

中图分类号: TP242 doi: 10.19708/j.ckjs.2019.04.002



兵器地面无人平台研发中心副主任江磊 ▶

行走的智能：四足仿生移动机器人

江磊

摘要：随着技术的进步，以及人们对智能型移动服务机器人的要求越来越高，兼具高速度、高机动和高适应性的四足机器人正在成为全球研究热点，并成为智能移动服务型机器人的重要组成部分。介绍了四足机器人的国内外现状，回顾了我国自主研发的“奔跑号”四足机器人的研究历程，并对四足机器人的未来发展趋势进行了展望。

关键词：四足机器人；仿生；虚拟柔顺控制

1 为什么需要四足机器人

随着技术的进步，以及人们对智能型移动服务机器人的要求越来越高，以替代人工操为目标的服务机器人逐步成为智慧城市领域的关注热点。移动服务机器人作为解决以上问题的切入点，被全球各国所关注和尝试，逐步应用于物流运输、安防服务、自动巡检、小区巡逻等领域，包括美国、中国、英国在内的顶尖科研机构将目光瞄准复杂地形条件下的智能移动服务机器人。

复杂地形条件给移动系统带来极大挑战，传统的车辆行走机构具有轮式和履带式两种基本形式，然而，自它问世以来：“经过近百年的努力也未能使轮式或履带式车辆在松软地面上的性能得到根本改进。”陪伴服务型机器人进入人类生活，它应当会爬楼梯、上台阶、过草地、过雪地等，但目前的轮式和履带式机器人是有明显缺陷的，所以足式移动机器人正在成为全球研究热点，并成为智能移动服务型机器人的重要组成部分。足式移动机器人按照其“腿部”的数量不同可以分为单足式移动机器人、双足式移动人和多足式移动机器人，四足移动机器人在非结构地形条件下具有更

先天的优势，使其成为足式移动的先锋。

有机构预测，到2020年，中国的智能移动服务型机器人销量将会达到4000多万台，服务机器人企业数量也将逐渐增长，涉及家政服务、物流、公共安全和其他机构等行业。据此测算，中国智能移动机器人总的潜在市场规模超过千亿元级别。

2 四足机器人的国内外现状

国外的机器人研究起步早，发展较成熟，其中以美国、日本、英国为首的国家，其根据自身生产力的需求，研发了各种各样的机器人。而中国的机器人技术起步较晚，但是发展迅速。

在移动机器人方面，美国从1980年开始做的第一款高性能移动机器人到2016年推出的一系列有颠覆性意义的机器人，历时36年。中国从2010年研制成功国内第一台液压驱动四足仿生机器人，短短几年时间，我们国家至少有10个单位有能力做整机的高性能四足机器人，在国际上取得非常耀眼的成绩。

2016年以后，四足机器人逐渐成为全球研究热点，美国、中国、瑞士、意大利、俄罗斯、韩国、日本等国家都纷纷推出了自主研发的四足机器人，其中有以下5款主流的机器人。

(1) 最强大狗：LS3 机器人

LS3是由美国军方研制出的一种四足移动机器人，它被命名为“LS3”，绰号“阿尔法狗”。LS3自重350 kg，载重150 kg；具有大角度坡度、崎岖不平全地形适应能力；可语音进行人机交互；拥有慢步行走、小跑、快速奔跑步态，且摔倒后可自恢复；具有基于感知系统的自主人机跟随能力。这些特点使得LS3能

