

工学博士学位论文

四足机器人稳定行走规划及
控制技术研究

王鹏飞

哈尔滨工业大学

2007 年 12 月

国内图书分类号：TP242.2

国际图书分类号：681.5

工学博士学位论文

四足机器人稳定行走规划及 控制技术研究

博士研究生：王鹏飞

导师：孙立宁教授

申请学位：工学博士

学科、专业：机械电子工程

所在单位：机电工程学院

答辩日期：2007年12月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP242.2

U.D.C: 681.5

Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering

RESEARCH ON QUADRUPED ROBOT
STEADILY WALKING PLANNING AND
CONTROLLING TECHNOLOGY

Candidate:	Wang Pengfei
Supervisor:	Prof. Sun Lining
Academic Degree Applied for:	Doctor of Engineering
Speciality:	Mechatronics Engineering
Date of Defense:	December, 2007
University:	Harbin Institute of Technology

摘 要

在地球陆地表面,有超过 50% 以上的面积为崎岖不平的山丘或沼泽,仅仅依靠轮式机械无法完全实现在这些自然环境中的移动。因此,设计和制造一个类似动物能够在自然环境中步行的机器,一直以来是人类追求的目标。正是这个原因,使得仿生足式机器人的研究成为机器人研究领域的热点之一。其中四足机器人由于其既有超于二足机器人的平稳性又避免了六足机器人机构的冗余和复杂性,在工程探险、反恐防爆、军事侦察等具有良好的应用前景,开展该方面的研究具有重要的实际应用价值及社会意义。

本课题所研究的对象为足轮混合式四足机器人,其能很好的结合轮式机器人和足式机器人的优点,根据不同的环境变换轮式运动和足式运动两种运动方式,达到良好的运动灵活性和较高的移动速度的统一。论文主要针对两种运动形式中轮足锁定条件下的足式运动开展研究,在运动学分析、稳定性评价方法、步态规划、足力控制、嵌入式控制系统设计等方面寻求实用有效的设计方法。

四足机器人具有时变的运动拓扑结构,论文首先针对机器人运动学特点及要求,提出了串并联结合分析的方法,分别对摆动腿及支撑腿的逆运动学进行了分析,解决了多足机器人无法建立整体运动学的问题。同时,为了准确的评定足式机器人的行走稳定性,论文采用支撑面压力中心至各足支撑点构成的多边形各边的最短距离来作为稳定性判定准则,并由此引出了重心最小稳定距离概念及相应的稳定裕度评定方法,讨论了干扰项、重心高度、支撑面姿态以及机器人质量等参数与稳定裕度的关系。

在四足动物步态一般性描述框架下,根据不同的步态参数取值,结合机器人自身结构特点,论文规划了针对非平坦路面的间歇爬行步态和针对平坦路面的协调爬行步态,并对两种步态在稳定裕度、步行柔顺性等方面进行了对比仿真分析。最后对转弯步态和摆动足轨迹进行了规划,为机器人步态实验提供了理论依据。

针对非结构环境,为了保持四足移动机器人躯体的预定位姿,并实现摆动足从自由空间到约束空间的良好过渡,本文建立了四足移动机器人的整体受力模型和虚拟悬挂模型,采用承载能力最优的约束条件对机器人足力分配

进行了优化，提出了基于足力补偿的机器人躯体位姿偏差修正算法。同时论文结合改进的基于位置的阻抗控制策略，实现了摆动足从摆动相到支撑相的良好过渡和期望的足力跟踪问题。由于基于足力的机器人控制策略避免了计算复杂的多足机器人多刚体动力学，因而具有较高的实时性和可行性。

最后，研制了四足机器人嵌入式分级递阶多关节运动控制系统，针对关节负载非线性特性，嵌入式系统采用带自调整权函数的模糊控制规则，实现了良好的关节速度跟踪。控制系统的集成化为足式机器人的离线控制奠定了基础。同时开展了关节速度位置跟踪测试、单足阻抗控制实验以及机器人在不同环境的间歇爬行步态、协调爬行步态行走实验，实验证明了理论分析的正确性。

关键词 四足机器人；稳定性；步态规划；虚拟悬挂；阻抗控制；

Abstract

About fifty percent of the surface of earth is covered by dene, marish, massif and so on. Though researchers have invent many kinds of wheeled machine, designing and manufacturing a legged robot like myriapod running in natural environment is still a huge challenge. So researches on legged robot have been always an important branch of robot field. Because of the stronger loading capacity and better stability than biped mobile robot as well as simpler structure than hexapod robot and eight-legged robot, research of quadruped mobile robot has glamorous future as platform for application of medical services, environmental monitoring, terrorism prevention, and other related areas.

In view of the robot running environment, the structure of multi-motion mode, four legs and wheeled foots are adopted in this vehicle system. This robot can well combine the priorities of wheeled robot and legged robot, change motion mode to stability walking or fast wheeled driving according to different environments, so realize both flexibility and higher speed. This thesis focuses on quadruped motion research and seeks practical and efficient designing methods in the fields of kinematics analysis, stability criterion, gaits planning, foot force control and emebded control system.

Because of changing motion topology structure of quadruped robot, the inverse kinematics of swing leg and supporting leg are studied by combining series and parallel analysis methods. At the same time, in order to exactly evaluate the robot stability and stability margin while walking, one general criteria is proposed, which adopts the minimal distance from supporting edge to center of pressure on ground to estimate robot walking stability. For convenience, the conception of minimal stability distance λ_{\min} is introduced and the relations between stability and parameters such as disturb elements, height of center of gravity, obliquity of supporting plane and mass of robot are discussed.

Based on the combination of characteristic analysis of animal gait and our robot structure, discontinuous crawl gait for uneven surface and coordinated crawl gait for even surface are proposed with different gait variable value. Meanwhile, two kinds of gaits are compared and analyzed by simulation in the aspect of stability margin and body compliance. At last, turning gait and sway track planning is introduced which provides theory base for later experiments.

To maintain quadruped robot scheduled posture on rough terrain and realize good transition of sway leg from free space to constraints space, the whole force

model and virtual suspension model of quadruped robot is established. The foot force distribution is optimized and robot posture amending algorithm is proposed based on foot force compensating. Besides, the paper applies improved impedance control based on foot position to make legs achieve good transition from sway status to supporting status and expected force tracking. Such methods avoid computing complicated multi-body dynamics, so has characteristics of high real-time and feasibility.

Finally, the embedded hierarchical control system of quadruped robot is proposed. In view of nonlinear of joint load, the embedded controller adopts algorithm of fuzzy regulation with modifiable function and realizes good joint speed tracking. The integration of control system lays the foundation for quadruped robot remote control. At the same time, several experiments such as joint speed and position tracking experiment, one leg impedance experiment, walking experiments on even and uneven plane are carried out. The experiment result confirmed the validity of the designing and theoretical analysis of the robot system.

Keywords quadruped robot, stability, gait planning, virtual suspension, impedance control

目 录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 足式机器人系统的研究发展现状及分析	2
1.2.1 足式机器人的发展现状	2
1.2.2 轮足式机器人的发展现状	8
1.3 足式机器人稳定行走关键技术研究综述	10
1.3.1 步态规划研究综述	10
1.3.2 稳定性评价方法研究综述	13
1.3.3 运动控制策略研究综述	15
1.4 课题来源及本文的研究内容	17
第 2 章 四足机器人运动学研究 with 稳定性分析	20
2.1 四足机器人运动学分析	20
2.1.1 拓扑结构分析	21
2.1.2 单腿串联运动学分析	22
2.1.3 躯体并联运动学分析	24
2.1.4 雅克比矩阵方程	25
2.2 工作空间仿真	26
2.2.1 摆动腿工作空间	26
2.2.2 躯体工作空间	27
2.3 四足机器人稳定性评价方法	28
2.3.1 支撑面压力中心方程	29
2.3.2 稳定性分析与判定准则	31
2.3.3 仿真与分析	33
2.4 本章小结	34
第 3 章 四足机器人稳定行走步态规划	35
3.1 步态描述的基本定义	35
3.2 四足动物步态分析	37
3.3 四足机器人爬行步态规划与仿真研究	40

3.3.1	间歇爬行步态规划与仿真	40
3.3.2	协调爬行步态规划与仿真	43
3.3.3	两种步态对比分析	45
3.4	转弯步态规划	46
3.5	摆动足轨迹规划	47
3.6	本章小结	49
第 4 章	四足机器人足力控制方法研究	50
4.1	四足移动机器人力学模型	51
4.2	基于虚拟悬挂模型的躯体姿态保持	54
4.2.1	虚拟悬挂模型	54
4.2.2	足力补偿	55
4.2.3	仿真分析	56
4.3	四足移动机器人足力阻抗控制	58
4.3.1	阻抗控制原理	58
4.3.2	机器人足阻抗控制	59
4.3.3	足与地面接触等效模型	60
4.3.4	基于阻抗控制的力跟踪	62
4.3.5	仿真分析	64
4.4	本章小结	65
第 5 章	四足机器人分级控制系统研究	66
5.1	多足机器人控制体系	66
5.2	嵌入式多关节伺服控制器的研究	67
5.2.1	控制系统设计要求	67
5.2.2	嵌入式控制系统总体设计	68
5.2.3	单腿控制驱动设计	70
5.2.4	单电机控制驱动设计	72
5.3	伺服控制器软件策略	73
5.3.1	基于自适应模糊控制的速度跟踪	73
5.3.2	实时性控制策略	75
5.3.3	通讯协议	76
5.4	本章小结	78
第 6 章	四足机器人实验研究	79
6.1	四足机器人实验系统介绍	79

6.2 关节速度跟踪实验	81
6.2.1 驱动模块基本特性测试	81
6.2.2 关节速度跟踪特性实验	83
6.3 单足阻抗控制实验	84
6.4 行走实验	86
6.4.1 平坦路面协调步态行走实验	86
6.4.2 非平坦路面间歇步态行走实验	87
6.5 本章小结	91
结 论	92
参考文献	94
攻读博士学位期间所发表的学术论文	102
哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明	103
哈尔滨工业大学博士学位论文使用授权书	103
致 谢	104
个人简历	105

Contents

Abstract (In Chinese)	I
Abstract(In English).....	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Motivation.....	1
1.2 Research Overview of the Legged Robot System.....	2
1.2.1 Research Overview of Legged Robot	2
1.2.2 Research Overview of Wheeled-Leg Robot.....	8
1.3 Research Overview of Quadruped Robot Steadily Walking	10
1.3.1 Gaits Planning	10
1.3.2 Stability Measure Methods.....	13
1.3.3 Strategies of Motion Control	15
1.4 Research Contents	17
Chapter 2 Analysis on Kinematics and Stability Measure Method	20
2.1 Analysis on Kinematics	20
2.1.1 Motion Topology Structure Analysis	20
2.1.2 Serial Inverse Kinematics Analysis for Sway Leg.....	22
2.1.3 Parallel Inverse Kinematics for Supporting Legs	24
2.1.4 Jacobi matrix	25
2.2 Analysis and Simulation on Working Space	26
2.2.1 Sway leg Working Space.....	26
2.2.2 Body Working Space.....	28
2.3 Analysis on Stability Measure Method	28
2.3.1 Center of Pressure Equation.....	29
2.3.2 Stability Analysis and Measure Criterion	31
2.3.3 Simulation and Analysis.....	33
2.4 Summary.....	34
Chapter 3 Crawl Gaits Planning for Quadruped Robot	35
3.1 Gaits Variable Definition.....	35
3.2 Analysis on Quadruped Animals Gaits	37

3.3	Statically Crawl Gaits Planning and Simulation	40
3.3.1	Discontinuous Crawl Gait Planning and Analysis	40
3.3.2	Coordinated Crawl Gait Planning and Analysis	43
3.3.3	Comparison on Two Kinds of Gaits	45
3.4	Turning Gait Planning	46
3.5	Sway Foot Track Planning.....	47
3.6	Summary.....	49
Chapter 4	Foot Force Control Methods of Quadruped Robot.....	50
4.1	Whole Force Model of Quadruped Robot.....	51
4.2	Body Posture Control Based on Virtual Suspension Model	53
4.2.1	Virtual Suspension Model.....	54
4.2.2	Force Compensation.....	55
4.2.3	Simulation and Analysis.....	56
4.3	Impedance Control on Foot Force.....	57
4.3.1	Impedance Control Theory.....	58
4.3.2	Impedance Control of Robot Foot.....	59
4.3.3	Touching Model between Foot and Environment	60
4.3.4	Force Tracking Based on Impedance Control.....	62
4.3.5	Simulation and Analysis.....	64
4.5	Summary.....	65
Chapter 5	Research on Robot Hierarchical Control System	66
5.1	Polypod Robot Control System	66
5.2	Embedded Servo Controller Research of Multi-Joint	67
5.2.1	Requirement for Quadruped Robot Control.....	67
5.2.2	General Design on Embedded Control system	68
5.2.3	Control Design for One Leg.....	70
5.2.4	Control Design for One Motor.....	72
5.3	Servo Controller Software Design	73
5.4.1	Speed Tracking based on Adaptive Fuzzy Control	73
5.4.2	Real-time Control Design	75
5.4.3	Communication Protocol	78
5.4	Summary.....	78
Chapter 6	Research on Experiments for Quadruped Robot.....	79

6.1	Quadruped Robot Introduction.....	79
6.2	Joint Speed Tracking Experiment.....	81
6.2.1	Basic Features Test on Driving modular	81
6.2.2	Joint Speed Tracking Experiment	83
6.3	One Leg Impedance Experiment	84
6.4	Walking Experiments	86
6.4.1	Walking Experiment on Even Plane.....	86
6.4.2	Walking Experiment on Uneven Plane	87
6.5	Summary.....	90
	Conclusion	92
	References	94
	Publications.....	102
	Statement Of Copyright.....	103
	Letter Of Authorization	103
	Acknowledgement.....	104
	Resume	105

第1章 绪论

1.1 课题背景

从 1920 年，“机器人”一词诞生；到 1962 年，真正意义上的工业机器人出现；再到 1980 年，工业机器人广泛的应用于工业现场；直至二十一世纪的今天，与人类发展的漫长历史相比，机器人的发展经历了近百年的时间，但对人类的影响却超乎人类历史上的任何一个百年。随着机器人技术的逐步完善，适于特殊作业的机器人种类也日益增多。近年来，作为机器人技术发展的一个重要分支，服务机器人成为机器人学中十分活跃的研究领域。未来的服务机器人将在人类不能或难以到达的已知或未知环境里为人类工作^[1,2]。国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020）中明确提出了我国智能服务机器人的发展战略，明确提出“智能服务机器人是在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术集成的智能化装备”。以服务机器人和危险作业机器人应用需求为重点，研究设计方法、制造工艺、智能控制和应用系统集成等共性基础技术^[3]。从目前的发展趋势来看，人们对服务机器人提出了更高的要求。人们要求机器人不仅适应原来结构化的、已知的环境，更要适应未来发展中的非结构化的、未知的环境。服务机器人的应用领域也已经从导游、安防等平坦环境应用进一步扩展到工程探险、反恐防爆、军事侦察等复杂环境的应用。

在地球陆地表面，有超过 50% 以上的面积为崎岖不平的山丘或沼泽，不适合轮式或履带式机械在其上行走^[4]。然而，在这些地区却遍布奔驰着各种各样的自然界的生物。人类虽然已经发明了坦克、汽车以及许多能够产生运动的机械，但设计和制造一个类似人和动物能够在自然环境中步行的机器，仍然是人类面临的极大挑战。传统的轮式机器人具有较高的运动速度，但是避障能力和非平坦环境下移动性能不够。足式机器人与轮式机器人相比速度较低，但优点是其可以利用孤立的地面支撑而不是轮式机械所需的连续地面支撑^[5]，因此其对行走路面的要求很低，可以以非接触方式规避障碍，或用跨步方式跨越障碍；它可攀登阶梯，迈过溪流，跋涉沼泽等等。这些特点是

目前任何一种机械的运动方式无法与之相比的,因而使得步行运动的研究一直是机器人研究领域的一个热点,几十年始终激励着科学家们锲而不舍地努力探索步行的奥秘。就足式机器人仿生原型来看,足式机器人主要有二足、四足、六足三种主流型号。而四足机器人由于其既有超于二足机器人的平稳性又避免了六足机器人机构的冗余和复杂性,在整个步行机器中占有很大比重,因此对仿生四足步行机器人的研究具有很重要的意义。受到人类“步行”和“轮滑”两种运动形式的启发,论文针对足轮结合式四足机器人系统展开研究,该系统能很好的结合轮式机器人和足式机器人的优点,根据不同的环境变换轮式运动和足式运动两种运动方式,达到良好的运动灵活性和较高的移动速度的统一。从应用平台角度来看,足式运动是该系统能否满足实际应用的技術瓶颈,因此,论文主要针对两种运动形式中的足式运动重点开展研究,在运动学分析、稳定性评价方法、步态规划、足力控制、嵌入式控制系统设计等方面寻求实用的设计方法,为工程探险、反恐防爆、军事侦察提供良好的移动应用平台。

1.2 足式机器人系统的研究发展现状及分析

针对不同的应用领域、不同的操作需要,足式机器人系统的移动结构形式也大相径庭。从足式机器人仿生原型来看,足式机器人主要有二足、四足、六足三种主流型号。近年来,由于足式机器人移动速度较慢的缺点,国内外学者针对足轮混合式机器人系统也开展了研究。论文首先对单纯足式机器人和足轮混合式机器人两种系统的发展现状进行综述。

1.2.1 足式机器人的发展现状

四足移动机械的研究最早可以追溯到四世纪,人们设计了一个四条腿的木制机构来帮助运载沉重的货物。从那时起,很多设计研究相继出版,但一直仅停留在设计阶段。早期的步行机器人限于当时的计算机发展水平控制系统由逻辑电路组成。后来才有计算机作为控制器进行变更步行模式的控制。两个早期的实现代表是G.E 四足电控步行车(图 1-1)^[6]和Poney四足机构^[7],其控制系统由逻辑电路组成,在操作者的控制下机器人能够跨越障碍。限于当时的计算能力,它以人为中心控制器。1977 年, Frank和McGhee完成了世界

上第一台多足机器人。McGhee的机器人关节由逻辑电路组成的状态机控制，每个状态由前一个状态触发，这使得机器人行为受到限制，只能呈现固定的运动形式^[8]。然而，它开启了计算机控制机器人步态的大门。直到 20 世纪 80 年代，随着计算机技术的快速发展，四足移动机械的相关研究获得了飞跃式发展。科学家们受昆虫等多足生物步行运动的启发，研制了由计算机控制的静态稳定多足步行机器人。这些机器人在任何时候都能在支撑腿的支撑作用下保持静态平衡，非支撑腿(摆动腿)可移动至新的立足位置，并进行支撑腿转换，呈新的稳定平衡状态，完成步行运动。控制器的设计理念是基于传感器反馈控制腿的运动，以确保腿移动到新的状态，因而能够实现非常鲁棒的运动(如腿向前运动碰到障碍会避开并寻找新的落足点等)。TITAN， PV-II 等都是当时发展过程中的代表性研究。

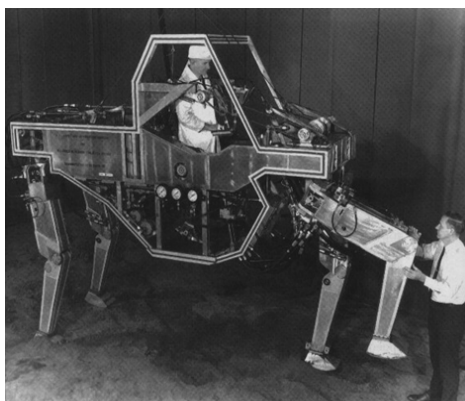


图 1-1 GE 四足电控步行车

Figure 1-1 GE quadruped electrical machine

表 1-1 为人类在步行机器人技术发展过程中的几个重要里程碑。

表 1-1 步行机器人技术发展的里程碑

Table 1-1 Milestones in the development of legged robot

时间	研究学者	研究成果
1968	Mosher	GE 的四足步行车在人的操纵下完成步行行为
1968	Frank 和 McGhee	实现了 Phony Pony 的移位逻辑控制器步行控制
1977	McGhee	使用数字计算机协调六足机器的人腿运动
1980	Hirose 和 Umetani	四足机器人使用简单的传感器和类似反射控制的简单控制方法，实现了爬越阶梯和越过障碍的步行
1983	Raibert	单腿跳跃机器人
1997	Honda	发布自主两足步行机器人

人和动物的运动能力和执行指定任务的能力是移动机器人追求的目标，因此就机器人仿生原型来看，主要有二足、四足、六足三种主流型号。其中，日本本田的Honda P3 代表了双足移动机器人研究领域的最高水平^[9]。在四足和六足这两种型号中，国外重点开始该方向项目的研究已持续十几年，且不断投入资金进行新的立项。下面用几款代表研究前沿的四足和六足机器人来分析多足移动机器人的发展现状和趋势。

图 1-2 所示是德国 1998 年开发的四足机器人BISAM^[10]。该机器人结构由主体、四条腿和头部组成。机器人总重 14.5 公斤，内部装有微控制器、处理器、电池以及立体摄像头。机器人四条腿完全相同，每条腿分为四个部分，之间用三个平行的转动关节互连。第四个转动关节连接腿部和躯干。该机器人通过三级控制结构对控制任务进行了分担，三级结构为由西门子高性能单片机C167 负责单腿运动控制、由嵌入式系统PC104 负责多腿协调控制、由外部高性能PC机负责人机接口交互。PC104 与外部高性能PC机通过无线局域网进行通信^[11]。BISAM还具有两个摄像头，可识别障碍物的形状和距离，并对数据作了简化处理，从而实现了实时性。BISAM的行走完全不需要人来参与，可实现自适应行走^[12~14]。应该说BISAM是四足机器人中比较有代表性的研究成果，尤其它的硬件结构给了我们很大的启示。

1995 年，巴黎机器人实验室成功研制了RALPHY四足气动机器人（图 1-3）。该款机器人可以在崎岖的地面上稳定的行走，但由于需要进行大量计算，行使速度受到了一定的限制。该款机器人每条腿上具有两个转动关节，采用气缸的形式驱动^{[15] [16]}。气缸驱动具有出力大、速度快的特点，因此，研究者尝试开展动态行走方面的研究。但在实用化过程中常常受到气源的限制，机器人独立运行时间较短。

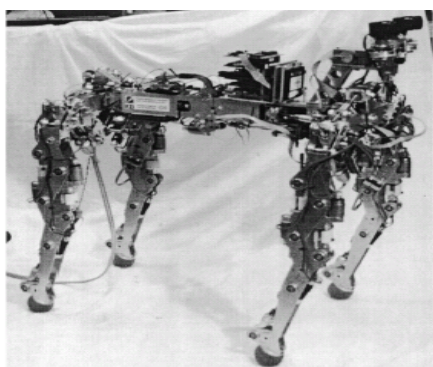


图 1-2 四足行走机器人 BISAM

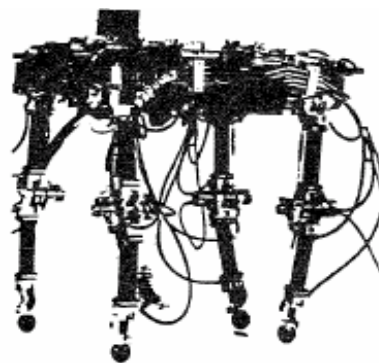


图 1-3 四足气动机器人 RALPHY

Figure 1-2 Quadruped robot BISAM

Figure 1-3 Quadruped air-actuated robot RALPHY

日本东京工业大学从事四足移动机器人研究已有 20 余年,从 1979 年第一代的PV-II开始到最新的TITAN-VIII^[17](图 1-4)一共研制了十多个型号的机器人^[18~20],该课题组一直从事四足机器人的研究,而且认定无论是从实用的角度还是从静态稳定行走的角度考虑,机器人都应该保证三足以上。其中最有借鉴意义的是TITAN-VIII,该款机器人共售出约 40 套给日本的多个大学和研究所作为应用开发的平台。该款机器人每足具有三个自由度,其中大腿关节具有前后转动和上下转动两个自由度,膝关节具有一个上下转动自由度。采用新型的电机驱动和绳传动,重量约 40 公斤,有效负载 5-7 公斤,行走速度决定于负载情况,一般在 0.3m/s到 0.9m/s之间变化。TITAN-VIII足底装备有传感器和信号处理系统,可自动检测与地接触的状态。姿态传感器和姿态控制系统根据传感器信息作出决策,实现在不平地面的静态稳定运行。同时TITAN-VIII的腿能作为有力的工作臂,用于探测地雷和进行排雷操作^[21]。

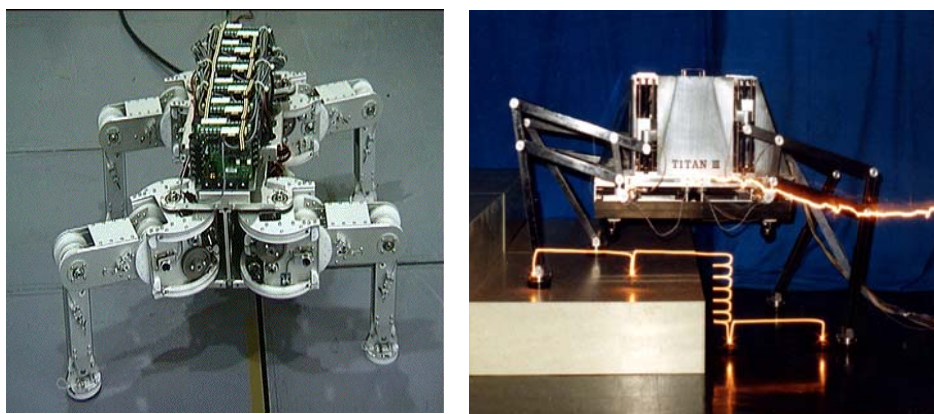


图 1-4 TITAN 系列四足移动机器人

Figure 1- 4 Quadruped robot TITAN series

2003 年日本电气通信大学的Hiroshi Kimura等研制成功四足移动机器人Tekken^[22,23],如图 1-5 所示,该机器人安装了陀螺仪、倾角计和触觉传感器。采用基于中枢模式发生器(CPG)的控制器和反射机制构成控制系统,其中CPG用于生成机体和四条腿的节律运动,而反射机制通过传感器信号的反馈,来改变CPG的周期和相位输出, Tekken能适应中等不规则地面环境。

从以上几款四足机器人看,有一个共同的特点,即单腿具有三个自由度。国外一些六足仿生机器人也大都采用单足三自由度结构,早在 1993 年,卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)大学计算机科学研究研发中心开始研究六足行走机器人LAURON I。紧接着 1994 年LAURON II也相继被开发除来。LAURON II由主身体、六条腿和头部组成(图 1-6),主体上具有微控制器、能量供给单元和

三维摄像头。由于所有的部件均固定在机器上，LAURON II能够实现完全自主。LAURON II重 16 公斤，长宽均为 70cm，最大负载 19 公斤，最快速度 0.5m/s^[24]。

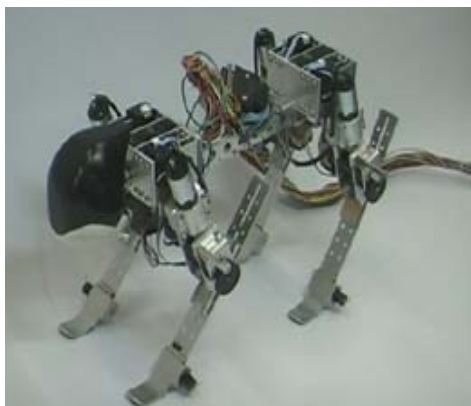


图 1- 5 四足移动机器人 Tekken
Figure 1- 5 Quadruped robot Tekken



图 1- 6 LAURON I 六足移动机器人
Figure 1- 6 Hexapoda robot LAURON I

德国杜伊斯堡大学从 1992 年开始研制第一代机型仿竹节虫六足机器人 TarryI及二代机型TarryII（见图 1-7），该款机器人自重 2.9Kg，有效负载 2Kg。值得借鉴的是它的行走姿态和步态，TarryII可以前进、后退、侧行和以组合步态行走在不平路面。根据每条腿摆动、支撑的相对相位的不同，能够组合多宗步态。其利用超声波传感器来感知大的障碍物并进行有效避障，利用脚部传感器和腿的行动受阻来感知小的障碍物并爬越或回避^[25]。



图 1- 7 TarryI 和 TarryII 六足仿生移动机器人
Figure 1- 7 Hexapoda robot TarryI and TarryII

足式机器人在崎岖路面具有很强的越障能力和运动灵活性，这是其他非足式机器人所不能相及的，但其移动速度不够，针对这一问题，国外正在积极开发飞奔型(gallop)四足移动机器人^[26,27]，尚处于研发阶段。

近几年来,我国在多足移动机器人领域逐渐展开研究。1997年,上海交通大学信息存储研究中心也设计开发了JTUWM-III型四足机器人(图 1-8) [28~30]。JTUWM-III型动态步行机器人腿为开链式关节型结构,膝关节为一纵摇自由度,髋关节为纵摇和横摇两个自由度。各自由度由直流电机经谐波齿轮驱动,用电位器、测速电机作为位置和速度传感器。机器人长 \times 宽 \times 高为81cm \times 75cm \times 30cm,重37.5kg,脚底为直径12cm的圆盘,是一个被动的纵摇自由度。该机器人是目前足式机器人的经典结构。

近年来,华中科技大学针对足式机器人技术的开展了积极的研究^[31],并在多足步行机器人技术的发展上也取得了较大的成果。图 1-9 为华中科技大学研制的“4+2”多足步行机器人^[32]。而所谓“4+2”是指步行机器人在复杂步行区域最多可利用六条腿来实现稳健的步行运动,而在工作区域又可作为具有两条上臂的四足机器人。因此,该机器人不仅具有步行移动的基本功能而且可借助相应的末端执行上具,如机械手臂来完成指定的作业任务,体现机器人的多功能性。

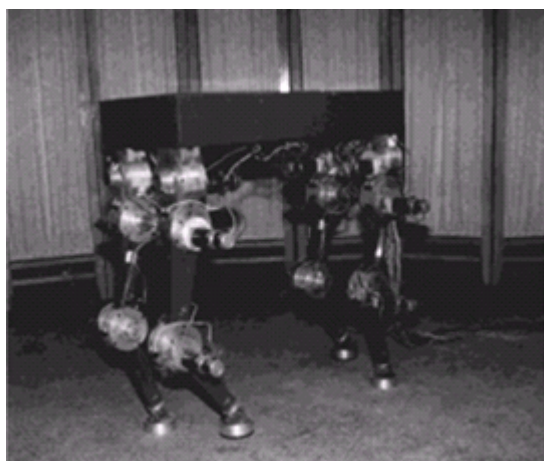


图 1-8 JTUWM-III 型四足机器人

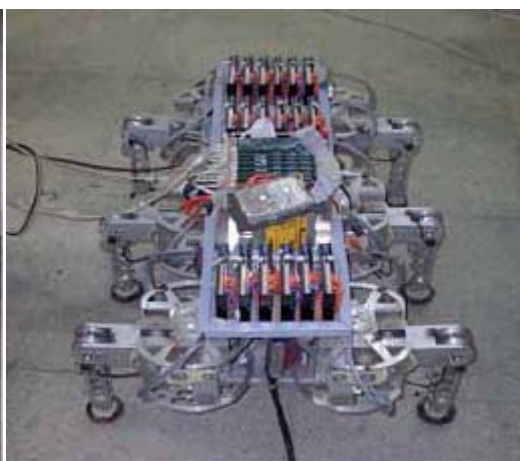


图 1-9 “4+2”多足步行机器人

Figure 1- 8 Quadruped robot JTUWM-III Figure 1- 9 “4+2” multi-leg robot

从上述介绍的几款足式机器人典型的实验系统平台可以看出,足式机器人有较好的运动灵活性和环境适应性,但是在平坦路面上的运动速度缓慢。目前国内外在该领域已经开发了多款机器人系统,国内在足式行走相关理论的研究尚落后于国外,系统平台尚不成熟。

1.2.2 轮足式机器人的发展现状

尽管轮式机器人在不平路面或非结构环境下的移动性能不够，但在平坦路面，轮式机器人相比足式机器人其具有较高的移动速度和一定的越障能力，所以若结合足式机器人和轮式机器人的优点开发可变运动方式机器人是一种不错的解决方案，近年来国外学者在在轮足式机器人方面也进行了大量的研究。

