

基于ZMP双足机器人稳定性控制策略与算法的研究

赵瑞林, 黎 炜, 王聪慧

(陕西工业职业技术学院 电气工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 基于ZMP控制理论及其数学模型,通过预先给定双足机器人步态的运动轨迹,计算确定各关节的旋转角度并选定控制系统的控制算法。对遗传算法在双足机器人步行稳定性控制策略做了分析,主要解决如何产生稳定控制机器人步态的数据,在步态运行过程中保证双足机器人从一个稳定态到下一个状态时,同样也是稳定的,以实现机器人在实际行走过程中达到较好的稳定效果。

关键词: 双足机器人; ZMP理论; 控制策略; 计算方法

中图分类号: TP 24 **文献标识码:** A

Biped Robot Stability Control Strategy and Algorithm Based on ZMP

Zhao Ruilin, Li Wei, Wang Conghui

(College of Electrical Engineering, Shaanxi Poletechnic Institute, Xianyang 712000, Shaanxi China)

Abstract: Based on ZMP control theory and the mathematical model, by presetting biped robot gait trajectory, the rotation angles of each joint are calculated, and system control algorithm is determined. The genetic algorithm in biped robot walking stability control strategy is analyzed, then robot gait stability control data are generated. Biped robot gait during running is ensured to be stable from one state to the next state, in order to achieve that actual running process of walking robots is stable.

Key words: biped robot; ZMP theory; control strategy; calculation method

双足步行机器人是一个多自由度、多变量、非线性、复杂的动力学系统。对于这个系统的伺服控制一直以来都是控制领域的重要课题。随着计算机计算能力的不断提高,各种各样的机器人控制算法不断涌现。遗传算法就是其中较为广泛应用的一种,本文将从实际的机器人控制角度,对遗传算法在双足机器人步行稳定性控制策略上做研究。

1 控制系统建模

在双足机器人步态控制理论中,ZMP步态控制理论是较为广泛使用的一种。根据ZMP理论关于机器人稳定性分析的描述:机器人所受的重力和惯性力及地面反力合力在水平面上的分力为零。其中至关重要的是寻找ZMP点。ZMP点就是两足机器人所受重力、惯性力的合力矢量的延线与地面的交点^[1]。如图1所示。

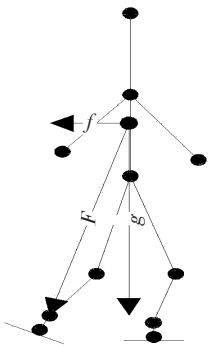


图1 机器人的连杆机构模型
Fig.1 Model of robot linkage

收稿日期: 2014-03-10
基金项目: 陕西省教育厅2013年自然科学专项科学研究项目(2013JK1088)
作者简介: 赵瑞林(1976-),男,陕西宝鸡人,副教授,硕士,研究方向为控制工程与控制理论
黎 炜(1967-),男,陕西彬县人,教授,研究方向为电气自动化控制
王聪慧(1983-),女,陕西渭南人,讲师,硕士,研究方向为控制工程与控制理论。

根据ZMP点的计算方法,依据D'Alembert定理有式(1)

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{X}_i + g) X_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Y}_i + g) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g)};$$
$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i Y_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{X}_i + g) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g)},$$

(1)

式(1)中: X_{zmp} 表示 X 方向上的运动状态; Y_{zmp} 表示 Y 方向上的运动状态; f_i 表示合外力; m_i 表示连杆 i 的质量; (X_i, Y_i, Z_i) 表示质心位置; $(\ddot{X}_i, \ddot{Y}_i, \ddot{Z}_i)$ 表示加速度; g 为重力加速度.

当机器人做静态步行时则有式(2):

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g X_i}{\sum_{i=1}^n m_i g}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i g}.$$

(2)

由定理可知,当机器人行走的过程中,ZMP点始终在机器人的支撑区域内,则机器人可以稳定地行走,并且ZMP点离支撑域中心越近,机器人的稳定裕度就越大,机器人抗干扰的能力越大,如图2所示,在支撑域中,小圆点为中心点,小方点为机器人的ZMP点.当ZMP点与中心点的距离 L_{zmp} 越小,稳定裕度越大.

