

面向大型四足机器人行走的改进运动控制器算法

李 斌¹, 郭雅娟¹, 黄 伟¹, 陈锦铭¹, 陈 磊¹, 王 伟²

(1.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2.中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘 要: 基于中枢模式发生器的运动控制器不需要对机器人及环境进行精确的运动学和动力学建模, 既能够以简单的开环控制实现机器人行走, 也能够通过生物反射等反馈形式对机器人进行闭环控制。但是, 中枢模式发生器的参数之间存在强耦合性, 很难通过参数整定得到理想的输出信号。四足机器人采用中枢模式发生器作为其运动控制器时实现步态变换困难以及存在后腿拖地问题。本文在中枢模式发生器的基础上提出一种适用于四足机器人行走的运动控制器。该控制器既很好地解决了存在于中枢模式发生器中的相位固定、非零点起步等问题, 也有效地解决了后腿拖地问题并方便实现了从慢走步态到对角小跑步态的转换。通过仿真研究及在实际四足机器人上进行实验表明本文提出的运动控制器不仅在步态产生及步态变换方面比中枢模式发生器更有优势, 也为步态控制的深入研究提供了新的思路。

关键词: 运动控制器; 四足机器人; 步态变换; 后腿拖地

0 引言

福岛核电站核事故之后, 核电安全再次引起国际社会的高度重视。东芝公司对作业环境、作业任务及机器人功能进行了全方位的分析, 于2012年11月发布了其研制的四足机器人。该机器人对福岛核电站灾难现场摄像、放射性探测等灾难评估, 为福岛核电站建筑物内及周边区域辐射污染清理工作发挥了不可替代的作用。该机器人由直流伺服电机驱动, 配备有计算机视觉等传感器, 具有适应不同结构地面行走、跨越障碍物、攀爬楼梯、紧凑空间下的运动机动等功能。

四足机器人的运动控制器一般分为两种类型, 一种是基于位置的运动控制器, 该控制器以神经振荡器作为基本组成单元构成中枢模式发生器(CPG), 其中振荡器由两个相互抑制的神经元组成, 各个振荡器之间采用一定的抑制权重使得振荡器的输出具有节律性并对应于机器人某一条腿的髋关节运动的位置信号^{[1][2][3]}。例如日本电气信息大学的Hiroshi Kimura等人以此运动控制器研发的Patrush系列机器人实现了对角小跑步态^[2]。另一种类型是基于状态机的运动控制器, 该控制器将四足机器人的腿在一个步行周期内的运动划分为几个状态, 使腿在不同的状态内运动到某一固定位置

^{[4][5][6][7]}。加拿大McGill大学的M.Buehler等人研发的Scout系列机器人采用该类型运动控制器, 将腿的运动划分为站立相、摆动相等两个状态, 实现了Scout II跳跃步态^[11]。

一般而言, 运动控制器往往是针对某一步态设计, 例如以CPG为代表的控制器适合对角小跑步态。本文针对此问题提出一种适用于四足机器人产生各种步态步行的运动控制器。该控制器由组成CPG的耦合神经振荡单元的通用形式的解衍生而来。CPG的神经振荡单元的通用形式为:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1)$$

公式(1)中 x 为神经振荡单元的状态变量, f 表征振荡单元的动态特性。该通用形式的稳定周期解由正弦信号组成。为此, 本文直接利用正弦函数来产生适合四足机器人慢走、对角小跑等的运动控制器。该控制器可以直接调节各输出信号的幅值、相位、周期等, 因此不再需要繁琐地拼凑CPG参数来解决诸如后腿拖地^[12]、步态变换等。

本文首先利用仿真平台对四足机器人多种典型步态的位置曲线进行分析, 然后基于该运动控制器在实际四足机器人上实现慢步、对角小跑等步态。最后通过解决后腿拖地及实现步态变换来体现该控制器的简单易行、参数物理意义明确等优点。

