



工业和信息化部“十二五”规划专著

仿生四足 机器人技术

QUADRUPED BIONIC ROBOT
TECHNOLOGY

罗庆生 罗 霄 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划专著

仿生四足 机器人技术

QUADRUPED BIONIC ROBOT
TECHNOLOGY

罗庆生 罗 霄 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

仿生四足机器人是仿生基础理论、机械设计方法、步态规划策略、柔性制造模式、器件集成理念、智能控制机制、信息交互方式等现代高新技术有机融合的产物。本书主创人员经过数年的系统研究和深入探索,并通过几代仿生四足机器人研制历程的经验积累和技术沉淀,在仿生四足机器人的理论研究、技术探索、工程实现等方面取得了一系列创新与突破,所涉及的技术均为当今业界的前沿与核心技术。本书汇集了仿生四足机器人技术领域的最新研究成果,具有先进性、代表性、借鉴性、实用性。无论是在理论学习,还是在技术参考,或是在成果借鉴等方面,都可为广大读者提供帮助。本书可作为从事机械、控制、信息、探测、图像处理、模式识别、运动规划,以及机器人技术与应用的科研人员的学习参考书使用,也可作为普通高等院校机械类、控制类、信息类等相关专业的本科生和研究生教材使用,具有推动相关学科发展和促进创新人才培养的双重作用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

仿生四足机器人技术 / 罗庆生, 罗霄著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 4
ISBN 978-7-5682-1723-1

I. ①仿… II. ①罗… ②罗… III. ①仿生机器人-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 009986 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 29.25

字 数 / 551 千字

版 次 / 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 118.00 元

责任编辑 / 王玲玲

尹 晖

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

序言

“滚滚长江东逝水，浪花淘尽英雄。是非成败转头空。青山依旧在，几度夕阳红。白发渔樵江渚上，惯看秋月春风。一壶浊酒喜相逢。古今多少事，都付笑谈中。”明代词人杨慎的这一首《临江仙》任何时候读来都令人荡气回肠，唏嘘不已。作为电视连续剧《三国演义》的开篇曲，它引发了人们对那个时代的人与事的无限向往。随着电视剧剧情的不断深入，人们除了关心魏、蜀、吴之间胜负局势的此消彼长，还会对诸葛亮发明的“木牛流马”津津乐道、啧啧称奇。甚至就连千余年过后的今天，还在世界掀起了一股仿造“木牛流马”的热潮。虽然如今科学家们研制的不是当年的木牛流马，而是一种有着四条机械腿的机器人，但这并不是现代人观剧以后的心血来潮、率性而为，其实质是一种目标明确、意义重大的科学探索与工程实践。近年来，随着全球范围内现代科技的强力推动和应用市场的大力牵引，机器人技术取得了长足的进步。人们在科技飞速发展、应用不断创新的今天，已不再满足于生产那些钢筋铁骨，充斥重金属气息的传统机器人。伴随着机器人视觉、计算机、自动化、智能化以及传感器等技术水平的不断提升，人们将目光转向了自然界中拥有更加高超的运动能力和更加协调的控制能力的各种生物。越来越多的科学家们正在以仿生学知识为指导，在充分了解生物系统组成形式、运动方式和控制模式的基础上，通过各种现代高新技术模仿并重塑机器人的躯体和大脑，三国时代的“木牛流马”已经逐渐变为现实。

众所周知，在地球的陆地表面，有超过 50% 以上的面积为崎岖不平的山丘或低洼潮湿的沼泽，不适合轮式或履带式机器人在上面行走。在这种环境下，足式机器人有着轮式和履带式机器人无法比拟的优点。足式机器人可以利用孤立的地面支撑而不是轮式机器人

所需的连续地面支撑，在可能到达的地面上能够选择最优的支撑点，更加适应不平整的地面，因此具有更强的机动性和更好的适应性；另外，足式机器人腿部所具有的多个自由度，使其具有良好的选择性与灵活性，这些特点使得足式机器人在非结构化、存在不确定因素的环境中具有一定的优势。因此，足式机器人近年来日益成为国内外机器人领域的研究热点，不断激励着科学家们锲而不舍地探索其中的奥秘。

