

工学硕士学位论文

小型双足人形机器人机构设计与步态规划

张 博

哈尔滨工业大学

2006 年 6 月

国内图书分类号：TP242.2

国际图书分类号：621.865.8

工学硕士学位论文

小型双足人形机器人机构设计与步态规划

硕 士 研 究 生：张 博

导 师：孙立宁教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科、专 业：机械电子工程

所 在 单 位：机电工程学院

答 辩 日 期：2006 年 6 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP242.2

U.D.C.: 621.865.8

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

Design and Gait Planning of Miniaturization Biped Humanoid Robot

Candidate:	Zhang Bo
Supervisor:	Prof. Sun Lining
Academic Degree Applied for	Master of Engineering
Speciality:	Mechatronic Engineering
Affiliation:	School of Mechatronics
Date of Defence:	June, 2006
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘要

人形机器人一直是机器人领域研究的热点，它集中了机械工程、电子工程、计算机工程、信息工程、自动控制工程以及人工智能和仿生学等多种学科的最新科研成果，代表了机电一体化的最高成就，是目前科技发展最活跃的领域之一。课题旨在设计一种小型双足人形机器人平台，在此基础上对双足机器人的步行机理进行研究，为进一步设计自主的智能双足人形机器人积累经验。

以人体结构为模仿对象，对其进行了抽象与简化。应用微型伺服马达作为驱动元件，采用集中式控制，并在分析自由度配置及传感器应用方案的基础上，对小型双足人形机器人的本体机构进行设计。

机器人采用离线规划—再线调整的行走方式，其中，对机器人离线规划提出三步规划法。首先，结合对人类行走步态的研究，规划机器人行走姿态及轨迹；在此基础上建立并求解运动学方程，获得机器人行走时各关节的转角曲线；最后，针对前向运动与侧向运动之间的耦合，对求得的运动曲线进行修正，使机器人在保证稳定的前提下，动作更加流畅。结合机器人物理样机模型，利用三步规划法规划机器人行走步态，使其在平行步态下实现静态步行。

应用虚拟样机技术，对机器人行走步态进行仿真实验。在 SolidWorks 中建立机器人的简化模型，导入仿真软件 Adams 中，再利用 Matlab 中得到的运动曲线控制虚拟样机模型的关节运动。通过联合仿真实验获得机器人行走时的动态图像及实验数据，验证步态规划方法的可行性。最后应用规划的关节运动曲线控制微型伺服马达，实现物理样机的稳定行走，进一步验证理论研究的正确性和有效性。

关键词 人形机器人；双足；步态规划；运动仿真

Abstract

Humanoid robot is an integration field, developed in recent years, which includes the latest research results on mechanical engineering, electrical engineering, computer engineering, communication engineering, automatic control, artificial intelligence, and bionics etc. It represents the greatest achievement of mechatronics engineering, which, at present, is one of the most prosperous fields.

The project aims to design a kind of a miniaturization biped humanoid robot and carry out the research on the basic walking principle of this robot, in order to accumulate the design experience of autonomous intelligent biped robot systems later on.

This thesis mimics an object on a human body structure which has been abstracted and simplified. Mini-server motors are applied as the actuators in the system, which uses the central control mode. The structure of a biped humanoid robot is designed based on the analysis of the configuration of degree of freedoms and the utilization of sensors.

The robot walking mode uses the method of “Off-line planning, On-line adjustment”, in which the three-step program of off-line planning is raised. Firstly, making out the walking poses and tracks of the robot, according to the study on the humans’ gait and the sine and cosine curves are used to program its center-of-gravity track and its feet-lifting track. Secondly, the kinematics model is established, and according to the constraint and the programmed tracks, the kinematics equations of each walking stages are available. Then find the solutions of each equation and get the motion curves of its joints, which are also the motion curves of the mini-servomotor. Finally, the coupling of its forward and sideward motion revises the existing motion curves, in order to ensure that the robot can walk stably enough.

The robot’s walking gait simulation is performed utilizing the virtual prototype technology. Firstly, a simplified model of the robot is established in SolidWorks, which is imported into the simulation software Adams. And then the motion curves got from Matlab are applied on joints control. The joint simulation

experiments can give the dynamic pictures and relevant experimental data, which validate the feasibility of the walking gait planning. Lastly, the motion curves are applied to control the mini-servomotors to drive the robot, in which the theoretical research above is validated further.

Keywords humanoid robot, biped, gait planning, kinematics simulation

中国知网
CNKI

目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 双足人形机器人特点及研究意义	1
1.2 国内外人形机器人研究发展现状	1
1.2.1 国外人形机器人研究概述	1
1.2.2 国内人形机器人研究概述	5
1.3 步态规划方法的发展	6
1.4 课题来源、主要研究内容	7
第 2 章 机器人机构设计	8
2.1 引言	8
2.2 自由度配置	8
2.2.1 下肢自由度	8
2.2.2 上肢自由度	9
2.3 驱动、控制元件选择	10
2.3.1 驱动元件	10
2.3.2 控制元件	11
2.4 传感器配置	12
2.4.1 脚底设计	12
2.4.2 头部设计	14
2.5 整体机构介绍	14
2.6 本章小结	16
第 3 章 步态规划方法研究	17
3.1 引言	17
3.2 步态规划基本原则	17
3.2.1 静态步行	18
3.2.2 平行步态	19
3.3 步态规划基本方法	20
3.3.1 完整步行过程	20

3.3.2 三步规划法	20
3.4 人类行走步态研究	22
3.4.1 研究方法	22
3.4.2 HMCD 研究	23
3.5 本章小结	24
第 4 章 机器人步态规划	25
4.1 引言	25
4.2 规划机器人姿态及轨迹	25
4.2.1 行走姿态及轨迹	25
4.2.2 步态参数设定	26
4.3 求解关节运动轨迹	27
4.3.1 建立运动学方程	27
4.3.2 求解运动学方程	30
4.4 关节运动轨迹修正	34
4.4.1 误差分析	34
4.4.2 轨迹修正	36
4.5 MATLAB 仿真	37
4.6 本章小结	37
第 5 章 仿真及实验结果分析	38
5.1 引言	38
5.2 虚拟样机仿真	38
5.2.1 建立虚拟样机模型	38
5.2.2 仿真结果分析	40
5.3 物理样机实验	43
5.4 本章小结	45
结论	46
参考文献	47
攻读学位期间发表的学术论文	51
哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明	52
哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书	52
哈尔滨工业大学硕士学位论文涉密论文管理	52
致谢	53

第1章 绪 论

1.1 双足人形机器人特点及研究意义

目前机器人的主要移动方式有轮式、履带式、步行、爬行等。人形机器人与传统的轮式、履带式机器人相比具有无法比拟的优越性^[1]：

人形机器人具有较强的越障能力，能够上下台阶及通过不平整、不规则的路面，它的移动盲区很小；

人形机器人具有广阔的工作空间。由于其越障能力强，所以人形机器人活动范围很大；

人形机器人的能耗很小。机器人力学计算表明，足式机器人的能耗通常低于轮式和履带式。

此外，双足机器人与其他足式机器人相比，具有体积小、重量轻、动作灵活等特点，并且类似于人类的步行特点，因此对环境有最好的适应性。

双足步行是生物界难度最高的步行动作，但其步行性能却是其它步行结构所无法比拟的。人形机器人是工程上少有的高阶、非线性、非完整约束的多自由度系统^[2]。这对机器人的运动学、动力学及控制理论的研究提供了一个非常理想的实验平台。另外，人形机器人的研究还可以推动仿生学、人工智能、计算机图形、通信等相关学科的发展。因此，仿人形机器人的研制具有十分重大的价值和意义。

在实际应用中，人形机器人可用于有放射性、危险及其它对人体有害的环境中取代人类劳动，或把人类从高强度、长时间及单调乏味的工作中解脱出来，具有广阔的应用前景^[3]。

1.2 国内外人形机器人研究发展现状

研制具有人类行为特征、可以模拟人类行走与操作功能的机器人是长久以来人类对机器人研究的梦想之一。上世纪六十年代至今，这一梦想吸引了大批科技工作者，特别是近十年，随着各种高技术的迅速发展，这一领域的研究取得了长足的进步。

1.2.1 国外人形机器人研究概述

世界第一台真正意义上的人形机器人，是日本 Honda 公司于 1996 年 12 月推出的 P-2 型机器人^[4]，见图 1-1。P-2 是世界上首台无缆自主式人形机器

人，身高 $1.82m$ 、重量 $210kg$ ，共 28 个自由度。P-2 型机器人通过陀螺仪、加速度传感器及六个脚底压力传感器把地面的信息传给机器人的控制单元进行判断，进而平衡身体。可以在不同路面以 $3km/h$ 的速度行走，可以通过狭窄通道，可以上下台阶、跨越障碍物；并可以完成推小车、紧螺母等动作。

P-2 的出现标志着一个崭新的人形机器人时代的到来。此后，世界许多研究机构都纷纷针对人形机器人进行研究，并展示了各自的成果。

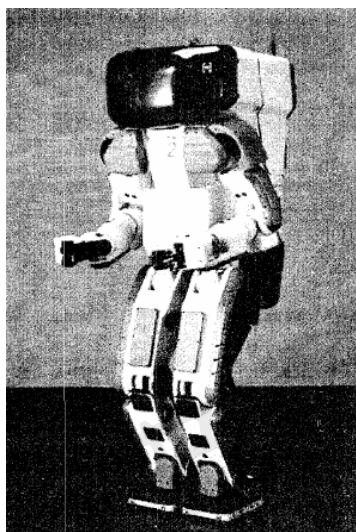


图 1-1 P-2

Fig.1-1 P-2



图 1-2 ASIMO

Fig.1-2 ASIMO

日本 Honda 公司从 1986 年开始研制双足人形机器人，其目标是研制一种能够和人类共存、合作，并能完成人类不能完成的任务的新型智能机器人。目前，世界上最先进的机器人是日本 Honda 公司于 2002 年 12 月推出的新款 ASIMO 智能机器人^[5,6]，见图 1-2。ASIMO 身高 $1.2m$ 、体重 $43kg$ 、共 34 个自由度，采用 Honda 自行开发的处理器、VxWorks 操作系统，驱动元件采用伺服电机、Harmonic 减速器、镍氢电池作为动力源。传感器方面，ASIMO 应用了视觉传感器、听觉传感器、陀螺仪、压力传感器、六维力传感器等。

步态规划方面，采用了新开发的“ I-Walking(Intelligent Real Time Flexible Walking)”智能实时柔性行走技术。I-Walking 是在零力矩点控制（ZMP）的步行技术的基础上结合了新的“预测运动控制”功能，可以实时预测以后的动作，并且据此事先移动重心来调整步态，使 ASIMO 具有动态行走能力。过去由于不能进行预测运动控制，因此当机器人从直线行走改

为转弯时，必须先停止直行运动后才可以转弯。而 ASIMO 通过事先预测重心变化，可以使得从直行改为转弯时的步行动作变得连续流畅。同时，ASIMO 结合 ZMP 控制，C-ATGRF 控制，落脚姿态控制提高了步行技术使其更接近人类的步行方式。此外，ASIMO 还能够通过平滑地调节步幅来改变行走速度。

在智能方面，由于应用了视觉、听觉传感器，ASIMO 能够辨别并回复 50 种不同的日本招呼用语以及 30 种回应动作，并且可以遥控方式操作。通过改善数据处理速度和软件，ASIMO 已经做到无需预编程就能够上下楼梯。

日本 Sony 公司于 2003 年 9 月推出的 SDR-4X 是目前最先进的小型人形机器人^[7,8]，见图 1-3。SDR-4X 身高 0.5m，体重 5kg，具有 38 个自由度。能够以 0.9km/h 的速度行走，并能在行走中转身。SDR-4X 集成了实时自适应运动控制系统使其能够在不规则的地形和斜坡上行走，并在外部压力下保持行走姿态，进行较高速度的自律运动，表演单腿站立、踢球、舞蹈等动作，外还配备声音识别和图像识别功能。



图 1-3 SDR-4X

Fig.1-3 SDR-4X

其他的公司和研究机构也纷纷研制出形态、功能各异的机器人，如韩国科学技术院(KAIST)研制的 KHR-1^[9]，身高 1.20m，体重 48kg，共 21 个自由度，见图 1-4。KHR-1 采用了较为简单的自由度配置，避免了结构上的复杂。应用谐波齿轮进行减速，用皮带轮和斜齿轮进行传动。基于踝关节力/力矩传感器实现了阻尼控制，落脚方向控制和落脚位置控制。实现速度为

1km/h 的高速步行。图 1-5 为日本 AIST 研制的 HRP-2^[10]，身高 1.54m，体重 58kg，共 30 个自由度，可以实现以 2km/h 的速度行走。HRP-2 能够与人合作抬木板，通过感应另一端的受力情况来掌握平衡。此外 HRP-2 还能够听懂人类的一些简单指令。



图 1-4 KHR-1

Fig.1-4 KHR-1



图 1-5 HRP-2

Fig.1-5 HRP-2



图 1-6 PINO

Fig.1-6 PINO



图 1-7 KONDO

Fig.1-7 KONDO

在小型人形机器人方面，一些研究者使用微型伺服马达作为驱动元件制作机器人平台。如日本 Hiroaki Kitno 博士开发的 PINO，身高 0.7m，体重 4.5kg，共 26 个自由度，见图 1-7。PINO 的主要目的是以低成本的条件，建立一个开放的机器人平台。图 1-8 是日本 KONDO 公司推出的 KONDO，身高 0.34m，体重 1.2kg，共 17 个自由度。KONDO 通过两片多路运动控制

器控制 17 个微型伺服马达运动，实现各种动作。

1.2.2 国内人形机器人研究概述

国内在人形机器人领域的研究起步较晚，长沙国防科技大学于 2000 年 11 月研制出我国首台人形机器人——先行者，见图 1-5。先行者身高 $1.4m$ ，体重 $20kg$ ，共有 17 个自由度，可以完成原地扭动、平地前进、后退、左右侧行和左右转弯等动作。此外，该机器人还具有一定的语言功能，并能表演眨眼动作。

先行者在步行中，通过手臂前后摆动与下肢运动相协调，实现了小偏差未知地面环境中的动态稳定行走，并在多项关键技术取得了突破。



图 1-6 BRH-02

Fig.1-6 BRH-02



图 1-6 BHR-02

Fig.1-6 BHR-02

目前，国内最先进的机器人是北京理工大学于 2005 年 9 月研制成功的 BHR-2 型机器人^[11]，见图 1-7。BHR-2 身高 $1.6m$ ，体重 $63kg$ ，共 32 个自由度。以 $1km/h$ 的速度行走，步幅 $0.33m$ 。配备力传感器、视觉传感器、加速度计、倾角计、编码器等各类传感器共 44 个，具有视觉、语音对话、力觉、平衡觉等功能。