2 四足机器人实验平台及其控制器

2.1 四足机器人

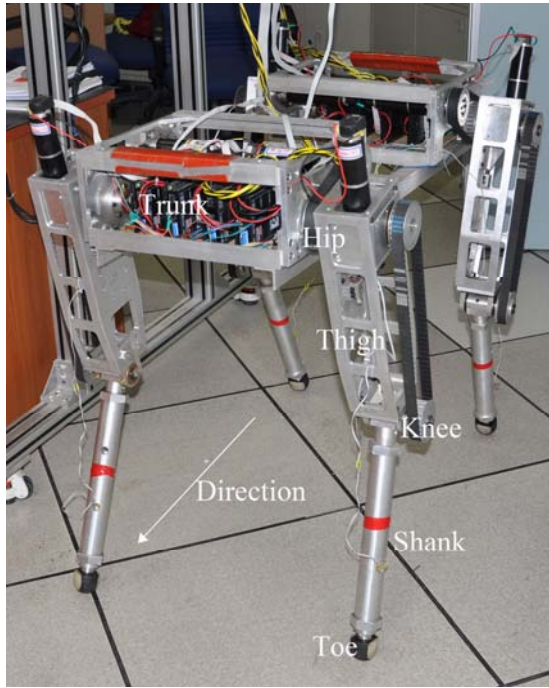


图1 本文实验用四足机器人

Fig.1 The quadruped robot for the experiments

图1为我们研制的四足机器人。该机器人由九部分组成：躯干、四条大腿和四条小腿，分别对应于图中的Trunk、Thigh和Shank。其中躯干长950mm，宽375mm；大腿长377mm，小腿长431mm；从髋关节到足端的垂线高为785mm；左右髋关节之间宽546mm。大腿通过相应的髋关节与躯干相连（对应于图中的Hip），小腿通过相应的膝关节与其大腿相连接。髋关节的初始角度(θ_0)为 15° ，其中髋关节

的零度角与水平地面的垂线重合；膝关节的初始角度(ϕ_0)为 28° ，其中膝关节的零度角与其相应大腿的延长线重合。所有关节的运动由直流伺服电机、涡轮蜗杆以及相应关节的齿形带轮驱动，足底触地传感器为足端提供是否触地信号，陀螺用于感知四足机器人的姿态。

为了方便分析，本文的仿真平台由MSC.ADAMS 和 MATLAB 软件联合建立。利用MSC.ADAMS 搭建四足机器人动力学模型，同时利用 MATLAB 设计该仿真的运动控制器。仿真机器人的部件参数与四足机器人实验平台大致相似，考虑仿真只为实际四足机器人提供相应的轨迹曲线及分析结果，仿真机器人中的各组成部分参数本文不再赘述。其详细参数见文献^[9]。

图1中 Hip 代表髋关节，Knee 代表膝关节，Toe 代表足，Trunk 表示四足机器人的躯干，Thigh 表示大腿，Shank 表示小腿，Direction 表示四足机器人的行走方向。

2.2 运动控制器

运动控制器直接利用正弦函数来产生四足机器人的慢走步态、对角小跑步态等各种步态所需的控制信号。各关节角位置由下列公式给出：

$$T_{s \tan} = 2N\bar{g}/(N+1) \quad (2)$$

$$T_{swin} = 2T/(N+1) \quad (3)$$

$$T_{knee} = T_{swin}/4 \quad (4)$$

$$t_{RF} = rem(t, T) \quad (5)$$

$$t_{LH} = rem(\max((t - N\bar{g}/(3(N+1)) - D_{LH}), 0), T) \quad (6)$$

$$t_{LF} = rem(\max((t - 2N\bar{g}/(3(N+1)) - D_{LF}), 0), T) \quad (7)$$

$$t_{RH} = rem(\max((t - N\bar{g}/(N+1) - D_{RH}), 0), T) \quad (8)$$

$$H_i = \begin{cases} -HA_i \sin(2\pi t_i / T_{s \tan}) & \text{if } (0 \leq t_i < T_{s \tan} / 4) \\ -HA_i \cos(\pi(4t_i - T_{s \tan}) / (2T_{swin})) & \text{if } (T_{s \tan} / 4 \leq t_i < (T_{s \tan} + 2T_{swin}) / 4) \\ HA_i \cos(\pi(4t_i - T_{s \tan} - 2T_{swin}) / (2T_{s \tan})) & \text{if } ((T_{s \tan} + 2T_{swin}) / 4 \leq t_i < T) \end{cases} \quad (9)$$

$$K_i = \begin{cases} KA_i \sin(\pi(4t_i - T_{s \tan}) / (2T_{swin})) & \text{if } (T_{s \tan} / 4 \leq t_i < (T_{s \tan} + 2T_{swin}) / 4) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

$$Hip_i = \begin{cases} H_i + HM_i \cdot \sin(\pi(4t_i - T_{s \tan}) / (2 \cdot T_{swin})) & \text{if } (T_{s \tan} / 4 \leq t_i \leq T_{s \tan} / 4 + T_{swin} / 2) \\ H_i & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

$$Knee_i = \begin{cases} K_i + KM_i \cdot \sin(\pi(4t_i - T_{s\text{tan}})/(2T_{knee})) & \text{if } (T_{s\text{tan}}/4 \leq t_i \leq T_{s\text{tan}}/4 + T_{knee}/4) \\ K_i + KM_i & \text{if } (T_{s\text{tan}}/4 + T_{knee}/4 \leq t_i \leq T_{s\text{tan}}/4 + T_{swin}/2 - T_{knee}/4) \\ K_i + KM_i \cdot \cos(\pi(4t_i - T_{s\text{tan}} - 2T_{swin} + T_{knee})/(2T_{knee})) & \text{if } (T_{s\text{tan}}/4 + T_{swin}/2 - T_{knee}/4 \leq t_i \leq T_{s\text{tan}}/4 + T_{swin}/2) \\ K_i & \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 和 (3) 为四足机器人的腿提供站立相、摆动相时不同的时间周期；(4) 为膝关节在摆动相时的时间周期；(5) - (8) 分别为四足机器人的腿提供各自的时间变量；(9) 和 (10) 给出了各髋关节、膝关节的无偏移初始正弦振荡信号；(11) 和 (12) 为输出到各髋关节、膝关节的角位置信号。表 1 阐述了上述公式中各参数的意义。其中关键变量 N 用

