

机器人技术

载人两足步行机器人步态规划

郭新明,殷跃红

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030)

摘 要: 载人两足步行机器人是一种为残疾人设计, 用来替代轮椅和假肢的新型步行机器人。由于其关节自由度较多, 可以通过自身的调节来保持纵向及横向的平衡, 从而保证动态步行的平稳, 但也因此使得零力矩点 (ZMP) 的计算上出现耦合现象, 为 ZMP 轨迹的精确规划带来困难。从重心的轨迹入手, 通过约束重心 z 向坐标实现载人两足步行机器人纵向与横向的分离, 进而以重心的轨迹为基础, 确定了机器人行走姿态, 并通过简化模型计算支撑脚关节扭矩来评估步态规划的正确性与合理性。

关键词: 两足步行机器人; ZMP; 步态规划

中图分类号: TP241.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2006)02-0000-00

Gait planning of Biped Walking-chair Robot

GUO Xin-ming, YIN Yue-hong

(Robot Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Biped walking-chair robot is a new type of biped robot designed for the disable man to replace traditional wheelchairs. Because it has more degrees of freedom, Biped walking-chair robot can keep portrait and landscape balance by adjust its joints and insure a smooth dynamic walk, but this also bring coupling into calculation of ZMP and make it difficult to plan the locus of ZMP exactly. This paper starts with the locus of barycentre, separates portrait and landscape of biped walking-chair robot by restrict z -coordinates of barycentre, and plan the gait based on the locus of barycentre, finally calculate the torque of joints of the supported leg with a simplified model to evaluate the correctness and rationality of gait planning.

Key words: biped walking-chair robot; ZMP; gait planning

0 引言

载人两足步行机器人是能够让人乘坐、在复杂的地面条件下像人的双腿一样步行自如的助残机器人。两足步行机器人是机器人技术中的一个重要研究领域, 同时也是机器人技术发展中的一个难点问题。可载人的两足步行机器人更是近几年来机器人领域的一个新的热点。

载人两足步行机器人是在两足步行机器人基础之上, 结合机构学、仿生学、机器人学、传感技术、人工智能、计算机控制等高新技术, 为下肢有残疾的残疾人开发的新型特种机器人, 对于帮助下肢残疾的人重新回到正常的学习和生活中有着重要意义。

1 零力矩点 (Zero Moment Point—ZMP)

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。它是由南斯拉夫学者 Vukobratovic 提出的。

地面对脚底板沿 z 向作用的分布力的合力, 若这个合力作用点处的力矩为零, 这一点便是零力矩点如图 1 所示。

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

收稿日期: 2005-12-09

修订日期: 2005-12-29

基金项目: 科技部中德合作重点资助项目 (2003DF000017)。

作者简介: 郭新明 (1982-), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 研究方向为载人两足步行机器人步态规划。

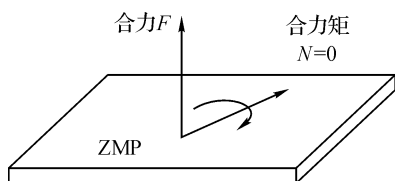


图 1 零力矩点示意图

点称为 **ZMP**。当物体处于静止状态时,不受惯性力,二者相统一,故可将前者看作是后者的一个特例^[2]。

当两足机器人处于动态平衡时, **ZMP**和脚底所受地面反力的压力中心 **CoP** (Center of Pressure) 是重合的。^[3]

稳定区域是由支撑脚掌所组成的凸形区域在水平面上的投影。在单脚支撑期间,这一凸形区域投影就是支撑脚底板面;在双脚支撑期间,这一凸形区域投影为两支撑脚底板触地点所构成的凸形最大区域(图示阴影区域),如图 2所示。

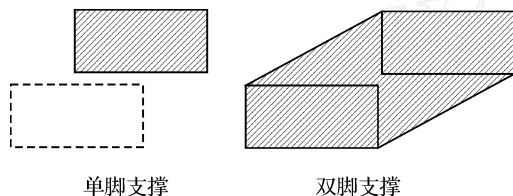


图 2 脚底板触地区域

两足步行机器人保持平衡的一个必要条件是:行走过程中 **ZMP**始终落在稳定区域内。

2 步态规划

图 3是载人两足步行机器人结构总图,图 4是其关节示意。载人两足步行机器人的运动机构由四部分组成:踝关节、膝关节、髋关节和座椅。其中踝关节 2个自由度,膝关节 1个自由度,髋关节 3个自由度。

