

分类号:

学校代号: 11845

UDC:

密级:

学 号: 2110804311

广东工业大学硕士学位论文

(工学硕士)

双足机器人步态规划研究

黄春林

指导教师姓名、职称: 张祺 副教授

学科(专业)或领域名称: 控制理论与控制工程

学 生 所 属 学 院: 自动化学院

论 文 答 辩 日 期: 2011 年 5 月



A Dissertation Submitted to Guangdong University of
Technology for the Degree of Master of Engineering Science

Research of Gait Planning for Biped Robot

Master Candidate: Huang Chunlin

Supervisor : Vice Prof. Zhang Qi

May 2011

Faculty of Automation

Guangdong University of Technology

Guangzhou, Guangdong, P. R. China, 510006

摘 要

双足机器人因其灵活的步行能力和类人的行为而具有广泛的应用前景，其步态的稳定性已成为研究热点。步态规划是机器人实现稳定步行的基础和实现类人动作的关键。本文在收集、整理和分析相关文献资料的基础上，以双足机器人为研究对象，借助 RoboCup3D 仿真平台，对双足机器人的步态规划进行研究。本文主要工作如下：

1. 采用三次样条插值算法规划步态。根据关键时刻主要关节的位姿，基于三次样条插值算法，在满足步行环境，几何约束和物理结构的条件下，在径向和侧向平面中，分别规划出踝关节、髋关节在整个步行运动周期内的轨迹。再利用几何关系通过双平面的合成计算得到膝关节、脚掌等双足机器人下肢主要部位的运动轨迹。

2. 利用粒子群算法对步态参数进行优化，得到稳定裕度大的平滑步态。首先分析了步态参数对步态稳定性的影响，然后根据双足机器人步行过程中单、双足支撑期的特点，分别构造了稳定裕度评估函数，并综合步行特征得到了步态优化的目标函数。最后采用粒子群算法优化步态参数，得到稳定裕度大的步态。

3. 在 MATLAB 环境中和 RoboCup3D 仿真平台上进行实验。在 MATLAB 环境中规划得到期望的双足机器人各关节步行运动轨迹和稳定裕度大的 ZMP 轨迹，能够较好满足双足机器人稳定性原则。然后，在 RoboCup3D 仿真平台中，将已规划好的步态应用到仿真 Nao 机器人，通过统计仿真 Nao 机器人步行过程中的相关数据，验证三次样条插值规划方法的有效性和粒子群步态优化算法的优越性。

最后进行了总结，说明了本文的主要研究成果，同时对课题中需要改进之处提出了展望。

关键词：双足机器人；三次样条插值；粒子群算法；步态规划；步态优化；

Abstract

Biped robot has great application prospect because of its flexible walking ability and humanoid action, the stability of its gait has become a hot issue. Gait planning is the basics for the robot to walk stably and the key part to implement humanoid motion. In this dissertation, with RoboCup3D simulation platform, the research on walking motion planning of biped robot has been done based on the collection, collation and analysis of relevant literatures. The primary contents are as follows:

1. Using the cubic spline interpolation algorithm to plan the gait. In the sagittal and lateral plane, according to the main joint postures of critical moments, the walking patterns of ankle and hip joint have been planned in the walking cycle based on the cubic spline interpolation algorithm. And the planning gaits must meet all the conditions such as walking environment, geometric constraints and robot's structure. Finally, the trajectories of knee, foot and other parts of the biped robot are obtained by calculating with the geometric relationship between the two planes.

2. Using the particle swarm optimization algorithm to optimize parameters of gait and generate a smooth gait with large stability margin. Firstly, the dissertation analyzes the effect of gait parameters on gait stability. Secondly, this assessment function of stability margin is constructed according to the characteristics of walking biped robot in single-support and double-support phase, and the target evaluation function used for evaluating the gait stability is obtained in the process of synthesizing respectively and completely on walking features. Finally, optimizing the gait parameters with particle swarm optimization algorithm and obtaining perfect gait with large stability margin which achieve the purpose of gait optimization.

3. Do experiments in the MATLAB environment and RoboCup3D simulation platform. Planning the desired walking motion trajectories of biped robot and the ZMP trajectory with large stability margin in the MATLAB, which can meet the principle of stability of biped robot. Then, the planned gait has been used on the biped

robot Nao on the simulation platform in RoboCup3D. With statistical simulation data in the Nao robot walking process, it can verify the effectiveness of cubic spline interpolation algorithm and the advantages of PSO algorithm in planning biped gait.

At the end of this dissertation, the main research is summarized. It makes out the main research results, and also the problems which need to further research.

Keywords: biped robot; cubic spline interpolation; particle swarm optimization; walking pattern planning; walking pattern optimization;

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
Contents	VII
第一章 绪 论	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 基于仿生运动学的步态规划研究	2
1.2.2 基于模型的步态规划研究	3
1.2.3 基于能耗优化的步态规划研究	5
1.2.4 基于智能算法的步态规划研究	5
1.3 本文主要研究内容及章节安排	6
第二章 双足机器人步行稳定性判据	8
2.1 引言	8
2.2 双足机器人七连杆模型	8
2.3 步行稳定性判据	9
2.3.1 零力矩点定义	9
2.3.2 稳定步行的条件	14
2.4 本章小结	16
第三章 双足机器人步态规划	17
3.1 引言	17
3.2 双足机器人步行过程分析	17
3.3 三次样条插值算法	19
3.4 径向轨迹规划	20
3.4.1 脚掌倾角规划	21
3.4.2 踝关节规划	23

3.4.3 髋关节规划	25
3.4.4 膝关节规划	26
3.5 侧向轨迹规划	28
3.5.1 踝关节规划	29
3.5.2 髋关节规划	29
3.5.3 膝关节规划	32
3.6 双足机器人 ZMP 轨迹	33
3.7 仿真实验及结果分析	34
3.7.1 仿真实验	34
3.7.2 规划步态效果图	36
3.7.3 实验结果分析	37
3.8 本章小结	37
第四章 双足机器人步态优化	38
4.1 引言	38
4.2 髋关节轨迹对 ZMP 的影响分析	38
4.3 目标函数构造	40
4.4 粒子群步态优化算法	41
4.5 实验及结果分析	43
4.6 本章小结	44
第五章 基于 RoboCup3D 平台的仿真实验	45
5.1 引言	45
5.2 RoboCup3D 实验平台	45
5.3 Nao 机器人结构	47
5.4 RoboCup3D 实验及结果分析	50
5.5 本章小结	55
总 结	56
参考文献	58
攻读学位期间发表的论文	62
学位论文独创性声明	63
致 谢	64

Contents

Abstract(In Chinese)	I
Abstract(In English)	III
Contents(In Chinese)	V
Contents(In English)	VII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Significance of This Dissertation.....	1
1.2 Reseach Situation.....	2
1.2.1 Research of Gait Planning Based on Bionic Kinematics.....	2
1.2.2 Reaearch of Gait Planning Based on Model.....	3
1.2.3 Research of Gait Planning Based on Energy Optimization.....	5
1.2.4 Research of Gait Planning Based on Intelligent Algorithm.....	5
1.3 Primary Contents of Research and Constructure	6
Chapter 2 Stability Criteria for Biped Walking Robot	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 The Seven Link Model for Biped Robot	8
2.3 Stability Criteria for Biped Robot.....	9
2.3.1 The Definition of zero-moment point	9
2.3.2 The Conditions for Stable Walkin.....	14
2.4 Summary	16
Chapter 3 Gait Planning for Biped Robot	17
3.1 Introduction.....	17
3.2 The Process Analysis of Biped Walking Robot	17
3.3 Cubic Spline Interpolation Algorithm	19
3.4 Trajectory Planning in Radial Plane	20
3.4.1 The Angle Planning of Foot.....	21
3.4.2 The Trajectory Planning of Ankle.....	23

3.4.3 The Trajectory Planning of Hip	25
3.4.4 The Trajectory Planning of Knee.....	26
3.5 Trajectory Planning in Lateral Plane	28
3.5.1 The Trajectory Planning of Ankle.....	29
3.5.2 The Trajectory Planning of Hip	29
3.5.3 The Trajectory Planning of Knee.....	32
3.6 The ZMP Trajectory of Biped Robot	33
3.7 Simulation and Result Analysis	34
3.7.1 Simulation.....	34
3.7.2 The Renderings of Planning Gait.....	36
3.7.3 Experimental Results and Analysis	37
3.8 Summary	37
Chapter 4 Gait Optimization for Biped Robot	38
4.1 Introduction.....	38
4.2 The Impact Analysis of Hip Trajectory on the ZMP	38
4.3 Construct the Objective Function	40
4.4 Particle Swarm Optimization Algorithm of Gait.....	41
4.5 Experimental Results and Analysis	43
4.6 Summary	44
Chapter 5 Simulation Based on RoboCup3D Platform	45
5.1 Introduction.....	45
5.2 RoboCup3D Simulation Platform.....	45
5.3 The Structure of Nao Robot.....	47
5.4 The Simulation on RoboCup3D and Result Analysis.....	50
5.5 Summary	55
Conclusion	56
References.....	58
Thesis Published During Studying for the Degree	62
Originality Statement of Academic Dissertation.....	63
Acknowledgment.....	64

第一章 绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

双足机器人是当今机器人研究领域最为前沿的课题之一,它集机械、电子、计算机、材料、传感器、控制技术及人工智能等多门学科于一体,是一个国家高科技实力的重要标志。而且,双足机器人是一种高度非线性、强耦合的对象,反映了一个国家的智能化和自动化研究水平,双足机器人研究已成为目前非常活跃的一个研究领域。

双足机器人是一种非常典型的仿人机器人,国外早在 60 年代末就开始了双足机器人的研究开发。1968 年,美国通用公司试制了一台名为“Rig”的操纵型双足机器人,揭开了双足机器人研究的序幕^[1]。随着双足机器人在各个领域的应用日趋广泛,各个国家在该领域相继投入巨资开展研究。自 20 世纪 90 年代开始,双足机器人的研究已从模仿人类腿部行走发展到全方位拟人阶段,相继诞生了 P3, ASIMO 等机器人明星^[2~4]。双足步行机器人的运动规划问题主要是研究如何提高行走速度、减少行走耗能、实现行走稳定(包括静态和动态稳定)和姿态切换等。

步行是人类最基本的行为方式,双足机器人具备人类的基本结构,具有类人的步行能力。双足步行机器人在外形上具有人类特征,适合用于人类生活的环境,为人们提供方便,因此具有广阔的市场前景^[5~7]。双足机器人与其他多足机器人相比具有体积较小、重量轻、动作灵活、迅速,而且更接近于人类步行的特点,因此它们对环境有最好的适应性,在日常生活中更具有广泛的应用前景。

步行运动是双足机器人实现基本类人动作的关键,可以为仿人机器人的机构设计、优化提供理论指导和技术支持。对双足机器人步态规划进行研究,规划合理的步态并控制机器人稳定的跟踪步态实现稳定的步行运动成为双足机器人技术研究的重点^[8~10]。稳定的步态是双足机器人实现行走功能的基础,有了稳定的步态才能显现它的灵活性和更强的适应能力,也才能使机器人其他的很多功能得以实现。另外,技术发展的角度看,步态规划研究会对传统的机械机构、传动方式

和控制方法产生一定影响,从而促进仿生学及其他领域的相关研究与应用,可以更多的了解和掌握人类的步行特征,并为人类的服务,如人造假肢^[14]。

综上所述,双足机器人的步态规划研究具有重要的理论意义和应用价值,步行稳定性是首要的问题,也是双足步行机器人的核心问题,是实现其他复杂功能的前提和基础,是当前双足机器人研究的重要任务。

1.2 国内外研究现状

双足机器人采用单、双脚交替支撑的方式步行,具有很好的灵活性,但由于其结构复杂,要实现稳定的步行,必须先规划出合理的步态。步态的好坏将直接影响到机器人行走的稳定性、驱动力矩的大小以及姿态的美观性等^[12]。目前,双足机器人的步态规划方法计算量大,难以满足实时性要求,因此,大部分步态都是离线规划的。在规划过程中,为了使计算过程和运动分析变得简单,一般把三维空间的步态规划分解到径向和侧向两个平面内进行,并且假设这两个平面内的步态是相互独立的。

1.2.1 基于仿生运动学的步态规划研究

双足机器人步行的目的就是模仿人类的行走特性,故其步态规划可借鉴人类的仿生步态。利用捕获的人类步行运动数据(HMCD: Human Motion Capture Data)可以规划复杂多样的动作。由于双足机器人与人在质量分布、动力学特性和驱动特性上有很大差异^[13-14],因此,不能直接将人类的步态用于双足机器人,而是对HMCD进行分析,研究人类步行的基本原理,将得到的一些基本步态特征应用到机器人的步行规划中,生成适合双足机器人的步态^[15]。本田的研究团队在分析了人类下肢行走时各关节之间的相互抑制、相互协调规律的基础上得到相关数据,生成了ASIMO的步态^[16]。纪军红等利用修正的HMCD规划出了HIT-III双足机器人的步态^[17]。

由于参考动作由人体产生,规划的方法变得更加简单,不需要像模型规划法那样人为地设定过多的参数。但是,该方法的可行性完全依赖于步行数据,而现有的仪器难以准确而完备地测量、记录人类行走的特征数据,因此,要得到大量适用于机器人的步行数据并不容易;此外,机器人的具体步态与实际物理参数相关,不同机器人的数据不具有共享性,故此方法规划的步态不具有通用性。但随

着对人类步行机理研究的深入, HMCD 的更完备, 基于 HMCD 规划的步态将会更自然、更类人, 它将成为双足机器人步态规划的一个重要途径。

1.2.2 基于模型的步态规划研究

在理想状态下, 只要规划出合理的步态, 实际的双足机器人就能实现稳定步行。为此, 必须建立精确的双足机器人模型, 即一个严格按照命令运动的刚性机构, 再根据建立的模型规划步态。目前, 基于模型的步态规划方法主要有基于多连杆模型、基于倒立摆模型和基于桌子-小车模型等。

(1) 基于多连杆模型的步态规划研究现状及分析

将机器人的上半身、大腿、小腿和脚掌分别用一匀质的刚性连杆代替, 各连杆之间的接点分别代表机器人的髋关节、膝关节和踝关节, 建立双足机器人的多连杆模型。双足机器人的步行就是其中一些或全部关节的协调运动。目前很多实用的步态都是基于此模型或其发展形式规划的。其基本思想: 首先规划出机器人主要关节(如髋关节、踝关节)的运动轨迹; 再通过几何关系求得其它关节的运动轨迹, 然后根据已有的轨迹及机器人的物理参数, 通过调整步态参数值, 保证机器人的稳定性; 最后求解逆运动学方程得到各关节角轨迹, 即最终步态^[18,19]。该方法已在 Honda 机器人上得到成功应用。

(2) 基于倒立摆模型的步态规划研究

与多连杆模型相比, 基于倒立摆模型规划双足机器人的步态显得更加简洁, 更容易分析其动力学特性^[20,21]。将双足机器人近似为一个由集中了所有质量的质点和连接该质点与支撑点的无质量的腿组成的三维线性倒立摆。由于支撑点处的力矩为零, 因而可以自由转动。在伸缩力的作用下腿可以伸缩, 相当于双足机器人膝关节的弯曲或伸展而使其质心上下运动。

在一定的步行约束条件下, 通过设置合适的步态参数, 求解倒立摆的运动学方程得到其质心的运动轨迹, 让双足机器人的腰部跟踪倒立摆的质心运动, 然后通过其它方法规划摆动脚的轨迹, 使之在规定的时间内到达期望的落地点。在腰部和双足的轨迹确定后, 利用逆运动学方程求得机器人各关节角的轨迹, 即最终的步态^[22]。Shuuji 等基于三维线性倒立摆模型规划得到了双足机器人的步态, 在双足机器人 HRP-2L 上实验成功^[23]。

倒立摆模型法利用了双足机器人的动力学特性, 得到函数化的步态。然而,

该方法是基于理想的线性倒立摆模型,即假设机器人的质量都集中在一点,没有考虑摆动脚的质量,转动惯量,关节之间的耦合和摩擦等因素,这使得模型与实体机器人之间存在很大误差,此简化的模型不能充分的反映机器人的运动学特性。因此,该方法只适用于腿部质量和转动惯量都非常小的情况,这就限制了它的应用范围。

(3) 基于桌子-小车模型的步态规划研究现状及分析

桌子-小车模型:一辆质量为 M 的小车在一个质量可以忽略不计的桌子水平面上运动。虽然桌子的支撑脚相对于小车的运动范围而言很小,当小车运动到边缘时整个系统会倒,但是当小车以某个适当的加速度运动时桌子可以维持瞬时平衡而不倒。基于桌子-小车模型的步态规划方法,也可称为基于 ZMP 的步态生成方法,其基本思想是:给定双足机器人 ZMP 的期望轨迹,基于桌子-小车模型计算所需要的质心运动,然后使其腰部跟踪质心运动,再结合已规划的踝关节轨迹,通过逆运动学方程得到各关节的角度,即最终的步态。

该方法首先由 Vukobratovic 和 Stepanenko 在 1972 年发表的论文中提出,但是他们的算法需要很长的计算时间。后来 Takanishi 等人变换目标 ZMP 模式,通过 FFT 在频率域内求解 ZMP 方程,再利用 FFT 的逆变换得到质心的轨迹^[24,25]。基于这种方法规划的步态在 HRP 项目的早期阶段起了重要作用。最近,由 Nishiwaki 等人提出了一种将 ZMP 方程用采样时间离散化的快速有效算法。目前应用于双足机器人 HRP-2 的步态也是基于桌子-小车模型,通过预观控制系统在线生成的。

显然,只要将期望 ZMP 轨迹规划在支撑区域的中心,则步行稳定裕度将最大,但这样会影响机器人的步行速度;另一方面,通过髋关节的运动来改变 ZMP 的能力是有限的,因此,并不是所有的期望 ZMP 轨迹都能实现,即便能实现,髋关节也需要很大的加速度,这将使机器人上半身的控制难度加大,能耗增加。

上述步态规划方法都是基于理想模型,忽略了径向运动和侧向运动的耦合,因此,将规划的步态应用于实际样机的时候,不可避免地存在误差,可能会出现径向运动和侧向运动发生干涉、步态切换不连续以及摆动脚与地面不平行等情况。由于只考虑稳定性约束,因而可能会出现能耗过大,关节力矩过大或突变等问题。此外,步态都是在理想环境下离线规划的,对实际步行环境的适应性和对干扰的鲁棒性较差。

1.2.3 基于能耗优化的步态规划研究

人类在进化过程中已经使自己能够采取能耗最低的方式行走而且能够保持稳定。因此,对双足机器人采用能耗优化的方法规划步态势必能够使其行走方式更加接近人类。以稳定作为约束条件,以耗能最少作为优化目标来生成步态。