在形形色色的足式机器人中，四足机器人对科研人员们有着巨大的吸引力，因为它是模仿四足动物结构特点和运动形式的一种极为特殊，又极为优秀的机器人，它既有优于双足机器人的高负载性与高平稳性，又具备多足机器人更大的腿部运动空间，同时还减小了机构的冗余性和复杂度；它既能以静态步行方式在复杂地形上缓慢行走，又能以动态步行方式在一般道路上高速行进，这些特质使其在抢险救灾、反恐排爆、军事运输、野外勘探、星球探测、农业生产、教育及娱乐等诸多方面都有极其广阔的发展远景。

北京理工大学特种机器人技术创新团队成立于2005年，是在罗庆生教授和韩宝玲教授带领下，长期不懈地走在特种机器人科技创新探索、科研任务攻关道路上，充满创新能量、奋斗不息的一支标兵团队。该创新团队的主要研究领域为光机电一体化特种机器人、工业机器人技术、机电伺服控制技术、机电装置测试技术、传感探测技术和机电产品创新设计等。目前已研制出仿生六足爬行机器人、新型特种搜救机器人、多用途反恐防暴机器人、新型工业码垛机器人、新型轮腿式机器人、新型节肢机器人、新型工业焊接机械臂、陆空两栖作战任务组、外骨骼智能健身与康复机、“神行太保”多用途机器人、履带式壁面清洁机器人、小型仿人机器人、“仿豹”跑跳机器人、先进综合验证车、仿生乌贼飞行机器人、履带式变结构机器人、制导反狙击机器人、新型球笼飞行机器人等多种特种机器人。该团队在承研×××部“十二五”重点项目——新型仿生液压四足机器人过程中，系统、全面、详尽、科学地开展了四足机器人结构设计技术研究、四足机器人动力驱动技术研究、四足机器人液压控制技术研究、四足机器人仿生步态技术研究、四足机器人传感探测技术研究、四足机器人系统控制技术研究、四足机器人器件集成技术研究、四足机器人操控装备技术研究，在有关液压四足机器人的仿生研究、机构设计、结构优化、机械加工、驱动传感、液压伺服、系统控制、人工智能、决策规划和模式识别等高精尖技术方面取得一系列创新与突破，从而为本书的撰写提供了丰富的资料和坚实的基础。

本书的主创人员在开发高性能、多用途特种机器人方面具有丰富的研制经验和深厚的技术积累，由罗庆生、韩宝玲、罗霄撰写的专著《智能作战机器人》曾获第五届中华优秀出版物图书奖，这是我国出版物领域中的最高奖，表明其在科技领域，尤其是在机器人领域中的实力与地位。这次，罗庆生、罗霄等人将其在仿生液压四足机器人核心功能与关键技术方面取得的突破与进展修撰成书，以飨读者，实为广大读者的

福音。本书共含 12 章，第 1 章绪论、第 2 章仿生液压四足机器人结构设计技术、第 3 章仿生液压四足机器人步态规划技术、第 4 章仿生液压四足机器人运动学与动力学分析、第 5 章仿生液压四足机器人液压控制技术、第 6 章仿生液压四足机器人步态生成器设计、第 7 章仿生液压四足机器人环境适应控制技术、第 8 章仿生液压四足机器人侧向冲击下的动态稳定性控制、第 9 章仿生液压四足机器人立体视觉技术、第 10 章仿生液压四足机器人自动随行技术、第 11 章仿生四足机器人多传感器检测与信息融合技术研究、第 12 章总结与展望。这些章节架构严谨、相互呼应；条分缕析、层层递进，所涉及的均是机器人领域的前沿与核心技术，所论及的均是机器人领域的热点与难点问题。全书汇集了仿生四足机器人技术领域最新的研究成果，反映了仿生四足机器人技术领域最新的发展动态，仔细读来能够帮助人们登堂入室，领略仿生四足机器人技术发展的宏伟远景。

