

双足机器人运动仿真中的能耗评估方法*

卢志强^{1,2} 侯媛彬¹ 孟芸²

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 河南大学 人工智能学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 有限储能的双足机器人, 运动过程的高能耗是制约其应用与发展的重要因素之一。对比人类节能高效的行走, 当前的双足机器人步态算法的能量利用效率存在较大的提升空间。文中通过分析双足机器人运行能耗的构成, 选取机器人质心重力作用下的关节执行器的负荷转矩作为能耗评估的基础, 通过算法测算关节执行器的角速度与负荷转矩的乘积, 建立评价步态算法的能耗指标函数。经过在步态算法中的计算分析, 建立的能耗函数可快速、准确计算机器人运动步态的能耗值。文中能耗函数的计算方法具有广泛的适用性, 将其融入步态参数优化算法, 评估参数取值的能耗指标, 是实现双足机器人节能步态控制的基础。

关键词: 双足机器人 能耗评估 运动控制 步态仿真 质心模型

DOI: 10.12319/j.issn.2096-1200.2022.23.166

一、引言

双足机器人是当前工程技术研究的热点之一。在过去的50余年, 经过科研人员的不懈努力, 其理论研究取得了显著的进展。如ASIMO能攀爬楼梯, 并能在运动中实现双足到四足的转换。Atlas可实现转体跳跃、后空翻等复杂动作。Walkman可完成开闭阀门, 驾驶汽车等任务。然而, 对比人类自然、稳定、节能的运动, 双足机器人运动控制的研究还存在较大差距^[1]。

一直以来, 能量利用效率低是制约双足机器人应用与发展的重要因素之一。分析人类运动特征的仿生学研究表明, 人类在运动中总是采用最小能耗的方式, 其移动同样距离的能耗值比双足机器人低数十倍。双足机器人完成同样的任务, 不同的运动算法产生的能耗存在较大差异, 能在算法设计过程中, 快速评估运动的能耗值, 是实现双足机器人运动控制参数优化的关键^[2]。

二、双足机器人的能耗指标函数

双足机器人在运行过程中产生的能耗 E_a 可分为用于控制器和各传感器、通信电路工作的基础能耗 E_b 和用于驱动关节转动的运动能耗 E_m , 其中 E_b 一般是功率 P_b 和时间 t 的线性函数, E_m 是系统能耗的主要部分, 其为各关节电机瞬时功率 $p_i(t)$ 对时间 t 的积分和, $i=1,2,\dots,K$, 其中 K 是关节电机的数目, 即:

$$E_a = E_m + E_b = \sum_{i=1}^k \int_0^t p_i(\xi) d\xi + P_b t \quad (1)$$

不同的步态运动算法, 控制机器人关节电机执行不同的轨迹, 产生的 E_m 会存在较大差异。在机器人的运动算法中, 控制参数轨迹, 可有效降低 E_m 。然而, 包含数十个关节-连杆结构的双足机器人, 准确测量 $p_i(t)$ 并不容易。考虑 $p_i(t)$ 为电机输出功率瞬时功率 $p_i^2(t)$ 与附加功率 $p_i^0(t)$ 之和, 其中 $p_i^2(t)$ 用来克服电机转轴的负载功率 $p_i^l(t)$, $p_i^0(t)$ 包括电机自身产生的铜耗、铁耗、及机械损耗等。一般而言, $p_i^2(t)$ 是 $p_i(t)$ 的主要成分。对于包含 M 个质心的双足机器人, 第 i 个关节转轴上的负载功率为:

$$p_i^l(t) = \dot{q}_i(t) \sum_{j=1}^M \tau_i^j(t) \quad (2)$$

其中, $\dot{q}_i(t)$ 是机器人第 i 个关节的旋转角速度, τ_i^j 是第 j 个质心 m_j 的重力 $f_j(t)$ 作用于第 i 个关节的负载转矩, 其值为:

$$\tau_i^j(t) = [\mathbf{r}_j(n) - \mathbf{r}_i(n)]^T \times \mathbf{f}_j(t) \quad (3)$$

式中, $[\mathbf{r}_j(n) - \mathbf{r}_i(n)]$ 表示第 i 个关节于第 j 个质心的空间位置矢量, $\mathbf{f}_j(t) = [0 \ 0 \ c_i^j(t)m_jg]^T$, $g = 9.81m/s^2$ 是重力加速度, $c_i^j(t)$ 用来表述机器人运动中第 i 个关节对 j 个质心的支撑系数, 当关节 i 位于单腿支撑的关节时 $c_i^j(t) = 1$, 在双腿分担支撑重力时 $c_i^j(t) = 0.5$, 关节 i 不受质心重力影响时 $c_i^j(t) = 0$ 。一般而言, 式(2)和式(3)均可在通过步态算法求取, 若对各变量离散化, 并令:

