



装备科技译著出版基金



先进机器人科技译丛

# Snake Robots

Modelling, Mechatronics, and Control

# 蛇形机器人

## 建模、机电设计及控制

[挪威] 帕尔·李列巴克 (Pål Liljebäck)

克里斯汀·Y.皮特森 (Kristin Y. Pettersen)

欧文德·斯达伍德 (Øyvind Stavdahl)

詹·汤米·格拉伍德 (Jan Tommy Gravdahl) 著

谭天乐 袁德虎 郑建勇 项飞 周誌元 曾强 译

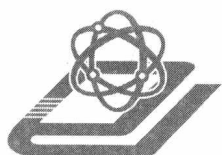


国防工业出版社

National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

先进机器人科技译丛

# 蛇形机器人

## 建模、机电设计及控制

### Snake Robots

### Modelling, Mechatronics, and Control

[挪威] 帕尔·李列巴克(Pål Liljebäck)  
克里斯汀 Y. 皮特森(Kristin Y. Pettersen)  
欧文德·斯达伍德(Øyvind Stavdahl)  
詹·汤米·格拉伍德(Jan Tommy Gravdahl) 著  
谭天乐 袁德虎 郑建勇 项飞 周誌元 曾强 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-145 号

图书在版编目(CIP)数据

蛇形机器人:建模、机电设计及控制/(挪)李列巴  
克等著;谭天乐等译. —北京:国防工业出版社,  
2015. 11

(先进机器人科技译丛)

书名原文:Snake Robots Modelling, Mechatronics,  
and Control

ISBN 978-7-118-10683-1

I. ①蛇… II. ①李… ②谭… III. ①仿生机器  
人—研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 280670 号

Translation from English language edition:  
*Snake Robots. Modelling, Mechatronics, and Control*

by Pål Liljebäck, Kristin Y. Pettersen,  
Øyvind Stavdahl and Jan Tommy Gravdahl

Copyright © 2013 Springer London

Springer London is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 18 字数 402 千字

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## PREFACE | 前言

本书的目的是提出关于蛇形机器人的理论和实际应用方面的主题。蛇形机器人是类似生物蛇移动的机器人。这类机器人的优点是它们具有在人类不想进入或无法进入的具有挑战性的环境中进行移动和操作的能力。将来这类机械的应用包含搜救工作、工业的检测和维护以及海底工作。关于蛇形机器人的研究已经进行了几十年。例如,世界上第一个蛇形机械臂是由日本于1972年开发出的。然而,在蛇形机器人的文献中,在蛇形机器人运动中的理论和实际应用方面,仍有许多问题没有解决。最近的文献中提出了许多关于蛇形机器人的建模、发展和控制策略的方法,但是至今还未能建立一个统一的蛇形机器人的理论基础。

在本书中,我们尝试找到这些关于蛇形机器人的论著中的局限。本书的主要目的是为蛇形机器人控制理论的数学基础做出贡献,并激励和支持未来对这些机械装置进行进一步的研究。为了这个目的,本书从机械建模技术、机械设计和实现、控制策略等方面对蛇形机器人进行全面的研究。特别是展示了蛇形机器人运动建模的一些新方法。另外,蛇形机器人的一些动态特性是使用非线性系统分析工具推导出来的,还提出了对蛇形机器人的一些新的控制策略。本书还介绍了两个蛇形机器人,并通过实验验证了许多理论结果。现有的文献主要集中在平面运动,而本书则主要聚焦于在不平坦且复杂的环境下的运动。本书的组织结构详见1.5节。

虽然本书中的结果是基于最近的会议以及杂志论文,较为新颖,但是都将它们较为浅显地展示出来,具有控制或者机械理论背景的本科生都能够理解。本书描述清晰,易于理解,大量数字和图表使得本书更为形象直观。本书的读者对象包括学院学者和对蛇形机器人或者一般的欠驱动系统感兴趣的大学生。本书也可用于自学,或者作为工程师和应用数学工作者,以及任何想从蛇形机器人领域找到更多发现的人的参考书籍。我们相信,本书对于从事蛇形机器人相关课题的新的研究者来说具有一定参考价值,因为本书对于蛇形机器人进行了广泛的概述,是研究这一领域合适的起点。