中国工程院院士 朵英贤

2015 年 10 月于北京

在仿生学一词频繁在科研领域亮相时，仿生机器人也逐步进入人们的视野。由于当代机器人的应用领域已经从结构化环境下的定点作业，朝着航空航天、军事侦察、资源勘探、管线检测、防灾救灾、疾病治疗等非结构化环境下的自主作业方向发展，原有的传统型机器人已不再能够满足人们在自身无法企及或难以掌控的未知环境中自主作业的要求，更加人性化和智能化的、具有一定自主能力、能够在非结构化的未知环境中作业的新型机器人已经被提上开发日程。为了使这一研制过程更为迅速、更为高效，人们将目光转向自然界的各种生物身上，力图通过有目的的学习和优化，将自然界生物特有的运动机理和行为方式运用到新型仿生机器人的研发工作中去。

与科幻小说中塑造的几可乱真的仿人机器人不同，仿生机器人是一个庞大的族群，从在空中自由飞翔的“蜂鸟机器人”和“蜻蜓机器人”，到在陆地恣意奔跑的“大狗机器人”和“猎豹机器人”，再到在水下尽情嬉戏的“企鹅机器人”和“仿鱼机器人”；从肉眼几乎无法看清的“昆虫机器人”，到可载人行走的“螳螂机器人”，现实世界中处处都可看见仿生机器人的身影，以往只有在科幻小说中出现的场景正在逐步与现实世界交汇。

仿生机器人的家族成员们拥有五花八门的外观形貌和千奇百怪的身体结构，它们通过不同的机械结构、步态规划、行动特点、反馈系统、控制方式和通信手段模拟着自然界中各种卓越的生物个体，同时又通过人类制造的计算机、传感器、控制器以及其他外部构件诠释着自己来自实验室的特殊身份。如今，这支源自自然世界和科学世界混合编组的突击部队正信心满满，准备在人类生活中大显身手。

时至今日，仿生机器人已经成为家喻户晓的“大明星”，每一款造型新颖、构思巧妙、功能独特、性能卓异的仿生机器人自问世之时起都伴随着全世界的惊叹和掌声，仿生机器人技术的迅速发展对全球范围内的工业生产、太空探索、海洋研究，以及人类生活的方方面面产生越来越大的影响。在减轻人类劳动强度，提高工作效率，改变生产模式，把人从危险、恶劣、繁重、复杂的工作环境和作业任务中解放出来等方面，显示出极大的优越性。人们不再满足于在展示厅和实验室中看到机器人慢悠悠地来回走动，而是希望这些超能健儿们能够在更加复杂的环境中探索与工作。在各类仿生机器人健儿中，四足机器人更是寄托着人们的希望与憧憬。

进入 21 世纪以后，机器人的应用范围不断从结构化环境向非结构化环境、从已知环境向未知复杂环境甚至极限环境延伸，并大大加强了四足机器人的快速动态步态行走和崎岖地形负载行走的能力。四足步行机器人的研究方向已经转移到具有一定负载水平、自主能力，可在面对复杂地形时进行自适应运动规划的仿生液压四足机器人上来。

为了成功研制出高平衡性、高动态性、高适应性、高负载力、高性价比的仿生液压四足机器人，人们持续在四足机器人的核心功能和关键技术方面展开深入、系统的研究，尤其在仿生机构、高功率密度液压驱动、状态感知与环境适应、仿生步态规划与动态控制等核心技术上力求取得突破，因为这是保障仿生液压四足机器人研制成功的关键所在。

仿生四足机器人是集光机电液等多学科、多领域、多专业知识与技术于一体的高集成度、高复杂性的软硬件融合体，其研制的水平在一定程度上代表着一个国家科技发展的实力。本书以北京理工大学特种机器人技术创新团队承研的一款新型仿生液压四足机器人为研究对象，系统、全面、详尽、科学地阐述了本团队将仿生研究、机构设计、结构优化、机械加工、驱动传感、液压伺服、系统控制、人工智能、决策规划和模式识别等高精尖技术有机结合且巧妙运用在该机器人的研制过程中的经历与体会，以及本团队由此在理论研究、技术探索、工程实现等方面取得的一系列创新与突破，相关研究结论与成果有着推进相关学科发展和满足国家战略需要的双重价值。