图 1-10 所示为瑞典联邦工学院 2000 年开发的一款太阳能动力足轮混合式机器人 Shrimp III^[33]。机器人采用六足基本结构，在每条腿的末端安装有主动轮。开发者针对机器人腿的被动适应型机构进行了深入研究，通过腿的自适应性使得机器人的轮式运动获得良好的越障性能。由于腿关节并没有主动关节，机器人的移动主要依靠驱动轮来执行，因此严格的说，该款机器人仍属于轮式机器人。

2002 年，瑞典联邦工学院开发了另外一款具有被动适应性的越障型足轮式机器人 Octopus，如图 1-11 所示。该款机器人长 43cm，宽 42cm，高 23cm，自重 10 公斤，可携带 5 公斤负载。机器人由左右两个对称机构构成，中间通过被动式差动机构连接。单侧机构由前臂、上臂及躯体构成，每个前臂安装有两个主动驱动轮。机器人周身共 14 个主动自由度，1 个被动自由度，其中主动自由度包括 8 个驱动轮，6 个关节驱动。值得一提的是该款机器人的驱动轮具有触觉功能，其在轮胎内部周向安装 16 个红外传感器，通过检测轮胎的变形进而确定接触障碍平面法向量方向。通过检测障碍信息，机器人可以保证所有驱动轮实时与障碍保持接触，从而提高机器人的越障能力。



图 1-10 足轮式移动机器人 Shrimp III
Figure 1- 10 Wheel-legged robot ShrimpIII

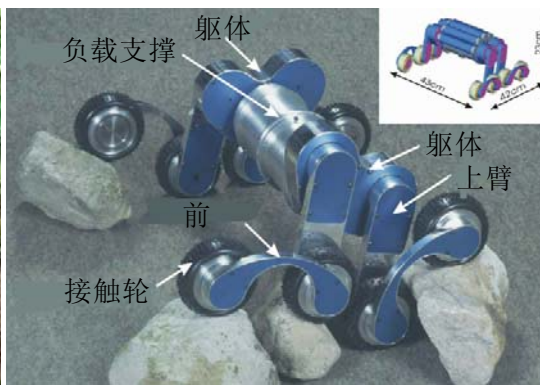


图 1-11 足轮式移动机器人 Octopus
Figure 1- 11 Wheel-legged robot Octopus

图 1-12 所示为芬兰的赫尔辛基工业大学针对野外应用开发一款机器人 WorkPartner^[35]，该四足机器人单足具有三个自由度外加一个轮子，车身上还布置有两个操纵手，能够灵活的夹持重物。机器人自重 200 公斤，有效负载 40 公斤，动力由电池和 3KW 的内燃机提供，在平坦路面上滚动运行时最高能达到 7km/h 的移动速度。该款机器人除了单独能够实现足式运动和轮式运动以外，还能够实现被称为 Rolking 的运动方式，即在足式运动中，轮没有完全离开地面，在腿的带动下使得轮在地面上滑动。该款机器人是非自主的遥控机器人，由于自身质量过重，足式运动速度缓慢，轮式运动是其主要应用的运动方式。



图 1-12 Hybtor 可变运动方式机器人

Figure 1-12 Wheel-legged robot Hybtor

除了在机器人足端增加驱动轮形成足轮结合运动的结构外，意大利的研究者针对基于足轮分离机构的移动机器人展开了研究。Wheeleg 机器人是这一类机器人机构的典型代表，如图 1-13^[36]。该款机器人由两条前腿和两个驱动轮支撑，其中前腿具有 3 个自由度，气动驱动形式，驱动轮由两个直流电机驱动。设计的主要思想是模仿马拉车的原理，利用驱动轮承担机器人的大部分重量，而两条前腿则用来提高机器人在崎岖路面的抓地力和越障能力。

另外一款此类结构的足轮混合式机器人是日本研发的 Walk'n Roll^[37]，如图 1-14 所示。与前面一款机器人不同的是 Walk'n Roll 机器人在两条前腿的足端增加了两个被动轮，这样在非常平坦的区域，其可以完全采用轮式运动而获得更快的移动速度，此时机器人前腿第一关节可以作为主动关节进而控制机器人轮式运动的方向。

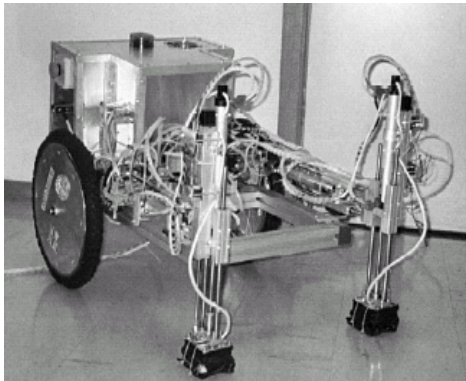


图1- 13 机器人Wheeleg

Figure 1- 13 Robot Wheeleg



图1- 14 机器人Walk'n Roll

Figure 1- 14 Robot Walk'n Roll

从上述介绍的几款足轮式机器人典型的实验系统平台可以看出，足轮机器人能够很好地整合轮式机器人和足式机器人的优点，根据不同环境，及时切换运动机构来达到良好的越障性能和较高移动速度。从已发表的文献来看，目前已有的足轮式机器人平台主要分为被动式和主动式，主动式又进一步细化分为足轮结合式和足轮分离式。被动式足轮机器人的移动主要依靠驱动轮来执行，足式结构主要用来提高对障碍的适应性，越障能力有限。足轮分离式移动机器人由于在足式运动中利用了轮式驱动，从而对环境的依赖程度依然较高。目前对足轮结合式移动机器人的研究相对较少，足轮结合式由于在足式运动中驱动轮被锁定，可以实现与单纯足式机器人相同的越障能力；而在轮式运动中驱动关节被锁定，与单纯轮式机器人的速度无异，因而具有较好的研究前景。

1.3 足式机器人稳定行走关键技术研究综述

轮式机器人的相关理论研究已较为成熟，而对于足轮结合式机器人来说，如何能够实现足式运动的稳定行走是其亟待解决的关键问题。目前，国内外的研究工作者在足式机器人步态规划、稳定性评价方法、控制方法等方面展开了大量研究，以下将对相关的研究现状和趋势分别进行综述。

1.3.1 步态规划研究综述

足式机器人是仿生学、现代制造技术和现代信息技术等多学科技术综合

应用的成果。不同的步行机器人结构需要采用不同的步态规划和策略实现其行走的目标。为了能使机器人在特殊环境下完成预期的功能要求，人类在向自然学习中，创造了形形色色的步行机器人。双足行走机器人、四足行走机器人、多足行走机器人以及蛇形和蠕动行走机器人等都是人类对生物的认知转化为工程应用的研究实例，是生物科学研究与工程科学实践有机结合的产物。步行机器人行走方式的设计得益于人们对自身和动物的运动方式的研究。模仿生物体的运动形态设计步行机器人的步态和体态大大拓展了步行机器人的应用领域。步态规划作为足式机器人运动控制的重要内容，一直是国内外学者研究的热点。

十九世纪末，美国摄影师麦布里奇(Muybridge)用 24 架照像机拍摄了马奔跑动作的连续照片，奠定了影像测量与分析步态的基础^[38]。1961 年至 1966 年南斯拉夫特母维克(Tomovic) 和麦吉(McGhee)在总结前人对动物步态研究成果的基础上，比较系统地给出了关于步态的一系列描述方法和分析步态的严格数学定义，为步态的研究分析奠定了较为完整的数学基础^[39,40]。同时他们将有限状态理论应用到腿的行走运动过程中，认为一条腿在某一时刻可处于支撑状态和悬空状态的其中一种状态，并利用这个性质，把每个腿的悬空和着地各当作为一个事件，当这些事件不是同时出现的时候，设腿的数目为 n 时，规划出机器人共有 $(2n-1)!$ 种非奇异性步态。以四足为例，会有四个抬脚和四个落脚事件在一个步态周期内发生，所以机器人便有 5040 种可能的步态。虽然步态数目庞大，但真正可以使动物随时保持三只脚着地的步态只有六种，如果以逆时针方向命名腿的ID，这六种步态顺序分别是 1-2-3-4、1-2-4-3、1-3-2-4、1-3-2-4、1-4-3-2、1-4-2-3。1990 年，Song 针对 $2n$ 只脚的机器人进行研究。提出波浪步(WaveGait)的概念^[41]。所谓波浪步是因为从单侧观看机器人行走时，同侧的奇数脚抬起而偶数脚着地，在下一个动作时，抬起的脚将放下，着地的脚会抬起，看起来就像波浪一样。随后众多学者先后又提出了改进波浪步态、FTL(Follower-and-leader)步态^[42]、对角步态^[43,44]、间歇步态(Intermittent gait)^[45]、动静混合步态等。以上几种步态从控制的角度看均属于规划步态(Rule-based gait)，即机器人的落脚点在行走之初即已经规划。1979 年 McGhee 对步态进一步研究，并提出了自由步态(Free gait)的概念。该种步态应用启发式原理，根据传感器的反馈信息在线产生步态形式，并由主控模块即时确定当前步态的下一个落脚点。同时腿部运动序列和每个腿的位置都要通过考虑步行机械的稳定性来使其最优化，因而算法复杂，在线计算量较大，计算时间较长，不便于实际应用。自由步态由于受智能控制

相关学科发展的限制，目前尚处于研究阶段。

目前，大多数学者公认的步态分类方法是根据负荷因数 β （即单腿在地面支撑时间和四条腿作一次循环时间的比值）的取值范围来分类，分别是 Gallop ($\beta < 0.5$)、Pase or trot ($0.5 \leq \beta < 0.75$) 以及 Crawl ($\beta \geq 0.75$)。一般来说，负荷因数 β 越小，则机器人的行进速度越快。同时 Crawl 步态有被称为静态步态，而另外两种步态被归为动态步态。

如图 1-15 所示，1989 年，东京工业大学 Hirose 针对 Titan 四足机器人提出了动静混合步态规划^[46]。其规划思想为使机器人不断的在动态步态和静态步态两种步态切换，机器人在四足支撑—二足支撑—三足支撑的循环中前进，进而实现较好稳定性和较高的速度。

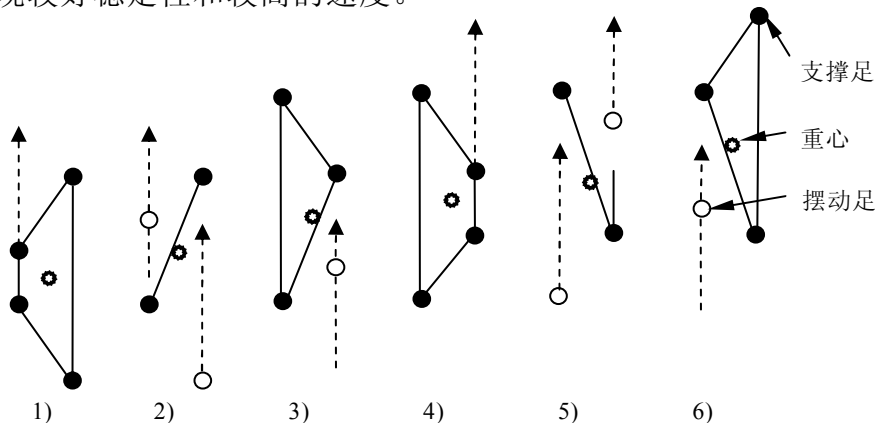


图 1-15 Titan 机器人步态图 ($\beta=0.6$)

Figure 1-15 Titan robot gait with $\beta=0.6$

为了克服摆动腿对机器人躯体稳定性的影响，1996 年东京工业大学 YONEDA 继续 Hirose 的研究，以 TitanVI 系列机器人作为实验平台，提出了间歇步态规划，如图 1-16 所示。其针对对角小跑步态进行了扩展，通过对四腿支撑所占周期比例的调整，可以使步态负荷因数 β 值在 0.5~1 之间调整。

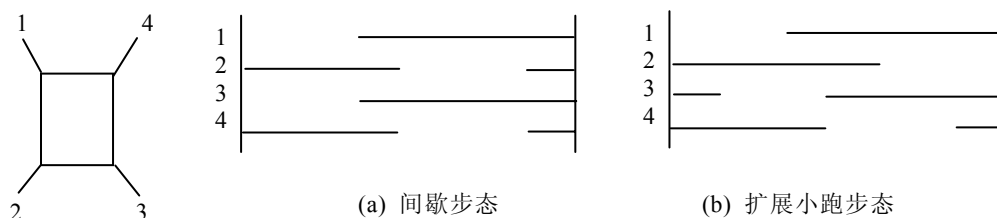


图 1-16 TitanVI 机器人步态图 ($\beta=5/8$)

Figure 1-16 TitanVI robot gait with $\beta=5/8$

另外一种步态的分类方法是根据步态相位差(φ_i)进行分类。相位差指各腿运动的相位落后于第1腿的时间与运动周期的比值。规则步态各腿运动规律相同,顺次腿之间的相位差值相同。双拍步态(trot、pace、gallop), $\varphi_i = 1/2$; 四拍步态(walk), $\varphi_i = 1/4$ 。表1-2为四足动物的典型步态的四足相位差:

表1-2 四足动物典型步态的四足相位差(φ_i : 相位)Table 1-2 Typical gait φ_i table for quadruped animal

步态	左前腿 (LF)	左后腿 (LH)	右前腿 (RF)	右后腿 (RH)
walk	0	3/4	1/2	1/4
trot	0	1/2	1/2	0
pace	0	0	1/2	1/2
gallop	0	1/2	0	1/2

1.3.2 稳定性评价方法研究综述

采用准确的参数评估足式机器人的稳定性及稳定裕度对于机器人的步态拟定、运动和结构参数的选择、控制的简化以及抗扰性是至关重要的。由于机器人具有动态稳定和静态稳定两种稳定状态,因此稳定性评价方法也与机器人的稳定状态息息相关。针对不同的步态规划方式,国内外学者对稳定性的评价方法的研究具有不同的侧重。针对规划步态,主要考虑当前步态完成后机器人的稳定裕度即抗扰能力;针对自由步态则主要从摆动腿的落地点的允许范围角度进行研究和评价。

McGhee和Frank于1968年首次提出了稳定裕度的概念,并将稳定裕度定义为机器人重心在足支撑平面上的垂直投影点到各足支撑点构成的多边形各边的最短距离,同时将稳定裕度的大小作为静态稳定性的衡量准则。可以说稳定裕度也是机器人可以承受多大的外界干扰的量度,然而该方法对于机器人在水平面上运动时具有直观简便的优点,但当机器人支撑足不在同一水平面时则显得衡量方法粗略,难以准确描述。

Messuri和Klein于1985年提出了能量稳定裕度(ESM)的概念,即将当前机器人势能与绕两支撑足构成的轴线刚性倾倒过程中的最大势能的差值作为稳定裕度的衡量准则^[47]。ESM是以机器人重心高度,重心到支撑边的距离,机器人质量为自变量的函数,通过该判定准则可以看出,机器人自身的重量与其稳定性成正比关系。该方法避开了机器人支撑面是否水平的问题,但在

判定中仅考虑了重力势能，而没有考虑系统的动能，因此仅能作为静态稳定的判别依据。作为ESM方法的扩展，1994年Nagy等提出在应用该方法时考虑系统的刚度，其中包括地面刚度及支撑足刚度等。

Papadopoulos和Rey(1996)提出力角稳定裕度的概念^[48]，即采用作用于质心的合力作用线与质心到机器人支撑多边形边界垂线的夹角来判定机器人稳定与否。当夹角为零时，说明此时机器人仅靠两足支撑。该方法在判定中考虑了外界作用力的因素，但忽略了外界作用力矩项。由于惯性力可以作为外力来分析系统的平衡问题，因此该方法可以用于动态稳定的评价。

在自由步态的稳定性判别方面，Hirose等曾提出了连接两对角支撑足的对角线法则^[49]，Pack等后来将其进一步定义为SAL(stability admitting line)^[50]，指出在机器人各条腿相对重心的位置关系已知的情况下，SAL是判定稳定性，选定摆动腿以及决定下一步落足点位置的重要参考。1999年，陈学东等指出SAL在自由步态的优化方面存在局限性，提出了SSA(statically stable area)的概念^[51]，即四足机器人同侧的两足到机器人重心构成两条相交的射线所形成的阴影，如图1-17所示。当机器人另外一侧某一足落在阴影内时，则此三足形成机器人稳定支撑。根据该准则，陈给出了判定方法的简化算法，该算法在自由步态中确定摆动腿以及摆动范围时具有简单方便的优点。

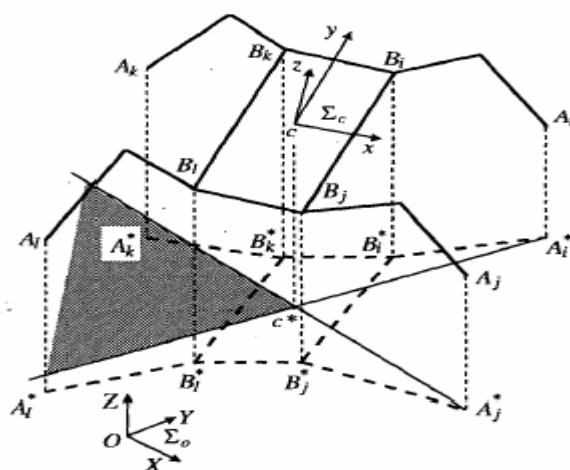


图 1-17 SSA 稳定性判定方法示意图

Figure 1-17 SSA stability judging method map

零力矩点（ZMP）方法是典型的分析足式机器人动态稳定性的方法。最早由南斯拉夫学者伍科布拉托维奇提出^[52]，当时主要用于两足机器人的动态行走稳定性分析及行走规划^[53,54]。近年来，ZMP方法被逐渐用于四足机器人

的动态稳定性分析即行走规划，如文献[55~57]。根据力学原理可知，当物体处于静止状态时，其平衡的充要条件是其重心在地面上的投影，落在其支撑面内，而此时重心在地面的投影即为零力矩点。而广义地讲，当物体处于运动状态时，其平衡的必要条件是所受重力与惯性力的合力的延长线通过其支撑面内(该合力的延长线与支撑面的交点称为零力矩点(ZMP))。单方向ZMP点计算公式为：

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z) X_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{X}_i + g_x) Z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z)} \quad (1-1)$$

以上叙述的几种稳定性评价方法，从稳定性角度可以分为静态稳定评价方法和动态稳定评价方法，从步态角度可以分为规划步态稳定评价方法和自由步态稳定评价方法。但几种稳定性评价方法均存在着一定的局限性，没有把所有的影响机器人行走稳定的因素都考虑进来，如地面倾角、外部作用力矩等，因此，建立一种更具有一般性的稳定性评价方法是本文研究的关键技术之一。

1.3.3 运动控制策略研究综述

足式机器人的运动控制，特别是多足协调控制一直是机器人技术领域的研究重点和难点。从产生机理上讲，机器人的运动控制主要有3种策略：基于行为的控制方法；基于生物控制的策略；基于建模规划的控制策略。

美国麻省理工学院(MIT)的Brooks在1985年提出了基于行为的控制方法。这种方法是对昆虫智能的仿生，采用感知触发的思路，在输入和输出之间没有复杂的计算处理过程，通过自组织实现系统的复杂行为。昆虫没有存贮、规划、控制全身各部分运动的中心控制系统，是根据身体各部分对内部指令或外界刺激的不同反应，将一些局部看来漫无目标的动作合成有意义的生物行为，运动简单、灵活，因此，在非结构化环境中具有较好的适应性。Brooks的“Genghis”六足机器人、“Hannibal”六足机器人等都是应用这种方法^[58,59]，如图1-18、图1-19所示。基于行为的控制策略从根本上否定了传统的基于表达和推理的方法而从另外一个角度阐述了动物在运动过程中表现出来的智能。但是，由于机器人的基本“能力”是不可修改的，系统的智

能水平或行为的复杂程度较低。另外，由于没有全局控制模块，机器人的可控性较差。在目前的阶段，基于行为的策略缺乏理论上的指导，而且没有一个成熟的设计方法用于指导实际的机器人实现。因此这种策略往往被用于动物行为学(Ethology)、人工生命(Artificial Life)、虚拟现实(Virtual Reality)以及基于软件的智能体(Software Agent)的研究中。在机器人学实际应用中通常应用于轮式移动机器人的控制。



图 1- 18 Genghis 六足机器人

Figure 1- 18 Hexapod robot Genghis



图 1- 19 Hannibal 六足机器人

Figure 1- 19 Hexapod robot Hannibal

基于生物控制的策略是近几年发展起来的一种新的控制思路，通过对动物节律运动控制机理的工程模拟，将中枢模式发生器、高层控制中枢、反射调节系统等生物控制模型(或机理) 应用于机器人控制，实现更加自然、协调、多样、具有环境自适应性的运动，使机器人具有更加贴近动物的运动能力。节律运动是动物最常见的运动方式，指具有时间和空间对称性的周期性运动，如走、跑、跳、泳、飞等，它是低级神经中枢的自激行为，由位于脊髓(脊椎动物) 或胸腹神经节(无脊椎动物) 中的CPG 控制。高层中枢(大脑、小脑) 发出运动指令，控制节律运动的起始，并综合CPG的中枢反馈信息、本体感受信息、视觉信息等对运动进行监控。来自躯体感受器的反馈信息通过生物反射机制，协调CPG与环境、本体的关系，对CPG 的输出进行调节。目前，国内外众多学者针对CPG控制模型进行了深入的研究，试图建立最能体现生物运动神经控制规律的CPG数学模型^[60,61]。从长远来看，该方法是仿生机器人协调控制中最优的方法^[62]，但由于目前所建立的CPG数学模型的局限性，尚无法很好的应用于具体的多足机器人系统中。

基于模型的运动控制方法都是应用十分广泛的经典方法。它采用建模—规划—控制的思路，首先对机器人本体及环境进行精确建模，然后通过人工规划得到机器人的最佳运动轨迹，再利用反馈机制控制机器人实际运动，使

机器人的运动尽可能趋近理想轨迹。这种前馈加反馈的控制模式，能够实现复杂、精确的运动。比较有代表性的应用实例有东京理工大学的TITAN系列四足机器人，法国巴黎机器人实验室（Laboratoire de Robotique de Paris）的RALPHY，以及国内上海交通大学的JTUWM四足机器人和华中科技大学的“4+2”腿/臂融合六足步行机器人^[63]等等。基于模型的策略首先根据牛顿欧拉方程或拉哥朗日方程建立机器人各关节与各关节角的动力学模型，对此模型在平衡点附近进行解耦、降阶和线性化处理，最后利用各种控制方法进行控制。该方法的缺点在于线性化设计范围不能满足机器人需要的大范围运动。而且由于解耦和线性化的处理，难免会对系统的控制性能造成影响，特别是当机器人的自由度增多时，得到和简化模型都十分困难，需要大量的计算和在线测量，在需要多自由度协调控制的任务中，缺乏足够的实时性。该方法只能对简单的步行系统进行控制，对于较复杂的步行行为，仅基于此控制方法难以解决问题。

从上面阐述的三种足式机器人控制策略综合来看，基于行为的控制方法更适用于具有简单机器人机构的行为控制，生物CPG控制方法虽然目前是较为热门的研究方法，但其他学科发展的限制和对生命神经控制的认识程度限制，尚不具有实用性。基于模型的运动控制方法由于受到建立复杂动力学模型的限制，控制中缺乏足够的实时性。因此如何建立一个实用、可靠、有效的机器人控制策略是目前足式机器人亟待解决的问题。

近年来，基于足力控制的足式机器人控制方法受到国内外学者的广泛关注，Klein和Brigges采用主动柔顺(active compliance)的方法来控制机器人足力^[64,65]。Gorinevsky和Shneider提出多足步行机械在坚硬路面和有弹性变形路面的足力控制问题^[66]。Nagy和Whittaker等提出了机器人与环境接触时的步行控制方法^[67]，它由预期的足力分配和步行时与环境接触变化的适当调整两部分算法组成。Yoneda和Iiyama等针对恶劣地形环境，提出基于虚拟悬挂模型的足力前馈控制(feed-forward)和反馈控制(feedback)方法，来保持躯体的预定姿态^[68]。最近，Huang和Fukuhara提出基于虚拟悬挂模型的滑模控制方法来抑制机器人足端和地面接触时的扰动^[69]。

1.4 课题来源及本文的研究内容

综上所述，足轮机器人能够很好地整合轮式机器人和足式机器人的优点，

根据不同环境，及时切换运动机构来达到良好的越障性能和较高移动速度，具有较高的应用前景。从应用平台角度来看，足轮结合式机器人的足式运动是该系统能否满足实际应用的技术瓶颈，部分理论及设计方法还远未达到实用要求。课题研究来源于国家黑龙江省重点攻关项目：“特种机器人关键技术的研究及示范应用”（课题编号：GB04A502）。课题总体目标为：

研制成功多运动方式足轮结合机器人系统，设计参数为四足，每单足三自由度外加一滚轮，机器人据路面特性和负载程度不同，具有一定的越障能力及爬楼梯能力，根据不同的环境变换轮式运动和足式运动两种运动方式，达到良好的运动灵活性和较高的移动速度的统一，为工程探险、反恐防爆、军事侦察提供良好的移动应用平台。论文针对四足机器人在进行多足行走时所面临的稳定性、步态规划、控制策略及控制系统构建等关键技术问题进行深入研究，为多足机器人的实用化应用奠定基础，因此，本文将在如下几个关键技术方面进行相关研究：

（1）作为一种多支链运动机构，四足机器人具有时变的运动拓扑结构，同时还是一种冗余驱动系统。因此如何建立简单有效的实时的足式机器人行走运动学模型是研究的首要内容。同时，目前制约足式移动机器人广泛应用的主要问题是其稳定性问题，为了准确的评定足式机器人的行走稳定性及抗扰性，本文试图寻求一种更具有一般性的稳定性评价方法建立干扰项、重心高度、支撑面姿态以及机器人质量等参数与稳定裕度的关系，为全面的评价机器人稳定性提供了依据。

（2）在四足动物步态一般性描述框架下，根据不同的步态参数的取值，结合机器人自身结构特点，规划针对非平坦路面和平坦路面的行走步态，并对两种步态在稳定裕度、步行柔顺性等方面进行对比仿真分析。最后对转弯步态和摆动足轨迹进行规划，为实现机器人在不同地面环境下的稳定行走提供了理论依据。

（3）当路面有弹性变形或者机器人踏上障碍时，单纯的位置控制会导致躯体的绝对高度降低或者姿态改变。因此四足机器人在步行过程中除了满足重心的稳定性外，还要满足机体的平衡。本文将基于模型规划的控制策略，结合足力反馈控制，在避免计算复杂的多足机器人多刚体动力学基础上，寻求一种更简单实用的控制策略，实现机器人摆动足从自由空间到约束空间的良好过渡以及躯体的平衡控制。

（4）考虑到需要附带执行机构，移动机器人一般设计功率较大，然而目前市场上，高功率伺服电机的控制与驱动产品体积重量均较大，且价格不菲，

这大大限制了移动机器人的负载空间。随着 DSP 技术以及 SOC (system on chip) 和 SIP(system in package) 的发展, 自主研制机器人控制系统, 将复杂的机器人运动控制算法与单电机控制算法融为一体, 将多个驱动芯片挂靠在同一控制微处理器上, 同时将多个这样的单元以总线形式互连, 从而构成集成化的控制系统是在研究中采用的主要思路。

(5) 搭建机器人实验系统, 进行关节轨迹跟踪、单足阻抗控制、平坦路面及非平坦路面基本步态实验研究, 验证机器人设计及理论分析的有效性。

第2章 四足机器人运动学与稳定性分析

以仿生技术为基础发展起来的足式机器人在不平路面和松软路面移动时较轮式机器人具有潜在的优越性。其行走运动学、工作空间分析以及稳定性评估对于机器人的步态拟定、运动参数的选择及行走控制是至关重要的。而且，四足机器人运动学分析要求具有在线实时性，因此如何建立简单有效的足式机器人运动学模型在机器人从系统构建到运动控制中具有重要意义。

目前制约足式移动机器人广泛应用的主要问题是其稳定性问题，综述中的几种稳定性评价方法均存在这一定的局限性，没有把所有的影响机器人行走稳定的因素都考虑进来，为了准确的评定足式机器人的行走稳定性及抗扰性，本章试图寻求一种更具有一般性的稳定性评价方法，为更好的评价机器人稳定性提供依据。

2.1 四足机器人运动学分析

作为一种多支链运动机构，四足机器人具有时变的运动拓扑结构，同时还是一种冗余驱动系统，无法将其作为一个整体来进行运动学分析。一般而言，具有全方位机动性能的多足步行机器人每条腿上至少有 3 个驱动关节，四足步行机器人就有 12 个驱动关节，这样一来，机器人的驱动关节数远多于其机体的运动自由度数，这是诸如轮式或履带式等移动机器人所不具备的特点。也正因为如此，多足步行机器人的运动学比一般的移动机器人的运动学要复杂的多。其单腿摆动期间属于单开链结构，多足支撑状态则又构成并联多闭链多自由度冗余驱动机构，落足点的不同，机构的运动效果亦不同。

文献[70~72]对一类四足机器人结构进行了正运动学分析，而在对足式机器人摆动腿和躯体姿态行走控制中，常需要对逆运动学进行分析；文献[73,74]对足式机器人进行了串连结构的逆运动学分析，同时近期已有大量学者对单纯的三支链六自由度并联结构运动学及工作空间方面进行了分析，如文献[75]，这些在建立四足机器人整体行走运动学中具有借鉴意义。

2.1.1 拓扑结构分析

初步设计机器人机构总体构型如图 2-1 所示，机器人由四足和躯干共五个相对独立的模块组成，单足具有三个自由度，其中髋关节具有两个自由度，膝关节具有一个自由度，关节轴线方向与转动方向如图中箭头所示。足的末端为独立驱动的车轮，可以根据环境需求在轮式机器人和足式机器人之间切换。当机器人进行步态行走时，两个驱动轮通过电磁铁锁死，车轮与机器人小腿形成一体，机器人通过驱动每条腿髋关节和膝关节进行步态行走。

当机器人以负荷因数 β 等于 0.75 地面行走时，主要借助 3 条腿在地面支撑并推动机体，另一条腿向前摆动。因此在每四分之一周期步态中，摆动腿从躯体上看是开链机构，可看作移动基座的串联机械臂。而 3 条支撑腿、地面以及躯体则可看作 3-RRRS 的多自由度并联多闭链机构，其中驱动轮与地面接触在运动学分析中被简化为球关节，简化过程存在两个基本假设：

假设 1：机器人足底与地面为点接触，即在地面与足底之间仅有作用力而没有作用力矩传递；

假设 2：足底与地面间的摩擦力无穷大，即机器人足与地面间无相对滑动。

因此四足机器人行走过程，从机构学角度看就是不同分支并联机构及串联开链机构之间的不断变化的复合型机构。

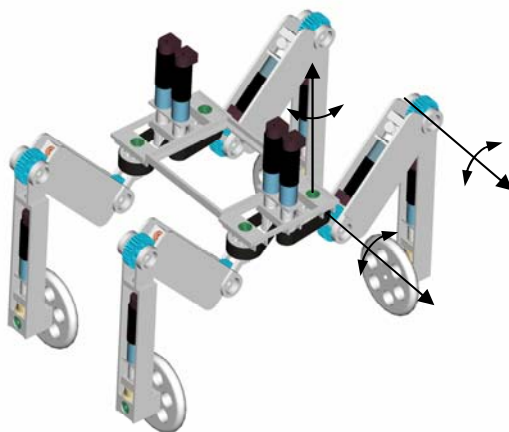


图 2-1 机器人仿真图

Figure 2- 1 Robot simulation picture

机构学中一个基本的原理就是机构所采取输入的数目要与机构的自由度相等，这样，机构就能实现确定的运动。四足机器人在三足支和四足支撑期间，从机构自由度分析上看，机器人上躯体的自由度数计算公式为^[76]：

$$M = 6 \times (n - 1) - \sum_{i=1}^n u_i \quad (2-1)$$

式中 n ——机构总的构件数；

u_i ——相应运动副所约束的自由度数；

代入参数后计算得 $M = 6$ 。因此理论上只要有 6 个输入就能保证并联机构的运行。换言之，控制 6 个关节的输入力矩，就控制了机器人躯体。然而实际上并非总是如此。随着并联机构各分支的相对位置关系不断变化，机器人上躯体的自由度数与关节的输入力矩数不一定相等。例如假设采用机器人三条支撑腿 β 关节和 γ 关节作为主动力矩输入关节，当机器人三支撑腿大腿位置与躯体前进方向垂直时，躯体则失去了前进方向的自由度。由此可见，足式机器人支撑阶段存在输入与输出的时变运动学映射关系。针对机器人支撑腿与躯体构成的并联冗余驱动机构的运动学问题，本文基于运动学分解的思想，采用串并联结合分析的方法，分别对摆动腿及支撑腿的逆运动学进行分析，建立四足机器人行走运动学模型。

