

Research on ZMP theory Applied to the Gait Control of Biped Walking Robot *

CHE Ling-ling, WANG Zhi-liang

(College of Information Engineering Beijing University of Science and Technoloqn, Beijing 10083, China)

Abstract : The special relationship between the ZMP point and the barycenter is used to construct barycenter model to checkout the action data of the robot in the problem of gait control of biped walking robot. Meanwhile, the action of robot is divided into some action element, namely the action database. More complex actions can be constructed based on the database. This control method is proved feasible through constructing complex action such as stepping.

Key words : robot control; gait control; ZMP; action database

EEACC :8380

ZMP 理论在双足步行机器人步态控制中的应用 *

车玲玲, 王志良

(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘 要 : 为了解决双足步行机器人的步态控制问题, 利用静态步行时 ZMP 点与重心的特殊联系, 构造重心模型来校验机器人的行为数据。同时, 将机器人的动作细分为一个个的动作元素, 即建立行为数据库。机器人可通过行为数据库来构造出新的、更加复杂的动作。通过完成构造双足步行机器人上台阶的复杂动作, 充分说明了这种控制方法的可行性。

关键词 : 机器人控制; 步态控制; ZMP; 行为数据库

中图分类号 : TP242

文献标识码 : A

文章编号 : 1005-9490(2007)04-1462-03

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]。双足步行机器人是一个多变量、强耦合、非线性且具有冗余自由度的复杂的动力学系统, 为控制理论的应用、动力学问题的研究以及各种优化算法的研究提供了理想的实验平台^[2]。双足步行机器人与多足机器人相比, 本质上是不稳定的, 而且控制更加困难。人类以其完美的行走姿态和稳定性成为双足步行机器人的模仿对象。由于人类和行走与机器人的行走机理不同, 完全生搬硬套地将人类行走的模型引用到双足机器人上显然是不行的^[3]。本文将对双足机器人的步态控制提出新的控制概念——基于行为发生器的步态控制。

1 硬件平台

本课题选用的硬件平台——Kondo 机器人, 是由日本近藤公司设计和制作, 铝合金框架, 共有 17 个舵机, 内置控制电路板及电池。机器人通过 RS232 串口线直接和计算机连接, 在计算机上操作, 完成各种动作。也可通过无线操作模块实现对机器人的数据传送和接收。VC++ 编程实现的可视化界面, 可任意设定每个关节的动作幅度和速度, 观察构成机器人的每个舵机的运动情况, 并可下载动作数据到机器人中, 对机器人进行操作。目前可完成的动作有招手、行走(包括向前走、向后走、向右走、向左走等)、趴下、躺下、俯

收稿日期 : 2006-06-06

基金项目 : 教育部科学技术重点研究项目资助《基于人工心理的个人机器人关键技术研究》(03021) ;

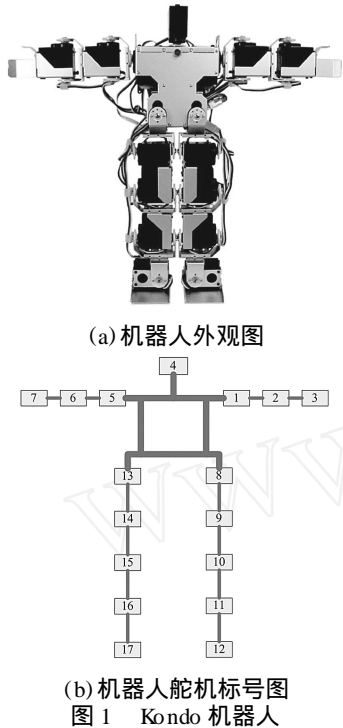
北京市“现代信息科学与网络技术”重点实验室开放基金资助“多模人机交互技术中的情感计算方法研究” ;

北京科技大学重点基金项目资助“NBIC 会聚技术研究” ;

国家自然科学基金资助项目基于状态空间描述的人工情绪理论和方法研究(60573059)

作者简介 : 车玲玲(1983-) , 女, 硕士研究生, 主要研究方向为双足步行机器人, lingling1983 @gmail.com.

