

基于解耦合成及 ZMP 方程的仿人机器人三维步态规划

王志良 于国晨 解 仑

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘 要 介绍了一种仿人机器人的新型步态规划方法。将仿人机器人前向步态简化为七连杆模型,侧向步态简化为五连杆模型;然后在 Z 坐标相等的情况下合成三维步态;最后通过 ZMP 方程来检验和仿真,并结合实际系统及其运行状况进行分析,验证了所提出规划方法的有效性。

关键词 仿人机器人,解耦合成,ZMP 方程,三维步态

中图分类号 TP242 **文献标识码** A

Three-dimensional Gait Planning for Humanoid Robots Based on Decoupling Synthesis and ZMP Algorithm

WANG Zhi-liang YU Guo-chen XIE Lun

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract This paper presented a new type of humanoid robot gait planning method. The gait of humanoid robot was simplified as 7-link model, lateral gait of humanoid robot was simplified as 5-link model. And then in the case of the same Z coordinate, three-dimensional gait was synthesized. Eventually the method Conducted a validation and simulation through ZMP equation, combined with the actual system and its operational status analysis, the effectiveness of the proposed planning method was verified.

Keywords Humanoid robot, Decoupling synthesis, ZMP equation, Three-dimensional gait

仿人机器人研究中的一个关键问题就是如何实现其稳定的行走。要实现和提高机器人的行走性能,必须研究实用而有效的步态规划方法。本文提出了一种将双足步行机器人行走周期先解耦计算然后再合成规划的方法,并在 ZMP(zero moment point)理论上^[1],结合几何约束和仿生学原理,针对 17 自由度双足机器人建立数学模型,实现了机器人稳定的行走。

1 双足步行机器人建模

本文研究的对象为一台具有 17 个自由度的双足机器人步行机构,以微型伺服马达作为驱动元件,全部是转动关节。其中每条腿上分别有髋关节 2 个,主要用于移动双腿,实现迈步并使上躯体前倾、后仰以及侧倾,使之在步行过程中起辅助平衡的作用;膝关节 1 个,主要用来调整重心高度,并用来调整摆动腿的着地高度,使之与地面的状态相适应;踝关节 2 个,其与髋关节相配合实现支撑腿和上躯体的移动,还可以调整脚掌与地面的接触状态,从而完成步行过程。物理参数如表 1 所列。

表 1 双足机器人的物理参数

| 连杆 | 长度 (mm) | 质量 (kg) | 质量中心位置 (mm) | 转动惯量 (kg·mm ²) |
|----|------------|------------|----------------|-------------------------------|
| 躯干 | 92.00 | 0.254 | 46.00 | 209.8478 |
| 大腿 | 47.00 | 0.110 | 23.50 | 55.6601 |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|---------|
| 小腿 | 57.60 | 0.060 | 38.28 | 23.8558 |
| 脚 | 16.80 | 0.066 | 14.61 | 23.5464 |

建立 D-H 坐标系。首先建立统一的坐标系,包括 1 个世界坐标系、1 个参考坐标系、1 个辅助坐标系和 17 个连杆局部坐标系。将世界坐标系原点设置在机器人运动的起点位置上,并且与地面相固联。一般规定机器人向前运动方向为 X 轴,垂直向上为 Z 轴,左侧为 Y 轴。参考坐标系原点设置在运动到第 k 步时的支撑脚着地点(k=1,2,3,...),也与地面固联。机器人行走时,左右脚交替着地,并参考坐标系间断性地向前平移。辅助坐标系原点设置在机器人髋关节中心,由于机器人的两个上肢、摆动腿和头部运动都是相对于躯干运动的,因此建立辅助坐标系可以大大简化计算量。这样机器人在行走过程的每一时刻,身体各个部分相对于参考坐标系的位形就可以确定。最后对机器人各个部分建立连杆局部坐标系,各个连体坐标系的原点设置在各关节旋转中心,并固连于相应杆件上。

2 运动规划方法

由文献及实验研究可知,在步行运动中,双足步行机器人前向与侧向各关节运动之间的耦合很小,可以忽略这一耦合的影响^[2],将机器人的步行解耦为侧向步态和前向步态,并分别简化为七连杆模型^[3]和五连杆模型^[4]。