2.1.2 单腿串联运动学分析

如图 2-2 所示， $O_c x_c y_c z_c$ 是固定在机器人机体上的躯体坐标系，且其原点位于机器人机体的几何中心。 $O-XYZ$ 为全局坐标系，摆动腿移动基座的参考坐标系为 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 。单腿三个转动关节可按 D-H 法建立坐标系分别为 $O_1 x_1 y_1 z_1, O_2 x_2 y_2 z_2, O_3 x_3 y_3 z_3$ 。其 D-H 参数表如表 2-1 所示^[77,78]。

表 2-1 机器人单腿运动学 D-H 参数表

Table 2- 1 Kinematics D-H parameters of robot one leg

杆件	变量	a_i	b_{i-1}	d_{i-1}
1	θ_1	90^0	0	0
2	θ_2	0^0	a_1	$-d_1$
3	θ_3	0^0	a_2	0

通过从参数表中选取参数带入 D-H 矩阵，可写出单腿每两个相邻关节的变换矩阵 ${}^0T_1, {}^1T_2, {}^2T_3$ 。

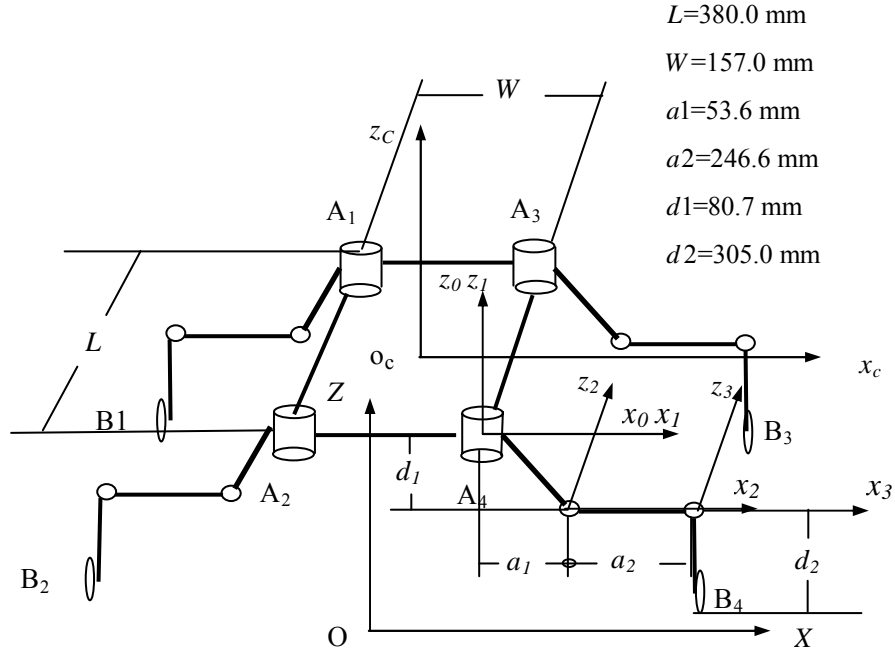


图 2-2 机器人各杆件坐标系

Figure 2-2 Coordinate system of robot

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

从而机器人摆动腿移动基座与足端的总变换矩阵为 ${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$ 。
则：

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 & -s\theta_1 & a_2 c\theta_1 c\theta_2 + a_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 & c\theta_1 & a_2 s\theta_1 c\theta_2 + a_1 s\theta_1 \\ -s\theta_2 c\theta_3 - c\theta_2 s\theta_3 & s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 & 0 & -a_2 s\theta_2 - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

假设机器人四足 Bn ($n=1\sim 4$) 在参考坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ 的坐标为 (X,Y,Z) , 在坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 的坐标为 $(0,d_2,0)$, 根据变换矩阵可有如下方程:

$${}^0T_3 * \begin{pmatrix} 0 \\ d_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

由公式(2-6), 解得摆动单腿串联运动学的三个逆解如下:

$$\theta_1 = \arctg \frac{Y}{X} \quad (2-7)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{\frac{d_2(d_2^2 - m^2 - n^2 + a_2^2)}{2a_2d_2} - a_2}{\sqrt{m^2 + n^2}} + \arctg\left(\frac{m}{n}\right) \quad (2-8)$$

$$\theta_3 = \arcsin \frac{(d_2^2 - m^2 - n^2 + a_2^2)}{2a_2d_2} \quad (2-9)$$

式中 $m = X \cos \theta_1 + Y \sin \theta_1 - a_1$
 $n = Z + d_1$

2.1.3 躯体并联运动学分析

如前所述, 当机器人在地面行走时, 主要借助 3 条腿在地面支撑并推动机体。3 条支撑腿、地面以及躯体则可看作 3-RRRS 的六自由度并联机构。并联机器人运动学的位置逆解相对简单。全局坐标系 $Oxyz$ 固定于下平台即地面。设 A_i^c 为机体上参考坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ 的原点在坐标系 $O_cx_cy_cz_c$ 的向量表示。则 A_i^c 可以通过坐标变换方法变换到全局坐标系 $Oxyz$ 中表示:

$$A_i = TA_i^c \quad (2-10)$$

式中 T ——上平台坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 在全局坐标系 $Oxyz$ 的变换矩阵

因此，在全局坐标系 $Oxyz$ 下，机器人足与根关节的相对位置关系：

$$A_i B_i = B_i - T A_i^c \quad (2-11)$$

式中 B_i ——全局坐标系 $Oxyz$ 下机器人各足的位置矢量

当给定上下平台的相对位置关系时，则 T 为已知。当机器人平动时：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X + \Delta X \\ 0 & 1 & 0 & Y + \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & Z + \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

当机器人零半径转弯时：

$$T = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & X \\ s\theta & c\theta & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

当已知机器人躯体相对地面的期望位置时，由公式(2-11)可以很容易写出上下平台各铰链点 A_i, B_i 的相对位置关系。将其分别带入每条支撑腿串联运动学的逆解中，进而可求得 3 条支撑腿共 9 个关节的并联运动学逆解。

2.1.4 雅克比矩阵方程

要实现对机器人各关节的双闭环控制，只知道机器人的位置参数是不够的，还需要对其速度参数进行控制，这就涉及到机器人机构学中的雅可比问题。机器人的雅可比矩阵是机器人足端的速度与各关节转动角速度的线性变换，可以看成是从关节空间向操作空间运动速度的传动比。由于机器人在地面行走时，主要借助 3 条腿在地面支撑并推动机体，控制机体的速度相当于分别控制三条腿的末端保持某一要求速度的一致性，因此本文仅对单腿的雅克比矩阵进行了分析。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

式中 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$ 、 $\dot{\theta}_3$ ——单腿三个关节角速度；

\dot{x} 、 \dot{y} 、 \dot{z} ——单腿足端三维速度；

J ——单腿雅可比矩阵

由公式(2-5)、(2-6)可得：

$$J = \begin{pmatrix} [d_2 s(\theta_2 + \theta_3) - a_2 c\theta_2 - a_1] s\theta_1 & [-d_2 c(\theta_2 + \theta_3) - a_2 s\theta_2] c\theta_1 & -d_2 c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_1 \\ [-d_2 s(\theta_2 + \theta_3) + a_2 c\theta_2 + a_1] c\theta_1 & [-d_2 c(\theta_2 + \theta_3) - a_2 s\theta_2] s\theta_1 & -d_2 c(\theta_2 + \theta_3) s\theta_1 \\ 0 & d_2 s(\theta_2 + \theta_3) - a_2 c\theta_2 & d_2 s(\theta_2 + \theta_3) \end{pmatrix} \quad (2-15)$$

由于 θ 的值是随时间变化的，从而雅可比矩阵是与时间相关的。

2.2 工作空间仿真

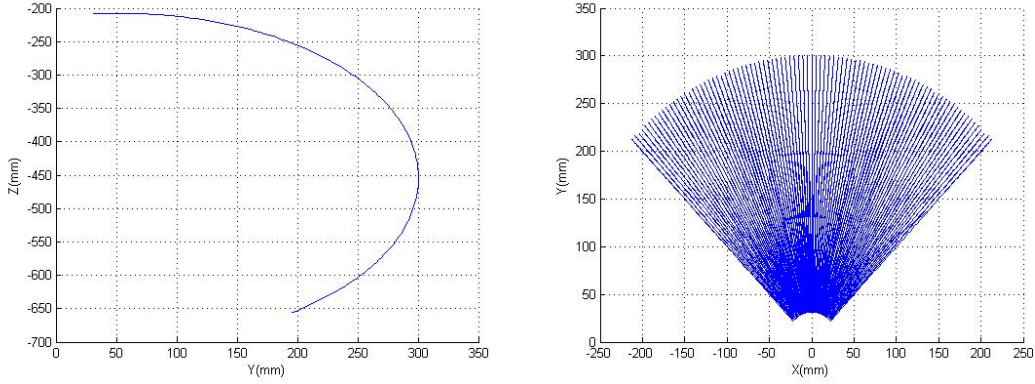
机器人机构的运动空间是规划步态的基础，其躯体的调整和随动的最大位移都是由机构的运动空间所决定的，因此分析机构的运动空间是非常必要的。

2.2.1 摆动腿工作空间

机器人单腿抬起后运动空间对于机器人的步态规划以及越障能力分析是非常必要的。一般来说影响机器人的单腿可达工作空间有以下几个因素：各关节转角约束和构件的干涉^[76]。各关节转角约束主要受构件的干涉影响，因此分析中仅需要考虑各关节的转动范围即可。

仿真分析中，髋关节与躯干横摇转角范围为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ ，髋关节与大腿纵摇转角范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ ，大腿和小腿的夹角范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。考虑足与地面不产生相对滑动限制条件，足趾和地面之间球副转动范围假设为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。

一般规划机器人行走时，摆动腿小腿以竖直方向与地面接触，图 2-3a) 为保持机器人小腿竖直时足端在躯体坐标系 YOZ 平面内的轨迹，此时机器人躯体保持一定高度，腿部第一关节角 α 保持在零点位置。图 2-3b) 所示为保持机器人小腿竖直时，单腿运动空间在躯体坐标系 XOY 平面内的投影。



a) 小腿竖直时足端在 YOZ 平面内的轨迹 b) 单腿运动空间在 XOY 平面内的投影
a) Foot track on YOZ plane with vertical leg b) Leg working space on XOY plane

图 2-3 摆动腿工作空间

Figure 2-3 Swing leg working space

2.2.2 躯体工作空间

由前面分析可知，当机器人四腿支撑时可以看作并联机构，并联机构的运动范围也就是躯体调整的范围或随动范围。一般来说影响并联机器人的运动空间有以下几个因素：杆长约束、各关节转角约束和构件的干涉。同时，以上几个因素又与支撑足的相对位置关系有关，因此，选择机器人两种常用支撑步态进行运动空间分析。在本机构中，杆长的约束可看作 A_i 、 B_i 的直线距离，各关节转角约束主要受构件的干涉影响，因此分析中仅需要考虑各关节的转动范围即可。

图 2-4、图 2-5 给出两个不同的支撑多边形所对应的躯体中心在全局坐标系下的可达运动空间，此时假设全局坐标系原点与机器人躯体坐标系原点在支撑面的投影重合。

在图 2-3 中高度 z 值是相对躯体坐标系的，在图 2-4、图 2-5 中高度 z 值是相对全局坐标系的，因此，机器人足端可通过最高点为：

$$H_{\max} = H'_{\max} - 200(\text{mm}) \quad (2-16)$$

式中 H'_{\max} ——机器人躯体高度的最大值。

H_{\max} ——机器人足端高度的最大值

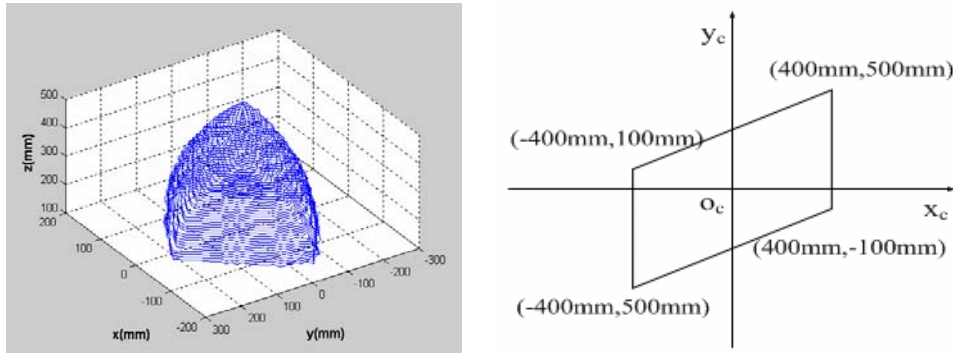


图 2-4 躯体中心可达工作空间 I

Figure 2-4 Reachable working space I of robot body

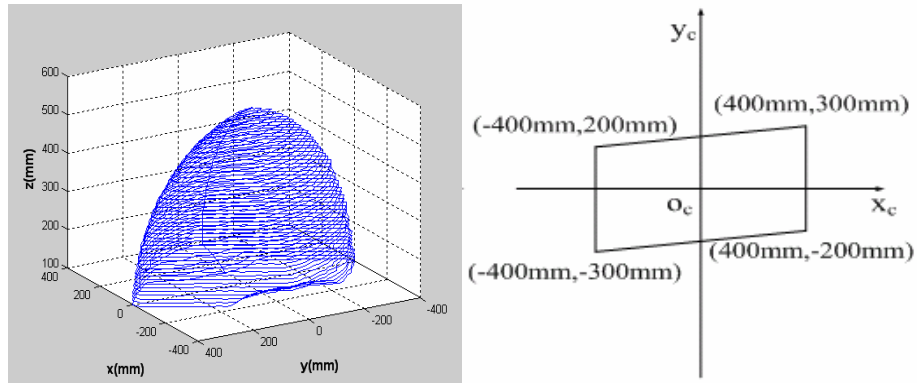


图 2-5 躯体中心可达工作空间 II

Figure 2-5 Reachable working space II of robot body

2.3 四足机器人稳定性评价方法

采用准确的参数评估足式机器人的稳定性及稳定裕度对于四足机器人的稳定行走是至关重要的。本节提出了采用支撑面压力中心至各足支撑点构成的多边形各边的最短距离来评定机器人的行走稳定性，该种评价方法将外部干扰项、重心高度、支撑面倾角以及机器人质量等变量融入到稳定性评价中，因此更具有一般意义。

2.3.1 支撑面压力中心方程

一般来说，四足机器人在以静态稳定步态行走时，负载因子 $\beta \geq 0.75$ ，即在任一时刻最少有三条腿构成支撑多边形。支撑面上反作用于机器人的支持力的合力与支撑面的交点定义为压力中心。

建立坐标系如图 2-6 所示，坐标系 fB 为全局坐标系， \underline{b}_1 和 \underline{b}_2 轴位于水平面内， \underline{b}_3 轴铅直向上。坐标系 fN 为参考坐标系， \underline{n}_1 和 \underline{n}_2 矢量位于机器人支撑平面内， \underline{n}_3 与支撑面垂直。 \underline{n}_3 与 \underline{b}_3 的夹角称为地面倾角。点 G 为机器人重心， G' 为机器人重心在支撑面的垂直投影。点 Q 为假想的压力中心。 P_1, P_2, P_3 分别为机器人支撑足与地面的接触点， R_1, R_2, R_3 相应为地面作用于支撑足的支持力。点 C 为假想的压力中心。 F_G 和 M_G 分别为外界或由于惯性作用于机器人重心的合力及合力矩，这里将机器人所受重力单独拿出来考虑，因此作用于重心的总合力为 $F_G + mg$ 。其中 m 为机器人总质量。

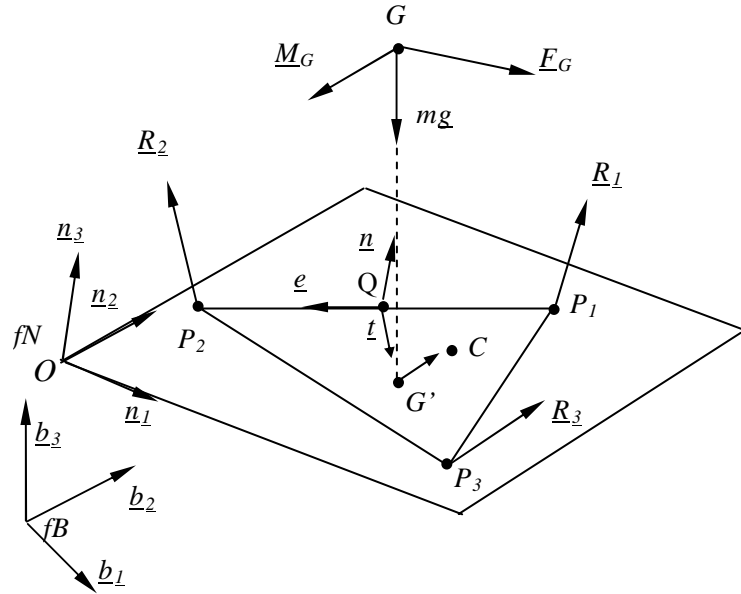


图 2-6 机器人受力分析坐标简图

Figure 2-6 Coordinates sketch of static force acting on robot

根据压力中心的定义及力学中的主矢分解原理，地面反作用于机器人的支持力分别围绕某一点取矩的矢量和应等于压力中心处合力对某一点的矩，因此，对参考坐标系原点 O 取矩有：

$$\begin{cases} \underline{r}^{OC} \times \sum_i \underline{R}_i = \sum_i \underline{r}_i^{OP} \times \underline{R}_i \\ \underline{n}_3 \cdot \underline{r}^{OC} = 0 \end{cases} \quad (2-17)$$

将公式(2-17)两边同时差乘 \underline{n}_3 ，同时利用三矢量差乘特性 $\underline{x} \times (\underline{y} \times \underline{z}) = (\underline{x} \cdot \underline{z})\underline{y} - (\underline{x} \cdot \underline{y})\underline{z}$ 可得：

$$\underline{r}^{OC} = \frac{1}{(\underline{n}_3 \cdot \sum_i \underline{R}_i)} \underline{n}_3 \times (\sum_i \underline{r}_i^{OP} \times \underline{R}_i) \quad (2-18)$$

由于点 O 与 P_i 点在同一平面内，因此有 $\underline{n}_3 \cdot \underline{r}_i^{OP} = 0$ ，公式(2-18)可改写为：

$$\underline{r}^{OC} = \frac{1}{(\underline{n}_3 \cdot \sum_i \underline{R}_i)} \sum_i (\underline{n}_3 \cdot \underline{R}_i) \underline{r}_i^{OP} \quad (2-19)$$

从公式(2-19)可以看出，压力中心的坐标方程可看作支撑足坐标的加权平均数，而权值为作用于每一足的支撑力在垂直支撑面方向的分量。

机器人所受所有外力围绕点 O 的力矩平衡方程为：

$$\sum_i \underline{r}_i^{OP} \times \underline{R}_i = -\underline{r}^{OG} \times (\underline{F}_G + m\underline{g}) - \underline{M}_G \quad (2-20)$$

在 \underline{n}_3 方向上的力平衡方程为：

$$\underline{n}_3 \cdot \sum_i \underline{R}_i = -\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}) \quad (2-21)$$

将公式(2-18)、(2-20)、(2-21)联立，同时利用关系式 $\underline{r}^{OG} = \underline{r}^{OG'} + \underline{r}^{G'G}$ ，可解得：

$$\underline{r}^{OC} = \underline{r}^{OG'} + \frac{\underline{n}_3 \times (\underline{M}_G + \underline{r}^{G'G} \times \underline{F}_G)}{(\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}))} \quad (2-22)$$

公式(2-22)为支撑面压力中心的最终方程，从中可以看出压力中心坐标由作用于重心的合力矩、合力、支撑面姿态、重心高度及机器人自身质量共同决定。同时，当作用于重心的合力矩、合力为零时，压力中心与重心在支撑面的垂直投影重合。

2.3.2 稳定性分析与判定准则

从前面分析知，支撑面压力中心与作用于重心的合力矩、合力密切相关。当压力中心位于支撑多边形某一条边上时，机器人实际上仅通过形成该条边的两个支撑足支撑。换句话说，机器人的其他支撑足实际上为虚支撑。机器人此时处于临界稳定状态，任何微小的外界合力矩或合力变化都会导致机器人偏离当前状态，因此该状态是不稳定状态。这里引入一个稳定判定准则：

支撑面压力中心必须始终保持在支撑多边形内部，且不包括边缘部分，其到支撑多边形的四周的最短距离作为衡量机器人当前稳定状态的稳定裕度，当距离越大时，说明机器人抗干扰能力越强。

该稳定判定准则可以用反证法予以说明其合理性。例如在机器人受到除支撑力以外的外力或因地面倾角过大使其压力中心点向左移出支撑区域外时，倘若此时所有外力矢量均对压力中心点取合力矩，由于此时所有外力对压力中心点的合力矩均为逆时针方向，因此，合力矩不为零，机器人失稳。

同时，为了计算上的方便，根据重心与压力中心的坐标关系，将压力中心位置转化为重心坐标表达式，通过重心到支撑多边形边缘的最短距离来间接判定机器人的稳定性。

如图 2-6 所示，假设压力中心 C 与支撑多边形的 P_1P_2 边距离最短。过 G 点向边 P_1P_2 做垂线，垂足 Q 为。以 Q 为原点建立 $\underline{n}_3, \underline{e}, \underline{t}$ 单位矢量如图所示，其中矢量 \underline{e} 与 P_1P_2 边平行，矢量 \underline{t} 与 P_1P_2 边垂直。因此有：

$$\underline{e} = \underline{r}^{P_1P_2} / \|\underline{r}^{P_1P_2}\| \quad (2-23)$$

$$\underline{n}_3 = \frac{\underline{r}^{P_1P_2} \times \underline{r}^{P_1P_3}}{\|\underline{r}^{P_1P_2} \times \underline{r}^{P_1P_3}\|} \quad (2-24)$$

$$\underline{t} = \underline{n}_3 \times \underline{e} \quad (2-25)$$

由于公式(2-22)中 O 点为支撑面任意一点，因此将式中 O 点用 Q 点取代，可以得到压力中心 C 与 Q 的相对位置关系为：

$$\underline{r}^{QC} = \underline{r}^{QG} + \frac{\underline{n}_3 \times (\underline{M}_G + \underline{r}^{GG} \times \underline{F}_G)}{(\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}))} \quad (2-26)$$

将公式(2-26)两边同时点乘矢量 \underline{t} ，如果要保持压力中心 C 在支撑多边形

内，需有如下条件成立：

$$\underline{t} \cdot \underline{r}^{QC} = \lambda + \frac{\underline{e} \cdot (\underline{M}_G + \underline{r}^{G'G} \times \underline{F}_G)}{(\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}))} > 0 \quad (2-27)$$

$$\text{即：} \quad \lambda > \frac{\underline{e} \cdot (\underline{M}_G + \underline{r}^{G'G} \times \underline{F}_G)}{-(\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}))} \quad (2-28)$$

式中 λ ——重心至边 P_1P_2 的距离。

$$\text{令：} \quad \lambda_{\min} = \frac{\underline{e} \cdot (\underline{M}_G + \underline{r}^{G'G} \times \underline{F}_G)}{-(\underline{n}_3 \cdot (\underline{F}_G + m\underline{g}))} \quad (2-29)$$

则有 $\lambda > \lambda_{\min}$ 。其中 λ_{\min} 称为重心最小稳定距离。令 $S = \lambda - \lambda_{\min}$ ，S 称为机器人稳定裕度。

为了更直观的讨论参数对稳定性、稳定裕度的影响，继续如下推导：

$$\underline{g} = -a_G \underline{b}_3 \quad (2-30)$$

$$\underline{r}^{G'G} = h\underline{b}_3 \quad (2-31)$$

式中 a_G ——重力加速度

h ——重心高度的代数值。

将式(2-30) (2-31)代入公式(2-29)，并进行适当的矢量法则运算得：

$$\lambda_{\min} = \frac{\underline{e} \cdot \underline{M}_G + hA}{ma_G(\underline{n}_3 \cdot \underline{b}_3) - \underline{n}_3 \cdot \underline{F}_G} \quad (2-32)$$

式中 $A = ((\underline{F}_G \cdot \underline{n}_3)(\underline{t} \cdot \underline{b}_3) - (\underline{F}_G \cdot \underline{t})(\underline{n}_3 \cdot \underline{b}_3))$

通过公式(2-32)，支撑压力中心判定准则转化为重心到支撑多边形的边缘的最短距离来间接判定，即 $\lambda > \lambda_{\min}$ ，方便了计算及判断。同时，公式(2-32)给出了 λ_{\min} 与外界干扰力矩及干扰力的数学关系，当 λ_{\min} 越大时，机器人当前稳定状态所能承受的干扰越小。

需要注意到， λ 不必一定大于零，即重心的投影可能会在支撑多边形外部，此时虽然已经不满足静态稳定的定义，但在一定的外力或外力矩的作用下，机器人可以保持平衡。当外力或外力矩很大时， $\lambda < 0$ 甚至是机器人保持平衡的必要条件。

2.3.3 仿真与分析

为了更直观的讨论参数对重心最小稳定距离的影响，根据式(2-32)，在MATLAB中进行了仿真，初始化条件如表2-2：

其中 F_G 作用在矢量 \underline{n}_3 平面内与 \underline{n}_3 成45度方向上， M_G 方向与矢量 \underline{e} 相同，地面倾角方向为沿 P_1P_2 轴转动方向。仿真结果如图2-7。

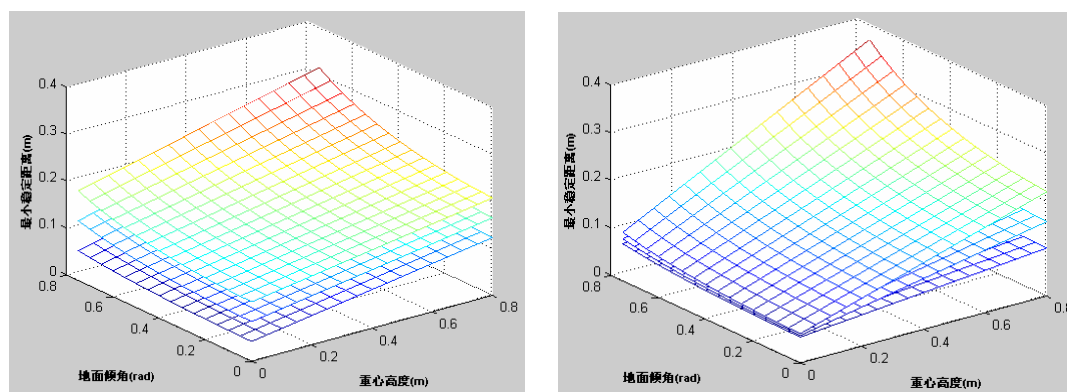
表2-2 仿真初始化条件

Table 2-2 Initial conditions for simulation

参数	数值或变化范围
机器人总质量 m (kg)	40
作用力 F_G (N)	30, 60, 90
作用力矩 M_G (N.m)	15, 30, 45
质心高度 h (m)	0~0.8
地面倾角 (rad)	0~ $\pi/4$

图2-7给出了不同外部作用力或作用力矩下重心最小稳定距离 λ_{\min} 与地面倾角及重心高度的变化关系。可以看出，当地面倾角或重心高度增加时，机器人所需的重心最小稳定距离 λ_{\min} 也相应增加，即机器人稳定裕度减小。

同时，从图2-7a)可以看出，外部作用力矩在矢量 \underline{e} 方向增加时，三幅图各点在z方向的间距基本相同。此说明了外部作用力矩对地面倾角及重心高度两参数均不敏感。而从图2-7b)可以看出，外部作用力在矢量 \underline{n}_3 方向或矢量 $-\underline{t}$ 方向增加时，在重心高度较小时， λ_{\min} 基本保持不变，即三幅图各点在z方向的间距等于零；在重心高度较大时， λ_{\min} 随着作用力的增加而增加。由此说明外部作用力对地面倾角变化不敏感而对重心高度具有敏感性。



- a) 不同外部作用力矩下 b) 不同外部作用力下
a) With the difference of external moment b) With the difference of external force

图 2-7 不同条件下 λ_{\min} 与地面倾角及重心高度关系变化趋势仿真图

Figure 2- 7 Relations between λ_{\min} , obliquity of ground and height of CoG

2.4 本章小结

本章首先讨论了四足机器人时变的运动拓扑结构，针对机器人运动学特点及要求，采用串并联结合分析的方法，分别对摆动腿及支撑腿的逆运动学进行了分析，并应用该运动学解析逆解进行了运动空间仿真，结果表明，该思路适合应用于足式机器人时变结构的运动学分析和实时控制。同时，为了准确的评定足式机器人的行走稳定性及抗扰性，本章在推导中引入了支撑面压力中心变量及干扰力和干扰力矩项，采用支撑面压力中心至各足支撑点构成的多边形各边的最短距离来评定机器人的行走稳定性，并由此引出了重心最小稳定距离（ λ_{\min} ）概念及相应的稳定裕度评定方法，讨论了干扰项、重心高度、支撑面姿态以及机器人质量等变量与稳定裕度的关系。

第3章 四足机器人稳定行走步态规划

3.1 步态描述的基本定义

四足行走机器人具有较好的结构稳定性，与双足步行机器人相比，系统平衡的动态补偿难度大大降低。通过对四足动物的研究，使得人们把较高的负重能力、快速的机动性能和优良的陆路通过性能等一系列指标寄希望于学习这类动物的活动模式。但是机器人毕竟不是真正的“动物”，它们的“神经系统”、“感官系统”和“执行系统”还远没有达到动物的水平，所以，针对机器人自身，步态有其特殊的理论。不同的步行机器人结构需要采用不同的步态规划和补偿策略实现其行走的目标。为了能使机器人在特殊环境下完成预期的功能要求，人类在向自然学习中，对自身和动物的运动方式进行了研究。模仿生物体的运动形态，设计步行机器人的步态和体态，大大拓展了步行机器人的应用领域。

各国学者在研究步态的过程中，逐渐形成了一些既定的步态术语及符号表示^[79]，基本定义如下：

步态 步态就是各腿相继抬跨的顺序和各足趾相对机体的位移关系，同时亦包含体态的调整；

步态周期 T 四条腿作一次完整的步态循环的时间；

负载因子 β 单腿在地面支撑时间和四条腿作一次循环时间的比值，一般来说， β 越小，机器人步行速度越快；当负载因子小于 0.5 时，机器人任何瞬时只有不足两条腿支撑于地面，这种步态被称为疾驰步态；当负载因子大于或等于 0.75 时，表明机器人任何时刻都至少有三条腿支撑于地面，该步态被称为爬行步态；介于这两种步态之间的被称为小跑步态。

相位差 φ_i 自选定参考腿落地时刻起至另一腿 i 落地时刻的时间差，数值上通常表示为该时间差与步态周期的比值；规则步态各腿运动规律相同，顺次腿之间的相位差值相同。

步距 λ 机器人躯体在一个步态周期中相对地面移动的距离。

单腿步距 A 单腿从抬起到落地的过程中，机器人躯体相对地面的位移。

机器人足可达区域 即机器人足端相对躯体的平面运动区域。它是由单腿的运动空间决定的，如图 3-1 中所示四个扇形区域。

前、后极限位置 在机器人足可达区域中，相对躯体前后有两个极限位置，即前极限位置(简称 *AEP*-Anterior Extreme Position)和后极限位置(简称 *PEP*-Posterior Extreme Position),见图 3-1 中的 *AEP* 和 *PEP*。机器人足在摆动状态下向 *AEP* 方向相对运动，在支撑状态下向 *PEP* 方向相对运动。