来改变机器人步行过程中的步态，例如当 N 大于等于 3 时，四足机器人处于慢走步态，当 N 等于 1 时，四足机器人处于对角小跑步态或者跳跃步态或者踱步步态。后腿拖地问题借助 HM_i 、 KM_i 等变量来解决，将在第 3 节中详述。第 4 节将详述变量 D_i 与变量 N 通过改变并延迟位置信号实现步态变换。

表 1 公式中参数的含义

Tab.1 The parameters

符号	含义	符号	含义
N	站立周期与摆动周期的比率， $N = T_{s\text{tan}}/T_{swin}$ ，类似于占空比；	T	周期， $T = T_{s\text{tan}}/2 + T_{swin}/2$ ；
$T_{s\text{tan}}$	腿处于站立相的周期变量	T_{swin}	腿处于摆动相的周期变量
T_{knee}	膝关节在摆动相时的周期变量	t	时间变量
t_i	第 i 条腿的时间变量， t_i 的值小于周期 T 大于 0；	i	四条腿的索引符号，即下标 i 应该枚举腿的代表符号 RF, RH, LF, 和 LH, 如 t_i 可能为 t_{RF} ；
HM_i	第 i 个髋关节的关节中值；	KM_i	第 i 个膝关节的关节中值；
H_i	第 i 个髋关节的中间状态变量；	K_i	第 i 个膝关节的中间状态变量；
HA_i	第 i 个髋关节的幅值变量；	KA_i	第 i 个膝关节的幅值变量；
Hip_i	输出的第 i 个髋关节位置变量；	$Knee_i$	输出的第 i 个膝关节位置变量；
$\max()$	一种比较算子， $\max(a,b)$ 返回 a 与 b 之间的较大者；	$\text{rem}()$	一种像求余算子 $\text{mod}()$ 一样的实数算子； $\text{rem}(a,b)$ 返回余数，i.e., $\text{rem}(a,b)$ 等于 $a - n \cdot b$ ，其中 n 接近且小于 a 的整数；
D_i	第 i 条腿的相位延迟， D_i 具体表示为第 i 条腿的相位延迟；		

第 2.1 小节中的默认值 θ_0 和 ϕ_0 对应于本控制器的起始值，即四足机器人在直线行走时输出到各髋关节、膝关节的角位置信号 Hip_i 、 $Knee_i$ 的零值。四足机器人在下列参数值下能够以慢走步态直线行走： $N=3$ ， $T=2$ ， $HM_i=KM_i=D_i=0$ ， $HA_i=0.1396$ ， $KA_i=0.1047$ ，($i=\{\text{RF,RH,LF,LH}\}$)。位置曲线如图 2 (b) 所示，该曲线能够通过改变 D_i ($i=\{\text{RF,RH,LF,LH}\}$) 的值来灵活进行相移。公式 (9) 通过将正弦曲线划分为三段，解决了存在于

CPG 中的非零点起步问题，因此将这些曲线作为关节运动的轨迹，四足机器人的腿不会在起步时突然大幅度摆动。为了方便后文叙述，图 2 (b) 描述了一个典型周期的特征。AEP 代表腿的前极限位置，PEP 代表腿的后极限位置，区间 1 表示腿处于摆动相，区间 2 表示腿处于站立相；摆幅是指髋关节或膝关节在摆动相的幅值；RF 代表右前腿，LH 代表左后腿，LF 代表左前腿，RH 代表右后腿。图 2 (b) 中各关节的轨迹曲线正方向为图 2 (a) 中箭头所指的方向，虚线表示各腿对应的膝关节轨迹曲线，实

线表示各腿对应的髋关节轨迹曲线。图2(a)中的Direction为四足机器人向行走的方向, Trunk为躯干, Thigh为大腿, Shank为小腿, θ_0 、 ϕ_0 为第2.1小节中各髋关节、膝关节的初始角度。