我们在很多人的帮助下完成了本书,在此要对 Scott David Kelly 教授(夏洛特的北卡罗莱纳州大学)、Shugen Ma 教授(Ritsumeikan 大学)以及 Ole Morten Aamo 教授(NTNU 控制工程系)表示衷心的感谢,感谢他们对本书中与 Pål

Liljeback 博士论文相关内容的共同参与和反馈。

感谢所有 NTNU 大学控制工程系的朋友和同事给予我们的支持。特别感谢 Idar Haugstuen 在 2009—2010 年期间关于蛇形机器人的 M. Sc. 项目中的合作。此外,感谢 Christian Holden、Alexey Pavlov 对于本书内容中相关研究工作的讨论以及许多有价值的建议,对他们在本书关于试验系统相关内容方面所给予的无私帮助以及贡献表示感谢。感谢机电工作室的 Terjr Haugen、Per Inge Snildal 以及 Glenn Angel。感谢 Stefano Bertelli 积极的鼓励和对于试验结果的整理。

我们对 SINTEF 应用自动化的朋友、同事给予我们的支持以及积极向上的工作环境表示感谢。特别感谢研究室主任 Sture Holmstrom,感谢他对蛇形机器人研究的热情关注和经费支持。我们对 Aksel A. Transeth、Sigurd Fjerdings 和 Erik KyrkjeØ在过去的几年中对于蛇形机器人的积极关注以及许多有趣的讨论表示感谢。这里要特别提到 Aksel A. Transeth 在本书中关于蛇形机器人的知识和经验的贡献。感谢 Geir Mathisen、Espen Helle 和 Knut Vidar Skjersli 在试验系统的电路板研制及软件开发方面的贡献。我们对 Anders Beitnes 表示敬意,感谢他构思了一个自推进的消防水龙,从而开创了在 SINTEF 和 NTNU 的蛇形机器人研究。同时感谢 Wheeko 和 Kulka 在试验过程中杰出的试验操作能力和任劳任怨的精神。最后,有了挪威科技大学和 SINTEF 提供的资源和条件才得以完成这本书的撰写,在此对挪威科学委员会给予我们在蛇形机器人研究上的支持表示最诚挚的敬意。

Pål Liljeback  
Kristin Y. Pettersen  
Øyvind Stavadahl  
Jan Tommy Gravdahl  
Trondheim, 挪威

## TRANSLATER PREFACE | 译者序

蛇形机器人是一种高冗余度移动机器人,在许多领域具有广泛的应用前景。在空间应用方面,蛇形机器人由于灵活、轻便、自由度多等特点,可以开展空间操控、维修与服务作业,也可以在地外天体崎岖不平的地形中移动以进行探测和采样。在军事方面,它可以是未来战场上的重要侦察、监视和攻击武器;在民用方面,适合对未知的有毒环境区域进行探索侦察,以及在地震、塌方或火灾后的废墟中搜寻灾难幸存者;在实验室中,还可以为人们研究数学、力学、控制理论和人工智能等提供实验平台。因此蛇形机器人具有重要的工程实用价值和战略研究意义。

蛇形机器人是一种多关节柔性活动机构,涉及数学、物理、机械、电气、材料、探测感知、自动化及控制多个学科。国内尚无在蛇形机器人方面结合工程应用的专业书籍。蛇形机器人的相关内容多是作为机器人书籍中的一部分,缺乏系统、深入的介绍,建模、仿真以及理论分析的深度不够。国外关于蛇形机器人的专著也较少,这与先进的蛇形机器人多在实验室阶段,还未有成熟的工业化产品和较大规模的推广应用有关。有这方面内容的书籍也多聚焦于理论分析和控制方法的探究,但缺少大量的实验验证内容,即便归结出很多理论结果,也因为存在诸多简化过程未能得到实验验证而难以令人信服。