南斯拉夫学者 Vukobratovic 最早从能量观点分析了实现各关节动作所需的扭矩,虽然仅限于导出各关节及整个步行系统的功率随时间的变化关系,没有涉及能耗最优这个问题,但他总结出一个有用的结论:步行姿态越平滑,类人型步行系统所消耗的功率就越少。姜山等用三次多项式拟合机器人髋关节和踝关节的运动轨迹,通过基于能量最优为目标,用遗传算法优化多项式系数,得到能量最优的行走步态^[26]。Capi 等针对能量最小、关节力矩变化最小的优化目标,生成双足机器人 Bonten-Maru 稳定的行走步态^[27]。

基于能耗优化的方法能充分发挥双足机器人的性能,降低对系统的要求,但是最优规划计算量大,在模型复杂的情况下,甚至不可解,尚不能实时计算^[28]。因此,迄今为止,基于能耗优化的步态规划方法主要建立在简化模型的基础上并且采用数值计算的方法。

1.2.4 基于智能算法的步态规划研究

智能技术如神经网络、模糊逻辑、遗传算法具有强大的自学习、自适应和容错能力,吸引了众多国内外机器人研究领域的学者尝试将其应用到双足机器人的步态规划中^[29]。

(1)神经网络规划研究

基本思想:在双足机器人各步行周期内采集各关节的广义坐标及其微分(如角度、角速度)为输入节点变量,设定一定数目的中间神经节点,以所需的各关节的驱动力矩或角度等为输出节点。郑元芳博士研制的基于神经网络的双足机器人 SD-2,实现了动态步行,并且能够在斜坡上行走^[30-31]。为了确定各节点上的权重需要大量的训练样本和长时间的计算,但由于样本空间构造和收敛性问题尚未解决,因此,将它应用于双足机器人的步态规划还有很多工作要做。

(2)模糊逻辑规划研究

基本思想:以事先确定的步态初始参数为输入变量,结合传感器检测的信息,通过接口生成模糊控制器输入,根据预先确定的控制规则库,产生所期望步态,

即各关节的角度、角速度等^[32]。但是双足机器人的姿态不确定，步行环境复杂多变，而且模糊控制规则的设定很困难，所以该方法目前还没有得到理想的效果。

(3)遗传算法规划研究

基本思想：先假设某个关节的运动轨迹，再用多次函数插值实现问题的参数化，最后利用遗传算法，根据稳定性条件或其它寻优条件确定各个参数，从而得到最终的步态^[33]。目前，遗传算法在双足机器人步态规划中的应用较少，主要有以下原因：1) 被规划关节的运动轨迹是未知的，即使假设已知，其关节运动曲线通常不是初等函数，插值误差很大；2) 计算复杂，资源消耗大。因此，该方法不适合直接用于步态规划，但可用来对已规划好的步态进行优化，得到最优的步态。

上述步态规划方法没有考虑步态参数对稳定性、速度、驱动力矩和能耗等的影响。因此，可以考虑将上述几种方法结合起来，获得最优的行走步态，如基于连杆模型，通过三次样条插值规划出参数化的双脚和髋部的轨迹，再以 ZMP 稳定裕度最大、能耗最省、力矩最小或速度最快等为目标，利用粒子群算法对步态参数（如步长、双腿支撑期比率、髋关节高度等）进行优化，得到合理的步态，最后通过神经网络或逆运动学模型得到各关节的参考轨迹。

1.3 本文主要研究内容及章节安排

本文的主要研究内容如下：

1. 基于三次样条插值算法进行步态规划。

将双足机器人步行过程进行时段划分，根据关键时刻主要关节的位姿，利用三次样条插值算法进行分段插值，在满足步行环境，几何约束和物理结构的条件下，分别在径向和侧向平面中，规划出踝关节、髋关节、膝关节、脚掌等主要部位在整个步行运动周期内的运动轨迹。

2. 基于粒子群算法进行步态优化。

采用粒子群算法对步态参数进行优化。首先分析步态参数对步态稳定性的影响，然后根据双足机器人步行过程中单、双足支撑期的特点，分别构造了稳定裕度评估函数，并综合步行特征得到了步态优化的目标函数。最后采用粒子群算法优化步态。

本文的章节安排如下:

第一章绪论主要介绍了该课题的研究背景和意义及国内外研究现状。

第二章分析了双足机器人的构造特性,建立了双足机器人的七连杆模型。在借鉴已有经验的基础上,引入了双足机器人步行运动稳定性判据——ZMP,并根据 ZMP 定义研究了机器人稳定步行的条件。

第三章是本文的研究重点之一,首先分析了双足机器人步行运动过程,接着采用三次样条插值算法规划步态。结合本文实验对象给出了三次样条插值的初始步态参数,并根据各步行时段的特征恰当选择三次样条插值的边界条件。分别在径向平面和侧向平面,对双足机器人脚掌倾角、踝关节、髋关节、膝关节进行轨迹规划并进行 MATLAB 仿真实验,得出了规划步态机器人各关节的运动轨迹和三维效果图。最后,计算出双足机器人整个步态周期的 ZMP 运动轨迹,判断规划步态的稳定性。

第四章是本文的研究重点之二,在第三章步态规划的基础上,分析了步态参数对双足机器人步行稳定性的影响,构造了评价规划步态优劣的目标函数。然后,利用粒子群算法对步态参数进行优化,并通过 MATLAB 仿真比较了步态优化前后 ZMP 的变化情况。

第五章实验验证本文研究内容的可行性和有效性。简要介绍了 RoboCup3D 仿真平台的功能以及仿真 Nao 机器人的基本配置,阐述了 RoboCup3D 仿真实验原理及过程,最后将规划步态及经过步态优化的步态应用于仿真 Nao 机器人,观察实验现象,记录实验结果并进行分析,得出实验结论。

最后对论文进行总结,对下一步要进行的工作提出展望。

第二章 双足机器人步行稳定性判据

2.1 引言

本章从理论上分析双足机器人的步态特性，研究步行稳定性判据。首先对双足机器人建立七连杆模型。模型的准确程度直接影响到分析结果反映双足机器人步态特性的真实程度。结合本文研究对象，重点分析了双足机器人下肢的步态特性，研究双足机器人步行稳定性的约束条件及零力矩点稳定性判据。

2.2 双足机器人七连杆模型

目前，双足机器人主要以连杆和关节构成，本文研究重点放在机器人下肢 12 自由度的关节上，所以将机器人上体头部及双臂和躯干合并简化为一整体 P_4 ，把机器人任意相邻关节之间的部分等效为质量均匀，形状规则的刚体。两刚体之间通过关节相连，将双足机器人简化为一个七连杆模型如图 2-1 所示。图中， p_1, p_7 表示左右支撑脚掌； p_2, p_6 表示左右小腿； p_3, p_5 表示左右大腿； P_4 为表示上躯体和左右髋关节连接部分； m_i 为杆件 i 的质量，其质心位置与杆件几何中心重合。

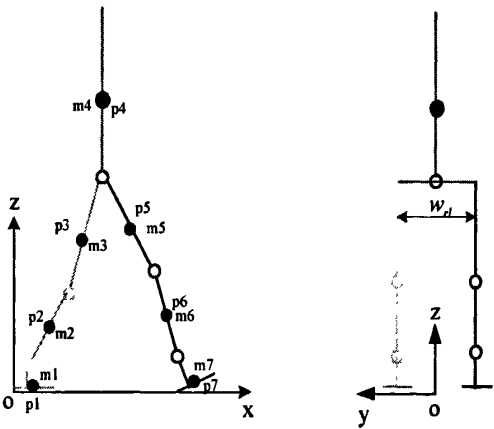


图 2-1 双足机器人七连杆模型

Fig2-1 Seven link biped robot model

机器人的运动轨迹规划是三维的轨迹规划，需建立一个三维直角坐标系。以

开始运动前静止状态左右脚后跟中点为坐标原点 o ，规定机器人正前方为 x 轴正方向，正左方为 y 轴正方向，竖直向上为 z 轴正方向，即 xoz 平面为径向平面， yoz 平面为侧向平面，建立机器人坐标系，如图 2-1 所示。本文分别在径向平面、侧向平面上对机器人的步态进行规划，主要研究双足机器人下肢 12 自由度关节运动轨迹，其自由度分布情况：髋关节、膝关节、踝关节分别是 3，1，2，左右对称。

2.3 步行稳定性判据

双足机器人步行运动过程中，两只脚交替的与地面发生间歇性的相互作用，即交替的出现左脚单支撑，双脚支撑和右脚单支撑的状态，周期性的不断前进。双足机器人步态研究的重点就在于如何维持支撑脚与地面的相对瞬时固定，使机器人的运动过程中保持稳定步行而不发生翻倒或滑倒。

目前衡量双足步行机器人稳定性有两个主要的指标：一个是整个机器人的重心在地面投影点(Center of Gravity,简称 COG)，COG 对应的是静态稳定性；另一个是零力矩点(Zero Moment Point,简称 ZMP)如图 2-2 所示，ZMP 对应于动态稳定性^[34]。静态稳定性只有在机器人运动非常缓慢时才适用，大多数情况，机器人运动具有一定的速度，需考虑它的动态稳定性。因此，研究者们已经采用了动态稳定性，最普遍的是采用零力矩点(ZMP)作为双足机器人步态稳定性判定标准。

2.3.1 零力矩点定义

零力矩点(zero-moment point，缩写为 ZMP)有关双足机器人各部位动态控制的概念，它首先由南斯拉夫学者 Miomir.Vukobratovic 在 1968 年 1 月莫斯科第三届理论与应用力学全联盟代表大会上提出^[35]，在他后来的研究工作中和发表的论文中，Miomir.Vukobratovic 等人致力于 ZMP 的研究工作，1972 年，Vukobratovic 和 Stepanenko 在一篇关于双足机器人控制的论文开头定义了零力矩点。现在经过几十年的研究发展，ZMP 的表述方法主要有两种：

1. ZMP 指地面上满足地面反力的合力矩对 x, y 轴分量为零的那一点, 即 $T(T_x, T_y, T_z)$ 表示由地面反力绕某一点产生的合力矩在 ZMP 点满足 $T_x=0, T_y=0, T_z=0$, 如图 2-2 所示。

2. ZMP 指重力和惯性力的合力在地面上的投影, 在这一点上合力矩为零。

可以证明这两种表述方式是一致的, 双足机器人稳定步行时, 其 ZMP 具有如下性质: ZMP 始终位于支撑腿的脚掌所组成的凸形有效支撑区域内, 以保证 ZMP 的条件, 满足 ZMP 稳定性原则^[36,37]。ZMP 概念的引入, 为双足机器人的动态步行运动分析和规划提供了一个重要的依据。

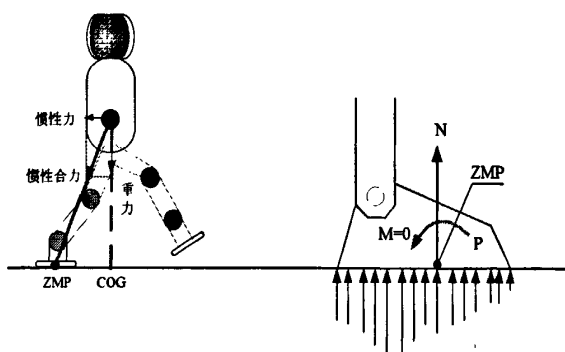


图 2-2 重心地面投影及 ZMP

Fig2-2 GOP and ZMP

根据零力矩点的定义, 不管哪一种步行方式, 零力矩点必须落在机器人支撑脚构成的区域的一定范围内才能保证它的稳定。如图 2-3 中, 这里对机器人行走时的某一连杆 i 进行讨论, 讨论过程中忽略连杆转动对 ZMP 的影响。记 m_i 为连杆 i 的重心, M_i 为其它外力对 m_i 的作用力矩, 点 M 为期望的零力矩点, \vec{p}_i 为 M 点相对于 $Oxyz$ 坐标平面原点的方向矢量, \vec{r}_i 为机器人肢节 m_i 点相对于原点的方向矢量, 则有 m_i 点相对于 M 的方向矢量为 $\vec{r}_i - \vec{p}_i$ 。

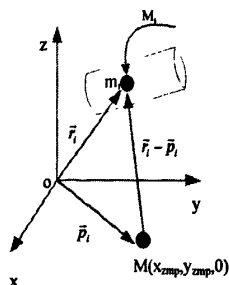


图 2-3 杆件受力分析示意图

Fig2-3 The diagram of rod stress analysis

根据达朗伯原理^[38]，机器人所受的惯性力为：

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

式中， F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的惯性力， m_i 为各连杆的质量， \ddot{x}_i 、 \ddot{y}_i 、 \ddot{z}_i 分别为各连杆质心 x 、 y 、 z 方向上的加速度。

惯性力与重力的合力为：

$$F_s = F + \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i + g \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

式中， g 为重力加速度， $g \approx 9.81 \text{m/s}^2$ 。

根据力矩公式 $M = F_s \times l \sin \varphi$ ， F 为力的大小， l 为力臂的长度， φ 为力与力臂之间的夹角，则可求出 x, y, z 三个方向上的力矩，如式(2.3)所示。

$$\begin{aligned} M &= F_s \times l \sin \varphi \quad M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = F_s \times l \sin \varphi \\ &= - \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} (\ddot{z}_{mi} + g)y_{mi} \sin(\pi/2) + \ddot{y}_{mi} z_{mi} \sin(-\pi/2) \\ (\ddot{z}_{mi} + g)x_{mi} \sin(-\pi/2) + \ddot{x}_{mi} z_{mi} \sin(\pi/2) \\ \ddot{x}_{mi} y_{mi} \sin(-\pi/2) + \ddot{y}_{mi} x_{mi} \sin(\pi/2) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} \\ &= - \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} (\ddot{z}_{mi} + g)y_{mi} - \ddot{y}_{mi} z_{mi} \\ -(\ddot{z}_{mi} + g)x_{mi} + \ddot{x}_{mi} z_{mi} \\ -\ddot{x}_{mi} y_{mi} + \ddot{y}_{mi} x_{mi} \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} \quad (2.3) \end{aligned}$$

根据零力矩点的定义，机器人在 M 点的所有合力的力矩为零，所以将合力从参照系原点移到 oxy 平面点 $M(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 处，使机器人绕 x 轴和 y 轴的倾覆力矩为 0，即：

$$M'_x = \sum_{i=1}^n m_i ((\ddot{z}_{mi} + g)(y_{mi} - y_{zmp}) - \ddot{y}_{mi} z_{mi}) + \sum_{i=1}^n M_{xi}$$

$$= \sum_{i=1}^n m_i ((\ddot{z}_{mi} + g)y_{mi} - \ddot{y}_{mi} z_{mi}) + \sum_{i=1}^n M_{xi} - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_{mi} + g)y_{ZMP} = M_x - F_z y_{ZMP} = 0 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} M_y' &= \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_{mi} z_{mi} - (\ddot{z}_{mi} + g)(x_{mi} - x_{ZMP})) + \sum_{i=1}^n M_{yi} \\ &= \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_{mi} z_{mi} - (\ddot{z}_{mi} + g)x_{mi}) + \sum_{i=1}^n M_{yi} + \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_{mi} + g)x_{ZMP} \\ &= M_y - F_z x_{ZMP} = 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

由式(2.4)和(2.5)可得:

$$\begin{cases} M_x - F_z y_{ZMP} = 0 \\ M_y - F_z x_{ZMP} = 0 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{M_x}{F_z} \\ \frac{M_y}{F_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n M_{xi}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n M_{yi}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

如果在行走中处于不受外力的作用的情况下, 则式(2.6)中的 $\sum_{i=1}^n M_{xi}$ 和 $\sum_{i=1}^n M_{yi}$,

图 2-3 中的 M_i 可以指定为机器人各个关节行走中所受到的惯性力作用的力矩,

因此 x_{ZMP} 和 y_{ZMP} 可用式(2.7)进行计算:

$$\begin{bmatrix} x_{ZMP} \\ y_{ZMP} \\ z_{ZMP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{M_x}{F_z} \\ \frac{M_y}{F_z} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

式(2.7)中, I_{ix} 和 I_{iy} 为合力的惯性分量, $\ddot{\Omega}_{ix}$ 和 $\ddot{\Omega}_{iy}$ 为围绕 x 轴和 y 轴转动的角的加速度。式(2.7)为笛卡尔空间的计算公式, 连杆质心的位置可以表示成广义坐标 θ 的函数, 加速度可以表示成 θ 及其角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度的函数 $\ddot{\theta}$, 所以机器人的 ZMP 也可以表示下列的关节空间的形式:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = f_{xZMP}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \\ y_{ZMP} = f_{yZMP}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \end{cases} \quad (2.8)$$

计算 ZMP 的坐标后, 要判断 ZMP 是否落在稳定区域内, 判断方法如下:

在 xoy 平面, 设直线 L 为稳定域边界, 则点 $P:(x_0, y_0)$ 与边界 $L:k_1x + y + k_2 = 0$ 的位置关系如下:

若 $k_1x_0 + y_0 + k_2 = 0$, 则 P 点落在直线 L 上 (如图 2-4 P1)

若 $k_1x_0 + y_0 + k_2 < 0$, 则 P 点落在直线 L 的下侧 (如图 2-4 P2)

若 $k_1x_0 + y_0 + k_2 > 0$, 则 P 点落在直线 L 的上侧 (如图 2-4 P3)

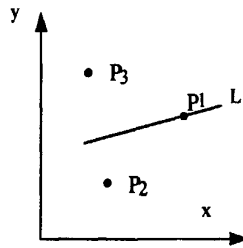


图 2-4 ZMP 与稳定域关系示意图

Fig2-4 the diagram of relationship between ZMP and stable regin

根据以上规则, 判断 ZMP 与稳定区域各边界线的位置关系, 就可判断 ZMP 是否落在稳定区域内。若 ZMP 在稳定区域内, 求 ZMP 到稳定区域边界的距离 d 的方法如下:

$$d = \frac{|k_1x_0 + y_0 + k_2|}{\sqrt{k_1^2 + 1^2}} \quad (2.9)$$

由式(2.9)计算 ZMP 到各边界的距离, 所有距离中的最小值 d_{\min} 为此刻步态的稳定裕度。

2.3.2 稳定步行的条件

对于一个给定步态，如果其在双足步行机器人上是可复现的，则称这一步态是稳定的；反之，则称这一步态是不稳定的^[39]。显然，当 ZMP 始终落在脚掌支撑面内时，这一步态是稳定的，也是可复现的；若 ZMP 超出脚掌支撑面，则这一步态是不稳定的，也是不可复现的。机器人行走时支撑脚与地面的接触面为支撑面，双脚支撑面为两脚所构成的凸多边形的面积，单脚支撑面和双脚支撑面如图 2-5 所示。