单腿运动限度 (kinematics limit) k 支撑足相对于躯体的当前位置与 *PEP* 的距离为 k ，由于躯体移动采用的是支撑腿向相反方向的相对运动，因此， k 代表了该腿可推动躯体前进的剩余能力。见图 3-1 中的 k_2 、 k_3 和 k_4 。通常在保持稳定情况下，具有最低运动限度的腿首先被抬起摆动。

单腿相对跨距 E 单腿从抬起到落地过程中，足趾相对机器人躯体的位移。其最大值为 *AEP* 与 *PEP* 间的距离，如图 3-1 中的 E_{\max} 。

单腿绝对跨距 L 机器人单腿从抬起到落地过程中，单腿相对地面的位移。通常情况下 $L = A + E = \lambda$ 。

稳定裕度 S 机器人从当前平衡状态至失稳状态的余量，其表示的单位可以是角度、距离、能量等。

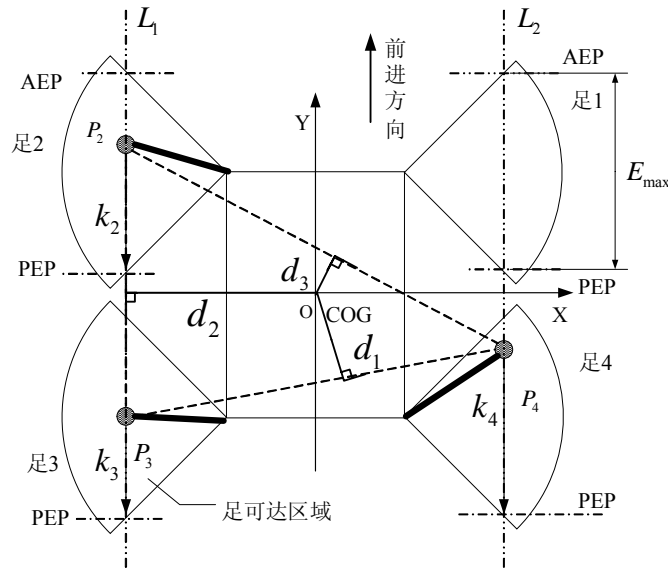


图 3-1 四足移动机器人俯视简化图

Figure 3- 1 Overlook of quadruped robot

为保持机器人的步行稳定，通常情况下步距、单腿步距、单腿相对跨距和单腿绝对跨距等都是稳定裕度 S 的函数，即 $\lambda(S)$ 、 $A(S)$ 、 $E(S)$ 、 $L(S)$ 。

3.2 四足动物步态分析

动物的躯体运动分为反射运动、模式运动和随意运动。反射运动由外界刺激引起，运动形式固定、反应快捷，如膝跳反射。模式运动是指运动型式固定的周期性运动，具有时空对称的表征，如走、跑。随意运动具有明确的目的性，运动形式比较复杂，受主观意识支配。这三种运动形式并不是绝对独立的，多数高级哺乳类四足动物的运动涉及多种运动形式。论文中研究的运动指的是一种复合运动，以模式运动为主，当地形条件或环境比较复杂时会有反射的参与。

不同的四足动物由于身体条件的限制和神经控制能力的差异，其步态呈现不同的形式，即使是同一种动物在不同的运动状态下步态差异也是相当大的，例如马的慢走和奔跑就属于两种完全不同的步态。动物的运动形式由相位差 ϕ_i 和负荷因子 β 两个参数表征。四足哺乳类动物具有四种典型步态：爬行步态(crawl)，各足依次起落， $0.75 < \beta < 1$ ，相位差为 $1/4$ ；对角步态(trot)，对角腿成对起落， $\beta = 0.5$ ，两对之间相位差为 $1/2$ ；蹄溜步态(pace)，同侧的腿成对起落， $\beta = 0.5$ ，两对之间相位差为 $1/2$ ；疾驰步态(gallop)，前后腿成对起落，存在四腿同时腾空时刻， $\beta < 0.5$ ，后腿相对前腿之间的相位差为小于 $1/2$ 。

在速度较慢的行走状态下，四足动物的每步行走均处于一个稳定的三足支撑状态，其稳定性得到必然的保证，称之为爬行步态，如乌龟和蜥蜴的行走^[80]（见图 3-2）。爬行步态(crawl)是一个 4 拍步态，每次只有一条腿抬起，按着左前LF（left-front）、右后RR（right-rear）、右前RF（right-front）、左后LR（left-rear）的抬腿顺序，其他三条支撑腿组成一个三角形支撑区域，实现稳定行走。一般来说，使用爬行步态行走的动物其髋关节的轴线多与重力方向平行。



图 3-2 蜥蜴的爬行步态

Figure 3-2 Lizard gait in a crawl

比爬行步态更快一些的是小跑步态(trot)和蹄溜步态(pace)。它们都是两拍步态。如图 3-3 所示,狗在小跑步态时,处于对角线位置的两腿同时摆动,即左后腿和右前腿(LR+RF)与右后腿和左前腿(RR+LF)交替进行摆动和支撑^[81]。在马的蹄溜步态中(见图 3-4),马用侧面支撑,即同侧的两条腿(LF+LR或RF+RR)同时摆动和支撑。

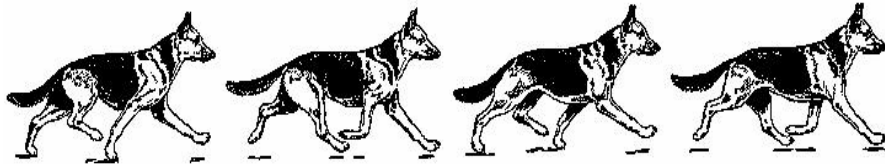


图 3-3 狗的小跑步态

Figure 3- 3 Dog gait in a trot



图 3-4 马的蹄溜步态

Figure 3- 4 Horse gait in a pace

某些四足爬行动物的小跑可能是它们最快的行走形式;而对于马、豹等一些大型哺乳动物,疾驰步态(gallop)则产生最高的运动速度。如图(3-5)所示,马在疾驰时,通常两前腿(LF+RF)或者两后腿(LR+RR)同时抬起或落下,即交替摆动和支撑。一般来说,使用非爬行步态行走的动物其膝关节的轴线多与重力方向和前进方向垂直。



图 3-5 马的疾驰步态

Figure 3- 5 Horse gait in a gallop

理论上四足移动机器人可以实现四足动物行走时的诸如爬行、小跑以及疾驰等不同的步态,然而,对于速度较快运动步态,现代技术制作的机器人结构还很难实现。因此,多数机器人还是着眼于模仿步行速度较慢的动物。

由于足式机器人的爬行步态具有负载能力大的特点，因此是一个被广泛研究和应用的机器人步态。

在对四足动物一般性爬行步态进行描述之前，需作如下假设：

- 1) 四个足趾点构成平行四边形，且重心只在前进方向上运动；
- 2) 各个腿的跨距相等且迈腿一次的时间相等；
- 3) 初始位置为抬腿前的最佳位置；
- 4) 具有结构对称性，重心在躯体的中心。

在以上假设下，建立四足爬行步态几何图如图 3-6 所示。在对生物界负载因子 $\beta \geq 3/4$ 的爬行步态进行几何分析后，发现四足动物倘若四条腿依次各迈一次，根据排列组合共有 24 种可能的步态次序，然而大部分四足爬行动物爬行时均采用 3-2-4-1（腿ID与图 3-6 对应）的摆腿顺序，同时动物驻停时四足呈现平行四边形。究其原因发现这样的摆腿顺序和启动步态在静态爬行时具有最少的重心调整量，步态的效率最高^[82]。一般来说，爬行步态行走快慢和以下几个方面有关：绝对跨距的大小、摆腿时间、为达到稳定裕度所进行的重心调整量（此处的重心调整是指四足着地进行的重心调整，而非三腿着地躯体的随动调整）。针对机器人而言，在机构设计之初就充分考虑绝对跨距和摆腿时间参数指标，因而，对爬行步态规划而言，为达到一定稳定裕度所需要的重心最小调整量是衡量步态优劣的重要指标。

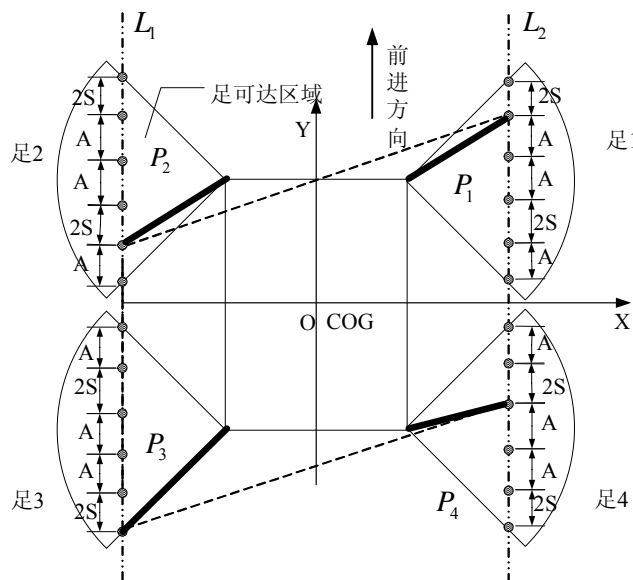


图 3-6 四足爬行步态几何图

Figure 3- 6 Geometry of crawl gait

考虑一般情况，假设四足动物在摆动腿摆动的同时躯体移动，并且存在四足支撑躯体移动的过程，以六个步态子周期完成一个完整步态，则 3-2-4-1 前进方向步态参数见表 3-1。

表 3-1 前进爬行步态参数表

Table 3-1 Parameter table of forward crawl gait

	T/6	2T/6	3T/6	4T/6	5T/6	T
腿 1	0	0	0	0	E(S)	0
腿 2	0	E(S)	0	0	0	0
腿 3	E(S)	0	0	0	0	0
腿 4	0	0	0	E(S)	0	0
躯体	A(S)	A(S)	2S	A(S)	A(S)	2S

从步态参数表可知，首先具有最低运动限度的腿 3 被抬起摆动 E ，同时躯体移动 A ，然后腿 2 满足最低运动限度成为摆动腿；然后躯体移动 $2S$ 来保持稳定裕度；这时另一侧的腿 4 满足最低运动限度成为摆动腿，同理，在腿 4 摆动 E 和躯体移动 A 后，腿 1 运动限度最低成为摆动腿；最后，躯体移动 $2S$ 回到初始位置。

表 3-1 中步态参数有下面关系^[83]：

$$\lambda(S) = L(S) = 4A(S) + 4S \quad (3-1)$$

$$E(S) = 3A(S) + 4S \leq \lambda(S) \quad (3-2)$$

$$\beta = \frac{3E(S) + 4S}{\lambda(S)} = \frac{3E(S) + 4S}{4E(S) + 4S} \geq \frac{3}{4} \quad (3-3)$$

3.3 四足机器人爬行步态规划与仿真研究

3.3.1 间歇爬行步态规划与仿真

由式(3-2)可知，当 $A = 0$ 时爬行步态有最大稳定裕度 $S_{\max} = E/4$ ，即在摆动腿摆动时躯体不移动，称之为间歇爬行步态。间歇步态的特点是稳定裕度高，适合在非规则路面采用，但步行柔顺性差，速度相对低。本文规划 $E = L = \lambda = 4S = 400 \text{ mm}$ ，则 $S = S_{\max} = E/4 = 100 \text{ mm}$ 。由于摆动腿摆动时间和躯体移动时间相同，因此 $\beta = 5/6$ 。

步态图是描述步行机器人在一个步态周期过程中，各腿的相继摆腿顺序和各腿足端相对躯体的位移图。即坐标系固定在躯体上，这样躯体相对静止，观察足端在各个时期的位移变化。间歇步态的步态图如图 3-7 所示。

如图 3-7a)所示，首先躯体不动，具有最低运动限度的腿 3 抬起作为摆动腿，向前摆动 $E = L = 4S$ ，机器人重心在腿 124 构成的三角形区域内；

继而具有最低运动限度的腿 2 作为摆动腿向前摆动 $E = A = 4S$ ，如图 3-7b)所示，机器人重心在腿 134 构成的三角形区域内；

然后到如图 3-7c)所示的四足支撑阶段，此时如果抬起腿 4 的话，重心 (COG)将在三角形支撑区域 123 之外，不满足静态稳定原理，因而四足支撑躯体向前移动 $2S$ ，以确保抬起足 3 时机体重心能在稳定区域。

同样原理，图 3-7d)和图 3-7e)为三足支撑过程，图 3-7f)为四足同时支撑躯体移动过程。然后回到初始位置图 3-7a)，如此往复循环。

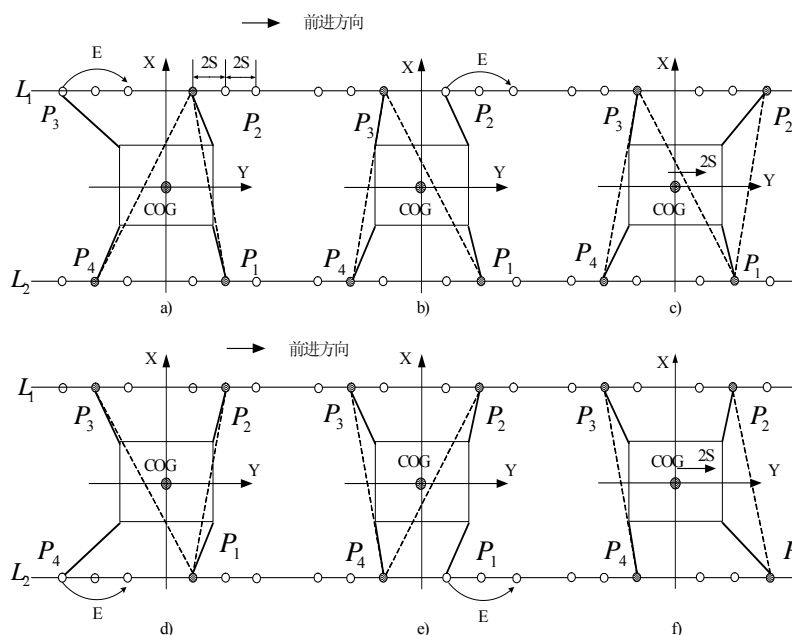


图 3-7 平面间歇爬行步态图

Figure 3-7 Gait chart of discontinuous crawl gait in plane

图 3-8 为机器人采用间歇步态在两个步态周期期间的仿真稳定裕度曲线图。从图中可以看出，间歇步态的最小稳定裕度在 50mm 左右。

上述步态规划给定的是全局坐标系下的机器人行走过程中的足端相对位置，在机器人的实际控制中通过对各个腿的关节的控制来实现。因此，进行机器人步态仿真须将全局坐标系中的足端轨迹和躯体位姿映射到关节坐标系

中。首先在MATLAB软件中进行逆运动学计算，得出各个腿的关节角轨迹。然后将四足移动机器人的 3D模型导入到ADAMS仿真环境中，并建立MATLAB中得出关节轨迹与ADAMS模型中的关节之间的映射关系，进而实现了步态仿真^[84~86]。

图 3-9 为针对平坦路面环境，在一个步态周期内，机器人的间歇爬行步态仿真过程的俯视截图，其中各个步态阶段与图 3-7 步态图 a)~f)一一对应。仿真结果验证了间歇爬行步态的稳定性。

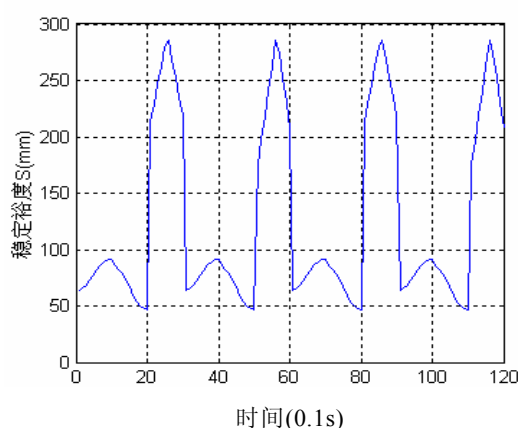


图 3-8 平面间歇爬行步态稳定裕度曲线

Figure 3- 8 The stability margin curve of discontinuous crawl gait

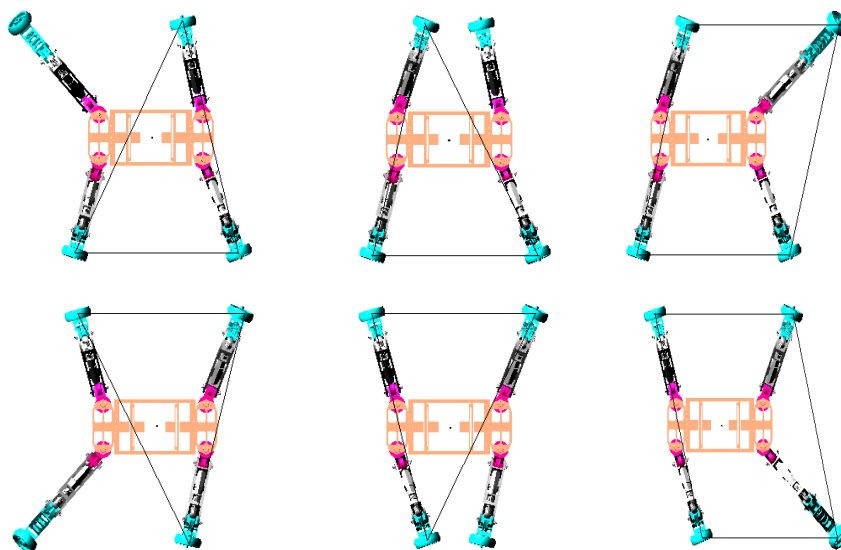


图 3-9 平面间歇爬行步态仿真图

Figure 3- 9 Simulation pictures of discontinuous crawl gait

(1) $\beta=3/4$ 考虑临界稳定情况 $S \rightarrow 0$, 即机器人在步行过程中不存在四足支撑躯体移动调整的过程。此时 $\beta=3/4$, 并且由公式(3-1)可知: $\lambda=4A$, $E=3A$ 。步态图如图 3-10 所示。

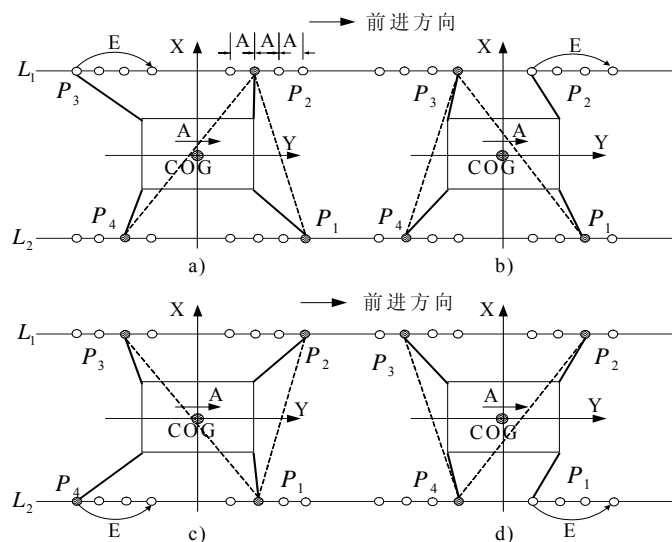


Figure 3- 10 Coordinated crawl gait chart with $S=0$ in plane

(2) $\beta=4/5$ 由于 $\beta=3/4$ 时, 步态稳定裕度趋近于零, 因而这种情况在实

际应用中并不可取。考虑在步行周期中增加一个四足支撑躯体调整的过程，采用 5 步步态。规划 $\beta=4/5$ 时， $\lambda=400\text{mm}$ ， $S=20\text{mm}$ ，由公式(3-1)和公式(3-2)可得 $A=80\text{mm}$ ， $E=320\text{mm}$ 。从计算结果可看出：每条腿在摆动时，足端相对躯体移动 320mm ，同时躯体相对地面移动 80mm ，则足端相对地面移动位移 400mm ，正好是一个步距长度。四条腿在一周循环的过程中，三足支撑时躯体相对地面移动的总位移为 320mm ；四足支撑时躯体相对地面移动的位移为 80mm 。步态图和仿真稳定裕度曲线图如图 3-11 和图 3-12 所示。

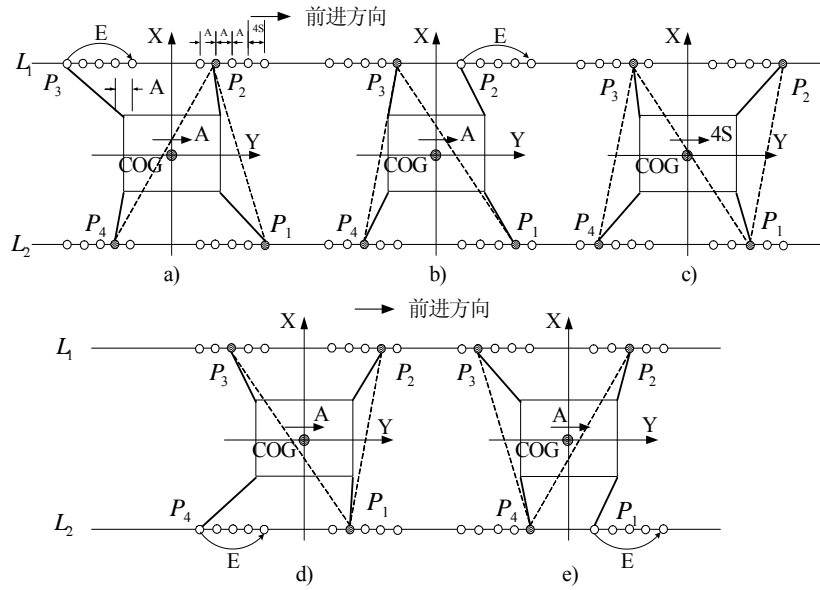


图 3- 11 $\beta=4/5$ 平面协调爬行步态图

Figure 3- 11 Coordinated crawl gait chart with $\beta=4/5$

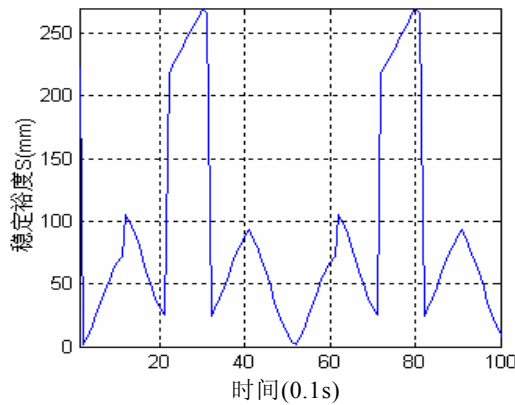


图 3- 12 $\beta=4/5$ 平面协调爬行步态稳定裕度曲线

Figure 3- 12 The stability margin curve of coordinated crawl gait with $\beta=4/5$

图 3-12 中, 稳定裕度仍具有趋近于零的时刻, 这是因为选择了与 $\beta=3/4$ 步态相同的启动步态。实际行走中, 启动时可以将机器人重心略前移, 所以稳定裕度应为图 3-12 曲线中几个最低拐点纵坐标的平均值。

在机器人理论步态规划时, 没有考虑机器人迈腿过程中重心的变化。而对于实际的机器人, 每条腿由于材料以及电机组件、传感器的质量使腿的质量往往在机器人的总质量中很大比重。例如, 前腿质量占躯体总质量的 20.94%, 后腿质量占躯体总质量的 17.22%。所以机器人在迈腿过程中, 重心不是完全在机器人几何中心, 因此实际机器人的稳定裕度要比理论分析机器人的稳定裕度小。

采用与间歇爬行步态仿真相同的方法, 在建立了控制所需的关节轨迹与 ADAMS 模型中关节之间的映射关系后, 在 ADAMS 环境下, 对机器人进行了平面协调爬行步态的仿真, 如图 3-13 所示, 采用 $\beta=4/5$ 的 5 步规划, 其中各个步态阶段与图 3-11a)~图 3-11e)一一对应。在仿真中, 机器人实现了稳定行走, 躯体重心仍保持在稳定三角区域, 仿真结果验证了间歇爬行步态的稳定性。

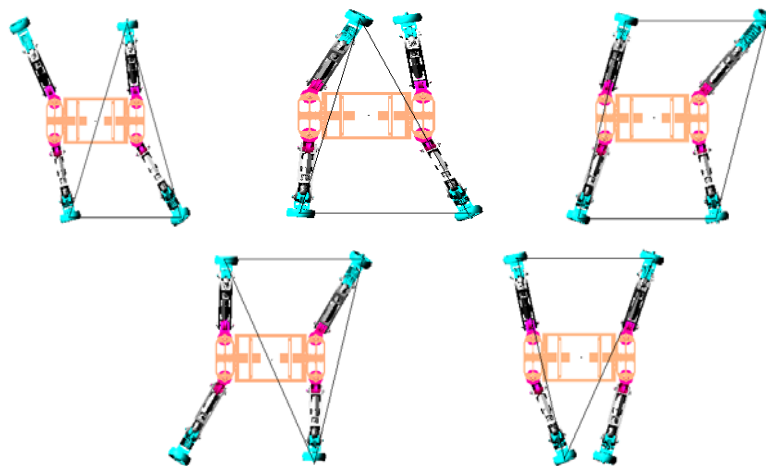


图 3-13 $\beta=4/5$ 平面协调爬行步态仿真

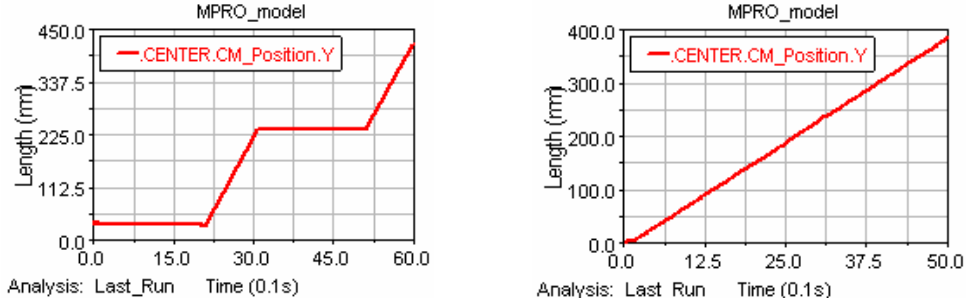
Figure 3-13 Simulation pictures of coordinated crawl gait with $\beta=4/5$

3.3.3 两种步态对比分析

节 3.3.1 和节 3.3.2 分别规划了 $\beta=5/6$ 间歇步态和 $\beta=4/5$ 的协调步态。可以看到, 间歇步态相比协调步态具有更高的稳定裕度, 但显然间歇步态的躯

体协调性相对较差。

图 3-14 是 ADAMS 一个步态周期仿真中 $\beta=5/6$ 间歇步态和 $\beta=4/5$ 的协调步态的躯体位移曲线图。从图中直观的可以看出，协调步态要比间歇步态躯体运动轨迹平滑，即柔顺性要好。



a) $\beta=5/6$ 间歇爬行步态躯体位移曲线 b) $\beta=4/5$ 协调爬行步态躯体位移曲线
a) Discontinuous crawl gait with $\beta=5/6$ b) Coordinated crawl gait with $\beta=4/5$

图 3-14 平面两种爬行步态重心位移仿真曲线

Figure 3-14 Simulation curve of COG locomotion from two kinds of crawl gait

如果用平均速度来衡量四足机器人的步行速度，即

$$\bar{v} = \frac{\lambda}{T} \quad (3-4)$$

式中 λ ——步距(mm);

T ——为步态周期(s)。

由于步距 λ 都为 400mm，假设两种步态的单次摆腿时间和躯体平移过渡时间均为 1s，即步态周期 T 分别为 6s、5s，则两种步态的平均速度分别为 66.67mm/s 和 80mm/s，可以看出 $\beta=4/5$ 时的协调步态平均速度较大。

综合以上对比分析可以看出，无论从四足移动机器人的步行柔顺性，还是步行速度方面来看， $\beta=4/5$ 时的协调步态都是最好的。但由上文可知，这种步态的实际稳定裕度却是较低的。因此，在机器人步行稳定裕度要求比较高的场合，例如非平坦路面时，间歇步态比较合适；而对步行柔顺性和速度要求比较高的场合，例如平坦路面，协调步态比较合适。

3.4 转弯步态规划

以上步态都是前进步态，但当机器人需要改变方向时，须对其转弯步态

进行规划^[87]。根据转弯半径不同,转弯步态可分为原地转弯和弯道转弯。当转弯半径等于零时为原地转弯,当转弯半径大于零时为弯道转弯。本节主要研究四足机器人原地转弯步态规划。因为少一个约束,因此三足着地时躯体绕Z轴的转动范围比四足着地时躯体绕Z轴的转动范围大。所以为了提高运动效率,可以在抬腿过程中是躯体同时旋转,即三腿着地转动。综合考虑机器人躯体的转动范围,每次转动 30° 。

图 3-15 为逆时针转动 90° 的步态仿真过程:初始位置是静态行走的平行四边形稳定姿态,躯体重心在四足趾组成的四边形中心处。图中具有标号的腿为转弯过程中的摆动腿。

第一步,迈三腿前进 100mm,右移 300mm,同时躯体旋转 30° ;

第二步,迈四腿前进 450mm,左移 100mm;

第三步,迈二腿前进 100mm,左移 450mm;

第四步,迈一腿后退 500mm,右移 100mm,同时躯体旋转 30° ;

第五步,迈三腿右移 400mm;

第六步,迈四腿后退 250mm,右移 200mm;

第七步,迈二腿左移 450mm,同时躯体旋转 30° 。

转动 90° 共通过 7 个子步态完成,规划每一步时间为 2S,整个转弯过程共计 14s。转弯步态的稳定裕度为 100mm。

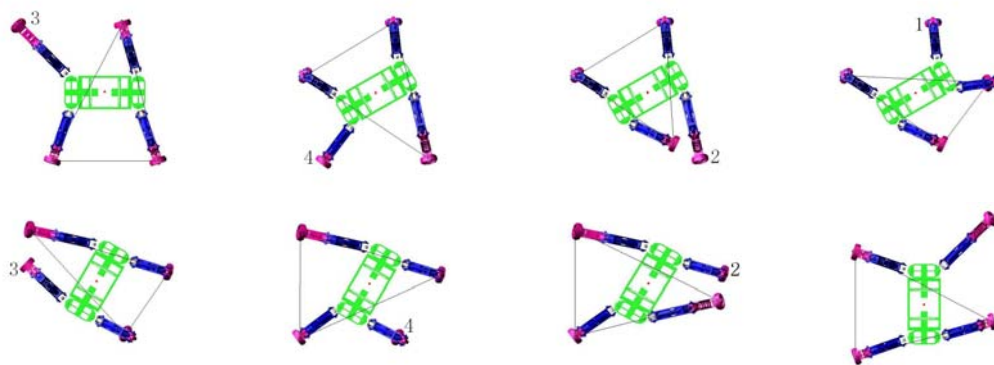


图 3-15 转弯过程

Figure 3- 15 The process of turning

3.5 摆动足轨迹规划

步行足的路径规划问题可以这样表述:选择足尖点在空间中经过的轨迹,

使该轨迹满足一定的要求。首先应当使足在抬离地面后不碰到障碍物或是与地面发生摩擦，这就要求足尖在抬起时有一定的离地高度，这一高度并不是越大越好，因为离地高度越大，固然提高了足的越障能力，但同时足抬起过高意味着驱动元件要做更多的功以及足在空间中经过距离的增加，降低了行走效率。所以在做足尖点的规划时，要选择合适的离地高度，除非在高度方向有障碍物时，再重新规划，选取更大的值。另外，还应当使机器人足在运动的过程中满足一定的起落条件以及较优的轨迹时间特性，速度加速度特性等。一些研究者在多足步行机器人的研究实践中，采用某种特定曲线作为摆动足足尖点的轨迹如摆线、抛物线、心形线、正弦曲线等，它们都不同程度的有各种各样的优点和缺点，无法满足上述条件。足尖点的路径所要满足的上述条件可以描述为：足尖在特定的时间经过一系列规定点，在特定的位置满足特定的运动约束条件。

这样足尖的路径可以用下面的多项式来表示：

$$p(t) = \sum_{i=0}^n c_i t^i \quad (3-5)$$

式中 $p(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$ ——随时间变化足尖点在空间中所经过的一系列点的坐标；

