

**Quadrupedal Locomotion**

**An Introduction to the Control  
of Four-legged Robots**

# 四足运动

——四足机器人控制技术

[西] Pablo González de Santos

[西] Elena García

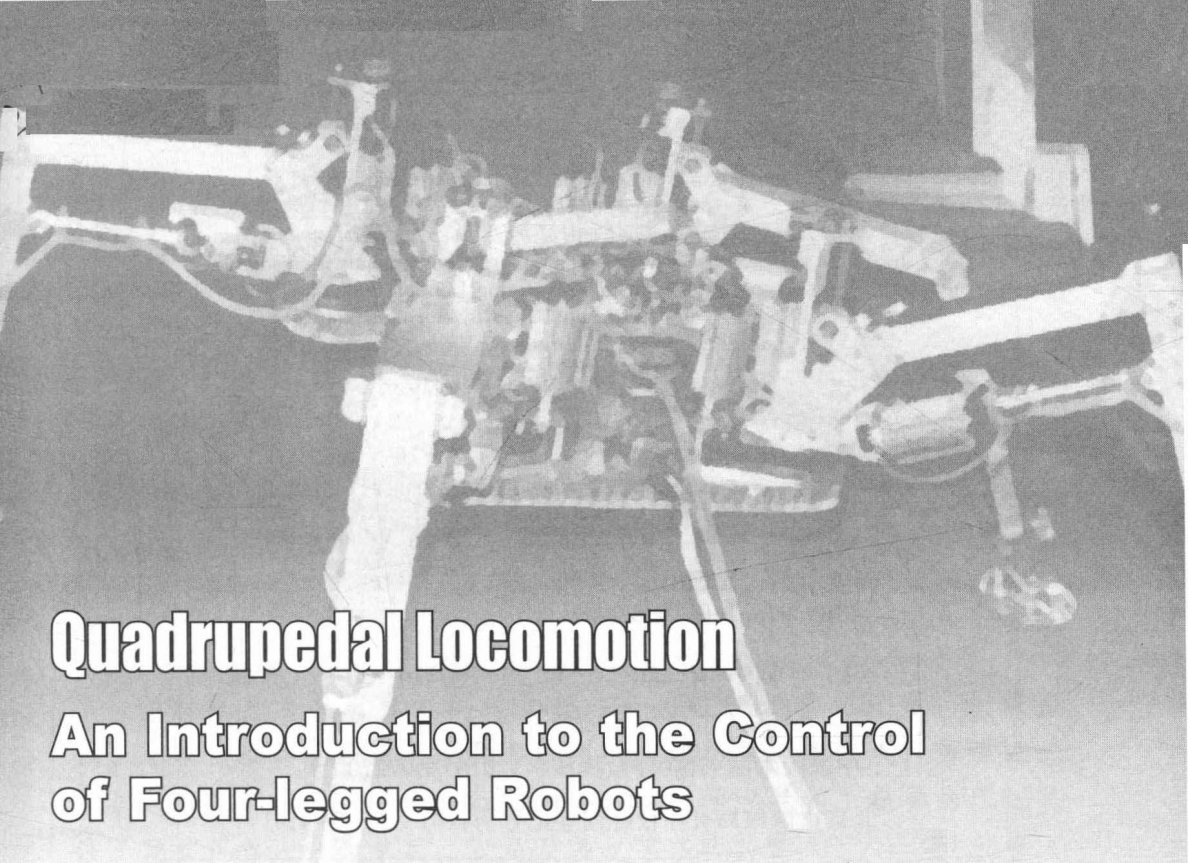
著

[西] Joaquin Estremera

王宇 徐震宇 译



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



# Quadrupedal Locomotion

An Introduction to the Control  
of Four-legged Robots

# 四足运动



## ——四足机器人控制技术

[西] Pablo González de Santos

[西] Elena Garcia

著

[西] Joaquin Estremera

王宇 徐震宇 译



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

Translation from the English language edition:  
*Quadrupedal Locomotion*  
*An Introduction to the Control of Four-legged Robots*  
 by Pablo González de Santos, Elena Garcia and Joaquin Estremera  
 Copyright © Springer - Verlag London 2006  
 This Springer imprint is published by Springer Nature  
 The registered company is Springer - Verlag London Ltd.  
 All Rights Reserved