除动态步行外，BHR-2 还能够表演太极拳、刀术等复杂的动作，实现了人形机器人复杂动作设计技术上的突破。另外，由于使用基于多种传感器的稳定行走控制方法，保证了机器人能够感知自身平衡状态及地面高度变

化，从而能在未知地面情况下实现稳定行走。

BHR-2 的面世，使中国成为继日本之后，第二个研制出无外接电缆行走，集感知、控制、驱动、电源和机构于一体的高水平人形机器人国家，标志着我国人形机器人研究已经跨入世界先进行列。

然而在小型人形机器人方面，除少数机器人爱好者自制的简易作品外，还未见有相关的报道。

1.3 步态规划方法的发展

人形机器人的步态规划的基本要求就是能够实现稳定的步行，这个目标的实现就依赖于有效而可靠的步态规划方法^[12,13]。人形机器人步态规划方法的发展经历了：模仿法、静步态法、动步态法、智能步态法四个阶段。

1. 模仿法

早期的研究者试图通过模仿人的步态来规划机器人步态，利用高速摄像机对人的行走步态进行拍照，纪录人行走数据，采集关节转角数据，并根据机器人实际尺寸来确定几个特殊位置的电机转角值，将其记录下来，用平滑曲线将各点连接，以应用于控制。由于机器人电机的运动方式与人的肌肉运动方式之间的差异，这种完全的模仿并未取得很好的效果。

2. 静步态法

为了更好的规划机器人步态，研究人员从机器人的实际结构出发建立运动学方程，规划机器人重心，以保证在机器人行走过程中重心在地面的投影始终保持在脚掌与地面接触的支撑平面内。这样就保证了机器人的步行稳定性。但是这种重心规划的静步态法仅适用于步行速度较低的情况，对于快速步行效果不佳。

3. 动步态法

ZMP（零力矩点）概念的提出突破了步行速度对步态规划的限制。零力矩点指机器人所受到的重力与惯性力的合力延长线与地面的交点。步行速度越快，惯性力越大，但只要保证零力矩点始终处于脚掌与地面接触的支撑平面内，机器人就能保持平衡。动步态法是目前应用最广的步态规划方法，并衍生出其它许多规划方法。

4. 智能步态法

智能步态的提出是为了使机器人能够更好的适应环境，具有更加智能的行走方式。目前大多是利用神经网络和遗传算法^[14]。如小脑模型法、中枢模式发生器法、试错法、延时奖励法等等。

现有机器人在已知环境中大多采用基于轨迹平滑、能量消耗等离线优化的规划方法；在未知环境中，大多采用基于力觉、视觉、陀螺仪等传感器信息的实时反馈的离线规划、在线调整的方法。

1.4 课题来源、主要研究内容

本课题来源于“985”重点学科建设项目，旨在开发一个小型双足人形机器人平台，并在此基础上研究双足人形机器人步态。

本论文主要包括以下四部分内容：

1．小型双足人形机器人机构设计。从机器人自由度的配置到驱动、控制元件的选择以及传感器的应用，介绍了机器人的设计原则及方法。设计了小型机器人 Robocean，为步态规划、控制方法的研究提供了平台。

2．人形机器人步态规划方法研究。双足步行机器人的运动链结构复杂，其自由度较多，因此步态运动规划十分困难。为解决此问题，在原有的两步规划法基础上提出了三步规划法。

3．根据三步规划法规划机器人步态。通过对人类行走步态分析规划机器人行走姿态及轨迹；建立运动学模型，得到实现规划步态的关节运动轨迹；通过修正使机器人获得稳定、流畅的步态。

4．机器人行走步态仿真及实验。建立虚拟样机模型，通过虚拟样机对机构本体及规划的步态进行仿真，经仿真验证后，再将规划得到的关节运动曲线应用到机器人控制中，使其获得稳定步态。

第2章 机器人机构设计

2.1 引言

Robocean 作为用以研究双足机器人步态规划方法的小型机器人平台，其机构的设计要实现以下目标：

1. 能够实现双足稳定行走；
2. 机器人动作连贯、美观；
3. 小型化，高度在 50cm 以内；
4. 结构简单，减轻机器人重量；
5. 采用通用零件，降低制造成本；
6. 外形美观，有利于进行人机交互。

材料方面，选用硬铝（LV12）作为机器人各关节间的连接部件，其他部件选用尼龙（1010）。

2.2 自由度配置

首先从仿生学的角度出发，研究人体自由度的分布情况。人体是一个可变结构的多自由度复杂系统，依靠全身 600 多块肌肉、200 多块骨骼，能够实现复杂的协调运动。对于如此复杂的运动，想利用机电系统进行完全的模拟是不可能也是不现实的。因此，基于通过尽量少的自由度，来实现尽量多的基本运动，同时又要使这些运动尽量柔顺美观的出发点，配置机器人自由度。

2.2.1 下肢自由度

下肢行走机构是双足机器人最关键的部分，关系着机器人能否稳定的行走。所以，对机器人下肢自由度的配置就成了机构设计中最为重要的部分。

通过对人体腿部关节运动方式的研究，发现可以利用 12 个自由度来近似实现人腿全部的运动功能^[15]。其中 $2 \times 3 = 6$ 个自由度负责前行运动， $2 \times 2 = 4$ 个自由度负责侧向摆动， $2 \times 1 = 2$ 个自由度负责转向。由于机器人仅实现前向运动，出于减轻重量的考虑，省略负责转向的 2 个自由度，仅保留负责前行运动和侧向摆动的 10 个自由度。Robocean 下肢自由度配置方案见图 2-1 所示。

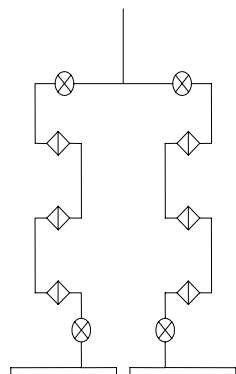


图 2-1 下肢自由度图

Fig. 2-1 DOF of lower limbs

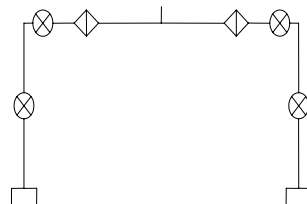


图 2-2 上肢自由度

Fig.2-2 DOF of upper limbs

2.2.2 上肢自由度

上肢是机器人的执行部件，同时在机器人行走时维持身体平衡。人体上肢有 $2 \times 4 = 8$ 个自由度，腕部有 $2 \times 3 = 6$ 个自由度，此外还有手指自由度。

Robocean 上肢自由度的配置主要考虑用其补偿行走时期望重心轨迹与实际测得重心轨迹之间的差值。通过大臂的前后摆动来补偿 ZMP 在前向上的误差，大臂的左右摆动来补偿 ZMP 在侧向上的误差。因此肩部需要 4 个自由度。考虑到机器人上肢的灵活性，再为其增加 2 个肘关节转动自由度。Robocean 上肢共 $2 \times 3 = 6$ 个自由度，如图 2-2 所示。

这样，Robocean 下肢具有 10 自由度，上肢具有 6 自由度，头部配置 1 个转动的自由度，共 17 自由度，如图 2-3 所示。

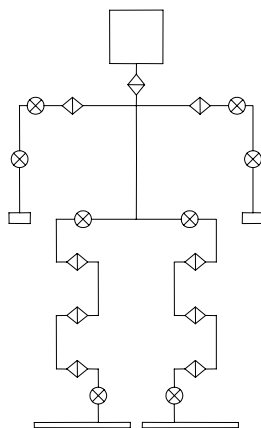


图 2-3 机器人自由度

Fig.2-3 DOF of Robocean

2.3 驱动、控制元件选择

在驱动元件的选择上，早期的研究者试图模仿人的肌肉运动方式来研制双足步行机，利用气动人工肌肉作为机器人的驱动元件，这种气动人工肌肉通过橡胶管充气膨胀引起的收缩来代替人体肌纤维的收缩运动^[16,17]，但是由于技术水平的限制人工肌肉在体积和力学特性等方面都与真正肌肉有较大差距，故未得以广泛应用。目前，大部分机器人采用伺服电机作为驱动元件。伺服电机具有速度快、扭矩大的特点，并配备双向接口，能够检测当前电机位置，因此得到广泛应用，并取得了良好的效果。

控制元件是影响机器人性能的关键部件之一，它在一定程度上影响着机器人的发展。小型机器人控制器，有其特殊性，要求尺寸小、重量轻、功耗低，能集成在机器人体内。因此，选用性能可靠的小型机器人控制器十分重要。

2.3.1 驱动元件

考虑到控制、扭矩、体积等方面因素，并参考目前已开发的小型机器人，选用微型伺服马达作为机器人关节驱动元件。微型伺服马达本质上是一种可以定位的直流电机，当其接收到一个位置指令，就会运动到指定的位置。微型伺服马达具有高力矩、高性能、控制简单、装配灵活、低价格等优点。

微型伺服马达内部包括了一个小型直流马达、一组变速齿轮组、一个反馈可调电位器及一块电子控制板，如图 2-4 所示。

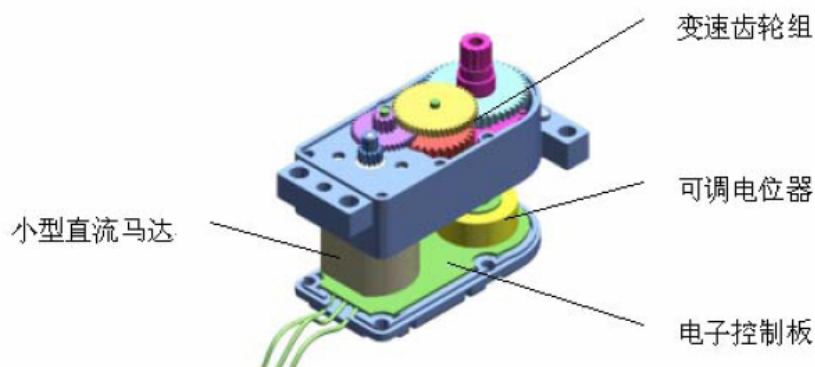


图 2-4 微型伺服马达

Fig. 2-4 Micro servo motor

微型伺服马达是一个典型闭环反馈系统，通过输入占空比不同的脉冲信

号来控制微型伺服马达的输出臂位置。其原理可由图 2-5 表示：

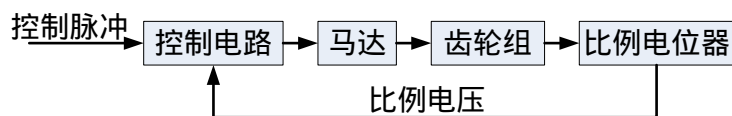


图 2-5 微型伺服马达工作原理

Fig. 2-5 The work mode of micro servo motor

经过初步的校核，Robocean 选用 TowerPro—MG995 型伺服马达作为关节驱动元件，见图 2-6。同时根据经验值，利用微型伺服马达驱动关节机器人，通常扭矩为 3.1 kg/cm 的伺服马达可以驱动 0.45kg 的机器人。TowerPro—MG995 型伺服马达最大扭矩为 15 kg/cm ，故应将机器人质量控制在 2.15kg 之内。



图 2-6 TowerPro—MG995

Fig.2-6 TowerPro—MG995

下表是 TowerPro—MG995 型伺服马达的性能指标：

表 2-1 TowerPro—MG995 性能指标

Table 2-1 The performance of TowerPro—MG995

尺寸	40.6mm*19.8mm*37.8mm		
重量	55.2g		
工作电压	4.8V~7.2V		
无负载速度	0.24sec/60degree(6.0V) 0.2sec/60degree(7.2V)		
堵转扭矩	13.0kg/cm (6.0V)	/	15.0kg/cm (7.2V)
结构要点	双滚珠轴承、金属齿轮、三级转子		

2.3.2 控制元件

Robocean 采用自行研制多路运动控制板，见图 2-7。该板可通过通讯电缆与 PC 或其它控制系统的串口相连接，可通过简单的串口编程，对多达 32 个微型伺服马达进行运动控制。通过将该控制板放置到机器人后背，机器人

可以实现无缆行走，见图 2-8。



图 2-7 运动控制器

Fig.2-7 motion controller

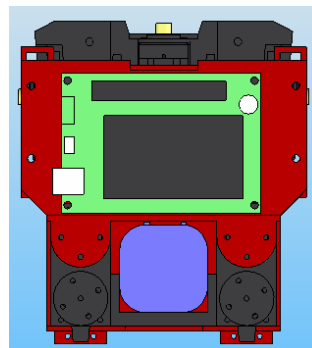


图 2-8 控制板布置

Fig.2-8 Position of controller

2.4 传感器配置

人类在运动时需要时刻感知周围的环境变化，以调整自己的姿态保持平衡。机器人同样需要感知周围的环境来保持稳定。早期的机器人很少采用或不采用传感器，机器人的动作完全是依赖于离线规划，这样的机器人对环境的适应能力很差。Robocean 在脚底设置了压力传感器，以实时测量行走时 ZMP 的位置。同时在头部集成了图像、语音传感器。

2.4.1 脚底设计

由于 Robocean 采用离线规划——在线调整的步行方式，在线调整时需要根据实际 ZMP 位置和期望 ZMP 位置的差值进行补偿，如图 2-9 所示。

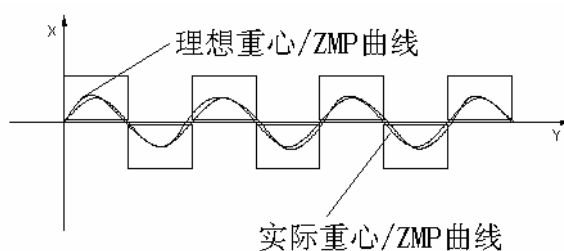


图 2-9 理想 ZMP 与实际 ZMP

Fig.2-9 Anticipant ZMP and actual ZMP

为了得到机器人行走过程中的实际 ZMP 位置，需要应用传感器来测量行走时的数据，并由此计算得到实际 ZMP 位置。通常测量 ZMP 的方法有三种^[18,19]：

1. 通过测量机器人各构件在行走时的速度、加速度，应用 ZMP 的

计算公式得到实际 ZMP 位置。但这种方法由于需要使用的传感器较多，计算过于复杂，故很少被使用。

2. 在机器人脚底安置压力传感器，通过测得的压力值计算实际 ZMP 位置，这种方法在小型机器人上被广泛采用。
3. 利用机器人踝关节处的六维力/力矩传感器测得实际 ZMP 位置，由于六维力/力矩传感器尺寸和价格上的限制，目前只有少数大型智能机器人上采用这种方法。

