摆动脚与地面发生非弹性碰撞,忽略 Z 项转动力矩,实际系统可以通过其它方式加以平衡^[5,6,10]。欠驱动两足机器人动力学推导过程参见文献[5, 10],其动力学模型可以表示为复杂非线性系统:

$$\dot{x}=f(x)+g(x)u \quad x \notin S \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60475035)。

作者简介:绳涛(1979-),男,博士生,主要研究方向:仿人机器人控制;王剑(1978-),男,博士生,主要研究方向:仿人机器人控制;马宏绪(1966-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:机器人控制、智能控制等。

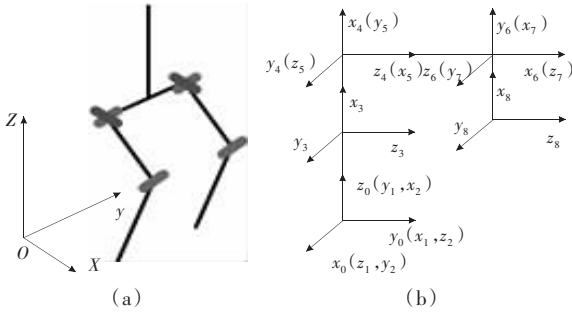


图1 欠驱动两足机器人及其D-H坐标

$$\dot{x}^+ = \Delta(x^-) \quad x \in S \quad (2)$$

方程(1)为单脚支撑期状态方程, $x=[q; \dot{q}]$ 为状态变量, u 为控制力矩, S 为碰撞平面; 方程(2)为状态切换方程. x^- 为上一步结束状态, x^+ 为下一步初始状态, $\Delta(\cdot)$ 为映射方程.

2.2 行走姿态约束

根据欠驱动系统理论, 对于存在 M 个控制输入的 N 自由度非线性系统, 可以通过建立 M 条约束, 将系统降维为 $N-M$ 维零动态子系统. 如果零动态子系统是稳定的, 则该非线性系统是最小相位的^[11]. 欠驱动两足步行机器人内关节为主动关节, 可以通过控制这些关节来约束其的行走姿态. 这些约束要求反映两足行走的基本特征, 基本约束如下:

- (1) 躯干前向保持固定倾角;
- (2) 躯干侧向保持竖直;
- (3) 髋部中心前向位于两脚之间;
- (4) 质心保持固定高度;
- (5) 摆动脚向预测落脚方向运动;
- (6) 抬脚高度与摆动脚前向运动相关.

其中, 约束(1)~(3)控制机器人躯干姿态、行走过程中躯干保持固定姿态、髋部中心位于两脚之间, 基本符合人的行走习惯. 约束(4)将机器人质心限定在固定高度, 降低由于质心波动带来的额外功耗. 约束(5)、(6)控制机器人的落脚位置和步长.

约束(1)~(6)是机器人的行走过程的基本约束集, 根据驱动关节数可以添加其它约束, 将这些约束定义为系统输出:

$$H(x)=[y_1, y_2, \dots, y_6]^T \quad (3)$$

2.3 运动控制

根据假设, 行走过程由间断的单脚支撑组成, 因此运动控制主要是对单脚支撑期进行控制. 其状态方程描述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= H(x) \end{aligned} \quad (4)$$

机器人系统为二阶动力学系统, 对其进行二次微分得:

$$\ddot{y} = L_f^2 H(q, \dot{q}) + L_g L_f H(q)u \quad (5)$$

根据反馈线性化理论, 当控制输入为:

$$u(x) = (L_g L_f H(x))^{-1} (v - L_f^2 H(x)) \quad (6)$$

非线性系统(4)被线性化为双积分系统. 利用有限时间收敛控制器^[12]对运动过程进行控制, 系统在有限时间内充分镇定, 机器人以期望姿态行进步态切换, 完成一步行走.

3 稳定性分析

欠驱动两足机器人通过虚拟约束降维为摆长可变、转动惯量可变的3D线性倒立摆, 如图2所示.