图书在版编目 (C I P) 数据

四足运动：四足机器人控制技术 / (西) 巴勃罗·刚萨雷斯·德桑托斯, (西) 艾琳娜·加西亚, (西) 华金·埃斯特雷梅拉著; 王宇, 徐震宇译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5170-6388-9

I. ①四… II. ①巴… ②艾… ③华… ④王… ⑤徐… III. ①机器人控制 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第072705号

北京市版权局著作权合同登记号为: 01-2017-9161

|       |  |
|-------|--|
| 书 名   | 四足运动——四足机器人控制技术  |
| 原 书 名 | SIZU YUNDONG——SIZU JIQIREN KONGZHI JISHU<br>Quadrupedal Locomotion   |
| 作 者   | [西] Pablo González de Santos<br>[西] Elena Garcia 著<br>[西] Joaquin Estremera                                |
| 译 者   | 王 宇 徐震宇 译  |
| 出版发行  | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn          |
| 经 售   | 电话: (010) 68367658 (营销中心)<br>北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 排 版   | 中国水利水电出版社微机排版中心  |
| 印 刷   | 北京市密云印刷有限公司  |
| 规 格   | 170mm×240mm 16开本 14.5印张 284千字  |
| 版 次   | 2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷  |
| 定 价   | 68.00元   |

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



## 译者的话

步行机器人具有良好的地形适应性，在诸如救灾救援、星球探测、军事侦察等复杂情况下具有广阔的应用前景，能够执行传统轮式机器人和履带机器人不能执行的任务，受到学术界和工程界的广泛关注。足式机器人分为单足、双足及多足等多种形式，其中四足机器人兼具静态稳定步态和动态稳定步态，除具备良好地形适应能力外，还可实现较高移动速度、较大的承载能力和较低的自重，近年来成为该领域研究热点。

本书阐述了作者十几年间在机器人方面所做的研究，并以SILO4四足步行机器人为例，分析探讨了四足机器人传统的稳定性判别算法，并引入了作者最新的研究成果，比较了各种算法之间的优劣；论述了四足机器人的规则步态及自由步态的步态生成算法，并通过仿真计算验证了算法的有效性；介绍了四足机器人腿部运动学、动力学分析、驱动系统计算及运动控制算法等关键问题。本书可为工程设计人员提供参考，同时对四足机器人的科普教育具有一定意义。

参与本书翻译的有王宇、徐震宇、尹宏俊、伏荣真、刘勇、周黎明、范春霞、聂军、李毅、屈信益、冯宇、王利涛、王德海、辛学亭、康艳艳、张印、张玉程等，全书由徐震宇统稿，王宇校订。由于译者水平有限，书中有不妥或者错误之处，欢迎读者朋友批评指正。

特别感谢刘勇、周黎明对翻译工作的大力支持和罗欣老师的指导。本书在翻译过程中得到华中科技大学、吉林大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学和中国水利水电出版社的支持，在此深表谢意。

译者

2018年3月



# 前言

步行机器人已经被证明是杰出的运动系统，能够执行常规车辆不能执行的任务。更令人兴奋的是，对于来自不同学科的探索人员，这是一个快速发展的研究领域。在过去 30 年里，足式运动技术已经在世界各地发展，出现了许多重要的新机器和新方法。但是，关于多足机器人的专著却屈指可数。本书的主要目标是探讨分析过去 10 年间作者所做的一些重要研究；次要目标是写一本只论述四足运动的书，也是第一本关于四足运动的专著。本书分为步行测量和算法以及控制技术两部分。第一部分专门介绍四足运动的理论方面。第 1 章介绍多足机器人的发展历史，重点介绍优缺点、主要特点、潜力和实际应用，并讨论一些基本概念以及四足和六足之间的权衡。最后说明四足运动最新的和传统的稳定性测量和步态生成算法。第二部分介绍一般设计和控制算法（运动学和动力学），旨在提高机器人的主要技术特征，如速度、接地检测和接口等。一般来说，这些技术用于足式机器人，本书将它们专门应用于四足步行机器人。本书是团体共同努力的成果。特别感谢工业自动化研究所（CSIC）的会员对 SILO4 步行机器人的加工和维护，以及许多有价值的贡献。还要感谢在自动化控制系的同事们，他们为实验工作提供了直接的帮助。非常感谢部门主管 M. Armada 博士的无条件支持。感谢 M. A. Jimenez 博士的贡献，她可能是本书的作者之一，但她决定跟随她的丈夫在荷兰进行另一个令人兴奋的探索。对 J. A. Galvez 博士的支持也非常感激，他完成了 SILO4

