



“十一五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

两轮自平衡机器人的研究与设计

• 阮晓钢 蔡建羨 李欣源 赵建伟 著 •



科学出版社

“十一五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

两轮自平衡机器人的研究与设计

阮晓钢 蔡建美 李欣源 赵建伟 著

国家高技术研究发展计划(No. 2007AA04Z226)
国家自然科学基金资助项目(No. 60774077)

科 学 出 版 社

北 京

作者简介



阮晓钢,男,1958年生于四川,1982年获哈尔滨船舶工程学院工学学士学位,1989年获浙江大学工学硕士学位,1992年获浙江大学工学博士学位,1992年7月至1994年6月于南京航空航天大学航空与宇航博士后流动站从事博士后科研工作,1994年7月至今效力于北京工业大学,现任教授及博士生导师。



蔡建美,女,1978年生于河北,2001年获河北科技大学工学学士学位,2003年获燕山大学工学硕士学位,2010年获北京工业大学工学博士学位,2004年4月至今效力于防灾科技学院防灾仪器系,现任讲师。



李欣源,男,1981年生于北京,2004年获北京工业大学工学学士学位,2010年获北京工业大学工学博士学位,2010年10月至今于清华大学计算机科学与技术博士后流动站从事博士后科研工作。



赵建伟,男,1979年生于内蒙古,2003年获内蒙古工业大学工学学士学位,2006年获内蒙古工业大学工学硕士学位,2010年获北京工业大学工学博士学位,2010年12月至今于清华大学精密仪器系博士后流动站从事博士后科研工作。

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编：熊有伦(华中科技大学)

编 委：(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)	李涵雄(香港城市大学/中南大学)
王田苗(北京航空航天大学)	周仲荣(西南交通大学)
王立鼎(大连理工大学)	查建中(北京交通大学)
王国彪(国家自然科学基金委员会)	柳百成(清华大学)
王越超(中科院沈阳自动化所)	赵淳生(南京航空航天大学)
王 煜(香港中文大学)	钟志华(湖南大学)
冯 刚(香港城市大学)	徐滨士(解放军装甲兵工程学院)
冯培恩(浙江大学)	顾佩华(汕头大学)
任露泉(吉林大学)	黄 强(北京理工大学)
江平宇(西安交通大学)	黄 真(燕山大学)
刘洪海(朴次茅斯大学)	黄 田(天津大学)
孙立宁(哈尔滨工业大学)	管晓宏(西安交通大学)
宋玉泉(吉林大学)	熊蔡华(华中科技大学)
张玉茹(北京航空航天大学)	翟婉明(西南交通大学)
张宪民(华南理工大学)	谭 民(中科院自动化研究所)
李泽湘(香港科技大学)	谭建荣(浙江大学)
李涤尘(西安交通大学)	雒建斌(清华大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有伦' (Xie Youjun) in a cursive style.

华中科技大学

2008年4月

前 言

有一类机器人，称为自平衡机器人，是机器人家族中重要的一族。

进入 21 世纪后，在机器人学和机器人技术领域，自平衡机器人由于其固有的不稳定动力学特性，引发了人们极大的研究兴趣，各种先进的自平衡机器人系统相继诞生。其中，两轮直立式机器人是最典型的自平衡机器人。

从美国、日本等国家对于机器人学和机器人技术的研究中可以发现，两轮直立式机器人是机器人的一种重要形式，是体现一个国家机器人学和机器人技术研究水平的重要依据之一。

在实验机器人学的意义下，两轮直立式机器人是重要的科学实验仪器，对于机器人学及其相关学科的科学研究和科学实验有重要价值。同时，两轮机器人具有占地面积小和运动灵活敏捷的特点，可以在许多特殊的环境（如空间狭小的搜救地或拥挤的办公环境）中获得应用，也可作为特殊交通工具、特殊运载工具、特殊运动器械、残疾人保障系统等，应用于现代社会的许多领域。

两轮直立式机器人的运动平衡控制问题，是机器人学和机器人技术研究的重要问题，同时也是控制科学研究的重要问题。

作者及其研究团队在国家高技术研究发展计划（No. 2007AA04Z226）和国家自然科学基金资助项目（No. 60774077）的支持下，对两轮直立式机器人展开了研究，研制出我国原创的具有自主知识产权的“原人”系列柔性两轮直立式机器人。其特征是：具有柔性的机体结构，能更好地模拟人和动物的生物动力学特性。因而，“原人”系列柔性两轮直立式机器人具有更好的仿生性质。