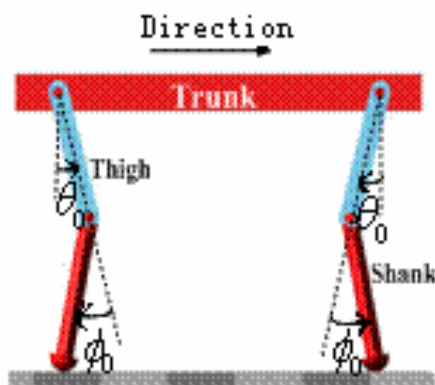


图2(a) 仿真机器人

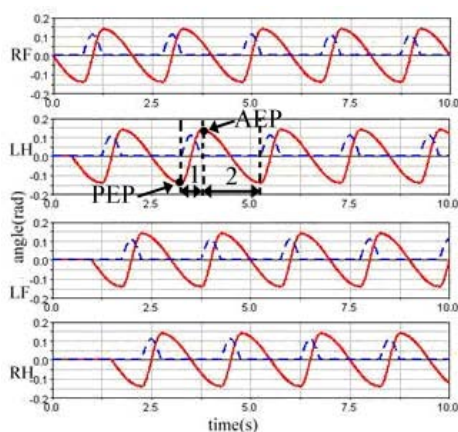


图2(b) 四足机器人各关节的轨迹曲线

图2 仿真机器人及慢走步态下的关节轨迹曲线

Fig.2 The robot in the simulation and the trajectories of joints in the walk gait

3 后腿拖地问题的解决

四足机器人按照上一节的位置控制曲线以慢走步态行走时或者按照文献[9]提出的CPG控制器以对角小跑步态行走时存在后腿拖地问题即后腿在摆动相不能有效抬起。文献[13]认为致使后腿无法抬起的原因是四足机器人在换相后的一段时间内由于惯性和重力作用使得机体产生向后的不平衡力矩,从而提出配重法和调节平衡位置法来解决此问题,但是效果并不理想。本文认为后腿拖地的关键在于四足机器人以某一步态行走时,其腿并非严格地在PEP点进入摆动相在AEP点进入站立相,因此后腿在摆动相即区间1摆动的步幅不能满足有效抬

起的要求。

本文针对四足机器人内膝肘式配置的特点,提出解决后腿拖地的方法:当前腿处于摆动相时向前增加髋关节的摆幅,当前腿处于摆动相时向后增加髋关节的摆幅。根据图1(b)描述的髋关节转动正方向,将增加的摆幅映射到运动控制器产生的曲线,增量为在各关节的转动正方向上增加的摆幅。

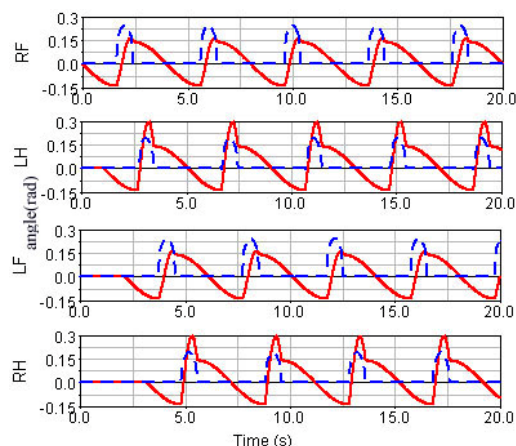


图3 慢走步态下能使后腿有效抬起的关节轨迹曲线

Fig.3 The trajectories of joints without hind leg dragging

运动控制器中的具体参数为: $N=4$, $T=4$, $HM_{LF}=HM_{RF}=0.0873$ 弧度, $HM_{LH}=HM_{RH}=0.2618$ 弧度, $KM_{LF}=KM_{RF}=0.1396$ 弧度, $KM_{LH}=KM_{RH}=0.0873$ 弧度, $D_i=0$, $HA_i=0.1396$ 弧度, $KA_i=0.1047$ 弧度,其中($i=\{RF,RH,LF,LH\}$)。比率 $N=4$ 增加了腿在站立相的时间同时相对缩小了摆动相的时间。图3显示了该参数下各关节的轨迹。图3中RF、LH、LF和RH代表的含义与图2中RF、LH、LF和RH一样,以后图也是如此。为了方便比较,我们将从仿真角度分别给出在没有增加髋、膝关节摆幅和增加髋、膝关节摆幅两种情况下四足机器人的足端轨迹,然后给出机器人消除拖地问题后的实验。

3.1 运动仿真

图4(a)为机器人在增加了膝、髋关节摆幅后的仿真运动图,足端的白色细线为左后足的运动轨迹。相对于没有增加膝、髋关节摆幅的仿真运动图4(b),左后足的离地高度明显提高。图4(b)控制器的参数设置为: $N=4$, $T=4$, $HM_i=KM_i=D_i=0$, $HA_i=0.1396$ 弧度, $KA_i=0.1047$ 弧度, ($i=\{RF,RH,LF,LH\}$)。图中Direction代表四足机器人行走方向, LH表示左后腿。