本文采用了机器人关节空间位置计算最常用的位姿矩阵,可以通过位姿矩阵的正向运算,得出期望点的位置,即在杆长 $L_i(i=0, \cdots, n)$ 、质量 $M_i(i=0, \cdots, n)$ 和杆与杆之间的夹角 $\theta_i(i=0, \cdots, n)$ 已知的情况下,可通过位姿矩阵的运算得到机器人重心的位置,如果以地面作为XOY平面,与地面垂直的轴作为Z,就可以得到机器人重心在这个笛卡尔坐标系中的位置,从而确定重心的位置.通过位姿矩阵的逆运算,可得到期望点所在的位置的时刻,每个关节的角度 $\theta_i(i=0, \cdots, n)$.如果可以已知期望点的关于时间的轨迹,那么就可以得出 $\theta_i(i=0, \cdots, n)$ 关于时间的函数,从而得到了机器人某一个固定时刻的各个关节的状态,对机器人的运行的姿态作出了确切的数学表达式.但是位姿矩阵的逆运算,是一个庞大的矩阵表达式,这个矩阵表达式所求出来的 $\theta_i(i=0, \cdots, n)$ 不是唯一解,在这个不是唯一的解集中,要求搜索出一个最佳解.对于最佳解的选取,有很多约束条件,这些条件包括:稳定性、类人运动、机械限制和外界作用力的影响等等.但是这样多的约束条件,如果到最后了进行验证,那样运算量大,效率也不高,为了避免这样的缺陷,可以将验证条件提前加入决策中,运算量会大大减小,提高系统的实时响应能力^[2]. 机器人建模如图3所示.

2 机器人的步态规划

双足步行机器人的步态是人步行的一个模拟,人的步态是由很多个往复的周期运动所合成的结果,只是在有干扰的时候,将这种周期运动进行了适应性改动^[3].对机器人的步态运动进行了简单的分解,在满足上述约束条件和保证步态可复现的前提下,用步行周期 T 、步速 V 、身高 H 、手臂摆幅 R 、身躯中心上下、左右的

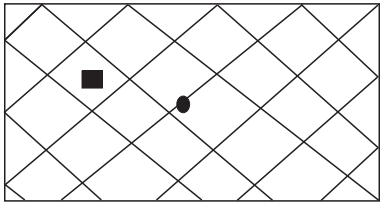


图2 机器人步行支撑域、中心点和ZMP点
Fig.2 The robot walking support domain, the center point and ZMP point

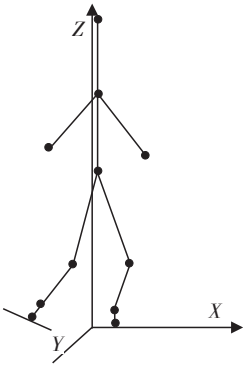


图3 机器人模型图和坐标系
Fig.3 The robot model and coordinate system

摆幅 C 和 A 这6个最具代表意义的参数来描述,为了便于处理数据,给机器人自身做了坐标定位如图3所示.双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坐标可以唯一确定,通过位姿矩阵反解可求其余关节坐标的值^[4].

3 遗传算法的设计与实现

对机器人的步态已经做了一定的规划,让机器人行走的步态近似于人的步态,但是,对于机器人步行过程中的一些参数,作为未知的变量,它贯穿了整个运算和最佳数据的选取和搜寻,同时知道最佳数据的要求,从而选取整个最佳数据的过程变成了最佳参数的选取过程.也正是这些参数的选取的合理性和可靠性,才能使机器人步态可靠和合理.这些参数的选取是非常复杂的,而且参数之间也是相互关联的.因此必须采用遗传算法对这些参数进行选取.选择目标函数,控制目标是能让机器人稳定可靠步行^[5].因此,要求ZMP点到支撑域的中心距离最小,设支撑域的中心为原点.而机器人的脚掌是一个长方形,为了更加准确地描述ZMP点的可靠位置,因此设定目标函数为:

$$x_{zmp}^2 + 2y_{zmp}^2 .$$

(3)

首先根据机器人的外形和运动的状态,机器人硬体的具体参数情况:机器人高度:300 mm,机器人宽度:150 mm,支撑域最小:60 mm×45 mm,腿长:135 mm. 选择了参数的范围如公式(4)所示:单位: $V(\text{mm/s})$; $H(\text{mm})$; $T(\text{s})$; $C(\text{mm})$; $A(\text{mm})$; $R(\text{mm})$.

$$\left\{ \begin{array}{l} V \in [0,20], \\ H \in [200,400], \\ T \in [0,10], \\ C \in [0,50], \\ A \in [0,30], \\ R \in [0,80]. \end{array} \right.$$

(4)

采用MATLAB的遗传算法软件包求得参数如公式(5)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 10, \\ H = 300, \\ T = 3, \\ C = 25, \\ A = 8, \\ R = 15. \end{array} \right.$$

(5)

根据此参数,对ZMP点用MATLAB做了如下仿真分析.