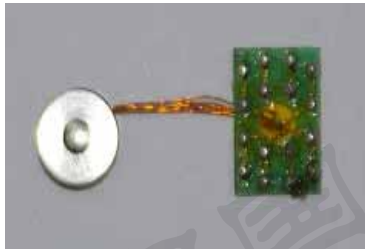


图 2-10 LK 系列压力传感器

Fig.2-10 LK series force sensor

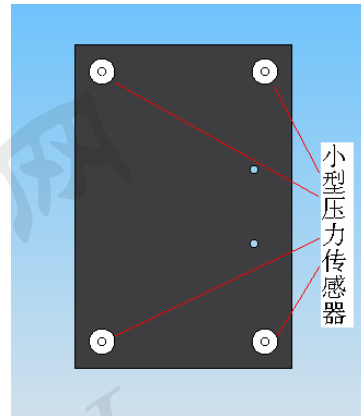


图 2-11 脚底压力传感器

Fig2-11 force sensor of sole

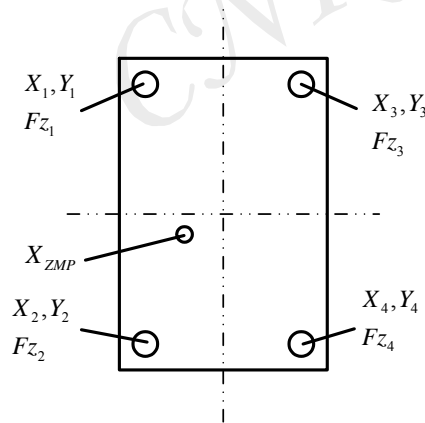


图 2-12 脚底压力传感器

Fig2-12 force sensor of sole

Robocean 选用在机器人脚底安置压力传感器的方法检测实际 ZMP 位置，选择 LK 系列压力传感器，见图 2-10。机器人脚底设计见图 2-11。

在机器人每个脚底放置 4 个压力传感器，如图 2-12 所示。在机器人行走过程中，根据压力传感器测得的压力值计算实际 ZMP 位置，计算公式如

下：

根据力平衡关系，可以通过压力传感器检测到的压力值计算与 ZMP 位置，ZMP 位置计算公式如下：

$$\begin{cases} X_{ZMP} = \frac{\sum_{n=1}^4 X_n Fz_n}{\sum_{n=1}^4 Fz_n} \\ Y_{ZMP} = \frac{\sum_{n=1}^4 Y_n Fz_n}{\sum_{n=1}^4 Fz_n} \end{cases} \quad (2-1)$$

2.4.2 头部设计

为了更好地实现人机交互，为机器人配备视觉系统、听觉系统及语音系统，如图 2-13 所示。目前，这些传感器只能做信号的采集，不能进行进一步的处理。头部结构设计见图 2-14。



图 2-13 头部传感器

Fig. 2-13 Sensors of head

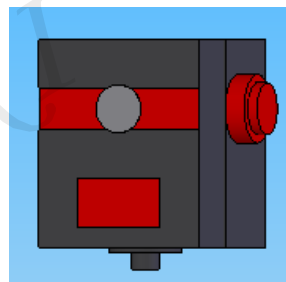


图 2-14 头部设计

Fig. 2-14 Design of head

2.5 整体机构介绍

根据确定的自由度配置方案以及选用的微型伺服马达、传感器、控制板，设计机器人的零件。本着结构简单、尽量采用通用零件、外形美观等原则，对机器人的机构及外观进行优化。相继设计了 HIT- 型、HIT- 型机器人，见图 2-15、2-16。最后确定了第一代小型双足机器人 Robocean 样机模型，如图 2-17 所示。

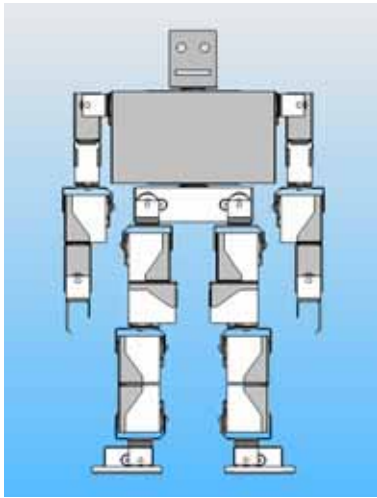


图 2-15 HIT- 型机器人
Fig.2-15 Robot HIT-



图 2-16 HIT- 型机器人
Fig.2-16 Robot HIT-

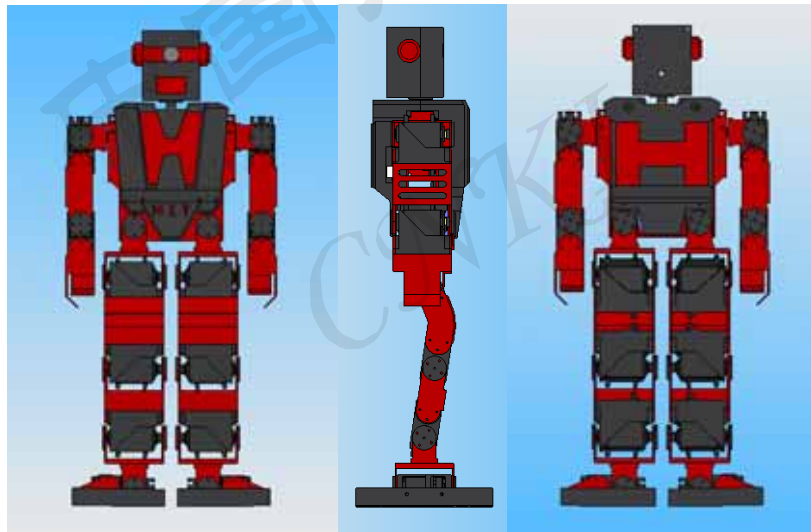


图 2-17 Robocean 模型
Fig.2-17 model of Robocean

加工后的物理样机见图 2-18。Robocean 高 410mm，重 2.05kg，共 17 个自由度。



图 2-18 HIT—ROBOCEAN

Fig. 2-18 HIT—ROBOCEAN

2.6 本章小结

本着小型化、结构简单、外形美观及能够实现稳定、流畅运动的原则，从机器人自由度的配置，到驱动元件、控制元件的选择，及传感器的应用，介绍了小型双足人形机器人 Robocean 本体结构的设计方法及过程。在自由度配置上，以通过较少关节，实现较多的动作为出发点，为机器人配置了 17 个自由度，采用微型伺服马达作为驱动元件，并通过集中式控制来实现关节协调运动。

Robocean 通过脚底压力传感器实时检测行走时的 ZMP 位置，并可以通过头部传感器采集图像、声音信号。作为小型双足人形机器人平台，可以在其基础上进行相关研究。

第3章 步态规划方法研究

3.1 引言

人形机器人具有广阔的应用前景,其研制工作得到了各国的重视,近年来已取得巨大的进展,但仍存在大量的理论和技术问题有待深入研究。如何规划机器人步态使其稳定行走仍是人形机器人研究领域的关键技术之一。步态是在步行运动过程中,机器人的各个关节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时间轨迹来描述。步态规划的目标是产生期望步态,即产生在某个步行周期中的实现某种步态的各关节运动轨迹(期望运动轨迹)。步态规划是机器人稳定步行的基础,也是双足步行机器人研究中的一个关键技术。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,实现机器人的稳定步行^[20,21]。

为了便于后面的阐述,首先对文中所用到的一些概念作以说明^[22]:

步长:在一个步行周期内,机器人摆动腿所移动的距离。

步行周期:机器人在周期性步行运动中,完成一步的行走所用的时间。

单脚支撑期:在一个步行周期中,机器人由某一单脚支撑的时间。

双脚支撑期:在一个步行周期中,机器人由双脚支撑的时间。

稳定区域:由支撑的脚掌所组成的凸形区域在水平面上的投影。

3.2 步态规划基本原则

对双足步行机器人而言,理论上可供选择的步态有无数种。但是,步态规划必须保证以下两个原则^[23]:

1. 所规划的步态必须满足设定的目标。
2. 机器人按照规划步态行走时必须始终保持自身的稳定。

同时,所规划的步态还应符合人类的行走习惯,并使控制尽可能简单^[24]。人类行走步态是几千年演化的结果,是自然界中最合理的行走方式,符合人类的行走习惯的步态不仅能使机器人保持稳定,而且能使其所消耗的能量减少到最低程度。此外,机器人的行走必须加以人为的控制,如果规划的步态存在控制上的困难甚至难以实现,显然意义不太。

根据上述的原则，Robocean 采用平行步态的静态步行方式。

3.2.1 静态步行

按照步态规划中选择的稳定判据的不同，双足步行机器人行走步态可以分为静态步行和动态步行。

机器人行走时双脚交替与地面接触，会形成随时间变化的稳定支撑区域。如果在步态规划中，以重心作为稳定判据，规划机器人重心在地面的投影始终保持在稳定支撑区域，机器人行走为静态步行。即在机器人在行走过程中每一时刻，机器人均处于静态平衡状态。重心计算公式为：

$$X_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g X_i}{\sum_{i=1}^n m_i g}, Y_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i g} \quad (3-1)$$

静态步行是一种较为简单的低速步行方式，却是一种基本的步行方式。在步态规划时需要规划重心的运动轨迹，保证静态平衡条件，再通过几何约束即可求解机器人运动的各关节运动轨迹。通常在机器人行走速度较低时，采用静态步行的行走方式。

当机器人行走速度提高时，在前进方向上会产生惯性力。机器人所受重力与惯性力的合力的延长线与支撑面的交点为零力矩点（ZMP）。如果在机器人行走步态规划中，以 ZMP 作为稳定判据，规划机器人 ZMP 在地面的投影始终保持在稳定支撑区域^[25,26,27]，机器人行走为动态步行。以 ZMP 作为稳定判据时，允许机器人重心在地面的投影超出稳定支撑区域。

ZMP 计算公式为：

$$\begin{cases} X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i X_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z) X_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{X}_i + g_z) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z)} \\ Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i Y_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Y}_i + g_z) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z)} \end{cases} \quad (3-2)$$

当机器人运动速度较低时，受到的惯性力较小，忽略 ZMP 公式中的导

数项，便得到重心计算公式。由此可见，采用重心作为稳定判据进行步态规划是机器人处于低速运动时对 ZMP 稳定判据的一种简化手段。

由于 Robocean 行走速度较低，采用基于重心稳定判据的静态步行。

3.2.2 平行步态

根据 Robocean 自身结构特点，在行走时采用“平行步态”，如图 3-1 所示。机器人采用这种步态行走时，两脚的落脚痕迹是相互平行的，实现这种步态行走的机器人对其自由度要求较少，但对稳定平衡提出了较高的要求

[28]。

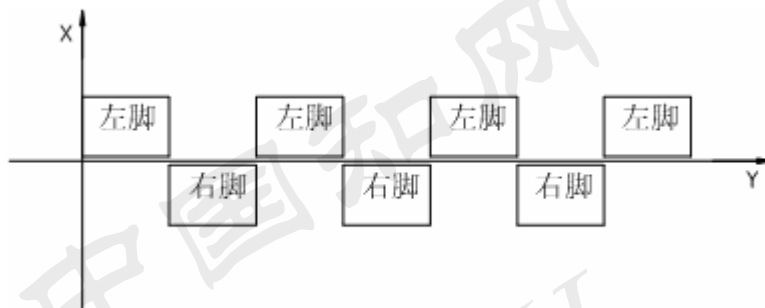


图 3-1 平行步态

Fig. 3-1 Parallel gait

与“平行步态”相对应的是“一字步态”。采用这种步态行走时，两脚的落脚痕迹在一条直线上，如图 3-2 所示。实现这种步态行走的机器人对稳定平衡的要求较低，但对其自由度要求较多。

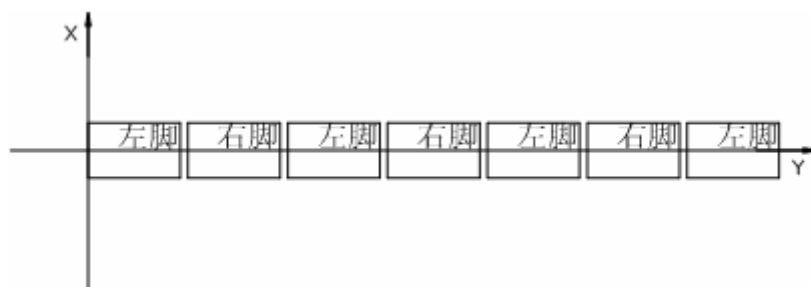


图 3-2 一字步态

Fig.3-2 Straight gait

3.3 步态规划基本方法

步态规划对于机器人的运动特性有直接的影响，同时也影响到控制方法及实施的难易程度。目前，双足步行机器人步态规划方法大抵有以下三种：

1. 基于符号运算和直接配置数值优化算法的步态规划方法；
2. 基于 ZMP/重心的经典方法及其新的变形；
3. 利用神经网络和遗传算法进行步态规划的方法。

结合 Robocean 的自身特点，进行步态规划时提出了基于重心的三步规划法。

3.3.1 完整步行过程

双足机器人完整的步行过程包括五种步态：启动步态，加速步态，正常行走步态，减速步态，停止步态。

启动步态：由双腿并立静止状态变化到向前行走状态；

加速步态：衔接起动阶段和正常步行阶段的过渡步态；

正常行走步态：两条腿交替向前跨出，各关节周期性运动；

减速步态：衔接正常步行阶段和停止阶段的过渡步态；

停止步态：由向前行走状态回到双腿并立静止状态。

当机器人步行速度较慢时，在静步态规划时可以将这五种步态简化为只包含起动步态、正常行走步态、停止步态这三种步态的步行过程。

3.3.2 三步规划法

由于双足步行机器人的运动链结构复杂，自由度较多，因此步态规划十分困难。以往大多采用基于分期、分相原则的两步规划法^[29]规划机器人步态，将前向运动与侧向运动分开进行。例如：为了防止在侧摆时抬腿造成身体向摆动腿一侧倾倒，两步规划法需要将侧摆和抬腿分步设计，即侧摆到位后保持，然后摆动腿向前跨出一步。这种规划方法虽然能够保证机器人的步行稳定性，但是其动作较为生硬。图 3-3 是采用两步规划法得到的步态流程图。