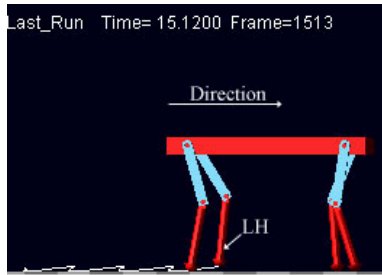


图 4 (a) 添加了膝、髋关节摆幅轨迹

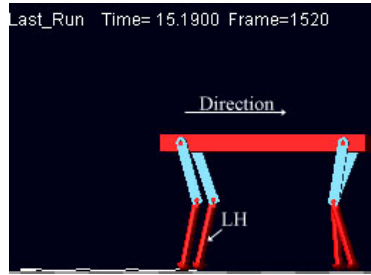


图 4 (b) 没有添加膝、髋关节摆幅轨迹

图 4 仿真机器人及足端轨迹

Fig.4 The toe trajectories of the simulation

图 5 与图 6 分别为四足机器人在增加摆幅和不增加摆幅两种情况下所有足端的轨迹曲线及受力曲线。实线为足端曲线，虚线为足端受力曲线。由图 5 可知，在前述增加关节摆幅的参数设置下前腿足端离地高度可达 50mm，后腿足端离地高度达 30mm。相对于图 6 中的足端曲线，增加膝、髋关节摆幅是一种有效的解决后腿拖地方法。图 5、图 6 右端的纵轴为足端受力轴以及对应的受力曲线虚线定性显示了足端触地情况。

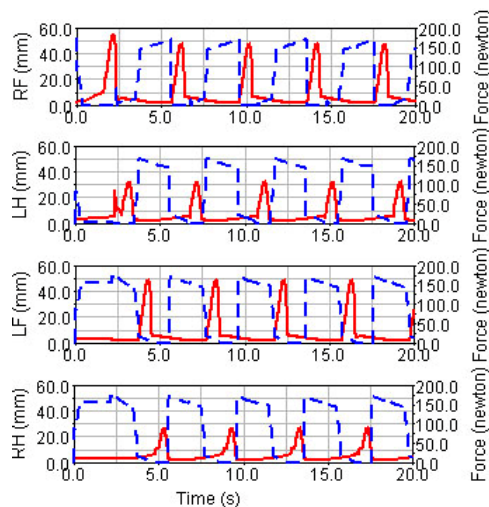


图 5 增加膝、髋关节摆幅的轨迹曲线及足端法向受力曲线

Fig.5 The toes trajectories and the normal forces with adding the swing amplitudes

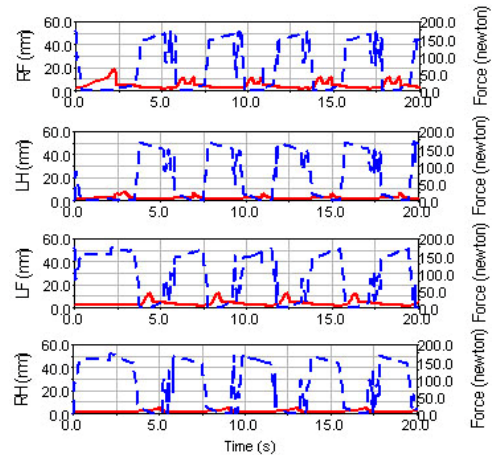


图 6 没有增加膝、髋关节摆幅的轨迹曲线及足端法向受力曲线

Fig.6 The toes trajectories and the normal forces without adding the swing amplitudes

本小节设置的控制器参数并非特例而为典型代表。因此，运动控制器的设计可以根据需要地改变髋关节步幅、膝关节步幅、髋关节摆幅和膝关节摆幅。

3.2 四足机器人实验

我们将四足机器人的所有关节转动正方向按照图 2 (a) 所示定义，使得四足机器人在本节增加膝、髋关节参数设置下后腿有效抬起并向前行走。图 7 描述了四足机器人各腿在一个慢走步态周期下的状态。





图 7 慢走步态下的四足机器人

Fig.7 The quadruped in walk gait

图 7 中的细圈用来标注机器人足端已经离开地面。四足机器人向前行走的同时在第 13.5s 右前足抬起, 在第 14.5s 左后足抬起, 在第 15.5s 左前足抬起, 在第 16.5s 右后足抬起。(视频地址: http://v.youku.com/v_show/id_XMTk1NjkyMzky.htm 1)

4 步态变换

为了使四足机器人既能在多种典型步态下行走即慢走、对角小跑、踱步等也能在典型步态之间相互变换, 运动控制器的步态产生与变换应该接近自然界四足动物对步态的控制, 既能够产生多种典型步态轨迹曲线也能快速平稳地在各种步态轨迹之间变换。