到稿日期:2010-01-20 返修日期:2010-03-27 本文受国家 863 高技术研究计划课题(2007AA04Z218),国家自然科学基金课题(No. 60573059),中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-BR-09-023B)资助。

王志良(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工心理理论及其应用、智能机器人等,E-mail:wzl@ustb.edu.cn;于国晨(1974-),男,博士生,主要研究方向为机器人运动和控制等。

2.1 机器人前向步态设计

将前向运动分解为躯干相对于支撑腿的摆运和摆动腿相对于躯干的摆动。

以右脚支撑,左脚摆动为例,简化图形如图 1 所示, A 点代表着髋关节中心,假设已知 A 点速度是 v ,步长是 s ,A 点到支撑脚的旋转中心高度为 h ,即 $OB=h$,步行运动周期为 T ,A 点轨迹是 $x=vt-s/2$ ($0 \leq t \leq T/2$),当时间 t 取某一值时, AB 的值就是已知的。

$$OA = \sqrt{h^2 + AB^2}$$

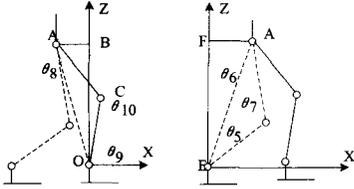


图 1 前向步态简化模型

在三角形 OAC 中, AC 是大腿长度, OC 是小腿长度。

$$\angle AOC = a \cos\left(\frac{OA^2 + OC^2 - AC^2}{2 * OA * OC}\right)$$

同理可以求出 $\angle OAC$ 和 $\angle OCA$ 。

在直角三角形 OAB 中, 3 个边长已知。

$$\angle AOB = a \sin\left(\frac{AB}{OA}\right), \angle OAB = a \sin\left(\frac{OB}{OA}\right)$$

$$\theta_9 = \angle AOB - \angle AOC$$

$$\theta_{10} = 180 - \angle ACO$$

$$\theta_8 = -\angle OAC - \angle AOB$$

$$\text{即 } \theta_8 + \theta_9 + \theta_{10} = 0$$

这样支撑腿的 3 个关节的相对角度就可以得到。E 点代表着摆动腿, 摆动腿的轨迹可通过实验得到或者按照仿生学知识得到。考虑到摆动腿落地时对地面有冲击的作用, 为了简化计算, 假设摆动腿的轨迹为 $z = b \sin\left(\frac{\pi vt}{s}\right)$ ($0 \leq t \leq T/2$)^[7], b 代表着摆动腿抬起的最大高度, 当时间 t 取某一值时, $AF=AB$ 就可以得到。

$$EF = h - b \sin\left(\frac{\pi vt}{s}\right)$$

在直角三角形 EFA 中, 已知 AF 和 EF , 那么 AE 的长度可以求出。

$$\angle FEA = a \sin\left(\frac{AF}{AE}\right)$$

$$\angle FAE = a \sin\left(\frac{FE}{AE}\right)$$

在三角形 EAD 中, AD 是大腿长度, DE 是小腿长度。

$$\angle AED = a \cos\left(\frac{AE^2 + ED^2 - AD^2}{2 * AE * ED}\right)$$

同理可以求出 $\angle EAD$ 和 $\angle EDA$ 。

$$\theta_5 = \angle FEA + \angle AED$$

$$\theta_6 = \angle EAD - \angle FEA$$

$$\theta_7 = \angle ADE - 180$$

$$\text{即 } \theta_5 + \theta_6 + \theta_7 = 0$$

这样摆动腿的 3 个关节的相对角度就可以得到。同理可以求出以左脚支撑、右脚摆动的 6 个关节的相对角度。

2.2 机器人侧向步态设计

图 2 是侧向步态简化模型。

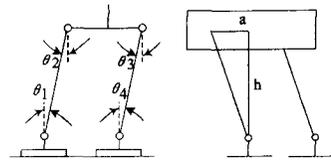


图 2 侧向步态简化模型

由于机器人在一个完成的行走周期内, 重心在左右脚之间来回摆动, 利用正弦曲线规划机器人重心轨迹, 避免了重心在两个脚掌支撑面内转化所引起的冲击, 同时也使关节的转动角度改变得更加平滑^[6]。 θ_1 的最大值是 $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{h}\right)$, 其中 a 代表着两个踝关节之间的距离的一半, h 是髋关节中心到支撑脚旋转中心的垂直距离。 $\theta_1 = \beta \sin(2\pi t/T)$, 由于 4 个侧向关节协调才能完成重心的转移, 那么有 $\theta_1 = -\theta_2 = \theta_3 = -\theta_4$ 约束条件, 这样 4 个侧向关节的相对角度就可以求出。