本书内容涉及机械建模技术、机械设计及控制方法。在书中系统介绍了一些蛇形机器人新的运动建模方法,使用非线性系统分析工具推导出蛇形机器人的一些动态特性,也提出来一些蛇形机器人新的控制策略。本书描述了两个蛇形机器人 Wheeko 及 Kulko 的发展,并使用这两个蛇形机器人实验验证了许多理论。以前的蛇形机器人的文献主要集中在平面运动方面,本书的一个独特的特征是研究蛇形机器人在非平坦的和有障碍的环境下的运动。本书不仅在理论上立足最新的方法和成果,同时也详细介绍了蛇形机器人的机电设计以及样机研制,使用蛇形机器人对驱动及运动控制方法、路径规划与避障进行了实验验证,内容系统、全面,体现了蛇形机器人最新的研究成果。原著结构组织清晰,包含了科学和工程两方面。本书的结构和内容可以用几种不同方式来解读。例如,本书中介绍的数学模型可以解释蛇每一秒的运动,描绘了这一领域中重要的基本科学原理。另一方面,本书可以作为迄今为止对蛇形机器人工程和技术研究以及回顾的参考资料。除了第1章中作者对蛇形机器人研究现状做了历史回顾,之后的每一章都有一节,回顾与作

者提出的研究内容相关的文献。原著还有一个吸引人的特点就是,在蛇形机器人的理解、控制和技术方面,作者采用循序渐进的方式来介绍每一章的内容,研究的内容越来越复杂。如此细心的结构安排使得专家和该领域新的研究人员能够快速审视所介绍内容的重要性以及它与过去研究的相关性。最后,原著还展现了作者自己在该领域的研究成果。该研究覆盖了全部的范围,包括数学模型、控制设计、仿真研究以及非常吸引人的实验演示。原著的最后,针对蛇形机器人运动方面,提出了未来的研究展望以及技术挑战。

本书密切结合武器装备现代化需要,对蛇形机器人研究中的关键技术,特别是控制系统技术进行了详细论述,学术思想新颖,理论研究超前,具有重要发展前景和重大开拓使用价值。原著的引进可帮助国内相关领域研究人员及时了解国外蛇形机器人技术的发展情况,通过学习国外关键技术,对缩短研制周期、节省研制经费有较大的促进作用。本书围绕蛇形机器人给出了大量的研究评述,内容丰富、全面、系统,集机器人当前研究方法为一体,形成了一本具有说服力的科技参考书。原著者研究团队来自于挪威最顶尖的工程学与工业技术的研究中心,代表了当前世界上蛇形机器人研究的最先进水平。本书内容水准已涵盖到大学毕业生专业水平及研究生专业水平,可面向广大读者对象,适合于机器人领域专业人士及工程技术人员阅读,可指导解决从事机器人研究中遇到的实际问题。

本书根据施普林格(Springer)出版的Snake Robots Modelling, Mechatronics, and Control一书翻译而成。翻译工作历时一年,其中绝大部分内容是按照原文翻译的,有个别之处是在原文的基础上根据译者的知识和理解来确定的。本书包含了较多的应用案例,还有不少评论性描述,这无疑增加了翻译的难度。译者在充分研究作者思想的基础上进行梳理,尽量使本书内容忠实于原著,但不排除个别内容的理解与翻译可能不完全与原作者一致。

本书的翻译具体分工如下:第1、2、8章由周誌元翻译;第3、4章由袁德虎翻译;第5、6、7章由项飞翻译;第9、10、11、12章由郑建勇翻译;第13、14章由谭天乐翻译,附录由曾强翻译。本书得到了国家自然科学基金项目“基于天基双目视觉的非合作旋转目标状态估计与逼近引导”(项目批准号:61374162)的资助与总装备部装备科技译著出版基金的资助,在此表示感谢;同时也衷心感谢上海航天控制技术研究所、上海市空间智能控制技术重点实验室和国防工业出版社的大力支持与帮助!