仿生四足机器人是为满足在非结构化环境中物资运输、供应保障等特殊要求而应运而生的，其工作环境和作业任务决定了其研制的艰巨性与复杂性。为了保证其能够在非结构化环境中准确、有效地跟随引导人员，在复杂地形条件下圆满完成物资运输的任务，就必须解决从理论探索到技术实现漫长历程中必然会遇到的无数技术难关和具体问题。本书经过认真梳理、仔细排查，针对仿生液压四足机器人研制过程中面临的最为核心、最为复杂、最为棘手的——多关节协调控制、动态稳定性控制、环境适应性控制、能耗控制、电液伺服控制、运动目标自动识别与跟踪等问题，以提升四足机器人的运动稳定性和节能为目的，对四足机器人的仿生机构设计、运动控制理论与

方法、运动控制系统构建与实现、液压伺服系统设计与分析、视觉跟踪系统设计与完善、步态生成器设计与改进等关键技术问题开展了系统研究和深入探索，取得了众多的研究成果。这些研究成果对缩短我国与世界强国在四足机器人研发水平方面的差距颇有助益。

本书由罗庆生、罗霄担任主撰；韩宝玲、李华师担任副主撰；苏晓东、王鑫、李欢飞、牛锴、朱颖、那奇、施世才、张天、李超、王梦迪、蔡雯琳等人参与了本书部分内容的研究与撰写工作；贾燕参与了本书体系的结构设计与内容安排，并参与了部分章节的写作。

在本书研究与写作过程中，得到了xxx部相关领导的极大关怀，得到了北京理工大学相关部门的热情帮助，还得到了许多同仁的无私支持。值本书即将付印出版之际，谨向所有关心、帮助、支持过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢！

作 者

2015年10月于北京

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 仿生学与仿生机器人概述	1
1.2 仿生四足机器人的研究现状与发展趋势	2
1.2.1 仿生四足机器人概述	2
1.2.2 仿生液压四足机器人国内外研究现状及发展趋势	3
1.3 仿生液压四足机器人关键技术概述	14
第2章 仿生液压四足机器人结构设计技术	15
2.1 四足机器人结构设计概述	15
2.1.1 四足机器人的总体性能要求及参数指标	15
2.1.2 四足机器人的设计目标	16
2.2 四足机器人运动参数的仿生学分析	17
2.2.1 步行动物腿足的生理特征与运动规律	18
2.2.2 四足机器人仿生设计对象的选取	19
2.2.3 马的解剖学研究	19
2.2.4 马的仿生学探索	20
2.3 四足机器人腿部结构参数的分析与确定	22
2.3.1 四足机器人的腿节比例关系	22
2.3.2 四足机器人的关节配置方式	27
2.3.3 四足机器人的关节摆角范围	27
2.3.4 液压缸的安装位置	30

2.3.5	液压缸的工作行程	33
2.3.6	四足机器人运动学仿真	36
2.4	四足机器人腿部结构设计	37
2.4.1	机器人髋关节及大腿组件设计	42
2.4.2	机器人膝关节及小腿组件设计	44
2.4.3	机器人腿部侧摆组件设计	51
2.4.4	机器人液压系统及其他元器件选型	56
2.4.5	机器人单腿整体结构设计	59
2.5	四足机器人整体结构设计	62
2.6	四足机器人结构的受力分析	63
2.6.1	有限元分析方法	63
2.6.2	有限元分析实例	65
第3章	仿生液压四足机器人步态规划技术	81
3.1	四足机器人仿生步态技术概述	81
3.1.1	四足动物运动神经控制机理分析	81
3.1.2	四足动物步态的定义与分类	83
3.1.3	四足机器人步态参数定义	86
3.2	CPG 单元模型及动态特性分析	87
3.2.1	CPG 振荡单元模型	87
3.2.2	CPG 单元模型的动态特性分析	90
3.3	四足机器人 CPG 控制网络	92
3.3.1	CPG 网络控制相关概念	92
3.3.2	四足机器人 CPG 控制网络一	93
3.3.3	四足机器人 CPG 控制网络二	100
3.4	四足机器人平滑步态转换技术方法	103
3.4.1	CPG 步态转换方法	104
3.4.2	基于 CPG 的平滑步态转换方法	107
3.5	CPG 控制算法的联合仿真实验	111
3.5.1	联合仿真系统模型	111
3.5.2	四足机器人行走步态仿真	111
3.5.3	四足机器人小跑步态仿真	113
3.5.4	四足机器人步态转换仿真	114