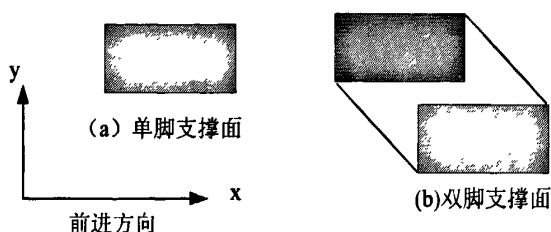


图 2-5 支撑面示意图

Fig2-5 The diagram of support surface

双足机器人动态步行的稳定性问题是步态规划的关键问题，借助理论力学工具，推导出稳定步行需满足的动力学条件。为了将 ZMP 的性质运用于动态步行的步态分析与设计中，首先得分析 ZMP 与步态轨迹之间的联系。机器人的行走方式可以划分为静态行走和动态行走两种方式。

静态行走是指在行走过程的任意瞬间，机器人都处于静平衡状态，即重心在地面的投影始终处于支撑面内。静态行走的速度较慢，各杆件运动的速度和加速度都很小。摆动腿着地时脚掌和地面的相对速度可看作近似为零，不发生碰撞，且行走过程中损失的能量很小，因而在连续行走中对其运动控制不考虑惯性力的影响。静态稳定性忽略机器人的动态性能，采用重心(COG)作为稳定性标准，所以这种稳定性只有在机器人运动非常缓慢时才适用。此时， $\ddot{Z}_i = \ddot{X}_i = \ddot{Y}_i = 0$ ，则 ZMP 点坐标变为：

$$X_{ZMP} = X_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, Y_{ZMP} = Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.10)$$

式(2.10)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, 只要使重心落在脚掌支撑面上就能保证双足步行机器人稳定的步行。

式(2.10)中: m_i ——各部分的质量; x_i, y_i, z_i ——各部分的质心, 本项目中为虚拟杆件 i 的质心。

动态行走与静态行走有很大的不同。动态行走的速度快, 机器人处于动平衡状态, 即动态行走不要求重心 COG 始终位于支撑面内, 而是要求零力矩点 ZMP 始终位于支撑面内。动态行走时, 机器人各杆件的运动速度和加速度都较大, 仅以质心是否在支撑面内不能决定系统的稳定性, 动态行走时 ZMP 坐标为:

$$\begin{aligned} X_{ZMP} &= -\frac{M_y}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i + \sum_{i=1}^n M_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ Y_{ZMP} &= -\frac{M_x}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_{i=1}^n M_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

在高速动态行走中, 由于惯性力的作用, 系统的质心和 ZMP 点不可能始终保持重合, 当质心 COG 落到支撑面之外, 即出现静不稳定期, 如果 ZMP 点仍处在支撑面内, 就可以保持系统的动态稳定性。在两足机器人的动态行走过程中, 即使重心满足静态稳定条件而 ZMP 在稳定区域之外, 整个双足机器人系统也是不稳定的, 在其运动控制中需要充分考虑惯性力的影响, 始终保持系统的动力学平衡关系。

由上述推导可知, 实现稳定的步态规划须满足以下条件:

1. 由于地面与支撑脚为单面约束, 即地面反力

$$F_{gz} = -F_z \geq 0 \Rightarrow \sum m_i (\ddot{z}_i + g) > 0 \quad (2.12)$$

以保证机器人在行走中不会腾空, 产生跑或者跳的动作。

2. 等效力与地面的交点 $P(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$, 始终位于支撑域内, 即

$$\begin{cases} -l_{ab} \leq x_{zmp} \leq l_{af} \\ -w_r \leq y_{zmp} \leq w_l \end{cases} \quad (2.13)$$

以保证机器人在步行中不会绕 x 轴倾覆, 式中 l_{ab} 为后脚掌的长度, l_{af} 为前脚掌的长度, w_r 为脚掌内侧的宽度, w_l 为脚掌外侧的宽度。

从节能的角度考虑,静态步行的驱动力矩主要克服重力矩,而动态步行可以有效地利用重力和惯性力进行重心的移动。毫无疑问,动态步行的驱动力矩比静态步行的驱动力矩要小,而且可以实现高速行走。

要保证双足机器人的动态步行稳定,必须保证零力矩在行走过程中始终落在支撑区域内。ZMP 越靠近支撑域的中心,机器人的动态稳定性越好,当 ZMP 与支撑域中心重合,机器人步行稳定裕度最大,抗颠覆能力最强,ZMP 位置可以通过控制关节力矩的方法进行间接控制^[40]。

2.4 本章小结

本章首先分析双足机器人的构造特点,建立双足机器人七连杆模型。接着介绍了常用双足机器人稳定性判据的类型,阐述了零力矩点的定义及推导过程,并分别就机器人静态步行和动态步行展开分析,得出两种不同运动情况下各自的步行稳定判断条件,随后研究了双足机器人稳定步行的条件,为后面章节的步态规划和步态优化及实验奠定基础。

第三章 双足机器人步态规划

3.1 引言

双足机器人的步态规划，是指机器人行走过程中其各组成部分运动轨迹的规划。步态是指机器人步行运动过程中，机器人各关节运动在时序和空间上的一种协调关系，通常由各关节运动的一组轨迹函数来描述。

双足机器人步行运动过程可以分为三个阶段：起步、周期步行和停步。这三个阶段各不相同，但有着紧密的联系，起步之后紧接着就是周期步行，周期步行之后是停步，周期步行的轨迹具有周期重复性。

3.2 双足机器人步行过程分析

双足机器人的步态规划就是规划机器人的行走步态，水平地面的基本行走步态有前向步行、侧向步行和转向步行。转向步行包含了前向步行和侧向步行，是最复杂的步行。本文主要以前向周期步行作为步态规划的重点，将前向步态分解如图 3-1 所示，图中以左腿首先作为支撑腿，右腿作为摆动腿为例分解，若右腿首先作为支撑腿，左腿作为摆动腿只需将图中左右调换即可。

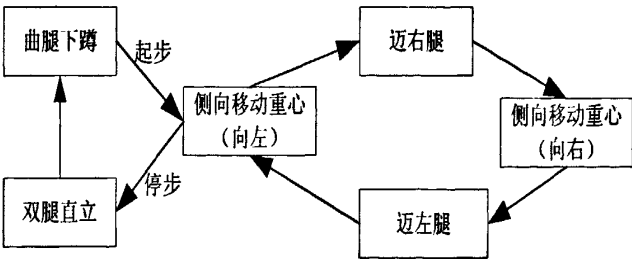


图 3-1 前向步态分解图

Fig3-1 The diagram of radial gait

在双足机器人整个步行过程中，假设身躯始终保持直立，所以左、右髋关节在 z 轴上的位置函数是相同的。人在平地上向前行走是双脚支撑期和单脚支撑周期性交替出现不断前进的过程。每一步可分为双脚支撑期和单脚支撑期，双脚支

撑期指从前脚跟接触地面到后脚尖离开地面的时间段，即图 3-2 中 OA、CD 阶段，双脚都跟地面接触。单脚支撑期指从一只脚离开地面到它再次跟地面接触的时间段，在这段时间里，只有一只脚与地面接触即图 3-2 中 AC 时段。

双足机器人的前向运动过程可分为：OA 双脚支撑（左脚在前，右脚在后）→AC 单脚支撑（左脚支撑，右脚摆动）→CD 双脚支撑（右脚在前，左脚在后）→DF 单脚支撑（右脚支撑，左脚摆动）→OA 双脚支撑（左脚在前，右脚在后）→... 从第 F 状态起，就是不断重复 OF 的过程，而 OC 的过程，与 CF 的过程相比，只是左右状态互换，因此只要把 OC 时段的步态确定了，机器人整个步行运动周期的步态就可以完全确定。

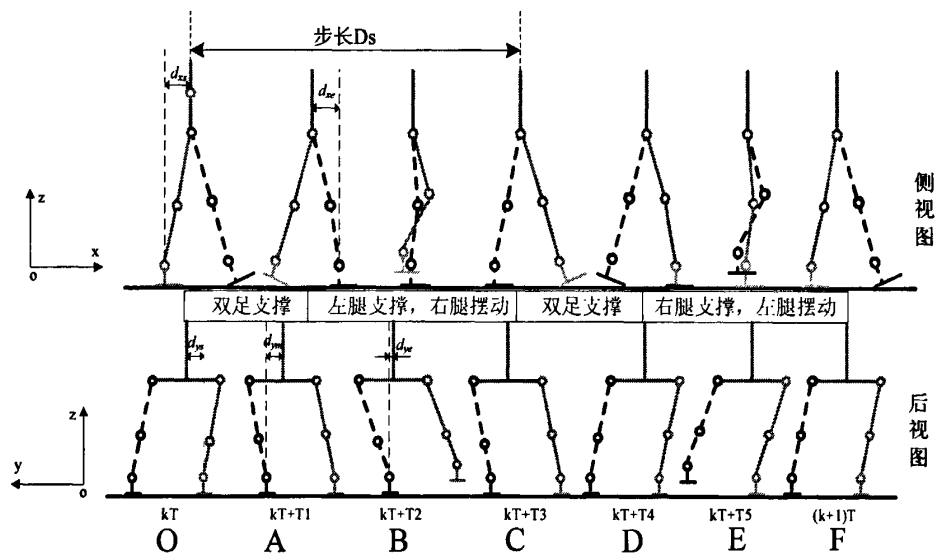


图 3-2 双足机器人步行过程示意图

Fig 3-2 The diagram of walking robot's process

单个步行周期中，其重心运动情况分为八个阶段：重心左移(先左腿支撑)、右腿抬起、右腿放下、重心移到双腿中间、重心右移、左腿抬起、左腿放下、重心移到双腿间。双足机器人的侧向运动过程如图 3-2 后视图所示。

3.3 三次样条插值算法

插值是指构造通过指定的一系列点的函数的方法,可以证明通过 N 个不同点的不高于 $N-1$ 次的函数有且只有一个^[4]。为了获得好的近似效果,插值节点的距离应当较小,故节点数量较多,如果在整个插值区间采用一个插值多项式,则插值多项式的次数一般很高,称之为高次多项式插值。但高次多项式插值容易产生震荡现象,因此采用一阶、二阶导数连续的三次样条插值函数来拟合数据。

一般的插值方法具有一致的收敛性,但是它只保证插值函数的整体连续性,在各小段的连接处虽然左右导数都存在,但不一定相等,因而在连接处不光滑。早期的工程技术人员在绘制经过给定点的曲线时使用一种有弹性的细长木条(或金属条),称之为样条。强迫它弯曲通过已知点,弹性力学指出样条的挠度曲线具有二阶连续的导函数,且在相邻给定点之间为三次多项式,即为数学上的三次样条插值曲线。

为了使规划出的轨迹平滑,在保持位移和速度连续性的同时,还要保证加速度的连续性,本文选用三次样条插值方法进行步态轨迹规划,通过选取双足机器人行走过程中的关键点,并确定其在这些关键点的位移、速度、加速度等状态参数,在各关键点中间未知的时间段内,用三次样条插值方法规划出机器人整个时间段内状态参数,从而得出规划轨迹。

通过对双足机器人步行过程分析得知,只需对机器人一个步态周期中 OD 段(如图 3-2)进行插值处理,其他时间段即是对此时段的重复运动,选取插值函数:

$$S(t) = M_i \frac{(t_{i+1}-t)^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(t-t_i)^3}{6h_i} + [f(t_i) - \frac{M_i h_i^2}{6}] \frac{t_{i+1}-t}{h_i} + [f(t_{i+1}) - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6}] \frac{t-t_i}{h_i}$$

$$\text{其中: } h_i = t_{i+1} - t_i \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

上式保证 $S(t)$ 在 t_i, t_{i+1} 两点连续,再保证 $s'(t)$ 在内点 t_i 外连续,经推导可得到 $n-1$ 个方程,即三弯矩方程:

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = d_i, (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}, \mu_i = \frac{h_i}{h_{i-1} + h_i} \\ \text{式(3.2)中: } d_i &= \frac{6}{h_i + h_{i-1}} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}} \right) \end{aligned}$$

其中有 $n-1$ 个方程, 要确定 $n+1$ 个未知量, M_0, M_1, \dots, M_n 需增加两个边界条件, 补充不同边界条件即可得到不同的三次样条插值函数。

第一类边界条件: $S'(x_0) = f'_0 = m_0, S'(x_n) = f'_n = m_n$, 可得:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & & & & \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & & & \\ & \lambda_2 & 2 & \mu_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \lambda_{n-1} & 2 & \mu_{n-1} \\ & & & & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} \frac{f[x_1, x_2] - m_0}{h_1} \\ \frac{f[x_0, x_1, x_2]}{h_2} \\ \frac{f[x_1, x_2, x_3]}{h_3} \\ \vdots \\ \frac{f[x_{n-2}, x_{n-1}, x_n]}{h_{n-1}} \\ \frac{m_n - f[x_{n-1}, x_n]}{h_n} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

第三类边界条件: $S'(x_0+0) = S'(x_n-0), M_0 = S''(x_0+0) = S''(x_n-0) = M_n$, 得:

$$\begin{pmatrix} 1 & & & & & -1 \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & & & \\ & \lambda_2 & 2 & \mu_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \lambda_{n-1} & 2 & \mu_{n-1} \\ & \mu_n & & & \lambda_n & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{f[x_0, x_1, x_2]}{h_1} \\ \frac{f[x_1, x_2, x_3]}{h_2} \\ \vdots \\ \frac{f[x_{n-2}, x_{n-1}, x_n]}{h_{n-1}} \\ \frac{f[x_{n-1}, x_n, x_0]}{h_n} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

式(3.3)(3.4)中, $\lambda_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}}, \mu_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}, (i = 0, 1, 2, \dots, n)$

由式(3.3)方程组即可解出 $\{M_i\}$, 代入式(3.1)即可得到第一类三次样条插值函数。由式(3.4)方程组即可解出 $\{M_i\}$, 代入式(3.1)即可得到周期三次样条插值函数。方程组(3.3)、(3.4)系数矩阵都是严格对角占优矩阵, 因此(3.3)、(3.4)有唯一解 $\{M_i\}$ 。

3.4 径向轨迹规划

假设各关节径向运动和侧向运动相互独立, 故可分别规划机器人在径向、侧向平面的运动轨迹。单个步态周期为左、右脚各迈出一大步, 整个规划周期为 T , 步长 D_s , 各典型时刻各关节位置参数如表 3-1 所示。

表 3-1 径向平面各关节典型时刻参数表

Table3-1 the joint parameters of typical time in radial plane

	t0	t1	t2	t3	t4
	0	0.1*T	0.3*T	0.5*T	0.6*T
q(t)/rad	0	pi/20	0	pi/20	0
Xankle(t)/m	0. 04	0.04	0.14	0.24	0.14
Zankle(t)/m	0.02	0.385	0.05	0.026	0.02
Xhip(t)/m	0.10	0.122	——	0.20	——
Zhip(t)/m	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29

3.4.1 脚掌倾角规划

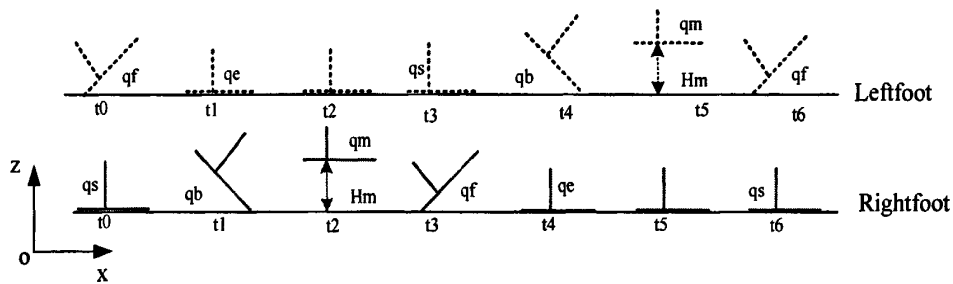


图 3-3 步态周期内脚掌运动示意图

Fig3-3 The diagram of foot movement in gait cycle

以左脚支撑，右脚前迈开始分析，选取脚掌与地面夹角为样条插值函数： $q(t) = s(t)$ ，设脚掌与地面的夹角为 $q(t)$ ，如图 3-3 所示，脚掌离开地面前，脚掌绕脚尖做初速度为零的变加速转动， t_0 时刻脚掌开始转动，脚掌与地面夹角 q_s ； t_1 时刻脚尖离开地面成为摆动角，脚掌与地面夹角 q_b ； t_2 时刻，踝关节达到最大高度 H_m ，离开地面后，脚掌绕踝关节转动； t_3 时刻脚跟着地，脚掌绕脚跟做末速度为零的变减速运动，脚掌与地面夹角为 q_f ； t_4 时刻，脚掌完全与地面接触，脚掌与地面夹角为 q_e 。在 $t_3 \sim t_4$ 时刻，摆动腿脚跟着地后，同时另一条腿脚跟绕脚尖开始转动，此时段双足支撑。图 3-2 中， $t_0 \sim t_6$ 时刻为一步态周期内，左、右脚掌各典型时刻状态，左脚在 $t_3 \sim t_6$ 及 t_1 时段即为右脚 $t_0 \sim t_4$ 时段的状态重复， t_6 时刻即为一个步态周期结束，双脚状态回到下一周期 t_0 时刻，开始新的步态周期，

即 t_0 与 t_6 时刻在脚掌姿态上是等效的。以此类推，双脚相互交替，周期性步行运动。

分析了一只脚掌的 $t_0 \sim t_4$ 状态，另外一只脚掌状态即在 t_4 时刻后相互交换，重复对方前一段时间的状态，故只许对在时间区间 $[t_0, t_4]$ 上进行插值规划，根据脚掌运动各状态特点分析，选取第一类边界条件：

$$q'(t_0) = m_0 = 0, q'(t_n) = m_n = 0$$

作为三次样条插值函数边界条件，即认为脚掌在 t_0 、 t_4 时刻速度均为0。

由式(3.3)得到如下方程：

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & 2 & \mu_0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 & 2 & \mu_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} \frac{f[t_0, t_1] - m_0}{h_0} \\ \frac{f[t_0, t_1, t_2]}{h_0 + h_1} \\ \frac{f[t_1, t_2, t_3]}{h_1 + h_2} \\ \frac{f[t_2, t_3, t_4]}{h_2 + h_3} \\ \frac{m_n - f[t_3, t_4]}{h_3} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

代入表 3-1 中各典型时刻状态参数，由此方程可求解出 $[M_0; M_1; M_2; M_3; M_4]$ ，且 M_i 值唯一，则插值函数即可得出：

$$q(t) = M_i \frac{(t_{i+1} - t)^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(t - t_{i+1})^3}{6h_i} + [q(t_i) - \frac{M_i h_i^2}{6}] \frac{t_{i+1} - t}{h_i} + [q(t_i) - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6}] \frac{t - t_i}{h_i} \quad (3.6)$$