由于时间仓促和水平有限,翻译难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2015年6月

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 研究背景和研究意义 .....               | 1  |
| 1.2 生物蛇 .....                     | 4  |
| 1.2.1 蛇的解剖结构 .....                | 4  |
| 1.2.2 蛇的运动 .....                  | 6  |
| 1.3 蛇形机器人的建模、机电设计和控制技术的研究现状 ..... | 8  |
| 1.3.1 蛇形机器人的建模与分析的研究现状 .....      | 8  |
| 1.3.2 物理蛇形机器人的实现方法的研究现状 .....     | 13 |
| 1.3.3 蛇形机器人控制的研究现状 .....          | 17 |
| 1.4 本书的研究范围 .....                 | 22 |
| 1.4.1 分析方法 .....                  | 22 |
| 1.4.2 无固定基面的蛇形机器人 .....           | 22 |
| 1.4.3 二维视角 .....                  | 22 |
| 1.4.4 无侧滑约束的运动 .....              | 23 |
| 1.4.5 基于蜿蜒爬行的运动 .....             | 23 |
| 1.5 本书大纲 .....                    | 23 |
| 1.5.1 第一篇大纲——蛇形机器人平面运动 .....      | 24 |
| 1.5.2 第二篇大纲——复杂环境中的蛇形机器人移动 .....  | 26 |
| 1.6 与本书相关的出版物 .....               | 27 |

## 第一篇 蛇形机器人平面运动

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第2章 蛇形机器人平面运动的一个复杂模型 ..... | 30 |
| 2.1 本章与现有文献之间的联系 .....     | 30 |
| 2.2 基本符号 .....             | 31 |
| 2.3 蛇形机器人的参数 .....         | 32 |

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 2.4   | 蛇形机器人运动学          | 33 |
| 2.5   | 地面摩擦力模型           | 35 |
| 2.5.1 | 地面摩擦力模型以及作用       | 35 |
| 2.5.2 | 库仑摩擦力模型           | 36 |
| 2.5.3 | 黏滞摩擦力模型           | 37 |
| 2.6   | 蛇形机器人动力学          | 38 |
| 2.7   | 被驱动和非驱动动力学的分离     | 40 |
| 2.8   | 模型的局部反馈线性化        | 42 |
| 2.9   | 本章小结              | 44 |
| 第3章   | 机械式平面移动蛇形机器人研制    | 45 |
| 3.1   | 本章与现有文献之间的联系      | 45 |
| 3.2   | 关节驱动机构            | 46 |
| 3.3   | 从动轮               | 48 |
| 3.4   | 电源及控制系统           | 49 |
| 3.5   | 实验装置              | 49 |
| 3.6   | 本章小结              | 50 |
| 第4章   | 蛇形机器人运动的分析与合成     | 51 |
| 4.1   | 本章与现有文献之间的联系      | 51 |
| 4.2   | 非线性可控性分析介绍        | 52 |
| 4.3   | 平面蛇形机器人的稳定性特征     | 55 |
| 4.4   | 平面机器人可控性分析        | 56 |
| 4.4.1 | 各向同性黏性摩擦可控性       | 56 |
| 4.4.2 | 各向异性黏性摩擦可控性       | 56 |
| 4.5   | 蛇体移动过程的推力分析       | 60 |
| 4.6   | 蛇形机器人的推进运动合成      | 63 |
| 4.7   | 蜿蜒爬行步态模式          | 66 |
| 4.8   | 关节控制系统            | 67 |
| 4.8.1 | 简单关节控制器           | 68 |
| 4.8.2 | 指数稳定关节控制器         | 68 |
| 4.9   | 蜿蜒爬行过程中的转弯运动分析    | 68 |
| 4.10  | 蜿蜒爬行中连续连杆间的相对运动分析 | 71 |
| 4.11  | 本章小结              | 72 |