$$\tau_i^j(n) = \sum_{j=1}^M \tau_i^j(n) \quad (4)$$

*项目名称: 2022年河南省科技攻关项目, 项目编号: 222102220060; 2022年河南省高校重点科研项目, 项目编号 22B520011。

则，定义双足机器人运动过程中的能耗指标函数为：

$$E = \sum_{n=1}^N \tau^T(n) \dot{q}(n) \quad (5)$$

式中， $\tau(n)$ 为机器人关节的转矩构成的列向量， $\dot{q}(n)$ 为机器人关节的转动角速度列向量， N 是行走的步态周期。

三、机器人运动步态算法的能耗计算

验证能耗算法的实物双足机器人，其总质量被划分为5个质心，图中，是身体质心位置， r_{lu}/r_{ru} 分别是左/右腿上部质心位置， r_{ld}/r_{rd} 分别是左/右腿下部质心位置， l_b 是髋关节中点到 r_b 的距离。 r_{lh}/r_{rh} 分别是左/右髋关节的位置， r_{lk}/r_{rk} 分别是左/右膝关节位置， r_{ll}/r_{rl} 分别是左/右足关节位置。双足机器人的五个质心质量。如表1所示。

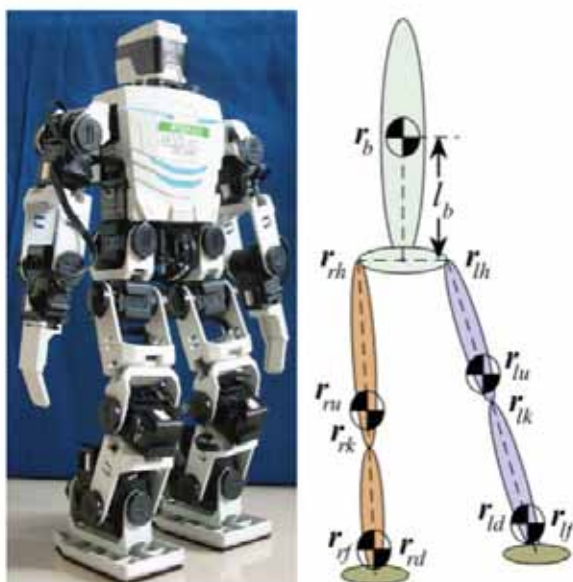


图1 双足机器人的质心结构

表1 双足机器人的质心参数

符号	定义	值
m_b	身体质量	1.2kg
m_{ru}	右腿上部质量	0.2kg
m_{rd}	右腿下部质量	0.2kg
m_{lu}	左腿上部质量	0.2kg
m_{ld}	左腿下部质量	0.2kg

图1所示机器人的每条腿具有5个关节，分别是控制右/左髋滚动的关节 q_1/q_6 ，位置为 r_1/r_6 ；右/左髋俯仰关节 q_2/q_7 ，位置为 r_2/r_7 ；右/左膝俯仰关节 q_3/q_8 ，位置为 r_3/r_8 ；右/左踝俯仰关节 q_4/q_9 ，位置为 r_4/r_9 ；右/左踝滚动关节 q_5/q_{10} ，位置为 r_5/r_{10} 。双足机器人各关节位置及能耗计算得中的矢量线及重力线。如图2所示。

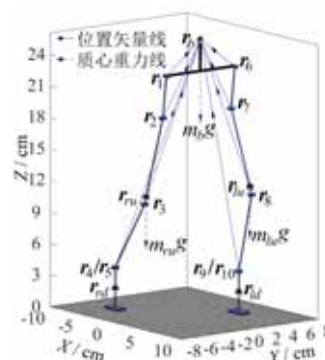


图2 双足机器人的能耗计算中的各变量及矢量线

若双足机器人行走的步态算法中步态周期 $N = 16$ ，采用时间 $t_s = 0.1s$ ，行走步长为10cm，行走以x轴为正方向。不失一般性，在步态算法的研究中，以左腿支撑，右腿摆动向前，双机器人行走的步态示意。如图3所示。

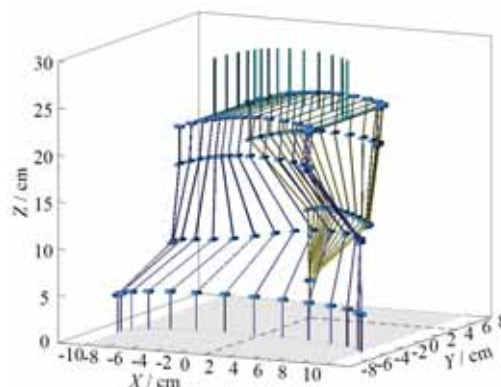


图3 双足机器人行走步态示意图

双足机器人在进行如图3所示的行走过程中，身体质心在每个采样点的位置 $r_b(n) = [x_b(n) \ y_b(n) \ z_b(n)]^T$ 如表2所示，表中的数据单位为cm，右腿关节和左腿关节的控制角度分别如表3和表4所示，表中的数据单位为rad。