其中： $h_i = t_{i+1} - t_i$ ($i = 0, 1, 2, 4$)。

经过三次样条插值处理，规划得出脚掌与地面夹角轨迹曲线如图 3.4 所示。

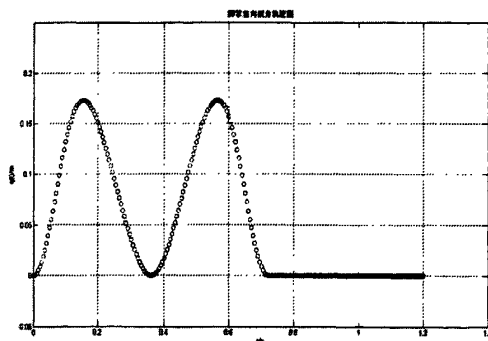


图 3-4 脚掌 $q(t)$ 规划曲线图

Fig3-4 The diagram of feet $q(t)$ planning curve

3.4.2 踝关节规划

本文研究前向平面下肢各关节的运动情况,假定踝关节在侧向平面内不作左右摆动,在 y 方向上的坐标保持不变。规定左踝关节在 y 方向上的坐标为 $w_{rl}/2$, 右踝关节的坐标为 $-w_{rl}/2$, 其中, w_{rl} 为左右髋关节距离。

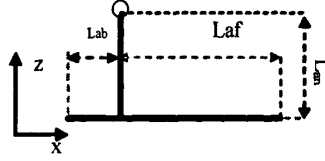


图 3-5 脚掌及踝关节侧视图

Fig3-5 the side view of foot and ankle

脚掌及踝关节侧视图如图 3-5 所示, 图中 L_{an} 表示踝关节到脚底的距离, L_{ab} 表示踝关节在脚底面的投影到脚跟的距离, L_{af} 表示踝关节在脚底面的投影到脚尖的距离。在脚与地面接触的期间内, 根据脚跟或脚尖的位置和脚掌与地面的夹角, 即可求出踝关节的位置。

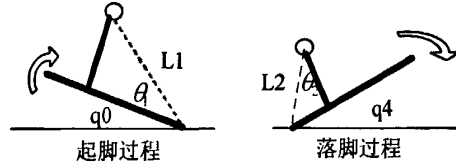


图 3-6 起脚落脚示意图

Fig3-6 The diagram of kicker and settled

$t_0 \sim t_1$ 时间段, 如图 3-6 起脚过程中, 脚掌绕脚尖转动时, 脚掌与地面的夹角为 $q_0(t)$, 踝关节在 x 方向和 z 方向的坐标分别为:

$$\begin{cases} x_{0ankle}(t) = x_{foot} - L_1 \cos[\theta_1 + q_0(t)] \\ z_{0ankle}(t) = L_1 \sin[\theta_1 + q_0(t)] \end{cases} \quad (3.7)$$

其中, x_{foot} 为脚尖在 x 方向上的坐标, L_1 为踝关节到脚尖的距离, θ_1 为踝关节与脚尖连线与脚掌的夹角。

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{L_{an}^2 + L_{af}^2} \\ \theta_1 = \arctan \frac{L_{an}}{L_{af}} \end{cases} \quad (3.8)$$

$t_3 \sim t_4$ 时间段, 如图 3-4 落脚过程中, 脚掌绕脚跟转动时, 脚掌与地面的夹角为 $q_3(t)$, 则踝关节在 x 方向和 z 方向的坐标分别为:

$$\begin{cases} x_{3ankle}(t) = x_{footb} + L_2 \cos[\theta_2 + q_3(t)] \\ z_{3ankle}(t) = L_2 \sin[\theta_2 + q_3(t)] \end{cases} \quad (3.9)$$

其中, x_{footb} 为脚跟 在 x 方向上的坐标, L_2 为踝关节到脚跟的距离, θ_2 为踝关节与脚尖的连线跟脚底的夹角。

$$\begin{cases} L_2 = \sqrt{L_{an}^2 + L_{ab}^2} \\ \theta_2 = \arctan \frac{L_{an}}{L_{ab}} \end{cases} \quad (3.10)$$

在 $t_0 \sim t_1$, $t_3 \sim t_4$ 两时间区间, 踝关节的位置与脚掌与地面转角密切相关, 通过以上计算可直接得出踝关节的轨迹; 在 $t_1 \sim t_3$ 时间区间, 选取踝关节的 x, z 坐标样条插值函数, 利用已经求得的 M 值得出插值函数为:

$$\begin{aligned} X_{ankle}(t) &= M_i \frac{(t_{i+1}-t)^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(t-t_{i+1})^3}{6h_i} + [X_{ankle}(t_i) - \frac{M_i h_i^2}{6}] \frac{t_{i+1}-t}{h_i} + [X_{ankle}(t_i) - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6}] \frac{t-t_i}{h_i} \\ Z_{ankle}(t) &= M_i \frac{(t_{i+1}-t)^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(t-t_{i+1})^3}{6h_i} + [Z_{ankle}(t_i) - \frac{M_i h_i^2}{6}] \frac{t_{i+1}-t}{h_i} + [Z_{ankle}(t_i) - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6}] \frac{t-t_i}{h_i} \end{aligned}$$

$$\text{其中: } h_i = t_{i+1} - t_i \quad (i=1, 2) \quad (3.11)$$

经过三次样条插值处理得到踝关节轨迹如图 3-7 所示。

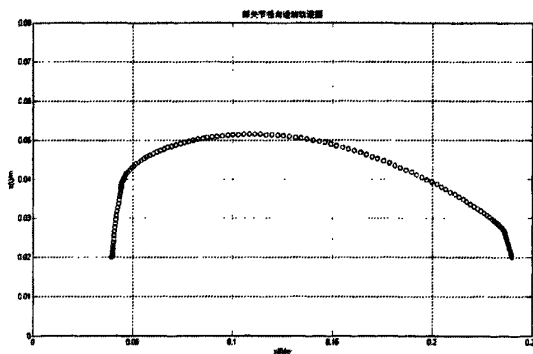


图 3-7 踝关节径向平面运动轨迹图

Fig3-7 The diagram of ankle trajectory in radial plane

3.4.3 髋关节规划

本文假定髋关节在步行过程中高度 z_{hip} 不变, 实验中考虑到周期步行过程中, 机器人有下蹲动作, 故在考虑髋关节高度是减除了下蹲下降的高度约 0.03m, 故设定 $z_{hip}=0.29$ 保持不变, 且假设髋部不绕 z 轴旋转即整个步行过程中左右髋关节在 xoz 平面重合。

髋关节的位置对 ZMP 的影响很大, 对机器人能否保持稳定步行起到至关重要的作用。初次规划的轨迹不一定能使机器人稳定, 所以在髋关节轨迹规划时设几个可调参数, 通过调节参数使机器人保持稳定。如图 3-8 所示, d_{xs} 表示摆动脚落地时髋关节到支撑腿踝关节的距离, d_{xe} 表示摆动脚抬起时髋关节到支撑腿踝关节的距离。通过调整这两个参数可以调节 ZMP 的落点, 具体分析见第四章。

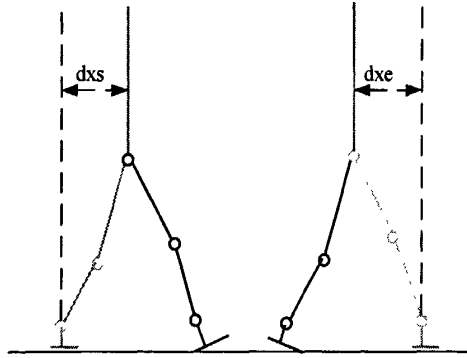


图 3-8 d_{xs} , d_{xe} 参数说明图

Fig3-8 The diagram of d_{xs} d_{xe} description

在 x 方向上, 规定髋关节的 t_0 、 t_1 、 t_3 时刻的坐标如表 4-1 所示, 设定:

$$x_{hip}(t) = \begin{cases} L_{ab} + d_{xs}, & t = T0 \\ L_{ab} + D_s - d_{xe}, & t = T1 \\ L_{ab} + D_s + d_{xs}, & t = T2 \end{cases}$$

由周期三次样条插值函数即得三弯矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Mhip_0 \\ Mhip_1 \\ Mhip_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\text{式(3.12)中, } \lambda_1 = \frac{h_0}{h_0 + h_1}, \mu_1 = \frac{h_1}{h_0 + h_1}; h_0 = t_1 - t_0, h_1 = t_3 - t_1$$

$$d_0 = 0$$

$$d_1 = 6f[x_0, x_1, x_2]$$

$$d_2 = 6f[x_1, x_2, x_0]$$

由此方程可求出矩阵 $[Mhip_0; Mhip_1; Mhip_2]$, 且 $Mhip_i$ 值唯一, 从而得到周期样条插值函数:

$$\begin{aligned} Xhip_0(t) &= Mhip_0 \frac{(t_1 - t)^3}{6h_0} + Mhip_1 \frac{(t - t_0)^3}{6h_0} + [Xhip(t_0) - \frac{Mhip_0 h_0^2}{6}] \frac{t_1 - t}{h_0} + [Xhip(1) - \frac{Mhip_1 h_0^2}{6}] \frac{t - t_0}{h_0} \\ Xhip_1(t) &= Mhip_1 \frac{(t_3 - t)^3}{6h_1} + Mhip_2 \frac{(t - t_1)^3}{6h_1} + [Xhip(t_1) - \frac{Mhip_1 h_1^2}{6}] \frac{t_3 - t}{h_1} + [Xhip(2) - \frac{Mhip_2 h_1^2}{6}] \frac{t - t_1}{h_1} \end{aligned} \quad (3.13)$$

利用以上周期插值函数对髋关节 x 坐标进行插值处理, 对髋关节 x 方向的运动进行规划, 结合步态周期关节位姿的重复性, 即可得到髋关节在整个步态周期每一时刻的坐标, 得出髋关节的运动轨迹如图 3-9 所示。

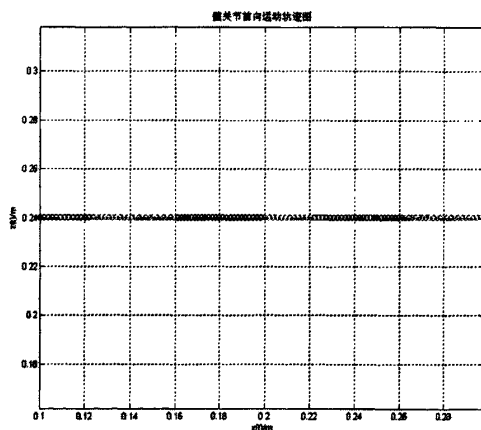


图 3-9 髋关节规划轨迹图

Fig 3-9 The diagram of planning hip trajectory

3.4.4 膝关节规划

Nao 机器人大腿长度为 $L_{th}=0.14\text{m}$, 小腿长度为 $L_{sh}=0.11\text{m}$, 根据髋关节和踝关节的位置, 可求出膝关节的位置。下面分两种情况讨论:

(1) 髋关节、膝关节、踝关节构成的平面垂直于 xoy 平面。如图 3-10, P_1, P_2, P_3 分别表示髋关节、踝关节、膝关节, 则 $|P_1P_3| = L_{th}$, $|P_2P_3| = L_{sh}$, 设 P_1, P_2, P_3 的坐标分别为 $(x_{hip}, z_{hip}), (x_{ankle}, z_{ankle}), (x_{knee}, z_{knee})$ 。若已知髋关节和踝关节的坐标, 则可由余弦定理求出膝关节的坐标。

如图 3-10a), 在直角 $\Delta P_1P_2P_3$ 中, $\angle P_4P_1P_2 = \arctan \frac{|P_2P_4|}{|P_1P_4|} = \arctan \frac{x_{ankle} - x_{hip}}{z_{hip} - z_{ankle}}$

在 $\Delta P_1P_2P_3$ 中, 由余弦定理得

$$\begin{aligned} \angle P_2P_1P_3 &= \arccos \frac{|P_1P_3|^2 + |P_1P_2|^2 - |P_2P_3|^2}{2 \cdot |P_1P_3| \cdot |P_1P_2|} \\ &= \arccos \frac{(x_{ankle} - x_{hip})^2 + (z_{hip} - z_{ankle})^2 + L_{th}^2 - L_{sh}^2}{2 \cdot L_{th} \cdot \sqrt{(x_{ankle} - x_{hip})^2 + (z_{hip} - z_{ankle})^2}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

由 $\angle P_2P_1P_3$ 和 $\angle P_3P_1P_4$ 可求出膝关节的坐标 (x_{knee}, z_{knee}) :

$$\begin{cases} x_{knee} = x_{hip} + L_{th} \sin(\angle P_3P_1P_4) = x_{hip} + L_{th} \sin(\angle P_2P_1P_4 + \angle P_2P_1P_3) \\ z_{knee} = z_{hip} - L_{th} \cos(\angle P_3P_1P_4) = z_{hip} - L_{th} \cos(\angle P_4P_1P_2 + \angle P_2P_1P_3) \end{cases} \quad (3.15)$$

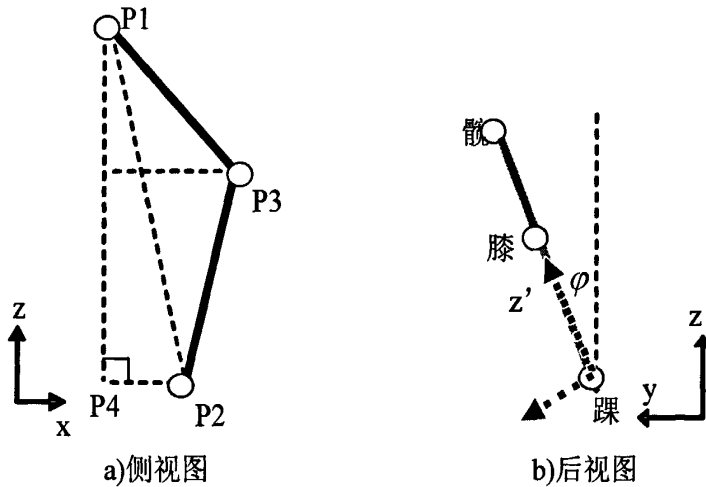


图 3-10 双足机器人下肢侧视、后视图

Fig3-10 The side view and back view of biped robot's leg

(2) 髋关节、膝关节、踝关节构成的平面不垂直于 xoy 平面。图 3-10b) 是从机器人背面观察图, 设髋关节、膝关节、踝关节构成的平面为 S , S 与 xoz 平面的夹角为 φ 。建立直角坐标系 $o'x'y'z'$, 令原点 o' 与踝关节重合, x' 轴平行于 x 轴, z' 轴平行于 S 平面。按照此方法建立了直角坐标系, S 平面与 $x'o'y'$ 平面垂直。将各关节在 $oxyz$ 坐标系下的坐标转化为 $o'x'y'z'$ 坐标系下的坐标, 采用情况 (1) 中的

方法计算出膝关节的坐标，最后将求得的坐标转化为 $oxyz$ 坐标系下的坐标，此坐标即为期望的结果。

对 S 平面上的点，从坐标系 $oxyz$ 到坐标系 $o'x'y'z'$ 的坐标变换如下（对 S 平面外的点不成立）：

$$\begin{cases} x' = x - x_{ankle} \\ y' = 0 \\ z' = (z - z_{ankle}) / \cos \varphi \end{cases} \quad (3.16)$$

对 S 平面上的点，从坐标系 $o'x'y'z'$ 到坐标系 $oxyz$ 的坐标变换如下（对 S 平面外的点不成立）：

$$\begin{cases} x = x' + x_{ankle} \\ y = z' \sin \varphi + y_{ankle} \\ z = z' \cos \varphi + z_{ankle} \end{cases} \quad (3.17)$$

根据以上几何关系分析，得出膝关节的运动轨迹如图 3-11 所示。

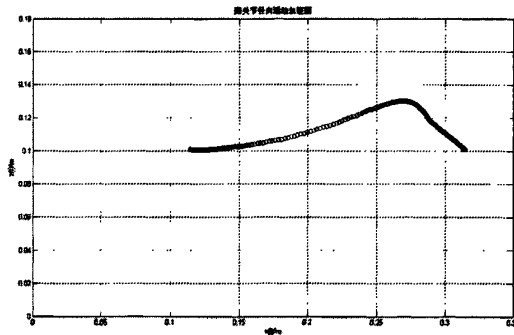


图 3-11 膝关节 $x(t), z(t)$ 轨迹图

Fig3-11 The trajectory of knee $x(t)$ and $z(t)$

3.5 侧向轨迹规划

在侧向运动求解时，假设机器人各关节径向运动和侧向运动相互独立，仅通过侧向关节的运动使机器人 ZMP 在两脚中心线附近左右摆动，以确保 ZMP 处在支撑面内，实现机器人稳定行走。

表 3-2 径向平面各关节典型时刻参数表

Table3-2 the joint parameters of typical time in lateral plane

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6
t	0.0	0.1*T	0.3*T	0.5*T	0.6*T	0.8*T	1.0*T
Yankle(t)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Yhip(t)	-0.011	0.019	0.041	0.011	-0.019	-0.041	-0.011
Yknee(t)	——	——	——	——	——	——	——

3.5.1 踝关节规划

本文步态规划中，假定踝关节在侧向平面无左右摆动，其左、右踝关节 y 坐标分别保持 $w_H/2$ ， $-w_H/2$ 不变，故踝关节在侧向平面运动轨迹为一直线。

3.5.2 髋关节规划

单个步行运动周期内，因为两髋关节之间距离固定，且假设两髋关节不发生绕 z 轴的旋转运动，故只需规划两髋关节中心运动轨迹，就能得到髋关节的运动轨迹。

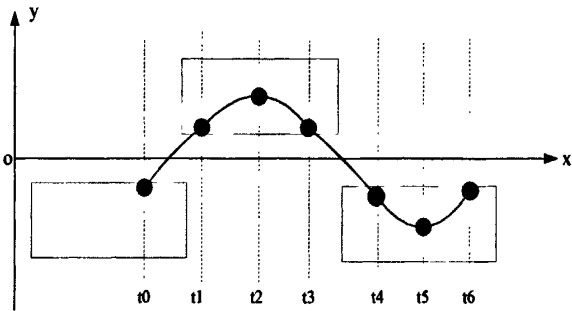


图 3-12 髋关节中心点投影位置图

Fig3-12 The projection location of hip center

髋关节中心在 $t_0 \sim t_6$ 时间段内，以右脚为摆动脚为例分析各时刻位置，如图 3-12 所示为单个步行周期髋关节中心在 xoy 平面的投影运动轨迹，其中矩形框表示支撑脚掌，黑点表示各关键时刻髋关节中心的投影位置。 t_0 时刻髋关节中点投影在右脚的边缘内侧； t_1 时刻髋关节中点投影在左脚的边缘内侧； t_2 时刻髋关节

