

基于 CPG 的四足机器人抗侧向冲击 的动态稳定性研究

罗庆生¹, 周晨阳², 贾燕², 高剑锋¹, 刘芳政³

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;
3. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 为解决四足机器人受到侧向冲击时的稳定性控制, 提出了基于 CPG 和侧向踏步反射的控制方案: 以 Hopf 振荡器构成的 CPG 网络为基础, 通过为侧偏关节构造具有触发使能性质的振荡器, 为四足机器人引入侧向踏步反射机制. 利用 ZMP 理论, 引入倒立摆模型, 从动力学角度预测四足机器人侧向踏步所需的步长与次数. 通过该反射, 四足机器人在承受侧向冲击时产生的侧向加速度能够在较短时间内恢复正常, 此后终止反射, 配合正常直线行走控制方案, 四足机器人就能够圆满实现在行走状态下受到侧向冲击后的稳定性控制, 其抵御侧向冲击的能力显著提高. 利用 Matlab 与 Adams 联合仿真, 该方案的可行性和有效性得到了可靠验证.

关键词: 四足机器人; CPG; 侧向踏步反射; ZMP; 动态稳定性控制

中图分类号: TP 242; O 811. 211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2015)04-0384-07

DOI: 10. 15918/j. tbit1001-0645. 2015. 04. 011

CPG-Based Control Scheme for Quadruped Robot to Withstand the Lateral Impact

LUO Qing-sheng¹, ZHOU Chen-yang², JIA Yan², GAO Jian-feng¹, LIU Fang-zheng³

(1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of School Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the research of land mobile robots, the stability control of quadruped robots has gradually become the focus, also the difficulty. Aimed to keep stability to withstand lateral impact, a control scheme was proposed. A four triggered Hopf oscillator was introduced into the CPG network in the form of reflex to control the lateral movement of the robot. The algorithm, based on the ZMP theory and the inverted pendulum model, can predict the lateral step size and times to keep the stability. Worked in the normal walking control scheme, the lateral acceleration can quickly return to normal after the impact. And the ability to withstand lateral impact was significantly improved. The scheme was validated with the Matlab and Adams simulation.

Key words: quadruped robot; CPG; lateral-step reflex; ZMP; dynamic stability control

近年来,足式机器人的运动及稳定性控制则成为业界研究的热点和重点. 目前,足式机器人控制领域的研究成果主要集中在常规条件下的步态控制

与不规则地面上的行走控制等方面^[1],其稳定性控制理论有零力矩点理论和倒立摆模型等,应用方面主要为机器人在不规则地形行走和提升机器人运动

速度^[1-5],而机器人行走时受到侧向冲击后的稳定性控制其方案和成果并不多见.显然,机器人具有较强的抗侧向冲击的能力对于提高其动态稳定性具有至关重要的作用,将极大提升足式机器人的运动水平.在有关机器人抗侧向冲击的动态稳定性研究成果中,具有代表性的是美国波士顿动力公司研制的Big dog,该四足机器人具有侧偏关节,能够在受到较大侧向冲击时有效保持稳定^[2].

图1为笔者所在团队自主研发的一款具有侧偏自由度的四足机器人(Cheetah Robot),其四足的侧偏运动由“电机-滚珠丝杠-滑台-四连杆”组成的侧偏平衡系统(见图2)完成.该系统通过电机1旋转带动丝杠2转动,转换为滑台3的直线运动;零件3~7之间通过旋转副连接,零件7固定在机器人躯干上,零件6通过拉簧限制其不能随意运动;滑台3的运动即转化为零件5的旋转运动,机器人腿部固连在零件5上,由此完成4肢的侧偏运动.



图1 Cheetah Robot
Fig.1 Cheetah Robot

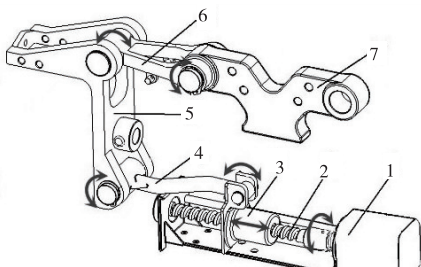


图2 侧偏平衡系统示意图
Fig.2 Lateral movement system

1 侧向稳定性控制应满足的条件

自然界中四足动物其髌关节处多为球形关节,能够实现腿部在三维空间内的自由摆动.在自身受到侧向冲击时,四足动物能够及时将腿部沿侧向摆出,利用地面的反作用力抵消侧向的加速度.如果