3D-LIPM 的动力学方程为:

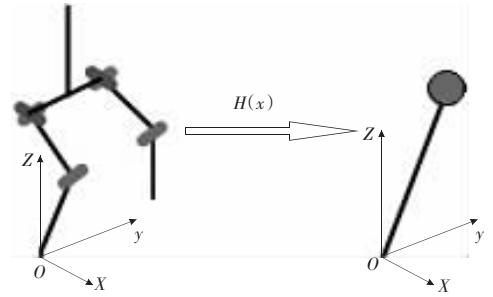


图2 机器人降维为3D线性倒摆

$$\ddot{r} = \frac{g}{z_c} \cdot r \quad (7)$$

$r=x, y, z_c$ 为质心高度. 通过式(7)可以看出, 当 z_c 固定时倒立摆前向运动和侧向运动是动力学解耦的. 机器人轨道能量^[13]定义为:

$$E = \frac{1}{2} \dot{r}^2 - \frac{g}{2z_c} r^2 = K - P \quad (8)$$

K 为轨道动能, P 为轨道势能.

3.1 前向运动稳定性

欠驱动两足机器人前向运动如图3所示: 行进过程中机器人的轨道能量守恒:

$$\frac{1}{2} \dot{x}_1^2 - \frac{g}{2z_c} x_1^2 = \frac{1}{2} \dot{x}_2^2 - \frac{g}{2z_c} x_2^2 \quad (9)$$

即:

$$K_2 = K_1 + P_2 - P_1 \quad (10)$$

“1”为开始时刻, “2”为结束时刻. 轨道势能由机器人姿态决定, 稳定状态下, P_1, P_2 为常值.

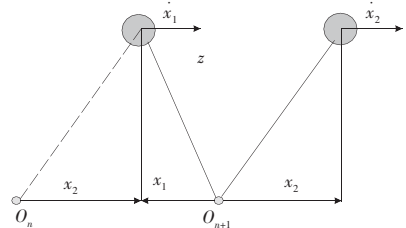


图3 前向平面运动示意图

步态切换过程近似为冲击作用, 机器人姿态保持不变, 关节速度发生瞬变. 机器人动能发生变化, 其映射关系为:

$$K_1^{n+1} = \delta \cdot K_2^n \quad (11)$$

δ 为动能映射因子, 由碰撞姿态决定. 因此公式(11)可以表示为:

$$K_2^{n+1} = \delta \cdot K_2^n + P_2 - P_1 \quad (12)$$

稳定状态下, 轨道动能收敛于极限值:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K = \frac{P_2 - P_1}{1 - \delta} \quad (13)$$

收敛条件为:

$$\begin{aligned} 0 &< \delta < 1 \\ P_2 - P_1 &> 0 \end{aligned} \quad (14)$$

收敛条件的物理意义为行进过程中, 冲击作用损失的动能会通过势能差进行补偿. 与被动式机器人前向运动稳定性相似, 被动机器人的能量补偿源于势能差, 欠驱动机器人则来自驱动关节. 从式(13)可以看出, 轨道动能决定于行走姿态, 而轨道动能同时决定机器人的行走速度.

3.2 侧向运动稳定性

稳定的侧向周期运动是对称的, 因此:

$$P_1 = P_2 \quad (15)$$

由于碰撞过程造成的动能损失不能及时补充,侧向运动将趋于静止,运动周期趋于零。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K=0 \quad (16)$$

机器人行走周期主要由前向运动决定,当侧向与前向不匹配时,会向一侧倾斜。如果不对侧向运动进行控制,质心会越过支撑点,最终导致机器人失去平衡。图4为机器人在没有侧向稳定控制下行走3步的质心轨迹,可以看出侧向运动是发散的。

