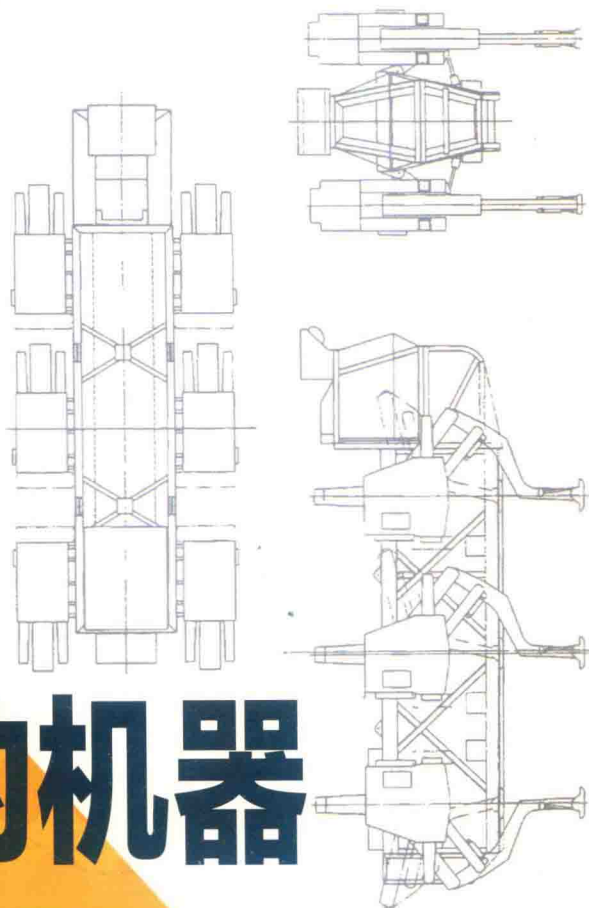


MACHINES THAT WALK:
The Adaptive Suspension Vehicle



行走的机器

——六足机器人

Shin-Min Song

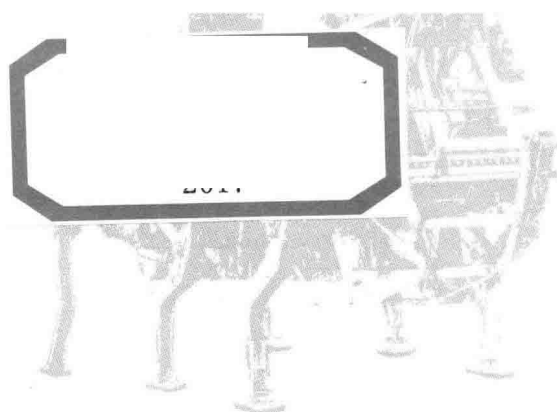
著

[美] Kenneth J. Waldron

刘勇 周黎明 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



MACHINES THAT WALK:
The Adaptive Suspension Vehicle

行走的机器 ——六足机器人

Shin-Min Song

[美] Kenneth J. Waldron

著

刘勇 周黎明 译



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统地介绍了步行机械的基本理论和一些设计方法, 主要内容包括步行机器调研、步态分析和水平行走步态、不规则地形步态、协调、基于四连杆机构综合的腿部设计、比例缩放腿的设计、运动受控的踝关节设计、自适应悬架车辆等内容。

本书适合从事相关专业的技术人员, 以及高校师生参考阅读。

This edition of *MACHINES THAT WALK: The Adaptive Suspension Vehicle* by Shin-Min Song, Kenneth J. Waldron is published by arrangement with MIT Press of One Rogers Street, Cambridge, Massachusetts 02142, U. S. A.