$c_i = [c_{ix} \ c_{iy} \ c_{iz}]^T$ —— t 的多项式的系数矢量。

摆动足轨迹要求抬起和落足瞬间速度为零，并且能越过一定的高度，因此采用轨迹规划如下：

设单腿摆动时间为 T_0 ，摆动足在竖直方向最大值为 H ，在前进方向最大值为 E 。在前进方向， T_0 被分成相等时间的两个阶段：分别为匀加速运动和匀减速运动；在竖直方向， T_0 被分成相等时间的四个阶段：分别为匀加速运动，匀减速运动，反向匀加速运动和反向匀减速运动；同时规定机器人足端横向速度恒为零。

因此，足端在前进和竖直方向的时间函数 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 和 $Z(t)$ 分别为：

$$X(t) = 0 \quad (0 < t < T_0) \quad (3-6)$$

$$Y(t) = \begin{cases} \frac{2E}{T_0^2} t^2 & (0 < t < T_0/2) \\ \frac{E}{2} + \frac{2E}{T_0} (t - \frac{T_0}{2}) - \frac{2E}{T_0^2} (t - \frac{T_0}{2})^2 & (T_0/2 < t < T_0) \end{cases} \quad (3-7)$$

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{8H}{T_0^2} t^2 & (0 < t < T_0/4) \\ \frac{H}{2} + \frac{4H}{T_0} (t - \frac{T_0}{4}) - \frac{8H}{T_0^2} (t - \frac{T_0}{4})^2 & (T_0/4 < t < T_0/2) \\ H - \frac{8H}{T_0^2} (t - \frac{T_0}{2})^2 & (T_0/2 < t < 3T_0/4) \\ \frac{H}{2} - \frac{4H}{T_0} (t - \frac{3T_0}{4}) + \frac{8H}{T_0^2} (t - \frac{3T_0}{4})^2 & (3T_0/4 < t < T_0) \end{cases} \quad (3-8)$$

通过调整公式(3-6)、(3-7)中的 H 和 E 参数,可以获得不同的足端运动轨迹。图 3-16 所示为 $H = 120 \text{ mm}$ 和 $E = 400 \text{ mm}$ 条件下足端在 YOZ 平面的运动轨迹。

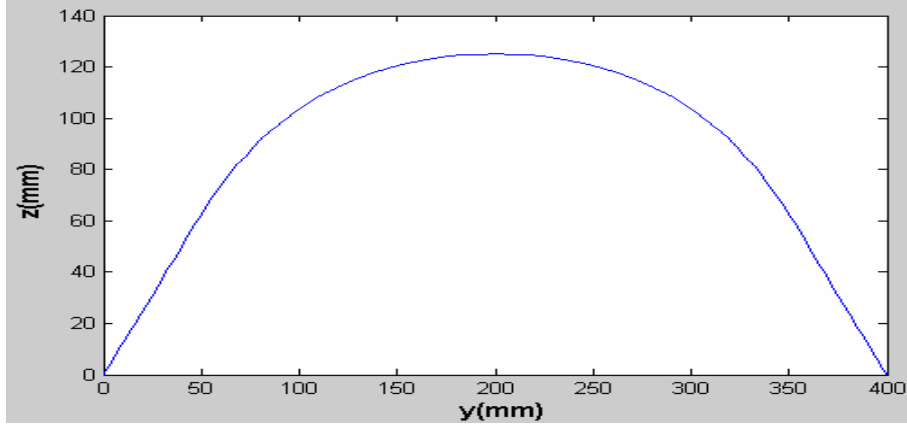


图 3-16 足趾运动轨迹

Figure 3-16 The locomotion track of toes

3.6 本章小结

本章首先引入四足步态的基本定义,在对四足动物步态研究分析的基础上,给出了四足动物步态的一般性描述。在此框架下,根据不同的步态参数,规划了四足机器人针对非平坦路面间歇爬行步态和针对平坦路面的协调爬行步态,并针对两种步态在稳定裕度、步行柔顺性等方面进行了对比及仿真分析,最后对转弯步态和摆动足轨迹进行了规划,为后面的步态实验提供了理论依据。

第4章 四足机器人足力控制方法研究

前两章主要是从静态稳定原理即四足机器人在步行过程中满足稳定裕度大于零的条件来规划步态的。四足移动机器人除了满足重心的稳定性和相应的步态位置要求以外，还要满足机体姿态及步态的柔顺与平衡。从机器人控制的角度，位置控制适用于机器人末端（足）在自由空间沿某一预定的轨迹运动，在运动过程中末端（足）不与任何外界物体相接触。一旦与物体相接触进入约束空间，仅使用位置控制远不能满足柔顺过渡的要求。同时，机器人在凸凹不平路面或有弹性变形路面行走时，支撑力的突变及关节和驱动轮的变形会使得机器人躯体的绝对高度降低或者姿态改变。显然，这样的波动单纯的位置控制已无法克服，因此，四足移动机器人的力控制成为机器人步态控制中十分重要的环节。

环境自适应特性对于足式机器人是必不可少的，如何提高足式机器人在复杂环境中的自动适应能力一直是足式机器人控制中的难题。传统基于模型的运动控制方法，一般需要预先对机器人本体和环境进行动力学建模，对此模型在平衡点附近进行解耦、降阶和线性化处理，建立适当的自适应控制算法，在运动过程中根据系统的状态和环境情况，调节系统参数，这种方法在建立足式机器人多刚体动力学模型过程中遇到了很大的困难，当机器人的自由度增多时，得到和简化模型都十分困难，需要大量的计算和在线测量，缺乏足够的实时性。自然界中动物的运动具有很强的环境适应性。动物可以非常轻松地行走于平原、山地、沟壑，可以对外界环境的改变和各种刺激作出快速、准确的反应。这种强大的运动适应性来源于动物运动神经系统中丰富的反馈网络和合理的生物反射机制。借助生物足底反射机制实现机器人的环境适应性是一条颇具潜力的思路。

为了避免计算复杂的多足机器人多刚体动力学，研究人员一直力求寻找一种有效的、实时性强的机器人平衡控制策略。本章提出了基于足力反馈的机器人控制算法。基本思想是在步行机器人的控制中建立机器人虚拟悬挂模型，采用改进的基于位置的阻抗控制策略，通过对足力而不是关节力矩的控制，实现躯体的位姿平衡控制和摆动足从自由空间到约束空间的柔顺过渡。

4.1 四足移动机器人力学模型

当机器人处于爬行状态时, 由于速度较低, 可以忽略加速度的影响, 此时机器人的运动可以看做是准静态运动。然而, 由于多足步行机器人每条腿有三个驱动关节, 这样即使是三条腿着地时也有九个关节驱动力矩需要确定, 但机体的力平衡方程只有六个, 因此不可能根据力平衡方程的求解获得关节力矩的控制变量, 这样的情况类似于并联机器人的超确定输入问题。幸运的是, 这里所关心的并不是关节的输入控制力矩问题, 分析机器人的力学模型, 主要目的是为了获得理想的足底反力, 找出足底受力的平衡关系。由于机器人足与地面接触不大, 因此假设机器人足底与地面为点接触, 即在地面与足底之间仅有作用力而没有作用力矩传递。

建立四足移动机器人受力示意图如图 4-1 所示。用 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 表示机体坐标系, 该坐标系固定在机器人机体上, 机器人机体定位在 $X_c Y_c$ 平面内, 机体重心为坐标原点。 $O - XYZ$ 为全局坐标系。设机器人所受主矢 $R = [R_x, R_y, R_z]$ 和主矩 $M = [M_x, M_y, M_z]$ 的外力作用, 各足在机体坐标系中的位置矢量 $r_i = [r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}]$ (i 为腿号), 所受地面作用反力的合力 $F_i = [F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}]$ 。根据力、力矩平衡关系有下列方程:

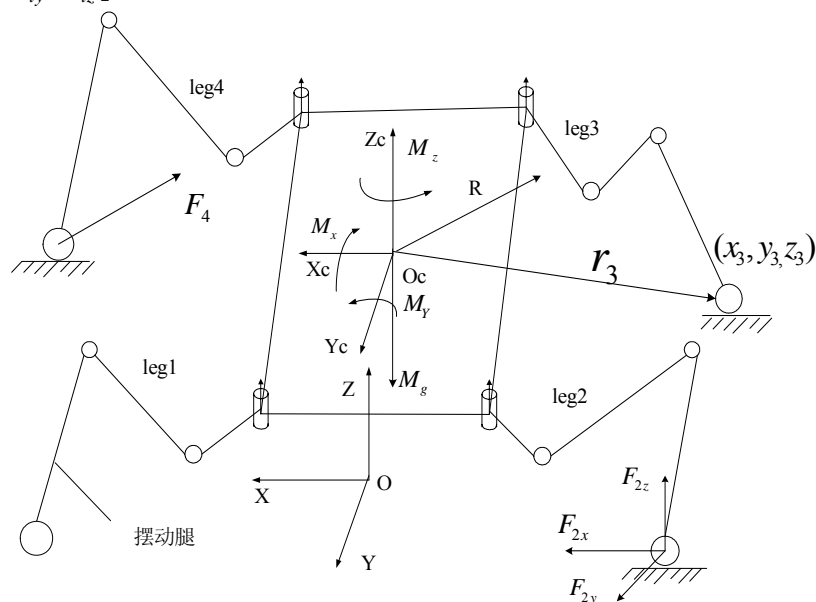


图 4-1 四足步行机器人力学模型

Figure 4-1 Force model of quadruped robot

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n F_i = m_0(\bar{g} + a_0) + R \\ \sum_{i=1}^n (r_i \times F_i) = M \end{cases} \quad (4-1)$$

式中 n ——支撑腿数；

当四足移动机器人以静步态直线行走时，可以忽略加速度的影响，因此 $a_0 = 0$ 。从机器人躯体平衡角度，竖直方向的波动及沿支撑面的转动是主要的控制参数，该参数与垂直于地面的足底反力直接相关，因此，公式(4-1)由竖直方向力平衡、俯仰及侧翻方向力矩平衡可以简化得到下面的矩阵方程：

$$AF_z = W \quad (4-2)$$

式中 A, F_z, W 分别为矩阵的形式，其中

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ y_1 - y_G & y_2 - y_G & \cdots & y_n - y_G \\ x_1 - x_G & x_2 - x_G & \cdots & x_n - x_G \end{pmatrix}$$

$$F_z = [F_{1z}, F_{2z}, \cdots, F_{nz}]^T$$

$$W = [m_0 g + R_z, M_p, M_r]^T$$

式中 x_i, y_i ——腿 i 足端在机体坐标系 XY 平面位置坐标；

x_G, y_G ——机器人重心在机体坐标系 XY 平面位置坐标；

F_{iz} ——腿 i 竖直方向足底反力；

$m_0 g$ ——机器人总重力；

R_z ——机器人所受主矢在重力方向的分量；

M_p ——机器人所受主矩在俯仰方向的分量；

M_r ——机器人所受主矩在侧翻方向的分量；

在静态支撑阶段，若机器人没有受到除重力外的外加主矢和主矩， $W = [m_0 g, 0, 0]^T$ ，此时机器人仅受到足端竖直法向力作用而使机体平衡。

当 $n=3$ 即三腿支撑时，公式(4-2)中具有三个未知的竖直方向足底反力变量，与独立方程数相同， F_z 有唯一解：

$$F_z = A^{-1}W \quad (4-3)$$

而当 $n=4$ 时即四腿支撑时，公式(4-2)中未知数多于独立方程数，没有唯一解，属一次静不定问题，即根据平衡方程得出的关于脚力的解有无数个，此时系统为非确定系统。

针对四腿支撑的足底反力解的问题，需引入额外的约束条件。一般情况下，当足底支撑力均匀分担机器人重力时，机器人具有最大承载能力，且能耗最小^[66]。据此在四足支撑时设定均方差最小为目标函数：

$$\sum_{i=1}^4 D(F_{iz}) \rightarrow \min \quad (4-4)$$

由公式(4-3)和公式(4-4)可求出整个步态周期内各腿足端受力 F_{iz} ($i=1, 2, 3, 4$) 情况。图 4-2 为机器人以间歇爬行步态行走两个周期的足受力曲线图，其中图 4-2a)~图 4-2d)分别对应足 1~4。由于结构的对称性，一个步态周期中各足受到的最大地面反力为机器人总重力（机器人总重力约为 236N）的一半，即 $F_{iz\max} = 1/2 Mg$ ($i=1, 2, 3, 4$)。

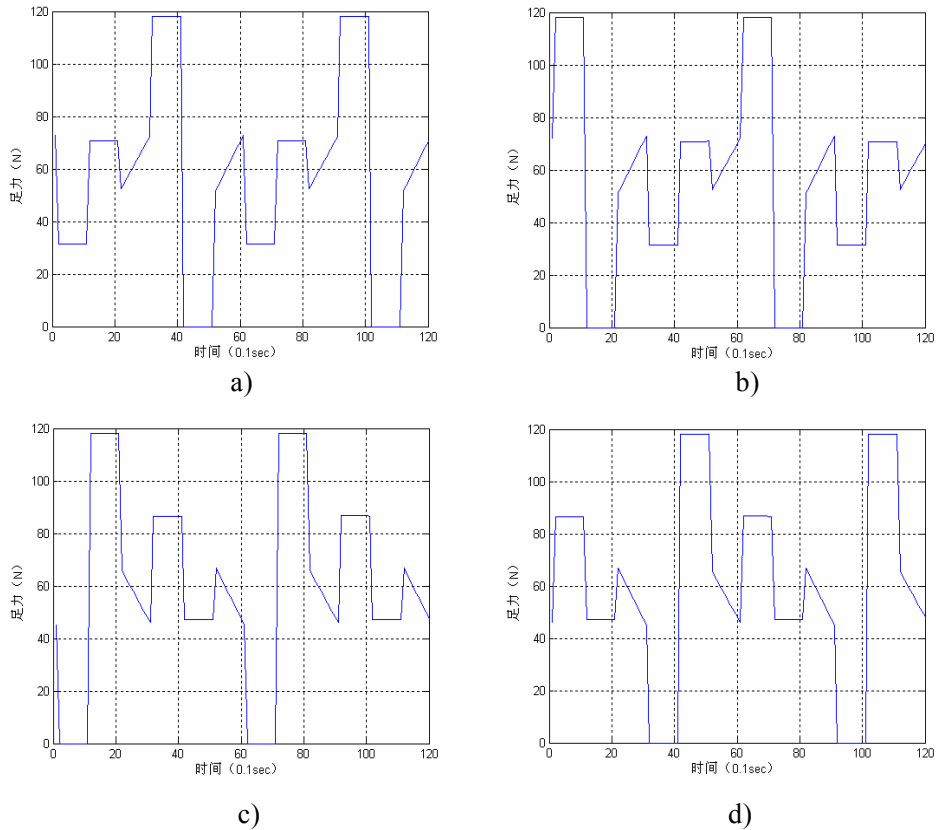


图 4-2 间歇爬行步态足力曲线

Figure 4- 2 Foot force curve in discontinuous crawl gait

4.2 基于虚拟悬挂模型的躯体姿态保持

多足机器人应用的一个重要方面是作为移动应用平台，因此机器人在非规则环境下不仅要求能够稳定行走并且要求躯体能够保持预定的平衡姿态。文献[88]研究了通过调整机器人步态来实现躯体的稳定，然而，在非结构环境下，由于地面高低、软硬的不同，通过简单地控制每条腿与躯体的相对位置以保持机器人躯体姿态水平的方法无法完全实现躯体期望的位姿。因此，本研究考虑在机器人足底增加力传感器，以取代原来的接触开关，躯体固定姿态传感器，建立一个虚拟悬挂系统使机器人足适应地形环境的变化，并保持姿态的平稳性。基于虚拟悬挂模型的躯体姿态保持算法包含两方面：1) 计算躯体无波动情况下的理论期望足底反力；2) 在绝对坐标系中，检测躯体波动，修改理论期望足底反力，进而调整躯体姿态。其中理论期望足底反力在四足机器人力学模型中进行了讨论，本节主要针对内容二进行研究。

4.2.1 虚拟悬挂模型

机器人在非平坦路面行走时，为保持躯体位姿稳定，在竖直、俯仰和侧翻方向分别建立单自由度弹簧阻尼虚拟悬挂模型，应用足力补偿策略来做主动位姿调整，如图 4-3 所示。

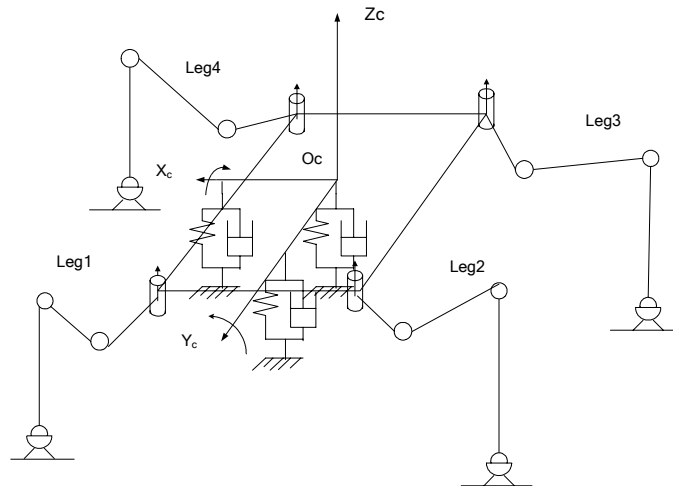


图 4-3 四足移动机器人虚拟悬挂模型

Figure 4-3 Virtual suspension model of quadruped robot

定义躯体高度和姿态变化为 Δz 、 $\Delta\theta_p$ 和 $\Delta\theta_r$ ，修复偏差所需的力和力矩为 ΔF_z 、 ΔM_p 和 ΔM_r ，在躯体竖直方向(z)、俯仰方向(pitch-p)和侧翻方向(roll-r)建立3个单自由度虚拟弹簧阻尼器，则有方程：

$$\begin{cases} -K_z\Delta z - C_z\Delta\dot{z} = \Delta R_z \\ -K_p\Delta\theta_p - C_p\Delta\dot{\theta}_p = \Delta M_p \\ -K_r\Delta\theta_r - C_r\Delta\dot{\theta}_r = \Delta M_r \end{cases} \quad (4-5)$$

式中 K_z, K_p, K_r ——虚拟弹簧刚度（角刚度）系数；

C_z, C_p, C_r ——虚拟阻尼（角阻尼）系数；

$\Delta z, \Delta\dot{z}$ ——躯体竖直方向的位移和速度；

$\theta_p, \dot{\theta}_p$ ——躯体俯仰方向的角度和角速度；

$\theta_r, \dot{\theta}_r$ ——躯体侧翻方向的角度和角速度；

$\Delta R_z, \Delta M_p, \Delta M_r$ ——修复躯体偏差所需的力和力矩。

4.2.2 足力补偿

为保持机器人在非平坦路面时的位姿，在三腿或四腿支撑阶段，通过主动足力补偿分配来完成躯体的位姿修复。主要思想为首先通过安装机器人身上的姿态传感器实时检测机器人位姿变化，当机器人姿态变化超过设置阈值时，由虚拟悬挂模型计算出躯体竖直方向、俯仰方向和侧翻方向进行位置补偿所需的合力和合力矩，进一步根据机器人力学模型得出修复偏差所需的足力补偿，将足力补偿解与原有足力共同应用于机器人足力控制中。

将修复偏差所需的 $\Delta R_z, \Delta M_p, \Delta M_r$ 分别带入公式(4-2)中，有矩阵方程：

$$\Delta F_z = A^{-1}W' \quad (4-6)$$

式中 $W' = [Mg + \Delta R_z, \Delta M_p, \Delta M_r]^T$

与平坦路面时类似，当三腿支撑时，根据公式(4-6)可求出唯一足力补偿解；当四腿支撑时，结合目标函数公式(4-4)也能求出为保持预定位姿所需要的各腿足力补偿。

采用计算得到的足力补偿解 ΔF_z 对无波动情况下计算的理论足底反力进行力值修正，并采用力控制策略对修复后的足底反力进行力跟踪。实际上，

采用虚拟悬挂模型对躯体姿态保持过程是一个动态的过程，随着躯体姿态逐渐恢复到平衡状态，足力补偿解 ΔF_z 也逐渐趋近与零。

4.2.3 仿真分析

为了更直观的分析机器人在非平坦路面的姿态变化，在 ADAMS 软件环境中进行了仿真。仿真环境中，障碍高度 $h = 50 \text{ mm}$ ，机器人采用间歇爬行步态爬行。图 4-4 为四足移动机器人在有障碍存在的环境中的步行仿真图。机器人以规划的爬行步态行走，在行走过程中遇到障碍后，在位置控制模式下躯体高度(z)方向、俯仰方向(Pitch)和侧翻方向(Roll)都有相应较大变化，在躯体坐标系下高度、俯仰角和侧翻角变化曲线如图 4-5、图 4-6 和图 4-7 所示。

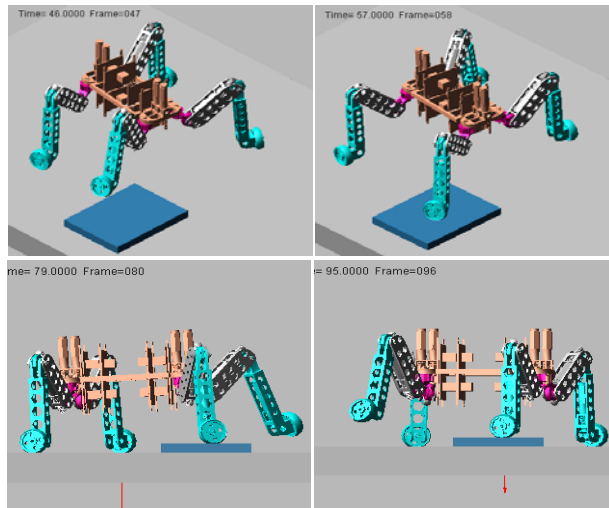


图 4-4 机器人在有障碍路面步行仿真图

Figure 4- 4 Simulation picture in the case of stepping obstacle

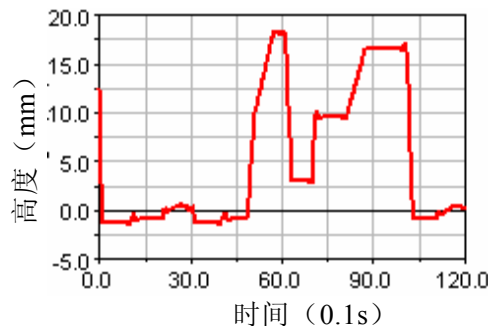


图 4-5 机器人在有障碍路面步行躯体高度变化曲线

Figure 4- 5 Body height in the case of stepping obstacle

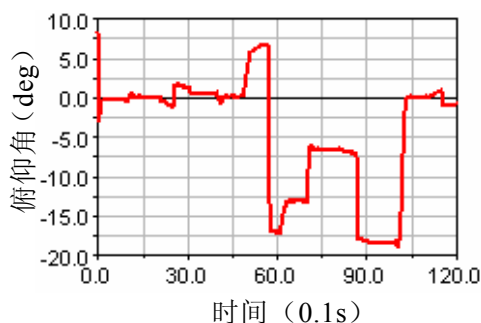


图 4- 6 机器人在有障碍路面步行俯仰角度变化曲线

Figure 4- 6 Pitching angle in the case of existing step obstacle

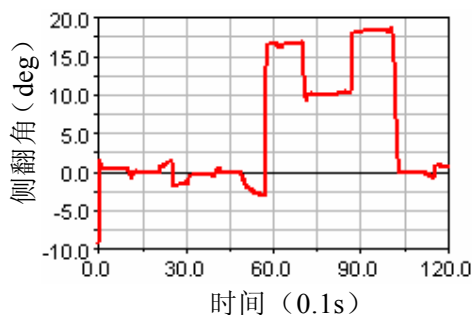


图 4- 7 机器人在有障碍路面步行侧翻角度变化曲线

Figure 4- 7 Rolling angle in the case of stepping obstacle

由于机器人躯体质量 $M = 5.7 \text{ Kg}$ ，俯仰方向和侧翻方向转动惯量分别为 $I_p = 0.186 \text{ Kg.m}^2$ 和 $I_r = 0.34 \text{ Kg.m}^2$ ，参考文献[69]，并忽略速度(角速度)影响，选择悬挂系统的参数三个参数分别为 $K_z = 2280 \text{ N/m}$ ， $K_p = 344 \text{ Nm/rad}$ ， $K_r = 136 \text{ Nm/rad}$ 。进而可由式(4-4)和式(4-6)计算相应各腿足力补偿量，图 4-8 为腿 3 足力曲线图。比较图 4-2 可以看出，腿 3 足力在最大处相应增加补偿约 15N。

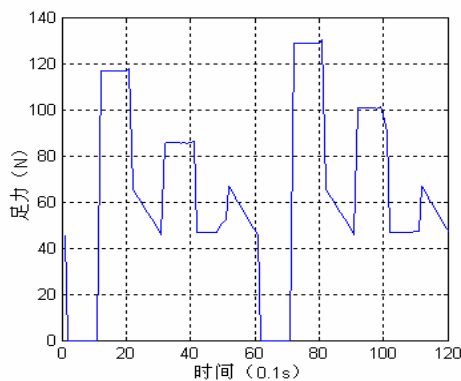


图 4- 8 非平坦路面步行足 3 补偿受力曲线

Figure 4- 8 Foot compensation force curve of leg 3 in the case of stepping obstacle

4.3 四足移动机器人足力阻抗控制

机器人足力控制是实现机器人稳定行走、保持预定姿态的一个重要途径。同时，足力控制还能实现机器人摆动足从自由空间到约束空间良好过渡。本文采用基于位置的阻抗控制方法来实现上述足力的跟踪。

4.3.1 阻抗控制原理

阻抗控制是通过调整机器人末端的刚度，从而使力和位置满足某种理想的动态关系来实现柔顺功能。这样的动态关系类似于电路中阻抗的概念，因而称为阻抗控制。如果只考虑静态，力和位置的关系可用刚性矩阵来描述。如果考虑力和速度之间的关系，可用粘滞阻尼矩阵来描述。因此，所谓阻抗控制，就是通过适当的控制方法以使机械手末端呈现需要的刚性和阻尼^[89]。它将力控制和位置控制纳于一个框架之内，采用相同的策略实现，因而具有较少的任务规划工作量。而且阻抗控制对一些不确定性和干扰因素具有较强的鲁棒性，被认为是一种统一的自由运动和约束运动控制方法，对自由运动和约束运动之间的转换具有很强的适应能力。

常用的目标阻抗模型为^[90]：

$$M_d(\ddot{x}_r - \ddot{x}) + B_d(\dot{x}_r - \dot{x}) + K_d(x_r - x) = F \quad (4-7)$$

式中 M_d, B_d, K_d ——阻抗模型的 3×3 目标惯量、目标阻尼和目标刚度矩阵；

F ——足端与环境接触时的足端所受的力向量；

x_r, x ——机器人足端的参考运动轨迹和实际运动轨迹。

阻抗控制方法总体上看可分为两大类：一类是基于动力学模型的阻抗控制方法，另一类是基于位置的阻抗控制方法^[91]。

在基于位置的笛卡尔阻抗控制中，力通过足端力传感器测量得到，将检测到的力反馈给阻抗滤波器(Impedance Filter)，通过阻抗滤波器产生一个修正位置向量 $X_f = (x_f, y_f, z_f)^T$ ，修正位置向量 X_f 与轨迹规划产生的参考位置向量 X_r 相减，得到位置控制命令 $X_d = X_r - X_f$ 。基于位置的阻抗控制的效果如何完全依赖于内环的位置控制器。

在基于动力学模型的阻抗控制中，位置由传感器检测得到，足底力参考

值 F_r 由轨迹规划产生的参考位置 X_r ，和实测位置 x 通过公式(4-7)计算得到，而后由驱动器通过控制关节力矩来使足端呈现需要的参考力。基于动力学模型的阻抗控制完全依赖于内环的力控制器以及机器人的动力学模型。

根据上面的阻抗控制模型，可以得到以下结论：当机器人足在自由空间运动即足端不与地面接触时， $F=0$ ，目标阻抗变为

$$M_d(\ddot{x}_r - \ddot{x}) + B_d(\dot{x}_r - \dot{x}) + K_d(x_r - x) = 0 \quad (4-8)$$

此时 $x - x_r \rightarrow 0$ ，可以保证准确的位置跟踪；但是当机器人足与地面接触时，足端与地面的动态关系由公式(4-7)描述。因此，阻抗控制可以实现摆动足从自由空间到约束空间良好过渡，并使系统的力控制和位置控制模型统一到一个框架下，使控制具有连续性。

公式(4-7)中的目标惯量矩阵、目标阻尼矩阵和目标刚度矩阵根据不同的操作任务来选取。一般来说，柔性环境和位置精确控制方向应选择较大的目标刚度；相反，刚性环境和精确力控制方向应选择较小的目标刚度。当机器人足的能量需要被快速吸收和消耗掉的情况下，应选择大的阻尼。足端与环境接触时，合理的选择目标惯性值能保证足端与环境接触后运动的“平滑”性。

4.3.2 机器人足阻抗控制

通过以上的分析可知，在同一个机器人的阻抗柔顺控制中，基于位置的阻抗控制和基于动力学模型的阻抗控制不是同时都适合的，应该根据机器人具体的传感装置而定。

对于四足机器人，其在足端装有力传感器，每个关节电机安装有相对码盘和旋转电位计，通过关节空间到操作空间的坐标转换可以得到足端的位置，因此，四足机器人采用了基于位置的阻抗控制。与基于动力学模型的阻抗控制相比，机器人位置控制的理论更为成熟，性能更为稳定。基于位置的阻抗控制避免了求解多足机器人复杂的动力学模型，也避免了在关节空间的施加力矩控制，在机器人柔顺控制中是常常采用的方法。

因此，本文采用基于位置的阻抗控制方法。在基于位置的机器人足阻抗控制系统中，足的精确位置控制是基础，把它作为整个控制器的内环，附加的外环是阻抗力控制器，控制框图如图 4-9 所示。

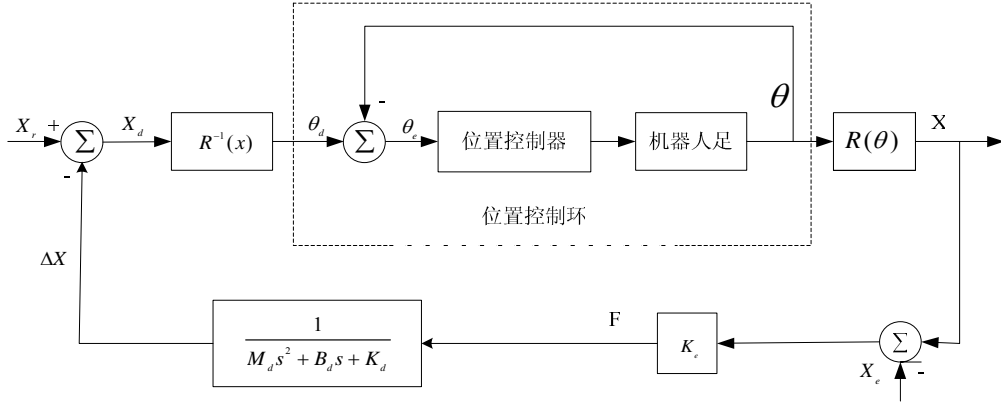


图 4-9 机器人足阻抗控制框图

Figure 4-9 Impedance control structure chart of robot foot

在如图 4-10 所示的基于位置的阻抗控制中，足力通过机器人小腿处串联的力传感器测量得到，把检测到的力反馈给阻抗控制器，通过阻抗控制器产生一个修正位置向量 $\Delta X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ ，位置修正向量满足下式：

$$M_d \Delta \ddot{X} + B_d \Delta \dot{X} + K_d \Delta X = F \quad (4-9)$$

则有：

$$\Delta X(s) = \frac{F(s)}{M_d s^2 + B_d s + K_d} \quad (4-10)$$

由于 M_d ， B_d 和 K_d 都是对角矩阵，这使得公式(4-9)就像一个二阶的低通滤波器一样对每一个 F 滤波，得到滤波后的位置修正向量 ΔX 。修正位置向量 ΔX 与轨迹规划产生的参考位置向量 X_r 相减，得到内部位置控制命令 X_d ：

$$X_d = X_r - \Delta X \quad (4-11)$$

X_d 通过逆运动学 $R^{-1}(x)$ ，映射为关节空间的期望关节角度 θ_d ，与实际反馈的关节角度 θ 相减，得到关节位置误差 θ_e ：

$$\theta_e = \theta_d - \theta \quad (4-12)$$

如果机器人的位置伺服控制系统足够精确的话， $\theta_e = 0$ ，则通过正运动学 $R(\theta)$ ，有 $X = R(\theta)\theta = R(\theta_d)\theta_d = X_d$ 。