要对载人两足步行机器人进行步态规划,首先要对其 **ZMP**的轨迹进行规划。

$$\begin{cases} X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g) X_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{X}_i Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g)} & (1) \\ Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{Y}_i Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g)} & (2) \end{cases}$$

由 **ZMP**的计算公式(1)可知,其 x, y 向坐标的两式产生耦合,两式中均出现了含 z 及其二次导数的项。而载人两足步行机器人采用关节平衡法来保

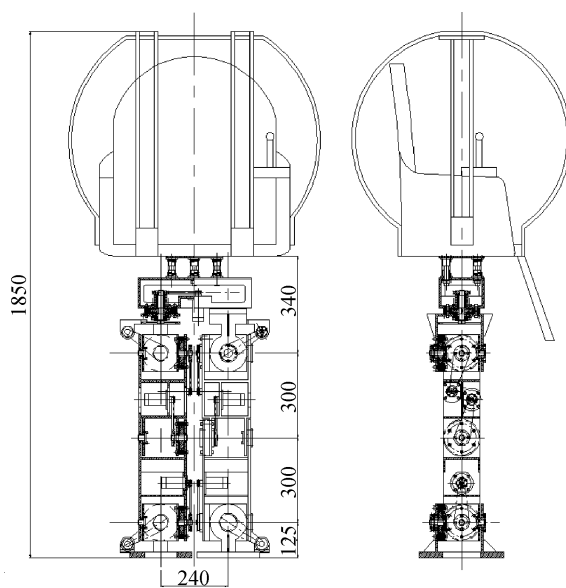


图 3 机器人结构总图

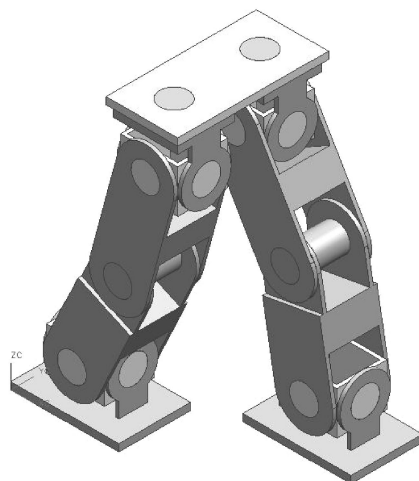


图 4 机器人关节示意图

证其横向的稳定性,不管是纵向还是横向调整都会引起 z 的变化,从而影响到 **ZMP**另一方向的坐标值,不可能同时精确规划出两个方向的 **ZMP**轨迹。

为此,需要添加约束条件将式(1)、(2)简化。考虑到载人两足步行机器人的大部分质量集中在腰部以上,而为了乘坐舒适,要求正常行走时机器人腰部以上保持一定姿态,也即不发生转动。于是可以从整体来考虑,以重心的坐标来表示 **ZMP**。同时,观察人走路的过程可知,行走过程中人的重心高度保持不变。由此可将式(1)、(2)简化如下:

$$\begin{cases} X_{ZMP} = X_c + \ddot{X}_c \frac{Z_c}{g} & (3) \\ Y_{ZMP} = Y_c + \ddot{Y}_c \frac{Z_c}{g} & (4) \end{cases}$$