卧撑等等一系列的动作. 为便于机械组装及舵机控制, 机器人的 17 台舵机均做了数字标号. 外观(a)和舵机标号(b)如图 1 所示:



2 静态步行

根据力学原理可知, 当物体处于静止状态时, 其平衡的充要条件是其重心在地面上的投影, 落在其支撑面内, 而广义地讲, 当物体处于运动状态时, 其平衡的必要条件是所受重力与惯性力的合力的延长线通过其支撑面内 (该合力的延长线与支撑面的交点称为 ZMP)^[4].

2.1 ZMP 点与重心之间的关系

目前世界上大多数双足步行机器人系统都采用 ZMP 作为稳定行走的判据. ZMP 即零力矩点 (Zero Moment Point) 的简称, 是由南斯拉夫学者 Vukobratov 提出的, 他研究了 ZMP 与双足动态系统之间的关系, 提出 ZMP 是判断动态平衡的一个重要依据^[5]. 根据 Vukobratov 提出的 ZMP 理论, 当支撑脚与地面多点接触时, ZMP 点的位置坐标如下公式 (1)、(2) 所示^[6]:

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i \left(Z_i + g \right) X_i - \sum_{i=0}^n m_i \left(X_i + g \right) Z_i}{\sum_{i=0}^n m_i \left(Z_i + g \right)} \quad (1)$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i \left(Z_i + g \right) Y_i - \sum_{i=0}^n m_i \left(Y_i + g \right) Z_i}{\sum_{i=0}^n m_i \left(Z_i + g \right)} \quad (2)$$

式中: m_i —各部分的质量; X_i 、 Y_i 、 Z_i —各部分的质心.

当机器人做静态步行时, $Z_i = X_i = Y_i = 0$ 所以有:

$$\begin{cases} X_{ZMP} = X_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ Y_{ZMP} = Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_c 、 Y_c —双足机器人质心的坐标. 即, 双足机器人的质心即为 ZMP 点. 因此, 只要使重心落在脚面上, 就可保证双足步行机器人稳定的静态步行.

2.2 静态步行的控制

如前所述, 只要重心落在落地脚的稳定域内, 就可保持静态稳定. 那么, 我们首先要建立的就是双足步行机器人的重心模型.

2.3 重心模型的建立

首先, 我们对双足机器人进行数学抽象, 抽象出的机器人各舵机参数 (舵机质量及各质点间的距离) 如图 2 所示:

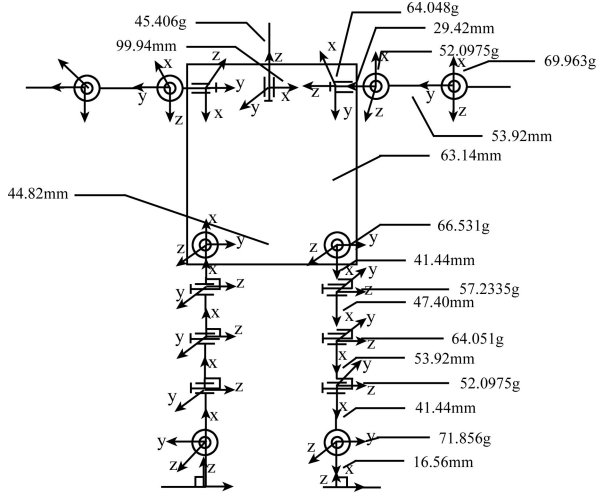


图 2 机器人抽象图及其参数

其中: \curvearrowright 表示舵机在水平面转动; \curvearrowright 表示舵机在垂直面转动.

对舵机的抽象基于以下的假设:

每个舵机的重心集中在舵机的转轴之处, 也就是说每个舵机的描述抽象成一个质点; 连接两个相邻的舵机的板金件的质量按照离舵机的远近采取 2:8 分在两个舵机的质点上; 每两个舵机之间的距离等于舵机的转轴之间的距离.