图书在版编目 (C I P) 数据

行走的机器: 六足机器人 / 宋新明, (美) 沃尔德伦 (Kenneth J. Waldron) 著; 刘勇, 周黎明译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 5
书名原文: *Machines That Walk*
ISBN 978-7-5170-5461-0

I. ①行… II. ①宋… ②沃… ③刘… ④周… III. ①机器人—研究 IV. ①TP242

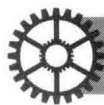
中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第131162号

北京市版权局著作权合同登记号为: 01-2016-8948

书 名	行走的机器——六足机器人
原 书 名	XINGZOU DE JIQI——LIUZU JIQIREN
作 者	MACHINES THAT WALK: The Adaptive Suspension Vehicle Shin - Min Song (宋新明)
译 者	[美] Kenneth J. Waldron (沃尔德伦)
出版发行	刘勇 周黎明 译 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13.25印张 260千字
版 次	2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	45.00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

步行机械是有别于传统的轮式和履带式车辆的一种新型移动式机械装备，由于其良好的地形适应性和在军事领域特殊应用的巨大潜力，近年来得到学者和工业界的广泛关注。随着仿生学、计算机科学、传感技术、材料科学和人工智能技术等领域的进展，步行机械由最初的简单机械装备融合逐步发展为高效率的、机电液系统高度融合、可自主移动的智能装备。鉴于步行机械的复杂性，本书主要目的是为设计者系统地介绍步行机械的基本理论和一些设计方法。

本书英文版由美国麻省理工出版社出版，以 ASV 车辆作为样本为读者展示了步行机械设计的设计流程和计算方法，是一本理论和工程实践兼顾的好书。

本书主要介绍了步行机械的发展历程及其潜在价值、步行机械的步态理论、不规则地形的步态选择、步行机械的足力控制理论、腿部机构的形式和设计方法、足部设计方法、腿部驱动装置形式以及整机控制和信息系统设计等内容，具有很高的实用价值。

参与本书翻译的有：刘勇主要负责前言、第一章的翻译工作；王宇主要负责第五章的翻译工作；周黎明主要负责第二章、第九章的翻译工作；徐霞宇主要负责第三章的翻译工作；尹宏俊主要负责第四章的翻译工作；王德海主要负责第六章的翻译工作；伏荣真主要负责第七章的翻译工作；李国灏主要负责第八章的翻译工作。全书由刘勇、周黎明校订。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。

本书翻译过程中得到哈尔滨工业大学、吉林大学、华中科技大学、大连理工大学和中国水利水电出版社的大力支持，在此深表谢意！

译者

2017 年 1 月



序

人工智能是研究如何智能地进行计算的理论和方法。不过目前来看，对智能进行准确定义似乎是不可能的，因为智能是一种融合了太多的信息处理和信息表达的能力。

心理学、哲学、语言学及其相关学科研究为研究智能提供了各种观点和方法，然而这些领域提出的理论通常不太完整、太模糊，并不能达到可计算的条件。尽管从已有研究中搜集到有价值的思路、关系以及约束等切实证明智能实际上是可能的，但我们还是需要更多。

人工智能提供了新视角和新方法，其核心目标是使计算机智能。更为深刻的是，人工智能旨在通过使用计算的思想和方法理解智能，从而提供了一个全新的理论架构。大多数从事人工智能的人员相信这些理论可以应用于任何智能信息处理，不论是对生物还是非生命体。

值得关注的是，即使是创建一个仅有少量智能的程序都是十分庞大而复杂的，因此人工智能不断面临或遭遇计算机科学的瓶颈。其所面临问题的难度和趣味激励着人们带着极大的热情去研究人工智能，因而很自然地，源源不断的创意从人工智能渗透到计算机科学，丝毫没有减弱的迹象。

麻省理工学院出版社人工智能系列丛书的目的是及时地提供世界各地前沿研究中心所产生的详细信息给众多领域的人们，包括专业人士和学生。

Patrick Henry Winston
J. Michael Brady



前言

本书的首要研究目标是具有全地形适应性、静态稳定的步行机器人的几何设计和操作等主要问题。静态稳定是指机器在工作时一直保持静态平衡。全地形适应性是指机体的垂直升降、水平俯仰和偏转在完全可控的方式下动作的能力，即将传统车辆悬挂的自由度由被动适应变为主动控制，使机体移动适应小尺寸不规则地形。

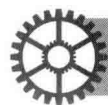
本书是设计和操作步态行走机器人的综合论述，事实上本书大部分材料都源自第一作者的博士论文，其侧重于深度，而非广度。因此，我们通过增加两个章节来提供一个更广阔的视角，分别是第五章和第九章。这种具有全地形适应性、静态稳定性、可步行行走等诸多特征的车辆，是迄今为止最为复杂的。本书的其他部分阐述的、具有普遍适用性的理论是专门指导这种车辆软硬件系统设计的。