外力过大,则四足动物会连续侧向迈步直至恢复平衡.同时,动物在侧向踏步时能够有效防止各腿之间的干涉.对于Cheetah Robot,本文提出了基于侧向踏步运动维持机器人动态稳定性的策略,同时在生物学研究以及相关仿真结论的基础上总结出如下5个必要条件,以保证该策略实现的可能性:

- ① 侧偏方向与受力方向一致;
- ② 侧偏关节相位与所在腿的髌关节相位保持一致,同时髌关节需保持一定的相位关系;
- ③ 任意两腿不发生干涉;
- ④ 侧向踏步中,保证处于摆动相的足部能够充分分离地,不应在侧向迈步时过早触地;
- ⑤ 侧向踏步中,机器人需要根据不同受力情况选择合适的步长与次数.

2 CPG网络结构的提出

2.1 CPG控制算法

四足机器人的CPG控制算法起源于生物学研究,它通过数学方法描述生物体内节律运动的控制神经中枢——中枢模式发生器^[3-4](CPG),从而建立起基于CPG的机器人运动控制理论.该理论能大大简化机器人的动力学建模过程,并通过向网络中引入反射来实现与环境的交互^[5].CPG以振荡器为基本单元,通过振荡器自身作用与相互耦合作用产生具有一定相位关系的信号,该信号可直接用作机器人关节运动的位置信号.本文选用基于非线性振荡器的Hopf振荡器作为CPG单元,每个振荡器表示为^[6]

$$\begin{cases} \dot{x}_i = a(\mu - r_i^2)x_i - \omega_i y_i, \\ \dot{y}_i = b(\mu - r_i^2)y_i + \omega_i x_i + \sum_{j=1}^m k_{ij} y_j, \\ r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \\ \omega_i = \frac{\omega_{st}}{e^{\gamma y} + 1} + \frac{\omega_{sw}}{e^{\gamma y} + 1}, \\ \omega_{st} = \frac{1 - \beta}{\beta} \omega_{sw}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 为振荡器的序号; n 为振荡器的个数; m 为反馈项的个数; x 和 y 为振荡器的输出,经过简单处理后可分别作为Cheetah Robot的髌关节、膝关节的相位控制信号; μ 用于控制振荡器的幅值,关系可近似由公式 $A = \sqrt{\mu}$ 表示; ω 用于控制输出信号的上升与下降,其中 ω_{st} 为支撑相频率, ω_{sw} 为摆动相频率,

二者通过占空比 β 联系; $\sum_{j=1}^4 k_{ij}y_j$ 为各个振荡器之间的耦合项, k_{ij} 为第 i 个振荡器和第 j 个振荡器之间的连接权重. 在占空比 $\beta=0.5$ 时, 振荡器的输出曲线如图 3 所示.

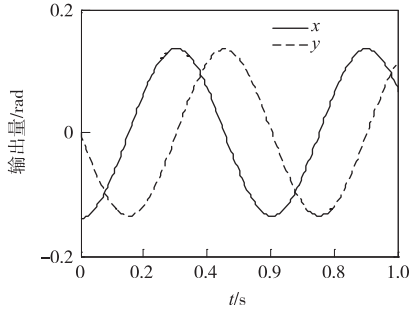


图 3 CPG 振荡器的输出
Fig. 3 Output of CPG oscillator

实线表示 x 输出, 虚线表示 y 输出. 参数 μ 取值合适时, 振荡器的 x 输出可直接用于机器人髋关节(以下称 hip)的相位控制信号, y 输出进行削波和幅值变换后可直接作为同一条腿的膝关节(以下称 knee)相位控制信号.

使用 4 个振荡器控制正常行走, 4 个振荡器分别控制侧偏关节. 其中, 控制侧偏关节的振荡器具有触发使能性质, 能够在触发侧向踏步反射时同步触发, CPG 网络振荡器数目从 4 个变为由 8 个, 其拓扑关系如图 4 所示. 其中, 1~4 号振荡器控制 1~4 号腿, 分别对应左前(LF)、右前(RF)、右后(RH)和左后(LH), 5~8 分别控制 1~4 号腿的侧偏关节.