“原人”机器人具有优良的自平衡能力和机动性能，可以完成自由平衡、定点平衡、自旋、环绕、巡航等多种基本的运动模式，鲁棒性好，能应对外部较大的冲击扰动和阶跃扰动，能适应较复杂的外部环境，在崎岖路面上行进，跨越障碍，上下坡道的坡度可达 25° ，其运动平衡控制能力可与国外同类机器人系统媲美。人或动物的运动平衡控制技能来自于小脑及其“感觉-运动”系统，而操作条件反射是感觉运动系统最为基本的和最为重要的学习机制，人或动物的运动平衡控制技能正是基于这种学习机制渐进地形成和发展的。“原人”机器人具有人工“感觉-运动”系统，具有基于 Skinner 的操作条件反射理论的操作学习机制，能像人和动物一样，自主地学习运动平衡控制技能。

本书记录了作者及其研究团队关于“原人”机器人的研究工作，讲述了“原人”机器人物理系统的设计、数学模型与动力学分析、姿态检测方法、运动平衡控制、自主学习运动平衡技能等内容，具有一定的理论和实践指导意义。

由于作者的水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评和指正。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 两轮平衡机器人的基本构造和运动原理	1
1.1.1 两轮机器人的基本构造	1
1.1.2 两轮机器人的运动原理	2
1.2 两轮机器人的成长历史	3
1.2.1 从倒立摆到平衡机器人	3
1.2.2 典型的两轮机器人系统	6
1.2.3 两轮机器人相关基础研究	7
1.3 两轮机器人技术应用前景	9
参考文献	12
第 2 章 “原人” 柔性两轮机器人	16
2.1 柔性机器人学概述	16
2.1.1 研究柔性机器人的目的	16
2.1.2 柔性倒立摆	17
2.1.3 柔性关节	18
2.1.4 柔性机械臂	19
2.1.5 柔性脊椎机器人	20
2.2 “原人” 机器人的基本特征	21
2.3 “原人” 机器人的机体结构	22
2.3.1 基本原理	22
2.3.2 总体框架	24
2.3.3 柔性腰椎	25
2.4 “原人” 机器人的电气系统	26
2.4.1 电气系统总体结构	26
2.4.2 检测系统	28
2.4.3 控制系统	29

2.5 “原人”机器人的软件系统	31
2.5.1 软件系统的主体结构	31
2.5.2 组织级: EPC 行为决策	32
2.5.3 协调级: DSP 运动平衡控制	34
2.5.4 操作级: ISU 伺服控制	37
参考文献	38
第3章 两轮机器人的数学模型	39
3.1 相关研究工作	39
3.1.1 刚性系统的数学模型研究	39
3.1.2 柔性系统的数学模型研究	42
3.2 刚性两轮机器人模型	43
3.2.1 系统坐标、参数和变量	43
3.2.2 动力学模型	45
3.2.3 运动学模型	49
3.2.4 电机及其伺服机构模型	50
3.3 柔性两轮机器人模型	52
3.3.1 柔性旋转关节与系统假设	52
3.3.2 系统坐标、参数和变量	54
3.3.3 运动学模型	56
3.3.4 动力学模型	57
3.4 柔性两轮机器人动力学特性分析	61
3.4.1 系统稳定性	62
3.4.2 系统可控性	63
3.4.3 柔性腰椎刚度对动态性能的影响	63
3.4.4 柔性腰椎刚度对平衡控制鲁棒性的影响	67
3.5 刚/柔两轮自平衡机器人动力学模型对比分析	69
参考文献	70
第4章 两轮机器人的姿态检测	73
4.1 姿态传感器及其原理	73
4.1.1 两轮机器人的姿态	73
4.1.2 姿态检测元件	75
4.1.3 陀螺仪	77
4.1.4 姿态测量算法与 Kalman 滤波	78

