

## 基于CPG的双足机器人多层步行控制器设计

薛方正, 陈强, 厚之成

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 针对双足机器人步行控制器的设计问题, 基于生物学启发原理, 提出一种基于中枢模式发生器(CPG)与稳定性分析相结合的多层次结构控制器设计方法. 分析机器人的步行运动, 给出双足运动描述. 基于CPG理论设计多层次结构的步行控制器, 应用极限环理论方法分析运动稳定性. 在保证步行稳定的前提下, 所提出的控制方法具有结构简单、通用性好、方便在线平滑修正等优点, 步行仿真实验验证了所提出算法的有效性.

**关键词:** 双足机器人; 中央模式生成器; 多层次结构; 极限环; 步行稳定

**中图分类号:** TP242

**文献标志码:** A

## Central pattern generator based multi-level walking controller design of biped robot

XUE Fang-zheng, CHEN Qiang, HOU Zhi-cheng

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondent: XUE Fang-zheng, E-mail: xuefangzheng@cqu.edu.cn)

**Abstract:** For walking controller design of the biped robot, a walking controller with multi-level structure is proposed by integrating the central pattern generator(CPG) stability analysis from the perspective of biological inspiration. The walking model of the biped robot is given. Then, the multi-level structure walking controller is proposed. By using the limit cycle theory, the walking stability is analyzed systematically. Compared with existing methods, the proposed controller is superior in simple structure, good versatility and convenient online smoothing correction on the premise of walking stability. The simulation results show the effectiveness of proposed method.

**Keywords:** biped robot; central pattern generator; multi-level structure; limit cycle theory; walking stability

### 0 引言

双足机器人具有与人相似的步行运动方式, 目前已被广泛应用于人们的生产生活中. 许多研究者已经开发出一系列能够实现稳定动态步行的仿人机器人, 如ASIMO、HRP和KHR等. 然而, 由于其存在的高阶、强耦合和非线性等特性, 实现灵活高效、环境适应性强以及快速稳定的动态步行仍是双足步行控制的一个挑战性问题, 也是仿人机器人领域的研究重点和热点.

传统的步行运动控制设计大多是基于机器人本身的模型特点. 例如最早提出的基于Zero Moment Point (ZMP) 理论的设计方法<sup>[1-2]</sup>, 该方法将机器人模型简化为线性倒立摆模型, 根据简化的倒立摆模型预

先规划满足ZMP判据的步行轨迹<sup>[3-4]</sup>. Pratt等给出了一种基于启发控制的设计方法, 该方法针对机器人的简化模型, 通过虚拟模型控制和在线寻找落脚点等方法实现步行控制<sup>[5-7]</sup>. 然而, 上述方法都未深入考虑人类步行运动所具有的生物学特点, 仅仅是基于机器人模型本身的特点而产生的步行运动, 存在运动模式呆板、在线修正计算量大等缺点.

人类的步行运动可以看作是一种周期性的节律运动. CPG是节律运动的中心控制单元, 是由中间神经元构成的多个振荡中心组成的分布网络, 能够产生周期节律性的驱动信号<sup>[8-9]</sup>. 相比于传统的基于机器人模型产生的步行运动, 通过模仿CPG产生节律信号控制的机器人步行运动具有稳定极限环和易于实

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473051); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2011BB0081); 中央高校基金项目(CDJZR11170006, CDJZR12170018).

作者简介: 薛方正(1977-), 男, 副教授, 博士, 从事机器人与智能控制等研究; 陈强(1989-), 男, 硕士生, 从事机器人与智能控制的研究.

时平滑在线修正等特点<sup>[10]</sup>. 王绍治等<sup>[11]</sup>提出了一种分布式控制系统, 将CPG同时应用于多组协调层和单足各关节协调层; 曾翔宇等<sup>[12]</sup>模仿生物神经反射机理, 采用CPG方法实现沟壑类非连续地形下的稳定步态运动; Zhang等<sup>[13]</sup>提出了系列型CPG模型实现四足机器人的慢跑步态规划. 然而, 上述方法对机器人的精确模型要求比较高, 且没有对CPG网络结构的形式、步态控制器稳定性分析等问题进行深入研究.