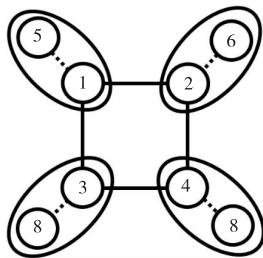


图 4 CPG 网络拓扑结构
Fig. 4 Topological graph

2.2 连接权重矩阵 K 的赋值

连接权重矩阵 $K=(k_{ij})_{n \times n}$ ($n=8$) 用于控制振荡器之间相位关系. 规定其赋值满足如下原则^[4]:

- ① 每个振荡器对自身的连接权重为 0;
- ② 若两个振荡器具有异相关系时为负值, 同相时为正值, 值越大, 振荡器间联系就越强.

对矩阵 K 进行分块研究:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{14} & k_{15} & \cdots & k_{18} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{41} & \cdots & k_{44} & k_{45} & \cdots & k_{48} \\ k_{51} & \cdots & k_{54} & k_{55} & \cdots & k_{58} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{81} & \cdots & k_{84} & k_{85} & \cdots & k_{88} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_t & K_{ct} \\ K_{tc} & K_{cc} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中 $K_t, K_{ct}, K_{tc}, K_{cc}$ 均为 4×4 的方阵. 同时, 将振荡器的 y 输出按下式表示为

$$Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8]^T = [Y_1 \ Y_2]^T. \quad (3)$$

当 4 个侧偏关节振荡器触发时, 振荡器模型(式 2)中耦合项形式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^8 k_{1j}y_j \\ \sum_{j=1}^8 k_{2j}y_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^8 k_{8j}y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_t & K_{ct} \\ K_{tc} & K_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_t Y_1 + K_{ct} Y_2 \\ K_{tc} Y_1 + K_{cc} Y_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

① 在 4 个髋关节中,

$K_t Y_1$ 表示 4 个髋关节之间的相位关系, 可通过改变 K_t 的取值而控制相位;

$K_{ct} Y_2$ 表示 4 个侧偏关节对髋关节的耦合影响, 影响程度由 K_{ct} 控制.

② 在 4 个侧偏关节中,

$K_{tc} Y_1$ 表示 4 个髋关节对侧偏关节的耦合影响, 影响程度由 K_t 控制;

$K_{cc} Y_2$ 表示 4 个侧偏关节之间的相位关系, 可通过改变 K_{cc} 的取值控制.

结合上文中提到的两个幅值原则, 对矩阵 K 按如下方法赋值.

i) 为满足 4 个髋关节的正常相位关系, 满足第 1 节中条件②, 以 Cheetah Robot 按 trot 步态行走为例, 1, 3 号同相, 2, 4 号腿同相, 两组之间为异相, 因此

$$K_t = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

ii) 为满足侧偏关节与对应的髋关节保持同相

关系,两者之间的耦合系数应为正数.适当增大耦合系数可使侧偏关节振荡器输出信号迅速回到正常相位.因此矩阵 \mathbf{K}_{tc} 形式如下(式8), λ 取一般为3~5,不宜过大,否则在侧偏关节初始振荡时会不稳定,而且影响其幅值大小.

$$\mathbf{K}_{tc} = \lambda \mathbf{I}, \lambda = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

③ 由图8和图9可知,侧偏关节振荡器在起始振荡时与髋关节信号并不重合而且幅值也有一定差异,为了减少侧偏关节对髋关节的影响,更好地满足条件②,防止髋关节出现异常,可令 $\mathbf{K}_{ct} = \mathbf{0}$;

④ 矩阵 \mathbf{K}_{cc} 控制4个侧偏关节之间的耦合效应.由于侧偏关节已经通过矩阵 \mathbf{K}_{tc} 分别与各自的髋关节维持了一定的相位关系,因此从简化CPG网络和提高计算速度的角度出发,可令 $\mathbf{K}_{cc} = \mathbf{0}$;

综上所述,步态矩阵 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_i & \mathbf{0} \\ \lambda \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \lambda = 4.$

确定步态矩阵 \mathbf{K} 的取值后,其余参数按照参考文献[5]所述,先对侧偏关节幅值不加考虑,假设在 $t = 2.5 \text{ s}$ 时侧向冲击发生,利用 Matlab/Simulink 进行数值仿真结果如图5所示.设置触发时间为 $t = 2.5 \text{ s}$,可以看到,粗曲线表示的侧偏关节输出能够迅速起振,并且与所在髋关节曲线保持同等相位,完全满足条件①②的要求.