表2 双足机器人运动中身体质心的位置 r_b

n	$x_b(n)$	$y_b(n)$	$z_b(n)$
1	-4.93	0.00	22.51
2	-4.67	1.02	22.54
3	-4.30	1.80	22.59
4	-3.84	2.23	22.68
5	-3.34	2.39	22.78
6	-2.83	2.41	22.88
7	-2.26	2.43	22.98
8	-1.52	2.46	23.07
9	-0.55	2.48	23.13
10	0.63	2.46	23.13
11	1.88	2.43	23.03
12	2.98	2.41	22.85
13	3.82	2.39	22.66
14	4.36	2.23	22.53
15	4.68	1.80	22.45
16	4.88	1.02	22.49

表3 双足机器人运动中右腿关节 $q_1(n) \sim q_5(n)$ 的控制角度

n	$q_1(n)$	$q_2(n)$	$q_3(n)$	$q_4(n)$	$q_5(n)$
1	0.000	0.072	-0.564	0.636	0.000
2	-0.055	0.119	-0.496	0.615	-0.055
3	-0.098	0.105	-0.541	0.647	-0.098
4	-0.122	0.039	-0.637	0.675	-0.122
5	-0.131	-0.072	-0.760	0.688	-0.131
6	-0.133	-0.210	-0.874	0.664	-0.133
7	-0.134	-0.349	-0.942	0.593	-0.134
8	-0.135	-0.464	-0.948	0.484	-0.135
9	-0.136	-0.542	-0.900	0.358	-0.136
10	-0.134	-0.587	-0.829	0.242	-0.134
11	-0.133	-0.614	-0.760	0.146	-0.133
12	-0.132	-0.631	-0.699	0.068	-0.132
13	-0.131	-0.633	-0.633	-0.001	-0.131
14	-0.122	-0.616	-0.557	-0.059	-0.122
15	-0.097	-0.583	-0.497	-0.086	-0.097
16	-0.055	-0.598	-0.554	-0.045	-0.055

表4 双足机器人运动中右腿关节 $q_6(n) \sim q_{10}(n)$ 的控制角度

n	$q_6(n)$	$q_7(n)$	$q_8(n)$	$q_9(n)$	$q_{10}(n)$
1	0.000	0.601	0.584	0.017	0.000
2	-0.055	0.589	0.597	-0.008	-0.055
3	-0.096	0.564	0.598	-0.033	-0.096
4	-0.119	0.532	0.596	-0.064	-0.119
5	-0.127	0.498	0.595	-0.096	-0.127
6	-0.127	0.464	0.595	-0.131	-0.127
7	-0.127	0.427	0.595	-0.169	-0.127
8	-0.128	0.378	0.595	-0.217	-0.128
9	-0.129	0.314	0.595	-0.281	-0.129
10	-0.128	0.237	0.595	-0.358	-0.128
11	-0.127	0.156	0.595	-0.440	-0.127
12	-0.127	0.082	0.596	-0.513	-0.127
13	-0.127	0.027	0.596	-0.570	-0.127
14	-0.120	-0.011	0.595	-0.606	-0.120
15	-0.097	-0.033	0.594	-0.627	-0.097
16	-0.055	-0.049	0.589	-0.638	-0.055

依照本文能耗指标函数的计算方法，双足机器人在每个采样之间的能耗 $E_i(n)$ 值如表5所示。则双足机器人行走的能耗算法中，行走单步能耗指标函数为：

$$E = \sum_{n=1}^{16} E_i(n) = 198.1mJ \quad (6)$$

表5 双足机器人运动中的能耗值

n	能耗值	n	能耗值
1	15.8 mJ	9	13.7 mJ
2	15.9 mJ	10	16.8 mJ
3	13.9 mJ	11	17.8 mJ
4	11.1 mJ	12	16.0 mJ
5	8.5 mJ	13	12.2 mJ
6	7.5 mJ	14	10.1 mJ
7	8.2 mJ	15	8.1 mJ
8	10.5 mJ	16	12.1 mJ

四、结论

有限储能的双足机器人，运动的能效性是衡量其算法性能的重要指标。机器人在运动采用不同的步态算法，产生的能耗值存在较大差异，快速评价算法的能效性是步态算法研究的基础。

本文从机器人运行中能耗产生的原因出发，分析机器人能耗的构成，选取机器人运动控制中，算法影响较大，且是能耗组成的主要部分，即机器人质心作用下的负载功率作为评价能耗的基础，通过计算机器人关节的负载转矩及关节角速度对时间的步态周期和，得到评价运动步态的能耗指标函数。本文算法可融入机器人运动的步态控制算法，在参数的优化中，快速、准确评估能耗值，为获取机器人节能运动的步态参数奠定基础。

参考文献

- [1]田彦涛,孙中波,利宏扬,等.动态双足机器人的控制与优化研究进展[J].自动化学报,2016,42(8):1142-1157.
- [2]卢志强,侯媛彬,孟芸,等.双足机器人节能步态规划算法[J].西安科技大学学报,2021,41(3):540-548.