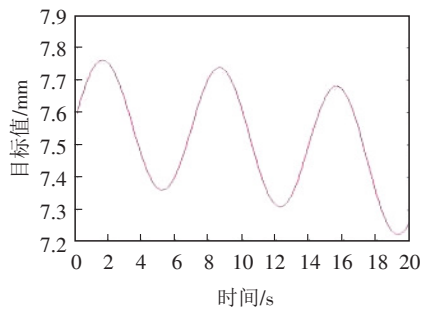


图4 目标函数图像

Fig.4 The objective function image

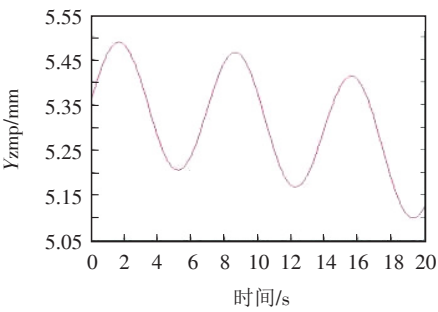


图5 Yzmp关于t的图像

Fig.5 Yzmp images with t

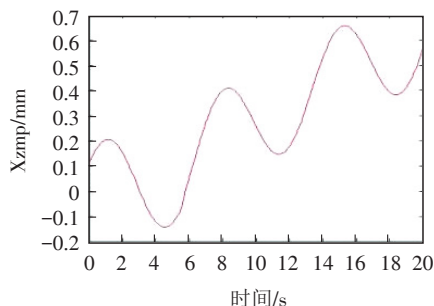
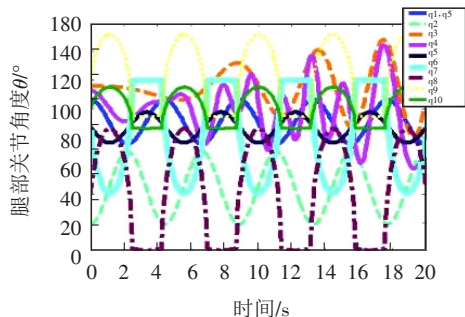
图6 X_{zmp} 关于 t 的函数图像Fig.6 X_{zmp} images with t 

图7 腿部关节的角度分布图

Fig.7 Distribution of leg joint angle

根据分析的结果,把所获取的参数式(5)带入位姿矩阵的逆矩阵中,获得 $\theta_i (i=0, \dots, n)$ 关于时间 t 的函数,从而获得了机器人任意时刻的关节角度的值.如图4、图5、图6验证数据图像可以看出,ZMP点始终在支撑域内部.因此根据这个函数,可以预期机器人关节角度,如图7所示,可求出腿部的各个关节的角度.由此,在静态的机器人控制中,就有了步态控制的数据^[6].当机器人步行满足条件(2),静态步行是动态步行的一个特例.

4 结语

基于ZMP控制理论建立的数学模型,通过遗传算法对机器人行走步态做了整体描述,主要解决如何产生稳定控制机器人步态的数据,在步态运行过程中保证双足机器人从一个稳定态到下一个状态时,同样也是稳定的.在实际使用时达到了较好的控制效果.

参考文献:

- [1] 窦瑞军,马培荪.基于ZMP点的两足机器人步态优化[J].机械科学与技术,2003,22(1):77-79.
- [2] 张瑞红,金德闻,张济川,等.不同路况下正常步态特征研究[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(8):77-80.
- [3] 石宗英,徐文立,冯元琨,等.仿人型机器人动态步行控制方法[J].哈尔滨工业大学学报,2001,33(1):54-56.
- [4] 胡洪志,马宏绪.一种双足步行机器人的步态规划方法[J].机器人技术与应用,2002(3):16-18.
- [5] 刘涛,王志良,解仑,等.基于遗传算法的双足步行机器人步行姿态控制策略[J].微计算机信息,2006,22(20):252-254.
- [6] 蒙运红,傅详志.两足步行机器人动态步行规划及仿真[J].华中理工大学学报,1999,27(3):28-31.

(编辑 张继学)