针对上述问题, 本文提出一种基于简易CPG网络结构的仿人机器人多层次步行控制器, 并应用极限环理论方法分析步行运动稳定性. 首先, 介绍双足机器人的运动描述; 然后, 给出多层次结构控制器的结构, 采用极限环理论方法给出控制器的稳定性分析; 最后, 利用步行仿真实验验证了所提出控制算法的有效性.

## 1 双足机器人运动描述

假定双足机器人行走平面为矢状面 $xoz$ 平面, 其机构包括躯干和完全相同的两腿, 每条腿有两杆, 通过膝关节链接而成, 膝和髋均为一自由度理想无摩擦旋转关节. 双足机器人的五连杆模型如图1所示.

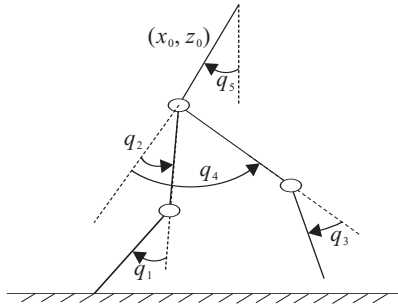


图1 仿人机器人模型

设 $q_c = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 为机器人的位形相对坐标;  $q_5$ 为躯干与绝对坐标系 $z$ 轴的夹角;  $p_{xy} = (x_g, y_g)$ 为躯干质心在绝对坐标系下的位置;  $q_r = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, x_g, y_g]^T$ 为系统广义坐标;  $u = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ 为机器人各关节的驱动力;  $F_{q_r} = [F_{q_1}, F_{q_2}, F_{q_3}, F_{q_4}, F_{q_5}, F_{x_g}, F_{y_g}]^T$ 为系统的广义力;  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T$ 为角度向量. 机器人系统的第二类拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{r_n}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{r_n}} + \frac{\partial P}{\partial q_{r_n}} = F_{q_{r_n}}, \quad n = 1, 2, \dots, 7. \quad (1)$$

其中:  $T$ 为系统动能,  $P$ 为系统势能.

躯干质心与腿末端 $p_{ek}(x_{ek}, z_{ek})$ 位置关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ek} \\ z_{ek} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{kx}(q) \\ f_{kz}(q) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中:  $f_k(q) = [f_{kx}(q), f_{kz}(q)]^T$  ( $k = 1, 2$ )为躯干质心与腿末端之间关系的向量函数, 由 $q$ 与双足机器人的物理参数共同决定. 由此得到

$$T = q_r^T \begin{bmatrix} A(q_c) & 0 \\ 0 & MI_{2 \times 2} \end{bmatrix} q_r, \quad (3)$$

$$F = \begin{bmatrix} I_{4 \times 4} \\ 0 \end{bmatrix} u + \sum_{k=1,2} \begin{bmatrix} -\frac{\partial f_k(q)^T}{\partial q} \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix} R_k. \quad (4)$$

其中:  $M$ 为双足机器人的质量,  $A(q_c) \subseteq R^{5 \times 5}$ ,  $I_{i \times i}$ 为 $i \times i$ 单位阵,  $-\frac{\partial f_k(q)^T}{\partial q} \in R^{5 \times 2}$ ,  $R_k = [R_{kx}, R_{kz}]^T$  ( $k = 1, 2$ )分别为两腿末端所受到的地面力.