4.3.3 足与地面接触等效模型

在自由空间中，机器人终端控制是单纯的位置控制，机器人不与环境发

生作用，是一个独立的受控对象。而当终端与环境接触后，就会受到环境的约束，此时的机器人终端不再是一个独立的受控对象，而是一个由终端及环境组成的综合动态系统。环境的建模是比较复杂的，根据运动和力的关系，机器人与环境的相互作用力与位移的微分变化有如下关系：

$$F = K_e \delta x + B_e \delta \dot{x} + M_e \delta \ddot{x} \quad (4-13)$$

式中 K_e, B_e, M_e ——分别为环境刚度矩阵、阻尼矩阵和惯性矩阵。

δx ——环境的微小变形。

由于速度项和加速度项很小，本文忽略其对作用力 F 的影响，因此可以只考虑位置项的作用，而不考虑阻尼项和惯性项的作用，此时接触力是由终端及环境的变形引起的。因此，终端与环境的接触模型被简化为一个“质量—弹簧”系统，如图 4-10 所示：

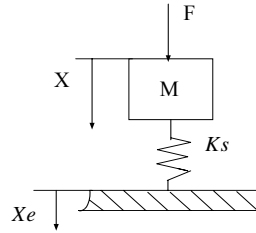


图 4-10 机器人足终端与环境接触模型

Figure 4-10 Model of foot contacting with environment

考虑到机器人终端的弹性变形，则有方程：

$$F = K_s (X - X_e) \quad X \geq X_e \quad (4-14)$$

式中 X ——机器人足端的实际位置；

X_e ——环境的位置；

K_s ——由足端刚度 K_z 、力传感器刚度 K_f 及环境刚度 K_e 串连的组成的等效接触刚度。

$$K_s = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_z} + \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_e}\right)} \quad (4-15)$$

由于机器人末端的位置是依靠关节空间到操作空间的正运动学计算获得，因此机器人足端的实际位置往往因为力传感器、充气轮胎的变形而与理论计算获得的位置不相符。于是将足端刚度 K_z 、力传感器刚度 K_f 及环境刚

度 K_e 组成的等效接触刚度 K_s 等效为机器人腿在绝对理想刚性条件下的等效环境刚度 K_{eq} ，在以下的推导中，如无特殊说明，所说的环境刚度即为等效环境刚度 K_{eq} 。

4.3.4 基于阻抗控制的力跟踪

通过修正目标机械阻抗，图 4-9 所示的阻抗控制系统能够快速修正参考位置轨迹从而达到快速响应接触力的目的，但它并不能实现机器人足力的跟踪。因此在公式(4-7)的基础上引入下面的目标阻抗：

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) + K_d(x - x_r) = F_r - F \quad (4-16)$$

式中 F_r ——足端参考力。

控制框图如图(4-11)所示。从中可以看出，目标阻抗由力误差 $\Delta F = F_r - F$ 来决定，从而达到力跟踪的目的。

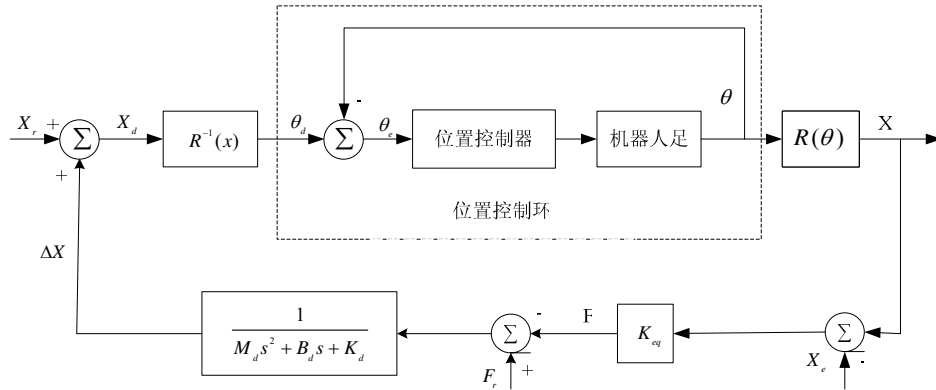


图 4-11 有力跟踪的机器人足阻抗控制框图

Figure 4-11 Impedance control structure chart existing force tracking

当机器人足与环境接触后， $x_r = x_e$ ，将公式（4-14）与公式（4-16）联立可得：

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_r) + (K_d + K_{eq})(x - x_r) = F_r \quad (4-17)$$

因此：

$$\frac{F(s)}{F_r(s)} = \frac{K_{eq}}{M_d s^2 + B_d s + (K_d + K_{eq})} \quad (4-18)$$

当机器人足稳定落地时：

$$\frac{F}{F_r} = \frac{K_{eq}}{(K_d + K_{eq})} \quad (4-19)$$

将图 4-11 中 F_r 做一下预处理，令：

$$F_r' = \frac{(K_d + K_{eq})}{K_d} F_r \quad (4-20)$$

而在实际实验中，用 F_r' 代替 F_r 输入到阻抗控制模型中，则：

$$F = F_r' \times \frac{K_{eq}}{K_d + K_{eq}} = F_r \quad (4-21)$$

因此，在理想情况下，即确切知道环境刚度情况下，应用公式（4-16），在机器人达到稳态时可以得到所期望的接触力。

然而，事实上，在非结构环境中，环境刚度是无法预知的，因此也就无法确切计算等效环境刚度 K_{eq} ，造成了力跟踪的稳态误差。针对稳态误差的出现，研究者在离线环境参数估计、在线环境参数估计等方面进行了深入研究，以实现精确的力跟踪效果。

在本文研究的四足机器人系统中，由于机器人足端为充气轮胎，力传感器为 S 型结构，因此，足端刚度 K_z 和力传感器刚度 K_f 远小于大多数地面环境刚度 K_e 。因此，实际计算中，常常忽略公式（4-15）中的 K_e 项，即等效环境刚度 K_{eq} 仅由足端刚度 K_z 和力传感器刚度 K_f 两项构成。尽管这样的简化和结构设计仍然会带来一定的力稳态误差，但对于足式机器人足力控制的场合是可以接受的。因此，在未知环境刚度情况下的力跟踪策略是有效的。

改进的基于位置的阻抗控制的目的是通过选用合适的控制参数来实现理想的目标阻抗，并最终将接触力稳定到期望值。阻抗模型中， M_d 为机器人理想惯性，对有大加速度的高速运动或会产生冲力的运动影响较大； B_d 为机器人理想阻尼，对中速运动或存在较强干扰时影响较大； K_d 为机器人的理想刚度，对平衡状态附近的低速运动影响较大。这些参数被当作时变参数，都可以通过主动控制来调节，它们都分别包含物体固有的和主动控制所带来的部分。文献[92~94]详细地论述了在位置控制精确的前提下，当机器人由自由空间向约束空间过渡时，目标阻抗系数只要满足公式(4-22)，过渡过程就

是稳定的。从公式(4-22)可以看出，为了实现系统的稳定，目标刚度应远小于环境刚度，同时目标阻尼要足够大以保证过渡状态的稳定性。

$$\begin{cases} \xi_t = \frac{B_d}{2\sqrt{M_d K_d}} \\ K = \frac{K_{eq}}{K_d} \gg 1 \\ \xi_t \geq 0.5(\sqrt{1+K}-1) \end{cases} \quad (4-22)$$

4.3.5 仿真分析

为了验证阻抗控制力跟踪策略，在 MATLAB/simulink 仿真环境中建立四足移动机器人单腿竖直方向仿真系统，如图 4-12 所示。其中正、逆运动学、位置控制和阻抗控制等子系统与控制框图 4-11 一一对应。从图中可以看出，改进的阻抗控制基本能够跟踪期望的足力 10N。

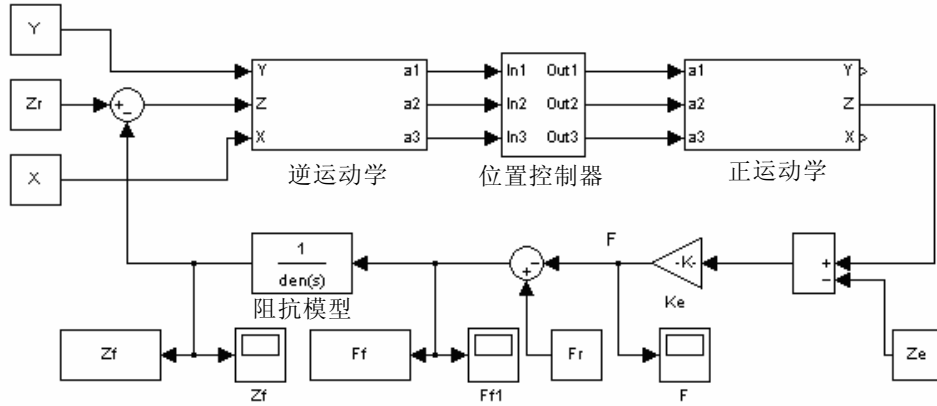


图 4-12 阻抗控制仿真框图

Figure 4-12 Simulation structure of impedance control

为了研究阻抗参数对系统的影响，选取参考轨迹 Z_r 为常量，环境刚度系数 $K_{eq} = 2000 \text{ N/m}$ 远远大于 K_d ，分别对竖直方向的取 $K_d = 20 \text{ N/m}$, B_d 取不同参数；以及取 $B_d = 60 \text{ Ns/m}$, K_d 取不同值的情况进行仿真，其对应仿真结果如图 4-13a)和图 4-13b)所示。从仿真结果可以看出，增大阻抗参数 B_d 值可以抑制系统振荡，使响应曲线趋向平滑，但增大阻抗参数 B_d 值会使系统响应速度降

低。由于仿真中环境刚度系数 K_{eq} 远远大于 K_d ，因此阻抗参数 K_d 的增大对系统的响应速度影响并不明显，但在一定程度上却带来了稳态误差。

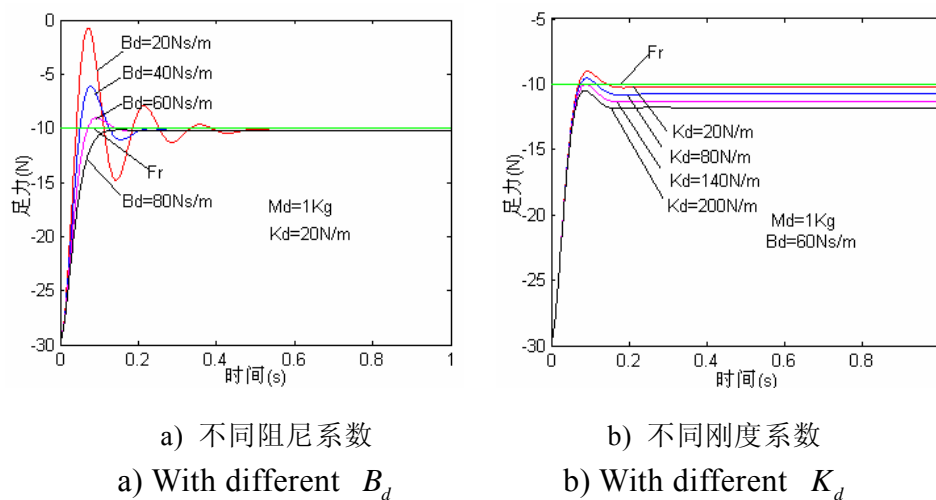


图 4-13 不同阻抗参数的力响应曲线

Figure 4-13 Force responding curve with different parameters

4.4 本章小结

本章首先分析研究了四足移动机器人的整体受力模型，采用了承载能力最优的目标优化函数来计算足力分配；在此基础上，建立了机器人虚拟悬挂模型及基于足力补偿的机器人躯体位姿偏差修正算法，并进行了仿真环境下的分析计算。针对摆动足从自由空间到约束空间的柔顺过渡和期望的足力跟踪问题，本章采用改进的基于位置的阻抗控制策略，并通过仿真，分析了阻抗参数对力跟踪的影响。

第5章 四足机器人分级控制系统研究

在前面的章节中，讨论了四足步行机器人运动学、步态、力控制等问题，严格的讲，上述方法属于解析或半解析性质，它们仅仅解决了多足步行机器人在给定简单明确的运动控制指令的情况下，如何正确规划并可靠完成该任务的问题。但对于指令如何在控制系统中实现，即任务规划和决策权在控制系统中的分配问题，此前并没有介绍。多足步行机器人的研究与设计来源于多足动物，而多足动物在自然界已有亿万年的演化史，并在复杂多变的环境中很好的生存下来，因此，借鉴多足动物的运动神经控制系统结构及任务分配方式，研究多足步行机器人控制原理，构建多足机器人控制体系，将极大的提高多足步行机器人对环境的适应能力。

5.1 多足机器人控制体系

机器人控制体系结构是指一个机器人系统中的智能、行为、信息、控制的时空分布模式。对一个具体的多足步行机器人而言，控制体系结构就是这个机器人信息处理和控制系统的具体物理实现。控制体系结构是机器人本体的物理框架，是机器人智能的逻辑载体，选择和确定合适的体系结构是机器人研究中最基础并且非常关键的环节。

四足仿生机器人机构的研究与设计来源于多足动物，其在控制体系的设计方面也必然要遵从多足动物的运动神经控制系统的结构和亿万年进化形成的精巧的运动控制机理。高等动物的运动控制系统是一个复杂的网络，涉及中枢神经系统、感觉器官以及骨骼、肌肉执行系统。中枢神经系统分为高级中枢和低级中枢两部分组成，高级中枢主要功能是控制节律运动的起始，发出运动指令，对运动过程进行监控，选择运动模式，实现复杂环境中的避障、路径规划等高级运动功能。低级中枢则作为节律运动的局部控制中心，感觉器官则是复杂反馈神经网络的末梢。多足动物的运动神经控制系统结构、递阶式任务分配方式以及信息传输通道在建立多足机器人控制体系中具有重要的借鉴意义。

Saridis曾在 1979 年提出, 智能控制系统必然是分层递阶结构, 如图 5-1 所示, 其分层的原则是随着控制精度的增加而智能能力减少^[96], 他根据这一原则把智能控制系统分为三级, 即组织级、协调级和执行级。从仿生学角度来看, 组织级来源于高级中枢的慎思, 协调级来源于低级中枢的局部控制, 执行级来源于生物的肌肉、骨骼及感观系统。组织级代表控制系统的主导思想, 具有最高的智能水平, 涉及知识的表示与处理, 一般由人工智能起主导作用, 在运行过程中可人为干预, 通过向机器人发送命令信息, 可以人为改变其行走路径、协作策略; 协调级为组织级和执行级之间的连接装置, 用于协调各个执行级间的协调动作, 并对执行级反馈回的传感信息作出及时的反映, 同时把其无法独自处理的信息反馈给组织级; 执行级是智能控制系统的最低层次, 要求具有最高的控制精度, 并由常规控制理论进行控制, 主要任务为关节控制、信息传感、反馈等^[97]。四足机器人的控制体系结构正是按照这样的分级原则进行设计的。

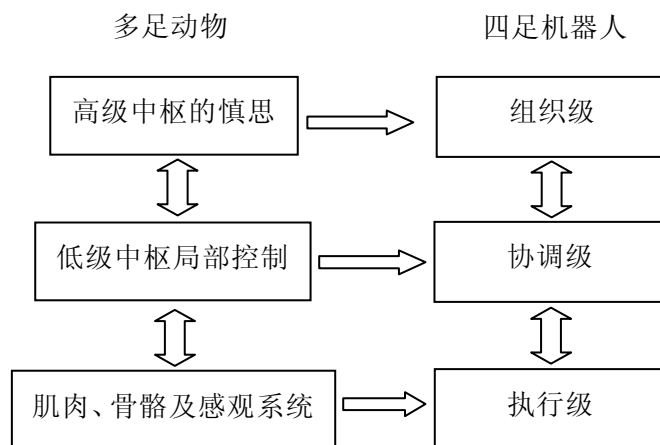


图 5-1 分层递阶控制系统结构

Figure 5- 1 Architecture of hierarchical control system

5.2 嵌入式多关节伺服控制器的研究

5.2.1 控制系统设计要求

为实现机器人灵活的、全方位的行走, 对足轮结合式机器人控制系统主

要有以下要求：

(1) 多自由度协调控制。

机器人总共有 14 个驱动关节,无论是全方位的行走,还是多功能的实现,都是通过驱动关节间的协调运动来实现的,因此必须对这些关节进行协调控制,要求各关节间位置、速度间具有严格的协调关系。

(2) 实时的综合决策能力。

与传统的自动机械以自身的动作为重点相比,仿生机器人的控制系统则更着重机器人本体与周围环境、操作对象的相互关系。机器人在运动的过程中,路面的状况和周围环境的情况都是随机的,针对这些意外事件,机器人必须能够及时反应,并作出合理的决策,否则将产生严重的后果。

(3) 小型化、集成化和嵌入式。

四足仿生机器人控制系统集电机控制、通讯、传感、能源为一体,由于其要求具有大范围的移动能力,以往控制柜式的设计思想无法在足式移动机器人上应用,控制系统能否小型化、集成化和嵌入式对四足仿生机器人运动范围的大小至关重要。目前,高端的大功率伺服电机的控制与驱动产品体积重量均较大,且价格不菲。因此,应针对四足仿生机器人的具体要求,量体裁衣,实现控制系统的小型化和嵌入式控制。

(4) 具有环境感知和执行指定命令的能力。

机器人的稳定协调的行走,得益于机器人自身的局部自主控制和环境感知能力。因此,控制系统应能够处理多种传感反馈信息,其中包括足底力信息的感知,躯体自身倾角信息的感知等。同时,控制系统能够接收上位机指令,执行相应的运动命令。

5.2.2 嵌入式控制系统总体设计

四足仿生机器人属于多自由度并联机器人范畴,其控制系统是四足仿生机器人的运转核心,机器人的各种理论步态最终需通过执行机构来实现验证。因此在进行多运动方式四足仿生机器人的研究过程中,从系统规模、关节数量、工作环境、传感信息的传递等角度提出了以无线通信和 CAN 总线通信为基础的三级控制系统的方案。

三级的任务分配与规划如图 5-2 所示。组织级通过无线通信对机器人进行遥控和全局路径规划,一般由操作者参与其中。系统协调级主要负责接受

用户命令、向用户反馈信息、根据现场环境规划各个腿的运动策略，完成四足机器人任务规划、轨迹规划和四条腿协调控制。系统协调级以嵌入式主板为核心，内部编制自适应控制步态算法，根据主从通讯协议通过 CAN 总线向各个执行级发送指令信息。执行级各节点在检测到与自己 ID 匹配的命令后进行命令解析，响应主机要求的动作，从而维持所需的机器人姿态和步态。执行级控制系统采用模块化的方法，由 4 个相同的腿驱动模块和一个多传感器信号采集模块构成。每个腿驱动模块以 DSP 芯片 TMS320LF2407 为核心控制器，主要负责四个电机的位置环、速度环闭环控制和 H 桥驱动信号的给定。在传感信息采集方面，机器人每个关节安装有高精度旋转电位计，当关节旋转误差累计到一定程度时，由该传感器进行误差修正。机器人每条小腿上安装有测力传感器，用于间接测量机器人足底受力情况。同时机器人躯体上安装有惯性传感器，主要用来反馈机器人躯体 X/Y 轴倾角信息，以实现机器人躯体平衡控制。

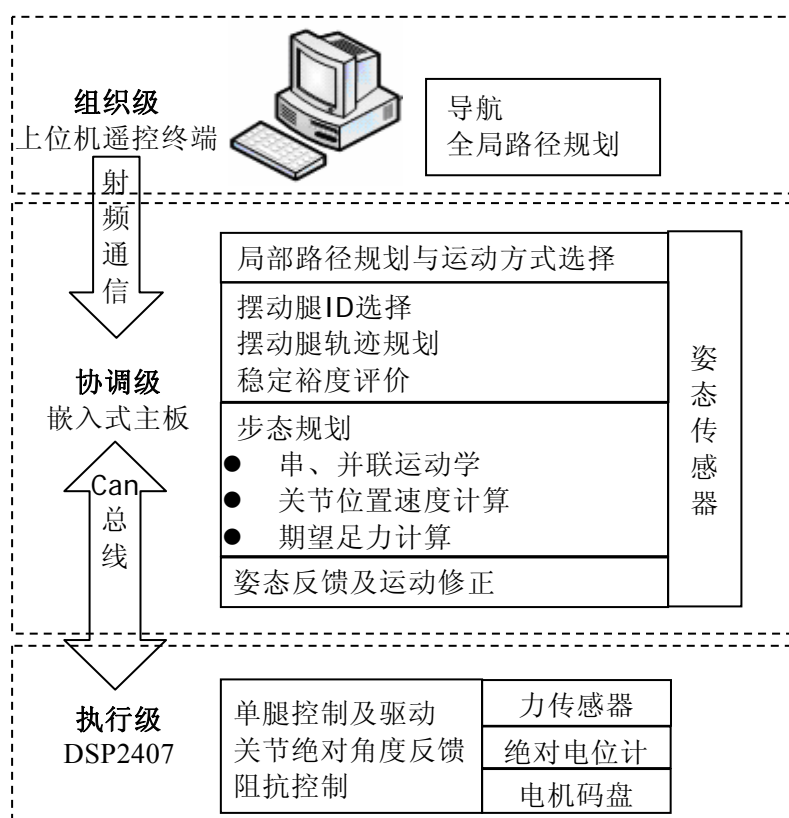


图 5-2 四足机器人任务分配结构图

Figure 5-2 Control tasks distribution structure

5.2.3 单腿控制驱动设计

由于组织级和协调级均采用购置的微处理单元，因此，控制系统的研究针对组织级、协调级进行了软件的设计和编程。在执行级方面，由于机器人控制系统对其开放性和小型化等指标的具有严格要求，本文针对执行级的控制器、驱动器和软件算法进行了详细的设计。

目前，大多数运动控制器都是针对特定的控制算法而设计的，封闭式控制结构使其应用的范围受到极大的限制^[98]。因此，除常规运动控制器所具有的基本功能外，本节将控制结构的开放性作为研究重点，将关节非线性力矩控制算法直接嵌入到底层电机控制中。同时，由于目前大功率高端伺服电机的控制与驱动产品体积重量均较大，价格不菲。四足仿生机器人周身 14 个主动关节，共需 14 套 90W 直流电机、驱动器，为减小自身尺寸和重量从而提高移动机器人速度和负载容量，自行设计了基于 DSP 的嵌入式多电机的伺服控制与驱动单元。并针对四足机器人负载力矩非线性的特点，多关节伺服控制器硬件上进行了位置环、电流环的设计，在 DSP 中采用了流水线采样软件策略和带修正函数的自调整模糊控制规则。

DSP 芯片 TMS320LF2407 具有快速性、支持多电机控制、功耗低等特点，其包含独立的 6 对 16 位 PWM 信号输出、两个正交编码脉冲电路、四个 16 位通用定时器和 6 个捕获单元，这些特性使得其很适合作为多电机伺服控制器中央处理单元^[99,100]。

LMD18200 是美国国家半导体公司（NS）推出的专用于运动控制的 H 桥组件。同一芯片上集成有 CMOS 控制电路和 DMOS 功率器件，峰值输出电流高达 6A，连续输出电流达 3A，工作电压高达 55V，还具有温度报警、过热、过流保护功能。同时可以利用其特有的分流电路，通过限流电阻，形成电流闭环控制^[101]。LMD18200 的输入信号是 PWM 方式，通过改变 PWM 的占空比来改变电机转速，因此其刚好可以与 TMS320LF2407 的任选 4 路独立的 PWM 相配合，实现控制电路与驱动电路的集成。

考虑到 TMS320LF2407 对码盘反馈信号的处理能力，使每片 TMS320LF2407 芯片控制 4 片 LMD18200，组成一个控制单元。四足仿生机器人每条腿安装一块这样的单元，通过四块相同的单元实现 16 个电机的驱动。四足仿生机器人单腿驱动控制结构如图 5-3。

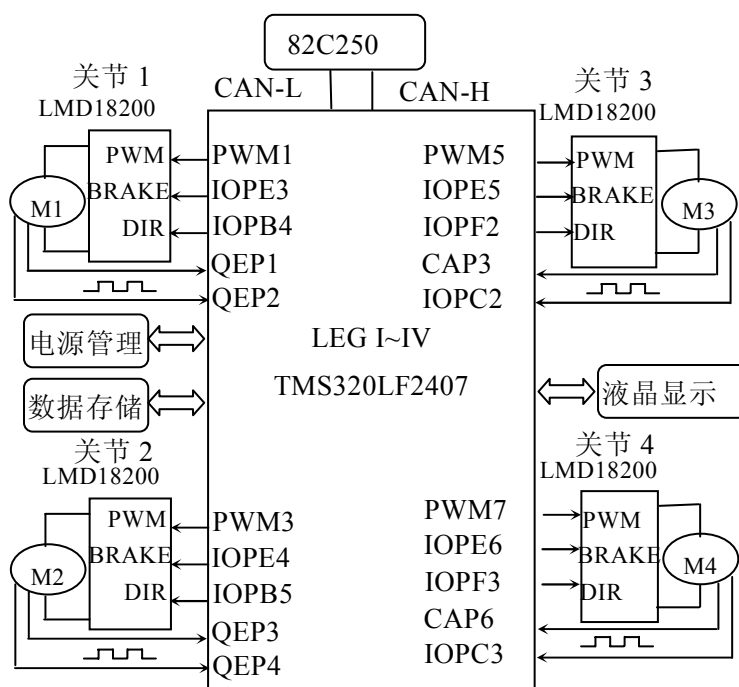


图 5-3 多关节伺服驱动控制结构图

Figure 5- 3 Control and driving card structure for one leg of robot

DSP 芯片 TMS320LF2407 承担了大量的任务，作为控制器其主要技术指标如下：

- (1) 实现 1 - 4 关节独立或联动控制，与上位机采用 CAN 总线通讯；
- (2) 四路独立的 16 位 PWM 输出方式，PWM 频率为 20KHz；
- (3) 速度梯形轨迹反馈控制及准梯形轨迹速度切换；

DSP 芯片 TMS320LF2407 功能分配如下：控制单元 CPU 提供四路启停信号，分别由 IOPE3-IOPE6 数字输入输出口来承担，四路方向电平信号，分别是 IOPB4、IOPB5、IOPF2、IOPF3。四路独立的 PWM 信号，分别是 PWM1、PWM3、PWM5、PWM7，将 IOPA6、IOPB0、IOPB2、IOPE1 设定为基本功能方式。以上这些信号均提供给 LMD18200 驱动芯片。在反馈码盘信号的处理上，DSP 自带的两路正交编码脉冲处理模块分别连接两个电机的光电编码器以获得旋转位置和速率等信息。其余两个电机的光电编码信号分别通过软件和硬件结合，捕获中断和 IO 口协调检测处理的方法来实现。具体的实现方法为在软件中设置两个计数变量，启动 CAP3 和 CAP6 两个捕获中断，分别捕获剩余两路电机码盘信号的 A 路信号，在捕获中断发生时启动 IOPC2、IOPC3 数字输入口来查询两路电机码盘信号 B 的高低电平，根据电平的高低

对软件计数变量进行加减计数，从而达到对另外两个电机的位置监测。DSP 四个 16 位通用定时器在电路的控制中具有重要作用，其多种工作模式为软硬件协调工作提供了方便，定时器工作模式及寄存器设置如表 5-1：

表 5- 1 定时器工作模式及寄存器设置

Table 5- 1 Timer registers mode and settings

定时器编号	工作模式	寄存器设置	功能
定时器 1	连续增计数模式	T1CNT=0 T1PR=95 CMPR1,2,3=48	为捕获 3 提供时基 电机 3 码盘检测 PWM1,3,5 时基
定时器 2	定向增减计数模式	T2CNT=1000 T2PR=FFFF	电机 1 码盘检测
定时器 3	连续增计数模式	T3CNT=0 T3PR=95 CMPR4,5,6=48	为捕获 6 提供时基 电机 4 码盘检测 PWM7 时基 采样周期中断
定时器 4	定向增减计数模式	T4CNT=1000 T4PR=FFFF	电机 2 码盘检测

5.2.4 单电机控制驱动设计

电机是与关节直接交互的环节，其控制与驱动性能的好坏最终决定了机器人的运行平稳性。单电机的控制驱动示意图如图 5-4 所示。为减小尺寸，采用集成化设计，并在电气上进行了数模隔离。软件上采用位置模式下速度闭环控制方案，同时通过对采样电阻上电压的 A/D 转换，达到对电机峰值电流的控制。工作时，首先调节数字电位计的阻值从而调整比较器的参考电压，当较大的电流通过采样电阻时，比较器的输出发生翻转，并对 PWM 的输出进行截断，导致电机两端的电压迅速下降；在毫秒级延迟后，电机两端电流下降，导致比较器的输出再次发生翻转，从而恢复电机电压供给。这样通过调节数字电位计的阻值就可以对电机的峰值电流限制到要求的水平，避免因电机堵转时由于电流过大烧毁电机。

保护电路上采用了过压，欠压，过热等保护措施。为使用方便，在电路中设计了 E2PROM，用于存储设置 PID 参数和码盘线数、减速比等可变参数。

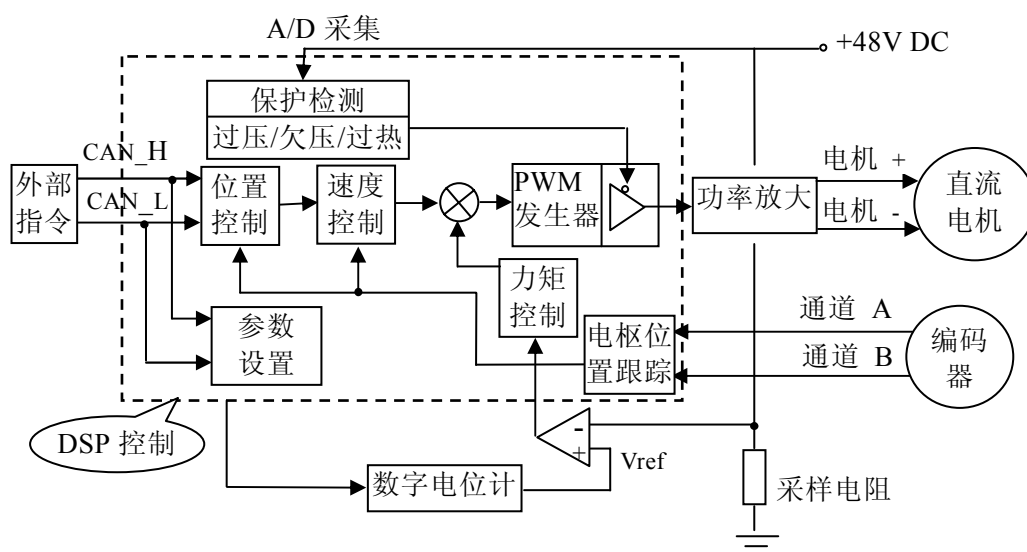


图 5-4 单轴位置模式下速度力矩控制分析图

Figure 5-4 Speed and moment control in position mode of motor

5.3 伺服控制器软件策略

5.3.1 基于自适应模糊控制的速度跟踪

作为一种步行机械，四足机器人的行走流畅性直接取决于各个关节运动的配合程度。然而，研究发现四足机器人行走数学模型具有严重非线性、强耦合的特点，并且包含有诸如摩擦、负载变化等不确定因素。根据直流电机转矩转速曲线，该非线性负载对直流电机的转速有较大影响。常规的 PID 负反馈控制对于解决线性定常系统的控制问题是很有效的，然而对于非线性时变系统难以奏效。同时在做速度闭环调试过程中发现，在特定的速度条件下，选择合适的 PID 参数以实现速度闭环控制比较容易。但若要实现高低速情况下均能达到稳定的速度闭环控制，并能够对负载变化不敏感，则找到这样的 PID 参数比较困难。