为解决这一问题，Robocean 采用三步规划法规划其行走步态：

第一步根据机器人的运动要求如：步长、步距、步行周期，规划机器人的行走姿态及运动轨迹；

第二步则可根据机器人的平衡关系式，确定各关节的运动轨迹，使系统能够实现协调运动；

第三步对机器人各关节的运动轨迹进行修正，以期待获得更加稳定、流畅的步态。

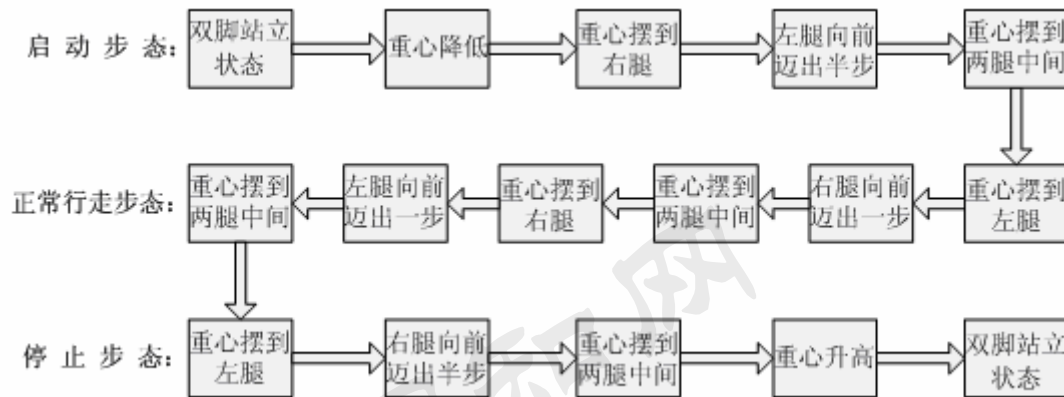


图 3-3 两步规划法步态流程

Fig.3-3 Gait flow of two steps plan

采用三步规划法规划机器人行走步态，在保证步行稳定性的前提下，使侧向运动与前行运动同时进行，运动更加流畅。整个步态流程如图 3-4 所示。

起动阶段，机器人在将重心高度由初始位置降低到适合行走的高度的同时，通过侧向关节运动将重心在地面上的投影从两腿之间的中心位置移动到支撑脚上。再通过前向关节运动使机器人向前跨出半步，同时重心返回到两腿之间的中心位置。这样机器人就从直立静止状态过渡到了正常步行阶段。

正常步行阶段，双脚交替向前迈出，同时重心在两脚中间不断转换，始终保持在支撑脚平面内。向前迈步的步长为一个脚底长度，周期为 $1s$ 。由于采用平行步态，行走时双脚在地面投影的轨迹始终保持平行。考虑到运动的对称性，只需对一个步长周期内的步态进行规划。

停止阶段可以视为起动阶段的反演运动，即先在重心在地面上的投影从两腿之间的中心位置移动到支撑脚上的同时，使机器人后腿向前跨出半步，与支撑脚齐平。再移动机器人重心到两腿之间的中心位置同时升高重心恢复到初始位置。

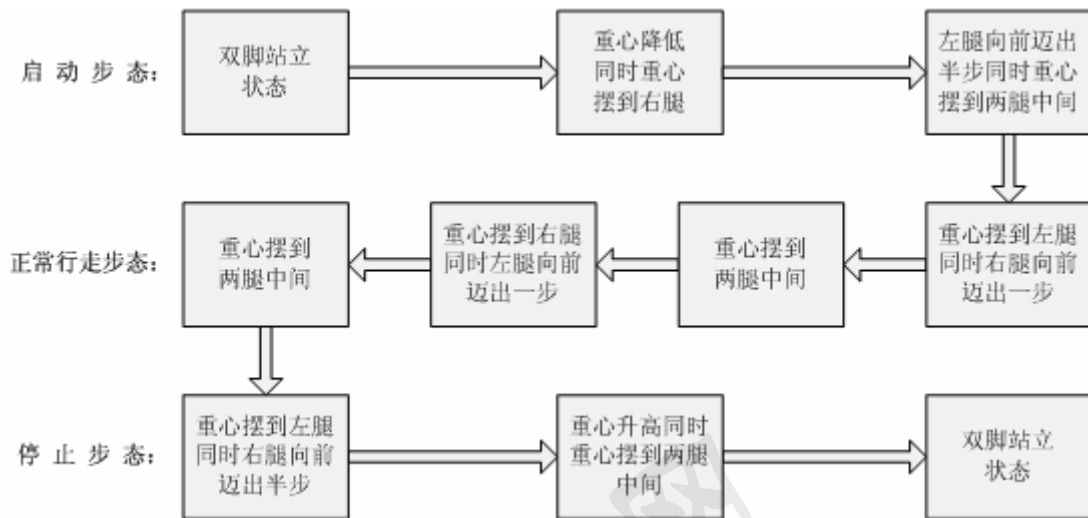


图 3-4 三步规划法步态流程

Fig.3-4 Gait flow of three steps plan

3.4 人类行走步态研究

研究人形机器人的步态是希望赋予机器人像人一样的运动能力，因此试图用记录的人类的行走步态数据 HMCD (Human Motion Capture Data) 指导机器人运动是很自然的事情^[30,31]。目前 HMCD 还不能直接用于人形机器人，由于技术水平的限制，目前可实现的机器人与人类在结构尺寸、响应速度、随机事件处理等方面还存在很大差距。人行走步态中的每一个动作都不是身体某一部分的单一运动，而是在神经系统的统一协调下的整体运动，它包括步态的实现和体态的调整。用机械电子系统来实现这样复杂的动作，具有较大的难度。

Robocean 采用以人类行走步态为指导，通过结合自身实际结构，对 HMCD 进行调整，利用调整后的步态应用于步态规划。目前最先进的自主式人形机器人——ASIMO 的研制就是在分析了人类行走步态数据 HMCD 的基础上进行的。

3.4.1 研究方法

近年来，随着双足机器人研究的兴起，人类行走步态的特征成了仿生机械学家研究双足机器人的一个重要依据^[32]。体育研究者和人体运动信息研究专家对人体的运动做了大量的研究工作。他们让实验者穿上紧身衣，并在踝、膝、髌、肩、肘等关键关节贴上亮片标志以便于识别，在实验者行走过

程中，利用高速摄像机对试验者的行走步态进行连续拍照^[33]，如图 3-3 所示。通过大量实验，获得不同实验者的行走步态连续照片，经过分析整理，获得可以指导机器人步态规划的人类行走步态数据。

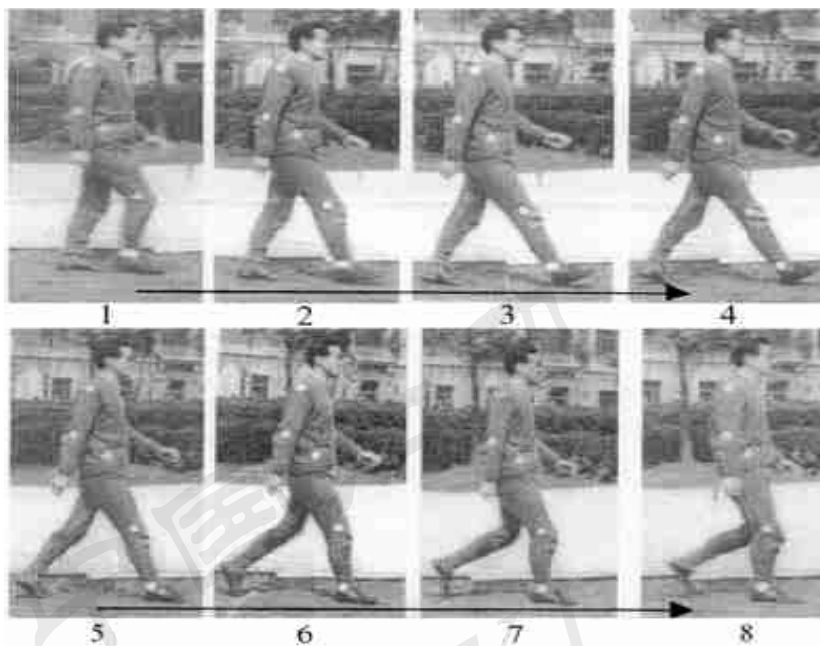


图 3-5 人行走步态的连续照片^[32]

Fig.3-5 Series pictures of human gait

3.4.2 HMCD 研究

通过纪录的人类行走数据可以发现^[34,35,36]：人类在行走过程中，为了保持身体平衡，必须保证 ZMP 处于支撑脚与地面接触的区域。因此，人类的步态表现出随着双腿迈出，ZMP 在双足间交替轮换，躯干左右摆动，在地面投影的轨迹近似为正弦曲线；此外，实验者在行走过程中，躯干近似保持与地面垂直，且前进速度波动不大，近似为恒定值（人行走速度可以用身躯的移动速度来表示）；髋关节标志在高度方向上的波动近似为正弦曲线，但波动幅度很小；双脚支撑期约占整个步态周期的 20%~30%；与此同时，一些关节和躯体部位按照跨步的频率，周期性的进行时间和空间上的位置变化。

从高速摄像机拍得的连续照片中可以看出，人类在行走过程中脚部动作比较复杂：迈腿时，脚跟首先离地，以脚尖为圆心做圆周运动，当脚跟运动到一定角度时脚尖离地，腿向前迈出；着地时，脚跟首先离地，脚尖以脚跟

为圆心做圆周运动。腿在摆动过程中，踝关节标志物的运动轨迹近似于正弦曲线。这种抬脚姿态有利于快速行走，同时起到缓冲作用。

以上这些运动规律是人类含有丰富运动学、动力学特性的行走步态的客观反映，双足人形机器人的运动步态以人类的步态为原型来设计，可以避免复杂的动力学计算，又得到仿生学观点上的优化步态。

研究人类行走步态对研究及实现机器人步态提供借鉴和指导，随着测试和记录手段的不断完善，人类行走步态数据 HMCD 的获得将更加完全和详细，由此提炼出的人类行走运动规律将更加完备，基于 HMCD 规划的实现的人形机器人在行走特征上将更加接近于人类。

3.5 本章小结

本章介绍了双足人形机器人步态规划的基本原则和基本方法，确定了 Robocean 采用平行步态的静态步行方式。并将完整的步行过程分为包含启动步态、正常行走步态、停止步态这三种步态的步行过程。

针对 Robocean 的步态规划，提出了三步规划法。与以往的两步规划法比较，在保证步行稳定性的前提下，使运动更加流畅。

在规划机器人步态前，首先对人类行走步态进行研究，获得人类行走步态数据 HMCD。并以此为指导，规划机器人步态，期望机器人获得像人一样稳定、灵活的行走步态。

第4章 机器人步态规划

4.1 引言

目前，双足机器人广泛采用离线规划——在线调整^[37]的行走方式，首先离线规划出保证机器人稳定行走的步态，在机器人行走过程中，根据实际情况进行姿态调整及步态修正。

目前，对离线规划这一问题的研究主要从两方面进行：

1. 模仿法。以人类行走步态作为模仿对象，通过对 HMCD 进行分析和抽象，将其应用到机器人步态规划中。
2. 优化法。首先根据实际情况先确定机器人的约束条件，再以某些物理指标最优为目标，来进行步态设计。

Robocean 采用模仿法，通过对 HMCD 的研究指导机器人的步态规划。通过三步规划法得到机器人稳定行走的关节运动曲线。

4.2 规划机器人姿态及轨迹

按照三步规划法规划机器人步态，首先需要规划机器人的行走姿态及运动轨迹。在模拟人类行走步态的同时，从机器人的实际结构出发，规划机器人行走姿态及运动轨迹，以保证在机器人行走过程中重心在地面的投影始终保持在脚掌与地面接触的支撑平面内。

4.2.1 行走姿态及轨迹

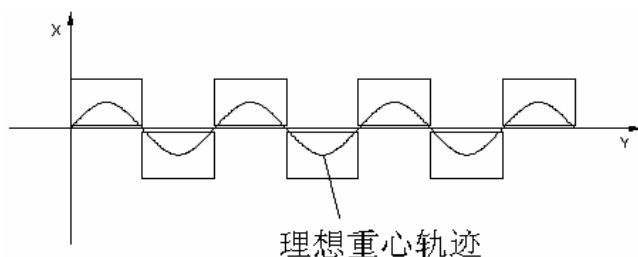


图 4-1 理想重心轨迹

Fig.4-1 The expect track of ZMP

参考人类步行特点，规划机器人行走时重心在地面投影为正弦曲线，如图 4-1 所示。利用正弦曲线规划机器人中心轨迹，避免了机器人重心在两个

脚掌支撑面内转换时所引起的冲击，同时也使关节的转动角度改变更加平滑。

规划机器人脚底运动轨迹：人类行走时脚部的运动方式适合于快速行走的步态，并且要求脚部至少有一个自由度。目前，一些能够实现快速动态步行的机器人采用这种方式规划脚部轨迹，并设置了一个脚趾自由度，如图 3-6 所示。

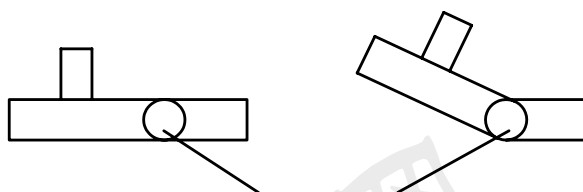


图 4-2 脚底自由度

Fig.4-2 DOF of sole

当机器人步行速度较慢时，采用这种规划方式效果并不明显。针对 **Robocean** 脚底没有自由度，规划其在行走过程中，脚底始终与地面保持平行。同时为了减小摆动脚着地时引起的冲击，规定摆动脚在高度方向上的运动轨迹为正弦曲线，这样在脚与地面接触的瞬间，速度为零。

参考人类行走姿态，规划机器人在行走过程中重心高度保持不变，由于机器人的重心在躯干上，所以重心高度保持不变就近似为躯干高度保持不变，即髋关节的高度保持不变。同时在行走过程中躯干始终保持与地面垂直^[38]。从能量的角度考虑，机器人行走过程中，重心的变化会引起整个系统能量的相互转化，保持重心高度不变，有利于节省能量^[39]。

4.2.2 步态参数设定

首先设定机器人行走速度为 60mm/s ，步距为一个脚底长度 120mm 。

机器人在正常行走步态下的重心高度：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，保持重心轨迹尽可能高会是有利于减少能耗。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。一个实际的步态规划，需要对上面的两种因素进行综合考虑。设定 **Robocean** 直初始位置重心高度为 277.5mm ，正常行走步态下的重心高度为 252.5mm 。

机器人摆动脚的抬脚高度：摆动脚的抬脚高度越高，越有利于机器人的

越障能力。但是从能量的角度看，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最差。因此需要根据环境的不同，规划摆动脚抬起的高度。综合上述两方面因素，设定 Robocean 的抬脚高度为 $15mm$ 。

4.3 求解关节运动轨迹

双足机器人运动学分析是步态规划的基础^[40]。运动学分析首先建立机器人运动学模型，并根据对规划的机器人姿态及重心轨迹建立运动学方程。求解运动学方程即可得到机器人各关节运动轨迹。