在以上假设及坐标的基础上, 根据机器人各个关节的质量和它的位姿矩阵 (在此不做推导), 我们可以求出机器人各个关节质点相对于坐标原点的坐标, 并且可进一步求出机器人的重心坐标. 重心坐标的求解如公式 (4) 所示:

$$O_z = \left(\frac{O_i \times m_i}{m_i} \right) \quad (4)$$

其中, O_z 表示重心的位置, O_i 表示第 i 个舵机质点的位置, m_i 表示第 i 个舵机质点的质量。

2.4 重心模型的 MATLAB 仿真

给定一组行为数据(舵机角度数据) $s = [0, 1, 2, 3, 4, 0, 61, 3, 35, 1, 8, 10, 3, 0, 6, 4]$, 运行 MATLAB 仿真程序, 结果如图 3 所示:

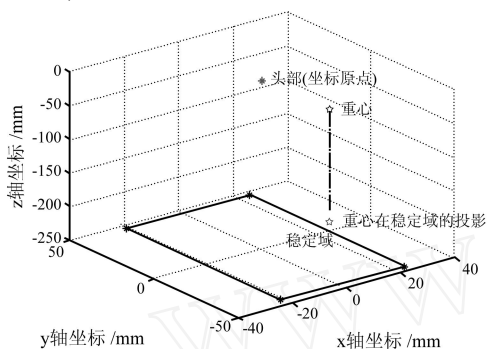


图 3 MATLAB 仿真图

图 3 中由实线条圈出的范围即为稳定域, 可以看出, 在给定的这一组舵机数据下, 重心的投影并没有落在稳定域中. 因此, 这一组舵机数据并不能使机器人处于稳定的状态, 机器人将因重心偏移而倾斜。

3 手动微调步态数据

人类是通过重复学习、实践, 发展和改善获得其固有的步态. 双足步行机器人作为高级的拟人机器人, 其步态也要经过拟人的过程, 如果没有这样的过程, 就必须充分利用动力学方程模型生成行走步态. 由于动力学方程的复杂性, 实时计算出行走步态几乎是不可能的^[7]. 本文中的 kondo 机器人可以完成包括前走、后退、招手、俯卧撑、躺下、起来等多种动作及其组合的动作. 这些动作数据都是在模仿人的动作行为的基础上组合生成的. 我们知道, 当机器人的运动速度在较为缓慢时, 可以认为是静态的动作行为. 此时, 只要每一细节的动作是稳定的, 那么其组合的一组动作也将会是稳定的。

通过用 VC 编程, 制作了数据生成模块, 如图 4 所示。

静态数据校验, 就是采用前面介绍的重心模型, 来计算仿真静态 ZMP 点是否在支撑域当中, 若在, 则说明这一组数据是稳定的; 若不在, 则要微调数据, 直到 ZMP 点在稳定域中。

由界面可以看出, 其程序可控制机器人的动作速度及对每个舵机进行单独微调, 使数据达到最佳. 数据的传输上由原本的有线传输扩展升级为无线传输和控制. 这也为今后机器人的进一步深入研究提供了发展的空间。



图 4 数据生成界面

4 行为数据库的建立

本文研究的系统中, 有一个重要的环节就是组建机器人行为数据库, 机器人的行为和人的行为一样可以分为很多细节, 一个连续的行为表达, 是由很多个细小的行为元素组成。

我们在静态的机器人控制中, 有了步态控制的数据, 利用这些数据控制机器人. 当机器人步行速度足够缓慢时, 静态步行是动态步行的一个特例. 下面是对前行的动作元素拍摄的图片, 如图 5 所示:

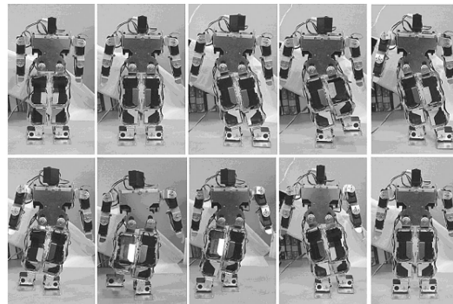


图 5 前行的动作元素

机器人的行为数据库是由细分的行为数据单元组成的. 每一个动作图片对应唯一的动作数据, 这样的动作单元的不断积累, 也就构成了我们的行为数据库, 即行为发生器. 图片的直观性也给我们组合其他复杂的动作带来了便利。

根据数据生成的原理可以保证最基本的动作数据的稳定性和可靠性能. 但是基本数据和基本数据的连接之间的过渡过程是否稳定、可靠就很难保证. 为了解决这个问题, 我们采用了两种办法: 采用静态数学模型稳定性判据来判断. 加一个过渡过程, 即在一个基本动作的开头和结尾都加一个可靠的过渡点. 实践证明, 方法 2 较为适合。