第 4 章 仿生液压四足机器人运动学与动力学分析	120
4.1 四足机器人运动学分析	120
4.1.1 四足机器人运动学概述	120
4.1.2 四足机器人的正运动学分析	123
4.1.3 四足机器人的逆运动学分析	125
4.2 四足机器人的动力学分析	126
4.3 四足机器人的能耗分析	128
4.3.1 四足机器人的能耗指标	128
4.3.2 四足机器人结构参数对能耗的影响	129
4.3.3 四足机器人运动参数对能耗的影响	130
4.4 四足机器人存在最优步长的理论依据	140
4.5 四足机器人 ADAMS 虚拟样机建模	141
4.5.1 ADAMS 简介	141
4.5.2 四足机器人三维模型简化建模	142
第 5 章 仿生液压四足机器人液压控制技术	145
5.1 四足机器人驱动方式的选择	145
5.1.1 液压驱动概述	145
5.1.2 电液伺服控制技术发展历程	146
5.2 液压系统整体方案	147
5.2.1 液压动力系统原理设计	148
5.2.2 液压系统重要参数设计	149
5.2.3 机载液压系统的集成	151
5.3 机器人控制系统总体方案	153
5.3.1 四足机器人系统总体概述	153
5.3.2 电液伺服控制系统控制对象分析	155
5.3.3 控制任务	155
5.3.4 研究方案	156
5.4 电液伺服系统仿真建模与分析	158
5.4.1 电液伺服系统分析	158
5.4.2 仿真环境和架构论证	159
5.4.3 虚拟样机结构建模	160
5.4.4 液压驱动系统建模	161
5.4.5 控制系统建模	164

5.4.6	仿真实验与结果分析	164
5.5	电液伺服系统硬件设计	168
5.5.1	系统架构设计	168
5.5.2	控制方案设计	169
5.5.3	技术方案确定	170
5.5.4	硬件系统设计	170
5.6	四足机器人控制系统软件设计	181
5.6.1	控制系统软件框架	181
5.6.2	电液伺服系统软件设计	182
5.7	电液伺服控制系统算法设计	187
5.7.1	运动学相关算法	187
5.7.2	轨迹规划插补算法	190
5.7.3	非对称前馈补偿模糊自适应 PID 算法设计	191
5.8	液压伺服系统控制实验	192
5.8.1	基本功能实验	192
5.8.2	实物等效伺服控制实验	194
5.8.3	控制对象性能评估实验	195
5.8.4	伺服控制实验	199
5.8.5	轨迹规划实验	205
5.9	本章总结	205
第6章	仿生液压四足机器人步态生成器设计	207
6.1	四足机器人复合控制系统总体设计方案	207
6.2	步态生成器的硬件设计	209
6.2.1	控制系统对步态生成器的设计要求	209
6.2.2	步态生成器的整体设计	209
6.2.3	步态生成器核心板的硬件设计	210
6.3	步态生成器的软件设计	217
6.3.1	硬件开发语言与软件开发环境	218
6.3.2	步态生成器的整体软件设计	220
6.3.3	CPG 算法硬件代码的实现	221
6.3.4	步态生成器核心板的软件设计	223
6.4	四足机器人控制系统实验	226
6.4.1	四足机器人原理样机简介	226

6.4.2	四足机器人数据通信测试	229
6.4.3	CPG 算法的硬件在环仿真	233
6.4.4	四足机器人单腿节运动控制实验	234
6.4.5	四足机器人步态规划测试实验	240
6.5	本章总结	241
第 7 章	仿生液压四足机器人环境适应控制技术	243
7.1	生物反射与机器人环境适应控制概述	243
7.2	四足机器人生物反射组织体系	244
7.3	加入反馈的四足机器人 CPG 控制模型	245
7.3.1	前庭反射建模与机器人斜坡运动的实现	246
7.3.2	屈肌反射建模与机器人越障运动的实现	260
7.4	本章小结	281
第 8 章	仿生液压四足机器人侧向冲击下的动态稳定性控制	283
8.1	四足机器人侧向稳定性控制策略	283
8.2	考虑机器人侧向运动的 CPG 控制网络模型	284
8.2.1	CPG 控制网络的整体结构	284
8.2.2	连接权重矩阵的取值	285
8.2.3	关节控制信号幅值的确定	288
8.3	四足机器人联合仿真实验及结论	290
8.4	本章总结	296
第 9 章	仿生液压四足机器人立体视觉技术	297
9.1	机器人视觉的基本原理与关键技术	297
9.2	四足机器人双目立体视觉系统的硬件设计	298
9.2.1	硬件系统总体参数设计	298
9.2.2	摄像机主要参数的确定	300
9.2.3	双目视觉系统成像模型设计	301
9.3	四足机器人双目立体视觉系统的软件设计	302
9.3.1	摄像机内外参数标定	302
9.3.2	图像预处理	303
9.3.3	图像对的立体匹配	304
9.3.4	空间点的三维重建	304