4.3.1 运动学方程的建立

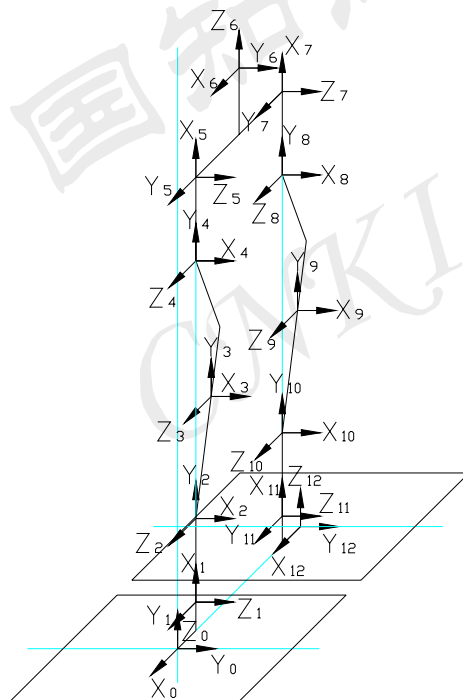


图 4-3 机器人腿部齐次坐标系

Fig.4-3 Coordinate transformation of leg

机器人腿部共 10 个自由度，全部是转动关节。首先，建立机器人腿部齐次坐标系，如图 4-3 所示。其中，建立在机器人右脚中心的坐标系 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ 是参考坐标系，建立在机器人躯干中心的坐标系 $O_6 - x_6 y_6 z_6$ 和建立在机器人左脚中心的坐标系 $O_{12} - x_{12} y_{12} z_{12}$ 是虚拟坐标系，并不依赖于关节自

由度，只作为一种计算时的参考，使计算结果更加直观。

在建立运动学方程时，将机器人两条腿分别视为两个串联机构，在求解机器人运动学方程时，摆动脚相对于支撑脚的运动即可视为机器人中心相对于支撑脚运动和摆动脚相对于机器人中心运动的叠加，大大简化了计算量。

机器人中心到参考坐标系的变换矩阵：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & p_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & p_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

式中：

$$\begin{aligned} {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & -13.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 44 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 9 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & -9 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 79.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 1 & 44 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 35 \\ 1 & 0 & 0 & -32 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由于上式结果过于复杂，不利于下一步的计算，希望将其化简。根据步态规划的方法，上身始终保持与地面垂直，可知：

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & p_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & p_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y1} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

由此可以得到关节转动角度之间的关系：

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0, \quad \theta_1 + \theta_5 = 0$$

以此对 0T_6 化简得到：

$$P_{x1} = 88 * S(\theta_1) - 45.5 - 9 * S(\theta_1)S(\theta_2 + \theta_3) + 60 * S(\theta_1)C(\theta_2) + 79.5 * S(\theta_1)C(\theta_2 + \theta_3) + 9S(\theta_1)S(\theta_2)$$

$$P_{y1} = -35 * S(\theta_5) - 9 * C(\theta_2 + \theta_3) - 79.5 * S(\theta_2 + \theta_3) + 9 * C(\theta_2) - 60 * S(\theta_2)$$

$$P_{z1} = 50 + 88 * C(\theta_1) + 79.5 * C(\theta_1)C(\theta_2 + \theta_3) + 9 * C(\theta_1)S(\theta_2) - 9C(\theta_1)S(\theta_3 + \theta_2) + 60 * C(\theta_1)C(\theta_2)$$

式中, S 表示 Sin, C 表示 Cos, 以后将一律采用此约定。

机器人摆动脚到机器人中心坐标系的变换矩阵:

$${}^6T_{12} = {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 {}^9T_{10} {}^{10}T_{11} {}^{11}T_{12} = \begin{bmatrix} n_{x2} & o_{x2} & a_{x2} & p_{x2} \\ n_{y2} & o_{y2} & a_{y2} & p_{y2} \\ n_{z2} & o_{z2} & a_{z2} & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

式中:

$$\begin{aligned} {}^6T_7 &= \begin{bmatrix} \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & -32 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & -35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^7T_8 &= \begin{bmatrix} \sin \theta_7 & \cos \theta_7 & 0 & -44 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_7 & -\sin \theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^8T_9 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & -\sin \theta_8 & 0 & 9 \\ \sin \theta_8 & \cos \theta_8 & 0 & -79.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^9T_{10} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_9 & -\sin \theta_9 & 0 & -9 \\ \sin \theta_9 & \cos \theta_9 & 0 & -60 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^{10}T_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_{10} & -\sin \theta_{10} & 0 & -44 \\ \sin \theta_{10} & \cos \theta_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^{11}T_{12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -15 \\ 1 & 0 & 0 & -13.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

同样根据步态规划的方法, 脚底始终保持与地面平行, 可知:

$${}^6T_{12} = \begin{bmatrix} n_{x2} & o_{x2} & a_{x2} & p_{x2} \\ n_{y2} & o_{y2} & a_{y2} & p_{y2} \\ n_{z2} & o_{z2} & a_{z2} & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x2} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y2} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

由此可以得到关节转动角度之间的关系:

$$\theta_7 + \theta_8 + \theta_9 = 0, \theta_6 + \theta_{10} = 0$$

化简得:

$$P_{x2} = -45.5 + 9 * S(\theta_6)S(\theta_7) - 9 * S(\theta_6)S(\theta_8 + \theta_7) - 88 * S(\theta_6) - 60 * S(\theta_6)C(\theta_8 + \theta_7) - 79.5 * S(\theta_6)C(\theta_7)$$

$$P_{y2} = -27/2 * C(\theta_{10}) - 9 * C(\theta_7 + \theta_8) + 60 * S(\theta_7 + \theta_8) + 9 * C(\theta_7) + 159/2 * S(\theta_7)$$

$$P_{z2} = -50 - 79.5 * C(\theta_6)C(\theta_7) - 60 * C(\theta_6)C(\theta_8 + \theta_7) - 88 * C(\theta_6) - 9 * C(\theta_6)S(\theta_8 + \theta_7) + 9 * C(\theta_6)S(\theta_7)$$

4.3.2 运动学方程的求解

由于机器人前向和侧向运动之间耦合较小，故将前向和侧向分开来求解^[41]，机器人行走的过程中，要保证机器人的重心移动到支撑腿上，重心的移动是通过双腿侧向关节的转动来实现的，如图 4-2 所示：

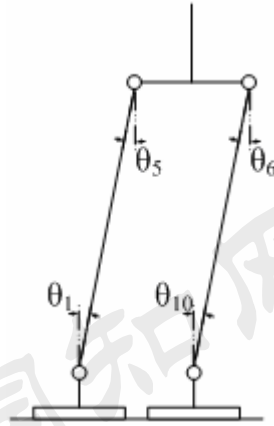


图 4-2 侧向关节运动

Fig.4-2 Lateral joint movement

在侧向运动求解时，假设机器人前向关节不运动，仅通过侧向关节的运动使机器人重心在两脚中心线内按正弦规律左右摆动，如图。由于机器人要保证身体始终与地面垂直，脚底始终与地面平行，故须保证 $\theta_1 = \theta_{10}$ ， $\theta_5 = \theta_6$ 且 $\theta_1 + \theta_5 = 0$ ， $\theta_6 + \theta_{10} = 0$ ，即： $|\theta_1| = |\theta_5| = |\theta_6| = |\theta_{10}| = \theta$

根据重心公式 3-1，得到机器人的重心：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g X_i}{\sum_{i=1}^n m_i g} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i l_i \sin \theta}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4-5)$$

分别根据启动步态（0~2s）、正常行走步态（2~4s）、停止步态（4~6s）的运动学方程求解关节角 θ 的变化曲线。

$$X = 45.5 \sin(\pi \times t/2) \quad t \in (0, 2s) \quad (4-6)$$

$$X = 45.5 \sin(\pi \times t) \quad t \in (2, 4s) \quad (4-7)$$

$$X = 45.5 \sin(\pi \times t/2) \quad t \in (4, 6s) \quad (4-8)$$

解得 θ 随时间 t 的运动曲线，见图 4-3。

机器人在行走过程中，两条腿交替向前迈出。前向运动由前向关节 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_7 、 θ_8 、 θ_9 的运动来实现，见图 4-4。考虑到运动的对称性，只计算一个步长周期内的前向关节运动曲线。下面分别根据启动步态、正常步

行步态、停止步态的运动学方程求解关节运动曲线。

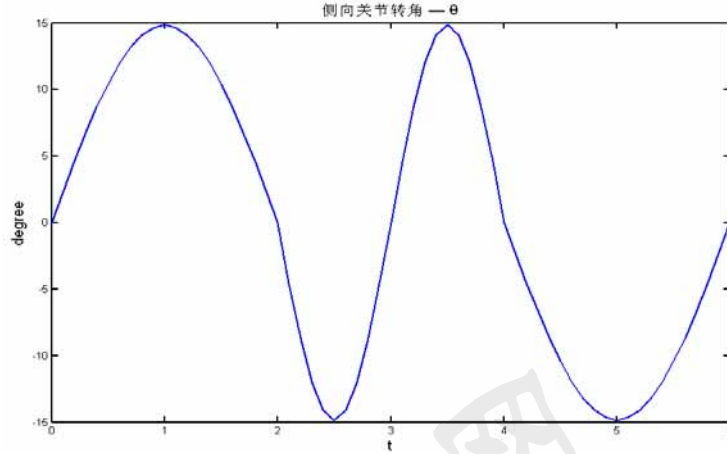


图 4-3 侧向关节运动曲线

Fig.4-3 The track of lateral joint

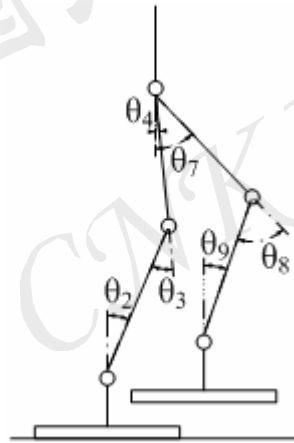


图 4-4 前向关节运动

Fig.4-4 Front joint movement

求解机器人前向运动关节曲线时，假设侧向关节不运动，即

$\theta_1=\theta_{10}=\theta_5=\theta_6=0$ 。对 0T_6 、 ${}^6T_{12}$ 进行化简：

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y1} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

式中：

$$\begin{cases} P_{x1} = -45.5 \\ P_{y1} = -9C(\theta_2 + \theta_3) - 79.5S(\theta_2 + \theta_3) + 9C(\theta_2) - 60S(\theta_2) \\ P_{z1} = 138 + 79.5C(\theta_2 + \theta_3) + 9S(\theta_2) - 9S(\theta_2 + \theta_3) + 60C(\theta_2) \end{cases}$$

$${}^6T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x2} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y2} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

式中：

$$\begin{cases} P_{x2} = -45.5 \\ P_{y2} = -27/2 - 9C(\theta_7 + \theta_8) + 60S(\theta_7 + \theta_8) + 9C(\theta_7) + 159/2S(\theta_7) \\ P_{z2} = -138 - 79.5C(\theta_7) - 60C(\theta_7 + \theta_8) - 9S(\theta_7 + \theta_8) + 9S(\theta_7) \end{cases}$$

启动阶段：

启动阶段机器人需要完成两个动作，首先下蹲降低重心，再向前迈出半步，来完成由静止状态向正常行走阶段的转化。

θ_2 、 θ_3 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y1} = 0 \\ P_{z1} = 277.5 - 15t \end{cases} \quad t \in (0, 1s) \quad (4-11)$$

$$\begin{cases} P_{y1} = 30t \\ P_{z1} = 252.5 \end{cases} \quad t \in (1, 2s) \quad (4-12)$$

θ_7 、 θ_8 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y2} = 0 \\ P_{z2} = -277.5 + 15t \end{cases} \quad t \in (0, 1s) \quad (4-13)$$

$$\begin{cases} P_{y2} = 60t \\ P_{z2} = 252.5 \end{cases} \quad t \in (1, 2s) \quad (4-14)$$

正常行走阶段：

机器人双腿交替迈出，脚底与地面始终平行，考虑到运动的对称性，左腿在前一步长周期内的运动曲线和右腿在后一步长周期内的运动曲线相同，

故仅对一个步长周期内的步态进行规划。

θ_2 、 θ_3 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y1}=60t \\ P_{z1}=252.5 \end{cases} \quad t \in (2,3s) \quad (4-15)$$

θ_7 、 θ_8 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y2}=0 \\ P_{z2}=-252.5+15\sin(2\pi t) \end{cases} \quad t \in (2,3s) \quad (4-16)$$

停止阶段：

可以视为起动阶段的反演运动，同样需要完成两个动作，首先向前迈出半步，再升高重心，恢复到原来的初始位置，完成由正常行走阶段向静止状态的转化。

θ_2 、 θ_3 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y1}=30t \\ P_{z1}=252.5 \end{cases} \quad t \in (4,5s) \quad 4-16)$$

$$\begin{cases} P_{y1}=0 \\ P_{z1}=252.5+15t \end{cases} \quad t \in (5,6s) \quad (4-16)$$

θ_7 、 θ_8 关节运动轨迹可以用方程组描述：

$$\begin{cases} P_{y2}=60t \\ P_{z2}=-252.5 \end{cases} \quad t \in (4,5s) \quad (4-16)$$

$$\begin{cases} P_{y2}=0 \\ P_{z2}=-252.5-15t \end{cases} \quad t \in (5,6s) \quad (4-16)$$

求解上述方程得到 θ_2 、 θ_3 、 θ_7 、 θ_8 的运动曲线，且有 $\theta_2+\theta_3+\theta_4=0$ 、 $\theta_7+\theta_8+\theta_9=0$ 可以得到 θ_4 、 θ_9 运动曲线。由于运动的对称性， θ_2 、 θ_3 、 θ_4 在 $t \in (3,4s)$ 的运动曲线与 θ_7 、 θ_8 、 θ_9 在 $t \in (2,3s)$ 的运动曲线相同，同样， θ_7 、 θ_8 、 θ_9 在 $t \in (3,4s)$ 的运动曲线与 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 在 $t \in (2,3s)$ 的运动曲线相同。