4.2 常用惯性测量元件的定姿方法	83
4.2.1 陀螺仪和加速度计的误差模型	83
4.2.2 基于陀螺仪的定姿方法	84
4.2.3 基于加速度计的定姿方法	86
4.2.4 捷联惯导定姿方法	87
4.3 Kalman 滤波器与两轮机器人姿态检测	91
4.3.1 陀螺仪和倾角仪测量模型	91
4.3.2 时间更新与测量更新	92
4.3.3 Kalman 滤波器参数设置问题	94
4.3.4 实验与分析	94
4.4 自适应扩展 Kalman 滤波器	96
4.4.1 陀螺仪和加速度计构成的惯性测量单元	96
4.4.2 扩展 Kalman 滤波器中的系统模型	97
4.4.3 自适应 R 矩阵	99
4.4.4 实验与分析	100
4.5 无味 Kalman 滤波器	104
4.5.1 无味变换	104
4.5.2 预测与校正	105
4.5.3 UKF 与 EKF 的比较	106
4.5.4 仿真实验及分析	107
参考文献	108
第 5 章 两轮机器人的 PID 控制	110
5.1 PID 控制概述	110
5.2 控制结构	111
5.3 伺服控制环	113
5.4 自治环：姿态平衡控制	114
5.5 运动控制环	118
5.5.1 行进速度的控制	118
5.5.2 差动系统与航向的控制	119
5.6 运动平衡的矛盾与统一	120
5.6.1 运动控制形成局部正反馈	121
5.6.2 平衡控制的负反馈特征及其稳定性	122
5.6.3 正反馈与负反馈的统一	123
5.6.4 负反馈与负反馈的矛盾	127

5.7 仿真实验	128
5.7.1 姿态平衡控制性能测试	129
5.7.2 鲁棒性测试	132
5.7.3 运动控制实验	136
5.8 物理实验	137
5.8.1 物理系统及其 PID 参数设定	138
5.8.2 自由平衡控制实验	138
5.8.3 定点平衡控制实验	141
5.8.4 运动平衡控制实验	143
参考文献	146
第 6 章 两轮机器人的 LQ 调节	147
6.1 线性二次型控制介绍	147
6.1.1 最优控制问题	147
6.1.2 最大值原理	148
6.1.3 线性二次型问题	151
6.1.4 线性二次型状态调节器设计	152
6.1.5 线性二次型跟踪调节器设计	156
6.1.6 离散系统的线性二次型调节器设计	157
6.2 两轮机器人 LQR 设计	159
6.2.1 柔性两轮机器人模型的线性化	159
6.2.2 线性二次型姿态平衡控制律	160
6.2.3 线性二次型运动平衡控制律	162
6.2.4 自由平衡的仿真实验	163
6.2.5 定点平衡的仿真实验	167
6.2.6 运动平衡的仿真实验	171
6.2.7 鲁棒性能的仿真实验	174
6.3 两轮机器人递归 LQR 设计	176
6.3.1 柔性两轮机器人模型的递归线性化	177
6.3.2 递归线性二次型姿态平衡控制律	177
6.3.3 仿真实验	178
参考文献	180
第 7 章 仿生的姿态平衡自主学习控制	182
7.1 关于动物的操作条件反射机制	182
7.1.1 Skinner 的操作条件反射理论	183

7.1.2	Skinner 的操作条件反射实验	183
7.1.3	操作条件反射在机器人学习中的应用现状	186
7.2	关于随机自动机理论	190
7.2.1	随机自动机理论的发展	190
7.2.2	随机自动机的定义	191
7.2.3	随机自动机与机器学习	193
7.2.4	随机自动机的熵	194
7.3	SOCA 自动机	197
7.3.1	SOCA 自动机的定义	197
7.3.2	SOCA 自动机的结构	199
7.3.3	SOCA 自动机的学习算法	199
7.3.4	操作条件反射与其他机器学习方法的比较	205
7.4	Skinner 鸽子实验的模拟	210
7.4.1	机器鸽的定义和构造	210
7.4.2	机器鸽的操作条件反射实验	213
7.4.3	模拟实验结果与分析	214
7.5	“原人”的“感知-行动”特征	216
7.6	“原人”姿态平衡控制的自主学习结构	221
7.6.1	机器人的环状控制结构	221
7.6.2	操作条件反射的姿态平衡控制环	223
7.7	仿真实验	224
7.7.1	学习自由平衡	224
7.7.2	学习定点平衡	231
7.7.3	行进：不同速度和轨迹的机动	233
7.7.4	抗干扰实验	234
7.8	“原人”系统的物理实验	237
	参考文献	240
第 8 章	映射领域可自主收缩的 SOCA 自动机	244
8.1	映射领域可自主收缩的提出	244
8.2	SOCA 自动机映射领域自主收缩的实现	245
8.2.1	结构设计	245
8.2.2	映射领域自主收缩的实现	247
8.2.3	学习算法设计及分析证明	249