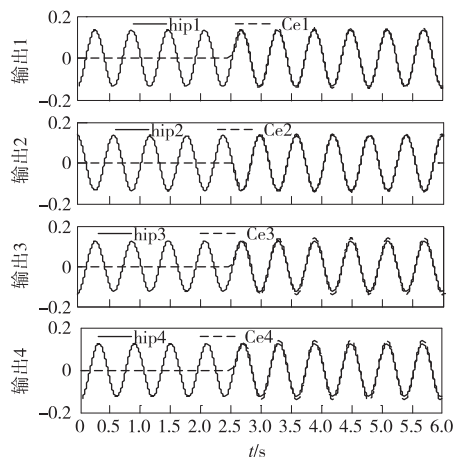


图5 Matlab/Simulink 数值仿真结果
Fig. 5 Numerical simulation in Matlab/Simulink

2.3 髋、膝关节控制信号幅值的确定

2.3.1 髋关节信号幅值的确定

侧偏步态需要满足在保证左右两足不发生干涉的条件(即满足条件③)下能够实现最大的侧偏步长.如图6所示,如果 Cheetah Robot 髋关节不摆动或者摆动幅值很小,则极易在腿部向内侧摆动时发

生干涉.因此髋关节的控制信号需要满足最小幅值要求.事实表明,最小幅值与机器人腿部结构,足部体积以及直线行走的速度有关.出于简化考虑,利用仿真得到髋关节最小幅值为 $A_{h_{\min}} = 0.174 \text{ rad}$.参考文献[6]可以得到式(2)中 μ 的取值.

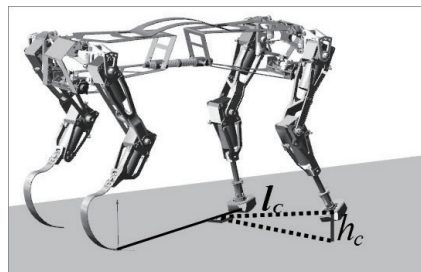


图6 前足发生干涉
Fig. 6 Interference

2.3.2 膝关节信号幅值的确定

Cheetah Robot 在受到侧向冲击力后,会绕着支撑腿构成的线段发生转动,其处于摆动相的腿的足部会因此提前触地如图7所示.

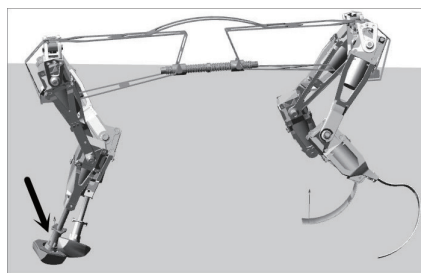


图7 机器人绕支撑轴线转动
Fig. 7 Rotation around the support axis

膝关节的摆动是保证机器人抬腿高度的直接因素,为了满足条件④,需要将机器人膝关节的摆动幅值适当增大,以保证机器人的足部不会因为身体的转动而提前触地.利用机器人携带的角加速度传感器可以得到机器人的角加速度 β ,因为 Cheetah Robot 处于摆动相的时长 $t_{sw} = 0.3 \text{ s}$,因此足端下降高度为

$$h_c = \frac{1}{2} \beta t_{sw}^2 l_c, \quad (7)$$

式中: l_c 为机器人处于摆动相的腿的足底点到支撑线段的距离; h_c 即为最小抬腿高度.参考文献[4]可以得到膝关节幅值.

2.4 基于ZMP控制方法和倒立摆模型确定侧偏关节信号幅值

当机器人处于动态时,ZMP点^[7]为机器人COG点沿机器人重力和惯性力的合力方向在支撑

平面上的投影点. 本文中研究侧向踏步的步态参数, 因此只需研究 ZMP 点在机器人 x 方向上的位置.

Cheetah Robot 在 x 方向上 ZMP 点的位置为^[8]

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g) z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (8)$$

式中: m_i 为每个机器人每个部件的质量; x_i 和 z_i 为每个部件的质心坐标; g 为重力加速度; 在该模型下, g 的方向为 z 负方向.

利用线性倒立摆模型^[9], 如图 8 所示.