将在三种步态下得到的关节运动曲线连接起来，就得到前向关节在一个完整的步态周期内的运动曲线，见图 4-5。

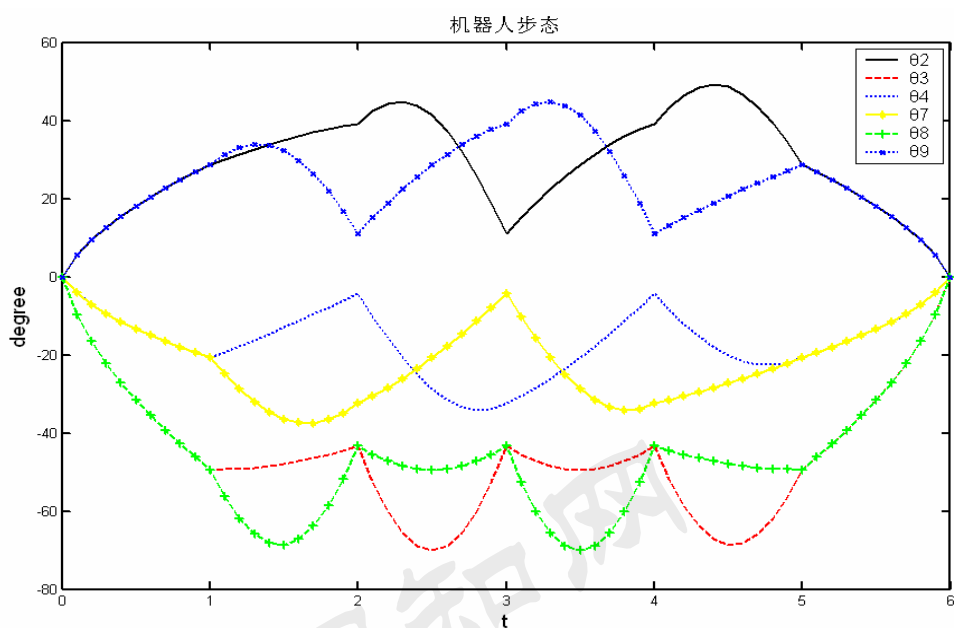


图 4-5 前向关节运动轨迹

Fig.4-5 The track of front joint

4.4 关节运动轨迹修正

将得到的关节运动曲线直接用于控制微型伺服马达转动，还不能很好的实现机器人的稳定步行，需要将这些曲线作进一步的修正。

4.4.1 误差分析

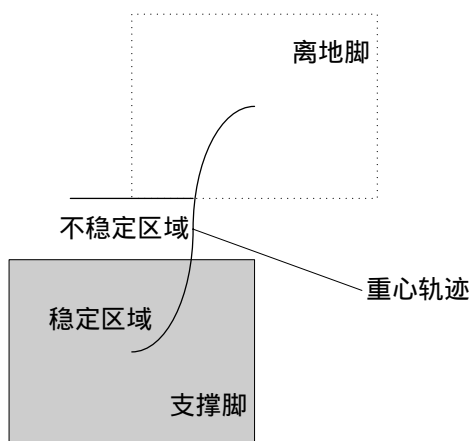


图 4-6 单脚支撑期

Fig.4-6 One feet support phase

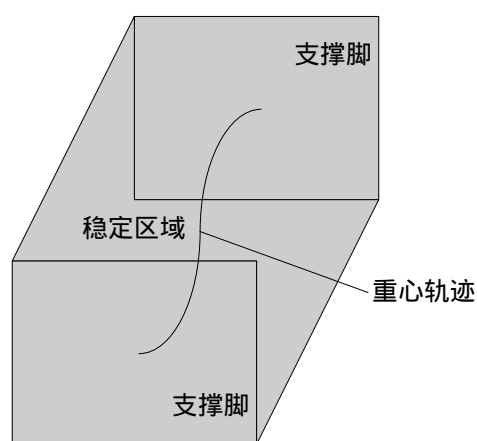


图 4-7 双脚支撑期

Fig.4-7 Two feet support phase

在上述步态规划中，由于前向关节和侧向关节同时动作，两者之间的耦合使机器人重心摆动到两腿中间附近区域内脱离稳定区域，如图 4-6 所示。为了使重心始终保持在稳定区域内，需要使重心摆动到两腿中间附近区域时机器人处于双脚支撑期，如图 4-7 所示。

同时为脚底设置稳定裕量，由于机器人重心在前向上不存在脱离稳定区域的问题，只在横向上有可能脱离稳定区域，故取脚底宽度的 80% 为有效稳定区域，其余为临界稳定区域，如图 4-8 所示。

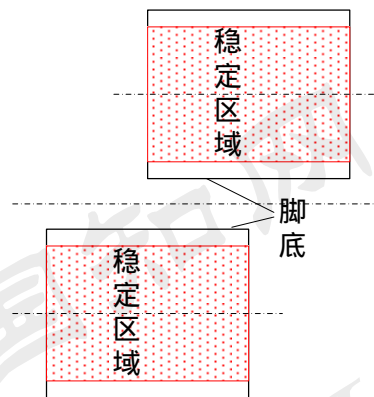


图 4-8 脚底稳定区域

Fig.4-8 The steady area of sole

通过研究机器人处于单脚支撑期时，侧摆运动对重心位置的影响，发现在启动阶段的末尾 0.2s 的时间内、正常行走阶段的始末 0.1s 的时间、中间 0.2s 的时间内；停止阶段的初始 0.2s 的时间内，机器人重心脱离了稳定区域。如图 4-9 所示。

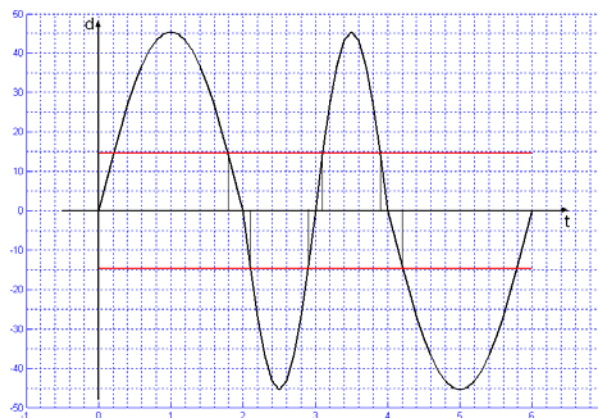


图 4-9 重心超出稳定区域的时刻

Fig.4-9 The in-steady period of cg

4.4.2 轨迹修正

对于重心脱离稳定区域的解决方法就是在这些时间段内，使机器人处于双脚支撑期。根据重心脱离了稳定区域的时间，可以在重心摆动到左右脚中心时侧向关节暂停相应的时间以等待前向关节的运动，前向关节在双脚支撑期同样暂停相应的时间以等待侧向关节的运动。通过修正后，各关节运动曲线如图 4-10 所示。

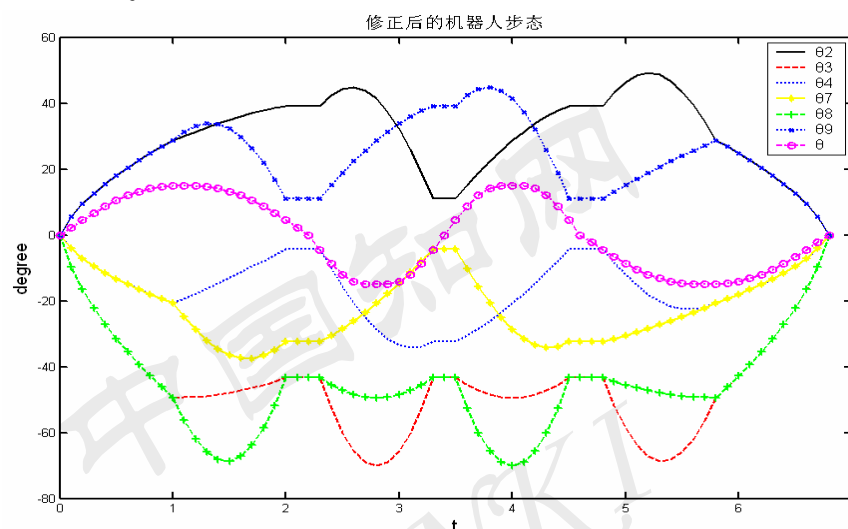


图 4-10 修正后的关节运动轨迹

Fig.4-10 The track of joint after amend

修正后重心的运动轨迹如图 4-11、4-12 所示：

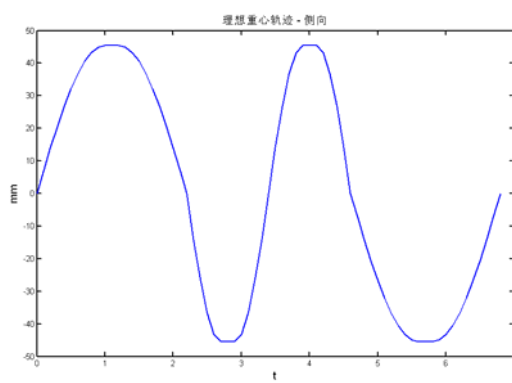


图 4-11 X 方向重心轨迹

Fig.4-11 The track of cg on X axis

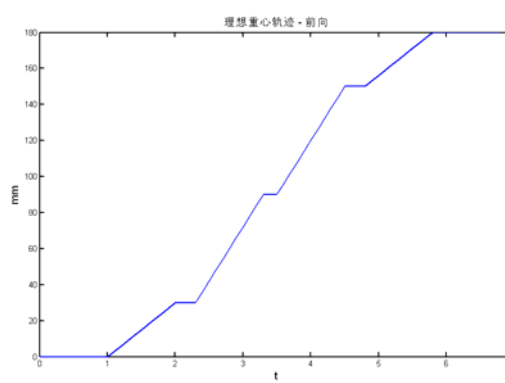


图 4-12 Y 方向重心轨迹

Fig.4-12 The track of cg on Y axis

通过修正，使机器人步行在保证稳定的前提下，运动更加同流畅。同时由于前向、侧向关节在每个步态周期内都有一段等待时间，有利于消除由落

脚冲击引起的积累误差。

4.5 MATLAB 仿真

为了验证步态规划的可行性和有效性，在 MATLAB 环境下，建立机器人二维杆件模型，根据得出的关节运动曲线，分别对机器人侧向摆动和前向运动进行仿真，如图 4-13 及 4-14 所示。从仿真结果可以看出，所求得的关节运动曲线实现了规划的步态。

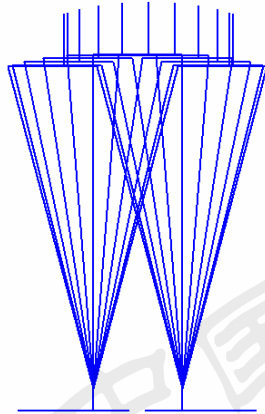


图 4-13 侧向运动仿真

Fig.4-13 Simulation of lateral movement

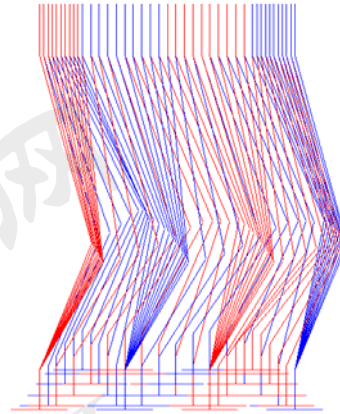


图 4-14 前向运动仿真

Fig.4-14 Simulation of front movement

4.6 本章小结

应用第三章提出的三步规划法，为机器人规划行走步态：

第一步中，规划机器人行走的姿态及轨迹。其中包括：

1. 机器人躯干始终保持与地面垂直；
2. 行走过程中，髋关节距离地面高度保持不变（Z 方向高度不变）；
3. 机器人中心在地面投影为正弦曲线；
4. 机器人采用平行步态，双脚轨迹始终保持平行；
5. 离地脚 Z 方向的运动轨迹为正弦曲线；
6. 脚掌始终保此与地面平行。

第二步通过运动学分析，建立运动学方程，将机器人行走姿态及轨迹转化为关节转角曲线。

第三步对得到的关节运动曲线进行修正，在保证步行稳定的前提下，使机器人运动更加流畅。

第5章 仿真及实验结果分析

5.1 引言

如果按照传统的产品研发过程，通过试制机器人物理样机，并对样机进行反复的修改后定型，需要耗费大量的时间和资金。而通过虚拟样机技术，在制造机器人物理样机之前就可进行样机的测试，发现潜在的问题。这样可以简化机器人的研发设计过程、缩短研发周期、节省研发费用，大幅度的提高设计质量^[42,43]。

三维实体建模软件 SolidWorks 是美国 SolidWorks 公司研制的三维工程设计软件。该软件可以实现复杂的产品设计、高性能的大型装配、计算质量特征等功能，最大限度的满足设计者的设计意图。

科学计算软件 Matlab 是美国 Math Works 公司推出的大型科学计算及工程运算软件。Matlab 内建 600 多种数学运算函数，是集数值计算、符号运算及图形处理等功能于一体的科学计算软件。

虚拟样机仿真软件 ADAMS 是美国 MDI 公司开发的针对机械系统运动学和动力学进行仿真的专用软件。ADAMS 集建模、计算和后处理为一体，是目前功能最为全面的机械系统仿真软件。

通过上述三种软件之间的接口可以进行虚拟样机模型的联合仿真。虚拟样机仿真证明所规划的步态可行后，再利用物理样机进行实验。

5.2 虚拟样机仿真

首先在 SolidWorks 中建立虚拟样机模型，将模型导入 Adams 中，通过 Matlab 中得到的关节运动曲线控制虚拟样机各关节的运动。利用 SolidWorks-Matlab -Adams 进行联合仿真^[44]。

5.2.1 建立虚拟样机模型

建立虚拟样机模型和建立物理样机模型的道理相同，要尽量简化模型。在满足虚拟样机仿真运动的完整性的同时，应尽量减少模型的零件数量。在最初的仿真分析建模时，不必过分追求构件几何形体的细节于实际一致，因为这往往要花费大量的建模时间，而此时的关键是能够顺利地通过仿真并获得初步的实验数据及结果^[45]。从原理上看，只要虚拟样机模型的质量、质

心、转动惯量等物理参数和实际构件相同，仿真结果与物理样机就是等价的。

由于 ADAMS 软件本身的建模功能较为薄弱，在 SolidWorks 中建立虚拟样机模型，见图 5-1。该模型将机器人实体进行简化为杆件模型，并按照机器人各构件的实际质量配置简化模型的质量，使简化模型获得于机器人实体相同的物理参数。