8.3 仿真实验	253
8.3.1 学习自由平衡	253
8.3.2 学习定点平衡	257
8.3.3 行进：不同速度和轨迹的机动	257
8.3.4 抗干扰实验	261
参考文献	263
第9章 Skinner 操作条件反射自动机的模糊化	264
9.1 仿生学习系统模糊化概念的提出	264
9.2 模糊 Skinner 操作条件反射自动机	265
9.2.1 结构设计	265
9.2.2 学习算法设计	270
9.2.3 学习流程	271
9.3 仿真实验	272
9.3.1 学习自由平衡	272
9.3.2 学习定点平衡	275
9.3.3 行进：不同速度和轨迹的机动	277
参考文献	280
附录 中英文对照	281

第 1 章 概 论

有一类机器人,称为平衡机器人,是自治移动式机器人家族中重要的一族。进入 21 世纪后,在机器人学和机器人技术领域,平衡机器人,由于其固有的不稳定动力学特性,引发了人们极大的研究兴趣,各种先进的平衡机器人系统相继诞生。

1.1 两轮平衡机器人的基本构造和运动原理

平衡机器人(balancing robot)又称自平衡机器人(self-balancing robot),其典型系统有两类:腿式平衡机器人(legged balancing robot)和轮式平衡机器人(wheeled balancing robot)。其中,轮式平衡机器人又分为独轮机器人(single-wheeled robot)和两轮机器人(two-wheeled robot)。

1.1.1 两轮机器人的基本构造

两轮平衡机器人(two-wheeled balancing robot),简称两轮机器人,既属于结构性仿生机器人系统(robotic system),又属于原理性仿生机器人系统。结构上,两轮机器人模拟人的直立姿态;原理上,两轮机器人模拟人的平衡技能。

如图 1.1 所示,两轮机器人的机体结构通常包含:

(1) 机体(body)。置于底盘之上,可装载各种电子设备,如机载工控机、数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、GPS 导航定位系统、电子眼等。

(2) 底盘(chassis)。主要用于安装或连接机体与轮系,携带和固定驱动系统,包括电机及其伺服机构。

(3) 轮系(wheels)。由左轮、右轮、轮轴或传动机构组成。左轮和右轮通过轮轴或传动机构安装在底盘的左右两侧,分别由左电机和右电机驱动。

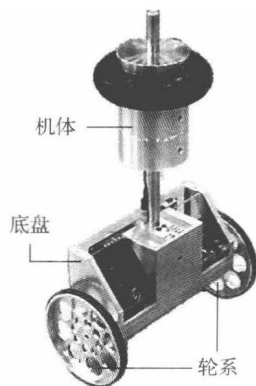


图 1.1 两轮机器人结构示意图

两轮机器人的重心一般位于轮系轴线之上,因而形成了内在固有的不稳定动力学特性。

1.1.2 两轮机器人的运动原理

与所有的平衡机器人一样,两轮机器人的核心问题是运动平衡控制的问题。

两轮机器人的姿态平衡问题类似于倒立摆(inverted pendulum)的平衡问题。因此,两轮机器人又被称为移动式倒立摆(mobile inverted pendulum)。所不同的是,两轮机器人可以在二维空间甚至三维空间中运动。两轮机器人不仅仅需要保持姿态的平衡,还需要在保持姿态平衡的同时行走于二维空间或三维空间。

