

文章编号: 1003-8728(2003) 01-0077-03

基于 ZMP点的两足机器人步态优化

窦瑞军, 马培荪

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030)

窦瑞军

摘要: 采用身高、速度和步长等六个参数描述两足机器人动态步行, 并进行了定量分析; 然后利用面向对象思想完成牛顿-欧拉算法的计算机实现, 进而求出机器人动态行走时的 ZMP点; 最后, 以 ZMP点为目标函数用遗传算法对步态进行了优化, 其结果证明算法的有效性。

关键词: 两足机器人; 步态设计; 零力矩点 (ZMP); 遗传算法

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A

ZMP-based Gait Optimization of a Biped Robot

DOU Rui-jun, MA Pei-sun

(Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract In this paper, the gait of a biped robot is described using six parameters such as stature, velocity, length of the step, etc. The Newton-Euler algorithm is realized by object-oriented philosophy, and then the zero moment point (ZMP) of the walking biped is calculated. Finally, the gait of the biped robot is optimized using genetic algorithm, and the result shows that of the algorithm is correct and effective.

Key words Biped robot; Gait design; Zero moment point (ZMP); Genetic algorithm

近年来, 对两足机器人的研究, 已引起了世界各国机器人专家的重视^[1]。由于其本身是一个复杂的非线性系统, 所以在实现两足机器人动态稳定行走这一关键问题时, 仍有许多难题有待克服。

实现两足机器人动态行走, 必须对机器人进行动力学建模、步态设计和稳定性分析。步态设计作为其中的一个重要环节, 在两足机器人动态步行中起重要的作用^[2,3]。由于两足机器人的自由度多且在动态行走时各自由度之间的关系协调比较困难, 导致两足机器人的步态设计复杂化。对两足机器人动态行走时各种步态稳定性的影响缺乏一个定量的指标。在一定的约束条件下, 本文对两足机器人的步态进行了参数化设计; 然后, 基于 ZMP点的目标函数, 用遗传算法对参数化步态进行了优化, 并进行了分析。

1 两足机器人步态设计

1.1 坐标系建立

两足机器人 JFHR是由上海交通大学和日本富士通公司外围设备研究所合作, 由上海交通大学研制而成。图 1 为两足机器人 JFHR的坐标系架构。本文没有像传统的方法, 把参考坐标系建立在支撑脚上, 而是建立了固定在地面上

的世界坐标系 $o-xyz$, 及一个和机器人身躯固连的相对坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$, 并用 $P_0 = [p_{0x} \ p_{0y} \ p_{0z}]^T$ 和 $W_0 = [w_{0x} \ w_{0y} \ w_{0z}]^T$ 分别表示坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 相对于坐标系 $o-xyz$ 的位置和姿态。本文讨论的两足机器人 JFHR的动力学模型有 18 个自由度, 其中有 12 个关节自由

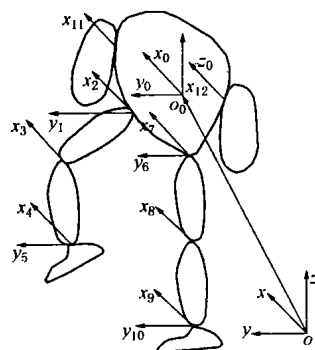


图 1 JFHR坐标系简图

度。在身躯相对坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 的基础上, 对机器人配置如图 1 所示的坐标架。各坐标系相互平行, 为了画图简单, 图中仅画出各坐标系的旋转轴, 即机器人各关节自由度的旋转轴。

1.2 两足机器人步态设计

由于机器人的自由度比较多, 对这么多的自由度进行独立控制是不可能的, 为此要对机器人做一定的限制, 约束条件为:

① 身躯保持垂直, 即 $W_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。

② 左右脚保持垂直并只可在 y 和 z 方向上移动, 即支撑脚踝关节位置 $P_{as} = [p_{asx} \ p_{asy} \ p_{asz}]^T$ 和迈步脚踝关节位置 $P_{an} = [p_{anx} \ p_{any} \ p_{anz}]^T$ 的 x 向分量恒定。