(下转第 1468 页)

情况下进行估计了,不会在实际应用中产生影响。

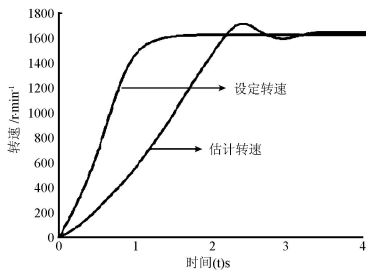


图 3 转速为 1600 r/min 时估计曲线

5 结论

通过在对无刷直流电机外特性进行分析,得出了电机的数学模型.在此基础上利用扩展卡尔曼滤波器可以对非线性系统进行最小方差估计的特点,较好的估计出了无刷直流电机的运行状态,克服了反电动势法不能连续准确地估计电机转速缺点.该方法在对电机转子状态估计中避免了精密的测量装置的使用,因此具有广泛的应用价值.但研究中使

用的电机模型还比较简单,缺乏对电机运行过程中细微改变的描述,这些问题仍需要进一步的研究.

参考文献:

- [1] 孙建忠,白凤仙,特种电机及其控制[M],北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 李剑飞,尹泉,万淑芬等,基于扩展卡尔曼滤波器的异步电机转速识别[J],电工技术学报,2002,17(5):40-44.
- [3] Jeon Y S, Mok H S, et al, A New Simulation Model of BLDC Motor with Real Back EKF Waveform[J]. Proceeding from Computers in Power Electronics, 2000, (16): 217-220.
- [4] 敬喜,卡尔曼滤波器及其应用基础[M],北京:国防工业出版社,1973.
- [5] Chen H C, Liaw C M, Sensorless Control via Intelligent Commutation Tuning for Brushless DC Motor[J], Electric Power Applications, 1999, 146(6):678-684.
- [6] 周健,王辉,基于扩展卡尔曼滤波器的无刷直流电动机控制[J],微特电机,2005,33(11):33-36.
- [7] 康凤举,现代仿真技术与应用[M],北京:国防工业出版社,2001.

(上接第 1464 页)

5 结论

由于双足步行机器人内在稳定性较差,呈现非线性特性,易受环境干扰,特别是机器人与地面接触环境的不确定性和局限性导致双足机器人行走控制难度增大^[8].利用行为发生器,我们组合出了一组机器人上台阶的动作,并保证其稳定性.在这里我们采用了机器人前行的动作元素进行组合,其中,由于台阶存在高度(为了循序渐进,我们并没有将台阶的高度定得很高),因此前脚抬起到落到台阶时的高度差和步行时落到地面的高度差是不同的,使得后脚抬起的时刻也不同.因此,我们对步行元素适当地删除和增加了一些过渡过程,使机器人可以完成上台阶的过程.这也证明了本文中介绍的这种基于行为发生器的步态控制是可行的.当然,此方法也有很多不足之处有待改进,但这也未尝不是在有限的条件下的大胆的新尝试.我们也希望今后能够完善这套系统,更多地利用传感器,通过提供大量的传感器反馈

信息来精确我们的控制效果.

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.
- [2] 柯显信,龚振邦,吴家麒,基于遗传算法的双足机器人上楼梯的步态规划[J].应用科学学报,2002,20(4):341.
- [3] 刘莉,王劲松,陈恩,基于六维力/力矩传感器的拟人机器人实际 ZMP 检测[J].机器人,2001,23(5):459.
- [4] 杨东超,汪劲松,刘莉,基于 ZMP 的拟人机器人步态规划[J].机器人,2001,23(6):504.
- [5] 林玎玎,刘莉,赵建东,双足步行机器人的 ZMP-COP 检测及研究[J].机器人,2004,26(4):368.
- [6] 陈立新,两足步行机器人步态及运动稳定性分析[J].现代机械,1995,(1):28.
- [7] 汪光,黄强,李科杰,基于仿人机器人自身约束条件的行为调节步行控制[J].探测与控制学报,2003,25:48.
- [8] 张永学,麻亮,强文义,基于多传感器信息的双足机器人步行系统的研究[J].高技术通讯,2001:66.