用分块矩阵表示式(1), 机器人的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} D & D_R^T \\ D_R & MI_{2 \times 2} \end{bmatrix} \ddot{q}_r + \begin{bmatrix} C & 0_{5 \times 2} \\ C_R & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \dot{q}_r + \begin{bmatrix} G \\ G_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{2 \times 4} \end{bmatrix} u + J_1^T R_1 + J_2^T R_2. \quad (5)$$

其中:  $D \in R^{5 \times 5}$ ,  $D_R \in R^{2 \times 5}$ 为惯性矩阵,  $C \in R^{2 \times 5}$ ,  $C_R \in R^{2 \times 5}$ 为离心力和哥氏力矩阵,  $G, G_R$ 为重力项,  $B = [0_{1 \times 4}, I_{4 \times 4}]^T$ 为关节驱动关系,  $J_1, J_2$ 分别为腿末端作用力 $R_1, R_2$ 对应的Jacobian矩阵.

人类步行运动以前向平面运动为主导, 且双脚切换时的支撑时间比较短. 考虑到步行运动的上述特点, 本文对机器人的步行运动做如下假设.

**假设1** 机器人的步行运动仅限制在前向平面内. 由于前向运动在正常步行运动中起主导作用, 侧向和横向运动幅度小, 本文仅考虑前向平面的运动.

**假设2** 双脚支撑期比较短, 可实现瞬时切换. 在人类步行运动中, 相对于单脚支撑期, 双脚支撑期比较短, 除此之外, 考虑到双脚支撑期机器人处于全驱动状态, 机器人的稳定易于控制, 因此可以认为双脚切换在瞬时完成.

**假设3** 机器人双腿具有对称性. 在建立实物机器人系统时, 其双腿具有相同的模型参数(包括质量分布和材料特性等), 结构对称, 因此可以假设机器人双腿在模型结构和参数上具有对称性, 仅仅是运动相位不同.

通过上述假设, 机器人步行运动可以归纳为一个单腿支撑的周期重复运动, 且具有节律特性, 因此步行控制器可以通过保证多步重复来保证机器人的动态行走.

## 2 基于CPG的多层次结构步行控制器设计

考虑到机器人步行运动的节律特性, 基于CPG

能够产生节律运动信号这一特性, 本文提出一种多层次结构的步行运动控制器设计方法。

## 2.1 步行控制器结构

机器人步行运动信号具有节律性, 且关节之间呈现分布式结构, 因此可设计一种分层结构特性的步行运动控制器, 每一层对应人类身体的某一实际部位, 并且可以模仿实现相应的功能。本文将控制器分为3层: 大脑层、脊柱层和关节层。步行控制器结构如图2所示。

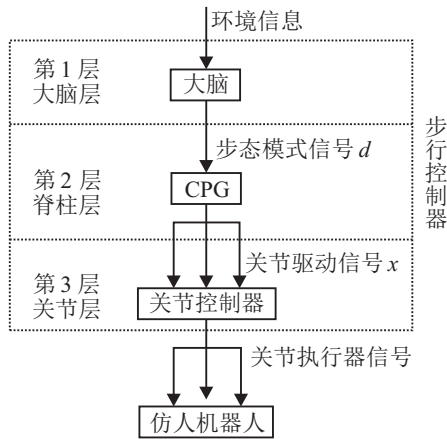


图2 步行控制器结构

第1层称为大脑层, 该层主要处理环境信息(如路况、障碍物情况、步行运动目标要求等), 产生步行模式信号  $d$ , 传递至第2层, 并作为第2层的激励信号。对于直线匀速步行运动, 模式信号可以采用周期不变的节律信号。

第2层称为脊柱层, CPG将上层的刺激信号  $d$  转化为关节驱动信号  $x$ 。由于CPG部分是基于机器人关节的结构, 且由多个具有一定拓扑结构的单元组成, 不同的CPG单元对于不同关节将产生不同的驱动信号  $x$ 。本文所提出的步行控制器设计所采用的CPG包括4个振荡单元, 分别对应于左右腿的髋关节和膝关节, 整体对应于五杆平面机器人模型的最简结构形式, 每条腿上的两个振荡器互相连接, 两条腿之间通过髋关节振荡器连接来体现两腿的相互影响, 通过调整连接的强度改变影响程度的大小。