收稿日期: 2001-11-13

作者简介: 窦瑞军 (1973-), 男 (汉), 山西, 博士研究生

E-mail: roverjob@yahoo.com.cn

③ 左右臂对称摆动。在满足上述约束条件和保证步态可复现的前提下,对步态用步长 S 步速 V 身高 H 手臂摆幅 R 身躯上下、左右的摆幅 A 和 C 这六个最具代表意义的参数来描述,即

$$T = \frac{S}{V} \quad (1)$$

$$p_{x0} = A \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (2)$$

$$p_{y0} = Vt \quad (3)$$

$$p_{z0} = H - \frac{C}{2} \cos\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta_{12} = R \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \\ \theta_{11} = -R \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_{12}, θ_{11} 分别为左右臂摆动自由度; T 为每一步所需的时间。

在动态步行时,支撑脚的位置和姿态以及迈步脚的姿态是唯一确定的,即支撑脚踝关节的位置 P_{as} 已知,据此可求出迈步脚踝关节的位置 P_{am}

$$p_{amy} = 2p_{y0} - p_{asy} \quad (6)$$

$$p_{amz} = C \cos\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \quad (7)$$

式中: p_{asy} 为支撑脚踝关节位置 P_a 的 y 向分量; p_{amy}, p_{amz} 分别为迈步脚踝关节位置 P_{am} 的 y 向和 z 向分量。

至此,两足机器人在动态行走的任意时刻,身躯以及两脚的位姿和手臂的摆动自由度可以唯一确定。通过运动学反解可求其余关节自由度的值,在此不做推导。

1.3 步态设计要解决的关键问题

由于两足机器人动态步行不同于一般工业机器人或多指手,它们都有一个稳定的基座,所以,对于两足机器人的动态行走,设计出一组满足稳定性的参数并不容易。

要防止机器人翻倒,则必须保证机器人在任意时刻的 ZM P 点在脚掌支撑面内^[4]。图 2 为地面对支撑脚的受力示意图,图 2 中 $F = [f_x \ f_y \ f_z]^T$, $M = [m_x \ m_y \ m_z]^T$ 分别为地面对支撑脚的作用力和力矩。在 F 和 M 已知时, ZM P 点可用下式来求取,即

$$x_{ZMP} = \frac{m_y}{f_z}, y_{ZMP} = \frac{m_x}{f_z} \quad (8)$$

1.4 ZM P 点的求解

基于牛顿-欧拉动力学计算方法易于采用计算机递推实现。本文利用 C++ 面向对象思想来分析研究,对 ZM P 点进行求取,具体过程如下:

步骤 1 图 1 的每一个坐标系,定义一个通用类

```
Class Coordinate{
```

私有成员:

质量 转动惯量 旋转角度等

成员函数:

Forward(); // 速度、加速度、惯性力和力矩前推

Backward(); // 约束力和关节力矩后推

}

步骤 2 每个坐标系相应定义一个对象。

Coordinate List[13]

步骤 3 分别计算身躯施加于四肢的作用力,如图 3 所示

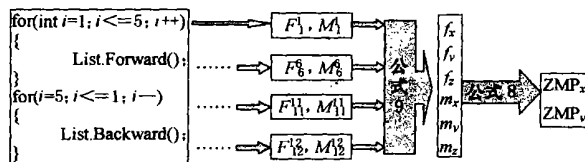


图 3 ZMP 计算流程图

图 3 中, $F_1^0, M_1^0, F_6^0, M_6^0, F_{11}^0, M_{11}^0, F_{12}^0$ 和 M_{12}^0 分别为在坐标系 1、6、11 和 12 中四肢所受身躯的约束力和约束力矩。图中只列出了计算 F_1^0 和 M_1^0 的程序,其他可类推。在机器人系统中,只有力 $F = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ 和力矩 $M = [m_x \ m_y \ m_z]^T$ 为外力,并可通过下式求解:

$$\begin{aligned} F &= R_1^0 F_1^0 + R_6^0 F_6^0 + R_{11}^0 F_{11}^0 + R_{12}^0 F_{12}^0 + F_0^0 \\ M &= R_1^0 M_1^0 + R_6^0 M_6^0 + R_{11}^0 M_{11}^0 + R_{12}^0 M_{12}^0 + N_0^0 + \\ &\quad r_{0,1}^0 \times R_1^0 F_1^0 + r_{0,6}^0 \times R_6^0 F_6^0 + r_{0,11}^0 \times R_{11}^0 F_{11}^0 + \\ &\quad r_{0,12}^0 \times R_{12}^0 F_{12}^0 + r_{foot}^0 \times F \end{aligned} \quad (9)$$