对 求二阶导数可以得到各关节角的角加速度曲线,如图 9所示,这在后面计算关节力矩时会用到。

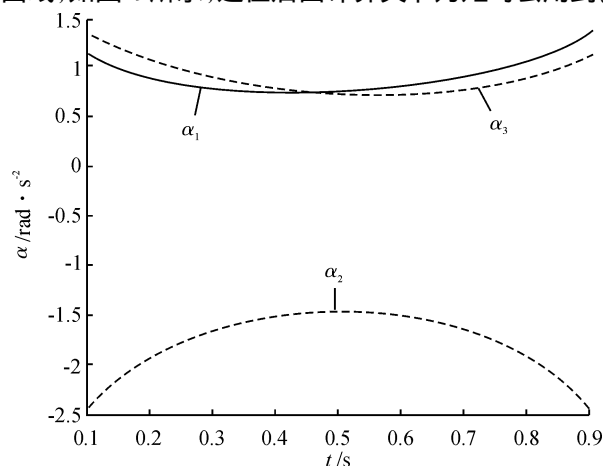


图 9 关节角加速度随时间变化曲线

3 关节力矩

如果能够得出关节扭矩跟各关节角的角加速度的关系,就可以计算出载人两足步行机器人在行走过程中任意时刻各关节的扭矩。为此,首先建立载人两足步行机器人的动力学模型。

在单脚支撑期,载人两足步行机器人可以看作无固定基座但和地面接触的自由下落的机械手模型。

动力学方程:

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

式中, F 为广义力; q 为广义坐标; L 为拉格朗日函数。

但是,载人两足步行机器人有 12 个自由度,要完全求解几乎是不可能的,有必要对模型进行简化。在单脚支撑期,侧倾和旋转角不动,而游动脚质量相对整个身体来说很小,将游动脚各关节角的角加速度设为零,则其对支撑脚关节力矩的影响可忽略不计,支撑脚可用无质量刚性杆代替,机器人上身集中了大部分质量且不发生转动,可用重心处的与身体等质量的质点代替,于是可将载人两足步行机器人模型简化如图 10 所示。机器人上身不发生转动,所以有 $\theta_3 + \theta_4 = \pi/2$ 。

对该模型求解过程如下:

(1) 笛卡尔位置坐标表达式

$$x = l \cos \theta_1 + l \cos(\theta_1 + \theta_2) + h_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)$$

$$z = l \sin \theta_1 + l \sin(\theta_1 + \theta_2) + h_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)$$

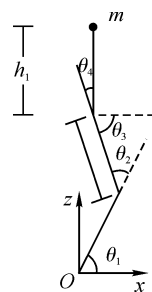


图 10 机器人模型示意图

(2) 速度笛卡尔分量

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -l \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - l \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \\ &\quad h_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \\ \dot{z} &= l \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \\ &\quad h_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \end{aligned}$$

(3) 速度平方

$$\begin{aligned} \dot{v}^2 &= \dot{x}^2 + \dot{z}^2 = (2\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_1^2 + (\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_2^2 + h_1^2 \dot{\theta}_4^2 + \\ &\quad 2\dot{l}^2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_2 + 2l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1^2 + 2l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ &\quad 2l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_2^2 + 2(\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{l}^2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ &\quad 4l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2h_1^2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 - \\ &\quad 2l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 - 2h_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - 2l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - \\ &\quad 2l h_2 (\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

(4) 动能 K

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} m \dot{v}^2 = \frac{1}{2} m (2\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m (\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_2^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} m h_1^2 \dot{\theta}_4^2 + m \dot{l}^2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_2 + m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1^2 + \\ &\quad m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_2^2 + m (\dot{l}^2 + \\ &\quad h_1^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m \dot{l}^2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \\ &\quad m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m h_1^2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 - m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 - \\ &\quad m h_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \end{aligned}$$

(5) 势能

$$P = m g z = m g l \sin \theta_1 + m g l \sin(\theta_1 + \theta_2) + m g h_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)$$

(6) 拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L &= K - P = \frac{1}{2} m (2\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m (\dot{l}^2 + h_1^2) \dot{\theta}_2^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} m h_1^2 \dot{\theta}_4^2 + m \dot{l}^2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_2 + m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1^2 + \\ &\quad m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_2^2 + m (\dot{l}^2 + \\ &\quad h_1^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m \dot{l}^2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 - m h_1^2 \ddot{\theta}_2 - m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 - \\
& m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 - \\
& m g l \sin \theta_1 - m g l \sin(\theta_1 + \theta_2) - m g h_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \\
\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_1} &= m (2\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_1 + 2m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 + \\
& 2m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 + m (\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_2 + \\
& m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 + m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_2 - \\
& m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_4 \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} &= m (2\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_1 + 2m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + \\
& 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 + 2m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 + \dots + \\
& m (\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_2 + m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 + \\
& m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_2 + \dots - m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - \\
& m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_4 + \dots
\end{aligned}$$