静态稳定行走是步态运动系统的两个主要类别之一。当静态平衡的某些约束条件不满足时，步态运动系统还可实现动态稳定。Marc H. Raibert 目前的工作专注于静态不稳定系统，可以视为《Legged Robots That Balance》的补充。上述成果可以从麻省理工学院出版社获得。

本书涉及的工作是多人团队努力工作的一部分成果。同时作者也非常感谢贡献素材的其他人，特别是 Robert B. McGhee 博士的贡献。Robert B. McGhee 博士和本书的第二作者一起负责 ASV 车辆项目开发。这些项目全依赖于他早期的工作所建立的基础，如果没有他的领导和出色的专业技能，本书的编撰出版工作不可能这么早完成。对本书编撰过程中提供材料方面有重要影响的还包括俄亥俄州立大学的 Gary L. Kinzel 博士、Charles A. Klein 博士和 David E. Orin 博士，以及自适应机器技术股份公司的 Vincent J. Vohnout、Dennis R. Pugh、Eric A. Ribble 和 Mark R. Patterson。芝加哥的伊利诺斯州立大学的研

究生 Mr. Byoung S. Choi 使用 LATEX 准备了有关材料，此处特别提及和感谢他出色的工作。作者还非常感谢国防高级研究项目机构和美国国家科学基金会对该项工作的资金支持。

Shin - Min song
Kenneth • J. Waldr



目录

译者的话

序

前言

1 绪论	1
1.1 步态运动	1
1.2 开发多足步行机器人的动机	2
1.3 ASV 项目	3
2 步行机器的发展	8
2.1 引言	8
2.2 步行机器	9
2.3 步态研究	13
2.4 总结	14
3 步态分析和水平行走步态	16
3.1 引言	16
3.2 步态分析的数学基础和分析方法	17
3.3 步行机器人的步态选择	24
3.4 水平行走步态	27
3.5 总结	62
4 不规则地形步态	64
4.1 引言	64
4.2 斜坡行走步态	66
4.3 跨越壕沟	78
4.4 跨越垂直台阶	83
4.5 跨越垂直墙	95
4.6 ASV 完整工作空间	98
4.7 总结	99

5 协调	100
5.1 引言	100
5.2 零内力约束	102
5.3 力瞬心的位置	103
5.4 垂直足力分配	105
5.5 调幅	107
5.6 讨论	108
6 基于四连杆机构综合的腿部设计	109
6.1 引言	109
6.2 RECSYN 介绍	112
6.3 四杆腿的设计	117
6.4 七杆腿的设计	138
6.5 总结	144
7 比例缩放腿的设计	145
7.1 简介	145
7.2 比例缩放机构的运动特性	147
7.3 比例缩放腿的设计	156
7.4 平面比例缩放腿的工作空间分析	161
7.5 七杆腿和比例缩放腿的对比	169
7.6 总结	171
8 运动受控的踝关节设计	172
8.1 简介	172
8.2 刚性足与踝关节铰接足的对比	173
8.3 主动踝关节系统	175
8.4 被动踝关节系统	175
8.5 总结	181
9 自适应悬架车辆	183
9.1 简介	183
9.2 操作员控制	186
9.3 感知	187
9.4 计算机体系结构	188
9.5 控制体系结构	189
9.6 动力和作动系统	189

9.7 腿部机构与机体结构	190
9.8 操作模式	191
9.9 总结	192
参考文献.....	193

1 绪 论

1.1 步态运动

生物系统应用步态运动已经有数亿年之久。相比之下，轮式车辆只有几千年的历史。在现代生活中，轮式车辆是如此普通以至于无处不在，因其发展较为成熟，而产生的价值是难以估量的。但是轮式车辆是破坏自然环境的一个主要因素。轮式车辆更适合运行在良好的道路表面而不是自然地形，因此为迎合这种形式的运动，需要大量铺设良好的道路。