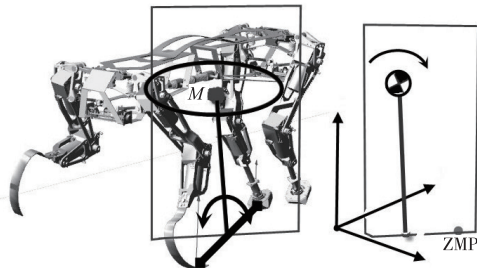


图 8 Cheetah Robot 倒立摆模型
Fig. 8 Inverted pendulum model

假设 Cheetah Robot 的所有质量集中在质心一点(COG)处, 以当前 ZMP 点作为倒立摆的支撑点, 可将 Cheetah Robot 简化成一个二维倒立摆模型, 摆动平面与支撑足构成的直线垂直, 如图 8 所示. 设机器人的重心 G 点坐标表示为 (x_G, y_G, z_G) , 那么 ZMP 和 COG 具有如下关系^[10]

$$\begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} - \frac{z_G}{g} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \end{bmatrix} \quad (9)$$

以 x 方向为例, 求解可得:

$$\begin{bmatrix} x_G(t) \\ \dot{x}_G(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(t) \begin{bmatrix} x_{G_0} \\ \dot{x}_{G_0} \end{bmatrix} + (\mathbf{I} - \mathbf{T}(t)) \begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 x_{G_0} 和 \dot{x}_{G_0} 分别表示初始时刻 Cheetah Robot 重心在 x 轴方向上的坐标和速度. 定义倒立摆系统的状态方程为: $\mathbf{D}(t) = [x(t) \quad \ddot{x}(t)]^T$, $x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 表示 Cheetah Robot 的 COG 点在 x 轴的位置和沿 x 轴的速度. 当其 ZMP 点位置为 $\mathbf{C} = [x_{ZMP} \quad 0]^T$ 时,

可解得

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{T}(t)\mathbf{D}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{T}(t))\mathbf{C} \quad (11)$$

故知道该时刻 ZMP 点的位置, 即可知道下一时刻能够保持 Cheetah Robot 稳定的 COG 点的位置从而完成 COG 点的规划. 利用坐标变换的方法即可得到其足部在 x 方向的落脚点^[11], 结合式(1)给出的 x 方向落脚点与侧偏关节位置的关系即可得到侧偏关节的幅值大小, 从而满足条件⑤的要求.

3 基于 Matlab 和 Adams 的联合仿真

3.1 机械系统与控制模型的建立

利用 solidworks 三维造型导入 Adams 中生成机械模型, 确定机器人机械模型输入输出变量后, 利用 Adams/Controls 模块将其输出至 Matlab/Simulink, 在其中建立控制系统.

3.2 仿真模型的运行

首先应在侧向冲击力为 0 时进行仿真, 以观察 Cheetah Robot 正常行走时的侧向加速度大小, 从而为下一步仿真确定侧向踏步反射的阈值. 仿真中测量机器人躯干的加速度, 进入 Adams/Processor 模块再进行后处理, 如图 9、图 10 所示.

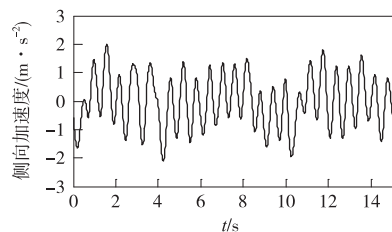


图 9 Cheetah Robot 正常行走时侧向加速度变化
Fig. 9 Lateral acceleration when normally trotting

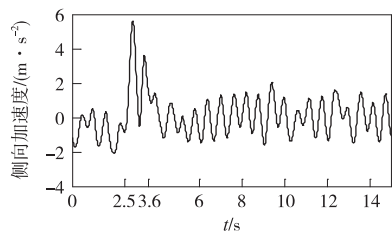


图 10 Cheetah Robot 受到侧向冲击前后侧向加速度变化
Fig. 10 Changes of lateral acceleration after impact

从图 10 可以看出, Cheetah Robot 的加速度基本可以稳定在 $2\ 000\ \text{mm/s}^2$ 以内, 考虑将阈值设置为 $2\ 500\ \text{mm/s}^2$.