模糊控制不依赖于对象数学模型且鲁棒性强，将之用于机器人关节轨迹跟踪控制能有效地克服机器人关节轨迹跟踪控制中耦合、非线性、参数变化等因素的影响，取得较好的效果^[102,103]。然而普通模糊控制器的参数和控制

误差较小时,此时系统已接近稳态,控制系统的主要任务是使系统尽快稳定,为此必须减小超调,这就要求在控制规则中误差变化项起的作用大一些,即对误差变化的加权大些。当控制误差非常小时,考虑到减少控制器的计算量,则仅对误差 E 加权。

根据这样的原则,利用误差及误差变化本身的绝对值作为对自身的加权是可取的。由于需要满足对二者加权之和等于 1 的条件,所以,误差的权函数及误差变化的权函数分别设计为:

$$\alpha_e = |E| / (|E| + |EC|) \quad (5-4)$$

$$\alpha_c = |EC| / (|E| + |EC|) \quad (5-5)$$

上述控制规则的特点是权函数 α_e 和 α_c 随着误差绝对值 $|E|$ 和误差变化绝对值 EC 的大小呈线性变化。显然,这种自调整过程符合人在控制决策过程中的思维特点,且非常易于 DSP 程序的实现。

5.3.2 实时性控制策略

多关节伺服控制器的主控单元除了为驱动器提供 PWM、方向、起停信号外,更多的时间在接收四个电机的码盘位置反馈信号,并根据这些信号进行电机的伺服调速和位置控制。由于四个电机经常需要同时运行,如果采用同样的采样时间点,分别对每个电机进行伺服计算、调整 PWM 输出,那么,对最后一个电机的伺服控制必然是滞后的,同时,同一个电机的采样周期也无法精确保证,从而直接影响后面算法所需样本的精确性。本伺服控制器的主控单元将位置信号的采样周期等分成四份,每个电机在每一份时间段的起点被采样,CPU 从当前采样时间点到下一个电机的采样时间点时间段内对当前电机进行闭环处理。从而保证每次采样的位置信号与电机当前的位置保持一致,同一个电机的采样周期保持不变。流水线采样策略如图 5-6 所示。

机器人摆动腿和支撑腿的轨迹规划需要通过插补实现。在插补过程中,关节电机当前时刻和下一时刻具有不同的速度。常规的控制器的速度的控制上仅能实现完整的梯形速度曲线,如图 5-7 虚线所示。因此,电机微观上是工作在起停状态。这样在快速运动中,不可避免的出现了振动现象。为解决该问题,在 DSP 软件中为每个电机建立了双缓冲区即工作缓冲和准备缓冲。当前插补运动的任务存储在工作缓冲中,当前插补位移结束前,DSP 首先查询准备缓冲是否有待完成任务,如果存在待完成任务,则电机速度并不执行

减速到零的运动，而是以当前速度为基础直接斜线过渡到下一个任务的速度状态。双缓冲区策略如图 5-7 实线所示。

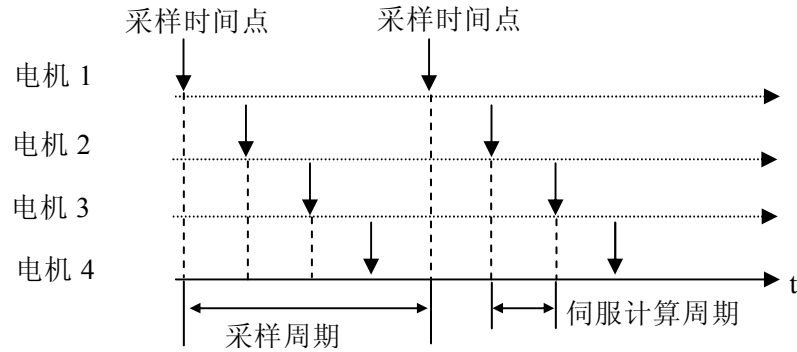


图 5-6 流水线采样策略示意图

Figure 5-6 Streamline sample strategy

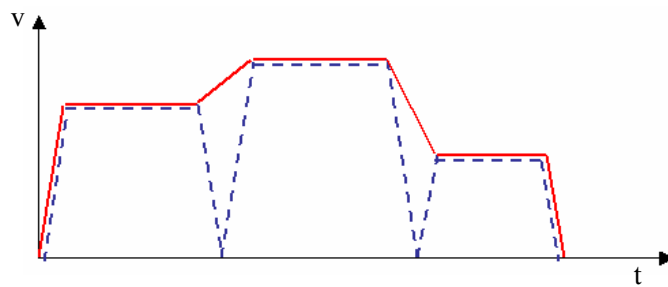


图 5-7 双缓冲区策略示意图

Figure 5-7 Two buffers software strategy

5.3.3 通讯协议

在计算机数据传输领域，长期以来一直使用 RS232 通信标准，尽管它们被广泛地使用，但却是一种低数据速率和点对点的数据传输标准，无能力支持更高层次的计算机之间的功能操作。随着计算机、控制、信息、网络及微电子技术的迅速发展，现场总线以双向、串行、多节点数字通信等技术为基础构成了开放式、数字化、分散化及智能化的底层控制网络 FCS(Fieldbus Control System)，并已广泛地成功应用于各种控制领域。现场总线中，CAN 总线通信方式灵活，结构简单，只有 2 根线与外部相连，且内部含有错误探

测和管理模块。直接通信距离最大可达 10km (速率 5kb/s 以下), 最高通信速率可达 1Mb/s (此时距离最长为 40m); 节点数可达 256 个。因此, 基于现场总线控制功能下载的思想, 将带有通讯功能的智能传感单元直接挂接在 CAN 总线上, 把主控机和全数字型电机伺服驱动器置入 CAN 总线接口, 就形成了新型的控制系统网络结构。

本系统嵌入式主板通过 USB 接口的 CAN 卡与 CAN 总线挂接, 而机器人每条腿的 TMS320LF2407 芯片利用其自身的 CAN 接口, 通过 82C250 驱动, 实现与主控机的 CAN 总线通讯。主机完成四足机器人任务规划、轨迹规划和四条腿协调控制规划后, 根据主从通讯协议通过 CAN 总线向各个节点发送指令信息, 各节点在探测到与自己 ID 匹配的命令后进行命令解析, 做出主机要求的动作, 从而维持所需的机器人姿态和步态。同时节点实时进行传感信息的采集、转发, 并与主机或其他节点通讯, 为实现机器人动作策略提供数据共享。

CAN 总线通信软件主要任务是将规划后的任务进行编码, 然后按照 CAN 协议进行数据传输, 最后在接收端进行解码处理, 将发送代码转化成具有控制意义的命令字。CAN 总线主发送编码、从发送编码如表 5-2 和表 5-3 所示:

表 5-2 CAN 总线主发送编码

Table 5-2 CAN bus master sending code

命令序列	序列说明	命令说明	取值范围	分辨率
1	CAN 前导字节	腿 ID	0~3	—
2	数据字节 1	期望足力	0~255	1N
3	数据字节 2	高四位: 四个电机方向	1: 正转 0: 反转	—
		低四位: 四个电机使能	1: 使能 0: 不使能	—
4	数据字节 3	电机 2 (β 关节) 位移	0~255	0.24 度
5	数据字节 4	电机 1 (α 关节) 或电机 4 (驱动轮) 位移	0~255	0.36 度
6	数据字节 5	电机 3 (γ 关节) 位移	0~255	0.24 度
7	数据字节 6	电机 1 (α 关节) 或电机 4 (驱动轮) 速度	0~75	0.01n/s
8	数据字节 7	电机 2 (β 关节) 速度	0~75	0.03n/s
9	数据字节 8	电机 3 (γ 关节) 速度	0~75	0.03n/s

表 5- 3 CAN 总线从发送编码

Table 5- 3 CAN bus slave sending code

命令 序列	序列说明	命令说明	取值范围	分辨率
1	CAN 前导 字节	腿 ID 或传感采集模块 ID	0~4	—
2	数据字节 1	躯体 X 轴倾角信息	0~255	0.1 度
3	数据字节 2	躯体 Y 轴倾角信息	0~255	0.1 度
4	数据字节 3	关节 1 绝对电位计角度	0~255	0.36 度
5	数据字节 4	关节 2 绝对电位计角度	0~255	0.24 度
6	数据字节 5	关节 3 绝对电位计角度	0~255	0.24 度
7	数据字节 6	电机 1 (α 关节) 指定位移是 否完成标志	0 或 0xff	—
8	数据字节 7	电机 2 (β 关节) 指定位移是 否完成标志	0 或 0xff	—
9	数据字节 8	电机 3 (γ 关节) 指定位移是 否完成标志	0 或 0xff	—

5. 4 本章小结

本章分析了多足动物的运动控制特征，针对四足机器人控制系统的总体要求，采用分级递阶智能控制系统的软硬件结构，设计了嵌入式四足机器人多关节运动控制系统。针对非线性负载特性，嵌入式系统采用了基于带自调整权函数的模糊控制规则，实现了速度跟踪。同时在软件中加入了流水线采样和双缓冲区策略，实现了速度实时性控制的要求。

第6章 四足机器人实验研究

四足机器人是一个很复杂的系统，很多模块的研制、理论参数的确定都是在反复的试验过程中的得到的，在完成了四足机器人原理样机本体的设计、加工、装配，控制系统软硬件模块的搭建，几何模型的运动学分析及步态规划，基于传感信息反馈的柔顺控制建模的基础上，为验证各功能模块的可行性，以及发现设计中存在的问题或理论中某些缺陷，为系统优化提供指导，本章开始对四足机器人一些功能模块及样机性能进行实验研究。

6.1 四足机器人实验系统介绍

四足机器人实验样机从功能模块上可分为机械系统、驱动控制系统、传感单元、通信单元等模块，四足移动机器人的总体结构如图 6-1 所示。

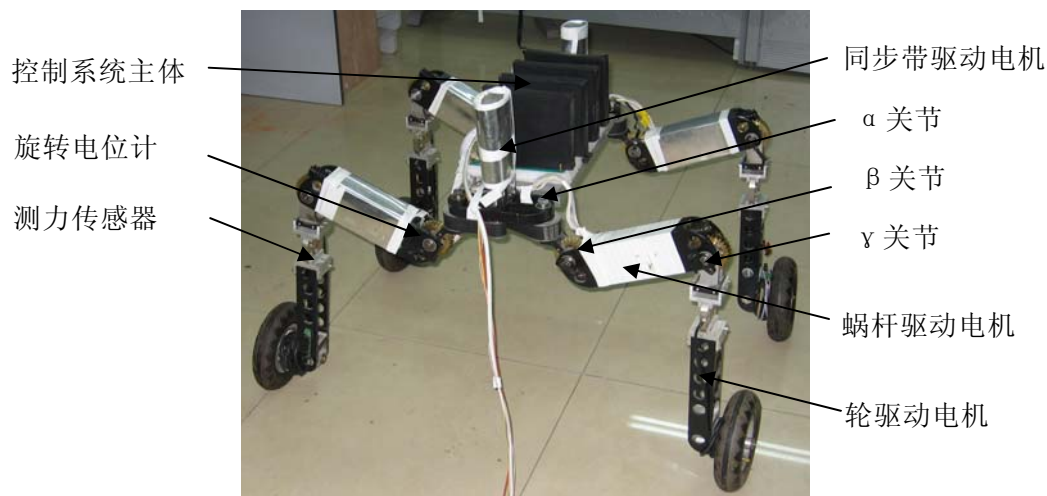


图 6-1 多运动方式四足移动机器人系统样机

Figure 6- 1 Picture of the hybrid quadruped robot

机器人采用仿爬行动物的运动机构，髋关节轴线与重力加速度方向平行。机械本体由四条腿和躯体组成。每条腿又由小腿、大腿、髋关节三部分组成。髋关节和躯体间有一转动副约束 α ，它能使腿绕躯体前后转动，采用带传动方式，传动比为 2 比 1；大腿和髋关节之间、小腿和大腿之间各有一转动副

β 、 γ ，使得腿能够抬起和放下，采用蜗轮蜗杆传动，传动比为 30 比 1。所以四个腿共有十二个转动副。另外两前腿足端装有轮子以便能够在平坦路面上滚动。机器人大腿长 246.6mm，小腿长 305.5mm，髌关节至大腿转动副之间的距离为 96.8mm。机器人所有关节均为电机驱动，选用 MAXON 公司的 RE35 系列 90 瓦电机，主要参数如下：额定功率 $P_N=90W$ ，额定电压 $U_N=48V$ ，空载转速 $n_0=3810\text{ rpm}$ ，堵转转矩 $T_D=493\text{ mNm}$ ，最大连续转矩 $T_M=112\text{ mNm}$ ，最大连续电流 $I_M=0.944\text{ mA}$ ，转矩常数 $K_t=119\text{ mNm/A}$ ，转速常数 $K_n=80.6\text{ rpm/V}$ ，转动惯量 $J_m=62.8\text{ gcm}^2$ ，电机内阻 $R=11.5\Omega$ ，电感 $L=3.16\text{ mH}$ 。电机自带减速器和编码器，编码器每转输出 500 个脉冲，4 倍频后每转 2000 个脉冲。每个电机自身安装有行星减速器。其中髌关节电机行星减速器减速比为 66 比 1，大腿和小腿的两个转动副驱动电机的行星减速器减速比均为 23 比 1，驱动轮电机的行星减速器减速比为 77 比 1。

本机器人可以在足式移动方式和轮式移动方式之间进行切换，用以实现在不同的结构环境下以不同的方式行进。当机器人进行步态行走时，两个驱动轮通过电磁铁锁死，车轮与机器人小腿形成一体，机器人通过驱动每条腿髌关节两个自由度和膝关节一个自由度进行步态行走。当机器人进行轮式驱动时，髌关节两个自由度和膝关节一个自由度锁死，驱动轮电磁铁打开，通过驱动轮快速前进。因为本文研究的重点是机器人的步态及其步行过程中的足力控制问题，所以此时足端轮子被锁死，轮子和小腿一起运动。

机器人每个关节安装有高精度 R24HS 中空轴导电塑料电位计（图 6-2），当关节旋转误差累计到一定程度时，由该传感器进行误差修正。R24HS 型电位计最高独立线性精度可达到万分之一。



图 6-2 高精度 R24HS 电位计

Figure 6- 2 High precision R24HS potentiometer

机器人每条小腿上安装有测力传感器，用于间接测量机器人足底受力情况，采用如图 6-3 所示的柯力 PST 测力传感器，选用量程为 300N，测量精

度为 0.02%。



图 6-3 测力传感器

Figure 6- 3 Force sensor

机器人躯体上安装有倾角传感器，主要用来反馈机器人躯体 X/Y 轴倾角信息，以实现机器人躯体平衡控制。采用如图 6-4 所示的 CrossBow 公司的 NAV420 倾角传感单元，该传感器采用 MEMS 制作工艺，同时内部集成了卡尔曼滤波方法。该传感器采用 RS232 串行接口形式，可以达到 100Hz 的数据输出频率，其中 X 轴倾角检测范围为 ± 180 度，Y 轴倾角检测范围为 ± 90 度，两轴的测量精度均为 0.1 度。



图 6-4 NAV420 倾角传感器

Figure 6- 4 NAV420 inclination sensor

6.2 关节速度跟踪实验

6.2.1 驱动模块基本特性测试

本实验首先对驱动模块进行了基本测试，测试的内容主要包括电机动态

性能和功放性能的测试。实验测试条件如表 6-1 所示：

表 6- 1 实验测试条件

Table 6- 1 Experiment conditions

主 CPU 电路供电电压	12.55V
电机电源	48.0V
电机	Maxon RE35
电机码盘	MR 型磁通码盘，500 线
控制信号	PWM 信号，频率 20k，占空比 0~1 间连续变化
周期寄存器 <i>TIPR</i>	0x64

电机动态性能和功放性能测试实验中，控制模块的比较寄存器 *CMPRI* 在 0 至 *TIPR* 内取间隔相等的 10 个点，使得占空比输出在 0 至 1 之间取间隔相等的 10 个点，使电机在空载情况下零速和最高速度之间变化，检测实际输入信号占空比、驱动输出信号和速度信号的线性关系。检测结果如表 6-2：

表 6- 2 PWM 驱动特性测试数据

Table 6- 2 Test data of PWM driving characteristics

测试项目	实测数据									
比较寄存器 <i>CMPRI</i>	0x0a	0x14	0x1e	0x28	0x32	0x3c	0x46	0x50	0x5a	0x64
理论占空比 ρ_0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
实际占空比 ρ	0.10	0.19	0.29	0.39	0.51	0.59	0.70	0.79	0.90	0.99
电机电压 (V)	4.78	9.59	14.41	19.15	24.03	28.75	33.55	38.34	43.12	47.6
码盘速度 (个/100us)	1.25	2.52	3.77	5.00	6.31	7.56	8.81	10.08	11.35	12.67

根据表 6-2 的测试数据，以采样次数为横坐标，分别以电机端电压和码盘速度为纵坐标作出如图 6-5、图 6-6 的曲线，从曲线中可以看出，在给定理论等间距速度跳跃条件下，以 TMS320DSP2407 为核心器件的控制电路显示出良好的控制输出线性特性，以 LMD18200 为核心器件的桥驱动电路显示出良好的电压放大特性。同时电机在给定电压下的速度响应特性较好，具有一致的线性关系。

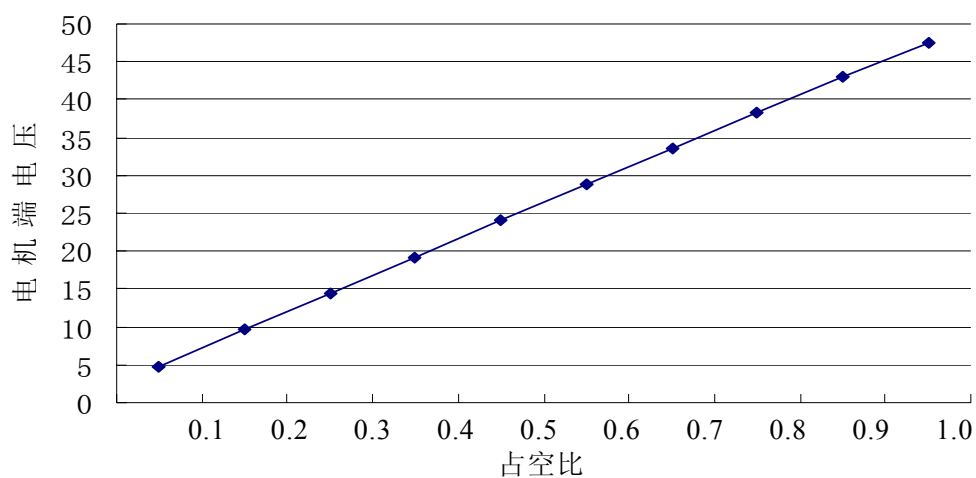


图 6-5 电机端电压变化曲线

Figure 6-5 Motor voltage changing curve

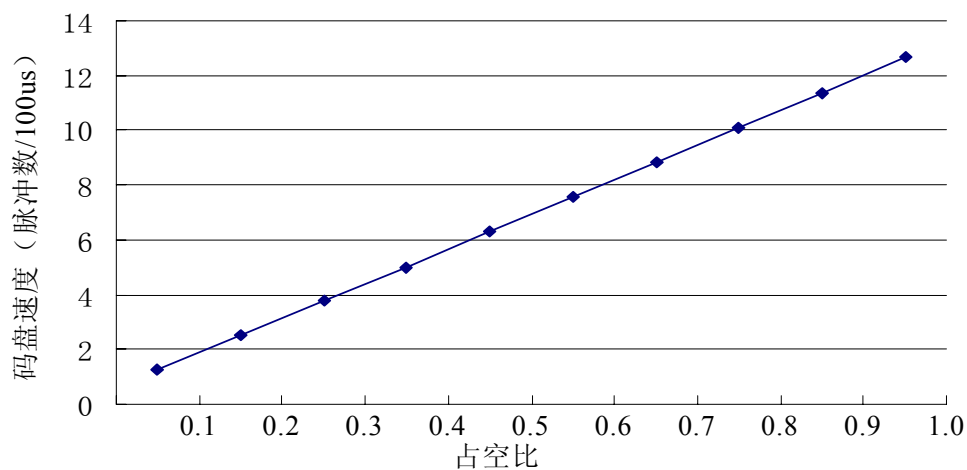


图 6-6 码盘采样速度变化曲线

Figure 6-6 Decoder sample velocity changing curve

6.2.2 关节速度跟踪特性实验

在对驱动控制模块进行了基本测试后,开展了在负载变化剧烈的情况下,基于带自调整权函数的模糊控制方法的关节速度跟踪特性验证实验,同时测试 TMS320DSP2407 单个 CPU 同时控制四个电机做位置速度闭环运算的响应特性。

实验中机器人四条腿做向上支撑动作,此时 β 关节负载变化最大,给定

β 关节延梯形曲线运动。在此过程中定时采样左前腿 β 关节的码盘反馈信息，采样周期 50ms。通过计算每个采样周期的码盘计数，得到左前腿 β 关节的位置跟踪信息及速度跟踪信息。模糊控制器实验中拟定 $E_m = 5$ ， $E_w = 2$ 。位置模式下的梯形速度跟踪特性实验结果如图 6-7。从图中可以看出，负载变化时，电机的稳态精度较高，超调较小，速度时间曲线平滑，速度跟踪效果较好，系统具有较高的鲁棒性和稳定性。

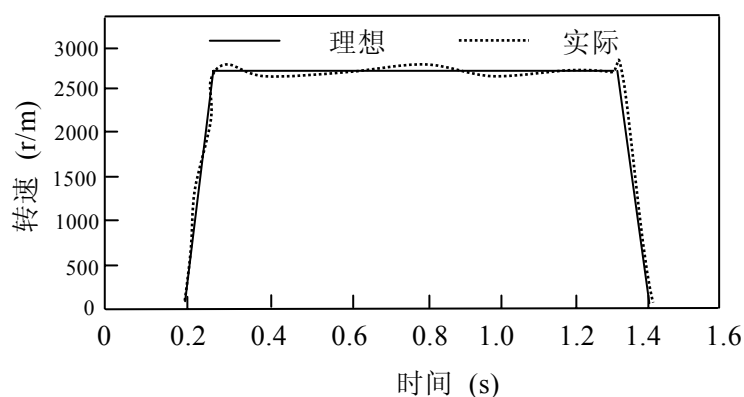


图 6-7 位置模式下梯形速度

Figure 6-7 Trapezoid velocity curve in position mode

6.3 单足阻抗控制实验

如前所述，为避免机器人在行走过程中摆动腿落地时的冲击，实现摆动足从自由空间到约束空间的良好过渡，针对阻抗控制算法开展了单足阻抗控制实验。阻抗控制是通过调整机器人末端的刚度，从而使力和位置满足某种理想的动态关系。为了验证阻抗控制的效果，采用如图 6-8 的方案对该控制方法进行实验研究。单腿按规划轨迹路径运行，即摆动腿落地前足沿着腿部坐标系的 Z 轴从起始点 $S_o(400,0,-200)$ mm 向终止点 $S_p(400,0,-230)$ 作直线运动，在 S_o 和 S_p 之间放置障碍物。足在自由空间跟踪规划轨迹，然后与障碍物接触，在接触面上进行阻抗力控制。最终保持 15N 的相互作用力。在实际控制实验中，加速度需通过位置信号的两次微分运算获得，然而由于传感器的精度和环境噪声等影响，造成计算的误差很大，当计算的加速度值用于实际控制算法时，往往使机器人足的运动跳跃，甚至不稳定。因此，在实际实验时，目标惯性矩阵设为零，避开加速度的影响，使目标阻抗由二阶线性模型

变为一阶线性模型，目标阻尼 $B_d=60\text{Ns/m}$ ，目标刚度 $K_d=20\text{N/m}$ 。足端刚度 $K_z=2000\text{N/m}$ ，力传感器刚度 $K_f=10000\text{N/m}$ 。

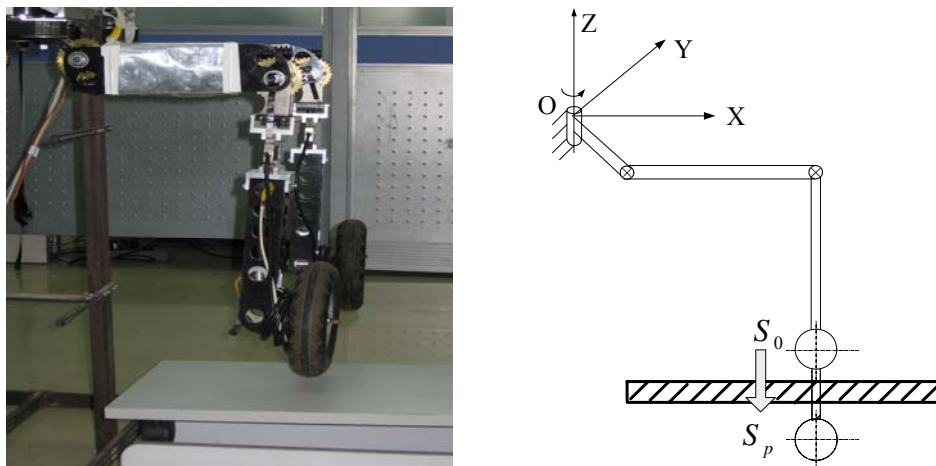


图 6-8 单足阻抗控制实验照片和简化图

Figure 6-8 Experiment setting of impedance control for a leg

实验结果如图 6-9 所示。可以看出，当摆动腿在自由空间摆动没有碰到障碍时，由于足力传感器噪声存在，力输出并不为零；而当机器人足与障碍接触时，力轨迹曲线产生突变，但是经过短时调整后迅速趋于稳定。在不考虑环境噪声的影响下，系统基本能够跟踪力轨迹，达到 15N 的期望力。

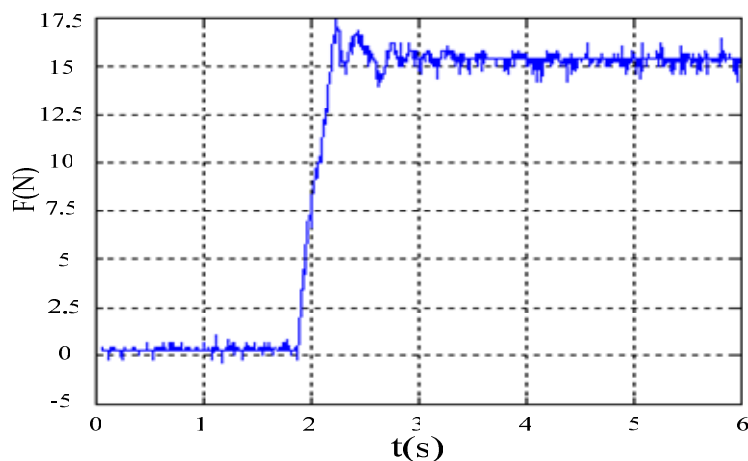


图 6-9 单足阻抗控制实验结果

Figure 6-9 Experiment result of impedance control for a leg

基于位置的阻抗控制通过参考位置对接触力进行间接的调节，因此，力跟踪效果的好坏，主要依靠对环境参数的认识程度。当环境的刚度和位置存在较大的不确定性时，阻抗控制系统的力跟踪性能较差。为了提高阻抗控制

中力跟踪的精度和鲁棒性，许多学者提出了采用自适应和神经网络控制等智能控制方法，来改进传统阻抗控制的不足。在环境和刚度未知的情况下可以使系统达到期望的接触力。由于本机器人足轮为内部充气的胶带轮，刚度较低，因此本文没有专门进行在未知环境的力跟踪问题进行更加深入的研究。同时，在摆动足从自由空间到约束空间的过渡过程中，往往不需要进行精确的力控制，只要保持接触力在一定的范围之内，使力和位置满足某种理想的动态关系，避免冲击即可。

6.4 行走实验

6.4.1 平坦路面协调步态行走实验

结合论文的步态理论规划方法和力控制算法，机器人系统样机首先进行了平坦路面的行走实验验证。由于平坦路面对机器人行走步态的稳定性能影响较小，机器人在行走过程中稳定裕度基本不变，因此，实验中采用速度较快、稳定裕度相对较低的协调爬行步态。平坦路面行走实验验证了论文所规划步态的稳定性。表 6-3 为协调爬行步态前进方向（Y 方向）各个步态子周期结束后机器人各腿在躯体坐标系下的坐标值。

表 6-3 协调爬行步态 Y 方向步态参数表

Table 6-3 Parameters of coordinated crawl gait toward Y direction (mm)

	T/5	2T/5	3T/5	4T/5	T
腿 1	-80	-80	-80	-80	320
腿 2	-80	320	-80	-80	-80
腿 3	320	-80	-80	-80	-80
腿 4	-80	-80	-80	320	-80

图 6-10a)~图 6-10e)为负载因子等于 4/5 的机器人连续爬行步态行走实验照片。实验中，步距 $\lambda = 400\text{ mm}$ ，稳定裕度 $S = 20\text{ mm}$ 。为叙述方便，将左前腿定义为 1 腿，右前腿定义为 2 腿，右后腿定义为 3 腿，左后腿定义为 4 腿。按步态规划，图 6-10a)为腿 3 摆动，腿 1、2、4 支撑躯体向前移动；图 6-10b)为腿 2 摆动，腿 1、3、4 支撑躯体向前移动；图 6-10c)为四腿支撑躯体向前移动；图 6-10d)为摆动 4 腿，腿 1、2、3 支撑躯体向前移动；图 6-10e)为腿 1 摆动，腿 2、3、4 支撑躯体向前移动，腿 1 落足即完成一个步态周期，回

到初始姿态，开始下一个周期步行。

图中黑线连接部分为支撑区域。每条腿在摆动时，足端相对躯体移动 320mm，同时躯体相对地面移动 80mm，则足端相对地面移动位移 400mm，正好是一个步距长度。四条腿在一周循环的过程中，三足支撑时躯体相对地面移动的总位移为 320mm；四足支撑时躯体相对地面移动的位移为 80mm。在五个步态子周期中，含有四个摆动腿周期和一个四足支撑躯体平移周期，完成一次循环至下一个步态周期所需时间为 10S，因此机器人移动速度为 2.4m/min。

由于机器人协调爬行步态在摆腿的同时躯体向前移动，因此，实验对机器人周身 12 个关节驱动电机的控制特性提出了严格的要求。机器人的稳定行走验证了论文所研制的嵌入式多关节驱动控制模块良好的位置、速度控制特性和协调性。

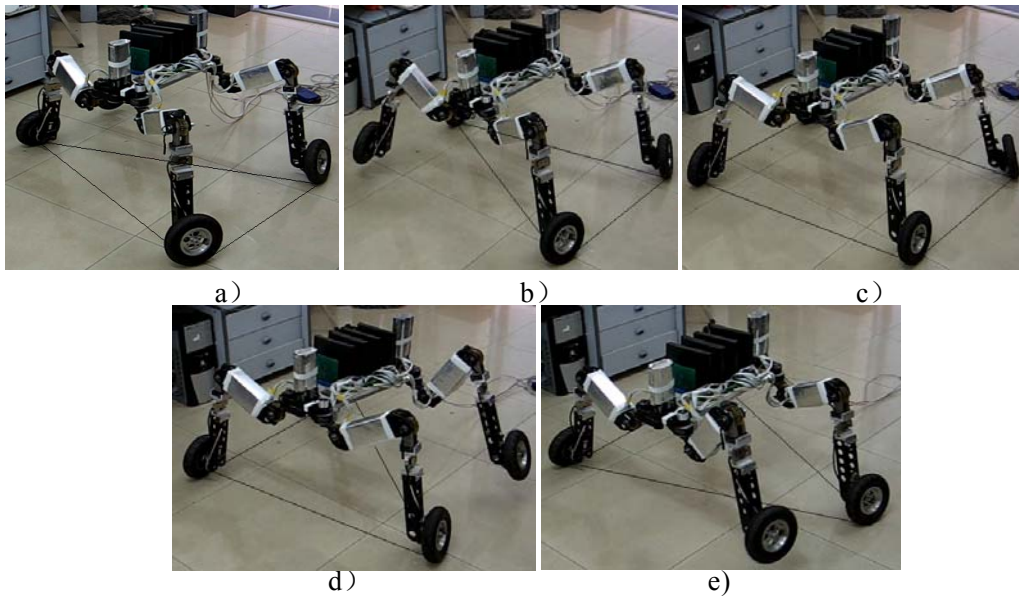


图 6-10 $\beta=4/5$ 协调爬行步态行走照片

Figure 6-10 Photos of coordinated crawl gait with $\beta=4/5$

6.4.2 非平坦路面间歇步态行走实验

为了进一步验证所研究的四足机器人系统的自适应特性，论文进行了非平坦路面的行走实验验证。由于非平坦路面对机器人行走步态的稳定性能影

响较大，机器人在行走过程中稳定裕度具有一定的波动，因此，实验中采用速度较慢、稳定裕度相对较高的间歇爬行步态。实验中在机器人行走的地面上人为放置高 60mm 的障碍，机器人采用间歇步态行走，在对障碍高度未预知的情况下，机器人右侧两条腿先后踏上障碍，并依次从障碍上走下。由于机器人腿部集成了力传感器，因此机器人在踏上障碍的时刻摆动足自动适应障碍高度，在前进方向仍然以原来的爬行步态行走，。表 6-4 为负载因子等于 5/6 的间歇爬行步态前进方向（Y 方向）各个步态子周期结束后机器人各腿在躯体坐标系下的坐标值。