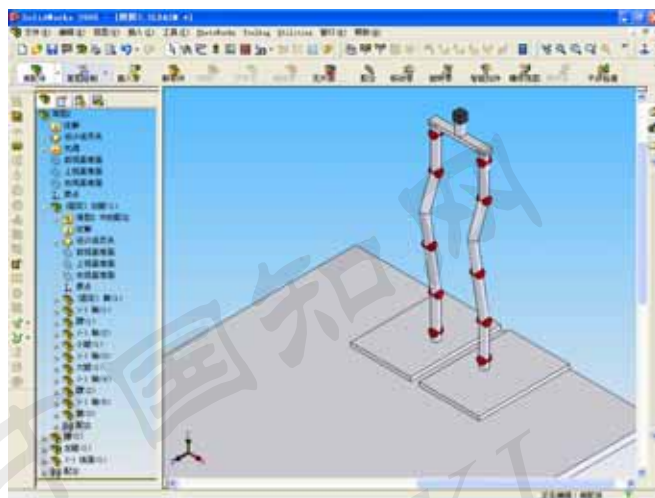


图 5-1 SolidWorks 中机器人简化模型

Fig.5-1 The simple model of robot in SolidWorks

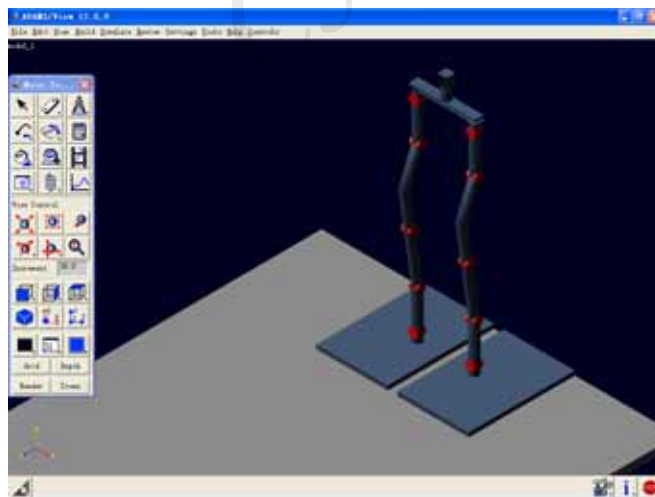


图 5-2 Adams 中虚拟样机模型

Fig.5-2 The dummy model of robot in Adams

通过 SolidWorks 和 Adams 之间的接口，将简化模型导入 Adams 中，见

图 5-2。对模型添加约束、运动副、驱动力，并定义脚底与地面之间的摩擦力。

将在 Matlab 中计算得到的机器人各关节运动曲线导入 Adams 中生成样条曲线 (Spline)，并用得到的样条曲线控制相应关节转动。至此，整个虚拟样机模型建立完成^[46,47]。

5.2.2 仿真结果分析

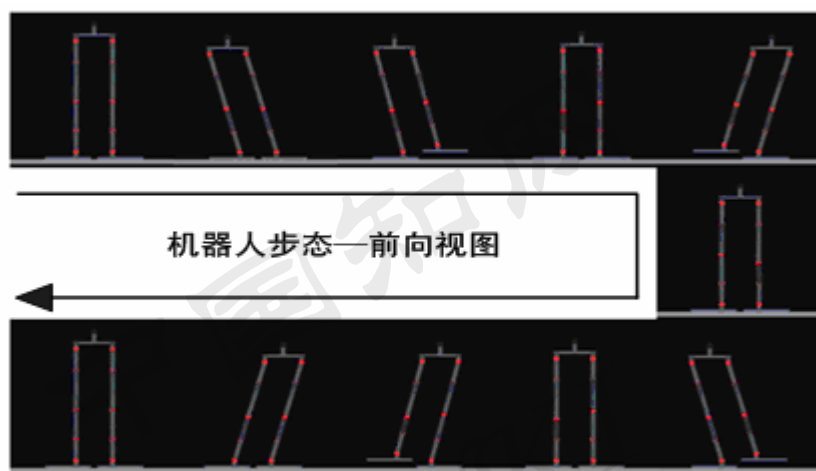


图 5-3 虚拟样机行走动画前向视图

Fig.5-3 The front view of dummy model gait

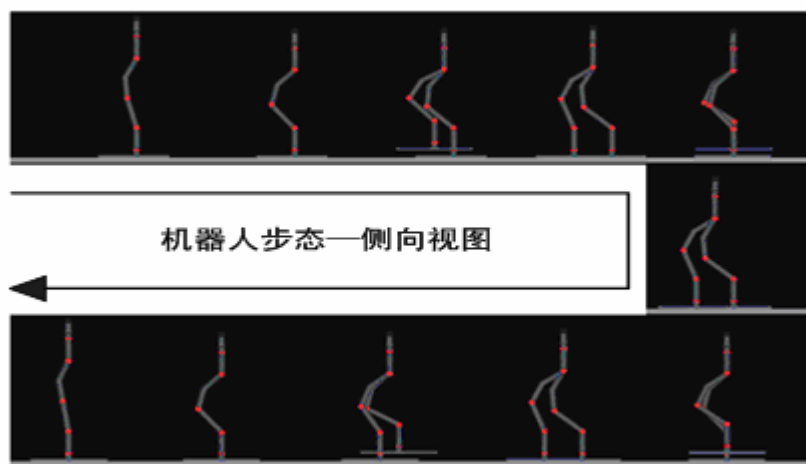


图 5-4 虚拟样机行走动画侧向视图

Fig.5-4 The side view of dummy model gait

设定仿真时间及步长后开始进行仿真，在 Adams 中自动生成虚拟样机的行走动画，如下图所示。图 5-3 为虚拟样机行走动画前向视图的关键帧，图 5-4 为虚拟样机行走动画侧向视图的关键帧。观察仿真动画，可以看到机器人能够按照所规划的步态行走，并且能够保持稳定。

对虚拟样机行走数据进行定量测量，首先根据重心公式，在 Adams 中通过编写重心计算函数表达式，得到重心在 X、Y、Z 方向的位置变化曲线，见图 5-5、5-6、5-7。与理想重心轨迹（见图 4-18、4-19）相比较，重心在 X、Y 方向的实际运动轨迹均与理想重心轨迹吻合较好，重心在 Z 方向的运动轨迹有小幅波动，波动幅度在 5mm 之内，不影响机器人稳定行走。

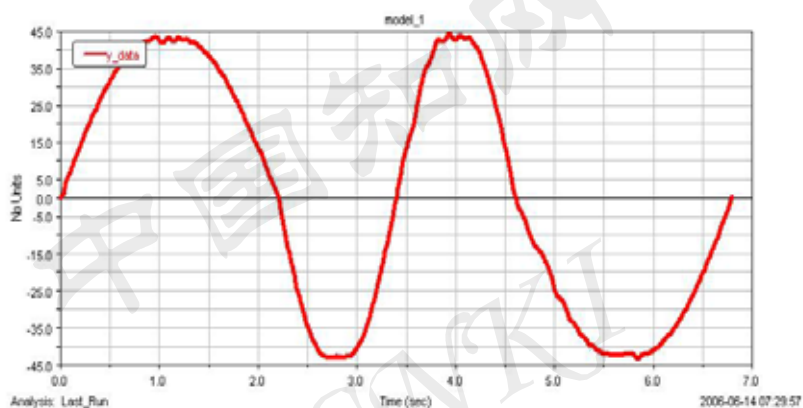


图 5-5 重心 X 方向位置变化

Fig.5-5 The movement of cg on X axis

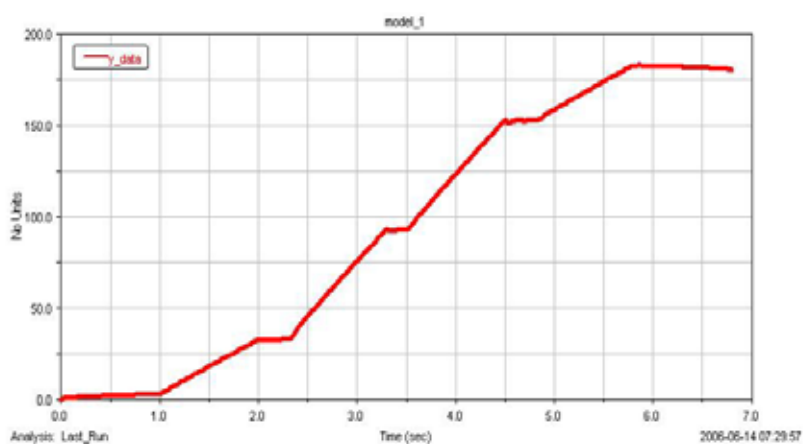


图 5-6 重心 Y 方向位置变化

Fig.5-6 The movement of cg on Y axis

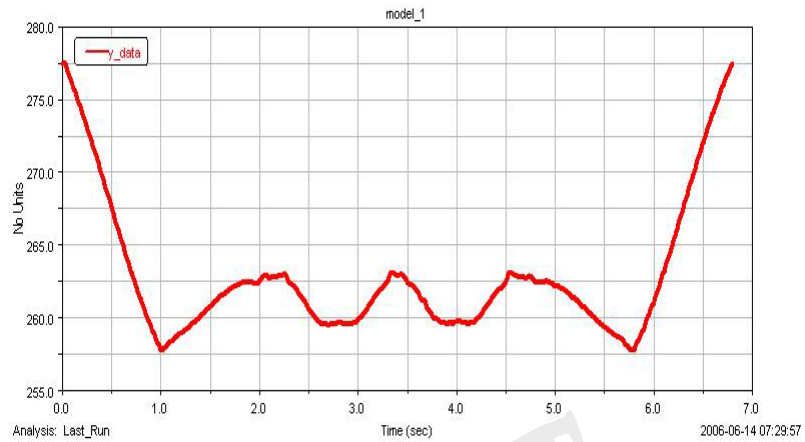


图 5-7 重心 Z 方向位置变化

Fig.5-7 The movement of cg on Z axis

在 Adams 中测量左脚在 Y 方向和 Z 方向的位置变化曲线，见图 5-8，5-9。右脚在 Y 方向和 Z 方向的位置变化曲线，见图 5-10，5-11。获得的曲线均与规划的轨迹吻合较好。

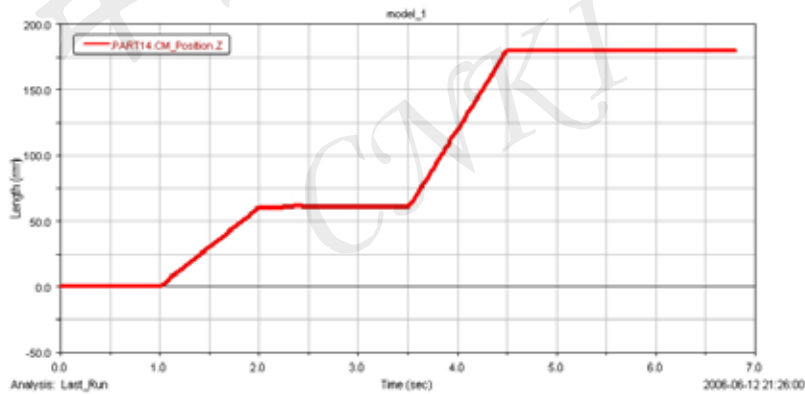


图 5-8 左脚 Y 方向位置变化

Fig.5-8 The movement of left feet on Y axis

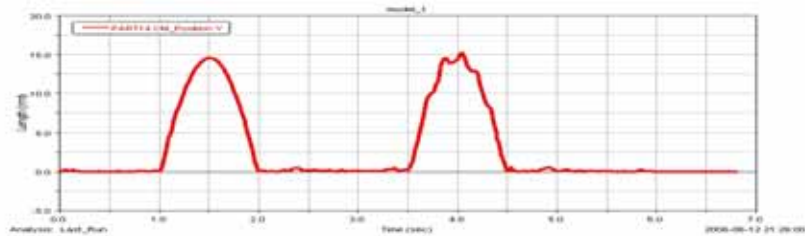


图 5-9 左脚 Z 方向位置变化

Fig.5-9 The movement of left feet on Z axis

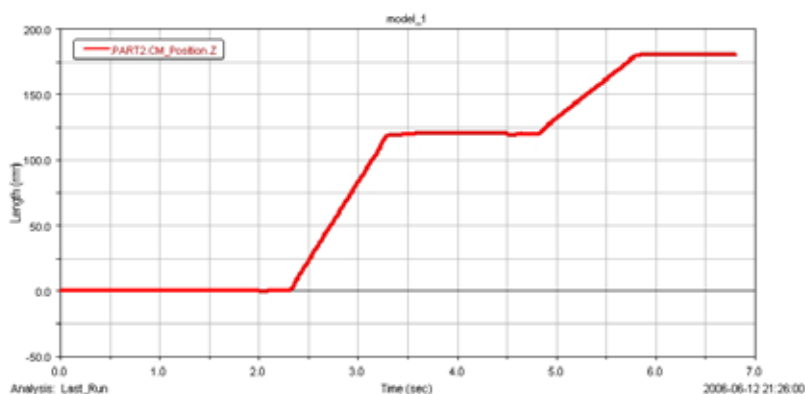


图 5-10 右脚 Y 方向位置变化

Fig.5-10 The movement of right feet on Y axis

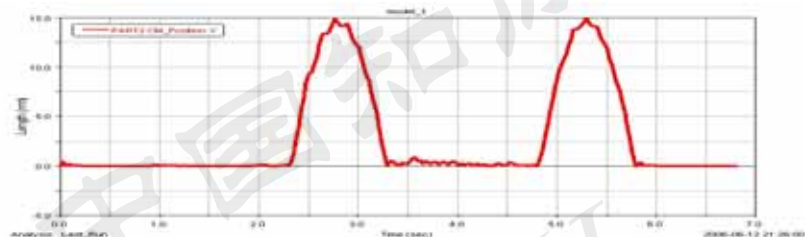


图 5-11 右脚 Z 方向位置变化

Fig.5-11 The movement of right feet on Z axis

由于在虚拟环境中机器人脚底与地面均被设置为刚体，故在相互接触时有振动冲击，且这种振动会随时间而累加。体现在仿真数据上使得曲线有波动、不光滑。为了解决这一问题，可以通过给机器人物理样机脚底装上橡胶垫来减小冲击、吸收振动。

除此之外，通过建立的虚拟样机模型，可以得到机器人行走时各个关节转动角度、角速度、角加速度；重心以及任意构件的位置、速度、加速度；关节扭矩以及脚底与地面的接触力等许多运动学、动力学参数，为进一步的研究打下基础。

5.3 物理样机实验

在虚拟样机获得良好步态前提下，利用物理样机进行实验。首先将规划的机器人关节运动曲线转换成微型伺服马达可以识别的 PWM 信号，输入至控制板。控制板在不同时刻向各个微型伺服马达发送脉冲信号控制机器人各关节运动，形成机器人行走步态。实验效果良好，图 5-12 是机器人行走录像的关键帧。