步态运动，从机械学的角度来看并无固有的劣势。动物使用步态运动速度即使在自然地形上可从每小时 0 到 65mile^①。采用步态行走的动物几乎从 0 到重达 16000lb^② 的非洲大象。据美国军方 (Anon, 1967) 资料，大约一半的地球陆地表面轮式或履带式车辆无法进入，而利用步态运动动物或人类几乎没有什么困难就能到达剩下 50% 的大多数区域。

然而，为什么人工步态运动在过去没有用于运输呢？最重要的原因是，缺少能够主动协调的完全自适应的腿。直到 20 世纪 80 年代中期，计算能力强大的计算机才在体积以及成本上满足车载应用。而且这种主动协调能力也需要机器人理论中协调算法的发展。本书主要讲述运动协调的相关内容。

虽然离常规商业用途的步行机器应用仍有一段距离，但是近期研究已经表明

① 1mile=1609.344m。

② 1lb=0.45359237kg。



这样的机器是可行的，而不仅仅是科幻。



1.2 开发多足步行机器的动机

人类使用地面运输的历史可以细分几个重要的发展阶段。在早期，人类依靠腿实现交通往来。一段时间后，动物被人类训练用来载人或载物。后来发明的车轮，大大提高了运输效率。有理由被视为人类交通历史上最伟大的发明，轮式车辆，通过人或动物拉动，成为陆地上最有效的交通工具。同时道路的建设，提高了轮式车辆的效率。大约两个世纪以前，随着另一个伟大的发明——蒸汽机的出现和工业革命开始，发动机驱动的车辆渐渐取代了动物或人类驱动的车辆，早期道路也发展成公路和铁路。在 21 世纪的今天，车轮的应用已经达到高峰，人类的原始交通手段——腿，对于长途运输已经成为一个辅助手段。

目前，几乎所有的陆地车辆都是基于轮式运动（履带式车辆可认为是轮式车辆的特例）。在过去的几百年中，在公路和铁路上行驶的轮式车辆已经被证明是最快和最有效的长途陆路运输手段。此外，轮式和履带式车辆作为越野车辆，在相对平顺的自然地面，其性能也能被人们接受。车轮在人类的文化中根深蒂固，以至于会很自然地认为，人类和动物被迫采用低级的步态运动是由于自然界无法创建一个不断旋转的关节。

然而，近期的研究表明，这是一个错误的结论。Bekker 在他的书中（Bekker, 1960）提到，履带式车辆在粗糙的硬质地面平均速度为 $5 \sim 10 \text{ mile/h}^{\text{①}}$ ，轮式车辆为 $3 \sim 5 \text{ mile/h}$ ，而在类似的条件下，动物可以达到的最高时速为 35 mile/h 。虽然重型和动力强劲的坦克可以达到更高的速度，却是以巨大的能源消耗和地形损坏为代价。同时，在软土壤推进大约 $10 \text{ in}^{\text{②}}$ ，推进所需的动力大约是履带车辆 10 马力^③/吨和轮式车辆 15 马力/吨，但是在理论上足式步行机器只有 7 马力/吨。

在另一本书（Bekker, 1969）中，Bekker 应用土壤力学解释了步态运动相对于轮式或履带式车辆表现出的优越的机动性。当轮子或履带陷入软土时，试图脱离陷入时会产生下陷，但腿只产生离散的足迹，任何滑移都会推动脚后土壤提供牵引力。

此外，步态运动在不规则地形下的平顺性更好，对隔离不规则地形也比较有利。通常，在高低不平的地面上以相同的速度行驶，骑在马背上比坐在振动的轮

① $1 \text{ mile/h} = 0.44704 \text{ m/s}$ 。

② $1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$ 。

③ $1 \text{ 马力} = 735 \text{ W} = 0.735 \text{ kW}$ 。

式或履带式车辆中更舒适。这对于仪器平台的运载车辆是十分重要的。

轮式或履带式车辆持续的车辙会大大损害自然地形，而步行机器只留下离散的脚步。根据自适应悬架车 (Adaptive Suspension Vehicle, ASV) 的使用经验，即使是在松软土壤，脚印也是不明显的。