第3层为关节层, 该层接收CPG产生的驱动信号, 并将其转变为各关节的执行器信号, 直接驱动机器人运动。

## 2.2 步行控制器设计

控制器第1层的输出信号  $d$  的幅值为单位1, 以此表示机器人的标准步行速度; 信号为周期信号, 以此表示左右脚的交替运动; 信号大小的正负表示左右脚; 信号在一个周期内幅值绝对值单调递减, 以此表示运动在每个步行周期中所处的阶段。

在控制器第2层的CPG网络中, 组成振荡单元的非线性振荡器的模型表示如下<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = 2\pi v_i + \sum_j r_j W_{ij} \sin \theta_j - \theta_i - \phi_{ij}; \\ \ddot{r} = a_i \left( \frac{a_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right); \\ x_i = \begin{cases} r_i (1 + \cos \theta_i) + b_i, & d > 0; \\ r_i (\text{mod}(\theta, 2\pi)) + b_i, & d \leq 0. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\theta_i$  和  $r_i$  为振荡器的状态变量, 分别表示相位和幅值;  $v_i$  和  $R_i$  决定振荡器的固有频率和幅值;  $a_i$  为正常数, 其大小决定  $r_i$  收敛于  $R_i$  的快慢;  $x_i$  为振荡器的输出值, 在本文中对应于关节驱动信号;  $b_i$  为偏移量, 通过  $b_i$  可整体增大或减小  $x_i$ 。

步行模式信号  $d$  不仅可以通过其正负改变振荡器的输出映射形式, 从而区分左右腿的作用, 同时也可影响振荡器本身的固有频率和幅值, 其关系如下:

$$\begin{cases} v_{L1} = 1.5 - d, v_{L2} = 1, v_{R1} = v_{R2} = 1, & d > 0; \\ R_{L1} = 0.02d, R_{L2} = 0.018, & d > 0; \\ R_{R1} = -0.0006, R_{R2} = -0.0003, & d > 0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_{L1} = v_{L2} = 1, v_{R1} = 1.5 - d, v_{R2} = 1, & d \leq 0; \\ R_{L1} = -0.0006, R_{L2} = -0.0003, & d \leq 0; \\ R_{R1} = 0.02d, R_{R2} = 0.018, & d \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $L1$  和  $L2$ ,  $R1$  和  $R2$  分别为左腿和右腿的髋关节和膝关节。

控制器第3层采用一个PD型的速度控制器, 将各关节给定速度转化为关节力矩输出。在仿真实验中, 选用如下PD型速度控制器:

$$\begin{cases} \tau = K_p \Delta v + K_d \Delta \dot{v}, \\ \Delta v = v_{\text{set}} - v_{\text{sensor}}. \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\tau$  为关节力矩输出,  $K_p$  和  $K_d$  为PD控制器增益,  $\Delta v$  为速度偏差。

## 3 步行稳定性分析

由于神经网络自身存在复杂性, 对于采用神经网络等方法设计的控制器的稳定性分析仍存在许多不足。考虑到机器人步行运动的周期节律性特点以及极限环理论在周期重复性运动稳定性分析方面的应用<sup>[15]</sup>, 本文采用极限环方法分析步行运动的稳定性, 结合数值仿真方法验证该稳定性分析方法的可行性。