第 5 章 基于庞加莱映射的蛇形机器人路径跟踪控制与分析 ..... 73

5.1 本章与现有文献之间的联系 ..... 74

5.2 庞加莱映射介绍 ..... 75

5.2.1 庞加莱映射的概述 ..... 75

5.2.2 庞加莱映射的实际应用 ..... 76

5.3 蛇形机器人的直线路径跟踪控制 ..... 78

5.3.1 控制目标 ..... 78

5.3.2 直线路径跟踪控制器 ..... 78

5.4 基于庞加莱映射的路径跟踪控制的稳定性分析 ..... 80

5.4.1 把蛇形机器人模型转化为一个时间周期的自治系统 ..... 80

5.4.2 蛇形机器人庞加莱截面技术参数 ..... 81

5.4.3 庞加莱映射的稳定性分析 ..... 81

5.5 仿真研究:路径跟踪控制器的性能表现 ..... 83

5.6 本章小结 ..... 84

第 6 章 蛇形机器人在平面运动的一个简化模型 ..... 85

6.1 本章与现有文献之间的联系 ..... 85

6.2 建模方法概述 ..... 86

6.3 蛇形机器人运动学 ..... 88

6.4 地面摩擦力模型 ..... 90

6.5 蛇形机器人的动力学 ..... 93

6.5.1 蛇形机器人的平移动力学 ..... 93

6.5.2 蛇形机器人的旋转动力学 ..... 94

6.6 完整的蛇形机器人的简化模型 ..... 95

6.7 简化模型的讨论 ..... 97

6.7.1 简化模型的应用 ..... 97

6.7.2 简化的运动学的精确性 ..... 97

6.7.3 地面摩擦模型的精确性问题 ..... 97

6.7.4 旋转动力学的精确性问题 ..... 98

6.8 简化模型的稳定性分析 ..... 98

6.9 简化模型的可控性分析 ..... 99

6.10 仿真研究:简化模型与复杂模型比较 ..... 102

6.10.1 仿真参数 ..... 102

6.10.2 在复杂模型和简化模型中关节坐标的关系 ..... 102

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 6.10.3     | 直线运动的比较 .....                  | 103        |
| 6.10.4     | 转弯运动的比较 .....                  | 104        |
| 6.11       | 本章小结 .....                     | 107        |
| <b>第7章</b> | <b>基于平均理论对蛇形机器人运动的分析 .....</b> | <b>108</b> |
| 7.1        | 本章与现有文献之间的联系 .....             | 108        |
| 7.2        | 平均理论的介绍 .....                  | 109        |
| 7.3        | 蜿蜒爬行过程中的速度动力学 .....            | 110        |
| 7.4        | 蜿蜒爬行中的平均速度动力学 .....            | 112        |
| 7.5        | 在蜿蜒爬行中速度动力学的稳定状态行为 .....       | 113        |
| 7.6        | 在蜿蜒爬行中步态参数和前向速度的关系 .....       | 114        |
| 7.7        | 仿真研究:初始速度和平均速度动力学的比较 .....     | 115        |
| 7.7.1      | 仿真参数 .....                     | 115        |
| 7.7.2      | 仿真结果 .....                     | 116        |
| 7.8        | 仿真研究:步态参数和前向速度之间关系的研究 .....    | 117        |
| 7.8.1      | 仿真参数 .....                     | 118        |
| 7.8.2      | 仿真结果 .....                     | 119        |
| 7.9        | 实验研究:步态参数和前向速度之间关系的研究 .....    | 122        |
| 7.9.1      | 实验设置 .....                     | 122        |
| 7.9.2      | 实验结果 .....                     | 124        |
| 7.10       | 本章小结 .....                     | 126        |
| <b>第8章</b> | <b>级联蛇形机器人路径跟踪控制 .....</b>     | <b>127</b> |
| 8.1        | 本章和现有文献之间的联系 .....             | 128        |
| 8.2        | 数学基础 .....                     | 128        |
| 8.3        | 蛇形机器人的直线路径跟踪控制 .....           | 130        |
| 8.3.1      | 控制目标 .....                     | 130        |
| 8.3.2      | 假设 .....                       | 131        |
| 8.3.3      | 模型转化 .....                     | 131        |
| 8.3.4      | 直线路径跟踪控制器 .....                | 133        |
| 8.3.5      | 路径跟踪控制器的稳定性特性 .....            | 135        |
| 8.3.6      | 定理 8.2 的证明 .....               | 136        |
| 8.4        | 蛇形机器人的曲线路径跟踪控制 .....           | 140        |
| 8.4.1      | 对于曲线路径跟踪控制器的评价 .....           | 140        |
| 8.4.2      | 曲线路径跟踪控制器 .....                | 140        |