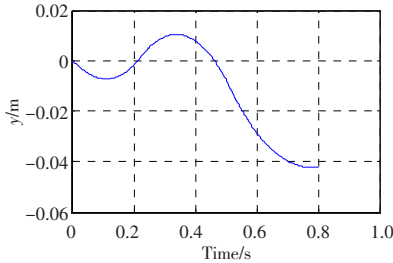


图4 无控制状态下质心水平面轨迹

4 侧向稳定控制

侧向稳定控制主要是调整侧向运动周期,使之与前向运动保持一致。影响运动周期的主要因素为侧摆幅度和摆动速度,针对这两个因素分别设计控制策略对机器人侧向运动进行控制。

4.1 步宽控制

步宽控制是基于3D-LIPM对机器人侧向落脚位置进行预测,使得单脚支撑期结束时质心运动到预计位置,实现侧向稳定和行走方向的控制。

4.1.1 落脚位置控制

根据3D-LIPM动力学方程(7), $k=(gz_c)^{1/2}$,质心侧向运动方程为:

$$y = \frac{y_0 - \dot{y}_0/k}{2} e^{-kt} + \frac{y_0 + \dot{y}_0/k}{2} e^{kt} \quad (17)$$

$$\dot{y} = \frac{\dot{y}_0 - k y_0}{2} e^{-kt} + \frac{\dot{y}_0 + k y_0}{2} e^{kt} \quad (18)$$

y_0 为初始时刻质心相对支撑点的坐标, \dot{y}_0 为质心速度。

连续两步行走如图5所示,假设当前步右腿支撑,支撑点为 (x_s^1, y_s^1) ,左脚位于 (x_0^0, y_0^0) ,质心坐标为 (x_0, y_0) ,结束时刻质心的期望位置为 (x_1, y_1) 。下一步结束时质心期望位置为 (x_2, y_2) ,相应的支撑点为 (x_s^2, y_s^2) ,以上均为绝对坐标。

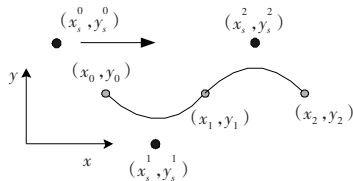


图5 质心运动轨迹

步宽控制就是通过确定支撑点 y_s^2 ,使得下一步结束时质心运动到期望位置。机器人步行周期为 T ,当前步结束时质心位置和速度分别为:

$$y_1 = \frac{y_0 - \dot{y}_0/k}{2} e^{-kT} + \frac{y_0 + \dot{y}_0/k}{2} e^{kT} + y_s^1 \quad (19)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{\dot{y}_0 - k(y_s^1 - y_0)}{2} e^{-kT} + \frac{\dot{y}_0 + k(y_s^1 - y_0)}{2} e^{kT} \quad (20)$$

行走过程中侧向摆幅是非常小的,可以忽略冲击作用对质心速度的影响,当前步结束时时刻质心状态为下一步的初始状态。当质心在结束时需要运动到 y_2 时,落脚点的侧向坐标应该为:

$$y_s^2 = \frac{(y_1 - k^{-1} \dot{y}_1) e^{-kT} + (y_1 + k^{-1} \dot{y}_1) e^{kT} - 2y_2}{e^{-kT} + e^{kT} - 2} \quad (21)$$

y_s^2 就是当前摆动脚的落脚位置,根据 y_s^2 对当前步的摆动腿运动进行规划。

4.1.2 稳定性分析

机器人沿直线行走,摆动脚只能落在支撑脚内侧,侧向稳定主要是确保机器人不会向外侧翻倒。根据轨道能量定义,机器人不侧翻的条件为^[15]:

$$E < 0 \quad (22)$$

下一步机器人侧向运动的轨道能量为:

$$E = \frac{1}{2} (\dot{y}_1^+)^2 - \frac{1}{2} k^2 (y_1 - y_s^2)^2 \quad (23)$$

\dot{y}_1^+ 为下一步开始时刻机器人质心速度。

开始时刻支撑点相对质心的坐标为:

$$y_s^2 - y_1 = -\frac{k^{-1} (e^{-kT} - e^{kT}) \dot{y}_1 + 2(y_2 - y_1)}{e^{-kT} + e^{kT} - 2} \quad (24)$$