图 5-12 机器人行走录像的关键帧

Fig.-12 The movie of dummy physical model gait

机器人行走过程中，通过脚底压力传感器实时采集脚底压力信号，并通过公式 2-2 计算实际 ZMP 的位置，得到机器人行走时实际的 ZMP 轨迹，如图 5-13。

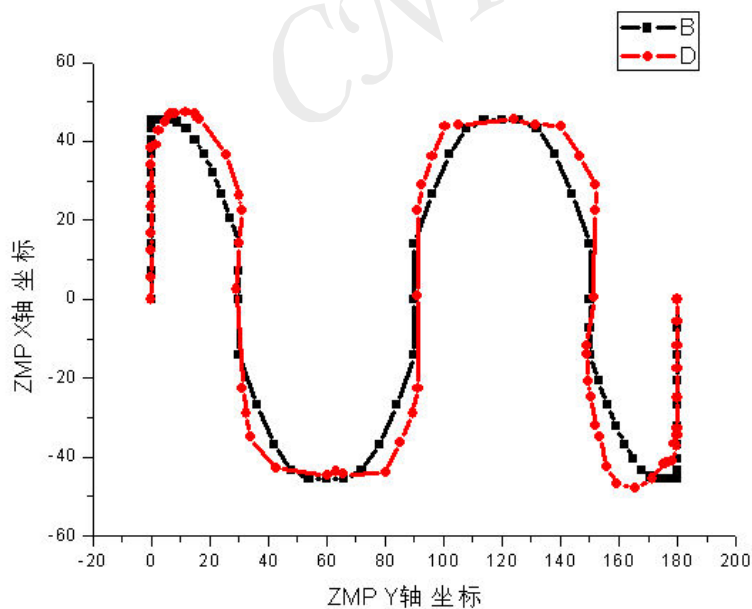


图 5-13 理想 ZMP 与实际 ZMP 轨迹

Fig.-13 The expect ZMP and practical ZMP

从图中可以看到，机器人行走时实际的 ZMP 轨迹与规划的理想 ZMP 轨迹还存在一定的差别。产生这一问题的原因主要有以下四个方面^[48]：

1. 在步态规划时对 ZMP 公式进行了简化；
2. 理想模型与机器人物理样机总有一定的误差，无法精确描述；
3. 控制驱动系统在复现步态规划的结果时，总有一定的误差；
4. 机器人所处的环境，与步态规划中的理想环境存在一定的偏差。

为了解决这一问题，使机器人行走时实际 ZMP 轨迹与规划的理想 ZMP 轨迹相吻合，需要对机器人在线调整方法作进一步研究，通过上肢肩部两关节的运动对 ZMP 进行实时的补偿。

5.4 本章小结

利用 SolisWorks、Adams 和 Matlab，对机器人进行联合仿真的结果表明，采用三步规划法所规划的机器人行走步态是可行的，机器人在该步态下可以实现稳定的行走。建立虚拟样机模型，也为下一步的工作提供了一种高效、可行的手段。在今后的研究中，完全可以在此虚拟样机模型的基础上进行仿真、分析。

在双足人形机器人步态规划的研究过程中，由于建立虚拟样机的方法可以在建模过程中突出重点研究内容，具有速度快、操作方便、节省资金等优点。目前，通过建立虚拟样机模型进行仿真实验对研究内容进行分析及验证已成为一种普遍的方法。

结论

课题研制了一种小型双足人形机器人样机，并在此基础上对双足步行机理进行研究。论文的主要工作及取得的成果如下：

1. 研制出了小型双足人形机器人样机 Robocean，该机器人高 530mm，重 2.05kg，下肢具有 10 个自由度，上肢 6 个自由度，头部 1 个自由度。机器人脚底装有压力传感器用以检测行走时的实时压力信号，并据此计算实际的 ZMP 位置。头部集成视觉传感器、听觉传感器以及发声单元。Robocean 为今后研究步态规划方法、控制算法提供了平台。并可以以此为平台对机器人的视觉及语音处理开展进一步的研究。

2. 通过对机器人步态规划方法的研究，在以往两步规划法的基础上提出了三步规划法。首先，以人类行走步态数据 HMCD 为指导，对机器人行走时姿态及轨迹进行规划，解决了自由度冗余的问题。其次，对机器人模型进行运动学分析，针对行走的三种步态分别建立运动学方程，求解方程得到机器人各关节的运动曲线。最后通过第三步对关节运动轨迹的修正，消除了由于前向运动和侧向运动同时进行而产生的耦合，使机器人在保证稳定的前提下，获得流畅的行走步态。

3. 利用虚拟样机技术，建立 Robocean 虚拟样机模型。通过 SlidWorks、Matlab 及 Adams 的联合仿真，得到虚拟样机前向行走的三维仿真动画及实验数据，验证了机构设计及步态规划方法的可行性。最后利用规划的步态控制 Robocean 行走，进一步验证理论研究的正确性和有效性。

结合已完成的工作情况，对下一步的工作展望如下：

1. 通过 Robocean 头部的视觉、语音传感器，进一步研究智能步态，使机器人可以通过图像及语音的识别处理，实现自主避障等功能。

2. 以 Robocean 作为平台，应用神经网络和遗传算法研究机器人步态，通过训练使其能够更好的适应环境。

参考文献

1. 谢涛, 徐建峰, 张永学, 强文义. 仿人机器人的研究历史、现状及展望. 机器人, 第 24 卷第 4 期, 2002 年 7 月
2. 包志军, 马培荪, 姜山, 程君实, 王春雨. 从两足机器人到仿人型机器人的研究历史及其问题. 机器人, 第 21 卷第 4 期, 1999 年 7 月
3. Kazuo Tanie. Humanoid Robot and its Application Possibility. IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems 2003: 213-214
4. Hirai K, Hirose M. The development of Honda humanoid robot. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 1998: 1321-1326
5. Yoshiki Sakagami, Ryujin Watanabe, Chiaki Aoyama. The intelligent ASIMO: System overview and intergration. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002: 2478-2483
6. Joel Chestnutt, Manfred Lau, et al. Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005: 629-634
7. Fujita M, Kuroki Y, Ishida T, et al. A small humanoid robot SDR-4X for entertainment applications. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2003: 938 - 943.
8. Tatsuzo Ishida, Yoshihoro Kurolud. Development of Sensor System of a Small Biped Entertainment Robot. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2004: 648-653
9. Jung-Hoon Kim, Jun-Ho Oh. Walking Control of the Humanoid Platform KHR-1 based on Torque Feedback Control. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2004: 623-628
10. Noriyuki Kanchira, Toshikazu Kawasaki, et al. Design and Experiments of Advanced Leg Module (HRP-2L) for Humanoid Robot (HRP-2) Development. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002: 2455-2460

11. Huang Q, et al. A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped Robot. Procof ICRA, 1999: 65-71.
12. 马宏绪, 张彭. 两足步行机器人研究. 高技术通讯, 1995, 5(9):17-20
13. 胡凌云, 孙增坎. 双足机器人步态控制研究方法综述. 计算机研究与发展, 2005, 42(5): 728-733
14. 窦瑞军, 马培荪, 谢玲. 两足机器人步态的参数化设计及优化. 机械工程学报, 第 38 卷第 4 期, 2002, 4
15. Sardain P, Rostami M, Thomas E, et al. Biped robots: Correlations between technological design and dynamic behavior. Control Engineering Practice, 1999;7(3): 401-411
16. 毛勇, 王家廛, 庄新彦, 丘振. 基于气动人工肌肉的双足机器人关节设计. 电子技术应用, 2006 年第 3 期
17. 臧克江, 顾立志, 陶国良. 气动人工肌肉研究与展望. 机床与液, 2004 年第 4 期
18. Lu-Ping Chao, Ching-Yan Yin. The six-component force sensor for measuring the loading of the feet in locomotion. Materials and Design, 1999: 237-244
19. Li Q H, Takanishi A, Kato I. Biped walking robot having a ZMP measuring system using universal force moment sensors. NASA Technical Memorandum, 1990: 1568 - 1573.
20. 胡洪志, 马宏绪. 一种双足步行机器人的步态规划方法. 机器人技术与应用, 2002 年第 3 期
21. 张伟, 杜继宏. 双足步行机器人的步态规划. 计算机工程与应用, 2002 年 13 期
22. 张永学, 麻亮, 强文义. 基于地面反力的双足机器人期望步态轨迹规划. 机器人, 第 23 卷第 6 期, 2001 年 11 月
23. 竺长安, 张彭. 两足步行机器人步态轨迹优化设计的可行方法. 计算机技术与自动化, 第 8 卷第 2 期, 1989
24. 刘清, 陈明哲, 张启先. 步行机器人的步态选择与静态平衡. 机器人, 12 卷第 3 期, 1990
25. 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. 机器人, 1997, 19(3):180-185
26. 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.

- 机器人, 1997, 19(3):180-185
27. MIURA H, SHIMOYAMA I. Dynamic walking of a biped. International J of Robotics Research, 1984,3(2): 60-74
 28. 陈立新. 两足步行机器人步态及运动稳定性分析. 现代机械, 1995 年 3 月第 1 期
 29. 蒙运红, 傅详志. 两足步行机器人动态步行规化及仿真. 华中理工大学学报, 第 27 卷第 3 期, 1999 年 3 月
 30. 刘延住, 徐俊. 人体步行的稳定性. 应用力学学报, 1996. 13(4): 22-27
 31. 张瑞红, 金德闻, 张济川, 王人成, 马琳. 不同路况下正常步态特征研究. 清华大学学报(自然科学版), 2000 年第 40 卷第 8 期: 77-80
 32. 周云松, 裴以建, 余江, 池宗琳. 双足行走机器人步态轨迹规划. 云南大学学报(自然科学版), 2006; 28 (1): 20 ~ 26
 33. 包志军, 马培荪, 仝建刚. 人行走速度规律的实验研究. 实验室研究与探索, 2000; (6): 39-42
 34. Valery B. Kokshenev. Dynamics of Human Walking at Steady Speeds. Physica review letters volume 93, Number 20, 2004 年 12 月
 35. 陈东辉, 佟金, 李重焕, 张书军, 陈秉聪. 人和动物的步态与步行机器人. 林大学学报 (工学版), 第 33 卷第 4 期, 2003 年 10 月
 36. 张瑞红, 金德闻, 张济川, 王人成, 马 琳. 不同路况下正常步态特征研究. 清华大学学报(自然科学版), 2000 年第 40 卷第 8 期: 77-80
 37. 石宗英, 徐文立, 冯元琨, 方海军. 仿人型机器人动态步行控制方法. 哈尔滨工业大学学报, 第 33 卷第 1 期, 2001 年 2 月
 38. 窦瑞军, 马培荪. 基于 ZMP 点的两足机器人步态优化. 机械科学与技术, 第 22 卷第 1 期, 2003 年 1 月
 39. 杨东超, 汪劲松, 刘莉, 陈恳. 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划. 机器人, 23 卷第 6 期, 2001 年 11 月
 40. 蔡自兴. 机器人学. 清华大学出版社. 2000 年 9 月
 41. Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, ec al. Planning Walking Patterns for a Biped Robot. IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 17, No. 3, 2001
 42. 杨东超, 汪劲松, 刘莉, 陈恳. Adams 在拟人机器人研究中的运用. 机器人技术与应用, 2001 年第 4 期
 43. 王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践. 西北

工业大学出版社, 2002

44. 李军, 刑俊文, 覃文洁. ADAMS 实例教程. 北京理工大学出版社, 2002
45. 陈新荣, 余跃庆, 姜春福, 刘迎春. 基于虚拟样机的机器人仿真. 北京工业大学学报, 第 30 卷 第 1 期, 2004 年 3 月
46. 荣学文, 吴利宁, 李云江, 樊炳辉. 基于 ADAMS 的机器人三维实体动画仿真. 煤矿机械, 2004 年第 2 期
47. M W Walker, D E Orin. Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanisms. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1982;104:205~211
48. 徐凯, 陈恳, 刘莉, 杨东超. 基于六维力/力矩传感器和关节力矩的仿人机器人步态补偿算法. 机器人, 28 卷第 2 期, 2006 年 3 月

攻读学位期间发表的学术论文

1. 张博, 杜志江, 孙立宁, 董为. 双足机器人步态的离线规划方法. 机器人 (已投稿)
2. 张博, 杜志江, 孙立宁, 董为. 基于 Solidworks、Matlab 及 Adams 的双足步行机器人运动仿真. 系统仿真学报(已投稿)
3. 孙立宁, 张博, 杜志江. 双足机器人步态规划方法研究综述. 哈尔滨工业大学学报(已投稿)
4. 孙立宁, 吕广明, 张博. 5-DOF 康复机械手臂的运动学分析及仿真. 哈尔滨工业大学学报 (已录用)
5. Dong Wei, Sun lining, Du zhijiang, Zhang Bo. A Compliant Ultra-Precision 6-DOF Parallel Positioner Based on the Coarse/Fine Dual Architecture , IEEE NTC Review of Advances in Micro, Nano and Molecular Systems. (已录用)
6. Dong Wei, Sun lining, Du zhijiang, Zhang Bo. A Compliant Ultra-Precision 6-DOF Parallel Positioner Based on the Coarse/Fine Dual Architecture, Proceedings of IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. (已录用)
7. Sun lining, Zhao Jianwen, Du zhijiang, Zhang Bo. Self-Motion Analysis on a Redundant Robot with A Parallel/Series Hybrid Configuration. Proceedings of Ninth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. (已投稿)

哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《小型双足人形机器人机构设计与步态规划》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字： 日期： 年 月 日

哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《小型双足人形机器人机构设计与步态规划》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

哈尔滨工业大学硕士学位涉密论文管理

根据《哈尔滨工业大学关于国家秘密载体保密管理的规定》，毕业论文答辩必须由导师进行保密初审，外寄论文由科研处复审。涉密毕业论文，由学生按学校规定的统一程序在导师指导下填报密级和保密期限。

本学位论文属于 保密 ，在 年解密后适用本授权书
不保密

(请在以上相应方框内打“ ”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

致谢

感谢孙立宁教授对作者的不倦教诲。孙老师渊博深厚的专业知识、敏锐深刻的学术洞察力、勤政务实的工作作风和精益求精的工作态度使学生受益匪浅、终生难忘！

在攻读硕士学位期间，作者始终得到杜志江老师的悉心指导，杜志江老师在工作、生活上给与作者极大的帮助。在论文完成之际，谨向杜志江老师致以衷心的感谢！

在课题进行期间，富历新老师、纪军红老师、吴冬梅老师等诸位实验室老师，给予了作者热情的指导和帮助，并提出了许多宝贵的意见和建议。在此致以诚挚的谢意！

感谢博士生董为、赵建文等诸位师兄的指导，对课题的顺利进行起到了极大地促进作用！同时，感谢硕士生余杭杞、马凌宇、赵博等诸位同窗好友的无私帮助。

感谢家人多年来对作者的支持与厚爱！

最后，向对本论文进行评审的各位老师致谢！