**Step 1** 分析机器人系统的模型特点, 说明极限环的存在性。根据机器人运动假设1~假设3, 机器人左右脚对称, 选定双脚切换时刻为庞加莱截面。由于

机器人的步行运动具有周期节律的特点,可以看作单步运动的重复,且CPG控制器实现了这种重复,该步行运动中存在极限环。

**Step 2** 找到不动点,分析局部稳定性.将初始状态  $v = (q, \dot{q})$  从当前步映射到下一步的函数称为跨步函数,并表示为

$$v_{n+1} = S(v_n). \quad (10)$$

如果该跨步函数有周期解,即初始状态映射到它们本身,则由此状态开始的运动为周期性运动,称为极限环,该初始状态称为对应极限环的不动点。

对于满足上述要求的初始状态的步行运动,  $k$  步以后的初始状态不变,即满足

$$v_{n+k} = v_n. \quad (11)$$

当  $k = 1$  时,周期解  $v_c$  满足

$$v_c = S(v_c). \quad (12)$$

将跨步函数线性化,可得

$$\begin{cases} S(v + \Delta v) \approx S(v) + J\Delta v, \\ J = \frac{\partial S}{\partial v}. \end{cases} \quad (13)$$

对于状态  $v$  采用 Newton-Raphson 方法,通过迭代搜索可以得到周期解  $v_c$ ,而

$$\begin{cases} \text{repeat } \Delta v = [I - J]^{-1}(S(v) - v), \\ \quad v = v + \Delta v; \\ \text{until } |\Delta v| < \varepsilon. \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $I$  为单位矩阵;  $J$  为雅克比矩阵,可通过增加小扰动的方法得到。

在CPG步行控制器作用下,机器人多个步行周期内各关节运动的相平面如图3所示,不动点可用上述方法搜索得到。

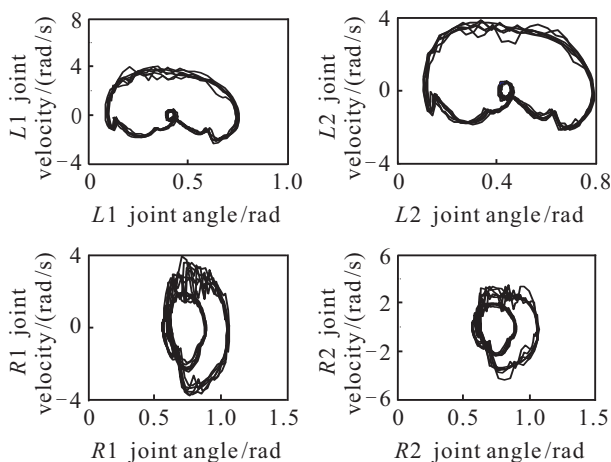


图3 多步周期

由于特征值的计算可以通过观察偏差的变化情

况得到,由图3可知,每个关节的运动在相平面构成了极限环,多步运动呈现出周期重复性,且误差具有收敛性,表明了该极限环的局部稳定性。

**Step 3** 分析全局稳定性.考虑到五连杆机器人模型结构的复杂性,针对状态变化对步行稳定性的影响程度,本文主要研究状态变化对步行稳定性的影响,进而估计系统运动的全局稳定吸收域.本文通过多步行走估计固定点的吸收域.若初始值在不动点的稳定范围内,则机器人经过多步行走后收敛于不动点所在的极限环上;否则,机器人将跌倒以致运动任务失败.对于相同的关节角度,相比于膝关节速度变化对步行运动的影响,髋关节速度变化的影响程度更大.不动点在髋关节速度这两个变量上的稳定吸收域如图4所示。

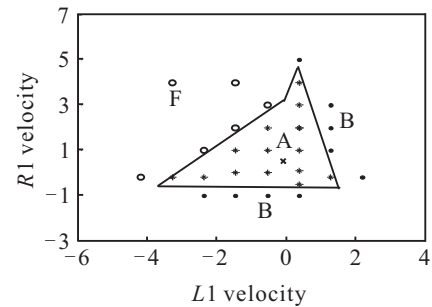


图4 不动点的稳定吸收域

在图4中:横纵坐标分别表示两关节速度,十字交叉点表示不动点,在其周围的星号点表示从该值出发的步行运动能够保持稳定,实心点表示从该值出发的步行运动最终向后跌倒,圆圈表示从该值出发的步行运动最终向前跌倒.由多次仿真实验的结果可知:三角包围的区域A表示该不动点在这两个变量上的吸收域,而其外的区域B表示从该区域出发步行运动的机器人最终将向后跌倒,区域F表示从该区域出发步行运动的机器人最终将向前跌倒。