步行机器人的主要机械设计。最后，要感谢西班牙教育和科学部的财政支持，书中的大部分成果都由该机构资助（ROB1990 - 1044 - C02 - 01，TAP94 - 0783，TAP1999 - 1080 - C04 - 01，DPI2001 - 1595 和 DPI2004 - 05824）。作者还非常感谢欧洲社会基金对她的 CSIC - I3P 合同的资助。

*Pablo González de Santos*

*Elena García*

*Joaquín Estremera*

工业自动化研究所 (CSIC)

Arganda del Rey, Madrid

2005 年 5 月 15 日



# 目录

译者的话

前言

## 第一部分 步行测量和算法

|               |    |
|---------------|----|
| 第 1 章 步行机器人概述 | 3  |
| 1.1 简介        | 3  |
| 1.2 发展历史      | 4  |
| 1.2.1 步行机构    | 5  |
| 1.2.2 步态设计    | 11 |
| 1.2.3 稳定性测量   | 13 |
| 1.3 步态运动的优点   | 14 |
| 1.3.1 机动性     | 15 |
| 1.3.2 克服障碍    | 15 |
| 1.3.3 主动悬架    | 15 |
| 1.3.4 能量效率    | 15 |
| 1.3.5 自然地形    | 16 |
| 1.3.6 滑动和干扰   | 16 |
| 1.3.7 环境破坏    | 16 |
| 1.3.8 平均速度    | 16 |
| 1.4 步态运动的缺点   | 16 |
| 1.4.1 机械系统    | 16 |
| 1.4.2 电子系统    | 18 |



|              |                  |           |
|--------------|------------------|-----------|
| 1.4.3        | 控制算法             | 18        |
| 1.4.4        | 可达速度             | 18        |
| 1.4.5        | 成本               | 18        |
| 1.5          | 步行机器人的潜在用途和实际用途  | 19        |
| 1.5.1        | 军事应用             | 19        |
| 1.5.2        | 核电厂检测            | 20        |
| 1.5.3        | 陆地、水下和空间探测       | 20        |
| 1.5.4        | 林业和农业任务          | 21        |
| 1.5.5        | 建筑活动             | 21        |
| 1.5.6        | 民用工程             | 22        |
| 1.5.7        | 帮助残障人士           | 22        |
| 1.5.8        | 支撑 AI 技术         | 23        |
| 1.5.9        | 生物学研究            | 23        |
| 1.5.10       | 人道主义排雷           | 25        |
| 1.6          | 四足机器人与六足机器人      | 26        |
| <b>第 2 章</b> | <b>步行机器人的稳定性</b> | <b>28</b> |
| 2.1          | 简介               | 28        |
| 2.2          | 静态稳定性标准          | 29        |
| 2.3          | 动态稳定性标准          | 31        |
| 2.4          | 稳定裕度的比较研究        | 35        |
| 2.5          | 稳定性水平曲线          | 44        |
| 2.6          | 结论               | 47        |
| <b>第 3 章</b> | <b>周期步态的生成</b>   | <b>49</b> |
| 3.1          | 简介               | 49        |
| 3.2          | 步态生成             | 50        |
| 3.3          | 连续步态             | 52        |
| 3.4          | 不连续步态            | 54        |
| 3.4.1        | 两相不连续步态          | 55        |
| 3.4.2        | 四相不连续步态          | 59        |
| 3.5          | 两相不连续的蟹行步态       | 60        |
| 3.5.1        | 初始位置无变化的 TPDC 步态 | 60        |
| 3.5.2        | 初始位置变化的 TPDC 步态  | 62        |
| 3.5.3        | 不连续步态策略          | 64        |
| 3.6          | 不连续转弯步态          | 65        |