式中: R_i^0 表示坐标系 i 在坐标系 j 中的姿态; $r_{0,i}^0$ 表示在坐标系 0 中坐标系 i 原点的位置向量, $r_{0,6}^0, r_{0,11}^0$ 和 $r_{0,12}^0$ 可以类推; F_0^0 和 N_0^0 表示在坐标系 0 中,身躯自身的惯性力和惯性力矩, r_{foot}^0 表示在坐标系 0 中脚的位置向量。

2 遗传算法在步态优化中的应用和实现

2.1 目标函数的建立

考虑两足机器人动态稳定步行的抗干扰能力,把防止两足机器人翻倒的稳定裕度作为参数化步态设计的指标,即 ZM P 点离支撑脚掌中心距离越小越稳定。考虑到:① x_{ZMP} 和 y_{ZMP} 有正负之别,但我们只关心绝对值;② 脚掌 y 向的距离比 x 向距离大,所以在设计以 x_{ZMP}, y_{ZMP} 为自变量的遗传算法目标函数时,考虑对包含 x_{ZMP} 的项乘一个加权系数 2。目标函数具体形式如下:

$$2 \times x_{ZMP}^2 + y_{ZMP}^2 \quad (10)$$

2.2 遗传算法的实现

以式 (10) 为目标函数,步态六参数空间搜索的遗传算法设计如下:

① 初始化满足两足机器人几何条件的染色体种群,即所拟定的两足机器人的几何尺寸能实现每一组参数化步态。

② 对每一个参数用一个双精度的实数来编码。

③ 参数的范围 (K, H, S, A, R 和 B)、种群数 (PopSize)、最大遗传代数 (Max Gen)、遗传计算的交叉率 (PCrossover) 和变异率 (PMutation) 分别如图 4 所示。

④ 经过计算得优化参数为: $V=0.50294\text{ m/s}$; $H=0.50865\text{ m}$; $W=0.23083\text{ m}$; $A=0.04358\text{ m}$; $C=0.09044\text{ m}$; $R=12.863^\circ$ 。

⑤ 图 5 为遗传计算每一代染色体的适应度值。由图 5 可见计算 40 代后, 参数已基本收敛。

2.3 步态参数分析

用优化参数规划两足机器人的步态, 基于 OpenGL 的三维动画如图 6 所示。其仿翻倒的稳定性裕度可用图 7 与图 8 来分析。图 7 为 x_{ZMP} 的曲线, 其值在 $(-0.03\text{ m}, 0.03\text{ m})$ 范围内; 图 8 为 y_{ZMP} 的曲线, 其值在 $(-0.05\text{ m}, 0.05\text{ m})$ 范围内。所以, 只要脚掌 x 向宽大于 0.06 m , y 向长大于 0.1 m , 就可以保证机器人不发生左右、前后倾翻。