机器人的运动是一种以多步周期重复为目的的运动形式,其运动系统满足极限环特性,可以采用基于极限环理论的方法分析其运动稳定性.但由于五连杆模型结构复杂,不易于全局稳定域的精确考察,本节突出考察主要状态影响,忽略次要状态影响,估计不动点的全局稳定吸收域,达到稳定性分析的目的。

## 4 仿真实验

本文基于五连杆平面机器人的动力学模型,通过Matlab进行仿真实验.地面接触力通过采用弹簧阻尼模型进行计算,假设双腿与地接触端各有一个弹簧阻尼模型,取弹性系数  $K = 1000 \text{ N/m}$ ,阻尼系数  $C = 500 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,机器人结构参数如表1所示。

表1 双足机器人结构模型参数

参量	躯干	大腿	小腿
质量/kg	5	2	1
长度/m	0.8	0.5	0.5
质心/m	0.4	0.25	0.25
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.27	0.04	0.02

CPG网络中振荡单元之间的连接权重和相位差设定为

$$\begin{cases} w_{L1,L2} = w_{L2,L1} = 1, \phi_{L1,L2} = \phi_{L2,L1} = 0; \\ w_{R1,R2} = w_{R2,R1} = 1, \phi_{R1,R2} = \phi_{R2,R1} = 0; \\ w_{L1,R1} = w_{R1,L1} = 1, \phi_{L1,R1} = \phi_{R1,L1} = \pi. \end{cases}$$

输出信号的偏移量参数  $b_i$  值为

$$\begin{cases} b_{L1} = -0.002, b_{L2} = 0; \\ b_{R1} = -0.002, b_{R2} = 0. \end{cases}$$

根据上述参数, 通过CPG单元将步行模式信号转换为关节驱动信号, 机器人左腿两个关节CPG的结果如图5所示。

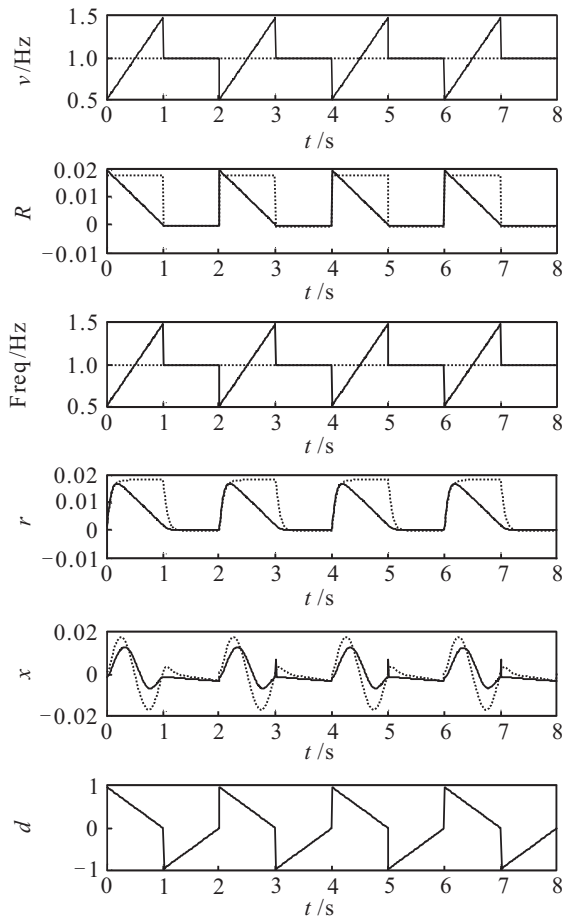


图5 左腿关节CPG

在图5中: 实线表示左腿髋关节, 虚线表示左腿膝关节。图5表明, 在步行模式信号  $d$  的激励下, CPG产生周期性节律信号, 同时在左腿分别作为支撑腿和摆动腿时, 能产生不同类型的关节驱动信号, 并将其作为关节速度给定信息传递到步行控制器的下一层。