中点投影在左脚的中心； t_3 时刻髋关节中心投影在左脚的边缘内侧； t_4 时刻髋关节中心投影在右脚边缘内侧； t_5 时刻髋关节中心投影在右脚中心； t_6 时刻髋关节中心投影在右脚边缘内侧,各关键时刻髋关节中心侧向移动幅度见图 3-13 中 d_{ys}, d_{ym}, d_{ye} 。

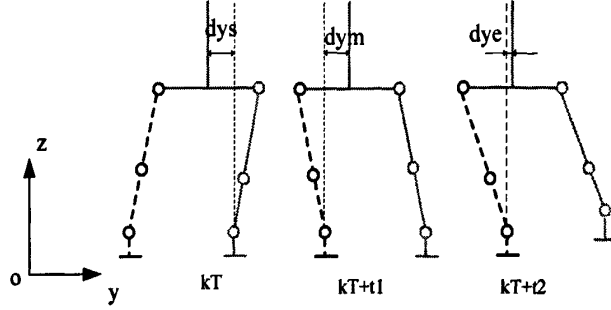


图 3-13 髋关节侧向平面运动示意图

Fig3-13 The diagram of hip motion in lateral plane

根据以上分析可知髋关节中心在各关键时刻的 y 坐标在如式 (3.18) 所示,

$$y_{hip}(t) = \begin{cases} -W_{hip}/2 + d_{ys}, & t = t_0 \\ W_{hip}/2 - d_{ym}, & t = t_1 \\ W_{hip}/2 - d_{ye}, & t = t_2 \\ W_{hip}/2 - d_{ys}, & t = t_3 \\ -W_{hip}/2 + d_{ym}, & t = t_4 \\ -W_{hip}/2 + d_{ye}, & t = t_5 \\ -W_{hip}/2 + d_{ys}, & t = t_6 \end{cases} \quad (3.18)$$

式中, W_{hip} 为两髋关节之间的距离; d_{ys} 为摆动脚落地时髋关节中心的 y 坐标; d_{ym} 为摆动脚离地时髋关节中心的 y 坐标; d_{ye} 为摆动脚抬到最高点时髋关节中心的 y 坐标, 通过调整这三个参数可以调节 ZMP 的侧向位置。由周期性条件得始末速度相等, 即: $\dot{y}_{hip}(T_0) = \dot{y}_{hip}(T_6)$ 。得到周期三次样条插值点的基本参数如表 3-2 中 $Y_{hip}(t)$ 值。根据髋关节各关键时刻的位置和满足的周期性条件, 通过三次周期样条插值方法规划得到其侧向步态: $y_{hip}(t) = f(d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}, t)$ 。

根据三次样条插值函数第三类边界条件, 构造周期样条插值函数:

$$S'(x_0 + 0) = S'(x_n - 0), M_0 = S''(x_0 + 0) = S''(x_n - 0) = M_n$$

得: $\lambda_n M_1 + \mu_n M_{n-1} + 2M_n = d_n$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \lambda_1 & 2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 2 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 2 & \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 2 & \mu_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_5 & 2 & \mu_5 \\ 0 & \mu_6 & 0 & 0 & 0 & \lambda_6 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} My_0 \\ My_1 \\ My_2 \\ My_3 \\ My_4 \\ My_5 \\ My_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dy0 \\ dy1 \\ dy2 \\ dy3 \\ dy4 \\ dy5 \\ dy6 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

式 (3.19) 中:

$$\lambda_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}, \mu_i = \frac{h_i}{h_{i-1} + h_i}; (i = 1, 2, \dots, 6), \text{ 且 } \lambda_6 = \frac{h_5}{h_5 + h_0}, \mu_6 = \frac{h_0}{h_5 + h_0}$$

$$h_i = t_{i+1} - t_i, (i = 0, 1, \dots, 5)$$

由方程组 (3.19) 可求出矩阵 $[My_0; My_1; My_2; My_3; My_4; My_5; My_6]$, 从而可得到周期样条插值函数:

$$Yhip_i(t) = My_i \frac{(t_{i+1} - t)^3}{6h_i} + My_{i+1} \frac{(t - t_i)^3}{6h_i} + [Yhip(t_i) - \frac{My_i h_i^2}{6}] \frac{t_{i+1} - t}{h_i} + [Yhip(t_{i+1}) - \frac{My_{i+1} h_i^2}{6}] \frac{t - t_i}{h_i} \quad (i = 0, 1, \dots, 5) \quad (3.20)$$

规划得出髋关节中心在 xoy 平面投影轨迹如图 3-14a 所示。左、右髋关节的轨迹即可根据髋关节中心位置求得, 式 (3.20) 中, $yhipl$ 表示左髋关节 y 坐标, $yhipr$ 表示右髋关节 y 坐标。

$$\begin{aligned} yhipl &= yhip + w_h / 2 \\ yhipr &= yhip - w_h / 2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

即可得到左右髋关节的运动轨迹如图 3-14b 所示。

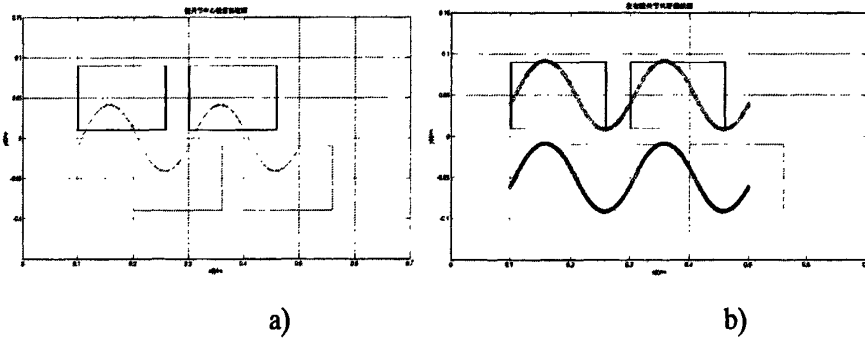


图 3-14 髋关节中心投影及左右髋关节轨迹图

Fig3-12 The diagram of hip central projection and hip trajectory

3.5.3 膝关节规划

侧向平面规划膝关节运动轨迹与径向平面类似, 根据髋关节和踝关节以及大腿、小腿的长度即可得到膝关节的位置, 但是得考虑髋关节、膝关节、踝关节构成的平面不垂直于 xoy 平面的情况, 参照径向膝关节规划第二种情况分析。

$$\psi = \arctan\left(\frac{y_{hip} - y_{ankle}}{z_{hip} - z_{ankle}}\right) \quad (3.22)$$

由式 (3.14), (3.15) 参照图 3-8,3-9 得如下公式:

$$\begin{cases} x'_{hip} = x_{hip} - x_{ankle} \\ z'_{hip} = (z_{hip} - z_{ankle}) / \cos \varphi \end{cases} \quad (3.23)$$

$$|P_1 P_2| = \sqrt{x'_{hip}{}^2 + z'_{hip}{}^2} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} \angle P_2 P_1 P_3 = \arccos \frac{|P_1 P_3|^2 + |P_1 P_2|^2 - |P_2 P_3|^2}{2 \cdot |P_1 P_3| \cdot |P_1 P_2|} \\ \angle P_4 P_1 P_2 = \arctan \frac{|P_2 P_4|}{|P_1 P_4|} = -\arctan \frac{x'_{hip}}{z'_{hip}} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} x'_{knee} = x'_{hip} + L_{th} \cdot \sin(\angle P_2 P_1 P_3 + \angle P_4 P_1 P_2) \\ z'_{knee} = z'_{hip} - L_{th} \cdot \cos(\angle P_2 P_1 P_3 + \angle P_4 P_1 P_2) \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\begin{cases} x_{knee} = x'_{knee} + x_{ankle} \\ y_{knee} = z' \sin \varphi + y_{ankle} \\ z = z' \cos \varphi + z_{ankle} \end{cases} \quad (3.27)$$

即可得出膝关节运动轨迹如图 3-15 所示:

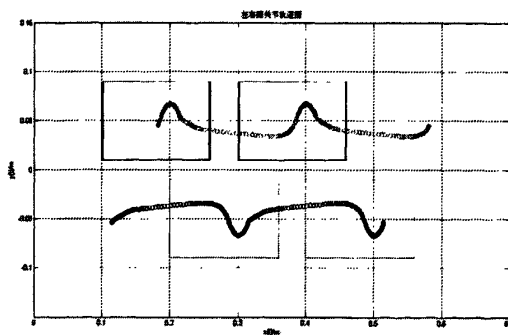


图 3-15 左右膝关节侧向轨迹图

Fig3-13 The lateral trajectory of knee

3.6 双足机器人 ZMP 轨迹

计算双足机器人 ZMP 时, 假设机器人各杆件质量均匀, 将各杆件质心归于杆件几何中心, 根据各关节已知坐标即可求出杆件质心的位置。试验中, 头部及双臂质量与躯干合并, 简化等效为质量为 2.118kg 的质心, 位置位于髋关节中心正上方 0.14m 处。躯干质心坐标即为:

$$\begin{aligned} x_{tor} &= x_{hip} \\ y_{tor} &= y_{hip} \\ z_{tor} &= z_{hip} + 0.14 \end{aligned} \quad (3.28)$$

大腿质心为髋关节与膝关节的中点坐标:

$$\begin{aligned} x_{thigh} &= (x_{hip} + x_{knee}) / 2 \\ y_{thigh} &= (y_{hip} + y_{knee}) / 2 \\ z_{thigh} &= (z_{hip} + z_{knee}) / 2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

小腿质心为膝关节与踝关节的中点坐标:

$$\begin{aligned} x_{shank} &= (x_{knee} + x_{ankle}) / 2 \\ y_{shank} &= (y_{knee} + y_{ankle}) / 2 \\ z_{shank} &= (z_{knee} + z_{ankle}) / 2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

脚掌质心即为踝关节在脚掌上的投影坐标:

$$\begin{aligned} x_{foot} &= x_{ankle} + L_{an} * \sin(q) \\ y_{foot} &= y_{ankle} \\ z_{foot} &= z_{ankle} - L_{an} * \cos(q) \end{aligned}$$

双足机器人 ZMP 引用式 (2.11) 即如下公式计算:

$$\begin{cases} X_{ZMP} = -\frac{M_y}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i Z_i + \sum_{i=1}^n M_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ Y_{ZMP} = -\frac{M_x}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i Z_i + \sum_{i=1}^n M_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{cases} \quad (3.31)$$

式(3.31)中: g 为重力加速度, $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 利用二阶三点数值微分公式计算见式 (3.32);

$$\begin{cases} f''(t_0) = \frac{1}{h^2}(x_0 - 2x_1 + x_2) - hf'''(\xi_1) + \frac{h^2}{6}f^{(4)}(\xi_2) \\ f''(t_1) = \frac{1}{h^2}(x_0 - 2x_1 + x_2) - \frac{h^2}{12}f^{(4)}(\xi_2) \\ f''(t_2) = \frac{1}{h^2}(x_0 - 2x_1 + x_2) + hf'''(\xi_1) + \frac{h^2}{6}f^{(4)}(\xi_2) \end{cases} \quad (3.32)$$

式(3.32)中, ξ_1, ξ_2 为无穷小值, 且 h 为采样周期, 根据插值处理得到各采样点数据, 即可根据 ZMP 计算公式得到双足机器人的实时 ZMP 轨迹, 如图 3-16 所示。

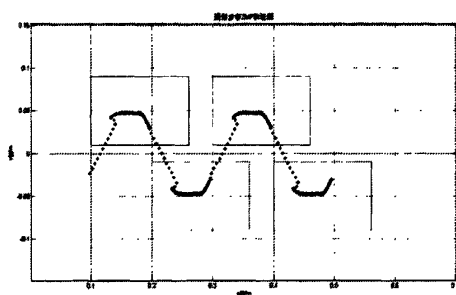


图 3-16 规划步态 ZMP 轨迹曲线图

Fig3-16 ZMP trajectory curve of planning gait

3.7 仿真实验及结果分析

3.7.1 仿真实验

仿真实验中以 Nao 机器人为对象进行, 其基本配置物理参数见表 3-3, 在 MATLAB 环境中, 将三次样条插值步态规划方法通过编码实现, 得出机器人下肢各个关节的运动轨迹和规划步态的 ZMP 轨迹见 3.4, 3.5 节相应规划轨迹图, 并得出规划步态的步行效果图如图 3-17, 3-18, 3-19 所示。

设步态规划周期为左、右脚各迈出一步, 步态周期 $T=1.2s$, 步长 $Ds=0.10m$, $Hm=0.01m$, 重力加速度 $g=9.80m/s^2$, 插值间隔时间 $\Delta t = 0.01s$ 。

表 3-3 仿真实验基本参数表

Table3-3 the parameters of simulation

名 称	参 数	描 述	取 值
头	M_head	头部质量	0.401kg
躯干	Ltor	躯干质心高度	0.14m
	M_torso	躯干质量	1.217kg
上臂	Luparm	上臂长度	0.06m
	M_uparm	上臂质量	0.163kg
前臂	Llowarm	前臂长度	0.05m
	M_lowarm	前臂质量	0.087kg
髋部	Zhip	髋关节高度	0.24m
	Whip	两髋之间距离	0.10m
大腿	Lth	大腿高度	0.14m
	M_th	大腿质量	0.533kg
小腿	Lsh	小腿高度	0.11m
	M_sh	小腿质量	0.423kg
脚掌	flong	脚掌长度	0.16m
	fWidth	脚掌宽度	0.08m
	fHeight	脚掌高度	0.02m
	Hm	脚掌抬起最大高度	0.01m
	M_ft	脚掌质量	0.158kg
上体质心	M_tor	上体质心质量	2.118kg

说明：

1. 髋关节高度 $zhip=fHeight+Lth+Lsh-0.03$,减去的部分是机器人下蹲的高度大约值，假设机器人步行过程中髋关节高度恒定。
2. 头部及双臂质量与躯干合并，简化等效为质量为 2.118kg 的质心，位置和躯干位置重合。

3.7.2 规划步态效果图

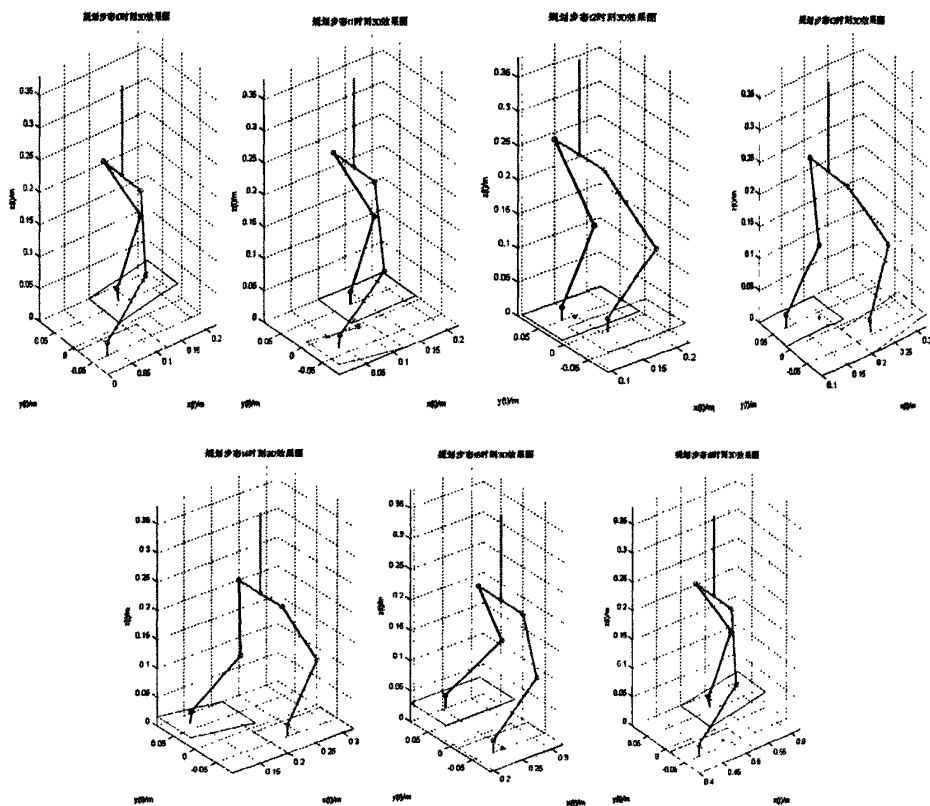


图 3-17 规划步态 t_0-t_6 时刻 3D 效果图

Fig3-17 The 3D rendering of planning gait at time t_0-t_6

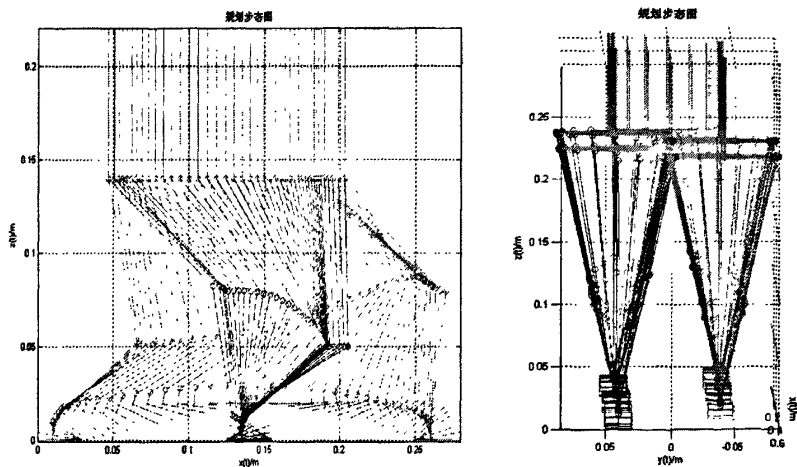


图 3-18 径向&侧向平面步态规划效果图

Fig3-18 The rendering of planning gait in radial and lateral

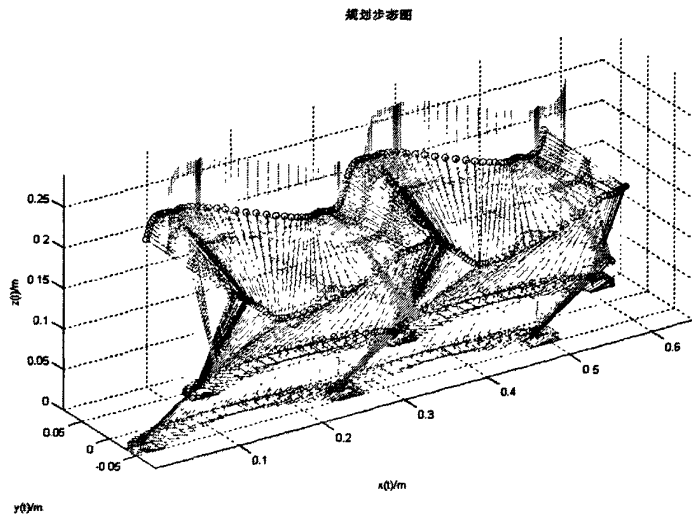


图 3-19 规划步态 3D 效果图

Fig3-19 The 3D rendering of planning gait

3.7.3 实验结果分析

由仿真实验可知，通过三次样条插值的轨迹连续平滑，单双脚支撑期过渡平滑，步态的 ZMP 轨迹都处于稳定区域内，满足双足机器人步行稳定性要求。通过观察规划步态的径向、侧向及 3D 效果图可知，机器人运动轨迹与期望步态轨迹相符，效果良好。实验表明，基于三次样条插值的步态规划方法能规划出稳定且平滑的步态。