机器人沿直线运动, $y_2 = y_1$,当 $T > 0$ 时:

$$-\frac{k^{-1} (e^{-kT} - e^{kT})}{e^{-kT} + e^{kT} - 2} > 0 \quad (25)$$

那么 y_s^2 相对于 y_1 的位置与 \dot{y}_1 的方向相同,根据冲击作用对质心速度的影响^[16]:

$$(\dot{y}_1^+)^2 < \dot{y}_1^2 \quad (26)$$

于是将公式(24)、(26)代入(23)化简得:

$$E < \frac{1}{2} \dot{y}_1^2 - \frac{1}{2} k^2 (y_1 - y_s^2)^2 = -2 \frac{1}{e^{-kT} + e^{kT} - 2} \dot{y}_1^2 < 0 \quad (27)$$

当下一步以 y_s^2 为支撑点运动时机器人不会向支撑点外侧翻倒。同时由于冲击作用和其它误差会在下一步的规划和控制中加以消除。

4.1.3 步宽控制实验

基于步宽控制策略对欠驱动两足机器人的行走进行仿真。机器人的机构参数如表1所示。

表1 机器人主要参数

	躯干	髋部	大腿	小腿
质量/Kg	10	0	2	2
长度/m	0.40	0.20	0.30	0.30
CoM/m	0.20	0.10	0.15	0.15

图6为机器人行走过程中质心轨迹与支撑点水平面位置关系图。从图中可以看出,机器人行走过程中质心始终在两脚

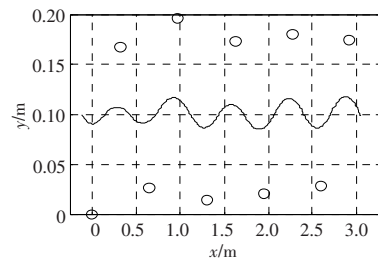


图6 落脚位置与质心轨迹

之间,侧向运动是稳定的。

步宽控制是一种被动控制方式,通过控制落脚位置影响侧向运动周期,使之与步行周期一致,但由于模型等各种误差的存在,两者并不能完全一致。

4.2 踝关节力矩控制

要实现侧向运动周期与步行周期完全一致,需要对侧向运动主动控制。为机器人安装一对侧向分布的圆柱形脚掌,提供侧向控制力矩,这样就形成前向欠驱动侧向全驱动机器人,如图7所示。机器人具有9个自由度,8个主动关节, q_2 为被动关节。

4.2.1 侧向运动规划

安装脚掌后机器人系统增加了两个侧向主动关节,需要对 $H(x)$ 扩充两条关于侧向运动的约束形成新的约束集 $H_e(x)$,这两条约束如下:

- (1)摆动脚掌保持水平;
- (2)质心侧向运动轨迹与前向位置相关。

根据3D-LIPM动力学方程,质心运动轨迹为双曲线。通过四次多项式对质心侧向运动轨迹进行拟和,轨迹方程为:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \quad (28)$$

x 为质心前向坐标, y 为侧向坐标。通过关键参数对多项式系数进行解算,包括:初始时刻质心位置、速度,结束时刻期望位置、速度,最大摆幅。

在 $H_e(x)$ 的约束下,侧向与前向运动周期一致,系统降维为一维零动态子系统,如图7所示。同时侧向运动轨迹是对被动运动轨迹的拟和,控制过程中只需要较小的力矩就可以实现机器人侧向运动的稳定。