够跟在士兵后面穿过复杂地形,同时以一种很自然的方式与士兵互动,就像训练有素的动物与主人之间的互动一样。它还可进行伪装,与周围环境融为一体。



语音交互



快速小跑



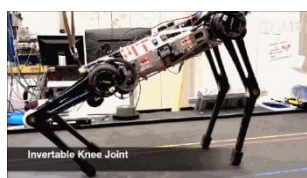
倒地自修复



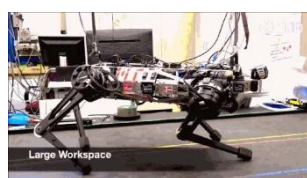
林间行走

(2) 最网红: 第三代“猎豹”机器人——DARPA 猎豹四足机器人

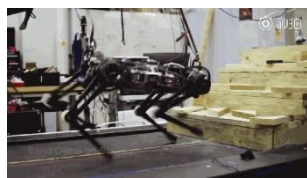
第三代猎豹机器人由麻省理工学院研制,重 90 磅(约 40.8 kg),体型和一只金毛犬差不多。它具有灵活的脊椎和铰接式头部,并装配有一系列高科技装备,包括激光陀螺仪、照相机和随载计算机等。它具有正反关节配置,可大范围姿态调节,能够完成慢速小跑(0.5 m/s)、快速小跑(1.7 m/s)、跳跃(2.7 m/s)、奔跑(3 m/s)、原地起跳、爬楼梯、抗侧向推力、跳跃障碍(76 cm)等动作。



正反关节配置



大范围姿态调节



爬楼梯



抗侧向推力

(3) 最接近民用: ANYmal 四足机器人

ANYmal 是一款由瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH Zurich)和 ANYmal 机器人公司合作研制的四足机器人。这款机器人重约 30 kg,可载重 10 kg,移动速度与一名灵活的成人步行时无异,依据不同活动耗能的不同,充电一次可工作 2~4 h。其最大特点是 ANY drive 驱动器,这个驱动器可以搭载在 4 条机械臂上,把机器臂倒过来使用,普通基座式工业机器人就变成了四足机器人。它的四条腿可以让机器人爬

行、行走、奔跑、跳舞、跳跃、攀爬、携带任何任务所需的東西。



蹲起站立



爬越障碍



爬越楼梯



砾石路行走

(4) 最容易被忽视: WildCat 四足机器人

波士顿动力研制的 WildCat 四足机器人,高 1.17 m,重 154 kg,由甲醇燃烧发动机提供动力,该发动机驱动液压驱动系统。该机器人可使用各种步态,包括小跑、跳跃和奔跑,并保持其平衡。目前在二维纵向平面速度可达到 45 km/h。WildCat 四足机器人在越野路面上有非常大的使用价值。



蹲起站立



高速奔跑



急停转向

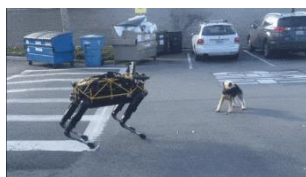


跑跳步态

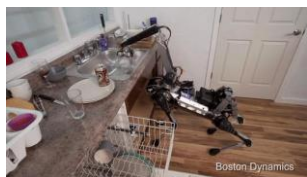
(5) 最强民用小狗: Spot 系列机器人

波士顿动力研制了多款 Spot 系列机器人。2015 年发布的 Spot 由液压驱动,自重 75 kg、载重 35 kg,其头部有一个快速旋转的传感器,可以在斜坡、草丛中行走,还能够爬楼梯、跑步,是当时平衡能力最好的四足机器人。外出的时候,它“懂得”跟着士兵行走,当可能遇到危险的时候,它也可以冲到前线,寻找潜伏的敌人和潜在的危险,减少人员伤亡。2016 年发布的 SpotMini 由电机驱动,自重 30 kg、载重 14 kg,由于没有任何液压系统在身体上,所以它是波士顿动力旗下最安静的机器狗;2018 年发布的 SpotMini2 的外观相较 SpotMini 有了极大改进,在充满电的情况下可运行 90 min,可以弯曲的四肢和灵活的移动性,让

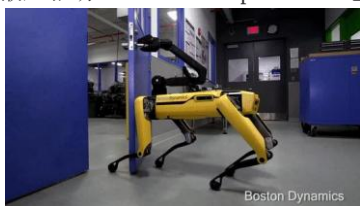
SpotMini2 能触达大型机器人和轮式、履带式机器人无法触达的空间，蛇形机器人臂可帮助其完成开门一类的动作。波士顿动力已开始量产 SpotMini2，并计划在 2019 年把这个数量提高至 1000 台。