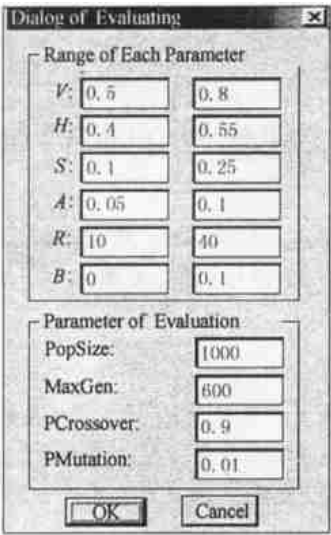


图 4 初始条件对话框

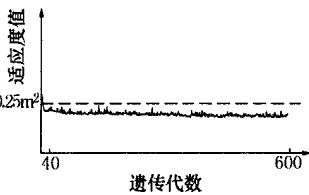


图 5 适应度值曲线图

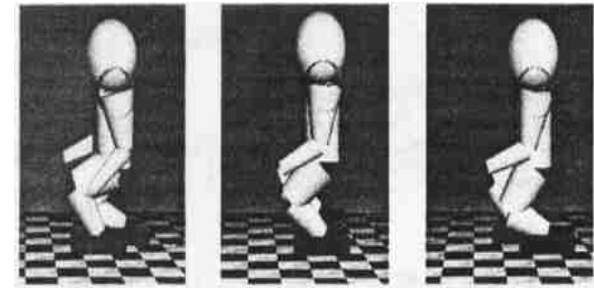


图 6 两足机器人三维动画仿真

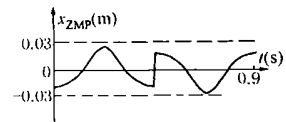


图 7 x_{ZMP} 曲线

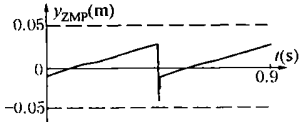


图 8 y_{ZMP} 曲线

3 结束语

本文针对两足机器人自由度多、在动态行走时不易协调的特点, 对两足机器人的步态进行了参数化描述, 从而可对两足机器人步态稳定性进行定量分析。为今后研究冲击、能耗等问题奠定了基础, 并可为两足机器人的机构设计和改进提供技术指导。为使两足机器人动态行走的稳定性高, 文中用遗传算法对参数化的步态进行了优化, 并对优化的结果进行了分析, 并证明遗传算法优化的有效性。

[参考文献]

[1] Hirai K, Hirose M. The development of honda humanoid robot [A], **Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation** [C], Leuven Belgium, 1321~ 1326

[2] Kajita S, Yamaura T, Kobayashi A. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit [J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1992, 8(4): 899~ 903

[3] Fujimoto Y, Kawamura A. Proposal of biped walking control based on robust hybrid position/force control [A], **Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics & Automation** [C], Minneapolis, Minnesota, 1996, 3 2724~ 2730

[4] 刘延柱, 徐俊. 人体运动的稳定性 [J]. **应用力学学报**, 1996, 13(4): 22~ 27

[5] 姜山, 陈君实等. 基于遗传算法的两足机器人步行优化 [J]. **上海交通大学学报**, 1999, 33(10): 1280~ 1283

(上接第 76 页)

[参考文献]

[1] Ting K L. Mobility criteria of single-loop n-bar linkages [J]. **ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design**, 1989, 111(4): 504~ 507

[2] Ting K L. Five-bar grashof criteria [J]. **ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design**, 1986, 108(4): 523~ 537

[3] Ting K L, Tsai G P. Mobility and synthesis of five-bar programmable linkages [A]. **Proceedings of the Ninth OSU Appalied Mechanisms Conference** [C], kansas city, MO, October 1985

[4] Ting K L. Gross motion and classification of closed-loop four-bar manipulators [A]. **Proceedings of the First National Conference on Appalied Mechanisms and Robotics** [C], Cincinnati, OH, Nov., 1989

[5] Ting K L, Liu Y W. Rotatability laws for n-bar kinematics chains and their proof [J]. **ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design**, 1991, 113(4)

[6] 陈瑞芳, 马履中. 平面五连杆机构曲柄存在条件及机构类型的判别方法 [J]. **江苏理工大学学报**, 1998, 19(1): 84~ 87

[7] 廖汉元等. 两自由度机构的可动性条件 [J]. **武汉冶金科技大学学报**, 1999, 22(1), 57~ 59

[8] 李佳等. 五杆两自由度机构可动性的充分条件 [J]. **武汉冶金科技大学学报**, 1998, 21(3): 329~ 332

[9] 周双林, 邹慧君等. 混合输入五杆机构构型分析 [J]. **上海交通大学学报**, 2001, (7)

[10] 周双林. 实现轨迹的混合驱动五杆机构设计理论及其实验研究 [J]. **上海交通大学**, 2001