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 3.6.1      | 圆形步态             | 66         |
| 3.6.2      | 旋转步态             | 69         |
| 3.7        | 不连续步态的路径跟踪       | 71         |
| 3.7.1      | 蟹行步态的路径跟踪        | 71         |
| 3.7.2      | 转弯步态的路径跟踪        | 72         |
| 3.7.3      | 路径跟踪示例           | 73         |
| 3.8        | 结论               | 74         |
| <b>第4章</b> | <b>非周期步态的生成</b>  | <b>76</b>  |
| 4.1        | 简介               | 76         |
| 4.2        | 自由蟹行步态           | 78         |
| 4.2.1      | 步行机器人的模型和基本概念    | 78         |
| 4.2.2      | 地形模型和地形适应        | 80         |
| 4.2.3      | 腿部序列规划           | 81         |
| 4.2.4      | 立足点规划            | 84         |
| 4.2.5      | 机体运动规划           | 91         |
| 4.2.6      | 足抬升规划            | 92         |
| 4.3        | 自由转弯步态           | 93         |
| 4.3.1      | 腿部序列、机体运动和腿部抬起   | 94         |
| 4.3.2      | 立足点规划            | 94         |
| 4.4        | 自由旋转步态           | 96         |
| 4.4.1      | 腿部序列和腿部抬起        | 96         |
| 4.4.2      | 立足点规划和机体运动规划     | 97         |
| 4.5        | 实验结果             | 99         |
| 4.6        | 结论               | 102        |
| <b>第5章</b> | <b>新的稳定性方法</b>   | <b>103</b> |
| 5.1        | 简介               | 103        |
| 5.2        | 几何稳定性和所需转矩       | 104        |
| 5.3        | 考虑有限的电机转矩影响：模拟研究 | 108        |
| 5.4        | 电机转矩限制对实际机器人的影响  | 110        |
| 5.5        | 全局稳定标准           | 112        |
| 5.5.1      | 全局标准的定义          | 112        |
| 5.5.2      | 基于全局标准的步态        | 115        |
| 5.6        | 结论               | 117        |