3.8 本章小结

本章首先分析了双足机器人单个步行周期内的运动过程，介绍了三次样条插值算法。根据机器人各个关键时刻的状态给出三次样条插值点步态参数，并恰当地选择插值的边界条件。在径向平面和侧向平面，分别规划双足机器人的脚掌倾角、踝关节、膝关节、髋关节轨迹，并进行 MATLAB 仿真实验，得出了各关节的运动轨迹和三维效果图。最后，计算出双足机器人整个步态周期的 ZMP 轨迹，判断了规划步态的稳定性。

第四章 双足机器人步态优化

4.1 引言

步态优化是提高步行性能的一个重要途径，步态优化需要先分析步态参数（如步长、步态周期、双腿支撑期时间、髋关节位置等）对步行稳定性、速度、驱动力矩和能耗等的影响。机器人在步行时通过膝关节的弯曲使重心高度降低，需要较大的关节保持力矩，故从能量的角度看，保持重心尽可能高有利于减少能耗。然而，在脚底接触面积一定的情况下，重心越高越不利于机器人保持稳定。机器人摆动脚的抬的越高，越有利于提高机器人的越障能力，但从能量的角度看，摆动脚抬脚越高，所需的关节扭矩就越大。故摆动脚在地面滑行的步态最节省能量，但对地面的适应能力差。因此需要根据环境的不同，规划摆动脚抬起的高度。实际的步态规划，需要利用各种步态优化算法以ZMP稳定裕度最大、能耗最省或速度快为目标对步态参数进行优化，生成最终的理想步态。

4.2 髋关节轨迹对 ZMP 的影响分析

双足机器人的很大部分质量集中于上半身，故上半身的位置对ZMP的影响大，而髋关节是离上半身最近的可控自由度，故本文主要分析髋关节位置对ZMP的影响。建立机器人步行时脚掌的受力模型，如图4-1所示。

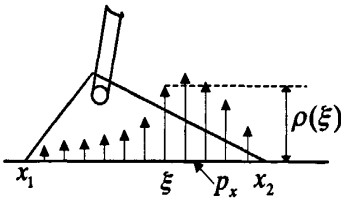


图 4-1 脚掌受地面作用力分布图

Fig4-1 The diagram of force distribution in feet by ground

根据文献[42]中对 ZMP 的定义，可得 x 方向的 ZMP 为：

$$p_x = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \xi \rho(\xi) d\xi}{\int_{x_1}^{x_2} \rho(\xi) d\xi} \quad (4.1)$$

式中 $\rho(\xi)$ 为足底每单位长度上地面作用力的铅垂分量, ξ 为 $\rho(\xi)$ 的 x 坐标, p_x 为地面作用力的压力中心, 即 ZMP, x_1 、 x_2 分别为支撑脚脚跟和脚尖在基坐标系中的位置。

第三章髋关节轨迹规划时, 设置了两个可调参数 d_{xs} 、 d_{xe} , 如图3-8所示, 用来调节髋关节在摆动腿离地和落地时刻髋关节中心的位置。当 d_{xs} 变小时, 髋关节向支撑脚后方移动, 致使支撑脚所受地面作用力分布向后端偏移, 由公式(4.1)可知 ZMP 将随之向脚跟移动。反之, 若 d_{xs} 变大, 则髋关节前移, 从而使支撑脚所受地面作用力分布前移, 导致 ZMP 也向脚尖移动, 使稳定裕度变小。同理, 当 d_{xe} 变小时, ZMP 前移; d_{xe} 变大时, ZMP 向后移。据此分析, 可以调节髋关节的位置使 ZMP 尽量位于支撑脚的中心, 保证较大的稳定裕度。

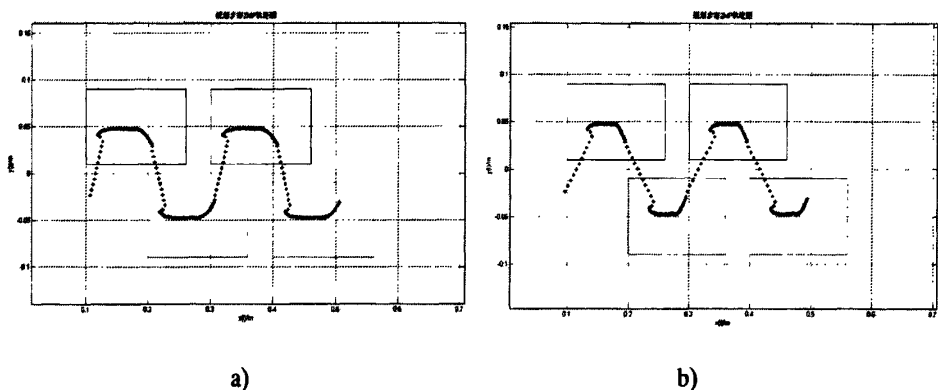


图 4-2 d_{xs}, d_{xe} 不同情况下 ZMP 轨迹图

Fig4-2 The diagram of ZMP trajectories in different situations

图4-2a)中髋关节位置 $d_{xs} = 0.60Ds, d_{xe} = 0.18Ds$; 图4-2b)中髋关节位置, $d_{xs} = 0.40Ds, d_{xe} = 0.28Ds$. 显然, 图b)中 ZMP 更靠近支撑脚的中心, 稳定裕度更大。根据以上分析可以较好优化步态参数, 进而调节 ZMP 的位置, 使步态有较大的稳定裕度。因此, 通过优化算法对这些参数进行优化, 期望得到稳定裕度大的平滑步态。

4.3 目标函数构造

对双足机器人而言，期望规划出稳定性最好的步态，必须有一个判断步态性能的目标函数。稳定裕度是机器人在运动过程中，ZMP 到有效稳定区域边缘的最短距离。当 ZMP 在支撑面内时，稳定裕度为正，双足机器人保持稳定，反之为负，是不稳定的。作为评价步态性能优劣的主要参数，稳定裕度越大，步态的稳定性越好，本文以步态的稳定裕度作为寻优目标的参数。

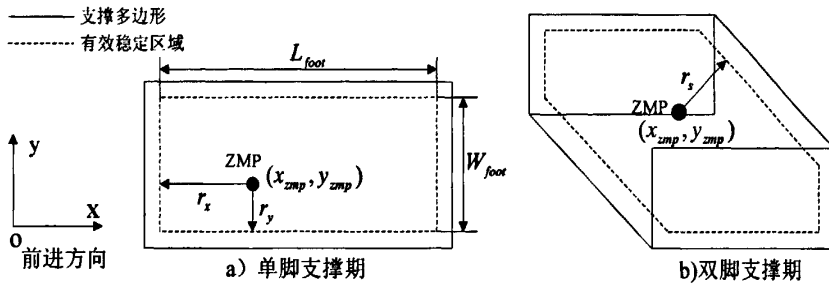


图 4-3 稳定域示意图

Fig4-3 The diagram of stable region

(1)单脚支撑期中任意 t 时刻，设 ZMP 在 xoy 平面坐标为 (x_{zmp}, y_{zmp}) ，ZMP 到有效稳定区域 x, y 方向边界的最小距离分别为 r_x, r_y ，如图 4-3a)虚线框，可构造出目标函数：

$$f(r_x, r_y) = \alpha r_x^2 + \beta r_y^2 \quad (4.2)$$

式(4.2)中， $f(r_x, r_y)$ 为 t 时刻稳定裕度， α, β 分别表示 r_x, r_y 对稳定裕度的影响权值。在单脚支撑情况下，由于侧向稳定区域小于径向稳定区域，因此，机器人步行时更容易侧翻，故侧向权值 β 比径向权值 α 小，可以取脚掌长、宽的比值作为 α 与 β 的比值，且 $\alpha + \beta = 1$ 。对同一组步态参数下，将一个步行周期内 n 个采样时刻的目标函数值求和，即可得到该组参数下，单脚支撑期步态轨迹的总目标函数值 J_s ：

$$J_s = \sum_{i=1}^n f(r_{x_i}, r_{y_i}) = \alpha \sum_{i=1}^n r_{x_i}^2 + \beta \sum_{i=1}^n r_{y_i}^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.3)$$

显然， J_s 值越大，机器人在单脚支撑期的稳定裕度越大，ZMP 越靠近有效稳定区域中心，双足机器人步行就越稳定。为了防止机器人发生绕支撑脚边缘的倾覆，ZMP 应该始终位于有效支撑域内，即：

$$\begin{cases} 0 \leq r_{x_i} < L_{foot} / 2 \\ 0 \leq r_{y_i} < W_{foot} / 2 \end{cases} \quad (4.4)$$

上式中 L_{foot} 、 W_{foot} 分别为脚掌有效支撑域的长和宽。

(2) 双脚支撑期任意 t 时刻, 设 ZMP 在 xoy 平面坐标为 (x_{zmp}, y_{zmp}) , 设 ZMP 到支撑多边形的最短距离为 r_s , 如图 4-3b) 所示, 则目标函数为:

$$J_d = \sum_{j=1}^m r_{s_j}^2 \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4.5)$$

为保证机器人步行稳定, 并且确保 ZMP 移动过程中不出现振荡, ZMP 必须落在有效稳定域之内, 且需满足约束条件: ZMP 从左脚到右脚切换时 $\dot{x}_{zmp} \geq 0, \dot{y}_{zmp} \leq 0$; ZMP 从右脚到左脚切换时 $\dot{x}_{zmp} \leq 0, \dot{y}_{zmp} \geq 0$ 。

综合单、双脚支撑期的目标函数, 可得到整个步行周期内总的目标函数为:

$$J = (J_s + J_d) \quad (4.6)$$

结合第三章髋关节轨迹规划时引入的可调参数, 可将单、双脚支撑期内各距离变量分别表示成关于髋关节位置参数的函数, 即:

$$\begin{cases} r_x = f_1(d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}) \\ r_y = f_2(d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}) \\ r_s = f_3(d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}) \end{cases} \quad (4.7)$$

所以目标函数 J 也是这些参数的函数, 可表示为:

$$J = f(d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}) \quad (4.8)$$

因此, 对参数优化获得具有最大稳定裕度的问题就转化为求目标函数的条件极值 J_{\max} 问题。显然, J 值越大, 对应步态的 ZMP 稳定裕度越大, 当取得最大的目标函数值 J_{\max} 时, 稳定裕度最大, 双足机器人最稳定。所有基本参数取得最优值, 从而得到最优的规划步态。

4.4 粒子群步态优化算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种基于群集智能的随机优化算法, 源于对鸟群捕食行为的模拟。PSO 算法的基本思想是通过群体中粒子间的合作与竞争而产生的群体智能进行优化搜索^[43-45]。相比于其它基于种群的进化算法如遗传算法, PSO 算法保留了基于种群的全局搜索策略, 采用了简单的速度—位置模型, 避免了复杂的遗传操作, 同时它的记忆功能使其可以动态地跟踪当前的搜索情况并调整搜索策略, 具有较快的收敛速度和较好的鲁棒性, 且

不需要借助问题的特征信息。

每个粒子代表空间的一个候选解,通过跟踪两个“极值”来实现在搜索空间寻找问题最优解的目的:一个是每个粒子当前已经搜索到的最优位置,称为个体极值;另一个是整个粒子群当前搜索到的最优位置,称为全局极值。PSO 算法的数学描述如下:假设在 D 维搜索空间中,有由 N 个粒子组成的一个粒子群 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 则第 i 个粒子位置向量表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 速度向量表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 粒子经历的最好位置(个体极值)记为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, 在群体中所有粒子经历的最好位置(全局极值)记为 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。粒子在每一次迭代找到上述两个极值后,对自己的速度和位置进行如下更新:

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)); \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (4.9)$$

$(i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, D)$

式(4.9)中: t 为当前进化代数; r_1, r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 、 c_2 为加速度因子; w 为惯性因子。为了使 PSO 算法在初期有较强的全局搜索能力,而在后期有较强的局部搜索能力, w 应该随着进化代数的增加而减少。由于采用常量的加速度因子对搜索能力的调整有限,而自适应的 c_1 、 c_2 可以加快收敛速度且不易陷入局部最优,故本文选取的自适应加速度因子满足下式:

$$\begin{aligned} c_{1ij}(t) &= 2/(1 + \exp(-\text{abs}(p_{ij}(t) - x_{ij}(t))/d_{\max})); \\ c_{2ij}(t) &= 2/(1 + \exp(-\text{abs}(p_{gj}(t) - x_{ij}(t))/d_{\max})); \\ w(t) &= w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})t/T \\ d_{\max} &= \max(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4.10)$$

式(4.10)中 $\text{abs}(\cdot)$ 表示求绝对值; d_{\max} 为当前所有粒子位置与全局最优位置距离的最大值。PSO 算法的寻优过程如下:

取粒子的位置为 $x_i = (d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye})$, 即粒子由髋关节位置组成,以式(4.6)目标函数 J 作为计算粒子适应度的函数,通过迭代进化寻找粒子的最优位置,即求得稳定裕度最大的步态参数值。PSO 算法优化步态参数的流程如下:

(1)设定粒子的数量 N , 搜索空间的维数 D , 最大进化代数 T , 惯性因子 w 的最大值、最小值以及加速度因子 c_1 、 c_2 的初值,当前进化代数 $t = 0$ 。在待优化步态参数的取值范围(搜索解空间)内随机产生粒子群的初始位置 $x_i(0)$ 和速度 $v_i(0)$, 并且令个体极值 $p_i = x_i(0)$, 全局极值 $p_g = x_i(0)$ 。令所有粒子的适应度初值都为 0。

(2)将每个粒子的位置代入步态参数,计算步态的 ZMP 稳定裕度,然后根据式(4.6)所示的目标函数 J 计算每个粒子的适应度值。

(3)将粒子 i 的当前位置适应度值与其经历过的最好位置 p_i 的适应度值进行比较,若更优,则将 p_i 更新为当前位置,否则 p_i 保持不变。

(4)将粒子 i 的当前位置适应度值与所有粒子经历过的最好位置 p_g 的适应度值进行比较,若更优,则将 p_g 更新为粒子 i 的当前位置,否则 p_g 保持不变。

(5)根据式(4.10)调整惯性因子和加速度因子。

(6)根据式(4.9)更新所有粒子的速度和位置。

(7)判断是否达到最大进化代数 T 。如未达到结束条件,则返回步骤(2)。反之,若已满足停止条件,则优化结束,此时 p_g 指向的粒子位置就是步态参数的近似最优解,步态的 ZMP 稳定裕度最大,机器人步行最稳定。

4.5 实验及结果分析

为验证本文步态优化方法的有效性,本文以法国 Aldebaran 公司的 Nao 机器人作为仿真对象,实验中相关基本参数参照第三章实验基本参数说明。在 MATLAB7.0 环境中,在三次样条插值算法规划出基本步态基础上,利用粒子群优化算法对步态参数进行寻优。

PSO 算法的具体参数如下:粒子数 $N = 40$,搜索空间的维数 $D = 5$,惯性因子 $w(t) = 0.9 - 0.5t/T$ (为当前进化代数),最大进化代数 $T = 50$;加速度因子的初值 $c_1 = c_2 = 2$ 。单脚支撑期 ZMP 稳定裕度的径向和侧向权重 $\alpha = 0.67, \beta = 0.33$ 。待优化参数的取值范围如下:

$$\begin{cases} 0.10Ds < d_{xs} < 0.60Ds \\ 0.12Ds < d_{xe} < 0.35Ds \end{cases} \quad \begin{cases} 0 < d_{ys} < W_{hip}/2 \\ 0 < d_{ym} < W_{foot}/2 \\ 0 < d_{ye} < W_{hip}/2 \end{cases} \quad (4.11)$$

表 4-1 PSO 优化前后的步态参数值

Table 4-1 Gait parameters before and after optimization

	d_{xs}/m	d_{xe}/m	d_{ys}/m	d_{ym}/m	d_{ye}/m	J
优化前取值	0.06	0.018	0.037	0.030	0.009	1.0871
优化后取值	0.04	0.03	0.039	0.031	0.009	1.1791

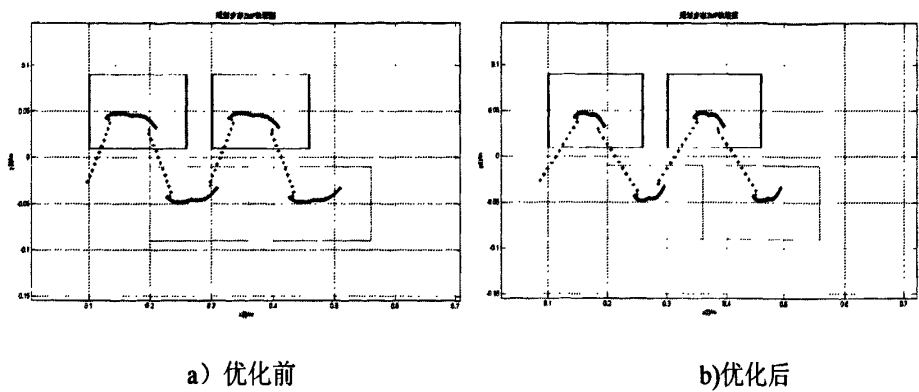


图 4-4 步态优化前后 ZMP 轨迹图

Fig4-4 The gait ZMP trajectory between before optimization and after

步态优化前各基本参数为见表 4-1 所示,得出 ZMP 运动轨迹如图 4-4a)所示,经过粒子群步态优化算法优化参数后,各基本参数见表 4-1 所示,得出 ZMP 运动轨迹如图 4-4b)所示,显然,优化后的 ZMP 轨迹没有出现震荡,侧向平面运动稳定,稳定裕度大。ZMP 单脚支撑期稳定裕度大,基本都集中于支撑脚掌中心附近,双脚支撑期双脚切换过渡平滑。径向运动能够保持在一定的稳定区域内,优化后的径向稳定裕度变大明显。仿真实验表明,基于粒子群算法的步态优化改善了步态稳定效果,机器人能够更稳定的步行。