8.5 蛇形机器人的路径点导航控制 ..... 141

8.5.1 方法的描述 ..... 141

8.5.2 路径点导引策略 ..... 142

8.6 仿真研究:直线路径跟踪控制器的性能 ..... 143

8.6.1 仿真参数 ..... 143

8.6.2 仿真结果 ..... 144

8.7 实验研究:直线路径跟踪控制器的性能 ..... 145

8.7.1 实现问题 ..... 145

8.7.2 物理蛇形机器人路径跟踪控制器的仿真 ..... 146

8.7.3 实验结果 ..... 147

8.8 仿真研究:路径点导航策略的性能 ..... 154

8.8.1 简化模型导航策略的仿真 ..... 154

8.8.2 复杂模型导航策略的仿真 ..... 154

8.8.3 仿真结果 ..... 155

8.9 本章小结 ..... 156

第二篇 蛇形机器人在复杂环境中的运动

第9章 引言 ..... 158

第10章 蛇形机器人在复杂环境中运动的混合模型 ..... 161

10.1 本章和现有文献之间的联系 ..... 162

10.2 混合动力学系统和互补系统 ..... 163

10.2.1 混合动力学系统建模 ..... 163

10.2.2 互补系统 ..... 164

10.3 无障碍条件下蛇形机器人的动力学系统 ..... 165

10.3.1 地面摩擦力模型 ..... 165

10.3.2 无障碍运动公式 ..... 166

10.4 接触力建模方法概述 ..... 167

10.5 与障碍物碰撞和分离的检测 ..... 170

10.6 受约束运动中蛇形机器人的连续动力学 ..... 171

10.6.1 障碍物的单边约束 ..... 171

10.6.2 无障碍物摩擦力条件下的蛇形机器人受约束动力学 ..... 173

10.6.3 有障碍物摩擦力条件下的蛇形机器人受约束动力学 ..... 174

10.7 蛇形机器人在与障碍物碰撞和分离过程中的不连续动态特性 ..... 176

|               |                                    |            |
|---------------|------------------------------------|------------|
| 10.7.1        | 蛇形机器人与障碍物碰撞过程中的不连续动态特性 .....       | 176        |
| 10.7.2        | 蛇形机器人与障碍物分离时的不连续动态特性 .....         | 177        |
| 10.8          | 有障碍物环境下的蛇形机器人完整混合模型 .....          | 178        |
| 10.8.1        | 离散集 .....                          | 178        |
| 10.8.2        | 离散集映射 .....                        | 179        |
| 10.8.3        | 连续集 .....                          | 179        |
| 10.8.4        | 连续集映射 .....                        | 179        |
| 10.8.5        | 小结 .....                           | 180        |
| 10.9          | 仿真研究:用实验与仿真结果与现有文献中的混合模型进行比较 ..... | 180        |
| 10.10         | 本章小结 .....                         | 182        |
| <b>第 11 章</b> | <b>障碍辅助运动的蛇形机器人开发 .....</b>        | <b>183</b> |
| 11.1          | 本章与现有文献之间的联系 .....                 | 183        |
| 11.2          | 蛇形机器人设计综述 .....                    | 184        |
| 11.3          | 外滑移面 .....                         | 185        |
| 11.4          | 接触力测量系统 .....                      | 186        |
| 11.4.1        | 传感器系统的基本假设 .....                   | 186        |
| 11.4.2        | 传感系统装置 .....                       | 186        |
| 11.4.3        | 接触力的计算 .....                       | 188        |
| 11.5          | 电源和控制系统 .....                      | 189        |
| 11.5.1        | 电源系统 .....                         | 189        |
| 11.5.2        | 控制系统 .....                         | 191        |
| 11.6          | 蛇形机器人的性能 .....                     | 192        |
| 11.6.1        | 接触力测量系统的实验验证 .....                 | 192        |
| 11.6.2        | 蛇形机器人运动模式演示 .....                  | 194        |
| 11.7          | 实验设置 .....                         | 195        |
| 11.8          | 测量接触力的另一种方法 .....                  | 195        |
| 11.9          | 本章小结 .....                         | 197        |
| <b>第 12 章</b> | <b>障碍辅助运动的混合控制 .....</b>           | <b>198</b> |
| 12.1          | 本章与现有文献之间的联系 .....                 | 199        |
| 12.2          | 混合控制器的初步说明 .....                   | 200        |
| 12.3          | 控制目标 .....                         | 200        |
| 12.4          | 符号及基本假设 .....                      | 201        |
| 12.5          | 障碍辅助运动的混合控制 .....                  | 202        |