## 第二部分 控制 技术

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第 6 章 运动学与动力学</b> .....      | 121 |
| 6.1 简介 .....                    | 121 |
| 6.2 步行机器人的运动学.....              | 122 |
| 6.2.1 正向运动学：“D-H 约定” .....      | 122 |
| 6.2.2 逆向运动学 .....               | 126 |
| 6.2.3 运动学求解的几何方法 .....          | 128 |
| 6.3 步行机器人的动力学.....              | 132 |
| 6.3.1 机械系统的动力学模型 .....          | 132 |
| 6.3.2 致动器和传动系统的动力学模型 .....      | 133 |
| 6.3.3 完整动力学模型 .....             | 134 |
| 6.4 动力学模型分析方法.....              | 136 |
| 6.5 SILO4 步行机器人的应用 .....        | 136 |
| 6.5.1 机械零件的动态模型 .....           | 136 |
| 6.5.2 执行机构的动力学模型 .....          | 139 |
| 6.5.3 模型分析 .....                | 142 |
| 6.6 结论 .....                    | 146 |
| <b>第 7 章 提高腿部速度的软计算技术</b> ..... | 148 |
| 7.1 简介 .....                    | 148 |
| 7.2 提高在线轨迹生成中的腿部速度 .....        | 148 |
| 7.3 加速度调整方法 .....               | 151 |
| 7.3.1 工作空间实验分区 .....            | 153 |
| 7.3.2 模糊集和规则 .....              | 156 |
| 7.3.3 模糊推理图 .....               | 157 |
| 7.4 实验结果 .....                  | 159 |
| 7.5 结论 .....                    | 162 |
| <b>第 8 章 步行机器人的虚拟传感器</b> .....  | 163 |
| 8.1 简介 .....                    | 163 |
| 8.2 方法概述 .....                  | 164 |
| 8.3 基于神经网络的虚拟传感器 .....          | 165 |
| 8.4 虚拟传感器设计 .....               | 166 |
| 8.5 在真实步行机器人中使用虚拟传感器 .....      | 167 |
| 8.5.1 神经网络 .....                | 168 |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 8.5.2      | 网络校准样本集            | 168        |
| 8.5.3      | 训练流程               | 169        |
| 8.5.4      | 网络性能测试             | 170        |
| 8.5.5      | 讨论                 | 176        |
| 8.6        | 结论                 | 178        |
| <b>第9章</b> | <b>人机界面</b>        | <b>180</b> |
| 9.1        | 简介                 | 180        |
| 9.2        | 人机界面和协同控制器         | 181        |
| 9.2.1      | 图形显示               | 183        |
| 9.2.2      | 图形控制环境             | 185        |
| 9.2.3      | 数字显示               | 186        |
| 9.2.4      | 传感环境               | 186        |
| 9.2.5      | 地形建模环境             | 187        |
| 9.2.6      | 控制仿真环境             | 187        |
| 9.2.7      | 步态环境               | 187        |
| 9.2.8      | 步行环境               | 188        |
| 9.2.9      | 致动器环境              | 189        |
| 9.2.10     | 命令行界面              | 190        |
| 9.2.11     | 协作环境               | 190        |
| 9.3        | 结论                 | 192        |
| <b>附录A</b> | <b>SILO4 步行机器人</b> | <b>193</b> |
| A.1        | 简介                 | 193        |
| A.2        | 机械结构               | 194        |
| A.2.1      | 机器人布局              | 194        |
| A.2.2      | 机身结构               | 194        |
| A.2.3      | 腿部配置               | 194        |
| A.2.4      | 足部设计               | 195        |
| A.2.5      | 运动学                | 197        |
| A.3        | 控制系统配置             | 198        |
| A.3.1      | 计算系统               | 198        |
| A.3.2      | 传感器和传感器系统          | 200        |
| A.3.3      | 控制算法               | 200        |
| A.4        | 模拟工具               | 202        |
| A.5        | 制造图纸               | 202        |

|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| A.6         | 结论 .....               | 202        |
| <b>附录 B</b> | <b>步行机器人仿真软件 .....</b> | <b>204</b> |
| B.1         | 简介 .....               | 204        |
| B.2         | 仿真参数 .....             | 205        |
| B.3         | 编程仿真 .....             | 205        |
| B.4         | 创建 SILO4 机器人 .....     | 206        |
| B.5         | 步态控制 .....             | 206        |
| B.6         | 地面图 .....              | 207        |
| B.7         | 地面接触模型 .....           | 207        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>           | <b>209</b> |



# 第一部分



# 步行测量和算法





# 第 1 章 步行机器人概述

## 1.1 简介

自然界由美妙的生物组成，人类对它们的行为感到好奇，甚至兴奋，并尝试了解、欣赏或模仿它们。模拟生物性能是一个有吸引力的想法，但非常难以完成。通常，人类制作简单的装置来模仿生物的视觉、嗅觉、肢体操作和行走等容易感知的特性。

本书致力于通过步行机器的发展模拟步行，即众所周知的机器人<sup>①</sup>；换句话说，是机械系统通过使用类似于腿的装置来移动自身。根据机器人腿的数量，可分为类似人类或鸟类的两足、类似哺乳动物和爬行动物的四足、类似昆虫的六足和类似蜘蛛的八足。机器人有一个足 [Raibert's hopper(1986)]、三个足 [OSU Triped (Berns, 2005)]、五个足 [Hitachi hybrid robot (Todd, 1985)]、八个足 [ReCUS (Ishino 等, 1983)] 或更多足 [Nonaped, (Zykov 等, 2004)] 是不常见的，但也并非不可能。本书特别关注四足步行静态稳定性，即具有四条腿的机器具有的一些特殊功能，以及使用特定的控制算法，将在后面重点论述。不过，不可避免地会提到其他的多足机器人（不包括单足和双足）和相关功能。