综上所述，步行机器相比轮式或履带式车辆，在不规则地形具有以下五个潜在优势：

- (1) 速度更快。
- (2) 燃油经济性更好。
- (3) 机动性更好。
- (4) 不规则地形隔离性更好。
- (5) 环境破坏较少。

除了上述优势，步态运动机器可以到达大约 50% 的地球陆地表面，是传统的轮式或履带式车辆不能到达 (Anon, 1967) 的地域。步行机器在商业、科学、农业、军事等的陆地应用非常有用，例如行星探测器。



1.3 ASV 项目

在步态运动的优势被发现之前，发明家已经试图设计这种行走机械了。1893 年，Rygg 获得专利设计的机器马，见图 1.1，但并没有证据证明他实际制造了这台机器。1913 年，Bechtosheim 获得专利设计的四腿机器，见图 1.2，但也没有任何报道证明他成功制造了这台机器。

20 世纪 50 年代，许多研究小组开始系统地研究和开发步行机器。大约 10 年后，步行机器逐步被不同的团队在实验室设计和制造出来。直到目前，已建成几十个试验步行机器。比较典型的有：Shigley, 1960 年；Mckenny, 1961 年；Baldwin 和 Miller, 1966 年；McGhee, 1966 年；Mosher, 1968 年；Cox, 1970 年；Vukobratovie 等, 1972 年；Mocci 等, 1972 年；Kato 和 Tsuiki, 1972 年；Schneider 等, 1974 年；Okhotsimske 等, 1977 年；McGhee Iswandhi, 1979 年；Hirose 和 Umetani, 1980 年；Kessis 等, 1981 年；Raibert 和 Sutherland, 1983 年；Russell, 1983 年。尽管部分步行机器能够在实验室中行走并在可控条件下演示一些机动性，但在实用层面上，并未表现出其优势。

步行机器研制进展缓慢的原因主要来自于腿协调控制的复杂性、行走步态以及机械腿结构研究的发展限制。然而，随着现代机器人技术和微型计算机的发展，腿式步行机器一些关键技术点已经得到突破。