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 12.5.1 | 主从控制方案 .....                   | 202 |
| 12.5.2 | 阻塞检测方案 .....                   | 204 |
| 12.5.3 | 阻塞解决方案 .....                   | 204 |
| 12.5.4 | 关节角度控制器 .....                  | 205 |
| 12.5.5 | 完整的混合控制器 .....                 | 206 |
| 12.6   | 闭环系统概述 .....                   | 208 |
| 12.7   | 仿真研究:混合控制器的性能 .....            | 209 |
| 12.7.1 | 仿真参数 .....                     | 209 |
| 12.7.2 | 在结构化的有障碍物环境下侧摆和起伏运动的开环控制 ..... | 210 |
| 12.7.3 | 在有障碍物环境中的混合控制器 .....           | 210 |
| 12.8   | 实验研究:混合控制器的性能 .....            | 213 |
| 12.8.1 | 实验设置 .....                     | 213 |
| 12.8.2 | 实验结果 .....                     | 213 |
| 12.9   | 本章小结 .....                     | 220 |
| 第 13 章 | 复杂环境中蛇形机器人的路径跟踪控制 .....        | 221 |
| 13.1   | 本章与现有文献之间的联系 .....             | 222 |
| 13.2   | 蛇形机器人运动控制的架构 .....             | 222 |
| 13.3   | 复杂环境中的直线路径跟踪运动控制 .....         | 223 |
| 13.3.1 | 控制目标 .....                     | 224 |
| 13.3.2 | 符号与基本假设 .....                  | 224 |
| 13.3.3 | 体波分量 .....                     | 225 |
| 13.3.4 | 环境自适应分量 .....                  | 226 |
| 13.3.5 | 方向控制分量 .....                   | 228 |
| 13.3.6 | 关节角控制器 .....                   | 228 |
| 13.3.7 | 对路径跟踪控制器的总结 .....              | 229 |
| 13.4   | 复杂环境下的路径点导航控制 .....            | 229 |
| 13.5   | 仿真研究:路径跟踪控制器的性能 .....          | 230 |
| 13.5.1 | 仿真参数 .....                     | 230 |
| 13.5.2 | 仿真结果 .....                     | 231 |
| 13.6   | 实验研究:环境自适应策略的性能表现 .....        | 233 |
| 13.6.1 | 实验设置 .....                     | 233 |
| 13.6.2 | 实验结果 .....                     | 234 |
| 13.7   | 本章小结 .....                     | 239 |

第 14 章 蛇形机器人运动在未来所面临的研究难点 ..... 240

14.1 控制设计难点 ..... 240

14.2 硬件设计难点 ..... 242

附录 A 引理 8.2 的证明 ..... 245

附录 B 引理 8.3 的证明 ..... 247

附录 C 低通滤波参考模型 ..... 248

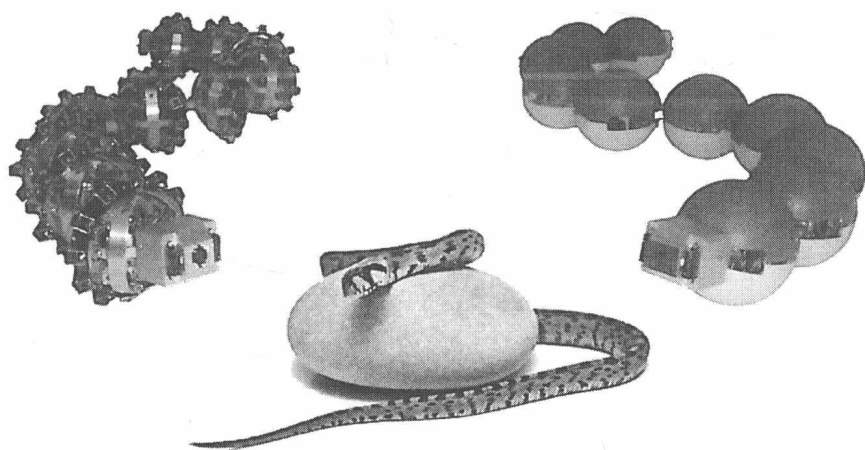
C.1 一个 2 阶低通滤波参考模型 ..... 248

C.2 一个 3 阶低通滤波参考模型 ..... 249

术语 ..... 250

参考文献 ..... 252

索引 ..... 262



---

## 1.1 研究背景和研究意义

蛇形机器人的机械构造设计就是使之像生物蛇一样运动。生物蛇的运动具有鲁棒性和稳定性,因此在面对未知和富有挑战的环境时,蛇形机器人有潜力满足对于运动越来越多的要求。这些典型的机构由很多个连接起来的关节模块构成,可以在一个面或者多个面内弯曲。蛇形机器人的多自由度使得它们很难被控制,但是多自由度提供了它们在复杂且有不规则障碍物的环境中运动的可能性,这种运动能力远远超过了常规的轮式、轨道以及有腿的机器人。