2.3 合成规划方法

将离散的每帧数据整合成一个连贯的行走周期, 这涉及到侧向步态和前向步态的合成问题。由于侧向步态是 x 和 z 方向的数据, 而前向步态是 y 和 z 方向的数据, 这样通过 z 值相等, 将 x 和 y 联系在一起, 即将两个二维平面的数据转化为一个三维平面的数据, 使得机器人行走更加协调和平稳。通过时间 t 取值相同, 再根据上面的几何约束, 就可以得到每一时刻每个舵机的相对角度。从而将解耦的两个平面的数据合成规划为一个三维平面的步态数据, 使得步行的姿态也与人类行走更为相似。

3 步态规划的稳定性

目前世界上大多数双足步行机器人系统都采用由南斯拉夫学者 Vukobratov 提出的 ZMP (Zero Moment Point) 作为稳定行走的判据。根据 ZMP 理论, 当支撑脚与地面多点接触时, ZMP 点的位置坐标如式 (1) 所示^[6]。

$$\begin{cases} X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i + g) X_i - \sum_{i=1}^n m_i (X_i + g) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i + g)} \\ Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i + g) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i (Y_i + g) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i + g)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_i 为各质点的质量; X_i, Y_i, Z_i 为各部分的质心。

当机器人做静态步行时, $\dot{X}_i = \dot{Y}_i = \dot{Z}_i = 0$, 所以有:

$$\begin{cases} X_{ZMP} = X_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \\ Y_{ZMP} = Y_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \end{cases}$$

因此, 只要使重心投影落在支撑多边形内, 就可保证双足步行机器人稳定的静态步行。

4 仿真算法

根据机器人的机械结构, 选取步行运动参数, 如表 2 所列, 调用相应的上述算法, 就可以得到每个关节的相对转角。将相对角度转化为绝对角度, 然后通过 ZMP 方程来检验数据的稳定性。如果不稳定则可以改变步行参数, 重复上述算法,

最后得到稳定的运动数据。

表 2 步态仿真的初始化参数

| | |
|---------------------|---------|
| s: 步长 | s= 80mm |
| a: 髋部侧摆摆幅 | a=35mm |
| b: 摆动脚上摆摆幅 | b=20mm |
| h: 髋部与脚踝部的前向关节的垂直高度 | h=80mm |
| V: 速度 | 7 |

本文使用 VC 与 MatLab 相结合的计算方法,将两者各自的优势结合起来,完成本系统的开发工作^[7]。使用 MATLAB 完成公式的计算、图形显示;然后将 MATLAB 程序转化为独立于 MATLAB 的 EXE 应用程序和 DLL 动态连接库。在 VC 中编写程序界面并加载调用动态连接库,实现两者之间的连接,完成数据的核心计算和结果的图形显示,如图 3 所示。

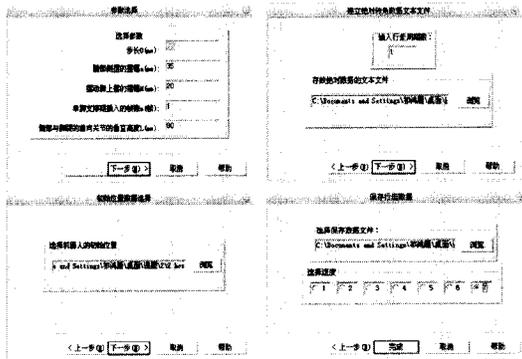
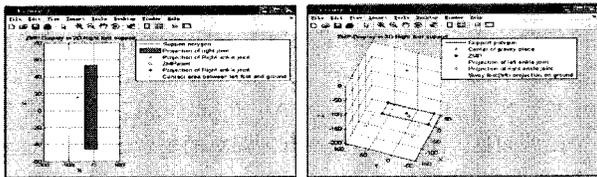
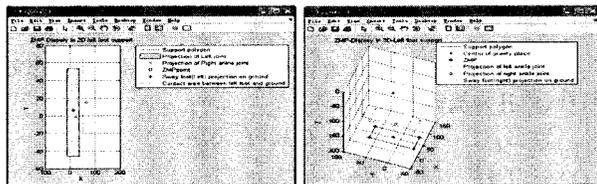