机器人在水平地面上沿直线步行运动的仿真结果如图6所示。

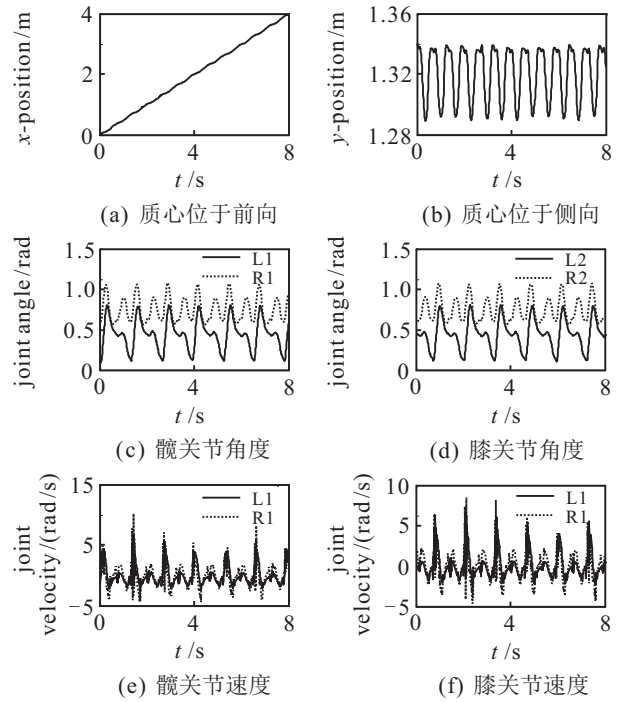


图6 双足机器人步行

在图6中: 图6(a)和图6(b)分别为质心在前向和侧向的运动曲线, 表明机器人实现前向直线运动; 图6(c)和图6(d)为左右腿关节角度曲线, 表明左右腿运动形式相似, 仅相位相差一步; 图6(e)和图6(f)为机器人的关节速度曲线。

单步周期内的动态步行控制结果如图7所示。

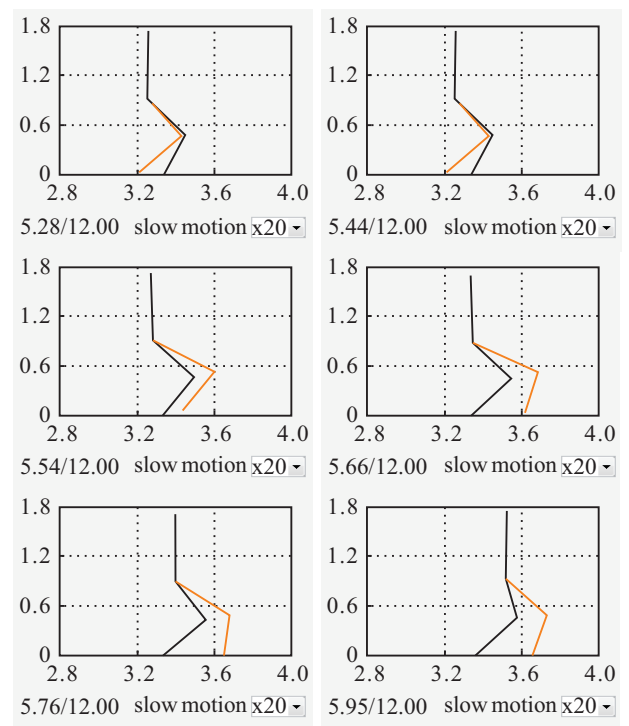


图7 单步周期内步行运动

在一个步行周期内,将腿部的整个运动过程分为6个阶段,依次为:左腿在前,双腿支撑;右腿离地,左腿单支撑;右腿前摆;右腿伸展;左腿单支撑,右腿着地;双腿支撑。

由图7可知:机器人在CPG步行运动控制器的作用下能够在水平地面进行周期性的步行运动,这种周期性体现在机器人位置、关节角度和关节速度等不同层面上,也表明了机器人步行控制器的多层次结构的合理性和必要性。实验表明了这种基于CPG的多层次结构步行控制器的有效性。