Spot（液压驱动）



SpotMini（电机驱动）



SpotMini2（电机驱动）

除了四足机器人，还有多种多样的足式、足轮式机器人等，随着技术的不断突破，未来，这些机器人在娱乐功能、应急响应、安保、仓储物流、配送以及工程建设、看护服务等应用场景会产生很大的价值。

我国非常重视高性能四足仿生机器人的开发，目前国内主要有 3 个重点研究计划支持：① 2011—2013 年国家 863 计划先进制造领域“高性能四足仿生机器人”；② 2012—2016 年陆军“十二五”预研“某型无人平台总体技术研究”和“十二五”预研加强“某型仿生无人平台技术研究”；③ 2017—2020 年陆军“十三五”“某型四足仿生无人平台”。

3 “奔跑号”四足机器人的研究历程

中国兵器工业集团第二〇一研究所兵器地面无人平台研发中心，目前是我国唯一集团级的地面无人平台专业研发机构。作为专门从事地面无人平台研究和产品开发制造的机构，该研发中心将面向海陆空三军、公安、武警、军贸和民用领域，致力于地面无人系统研究、产品开发和产业化发展，打造我国地面无人平台产研基地。其发展于 2004 年，2012 年开始研究四足机器人，目前有 3 个技术部，分别是特种地面无人平台需求论证部门、应用使用部门和研发部门，共有 53 名员工，承担四足机器人领域的相关重大科技专项、国防高新工程等专项论证。

下面介绍下兵器地面无人平台研发中心研发的“奔跑号”四足机器人的研究历程。

① 2012—2014 年：基于虚拟腿-倒立摆-力反馈控制的最基本模型，来解决四足如何行走问题。

2012—2013 年利用 CPG 模型，开展四足步态研

究，采用 CPG（Central Pattern Generator，生物中枢模式发生器）控制四足机器人节律行走，实现步态行走；以犬类动物为例，通常步态有 6 种不同形态，四足动物行走的过程，分为后躯推动前躯朝前移动（支撑项）、一条前腿需向前摆动以防止跌倒（摆动项），支撑项和摆动项的交替从而实现行走；使用 CPG 无法产生良好的四足稳定性控制策略，但是可以快速对四足机器人的步态开展研究。

2013—2014 年采用虚拟弹簧模型，研究腿足柔顺力伺服。基于虚拟弹簧的力伺服模型，建立单腿柔顺控制模型；对单腿柔顺性开展仿真分析研究，建立基于力伺服的正逆运动学模型；在单腿台架与整机上，开展性能试验，调整伺服参数，实现底层伺服柔顺性控制。同时，采用虚拟腿的模型，实现四足机器人的运动控制，并搭建了高度、速度和姿态控制模型。高度控制模型实现不同负载、不同地形下保持固定高度；速度控制模型实现由摆动腿的落足点位置控制机身前进速度；姿态控制模型实现支撑腿对机身姿态的动态支撑。

② 2015—2016 年：采用滑转率补偿的模型，实现野外环境行走。

由基本原理推导建立量化的、可用于控制实现的数学模型；通过典型试验修正模型参数，验证模型的精确性；通过仿真分析模型的适应性；在整机控制系统中验证，即分配控制目标和指标。

③ 2016 年起：从室内样机到室外样机，从摔倒中获得经验。

任何好的算法真正集成到工程应用上都会有不确定性，我们的国产元器件、传感器、伺服电机能不能达到我们期望的速度水平，这些是工程化所要面临的重大问题。机器人需要所有的专业达到一个非常好的状态，才能达到一个相对平稳的水平。