表 6-4 间歇爬行步态 Y 方向步态参数表

Table 6- 4 Parameters of discontinuous crawl gait toward Y direction (mm)						
	T/6	2T/6	3T/6	4T/6	5T/6	T
腿 1	0	0	-200	0	400	-200
腿 2	0	400	-200	0	0	-200
腿 3	400	0	-200	0	0	-200
腿 4	0	0	-200	400	0	-200

图 6-11a)~ 图 6-11o)为机器人以负载因子等于 5/6 的间歇爬行步态踏过障碍行走实验照片。实验中，步距 $\lambda = 400\text{ mm}$ ，稳定裕度 $S = 100\text{ mm}$ ，腿的 ID 定义同前。按步态规划，首先躯体不动，具有最低运动限度的腿 3 抬起作为摆动腿，向前摆动一个步距，如图 6-11a)；继而具有最低运动限度的腿 2 作为摆动腿向前摆动一个步距，如图 6-11b)，2 腿在落足过程中遇到障碍，但满足机器人稳定裕度，这期间机器人重心分别在腿 124 和 134 构成的三角形区域内；图 6-11c)为四条腿同时支撑躯体向前移动 2S，将重心移至三角形支撑区域 123 之内；图 6-11d)为 4 腿向前摆动一个步距，；图 6-11e)为 1 腿向前摆动一个步距；图 6-11f)为四条腿同时支撑躯体向前移动 2S，将重心移至三角形支撑区域 124 之内；腿 1、2、3、4 支撑躯体向前移动结束后，即完成一个步态周期，回到初始姿态，开始下一个周期步行。

图中黑线连接部分为支撑区域。在六个步态子周期中，含有四个摆动腿周期和两个四足支撑躯体平移周期，完成一次循环所需时间为 15 秒，因此机器人移动速度为 1.6m/min。

在后续步态中，图 6-11g)和图 6-11h)为机器人后腿踏上障碍；图 6-11j)和图 6-11k)为机器人前腿走下障碍；图 6-11m)和图 6-11n)为机器人后腿走下障碍。机器人总共进行了 2.5 个步态周期完成了前后腿分别踏上障碍和走下障碍过程，消耗总时间约为 40 秒。

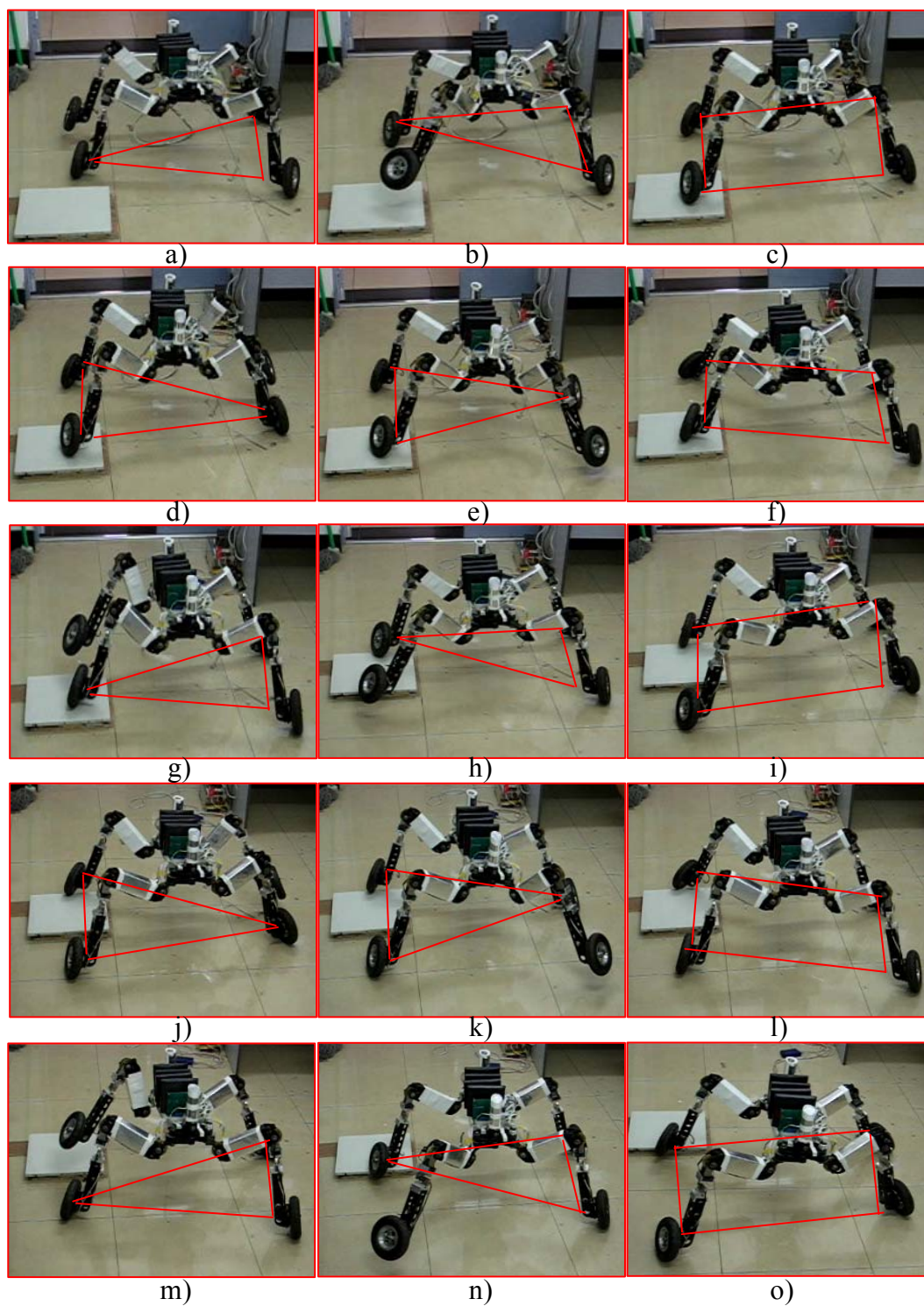


图 6- 11 有障碍路面爬行步态行走照片

Figure 6- 11 Photos of crawl gait in the case of existing step obstacle

本文第四章曾对机器人位置模式控制方法下的躯体波动情况进行了仿真（图 4-6，图 4-7）。在开展机器人在有障碍的路面爬行步态实验过程中，对机器人的俯仰角进行了实时采集，采集数据结果如图 6-12 所示。由于在机器人步态控制中增加了足力控制，使得机器人在踏上障碍时并没有对躯体姿态产生较大的影响，躯体姿态较大的波动仅出现在腿的切换过程中，幅值在 8 度范围内，远小于位置模式控制方法下的躯体波动。这样的波动是由于机器人在行走时，当处于不同的支撑拓扑结构情况下，各个支撑足的足力也在相应变化，尤其在支撑足从支撑相变换为摆动相时，与其同侧的另外一条支撑腿的支撑力会产生瞬间的增加；与此同时，与其异侧的另外一条腿由于从摆动相变换为支撑相，该侧原本的支撑腿的支撑力会产生瞬间的减小。由于机器人腿具有一定的柔性及关节误差的存在，在过渡阶段支撑力产生的突变导致躯体姿态发生波动。从图中可以看出，这样的波动由于虚拟悬挂模型算法及足力补偿方法，躯体在 1s 时间内基本恢复到平衡状态。

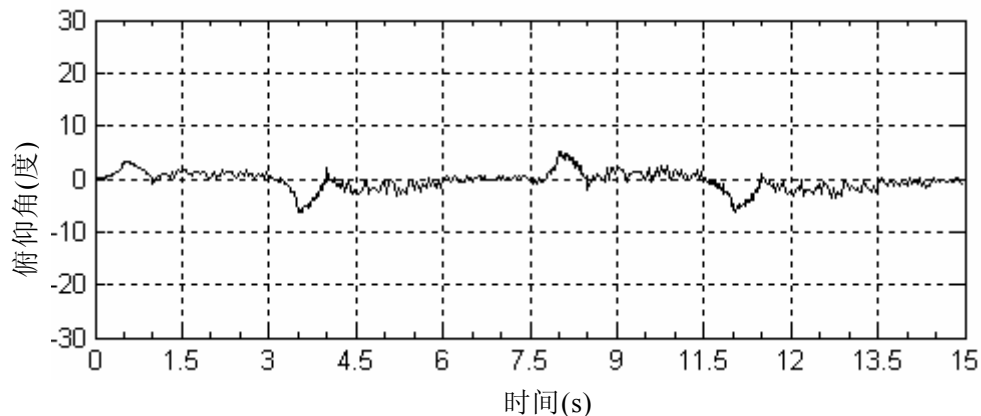


图 6-12 机器人俯仰角变化曲线图

Figure 6-12 Pitch angle curve of robot body

在机器人实际步行过程中躯体前进位移与理论规划位移存在一定误差，其主要原因是机器人足与地面接触时，有相对打滑现象。同时，由于机器人蜗轮蜗杆传动存在一定间隙，同步带传动关节具有一定的柔性等原因，对机器人的控制特性也会产生一定影响。但由于间歇爬行步态具有 100mm 的稳定裕度，因此即使在非平坦路面，这些误差一般不会导致稳定裕度小于零而使机器人失稳。

6.5 本章小结

本章根据前述几章的研究内容，搭建了四足移动机器人样机及嵌入式控制系统，并集成了绝对角度传感器、力传感器、倾角传感器等。首先对嵌入式多关节电机驱动控制系统进行了基本功放性能测试和电机动态性能测试，实验中驱动电路显示出良好的电压放大特性。同时电机在给定电压下的速度响应特性较好。其次进行了单足阻抗控制实验，系统基本能够跟踪给定力，实现了摆动足从自由空间到约束空间的良好过渡和足力跟踪，误差在允许范围内。最后分别在平坦路面和非平坦路面进行了协调爬行步态实验和间歇爬行步态实验，验证了理论分析的正确性和有效性。所有实验表明，该机器人系统的机构设计、控制系统设计、控制方法设计、软件设计都是正确、有效、可靠的。

结 论

本课题来源于来源于黑龙江省重点科技攻关项目：“特种机器人关键技术的研究及示范应用”（课题编号：GB04A502），在国内外该领域最新研究成果的基础上，论文针对轮足式四足机器人在进行多足行走时所面临的运动学分析、稳定性评价方法、步态规划、足力控制策略及控制系统构建等关键技术问题开展了研究，为轮足式机器人的实用化应用奠定了基础。

论文取得了如下创新性成果：

1. 提出了支撑面压力中心至各足支撑点构成的多边形边缘的最短距离来评定机器人行走稳定性的判定准则，并给出了重心最小稳定距离概念及相应的稳定裕度评定方法，判定准则全面的建立了干扰项、重心高度、支撑面姿态以及机器人质量等参数与稳定裕度的关系，实现了机器人行走稳定性的准确评价。

2. 在对四足动物爬行步态研究分析的基础上，规划了针对非平坦路面间歇爬行步态和针对平坦路面的协调爬行步态，并进行了步态仿真及实验研究，实现了不同环境下机器人的稳定行走。

3. 建立了四足机器人躯体虚拟悬挂模型，提出了基于足力补偿的机器人躯体位姿偏差修正算法，实现了躯体位姿平衡控制。采用改进的基于位置的阻抗控制策略，实现了摆动足从自由空间到约束空间的柔顺过渡和机器人期望足力的跟踪。实验证明，基于足力的机器人控制方法避免了计算复杂的多足机器人多刚体动力学，具有较高的实时性。

4. 设计了四足机器人嵌入式分级递阶运动控制系统，以开放式、集成化为目标，研制了嵌入式多电机驱动控制模块，采用带自调整权函数的模糊控制规则，实现了非线性负载下良好的关节速度跟踪及机器人多关节协调运动的伺服控制。

以上概括地总结了本文的主要工作内容。多运动方式四足仿生机器人应用于工程探险、反恐防爆、军事侦察等具有很好的实际应用前景，该方面的研究具有很好的实用价值及社会意义，进一步加强四足移动机器人的功能特性，提高其实用化水平仍是未来四足机器人研究发展的重要目标。在已完成的研究成果基础上，作者对未来的研究工作有以下几点展望：

1. 目前, 机器人机械部件仍有不足之处, 如同步带传动影响了关节的刚度, 蜗轮蜗杆传动具有一定的回程误差, 这些对关节位置精度具有一定的影响, 下一步工作应进一步改进和完善;
2. 加强对机器人各种步态动作连续性的研究, 将步态过渡、特殊环境的自由步态等融入到目前的规划步态中。
3. 加强半自主控制方法的研究, 增强机器人的导航及局部自主控制能力, 改善机器人的控制性能, 从而达到简化机器人操作的目的。

参考文献

- 1 王田苗, 刘进长. 机器人技术主题发展战略的若干思考. 中国制造业信息化. 2003.11
- 2 施拉夫特. 服务机器人. 机器人技术与应用. 1997(1):3-5
- 3 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)
- 4 干东英, 甘建国. 步行机器人述评. 机械工程. 1990,(4)
- 5 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述. 机器人. 2006,28(1):81-88
- 6 R.S.Mosher. Test and Evaluation of a Versatile Walking Truck. Proc. Off-Road Mobility Research Symp, 1968:359-379
- 7 R. B. McGhee. Some Finite State Aspects of Legged Locomotion. Math.Biosci., 1968: 67-84,
- 8 McGhee, R. B. Robot Locomotion. Neural control of locomotion. 1976: 237-264.
- 9 Tanie K. Humanoid Robot and Its Application Possibility. IEEE Int. Conf. on Multi-sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2003: 213 - 214
- 10 Berns.K, Ilg.W, Deck.M, Dillmann.R. The Mammalian-like Quadrupedal Walking Machine BISAM. 5th International Workshop on Advanced Motion Control, Coimbra., 1998: 429 - 433
- 11 Berns.K, Ilg.W, Deck.M, Albiez.J, Dillmann.R. Mechanical Construction and Computer Architecture of the Four-legged Walking Machine BISAM., IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999: 32 - 38
- 12 Albiez.J, Ilg.W, Luksch.T, Berns.K, Dillmann.R, Learning a Reactive Posture Control on the Four-legged Walking Machine BISAM. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2001: 999 - 1004
- 13 Ilg.W, Albiez.J, Jedele.H, Berns.K, Dillmann.R. Adaptive Periodic Movement Control for the Four Legged Walking Machine BISAM IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1999: 2354 - 2359
- 14 Berns.K, Ilg.W, Deck.M, Dillmann.R. Adaptive Control of the Four-Legged Walking Machine BISAM. IEEE Int. Conf. on Control Applications, 1998:

428 – 432

- 15 Villard C, Gorce P, Fontaine J.G.. Study of the Dynamic Behavior of RALPHY. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1993: 1765 - 1770
- 16 Guihard M, Gorce P. A Solution to Control the Dynamic Behaviour of a Pneumatic Quadruped Robot. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1995: 1000 – 1005
- 17 S. HIROSE, K. KATO. Study on Quadruped Walking Robot in Tokyo Institute of Technology-Past, Present and Future-Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA. 2000:414~419
- 18 S.Hirose, K.Yoneda and H.Tsukagoshi, “TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope,” Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, 1997:494-500
- 19 S. Hirose and K. Kato, "Development of Quadruped Walking Robot with the Mission of Mine Detection and Removal," Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on R&A, 1998:1713- 1718
- 20 Kurazume R , Hirose S , Yoneda K. Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for a Quadruped Walking Vehicle. IEEE Int . Conf . on Robotics and Automation , Korea , 2001:3172-3180
- 21 Arikawa K, Hirose S. Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1996: 208 – 214
- 22 Hiroshi Kimura. Three-dimensional Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped-rolling Motion Feedback to CPGs Controlling Pitching Motion. Proc. of IEEE Robotics and Automation (ICRA), Washington D.C. 2002:2228~2233
- 23 Yasuhiro Fukuoka. Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot 'Tekken' on Irregular Terrain Using a Neural System Model, Proc. of IEEE Robotics and Automation (ICRA). 2003:2037~2042
- 24 Cordes S, Berns K, Leppanen I. Sensor Components of the Six-legged Walking Machine LAURON II. Proceedings 8th International Conference on Advanced Robotics, 1997: 71 – 76
- 25 M. Frik, M. Guddat, D.C. Losch. Terrain Adaptive Control of the Walking

- Machine Tarry II. Proc. European Mechanics Colloquium, 1998:108-115.
- 26 P. Didier, M. Buehler. Stable Running in a Quadruped Robot with Compliant Legs. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. San Francisco. 2000: 444~450
- 27 S. A. James, P. Ioannis. Rotary Gallop in the Untethered Quadrupedal Robot Scout II. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Japan. 2004: 2556 – 2562
- 28 胡贵钱, 王菊芬. 四足步行机器人力位混合控制的实验研究与分析. 实验技术与管理. 2004,21(5): 26~30
- 29 席裕庚,程君实,陈佳品. 四足机器人对角小跑直线步行的虚拟模型. 上海交通大学学报. 2001,35(12): 1771~1775
- 30 席裕庚,程君实,陈佳品. 基于虚拟模型的四足机器人直觉控制. 上海交通大学学报.2002,36(8): 1150~1154
- 31 王新杰, 李培根, 陈学东. 四足步行机器人动力学模型及脚力分配的研究. 华中科技大学学报. 2005,33(12):12~15
- 32 苏军. 多足步行机器人步态规划及控制的研究. 华中科技大学硕士论文. 2004:15~17
- 33 T. Estier, Y. Crausaz, B. Merminod, M. Lauria, R. Piguet, R.Siegwart. An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities, Proceedings of Space and Robotics 2000, Albuquerque, USA, 2000.
- 34 M. Lauria, Y. Piguet. Octopus: An Autonomous Wheeled Climbing Robot. <http://asl.epfl.ch/research/systems/Octopus/octopus.php>. 2002.
- 35 I. Leppänen, S. Salmi, A. Halme. WorkPartner, HUT Automation's New Hybrid Walking Machine. First international symposium, Brussels, Belgium, 1998:26-28
- 36 S. Guccione, G. Muscato, The Wheeleg Robot. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2003(12):33-43.
- 37 H. Adachi, N. Koyachi, T. Arai, A. Shimizu, Y. Nogami. Mechanism and Control of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999: 1792-1797.
- 38 R.B. Meghee. Some finite state Aspects of Legged Locomotion. Mathematical Bios. 1968(12)

- 39 R. Tomovic, R. B. Meghee. A finite state Approach to the Synthesis of Bioengineering Control System IEEE Trans On Human Factors in Electronics. 1968.
- 40 R.B. Meghee and A.A. Franck. On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits. Mathematical Biosciences. 1968(3)
- 41 S.M. Song, B.S. Choi. The Optimally Stable Ranges of 2n-Legged Wave Gaits. IEEE Trans On Systems, Man and Cybernetics, 1990,20(4): 888~902
- 42 H.Igarashi, M.Kakikura. Adaptive Gait for a Quadruped Robot on 3D Path Planning, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2003:2049-2054
- 43 陈佳品, 程君实, 冯 萍. 四足机器人对角小跑步态的研究. 上海交通大学学报. 1997,31(6):18~23
- 44 何冬青, 马培荪, 曹冲振. 四足机器人对角小跑起步姿态对稳定性的影响. 上海交通大学学报. 2005,39(6):880~883
- 45 K. Yoneda, H. Iiyama, S. Hirose. Intermittent Trot Gait of a Quadruped Walking Machine Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Minnesota. 1996:3002~3007
- 46 S. Hirose , K. Yoneda. Dynamic And Static Fusion Control Of Quadruped Walking Vehicle. IEEE Int. Workshop. on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, 1989:199~204
- 47 D.A. Messuri, and C.A. Klein. Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of Legged Vehicle During Rough Terrain Locomotion. IEEE J. Robotics and Automation. 1985: 132-41
- 48 E.G. Papadopoulos, D.A. Rey. A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1996:3111-3116
- 49 Hirose S H. A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle. The Int. J. of Robotics Research. 1984, 3(2):113~133
- 50 Pack D J, Kang H S. An Omnidirectional Gait Control Using a Graph Search Method for a Quadruped Walking Robot. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995:988~994
- 51 王新杰, 李培根, 陈学东. 四足步行机器人关节位姿和稳定性研究. 中国机械工程. 2005,16(17):1561~1567
- 52 伍科布拉托维奇著, 步行机器人和动力型假肢. 马培荪, 沈乃熏译. 科学

- 出版社, 1983
- 53 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. 哈尔滨工业大学学报. 2001, 33(1): 4~7
- 54 杨东超, 汪劲松, 刘 莉. 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划. 机器人. 2001,23(6):504~509
- 55 K. Yoneda, S. Hirose. Dynamic and Static Fusion Gait of a Quadruped Walking Vehicle on a Winding Path. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nico, France, 1992:143~149
- 56 K. Yoneda, K. Yoneda, S. Hirose. Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for Quadruped Walking Vehicle. Kluwer Academic Publishers. 2002,(1):1~30
- 57 Ahikiko. Three-dimensional Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped-rolling Motion Feedback to CPGs Controlling Pitching Motion, Proc. of IEEE Robotics and Automation (ICRA), 2002.5
- 58 R. A. Brooks. A Robot that Walked: Emergent Behaviours from a Carefully Evolved Network. Neural Computation. 1989(1):253~262
- 59 R. A. Brooks. Intelligence without Reason. 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Sydney. 1991:569~595
- 60 郑浩峻, 张秀丽, 李铁民. 基于 CPG 原理的机器人运动控制方法. 高技术通讯. 2003(7):64~69
- 61 郑浩峻, 张秀丽, 关 旭. 基于生物中枢模式发生器原理的四足机器人. 清华大学学报. 2004,44(2):166~169
- 62 K. Hiroshi, Y. Fukuoka. Biologically Inspired Adaptive Dynamic Walking in Outdoor Environment Using a Self-contained Quadruped Robot Tekken. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004: 986~992
- 63 陈学东, 周明浩, 孙 翊. 模块化多足步行机器人的运动控制系统研究. 中国机械工程. 2006,(5):1071~1074
- 64 C.L. Shih, C.A. Klein. An Adaptive Gait for Legged Walking Machines over Rough Terrain. IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(4): 1150~1155
- 65 C. A. Klein and R. L. Briggs. Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.1980,10(7):393-400

-
- 66 D.M.Gorinevsky, A.Yu.Shneider. Force Control in Locomotion of Legged Vehicles over Rigid and Soft Surfaces. *Int. J. Robotics Research*. 1990, 9(2): 4~23
 - 67 P.V.Nagy, W.L.Whittaker, S.Desai. A Walking Prescription for Statically-Stable Walkers Based on Walk/Terrain Interaction. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1992:149-156
 - 68 K. Yoneda, H. Iiyama, and S. Hirose. Sky-Hook Suspension Control of Quadruped Walking Vehicle. *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1994: 999-1004
 - 69 Qingjiu Huang, Yasuyuki Fukuhara. Posture and Vibration Control Based on Virtual Suspension Model Using Sliding Mode Control for Six-Legged Walking Robot, *Proceedings of the IEEE/RSJ*. 2006:5232~5237
 - 70 陈学东,郭鸿勋,渡边桂吾. 四足机器人爬行步态的正运动学分析. *机械工程学报*.2003,39(2): 8~12
 - 71 F. Hardarson. Stability Analysis and Synthesis of Statically Balanced Walking for Quadruped Robots. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, 2002:25~37
 - 72 Z. Chang-de. Kinematics and Dynamics of Robotic Systems with Multiple Closed Loops. Doctoral thesis, University of Illinois, 1992:88~110
 - 73 李霞, 谢涛, 陈维山. 基于神经网络的双足机器人逆运动学求解. *机械设计*, 2003,20(4):30~40
 - 74 Michele L, Giovanni M. Kinematics, Dynamics and Control of a Hybrid Robot Wheeleg. *Robotics and Autonomous System*. 2003:161~180
 - 75 陈海伟, 高勇. 模块化可重构三腿并联机器人的运动学控制. *机械工程学报*, 2005,41(8)
 - 76 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 机械工业出版社.1996:29-35
 - 77 付京逊, 冈萨雷斯. 机器人学·控制·传感技术·视觉·智能. 中国科学技术出版社. 1995:23~87
 - 78 蔡自兴. 机器人学. 清华大学出版社. 2000:51-54
 - 79 徐轶群, 万隆君. 四足步行机器人腿机构及其稳定性步态控制. *机械科学与技术*. 2003,22 (1): 86~91
 - 80 Schmiedel ER J P. The Mechanics of and Robotic Design for Quadrupedal

- Galloping. Ph. D. Dissertation. The Ohio State University, 2001:1~12
- 81 Quadruped Locomotion - Musings About Running Dogs and Other 4-Legged Creatures URL:<http://www.oricomtech.com>
- 82 张金超. 四足移动机器人平地稳定行走步态的研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2005:22~23
- 83 LEE T T, SHIN C L.A study of the Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle. IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986, 2(2):61~68.
- 84 满洁, 张玉茹, 罗杨宇. 步行机动力学与控制集成仿真方法. 机械设计. 2001(8):33~35
- 85 何冬青, 马培荪, 四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析. 计算机仿真. 2005,22(2):146~149
- 86 杨东超, 汪劲松, ADAMS 在拟人机器人研究中的运用. 机器人技术与应用, 2001,(4):21-231
- 87 S. Ma, T. Tomiyama, Hideyuki Wada.Omni-directional Walking of a Quadruped Robot. IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002:2610-2613
- 88 I. Hiroshi, T. Machida, F. Harashima. Free Gait for Quadruped Robots with Posture Control. AMC, Istanbul, Turkey, 2006:433~439
- 89 陈峰, 费燕琼, 赵锡芳. 机器人的阻抗控制. 控制与决策. 2005(12):46~49
- 90 刘伊威, 金明和, 杨磊. HIT_DLR 灵巧手单手指的阻抗控制. 机械与电子. 2005(10):62~65
- 91 谢宗武. HIT-1 机器人灵巧手柔顺控制的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2003:59~69
- 92 D. Surdilovic. Contact Stability Issues in Position Based Impedance Control: Theory and Experiments. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota-April 1996:1675-1680.
- 93 D. Surdilovic. Robust Robot Compliant Motion Control Using Intelligent Adaptive Impedance Approach. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation. Michigan, 1999:2128~2133.
- 94 D. Surdilovic. Contact Transition Stability in the Impedance Control. IEEE International Conference on Robotics and Automation., 1997:847~852.
- 95 许宏岩, 王树国, 付宜利. 仿生机器人体系结构的研究. 机械工程师.

2004(1)

- 96 G. Saridis. Toward the Realization of Intelligent Controls. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation. 1979:1115~1133.
- 97 陈东良.仿生机器蟹两栖步行机理与控制方法研究. 哈尔滨工程大学博士学位论文. 2006:49~50
- 98 董春, 徐文力. 仿人手臂动力学控制实验平台的设计与实现. 机器人, 2004,26(1):23~26.
- 99 J Z Xiao, H. Dulimarta. DSP Solution for Wall-climber Micro-robot Control Using TMS320LF2407 Chip. IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. Faro, Portugal. 2000:1348~1351
- 100 刘和平等. TMS320LF2407DSP 结构、原理及应用. 北京航空航天大学出版社. 2002
- 101 林建伟. 电机驱动用 H 桥组件 LMD18200 的应用. 国外电子元器件. 1998,(9):10~12.
- 102 张筱磊, 李士勇. 实时修正函数模糊控制器组合优化设计. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 8~12.
- 103 L R Lin, H P Huang. DSP-based Fuzzy Control of a Multifingered Robot Hand. IEEE International. Conference on Intelligent Systems for the 21st Century. Canada. 1995: 3672~3677
- 104 李士勇著, 模糊控制.神经控制和智能控制论. 哈尔滨工业大学出版社, 1996:250~294

攻读博士学位期间所发表的学术论文

- 1 Pengfei Wang, Lining Sun. Wheeled Foot Quadruped Robot HITAN-I. HIGH TECHNOLOGY LETTERS. 2006,12(4):346~350 (EI: 070410388247)
- 2 王鹏飞,孙立宁,黄博. 地面移动机器人系统的研究现状与关键技术. 机械设计 2006,23(7): 1-4
- 3 孙立宁, 王鹏飞, 黄博. 四足仿生机器人嵌入式多关节伺服控制器的研究. 机器人. 2005,27(6):517-520
- 4 Pengfei Wang, Lining Sun. The Stability Analysis for Quadruped Bionic Robot. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2006, Beijing: 5238~5243. (EI: 072510665465)
- 5 Pengfei Wang, Bo Huang, Lining Sun. Walking research on multi-motion mode quadruped bionic robot based on moving ZMP, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2005, Canada: 1935~1940. (EI: 05469480398)
- 6 Pengfei Wang, Lining Sun. Three-class Control System Based on CAN and wireless Communication for Wheeled Foot Quadruped Robot HITAN-I, IEEE International Conference on Mechatronics(ICM) 2005, TaiWan: 208~213. (EI: 063910134219)
- 7 黄博, 王鹏飞, 孙立宁. 复合运动模式四足机器人机构设计及分析. 机械设计与研究, 2006(5): 481-485
- 8 Bo Huang, Pengfei Wang, Behavior based control of a hybrid quadruped robot. World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA) 2006, DaLian, 8997~9001. (EI: 071510544260)
- 9 Bo huang, Mantian Li, Pengfei Wang, A Parent-Children Type Robot System for Scout: Mechanics, Control, Simulation and Test. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2006, LuoYang, 406~410. (EI: 071710567297)
- 10 黄博, 王鹏飞, 孙立宁. 复合运动四足机器人行为模式控制体系设计. 机床与液压, 2007(4): 157-160

哈尔滨工业大学博士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的博士学位论文《四足机器人稳定行走规划及控制技术研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读博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

哈尔滨工业大学博士学位论文使用授权书

《四足机器人稳定行走规划及控制技术研究》系本人在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间在导师指导下完成的博士学位论文。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

哈尔滨工业大学博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

作者在攻读博士学位期间，始终得到导师孙立宁教授的悉心指导，使作者能够顺利完成课题的研究工作。特别感谢他在日常生活上给与作者大量无私的关怀与帮助，并为作者论文的完成创造了许多便利条件。导师严谨治学的学风、渊博的知识、始终站在学术前沿不断进取的精神，将使作者受益终生。在此论文完成之际谨向导师致以最诚挚的谢意。

在课题研究和论文撰写过程中，得到了研究所诸位老师给予的帮助与支持，在此，谨致以深深的谢意。特别要感谢李满天、郭伟老师给予了作者热情的指导和无私帮助，提出了许多宝贵的意见和建议；

感谢张金超、罗郁峰、宋磊等众多师弟在论文工作上的支持。

感谢同窗吴善强、张明辉、秦磊、李伟达、钟鸣、查福生等给予的帮助，正是和他们愉快的相处和讨论，使本论文得以顺利完成。

感谢所有关心与帮助我的老师、同事与同学！

个人简历

王鹏飞，男，1977年6月30日出生，黑龙江省五大连池市人。

主要经历：

1996年9月至2000年7月，哈尔滨理工大学，机械工程学院（本科）。

2000年9月至2003年3月，哈尔滨理工大学，机械工程学院（硕士）。

2003年3月至2007年9月，哈尔滨工业大学，机械电子工程（博士）。

2005年7月至今，哈尔滨工业大学，研究实习员。