在对蛇形机器人的总体概况进行研究之前,首先介绍一下作者是如何开始参与这项研究活动并对其产生兴趣的。挪威科技大学的蛇形机器人研究项目是从

SINTEF<sup>①</sup> 项目中产生的。这个项目是从 2003 年挪威特隆赫姆地区几个主要城市发生了火灾之后开始的,有人倡议消防部门要与特隆赫姆的研究机构联合来激励大家为火灾安全做更多的努力。这个倡议中提出了一个特别的想法,即一种可以自我推动的消防水龙,它就像一个机器人一样可以帮助消防员灭火。这个想法非常聪明,将管子中的高压水作为驱动机构中的液压介质来用于灭火,并且可以在有极端温度的环境中作为灭火介质与机器人的冷却介质。最后结果是,这个系统将是一个机器人式的消防水龙,它可以在极端环境中像蛇一样敏捷地移动,或者说,它可以称为液压蛇形机器人。SINTEF 的应用控制部门开始对这个设想进行更深入的研究,至此,SINTEF 和 NTNU 开始研究蛇形机器人。

SINTEF 和 NTNU 的研究人员很快就发现研发这样一种机构是一个多学科的任务,需要面临各方面的挑战,比如耐热材料、液压关节驱动的控制设计以及人机交互技术。为了说明这个概念的可行性,他们决定研发一个简单的液压蛇形机器人形式的技术演示品。这个机器人,被命名为 Anna Konda,如图 1.1 所示。它的更多细节可以参考 Liljebäck(2006)和 Transeth(2010)的文章。Anna Konda 可以在一个相对平整的表面上运动,并且通过它头部的喷嘴喷水。但是,这个机器人离实现在严苛的环境中工作这个水平还很远。

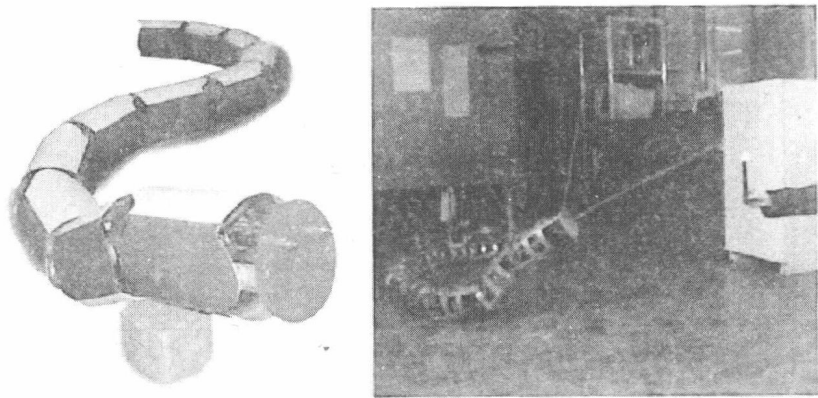


图 1.1 液压蛇形机器人 Anna Konda

对于 Anna Konda 的研究工作帮助我们确定了几个主要的研究难点。最关键、最主要的研究难点就是该系统中驱动机器人作蛇形运动的执行机构设计。在研发了 Anna Konda 之后,SINTEF 和 NTNU 把目标转向研发通用的蛇形机器人,而不是针对特殊应用领域的机器人。尽管灭火是这项研究最初的动力,但是当前研究的范围已不再局限于此,因为许多应用领域都可能需要利用具有鲁棒性的可移动蛇形机器人。未来蛇形机器人的一个非常有意义并且很重要的应用就是在地震区域

① SINTEF 是位于挪威科技大学附近,与挪威科技大学有着联合研究合作的一个组织机构。