Odetics 公司已经开发出一种足式步行机器，研发人员正在评估其在核反应

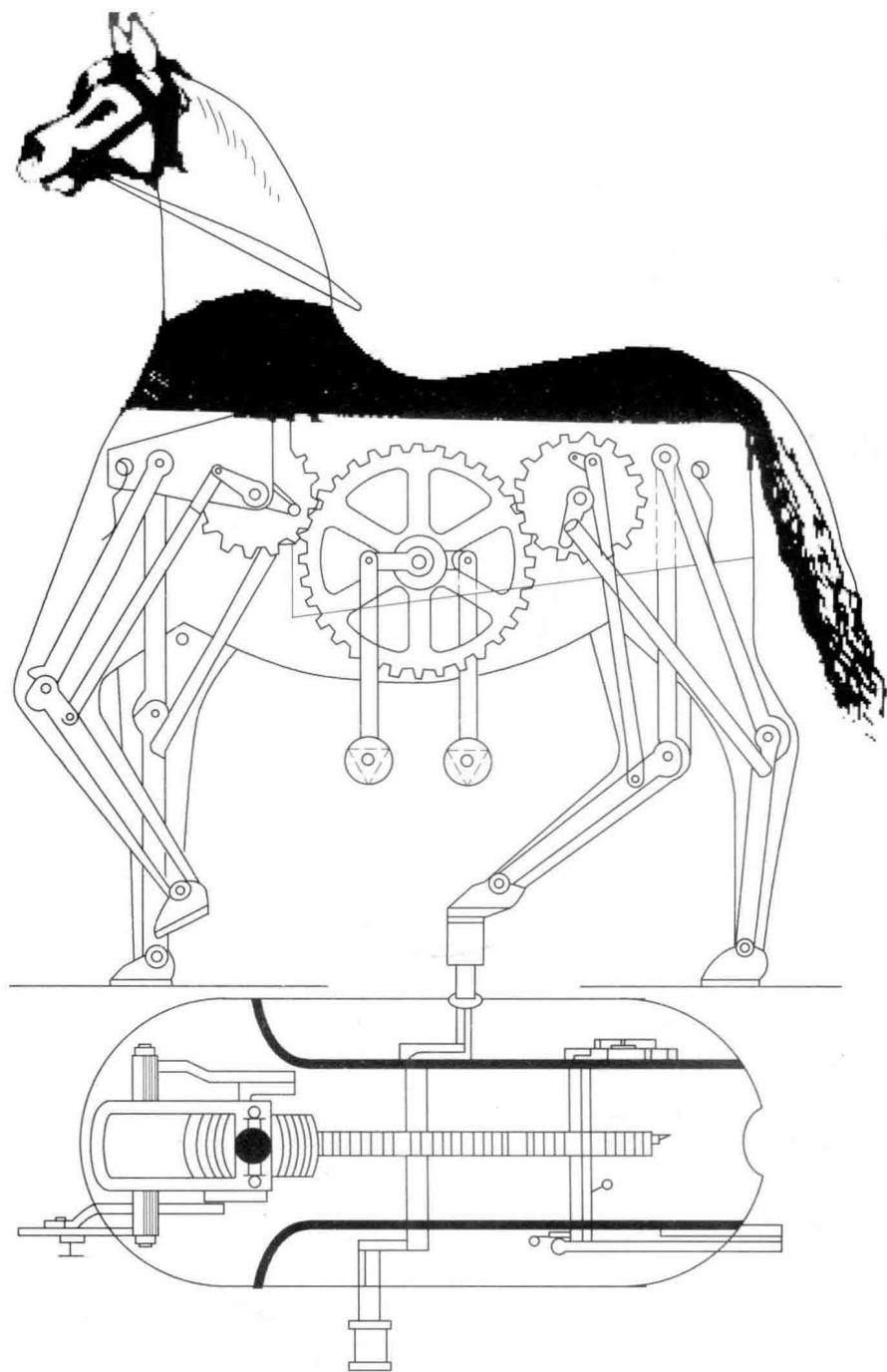


图 1.1 1833 年的机器马图纸

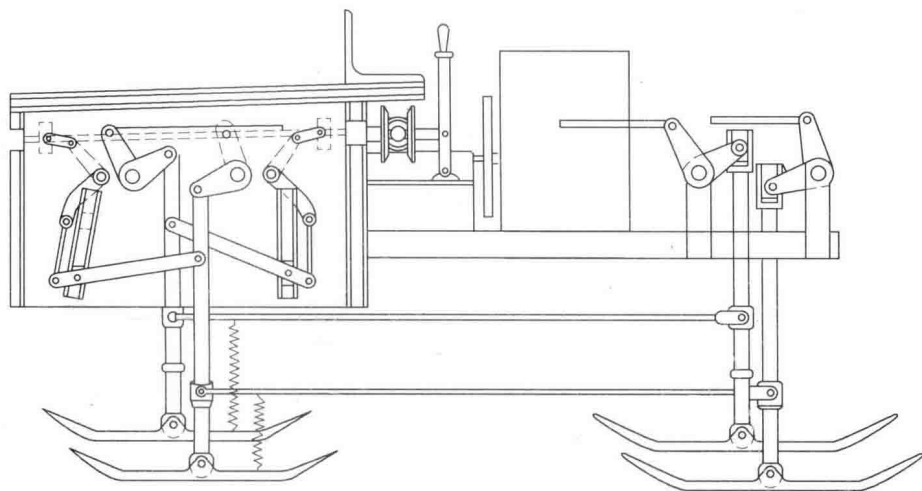


图 1.2 1913 年的步行机器图纸

堆周围的维修任务。尽管这台机器为室内工作而设计，由于其优越的机动性能，可以为商业设备的设计提供方向。

最近，美国俄亥俄州立大学的研究团队，借助其他研究小组的帮助下制造了一辆自形适应悬架车（ASV）（Waldron 和 McGhee, 1986）。该车辆可承载一个操作员以及 500lb 有效载荷，在崎岖的地形展示出了优于传统轮式和履带式车辆的机动性。图 1.3 展示出了一辆 ASV。