两轮机器人是一种典型的非完整系统(nonholonomic system),一个欠驱动系统(underactuated system)。

两轮机器人有4个自由度:2个平面支撑运动自由度,2个姿态角运动自由度。然而,其中只有2个自由度,即左轮和右轮位置,是可驱动的。

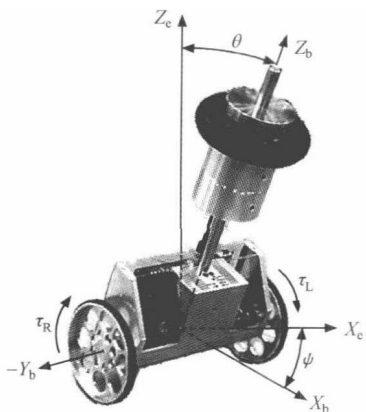


图 1.2 两轮机器人的坐标系

两轮机器人的机体系 $O(X_b, Y_b, Z_b)$ 和地体系 $O(X_e, Y_e, Z_e)$ 如图 1.2 所示。在机体系 $O(X_b, Y_b, Z_b)$ 中,本书规定 Z_b 过机器人重心并垂直于轮系轴线,由原点 O_b 指向重心; Y_b 为轮系轴线延长线,由原点 O_b 指向左轮圆心; X_b 垂直于 Y_b 和 Z_b ,由原点 O_b 指向机器人正前方。在地体系 $O(X_e, Y_e, Z_e)$ 中,本书规定 Z_e 指向重力加速度 g 的负方向, Y_e 指向正北方向, X_e 指向正东方向。

就运动平衡控制问题而言,两轮机器人通常有3个量需要控制,但只有2个可以施加的控制量,即

$$\text{三维被控量: } \mathbf{x}_0 = (\theta, \psi, v)^T \quad (1.1)$$

$$\text{二维控制量: } \mathbf{u}_0 = (\tau_L, \tau_R)^T \quad (1.2)$$

式中, θ 为姿态倾角; ψ 为航向角; $v = (v_L + v_R)/2$ 为行进速度, v_L 为左轮线速度, v_R 为右轮线速度; τ_L 为左轮驱动力矩; τ_R 为右轮驱动力矩。

两轮机器人的运动平衡控制问题涉及两个方面:一是“平衡”,即姿态平衡控制的问题;二是“运动”,即运动轨迹控制的问题。

尽管两轮机器人是不完整系统和欠驱动系统,然而,两轮机器人的姿态平衡

和运动轨迹仍然是可控制的或可操作的。

1) 姿态平衡控制的基本原理

如图 1.3(a) 所示, 两轮机器人的姿态可以通过调节左轮和(或)右轮的运动速度和运动方向来控制。当两轮机器人姿态倾斜时, 可通过左右电机产生控制力矩 τ_L 和 τ_R 来调节左轮和右轮的运动速度和运动方向, 控制左轮和右轮向倾斜方向和(或)倾斜速度方向运动, 使其姿态回复直立平衡状态。

2) 运动轨迹控制的基本原理

如图 1.3(b) 所示, 两轮机器人的运动轨迹控制问题, 是其行进速度和行进方向的控制问题。行进速度 $v = (v_L + v_R)/2$ 是左轮速度 v_L 和右轮速度 v_R 的平均值, 可以通过左右电机产生的控制力矩 τ_L 和 τ_R 来调节。行进方向 ψ 需要通过左轮和右轮的差动来调节, 即对左轮和右轮施加不同的作用力矩, 以产生不同的运动速度, 从而实现对两轮机器人航向的控制。

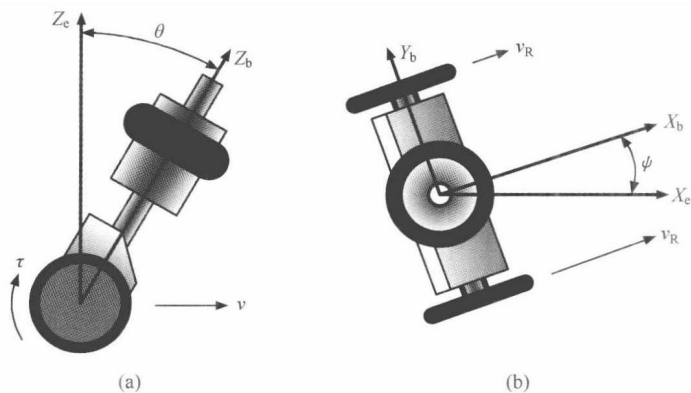


图 1.3 两轮机器人运动平衡控制原理图

1.2 两轮机器人的成长历史

两轮机器人的运动平衡控制问题, 是机器人学和机器人技术研究的重要问题, 同时也是控制科学研究的重要问题。

就运动平衡控制问题而言, 两轮机器人类似于倒立摆。实际上, 从某种意义上说, 倒立摆是两轮机器人的前身, 两轮机器人的基本思想和基本原理源于倒立摆。

1.2.1 从倒立摆到平衡机器人

在实验机器人学(experimental robotics)的意义下, 两轮机器人是一种新型