在第 1 次仿真基础上, 将 Matlab/Simulink 的偏信号触发与产生模块中阈值设为 $2\ 500\ \text{mm/s}^2$. 设置侧向冲击力发生时间为 $t = 2.5\ \text{s}$ (任意选定即

可),大小为 220 N(Cheetah Robot 总重在 22 kg 左右,因此设置该数值),冲击力持续时间为 0.2 s. Cheetah Robot 运动如图 11 所示.

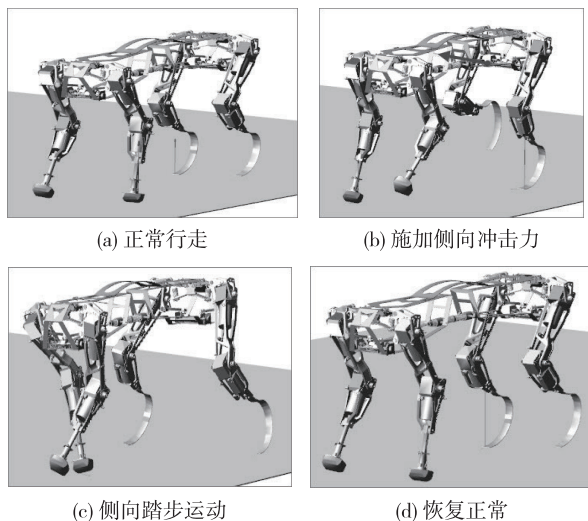


图 11 Cheetah Robot 运动仿真录像截图
Fig. 11 Screenshot of simulation video

3.3 仿真结果的分析

测量得到的 Cheetah Robot 质心的加速度后,按前述方法处理得到如图 12 所示结果. Cheetah Robot 在正常行走时与第 1 次仿真结果类似. 在 $t=2.5$ s 时侧向冲击力作用在 Cheetah Robot 躯干上,加速度发生突变,达到 $|a|=5\ 633.1\ \text{mm/s}^2$,因此触发侧向踏步反射. 在该反射的作用下,Cheetah Robot 在 2 个步态周期内加速度即回归到正常值,因此终止侧向踏步反射,并使侧偏关节回归正常位置后继续行走.

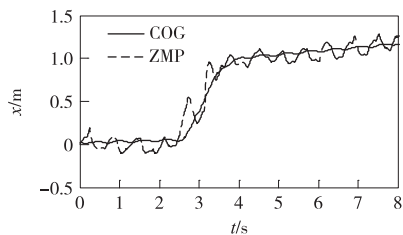


图 12 运动过程中 COG 点与 ZMP 点 x 坐标变化
Fig. 12 x -axis COG and ZMP response

Cheetah Robot 在整个仿真周期内的 COG 点和 ZMP 点的 x 坐标如图 13 所示,图中实线代表 COG 点,虚线代表 ZMP 点, x 坐标代表 Cheetah Robot 侧面方向. 由图 13 可知,机器人在 $t < 2.5$ s 阶段以对角步态正常运动 ZMP 点在 0 附近来回波动,COG 点在平稳行走时波动很小. $t=2.5$ s 时 Cheetah 受到侧向冲击力 $F=220$ N 作用,触发侧向

踏步反射,在前述倒立摆模型的控制下,计算得到理论 COG 点,Cheetah Robot 通过侧向踏步来保证实际 COG 点与理论 COG 点重合. 在 $t=3.6$ s 时,Cheetah Robot 加速度回归到阈值以内,终止侧向踏步反射.

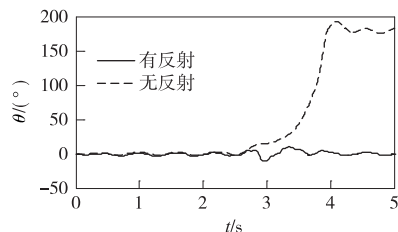


图 13 Cheetah Robot 躯干横滚角变化
Fig. 13 Torso angle response, Roll

为了验证该方案的有效性,作者对比了 Cheetah Robot 在引入侧向踏步反射前后的姿态变化. 图 13 表明了 Cheetah Robot 躯干绕 y 轴的横滚角(Roll)的变化. 正常行走和侧向踏步反射时的横滚角波动以局部放大图的形式展现. 可以看到,在正常行走时其横滚角在 $-4.009^\circ \sim 2.575^\circ$ 内变化. Cheetah Robot 在受到侧向冲击后如果不触发侧向踏步反射,其横滚角将会按照虚线变化,Cheetah Robot 将会过度侧倾直至翻倒. 当 Cheetah Robot 引入侧向踏步反射后,受到侧向冲击时的横滚角变化如图 13 所示实线,局部放大图表明,其横滚角会在侧向冲击后发生较大波动,但是由于侧向踏步而使其稳定在较小范围内($-11.030^\circ \sim 9.838^\circ$). 随后机器人恢复稳定,继续前进.