为此，我们开展了大量的行走试验，经历了无数次的摔倒，优化了机构和控制模型。目前我们的四足机器人基本达到美国 Bigdog 的技术水平，可完成在泥泞路面、沙土路面、草地、丘陵、上下坡、侧倾坡、侧端、奔跑等复杂条件下的操作。在 2016 跨越险阻挑战赛中，“奔跑号”四足机器人实现跨越障碍、上山下地，获得冠军。



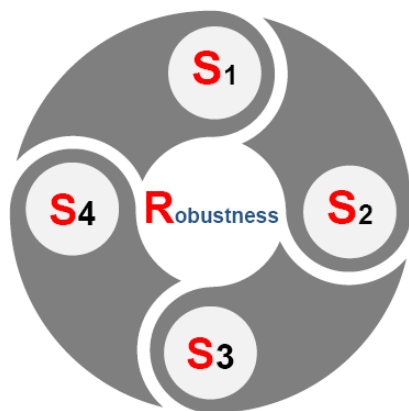
沙土路面



草地

4 四足机器人的发展趋势展望

未来,四足机器人将围绕“鲁棒性”的“4S”发展。



“鲁棒性”的“4S”

(1) Smart: 更加智能化

- 使机器人在复杂环境认知方面更加智能;
- 使机器人在复杂环境落足点选择方面更加智能;
- 使机器人在人机交互方面更加智能。

加利福尼亚大学伯克利分校和卡内基梅隆大学的实验室的研究人员在 ATRIAS 机器人身上演示了机器人如何通过手眼配合走“梅花桩”。



ATRIAS 手眼配合走“梅花桩”

(2) Stronger: 更加强壮

- 使机器人在承载性能方面更加强壮;
- 使机器人在抵抗大载荷下的扰动变形更加强壮;
- 使机器人在爆发式动作方面更加强壮。

美国波士顿动力公司研制的 Atlas 机器人, 可以完成跳跃翻转等一些人类都无法完成的动作。Atlas 之所以具有这样出色的灵活性, 关键在于它的腿部, 这是其发展中最具挑战性的部分之一。Atlas 每条支腿都由液压动力驱动, 需要将多个通道和动力气缸内部集成为一个部件。这个难题已经通过 3D 打印解决了。

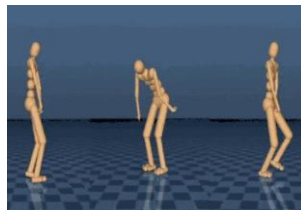


Atlas 机器人的 3D 打印腿

(3) Stability: 更加稳定

- 使机器人在抗侧向外力扰动方面更加稳定;
- 使机器人在抗不平整或松软地形方面更加稳定;
- 使机器人在摔倒自恢复方面更加稳定。

DeepMind 于 2017 年连续发表了三篇论文, 就如何在仿真环境中生成灵活行为进行了研究。也就是让机器人通过自主学习纠正在不同环境下的行走、奔跑、翻越障碍等动作, 使其更加稳定。



仿真研究如何生成灵活行为

(4) Silent: 追求静默性

美国军方弃用谷歌的 LS3 型机器人, 理由是噪声太大。所以要想使机器人得到更广泛的应用, 应使机器人足够安静, 可从以下三条线来开展研究:

- ① 发动机系统的降噪处理;
- ② 使用电动机+液压泵的方式降低噪音;
- ③ 采用纯电驱动方式实现降噪。

□

作者简介

江磊, 高级工程师, 中国兵器工业集团第二〇一研究所, 小型移动机器人学科团队科技带头人, 2011 年度北京市丰台区青年岗位能手, 一直从事地面无人作战平台、月球车行走系统、车辆动力学仿真分析、虚拟现实等技术研究, 现担任月球车行走系统项目负责人, 轻小型地面无人平台项目负责人, 山地四足仿生移动平台项目负责人, 中国农机学会地面车辆分会委员, 国际车辆地面力学学会、兵工学会、机械工程学会会员, 获兵器集团科技进步奖 1 项, 所科技进步奖 2 项, 发表科技论文 10 余篇, 发明专利 7 项。