9.4	基于双目立体视觉系统的预处理算法研究	304
9.4.1	摄像机的透视投影模型	304
9.4.2	摄像机标定中的几个坐标系	305
9.4.3	摄像机内外参数的标定	308
9.4.4	立体图像对的校正模型及实验结果	310
9.5	场景轮廓算法与动态规划立体匹配算法研究	313
9.5.1	场景轮廓算法	313
9.5.2	动态规划立体匹配算法	318
9.5.3	实验结果与分析	322
9.6	基于双目立体视觉系统的三维重建算法	331
9.6.1	基于双目视差的三维测量与深度感知方法	331
9.6.2	双目系统三维重建实验的结果与分析	334
9.7	本章总结	337
第 10 章	仿生液压四足机器人自动随行技术	339
10.1	基于机器视觉的运动目标跟踪系统概述	339
10.1.1	系统工作原理	339
10.1.2	基于机器视觉的运动目标跟踪系统结构	342
10.1.3	系统流程	343
10.2	摄像机标定以及图像畸变校正	345
10.2.1	摄像机的标定	345
10.2.2	常用成像模型及坐标系	345
10.2.3	摄像机标定流程	349
10.2.4	图像畸变校正	352
10.3	红外标志点的提取与识别	355
10.3.1	图像预处理	355
10.3.2	动态图像分割	356
10.3.3	红外标志点区域提取标记	357
10.4	摄像机位姿估计与基于卡尔曼滤波器的目标识别	362
10.4.1	摄像机位姿估计	362
10.4.2	基于卡尔曼滤波器的目标识别	370
10.5	本章总结	375
第 11 章	仿生液压四足机器人多传感器检测与信息融合技术研究	377
11.1	主要传感器的选型	377

11.1.1	直线位移传感器	378
11.1.2	角位移传感器	378
11.1.3	压力传感器	380
11.1.4	超声波测距传感器	381
11.1.5	视觉传感器	382
11.1.6	其他传感器	383
11.2	四足机器人传感检测系统的总体设计	383
11.2.1	传感检测系统总体方案的设计	384
11.2.2	传感检测系统主控芯片的选型	385
11.2.3	通信方式的选取	386
11.3	传感检测系统的硬件设计	388
11.3.1	传感检测系统的硬件总体设计方案	388
11.3.2	传感检测系统主控芯片的最小系统设计	389
11.3.3	ADC 电路设计	395
11.3.4	传感器电路设计	395
11.3.5	UART 串口通信电路的设计	401
11.4	传感检测系统的软件设计	403
11.4.1	软件工具概述	404
11.4.2	传感检测系统软件设计的总体架构	404
11.4.3	ADC 模块的软件设计	405
11.4.4	传感器模块的软件设计	407
11.4.5	UART 串口模块的软件设计	410
11.5	传感检测系统的性能实验与分析	411
11.5.1	直线位移传感器检测实验	411
11.5.2	超声波测距传感器检测实验	413
11.5.3	单目视觉传感器检测实验	415
11.6	基于 Matlab 的多传感器信息融合仿真实验	417
11.6.1	多传感器信息融合简介	417
11.6.2	卡尔曼滤波算法	418
11.6.3	STF (Simple Track Fusion) 融合算法	419
11.6.4	CV 模型	419
11.6.5	参数确定	420
11.6.6	仿真实验与结果分析	423
11.7	本章总结	427

第 12 章 总结与展望	428
12.1 成果总结	428
12.2 创新点归纳	431
12.3 前景展望	433
参考文献	434