联合仿真实验表明,在不引入该反射时,Cheetah Robot 最大能承受约 160 N 的冲击力,引入该反射后,Cheetah Robot 最大能够承受 340 N 的侧向冲击力,相当于自身重量的 1.545 倍,承受能力是原来的 2.125 倍,充分证明了该控制方案的有效性. 另外,侧向行走的引入对机器人正常行走并不会造成稳定性方面的影响,相反,由于机器人的侧向移动会使其重心降低,稳定性会得到提高.

4 结 论

通过研究四足动物在受到侧向冲击后稳定性维持的步态,提出了基于 CPG 生物控制方法的四足机器人在侧向冲击下的稳定性控制策略,并利用 Matlab 和 Adams 联合仿真进行了验证. 文中所述工作由以下几个创新点:以机器人的 CPG 仿生控制为基础,对 CPG 网路进行重构,为其引入侧向踏步

反射;从生物学角度提出 5 个实现侧向稳定性控制的必要条件;通过对连接权重矩阵 \mathbf{K} 进行分块与合适取值,CPG 网络的输出信号能够在任意时刻触发的情况下保持正确的相位关系;以 ZMP 步态规划理论为基础并结合倒立摆模型,根据实际机械结构调整幅值大小. 对比试验表明,Cheetah Robot 能够抵御的侧向冲击力由未加反射时的 160 N 提升至 340 N,其稳定性得到了显著的提升. 本文的研究对于提升足式机器人的动态稳定性具有重要的参考价值.

参考文献:

- [1] 罗庆生,魏天骐,莫洋,等. 多自由度模块化链节式 8 足机器人三总线控制系统设计[J]. 北京理工大学学报, 2013,33(7):698-703.
Luo Qingsheng, Wei Tianqi, Mo Yang, et al. Three-bus control system design for centipede-like robot[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(7):698-703. (in Chinese)
- [2] 罗庆生,苏晓东,韩宝玲. 基于 DSP 的大功率多轴控制系统[J]. 北京理工大学学报,2012,32(3):253-257.
Luo Qingsheng, Su Xiaodong, Han Baoling. High-power multi-axis control system based on DSP [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(3):253-257. (in Chinese)
- [3] Kimura H, Witte H, Taga G. Briefing of AMAM[C]// Proceedings of Int Symp On Adaptive Motion of Animals and Machines. Montreal, Canada: AMAM, 2000:232-240.
- [4] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究[D]. 北京:清华大学,2004.
- Zhang Xiuli. Biological-inspired rhythmic motion and environmental adaptability for quadruped robot [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [5] Kimura H, Fukuoka Y. Adaptive dynamic walking of a quadruped-sensory feedback to CPG[M]. [S. l.]: Neuromorphic Workshop, 2001.
- [6] Santos C P, Matos V. Gait transition and modulation in a quadruped robot: a brainstem-like modulation approach [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2001,59:620-624.
- [7] Vukobratovic M, Borovac B. Zero-moment point: thirty five years of its life [J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2004,1(1):157-173.
- [8] Wang G. Biped robot balance control-based on FRP feedback mechanism and ZMP [C] // Proceedings of Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference on IEEE. [S. l.]: IEEE, 2013: 251-254.
- [9] Ugurlu B, Kawamura A. Bipedal trajectory generation based on combing inertial forces and intrinsic angular momentum rate changes: eulerian ZMP resolution[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012,28(6):256-262.
- [10] Liu J, Veloso M. Online ZMP sampling search for biped walking planning[C]// Proceedings of Intelligent Robots and Systems, IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. [S. l.]: IEEE, 2008: 185-190.
- [11] Antonelli G. Stability analysis for prioritized closed-loop inverse kinematic algorithms for redundant robotic systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(5):985-994.

(责任编辑:刘雨)