根据文献[12], 慢走步态的特征是占空比 β 大于等于 0.75, 每条腿之间的相差为 $T/4$; 对角小跑步态、踱步步态和跳跃步态的占空比 β 等于 0.5, 其中对角小跑步态下的对角腿(如左前腿与右后腿)相差为零, 左右腿之间的相差为 $T/2$; 踱步步态下的同侧腿(如左前腿与左后腿)相差为零, 左右腿之间的相差为 $T/2$; 跳跃步态下的前腿(如左前腿与右前腿)或后腿之间的相差为零, 而前后腿之间为 $T/2$ 。本文针对上述特征设计的运动控制器 (N 对应于占空比 β , D_i 对应于相位差) 能够产生慢走步态、对角小跑步态、踱步步态及跳跃步态等。其中各种步态之间的变换应该满足下述三个条件之一:

- 1) 从一种步态变换到另一种步态的位置控制曲线应该有一个快速、平稳的过渡;
- 2) 步态变换的时间段应该选择在相应的腿处于摆动相时;
- 3) 步态变换对机器人行走的稳定性的影响应该控制在最小。

4.1 步态变换仿真

本文以慢走步态到对角小跑步态的变换来作为

步态变换的实例。慢走步态与对角小跑步态的差异不仅涉及到占空比和步幅的改变, 腿与腿之间的相位差也应作相应的调整即 D_{LH} 从零变为 $-N\pi/(3(N+1))$, D_{LF} 从零变为 $N\pi/(3(N+1))$ 。四足机器人在对角小跑步态下的参数为: $N=1$, $T=4$, $HM_{LF}=HM_{RF}=-0.0873$ 弧度, $HM_{LH}=HM_{RH}=0.0873$ 弧度, $KM_{LF}=KM_{RF}=0.0873$ 弧度, $KM_{LH}=KM_{RH}=0.0873$ 弧度, $D_i=0$, $HA_i=0.1396$ 弧度, $KA_i=0.1047$ 弧度, ($i=\{RF, RH, LF, LH\}$)。

从第 11s 到第 12s, 运动控制器产生的步态由慢走步态变换到对角小跑步态, 其中参数 N 、 HM_{LF} 、 HM_{RF} 、 HM_{LH} 、 HM_{RH} 、 KM_{LF} 、 KM_{RF} 、 D_{LH} 、 D_{LF} 按照如下方式进行插值过渡:

$$a = h_0 - h_1 \quad (13)$$

$$b = (t - t_0)/(t_1 - t_0) \quad (14)$$

$$Out = \begin{cases} h_0 & t \leq t_0 \\ h_0 - a b^2 (3 - 2b) & t_0 \leq t \leq t_1 \\ h_1 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (15)$$

公式中 h_0 为变换初值, h_1 为变换终值, t_0 为变换时间初值, t_1 为变换时间终值; a 、 b 为中间变量, Out 为对应于时间 t 的输出值。公式中的 Out 变量代表参数 N 、 HM_{LF} 、 HM_{RF} 、 HM_{LH} 、 HM_{RH} 、 KM_{LF} 、 KM_{RF} 、 D_{LH} 、 D_{LF} 等, t_0 取第 11 秒, t_1 取第 12s, h_0 为第 11 秒时参数对应的初值, h_1 为第 12s 时参数对应的终值。图 8 显示了步态变换下的所有关节的轨迹曲线。