ASV 设计参数见表 1.1。为了实现设计目标，研究了包括控制、协调和步

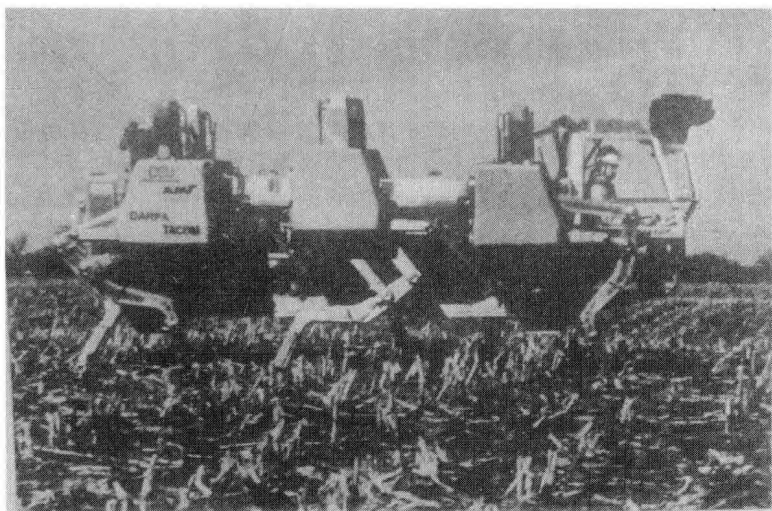


图 1.3 ASV

态，腿的几何构型，动力传动与冲击领域的基础理论。同时也涉及了地形扫描系统以及传感系统的设计。

表 1.1 ASV 的 设 计 参 数

尺 寸	长	17ft ^①
	宽	10ft
	轨迹宽度	8ft
净重		6000lb
有效载荷		500lb
巡航速度		5mile/h
阶段的攀爬能力（斜坡）		60%
机动性	壕沟通过	6ft
	垂直台阶通过	5.5ft
	独立墙通过	4.5ft
	涉水深度	4ft

本书主要阐述 ASV 相关的基础研究。主要介绍了腿部机构的运动学设计、ASV 的整体几何设计、能量利用效率以及机动性与腿几何构型的关系等。同时为了分析腿的几何设计、行走步态和机动性，有必要理解腿部控制和协调。本书内容主要分为以下两个部分：

（1）运动协调和步态分析。步态是协调腿的相位关系的行为方式。关于水平行走和跨越障碍以及车辆移动过程中腿部运动空间的研究在第 3 章和第 4 章中阐述。腿部运动协调将在第 5 章讨论。

（2）车辆和腿的几何设计。为实现车辆所需的运动空间、良好的能量利用效率、简单的结构以及良好的机械可靠性有必要设计一个最优的腿的几何构型。整个车辆几何设计必须满足大障碍跨越能力和高效率的长途步行。有关设计的细节在第 6 章和第 7 章中论述。

每章的内容简介如下：

第 2 章回顾过去关于步行机器的机械结构和行走步态两个方面的研究成果。通过在这两个领域所产生的重要历史事件来展开介绍。

第 3 章介绍步态分析所涉及的数学与图形学知识，并对不同类型地形的步态选择问题进行了讨论，同时详细介绍了在水平路面行走时使用的主要步态。主要步态包括波浪步态等相位步态、向后周期性步态、不连续跟踪引导步态和连续跟踪引导步态。对步态稳定性和腿运动空间之间的关系也进行了讨论。

① 1ft=12in=0.3048m。

第4章研究坡度行走步态以及提高稳定性的方法，同时对可跨越3类主要类型的大障碍步态进行了研究。三类大障碍类型是水平壕沟、垂直台阶和垂直墙。在各种情况下，对车辆机动性和腿运动空间之间的关系进行了研究。

第5章包含可用于协调步态运动机器的控制和力规划算法的讨论。书中提出的方法与ASV采用的技术类似。

第6章讨论了采用四连杆机构进行腿的几何学设计。以最优运动空间为目标，对腿部连杆机构进行优化，并对包括轴承负荷、驱动力、执行器的安装位置、干涉问题和应力分析进行了相应介绍。分析得出了一个最佳四连杆腿和七连杆腿的几何构型。

第7章提出了基于比例缩放机构的腿部几何构型设计。首先给出比例放大机构运动特性的理论背景，提出一种通过计算机辅助图形方法的腿的设计方法。同时分析研究比例放大腿的运动空间。

第8章对腿设计相关的其他内容进行了讨论。如足踝关节系统用于控制足的角度，并介绍了一些被动足踝系统。

第9章描述了ASV的总体架构。