1870 年前后出现了第一个记录在案的步行机器，是俄罗斯数学家 P. L. Chebyshev 基于四杆机制发明的，试图模仿自然步行 (Artobolevsky, 1964)。后来开发出一些用于休闲娱乐的机器，1893 年前后，美国专利局注册了第一个腿式系统的专利。

几十年后，大约在 1940 年，研究人员开始考虑将步行机器人用于实际应用的可能性。按照惯例，军方应用排在第一位。英国和美国军方赞助了一些重要项目，研究作为战争机器的步行机器的应用。后来，基于步行机器人理论上的优点，很多任务被设想为步行机器人的前瞻性应用。

创造步行机构的挑战令人着迷，但在当时又非常复杂，研究人员并不总是成功。尽管如此，在此期间仍然设计和制作了一些实物。随着计算机技术的发展，

---

<sup>①</sup> 本章不讨论由操作员直接控制的步行机器是否是机器人的问题。无论如何，腿部运动的序列是自动执行的，因此，机器、车辆和机器人这些术语会交替使用。



研究人员开始利用强大而紧凑的电脑时，步行机器人的数量有所增加，而且更加成功。到20世纪70年代中期，第一台计算机控制的步行机器人（OSU）在俄亥俄州立大学进行了测试。之后，美国、日本的大学和研究中心在这一领域开展了大量的工作，其中包括被认为是奇迹的步行车辆的开发。在欧洲的研究延迟了几年。大约在1972年，意大利罗马大学（Mocci等，1972）第一个步行机器人被记录在案。但1977年莫斯科生理技术研究所开发的六足机器人在当时被报道为欧洲的第一个步行机器人（Gurfinkel等，1981）。

步行机器人与传统的移动系统相比具有许多理论上的优势，科学界开发了大量计算机控制的步行机器人，用以证明其理论上的优势（Berns，2005）。但是，这些机器人中的大多数仍然以简单的实验室原型机的形式存在。只有少数步行机器人具备了实用特性，如ASV（Song和Waldron，1989）、Dante（Bares和Wettergreen，1999）和Timberjack（Plustech-Oy，2005）等，尽管它们远没有达到当时轮式和履带机器人的性能。目前步行机器人技术发展滞后的原因主要是步行机器人比预期的更复杂，不仅在机械方面，而且也包括电子系统、感知和控制算法方面。

基于作者以前的经验，本书介绍了与四足机器人静态稳定控制算法设计相关的一些基本概念，如RIMHO（Jimenez等，1993）、ROWER（Gonzalez de Santos等，2000）和SILO4<sup>①</sup>（Gonzalez de Santos等，2003）。从工程角度来看，这些技术专门用于四足静态稳定控制。动态稳定的算法和仿生机器人超出了本书的范围。本章将介绍一般的步行机器人，包括步行机器人的发展历史等，步态运动相对于传动轮式运动的优点、前景，真实步行机器人的应用，四足机器人和六足机器人的比较研究以及迄今已建成的最常见的机器人类型。

## 1.2 发展历史

步态运动技术发展起始于类似玩具的简单步行机器，能够在平坦地形等有利条件下行走移动。后来，科学家通过观察和记录某些物种的步行模式尝试了解生物的运动。然后制定了步态并根据数学模型进行了研究，试图改善步行机器的特性。因此，基于理想情况，创建稳定性测量和步态生成算法，并进行改进，最终达到现有的技术水平。

为了解步行机器的发展历史，应当首先了解人类和动物在步行方法研究方面的成果。本节将重点关注机构和算法相关的成果，而不提及关于运动摄影报告（Muybridge，1957）以及动物学和生物学的比较研究（Wilson，1966；Alexan-

① RIMHO、ROWER和SILO4由西班牙国家研究委员会工业自动化研究所开发。