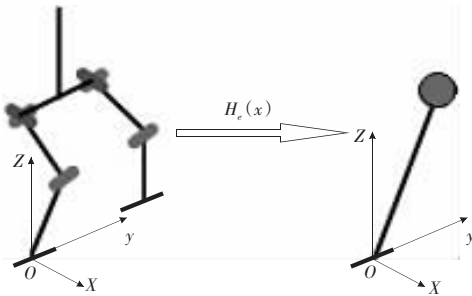


图7 安装侧向脚掌后的机器人模型

4.2.2 稳定性判定

机器人受单边约束,踝关节能够提供的力矩有限,这里引用FRI(Foot Rotation Indicator)指标对机器人侧向稳定性进行判断。

FRI点的计算公式为:

$$y_{FRI} = -\frac{u_1}{F_z} \quad (29)$$

其中, u_1 支撑踝关节侧向力矩, F_z 地面 z 向支撑力。侧向稳定的条件为:

$$|y_{FRI}| < L_{foot} \quad (30)$$

L_{foot} 为脚掌的单边长度。

4.2.3 踝关节力矩补偿控制实验

为机器人安装轻质圆柱形脚掌,长0.1m,质量为1Kg。图8为机器人行走过程中 q_1 的相平面轨迹。可以看出机器人侧向运动收敛于稳定的极限环,侧向运动是稳定的。

图9为行走过程中机器人侧向FRI点轨迹。行走过程中FRI点始终在脚掌范围内,机器人侧向运动始终是稳定的。

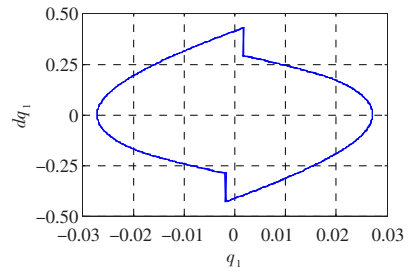


图8 q_1 相平面轨迹

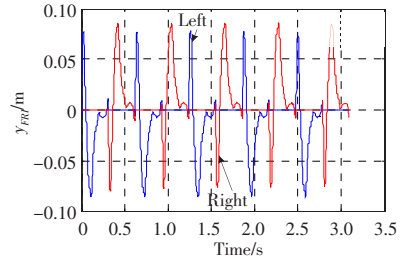


图9 侧向FRI轨迹

5 结论

本文的主要针对欠驱动两足步行机器人侧向运动稳定控制策略进行研究,提出了步宽控制和侧向力矩控制两种控制策略。其中步宽控制是一种被动控制方法,通过调整机器人落脚位置实现侧向运动的稳定,但是侧向运动并不收敛。踝关节力矩控制通过对侧向运动主动控制,以较小的力矩实现侧向运动稳定,并收敛于稳定的极限环。仿真实验表明,两种控制策略都实现了机器人侧向稳定控制,并且与前向运动结合,实现了欠驱动两足步行机器人3D动态行走。(收稿日期:2007年10月)

参考文献:

- [1] McGeer T. Passive dynamic walking [J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 62-82.
- [2] McGeer T. Dynamics and control of bipedal locomotion [J]. Journal of Theoretical Biology, 1993, 166(3): 277-314.
- [3] Goswami A, Espiau B. Limit cycle and their stability in a passive bipedal gait [C]// IEEE Int Conf on Robotics & Automation, Minneapolis, 1996.
- [4] Osuka K. Motion analysis and experiments of passive walking Robot QUARTET II [C]// IEEE Int Conf on Robotics & Automation, San Francisco, 2000.
- [5] Grizzle J W. Asymptotically stable walking for biped robots: analysis via systems with impulse effects [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(1): 51-64.
- [6] Chevallereau C. RABBIT: a test bed for advanced control theory [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003(8).
- [7] Catherine E. Active control of lateral balance in human walking [J]. Journal of Biomechanics, 2000, 33: 1433-1440.
- [8] Maxwell J. Mechanical and metabolic requirements for active lateral stabilization in human walking [J]. Journal of Biomechanics, 2004, 37: 827-835.
- [9] Arthur D K. Stabilization of lateral motion in passive dynamic walking [J]. Int Journal of Robotics Research, 1999, 18(9): 917-930.
- [10] Song Guobiao, Zefran Milos. Underactuated dynamic three-dimensional bipedal walking [C]// Proc of the IEEE ICRA, Orlando, Florida, 2006.
- [11] Murray R M, Li Z, Sastry S S. Introduction to Robotics: Mechanics