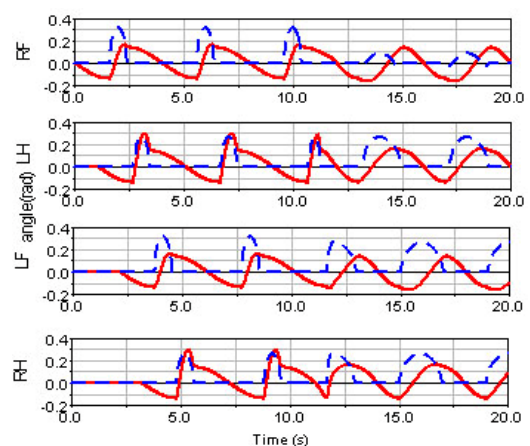


图 8 慢走步态变换到对角小跑步态的关节轨迹曲线

Fig.8 The transition trajectories from walking to trotting

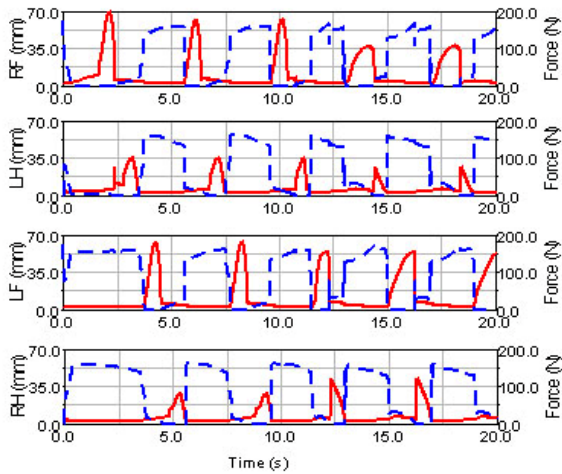


图9 步态变换的足端轨迹及法向受力曲线

Fig.9 The transition trajectories and the normal forces

图9显示了足端轨迹及法向受力曲线。机器人足端在第12s后转为对角小跑步态下触地曲线,由于从慢走变换到对角小跑其行走速度相对来说比较慢,因此对角小跑步态下的足端受力曲线即 RF 与 LH (或者 LF 与 RH)并非严格地同时抬起同时落下,而具有一定的时间延迟。从摆腿的时间顺序及占空比等特征来看,这不影响对慢走和对角小跑的区分。

4.2 步态变换实验

图10为四足机器人从慢走步态变换到对角小跑步态的实验。在时间4.5s、5.5s、6.5s、7.5s右前足、左后足、左前足以及右后足以慢走步态分别抬起并向前行走,第12s以后四足机器人以对角小跑步态行走,其中第13s左前足与右后足同时抬起,第15s右前足与左前足同时离开地面(图中以细圈标注)。

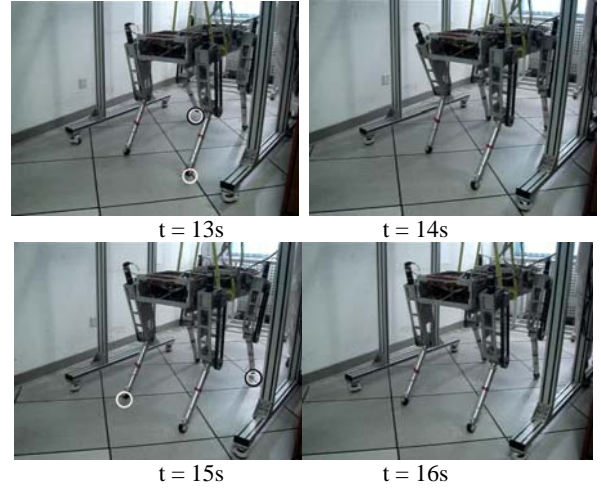
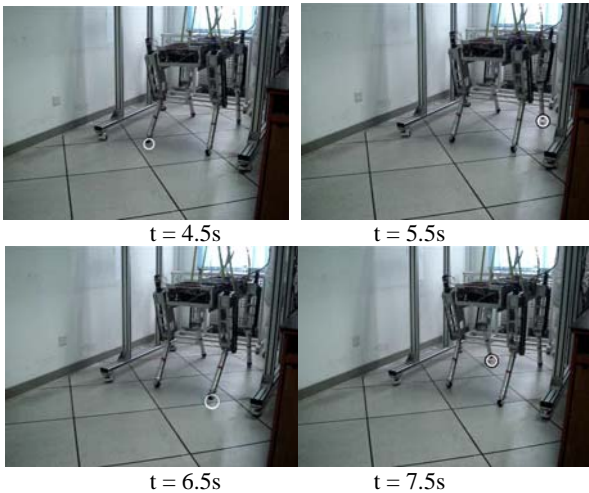


图10 四足机器人慢走步态变换到对角小跑步态

Fig.10 The quadruped transits from walking to trotting

维持机器人行走过程中的稳定性与前进方向以及平稳过渡原有步态的速度、加速度是前述三个条件的主旨,从图10中我们可以看到四足机器人通过改变占空比、调节各腿之间的相差成功实现慢走到对角小跑的变换。四足机器人变换步态后仍然能保持原有行走方向,并且将慢走步态下的速度平稳过渡到对角小跑步态的速度。同理,调节相应的比率 N 及相差 D_i ($i=\{RF,RH,LF,LH\}$),本运动控制器也能够实现慢走步态到踱步步态或者慢走步态到跳跃步态或者对角小跑到跳跃步态的变换。(视频地址:http://v.youku.com/v_show/id_XMTk1NjkyODI0.htm 1)

5 结论

本文提出了一种适用于四足机器人步行的运动控制器。该运动控制器通过直接利用正弦函数产生满足四足机器人在各种步态下行走的位置控制信号,其参数相对于基于CPG的运动控制器具有明确的物理意义。考虑到四足机器人行走时并非严格地在PEP点进入摆动相在AEP点进入站立相(PEP、AEP的定义见第2.2小节),因而通过直接增加髋、膝关节等运动摆幅来解决后腿拖地问题。

四足机器人不仅应该能在多种步态下行走,也应该在各种步态之间自如地变换。本文以慢走步态到对角小跑步态变换的实例验证了该运动控制器能够从改变对应于步态特征的某一参数的角度,如参数 N 对应于占空比、参数 D_i 对应于各腿之间的摆动相差和参数 HM_i 对应于步幅等,来实现平稳快速的步态变换。慢走步态到对角小跑步态变换的实验从