## 5 结 论

本文给出了一种基于CPG的双足机器人步行运动控制器,结合采用极限环理论和数值仿真的方法分析了步行运动的稳定性。首先,通过假设归纳描述机器人的步行运动为单步支撑运动的重复;然后,从仿生的角度给出了CPG步行运动控制器的结构和实现;最后,基于极限环理论,结合采用数值仿真方法给出了该运动的全局稳定区域。通过本文的方法可以得到一种不依赖于机器人的精确模型、结构简单、能够实现平滑修正、具有一定稳定区域的双足机器人步行控制器。

## 参考文献(References)

- [1] Vukobratovic M, Frank A A, Juricic D. On the stability of biped locomotion[J]. *IEEE Trans on Biomedical Engineering*, 1970, 17(1): 25-36.
- [2] Vukobratovic M, Borovac B. Zero-moment-point thirty five years of its life[J]. *Int J of Humanoid Robotics*, 2004, 1(1): 157-173.
- [3] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning walking patterns for a biped robot[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280-289.
- [4] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation*. Taipei, 2003: 1620-1626.
- [5] Pratt J, Chew C M, Torres A, et al. Virtual mode control: An intuitive approach for bipedal locomotion[J]. *Int J of Robotics Research*, 2001, 20(2): 129-143.
- [6] Pratt J E. Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots[D]. Cambridge: Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [7] Koolen T, Boer T D. Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 1: Theory and application to three simple gait models[J]. *The Int J of Robotics Research*, 2012, 39(9): 1094-1113.
- [8] Ekeberg Ö, Pearson K. Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: An examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition[J]. *J of Neurophysiology*, 2005, 94(6): 4256-4268.
- [9] Tamburin S, Idone D, Zanette G. Belly dancer's myoclonus and chronic abdominal pain: Pain-related dysinhibition of a spinal cord central pattern generator[J]. *Parkinsonism & Related Disorders*, 2007, 13(5): 317-320.
- [10] Zehr E P, Balter J E, Ferris D P, et al. Neural regulation of rhythmic arm and leg movement is conserved across human locomotor tasks[J]. *J of Physiology*, 2007, 582(1): 209-227.
- [11] 王绍治,郭伟,于海涛,等.基于CPG的六足步行机器人运动控制系统研究[J]. *机械与电子*, 2010(8): 65-68.  
(Wang S Z, Guo W, Yu H T, et al. Study on motion control system of a six-legged walking robot based on CPG[J]. *Machinery & Electronics*, 2010(8): 65-68.)
- [12] 曾翔宇,鄂明成,李冬冬,等.沟壑类非连续地形下的四足机器人运动控制[J]. *机器人*, 2011, 33(6): 700-705.  
(Zeng X Y, E M C, Li D D, et al. Quadruped robot walking control on trench-like noncontinuous terrain[J]. *Robot*, 2011, 33(6): 700-705.)
- [13] Zhang Jiaqi, Gao Feng, Han Xiaolei, et al. Trot gait design and CPG method for a quadruped robot[J]. *J of Bionic Engineering*, 2014, 11(1): 18-25.
- [14] Ijspeert A J, Crespi A, Ryczko D, et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model[J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1416-1420.
- [15] Wisse M. Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism[J]. *Robotics*, 2007, 23(1): 112-123.

(责任编辑: 闫 妍)