4.6 本章小结

在第三章步态规划的基础上,分析了步态参数对双足机器人步行稳定性的影响,以 ZMP 稳定裕度最大为目标构造评价规划步态优劣的目标函数。利用粒子群优化算法对步态参数进行优化,最终得到稳定裕度大、连续平滑的理想步态,仿真实验证明了该方法的有效性,并通过 MATLAB 仿真比较了步态优化前后 ZMP 的变化情况。

第五章 基于 RoboCup3D 平台的仿真实验

5.1 引言

RoboCup(Robot World Cup)即机器人世界杯足球锦标赛,以 MAS(Multi-Agent System)和 DAI(Distributed Artificial Intelligence)为主要研究背景。主要目的就是提供一个标准的易于评价的比赛平台,促进 MAS 与 DAI 的研究与发展。RoboCup 机器人足球世界杯赛及学术大会(The Robot World Cup Soccer Games and Conferences)是国际上级别最高、规模最大、影响最广泛的机器人足球赛事和学术会议。机器人足球的最终目标:到 2050 年,开发出完全自主的仿人机器人队,赢得人类足球世界杯冠军队^[46]。

RoboCup3D 仿真环境是一个动态实时,有噪声的,合作协调与对抗性的多 Agent 环境^[47-50]。参赛队伍编写各自的 Client 程序,组建自己的 3D 仿真球队,模拟足球队员进行比赛,参赛足球队员的仿真模型与实际队员接近,避免了机器人比赛中由于机器人硬件的不足而放弃的情况,故其对于分布式人工智能理论的研究具有重要意义。

5.2 RoboCup3D 实验平台

RoboCup3D 仿真系统采用 Client/Server 方式,由 RoboCup 联合会提供标准的 rcssserver3d 系统。RoboCup3D 仿真环境模拟了真实的三维物理世界,研究重点是球员的感知、基本动作及其决策、与服务器的通信等基本功能模块^[51-53]。

RoboCup3D 仿真系统主要包括了服务器端、客户端及监视器三部分,3D 仿真系统如图 5-1 所示。

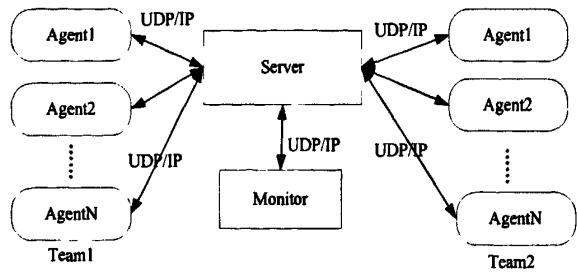


图 5-1 RoboCup3D 仿真系统

Fig5-1 The system architecture of RoboCup3D simulation

rcssserver3d 主要包含两个程序：Server 和 Monitor。Server 的工作是仿真足球和队员的状态、与 Client 进行通信、按照一定的规则控制比赛的进程。

Monitor 是一个可视化的程序，其主要功能是提供场上状态的可视化表示，并提供对比赛日志的回放。在 Monitor 上显示的信息包括比分，球队名字，所有球员和足球的位置。在 Server 上进行比赛，Monitor 并不是必需的。

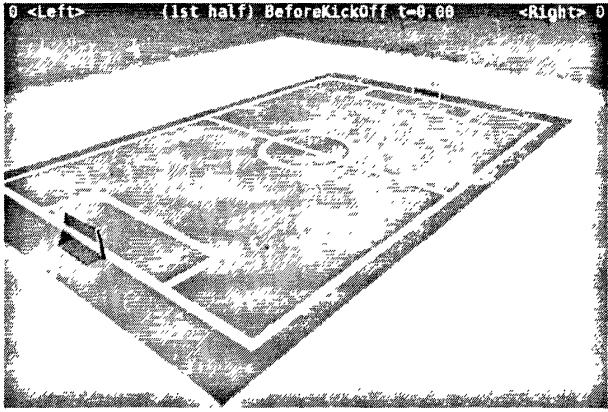


图 5-2 RoboCup3D 场地示意图

Fig5-2 The diagram of RoboCup3D environment

客户端是由各参赛队伍自行开发，每个客户端都是一个独立的进程。每个客户端模块只允许控制一名球员，每名球员发送它们下一步要做的动作请求给 Server。Server 接收到这些消息后，执行对应指令，并相应的更新环境。另一方面，Server 向所有的球员提供感知信息(如：受力、视觉等)。客户端 Agent 必须具备以下基本功能：能与服务器建立正常的连接；能从服务器获取感知信息；能在规定时间内进行正常的决策；能向服务器发送指定格式的命令。

RoboCup3D 仿真 Server 是在 SPADES(System for Parallel Agent Discrete Agent Simulation)平台上实现的。SPADES 是分布式仿真的中间系统。其主要目

的是为运行多计算机仿真系统提供一般性的平台。它实现了 Agent 和仿真世界之间的交互，而用户不需要担心接口、地址等等，SPADES 组织结构如图 5-3 所示。

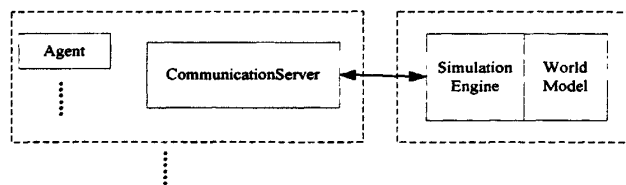


图 5-3 SPADES 结构图

Fig5-3 The architecture diagram of SPADES

SPADES 的组件按照 C/S 框架组成，如图 5-3 所示。仿真引擎和通信服务器已经作为 SPADES 的一部分，智能体和世界模型由用户创建并运行于前者之上。仿真引擎是一个可以在其上创建世界模型的软件，它运行于服务器端，通过通信服务器提供智能体和环境的交互。世界模型也运行于服务器端，它描述智能体作用的环境。运行于客户端的是智能体和通信服务器。所有的客户端机器都必须运行通信服务器，它提供智能体和仿真引擎之间的交流，把从智能体处理的信息传到服务器，或者从服务器获取感知信息^[54,55]。

5.3 Nao 机器人结构

目前，RoboCup3D 仿真平台中使用的机器人源于法国 Aldebaran Robotics 公司生产的 Nao 机器人，如图 5-4 所示。Nao 是由法国 Aldebaran RoboticsTM 公司研制的双足机器人，它高约 58cm，重约 4.3kg，具有 25 自由度，其中腿部 12 自由度，2008 年成为 RoboCup 公开赛标准平台组的选用机器人^[56]。

本文以仿真 Nao 机器人为实验对象，将双足机器人步态规划方法和步态优化算法应用于 Nao 机器人，取得理想的效果，得到了期望的步态。Nao 机器人主要由连杆和关节构成。其关节及齐次坐标系如图 5-5 所示。Nao 机器人下肢关节和连杆各参数见表 3-3。

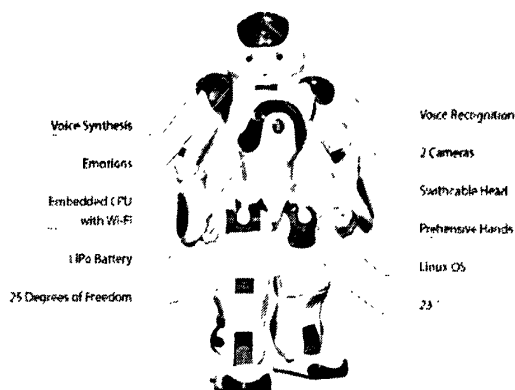


图 5-4 Nao 机器人及其配置

Fig5-4 The Nao robot and its configuration

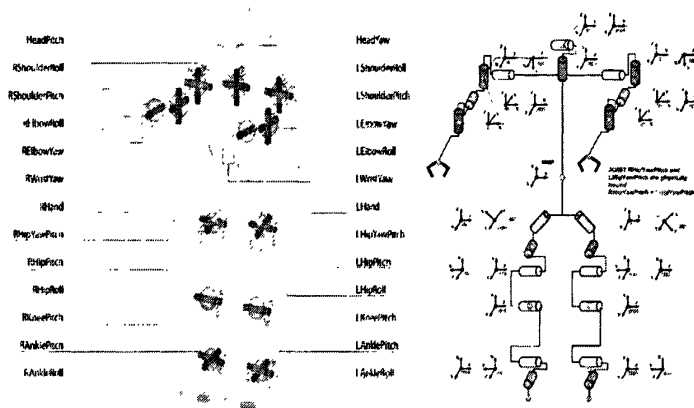


图 5-5 Nao 机器人关节配置图及齐次坐标系

Fig5-5 The joint configuration and the homogeneous coordinates of Nao

RoboCup3D 仿真 Nao 机器人的运动模拟主要通过 ODE(Open Dynamics Engine)来完成。ODE 中常用的关节类型有两种: HingeJoint 和 UniversalJoint, 如图 5-6 所示。HingeJoint 有 1 个关节轴(Axis), 关节转动时, 关节轴和锚点(Anchor)到连接的两个连杆 Body1 和 Body2 的相对位置保持不变; UniversalJoint 有两个关节轴, 运动时, Axis1 相对 Body1 保持不变, Axis2 相对 Body2 保持不变。目前 Nao 机器人的关节均为 HingJoint 类型。

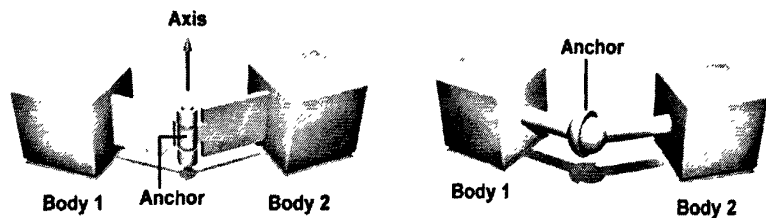


图5-6 铰链关节和万向关节示意图

Fig5-6 The diagram of hinge joint and universal joint

Nao 机器人下肢关节移动范围如下表所示，从表 5-1 中可以看 Nao 机器人各关节角的运动范围都大于等于人类各个关节角的运动范围，可以满足模仿人类动作的关节角度范围要求。

表 5-1 Nao 机器人关节移动范围

Table5-1 The movement range of Nao robot's joint

部 位	关节名称	动 作	范围（度）
左 腿	LHipYawPitch	左髋关节扭转(Z45°)	-44 至 68
	LHipPitch	左髋关节前后转动(Y)	-104.5 至 28.5
	LHipRoll	左髋关节左右转动(X)	-25 至 45
	LKneePitch	左膝关节转动(Y)	-5 至 125
	LAnklePitch	左踝关节前后转动(Y)	-70.5 至 54
	LAnkleRoll	左踝关节左右转动(X)	-45 至 25
右 腿	RHipYawPitch	右髋关节扭转(Z45°)	-68 至 44
	RHipPitch	右髋关节前后转动(Y)	-104.5 至 28.5
	RHipRoll	右髋关节转动(X)	-45 至 25
	RKneePitch	右膝关节转动(Y)	-5 至 125
	RAnklePitch	右踝关节前后转动(Y)	-70.5 至 54
	RAnkleRoll	右踝关节左右转动(X)	-25 至 120

RoboCup3D 仿真 Nao 机器人的层次结构分为三层：决策层、技术层和接口层，如图 5-7 所示。仿真 Nao 机器人能独立完成接收感知信息、进行决策、决定动作、发出命令这一系列的行为。

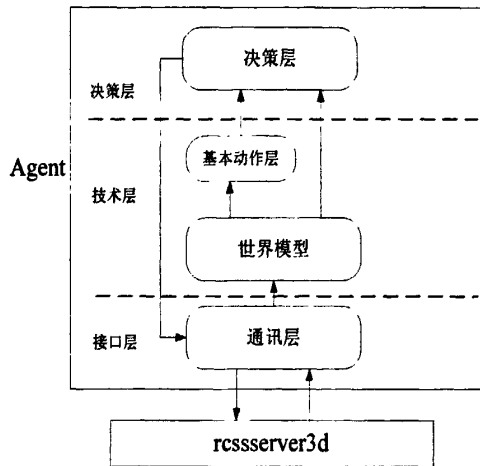


图 5-7 仿真 Nao 机器人体系结构图

Fig5-7 The system structure of Nao robot simulation

由图 5-7 可以看出，最底层的接口层直接负责与 rcssserver3d 进行通讯，输入端从 rcssserver3d 接收到感知信息，并解析数据，然后将解析后的信息发送给世界模型模块用来更新世界模型。世界模型是真实世界的反映，当它接收到信息后进行内部更新，让球员及时了解现在当前场上的形势，这些更新包括，球员的自定位，物体的跟踪，速度的确定等等。

技术层定义了球员智能体全部的个人动作，这些动作属于复合动作，即需要多个周期才能做完的；

决策层负责通过世界模型中提供的赛场信息来进行判断，作出最适合当前情况的决定，以便选择出需要做的动作。当高层进行决策后，所作出的命令将会被发送到动作选择器，最后球员的基本动作被分解成服务器认知的基础动作由触发器将动作命令发送给仿真服务器^[7]。

5.4 RoboCup3D 实验及结果分析

RoboCup3D 仿真实验中，通过调用 ODE 组件库中的各模拟杆件类，以达到真实模拟 Nao 机器人的目的。Nao 机器人中传感器由仿真 Nao 机器人中创建传感器类 AgentAspect 实现其功能，AgentAspect 由 Perceptor 和 Effector 组成。Perceptor 类及其子类能够遍历场景图结构并从中提取感知信息。Effector 能够修改场景图中的内容。

在 rcssserver3d 目前版本中，已经为 AgentAspect 提供了 Create Effector、

InitEffector、Beam Effector、Drive Effector、Kick Effector、Vision Perceptor、Game State Perceptor 和 Agent State Perceptor 用于 RoboCup 3D 仿真系统。Perceptor 和 Effector 类都继承自 Agent Aspect 类。

本文实验中联系紧密的传感器介绍如下：GyroRate Perceptor、HingeJoint Perceptor、UniversalJoint Perceptor、Touch Perceptor、ForceResistance Perceptor、VisionPerceptor、Agent State Perceptor 继承自 Perceptor 类。所有的 3D 对象还有 Collision Perceptor 和 Vision Perceptor 对象,它们已经作为仿真框架的一部分。

(1)GyroRate Perceptor

GyroRate Perceptor 用来感知机器人身体朝向和移动速度信息。当前 Nao 机器人躯干上安装一个陀螺仪传感器，GyroRate Perceptor 信息包含 GyroRate 编号，每条信息包括身体的全局坐标。

信息格式：(GYR (n <name>)(rt <x><y><z>))

(2) HingeJoint Perceptor

HingeJoint Perceptor 接收到特定 HingeJoint 的转动角度，每个 HingeJoint 都有编号和名字。

信息格式：(HJ(n<name>(ax<ax>))

(3) UniversalJoint Perceptor

UniversalJoint Perceptor 描述 2 个自由度的转角信息。每个 UniversalJoint 都有编号和关节名。0 角度表示与机器人身体平行。

信息格式：(UJ(n<name>)(ax1<ax1>)(ax2<ax2>))

(4)Touch Perceptor

Touch Perceptor 用于机器人和其他仿真目标碰撞或接触的时候被触发。机器人身体上有多个 Touch Perceptor,每个都有编号和名称。值 0 表示 Touch Perceptor 没有被触及，值 1 表示 Touch Perceptor 被触及。

信息格式：(TCH n<name>val 0|1)

(5)ForceResistance Perceptor

ForceResistance Perceptor 用于感觉作用在机器人身体上特点点的力量。信息中包含两个向量信息。第一个是力在身体上的作用点，第二个是作用了的方向。

信息格式：(FRP(n <name>)(c<px><py><pz>)(f<fx><fy><fz>))

(6) Vision Perceptor

球员具有 $-120^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 度的视野范围, Vision Perceptor 传送所看到的对象列表, 包括其他球员、球和场地上的标志^[58]。对于每个感知到的对象, 所得到的数据有球员与对象之间的距离; 在水平方向的夹角, 0 度指向对方的球门; 垂直方向的夹角, 0 度表示垂直。所有的距离和夹角都是与摄像机的相对位置, 摄像机位于球员体内的中心, 数据不包括速度。

信息格式:

```
(vision(<type>(team<teamname>)(id<id>)(pol<distance><horizontal angle>
<latitudal angle>)))
```

(7) AgentState Perceptor

AgentState Perceptor 报告球员当前的状态, 当前包括电量和体温。

信息格式:

```
(AgentState(battery<battery level in percent>)(temp<temperature in degree>))
```

本文实验中联系紧密的智能体指令执行器介绍如下: Create effect、Init Effector、Beam Effector、Drive Effector、Kick Effector 继承自 Effector 类;

(1) Create Effector

仿真比赛开始时, 需要使用 Create Effector 来创建 Effector、Perceptor 机器类型。目前只有一种类型, 那么可以采用默认值, 简单地使用 (Create) 命令开始。

(2) Init Effector

要设置参赛队名和号码, 必须使用 Init Effector, 在初始化之前, Effector 和 Perceptor 都无法正常工作。

信息格式: (init(unum<number>)(teamname<string>))

(3) Beam Effector

Beam Effector 让机器人从一个位置移动到另一个位置, 到现在为止, 移动机器人只在 Beforekickoff 模式中允许使用。Beam Effector 使用三维坐标, 但当前第三维只能为 0, 即只允许在水平面上移动。

信息格式: (beam<x><y><z>)

(4) Drive Effector.

rcssserver3d 中, 对象通过使用 Omnidriver 可以获得全方位的加速度。为了使用 Agent 的 Omnidriver, 必须调用 Driver Effector, 参数为一个笛卡尔向量(x y z), 最

大长度为 100 个单位。 x 坐标指向对手半场, z 坐标向上。当给其一个值时,它将在以后的仿真周期中一直起作用,直到改变其值为止。所给的值在每个坐标上都存在一定的误差(高于实际值 2%)。使用 Omnidriver 会耗费电力,可以从 Agent State Perceptor 中读取电池的当前状态。如果电池耗完,Omnidriver 将停止工作。

信息格式:(drive< x >< y >< z >)

实验中,根据前几章的分析,将所得步态规划方法和步态优化算法利用 C++ 编写函数体代码实现,形成了不同的代码版本,分别调用 Server 中 ODE 提供的相关仿真组件模块,接收相关 perceptor 感知信息后规划出合理的步态,并判断所规划步态的稳定性,生成 Agent 动作指令发送给各 effector 执行,以此观察机器人步态的稳定性和平滑性,并统计步行过程中相关数据。RoboCup3D 仿真实验程序流程图如图 5-8 所示。