实践上证明了四足机器人能够快速平稳地从慢走到小跑到跳跃到奔跑。

运动控制器不仅能从基于位置的角度产生各关节的驱动信号,也能从基于状态机的角度产生状态的判断信号。以速度信号(位置信号的导数)是否大于零来作为基于状态机的运动控制器的状态判别点,从而可以实现基于状态机的运动控制器。

参考文献:

- [1] Y. Fukuoka, H. Kimura, Y. Hada and K. Takase. "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot 'Tekken' on Irregular Terrain Using a Neural System Model"[J].*Robotics Research*, 2003(6):147-160.
- [2] Hiroshi Kimura, Seiichi Akiyama and Kazuaki Sakurama, "Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator"[J].*Autonomous robots*, 1999(7): 247-258.
- [3] Xiuli Zhang, Haojun Zheng, "Walking up and down hill with a biologically-inspired postural reflex in a quadrupedal robot"[J].*Autonomous Robots*, 2008,25(1-2): 15-24.
- [4] S. Talebi, I. Poulakakis, E. Papadopoulos, M. Buehler, "Quadruped Robot Running With a Bounding Gait" [C] Proceedings of the Seventh International Symposium on Experimental Robotics, pp. 281-289. vol.271.
- [5] M. Buehler, R. Battaglia, A. Cocosco, G. Hawker, J. Sarkis, K. Yamazaki, "SCOUT: A simple quadruped that walks, climbs, and runs" [C] Proceedings of 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, pp. 1707-1712. vol.2
- [6] M. Buehler, A. Cocosco, K. Yamazaki, R. Battaglia, "Stable Open Loop Walking in Quadruped Robots with Stick Legs" [C] Proceedings of the 1999 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, pp. 2348-2353. vol.3.
- [7] D. Papadopoulos, M. Buehler, "Stable running for a quadruped robot with compliant legs" [D] M. Eng. Thesis, McGill University, 2000.
- [8] K. S. Yamazaki, M. Buehler, "The design and control of Scout I, A Simple Quadruped Robot". [D] M. Eng. Thesis, McGill University, Dec 1999.
- [9] Bin Li, Xun Li, Wei Wang, Yanfeng Tang, Yiping Yang, "A Method Based on Central Pattern Generator for Quadruped Leg Control" [C]. Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2035-2041. vol.15/2009.
- [10] Xun Li, Wei Wang, Bin Li, Yanjun Wang, Yiping Yang, "Central Pattern Generators Based Adaptive Control for a Quadruped Robot"[C]. Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2068-2073. vol.15/2009.
- [11] S.Talebi, I.Poulakakis, E.Papadopoulos, Mattin Buehler, "Quadruped Robot Running With a Bounding Gait", [J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp.281-289, Vol.271/2000.
- [12] Schmiedeler, James Patrick, "The mechanics of and robotic design for quadrupedal galloping",[D]. Dissertation Abstracts International, Vol. 62-11, 2001.
- [13] Xiuli Zhang, "Biological-inspired Rhythmic Motion & Environment Adaptability for Quadruped Robot",[D]. Dissertation for the doctor degree, 2004.

作者简介:

李 斌 (1984-), 男, 工程师, 研究领域为四足机器人;
郭雅娟 (1975-), 女, 高级工程师, 研究领域为人工智能;
黄 伟 (1980-), 男, 高级工程师, 研究领域为人工智能;
陈锦铭 (1985-), 男, 工程师, 研究领域为人工智能;
陈 磊 (1983-), 男, 工程师, 研究领域为人工智能;
王 伟 (1966-), 男, 博士, 副研究员, 研究领域为多足机器人、机电控制系统。

A Controller For Quadruped Robot Locomotion

LI Bin, GUO Ya-juan, HUANG Wei, CHEN Jin-ming, CHEN Lei WANG Wei

Abstract : The controller based on Central Pattern Generator (CPG) doesn't need to give an exact model of the kinematics and the kinetics of the robot and the environment. The CPG can drive the robot to move with the open loop control and can realize the closed loop control with feedback like reflex. However, the parameters of the CPG couple with each other strongly, and it is difficult to tune the parameters to get the ideal output. So there exist the problem of hind leg dragging and the difficulty with realizing gait transition. This paper proposes a controller for the quadruped robot locomotion based on the CPG. The controller can shift the output phases flexibly and improve the non-zero start points that exists in CPG, and then it is easy to solve the hind leg dragging and to realize gait transition from walking to trotting. The experiments on the simulation and on the quadruped platform indicate that the controller not only substitutes the CPG in gait generation and gait transition, but also it provides a new way for gait control.

Keywords : Controller; Quadruped Robot; Gait Transition; Hind Leg Dragging