式中,略去了跟角速度有关的项,因为和速度有关的力矩与系统其他力矩相比明显较小;跟速度有关的项数太多,对他们进行符号解太复杂,计算量太大;只有在机器人步速较高时,这些量才有意义。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_1} &= -m g l \cos \theta_1 - m g l \cos(\theta_1 + \theta_2) - m g h_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \\
T_1 &= m (2\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_1 + 2m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 + \\
& 2m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 + m (\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_2 + m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 + \\
& 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 + m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_2 - m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - \\
& m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_4 + m g l \cos \theta_1 + \\
& m g l \cos(\theta_1 + \theta_2) + m g h_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)
\end{aligned}$$

同理可求得:

$$\begin{aligned}
T_2 &= m (\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_2 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 + m (\dot{\theta}^2 + h_1^2) \ddot{\theta}_1 + \\
& m \dot{\theta} \cos \theta_2 \ddot{\theta}_1 + 2m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 + m l h_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 - \\
& m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_4 + m g l \cos(\theta_1 + \theta_2) + \\
& m g h_1 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_3 &= m h_1^2 \ddot{\theta}_4 - m h_1^2 \ddot{\theta}_2 - m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_2 - m h_1^2 \ddot{\theta}_1 - \\
& m l h_1 \cos \theta_4 \ddot{\theta}_1 - m l h_1 (\theta_2 - \theta_4) \ddot{\theta}_1 - m g h_1 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)
\end{aligned}$$

支撑脚各关节角扭矩随时间变化的曲线,如图11所示。

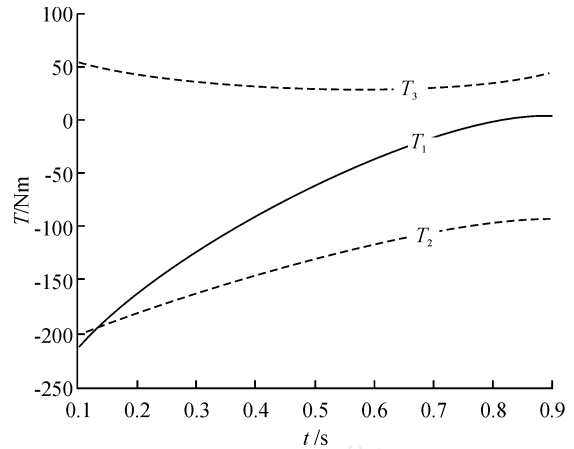


图 11 支撑脚各关节扭矩随时间的变化曲线

4 结束语

载人两足步行机器人由于其自身结构的特点,可以通过自身关节的调整方便地实现步态平稳,而不需要平衡块,但是也正因为这点使得 ZMP 的计算在纵向与横向上产生耦合,很难同时精确的规划出两个方向的 ZMP 轨迹。本文在重心轨迹的基础上,通过对重心 z 向坐标的约束,实现机器人纵向与横向的分离,进而根据重心的运行轨迹完成了行走姿态的规划,最后通过动力学方程计算关节扭矩对所做步态规划进行评估。

参考文献:

- [1] 伍科布拉托维奇 M. 步行机器人和动力学假肢 [M]. 马培荪,沈乃勋译. 北京:科学出版社,1988
- [2] 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,1999,23(6): 504 - 508
- [3] 林玳玳,刘莉,赵建东,等. 双足步行机器人的 ZMP-COP 检测及研究 [J]. 机器人,2004,26(4): 368 - 372
- [4] 张永学,麻亮,强文义,等. 基于地面反力的双足机器人期望步态轨迹规划 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(1): 4 - 7.
- [5] 理查德. P. 保罗. 机器人操作手: 数学、编程与控制 [M]. 郑时雄,谢存禧译. 北京:机械工业出版社,1982
- [6] 付京逊 R. C. 冈萨雷斯 C. S. G. 李. 机器人学 控制、传感技术、视觉、智能 [M]. 杨静宇,等译. 北京:中国科学技术出版社,1989