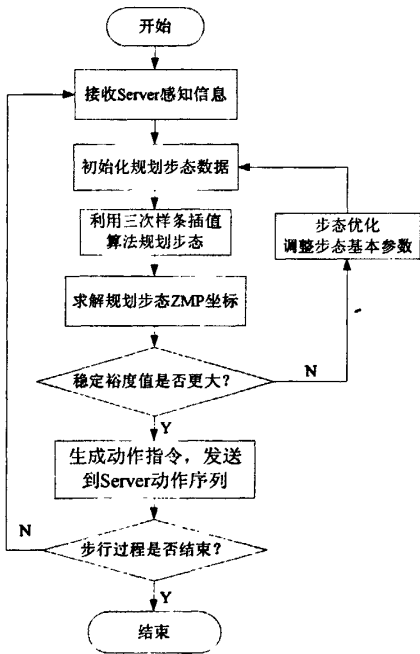


图 5-8 RoboCup3D 仿真实验流程图

Fig5-8 The simulation flow on RoboCup3D platform

仿真实验中,TAIJI3D_1.0 是没有采用三次样条插值算法也没有粒子群步态优化算法的 Agent 代码版本,TAIJI_2.0 是采用三次样条插值算法但没有粒子群步态优化的 Agent 代码版本,TAIJI_3.0 采用了三次样条插值步态规划算法,并且采用粒子群算法进行步态优化的 Agent 代码版本。将三种 Agent 代码版本在 rcssserver3d Server 中运行,观察各自 Nao 机器人步行运动的平滑性,统计各自 Nao 机器人的正常行走步数和摔倒次数,比较试验结果。实验记录如表 5-2 所示,

Nao 机器人各规划步态如图 5-9 所示。

表5-2 RoboCup3D仿真实验记录

Table5-2 The experimental record of RoboCup3D simulation

版 本	行走时间(s)	行走步数	摔倒次数
TAIJI3D_1.0	300	163	25
TAIJI3D_2.0	300	234	17
TAIJI3D_3.0	300	276	12

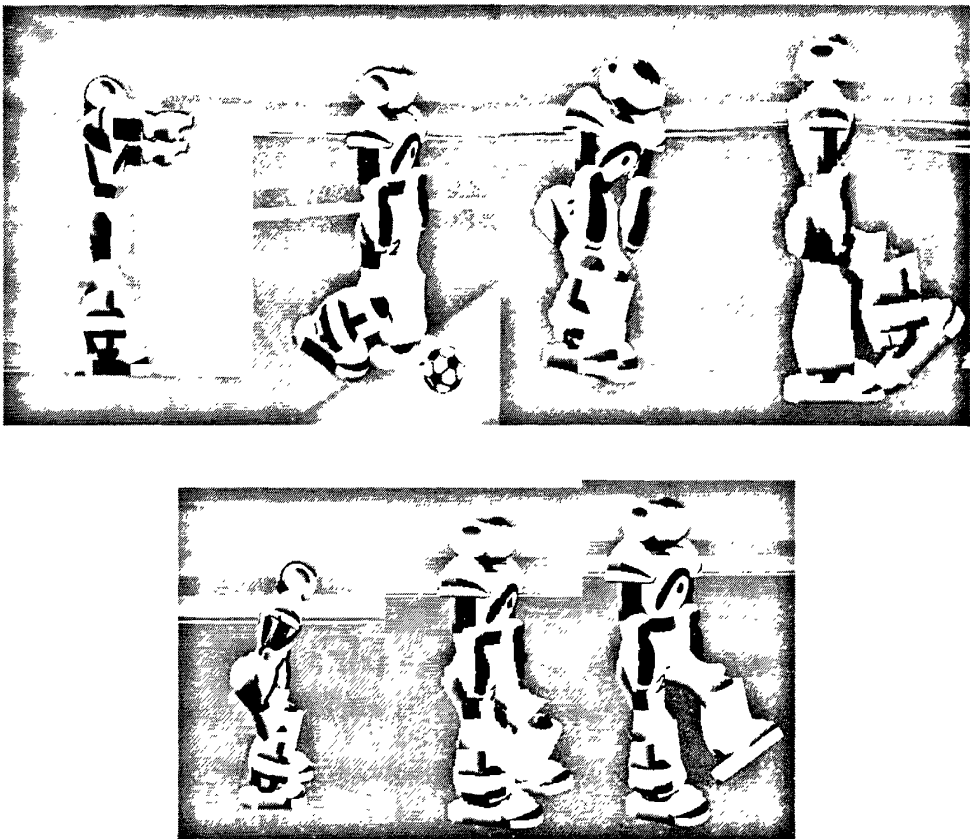


图 5-9 Nao 机器人规划步态示意图

Fig5-9 The planning gait diagram of Nao robot

实验发现，三个代码版本机器人都能基本完成步行动作，通过比较试验记录发现，TAIJI3D_3.0 机器人步行运动稳定性最高，平滑性最好，摔倒次数最少，步行更流畅，故相同时间内正常行走步数最多。TAIJI3D_2.0 Nao 机器人稳定性没有 TAIJI3D_2.0 好，但是能平滑的完成步行运动。TAIJI3D_1.0 只能完成步行动作，但是平滑性和稳定性存在很大问题，步行过程中，出现摆动脚震荡，经常摔倒现象。

通过比较TAIJI3D_1.0和TAIJI3D_2.0实验数据可证明通过三次样条插值算法规划步态，可以规划出平滑的步态，能减少双足机器人摔倒次数；通过比较采用粒子群算法进行步态优化的TAIJI3D_3.0和TAIJI3D_2.0可知，粒子群算法能优化步态参数，规划出的步态稳定性更高。实验证明了三次样条插值算法规划步态的有效性和粒子步态优化算法的优越性。

5.5 本章小结

本章对 RoboCup3D 仿真实验平台和实验对象仿真 Nao 机器人结构做了详细的说明，阐述了 rcssserver3d 仿真机制和实验原理。描述了实验中 Nao 机器人的步行运动情况，统计了实验中的相关数据记录，对实验结果进行分析并得出了实验结论。

总 结

双足机器人是当今机器人研究领域最为前沿的课题之一,步态规划是双足机器人实现稳定步行的基础性问题。为解决双足机器人步行运动的稳定性和平滑性问题,本文以 RoboCup3D 为实验平台,对基于三次样条插值算法的步态规划和基于粒子群算法的步态优化进行了研究,组建了广东工业大学 TAJI_3D 仿真足球队参加中国机器人大赛暨 RoboCup 公开赛。

TAJI_3D 队的比赛情况如下:

2009 年 12 月 25 日,TAJI_3D 参加在辽宁大连市举行的 RoboCup China Open2009 仿真组 3D 的赛事,荣获二等奖。

2010 年 7 月 18 日,TAJI_3D 参加在内蒙古鄂尔多斯市举行的 RoboCup China Open2010 仿真组 3D 的赛事,荣获三等奖。

本文的主要工作和研究成果如下:

(1) 设计了基于三次样条插值算法的步态规划方法。

研究了双足机器人步行过程,设计了基于三次样条插值算法的步态规划方法。该方法结合实际物理环境和几何约束条件,在径向和侧向两个平面内对机器人各关节轨迹进行插值处理,规划出连续平滑的步态,并通过计算 ZMP 的轨迹判定步态的稳定性。通过 MATLAB 仿真实验表明,此步态规划方法能规划出平滑步态,具有计算量小,易于实现的特点。

(2) 提出了基于粒子群算法的步态优化方法。

该方法首先分析了步态参数对步态稳定性判据 ZMP 的影响,构造出稳定裕度评估函数,作为步态优化的目标函数。然后基于粒子群算法对步态参数进行优化。MATLAB 仿真实验和 RoboCup3D 仿真平台实验表明,该步态优化方法实现了步态参数的优化,得到了稳定裕度大的平滑步态。此优化方法具有优化时间短的特点,适用于机器人这种实时性要求高的研究对象。

本文对双足机器人步态规划方法和步态优化方法展开了研究,虽然取得了一定的成果,但由于机器人步态规划问题的复杂性和研究时间有限,还有很多问题未能深入研究,步态规划和优化方法的许多处理环节也需要进一步完善,主要有

以下几个方面:

(1)双足机器人步行运动模型需更加精确地反映其实际情况,各插值时刻的位姿信息力求接近实际数据。另外,步态优化的目标函数需考虑更加全面的因素。

(2)目前的步态都是离线规划,实时性存在不足,需考虑更加智能有效的在线实时步态规划方法,可以考虑引入更加智能、有效、快捷的在线优化算法。

(3)步态规划方法基本上都是预先规划出 ZMP 轨迹,然后确定各关节的运动轨迹,来实现期望的 ZMP 轨迹。然而,由于 ZMP 是变化的,并不是所有的 ZMP 轨迹都能够实现。一些局部的关节运动往往是不切实际的,能耗会变得很大,对上躯体的控制会很困难。因此,有必要既要考虑动态稳定性,又要考虑局部关节的运动平滑性。

由于本文研究在时间和条件上都有限,所以需要在以后的工作和学习中逐步解决上述问题。

参考文献

- [1] 吴广玉,姜复兴. 机器人工程导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.
- [2] 梶田秀司著, 管贻生译. 仿人机器人[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Kajita Shuuji. Humanoid Robots [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [3] 殷际英, 何广平. 关节型机器人[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [4] 柳洪义, 宋伟刚. 机器人技术基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [5] SaeedB.Niku 著, 孙富春, 朱纪洪, 刘国栋, 等译. 机器人学导论一分析、系统及应用[M].北京: 电子工业出版社, 2004.
- [6] 傅京逊, [美]R.C 冈萨雷斯, C.s.G 李. 机器人学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [7] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 郑嫦娥, 钱桦. 仿人机器人国内外研究动态[J]. 机床与液压, 2006, (3): 1-4.
- [9] 徐建峰. 双足机器人动态步行研究及仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [10] 马宏绪. 两足步行机器人动态步行研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1995.
- [11] 马培荪, M 伍科布拉托维奇著. 步行机器人和动力型假肢[M]. 北京: 科学出版社. 1983.
- [12] Hanafiah Yussof, Masahiro Ohka, Mitsuhiro Yamano, et al. Biped Locomotion Strategy in Humanoid Robot Navigation: A Case of Speed-up Walk [C]. The 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2007: 1-7.
- [13] 汤卿. 仿人机器人设计及步行控制方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [14] 胡凌云, 孙增圻. 双足机器人步态控制研究方法综述[J]. 计算机研究与发展 2005, 42(5): 728-733.
- [15] Seungsu Kim, ChangHwan Kim, Bumjae You, et al. Stable Whole-body Motion Generation for Humanoid Robots to Imitate Human Motions [C]. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2009: 2518-2524.

- [16] Kazuo H, Masato H, Haikawa Y, et al. The Development of Honda Humanoid Robot [C]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1998: 1321-1326.
- [17] 俞志伟. 双足机器人拟人步态规划与稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [18] Chenglong Fu, Ken Chen. Gait Synthesis and Sensory Control of Stair Climbing for a Humanoid Robot [J]. 2008, 5(55): 2111-2120.
- [19] Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, et al. Planning Walking Patterns for a Biped Robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001, 3(17): 280-289.
- [20] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, et al. Biped Walking Pattern Generation by a Simple Three-dimensional Inverted Pendulum Model [J]. Advanced Robotics, 2003, 17(2): 131-147.
- [21] H. Hirukawa, S. Kajita, F. Kanehiro, et al. The Human-size Humanoid Robot That Can Walk, Lie Down and Get Up [J]. International Journal of Robotics Research, 2005, 24(9): 755-769.
- [22] 李建, 陈卫东, 王丽军, 等. 不平整地面上双足机器人的步态控制[J]. 东南大学学报, 2009, (39): 129-133.
- [23] 繆克华. Robocup3D 足球机器人体系结构与基本技能的研究与实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [23] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stokic. Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application. 1975.
- [25] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, et al. The Realization of Dynamic Walking by Biped Robot WL-10RD [C]. IEEE International Conference on Autonomous Robot. 1985: 459-467.
- [26] 伊强, 陈愚, 刘莉等. 考虑综合步行约束的仿人机器人参数化 3D 步态规划方法[J]. 机器人, 2009, 4(31): 342-350.
- [27] Nguyen Thanh Phuong, Dae Won Kim, Hak Kyeong Kim, et al. An Optimal Control Method for Biped Robot with Stable Walking Gait [C]. 2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2008: 211 -218.

- [28] 柯显信. 仿人形机器人双足动态步行研究[D]. 上海: 上海大学, 2005.
- [29] 夏泽洋, 陈恳, 熊琼等. 仿人机器人运动规划研究进展[J]. 高技术通讯, 2007, 10(17): 1092-1099.
- [30] 王剑. 仿人机器人在线运动规划方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [31] Dusko M. Katic, Miomir K. Vukobratovic. Survey of Connectionist Control Algorithms for Humanoid Robots [J]. EUROCON, 2005, 22(24): 310-313.
- [32] 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, (04): 341-343.
- [33] 于彦朝. 双足步行机器人步态规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [34] 魏航信, 刘明治, 赵丽琴. 仿人机器人跑步运动的仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 396-399.
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Zero_Moment_Point.
- [36] 王剑. 仿人机器人在线运动规划方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [37] LEE B J, Stonier D, KIM Y D, et al. Modifiable Walking Pattern Generation Using Real-time ZMP Manipulation for Humanoid Robots[C]. Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2007: 4221-4226.
- [38] 禹奇才, 张亚芳, 刘峰. 工程力学(理论力学部分) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 226-227.
- [39] 杨敏. 拟人机器人的步态规划仿真研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- [40] 王建文. 仿人机器人运动学和动力学分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [41] 许小勇, 钟太勇. 三次样条插值函数的构造与Matlab实现[J]. 自动测量与控制, 2006, 25(11): 76-78.
- [42] R.de Boer, J. Kok, and F.Groen. UvA Trilearn 2001 Team Description [J]. In Robocup-2001: Robot Soccer World Cup V. Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [43] Hanafiah Yussof, Masahiro Ohka, Mitsuhiro Yamano, et al. Biped Locomotion Strategy in Humanoid Robot Navigation: A Case of Speed-up Walk. The 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2007, 1-7.
- [44] Seungsu Kim, ChangHwan Kim, Bumjae You. Stable Whole-body Motion

- Generation for Humanoid Robots to Imitate Human Motions [C]. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2009, 2518-2524.
- [45] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [46] <http://www.robocup.org/>.
- [47] 胡崔娜. Robocup3D 仿真比赛关键技术的研究[D]. 江西: 江西理工大学, 2007.
- [48] Jelle R.Kok, Nikos Vlassis. UvA Trilearn 2005 team description. In Proceedings CD RoboCup 2005, Springer-Verlag, Osaka, Japan, July 2005
- [49] Paul Carpenter, Patrick Riley, Manuela Veloso, et al. Fcportugalteam description [R]. In RoboCup-02: Robot Soccer World Cup VI. Springer-Verlag, 2002.
- [50] Lufs Paulo Reis, Nuno Lau and Eugnio Costa liveir. Situation Based Strategic positioning for Coordinating a Team of Homogeneous Agents[EB / OL]. <http://www.jeeta.pt/robocup/archive.htm>, 2002-5-18/2002-10-24.
- [51] Philipp Vorst, Alexander Ferrein, Gerhard Lakemeyer. AllemaniACs3D Team Description [R]. In Proceedings CD RoboCup 2005, 2005.
- [52] 钟碧良. 机器人足球系统的研究与实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2003.
- [53] 肖明尧. 足球机器人仿真系统研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [54] SimSpark User's Manual. <http://www.robocup.org>.
- [55] 李实, 徐旭明, 叶榛等. 国际机器人足球仿真比赛及其相关技术[J]. 机器人, 2000, 2 (5): 420-426.
- [56] <http://www.aldebaran-robotics.com>.
- [57] 中国自动化学会机器人竞赛工作委员会, 中国机器人大赛官方网站: <http://www.rcccaa.org>.
- [58] 赵业锦. 受限视觉下 RoboCup3D 中机器人的定位[J]. 电子测试, 2010, (4): 81-84.

攻读学位期间发表的论文

序号	作者 (按顺序排列)	题 目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	相当于学位论文的哪一部分(章、节)	被索引、收录情况
1	黄春林 张祺 杨宜民	三次样条插值方法在 Nao 机器人步态规划中的应用	机电工程技术 (核心期刊)	2011 年第 40 卷第 2 期 62-64	第三章	

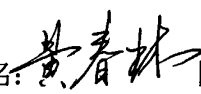
学位论文独创性声明


本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。本人依法享有和承担由此论文所产生的权利和责任。

论文作者签名： 日期：2011.6.7

学位论文版权使用授权声明

本学位论文作者完全了解学校有关保存、使用学位论文的规定，同意授权广东工业大学保留并向国家有关部门或机构送交该论文的印刷本和电子版本，允许该论文被查阅和借阅。同意授权广东工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、扫描或数字化等其他复制手段保存和汇编本学位论文。保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名： 日期：2011.6.7

指导教师签名： 日期：2011.6.7

致 谢

本论文的撰写和研究工作是在我的导师张祺副教授、杨宜民教授的悉心指导下完成的。他们渊博的知识，严谨求实、精益求精的治学态度和高尚的为师品格时刻深深的影响着我，在我攻读硕士研究生的三年中，他们不仅在学术上给予我指导和莫大的支持，而且在生活上时时给予关心，使我能全身心的投入到研究工作中，让我学会了很多做人的道理，在人生的奋斗目标和价值取向上给予我高瞻远瞩的指导，使我获益匪浅。这也将启迪我，激励我，使我在今后的道路上继续前进。在此，向张副教授、杨教授致以本人深深的敬意和由衷的感谢！

感谢课题组的付根平博士，在整个研究过程中对我的帮助和支持，和他的讨论给了我很大的启发，同时也给了我很大的信心和勇气，在此表示深深的谢意。

感谢课题组与我一起学习和工作的同学匡建辉、吴云标、李英、魏良、万超、项凡、蒋玉玲等，我们一起通力合作、互相探讨，共同完成研究课题，他们的科研能力和工作态度，使我获益良多。在此向他们表示衷心的感谢！感谢研究室的全体师兄、师姐、师弟、师妹，他们在学习和生活中给了我很多的关心和帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

最后，我要特别感谢我的父亲、母亲、哥哥。他们的理解和支持才能让我有机会进入研究生阶段的学习生活，也是他们的的爱和鼓励才能让我顺利地完学业。

回首硕士阶段的丰富多彩的学习、生活，百感交集。研究生阶段所有的成功与挫折都是我人生经历中的一笔宝贵财富，在此谨向所有关心支持我的人表示衷心的感谢！

谨此，再次感谢所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友和亲人！

双足机器人步态规划研究

作者：[黄春林](#)
学位授予单位：[广东工业大学](#)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1941788.aspx