图 3 步态仿真的初始化界面

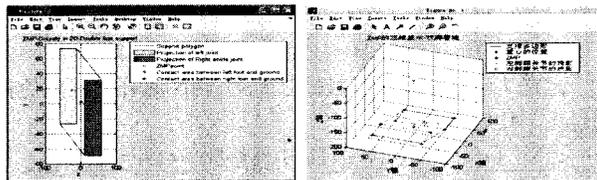
重心、ZMP 点的图形显示分为二维和三维显示两种模式,图 4(a)到图 4(c)所示为仿真计算的结果。



(a) 右脚支撑期 ZMP 在稳定域中的二维显示(上)和三维显示(下)



(b) 双脚支撑过渡期 ZMP 在稳定域中的二维显示(上)和三维显示(下)



(c) 双脚支撑期 ZMP 在稳定域中的二维显示(上)和三维显示(下)

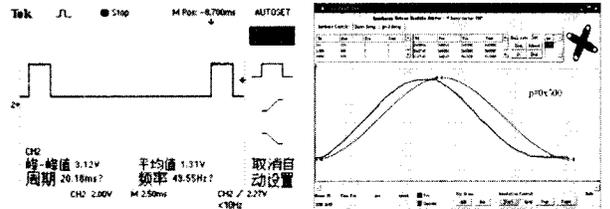
图 4

通过以上 3 个典型的计算仿真,可以看出本文所应用的方法完全可以满足双足机器人步态规划的稳定性要求。

5 系统实验结果

在系统实际实验过程中,通过对控制器、执行机构以及机

器人的运行状况进行测试,以验证本文所提出算法的有效性。从图 5(a)可以看出,系统所采用的控制器输出信号稳定、精确,基本没有毛刺,以此作为电机的触发信号,完全可以进行实时的精确控制;从图 5(b)可以看出,电机的实际输出完全光滑的相应给定信号,并具备很好的同步性能;图 6 反映了机器人行走的效果。



(a) 180 度时的控制信号波形图 (b) 实时运行过程中电机圆滑跟随情况

图 5

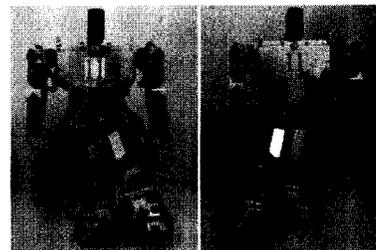


图 6 双足机器人行走动作

结束语 本文根据机器人的实际机械结构建立 D-H 坐标系,然后将双足机器人模型解耦为七连杆模型和五连杆模型。根据几何约束和仿生学原理,计算出每个关节的相对角度,再利用 ZMP 方程来检验角度的稳定性。最后经过实际机器人的实验,说明了该步态规划的可行性。如需进一步提高行走的速度和稳定性,需要对规划方法和控制方法进行更深入的研究。

参考文献

- [1] Vukobratovic M, Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 1969, 16(1): 1-6
- [2] 马宏绪, 张彭, 张良起. 两足步行机器人动态步行姿态稳定性及姿态控制[J]. 机器人, 1997, 19(3): 180-186
- [3] Lim H, Ogura Y, Takanishi A. Locomotion pattern generation and mechanisms of a new biped walking machine [J]. Proc R Soc A, 2008, 464: 273-288
- [4] Chevallereau C, Aoustin Y. Optimal reference trajectory walking and running of a biped robot [J]. Robotics, 2001: 557-569
- [5] Collins S H, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers [J]. Science, 2005, 307: 1082-1085
- [6] 杨东超, 汪劲松, 刘莉, 等. 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划 [J]. 机器人, 2001, 23(6): 504-508
- [7] 徐凯, 陈恩, 刘莉, 等. 基于主支撑腿运动优化的仿人机器人快速步态规划算法 [J]. 机器人, 2005, 27(3): 203-209
- [8] Katic D, Vukobratovic M. Survey of intelligent control techniques for humanoid robots [J]. Journal of Intelligent and Robotics systems, 2003, 37(2): 117-141