



四足机器人发展现状与展望

孟健¹, 刘进长², 荣学文¹, 李贻斌¹

1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061
2. 中华人民共和国科技部高技术研究发展中心, 北京 100044

自然界中有许多地形无法使用传统轮式或履带式车辆到达, 而哺乳动物却能够在这些地形行走自如, 这充分展示出四足移动方式的优势。在动物的启发下, 科研人员对四足机器人进行了深入研究, 并取得了丰硕成果。本文综述国内外四足机器人的发展现状, 归纳了四足机器人领域涉及的关键技术, 展望了其发展趋势。

人类在公元前 1000 年前就发明了轮子, 几千年来轮子的广泛应用为人类提供了大量便利。然而在不断使用和改进过程中, 人们逐渐认识到它的局限性。地球陆地表面有各种崎岖地形, 包括山地、丘陵、峭壁等, 传统的轮式与履带式车辆难以在这些地形行进, 而哺乳动物却能在这些崎岖地形行走自如, 充分展示出四足移动方式的优势:

- 1) 四足移动方式的落足点是分散的, 可以在工作空间内主动选择落足点, 可以跨过障碍和深坑。
- 2) 四足移动方式无横向运动约束, 易于实现全方位移动。
- 3) 足端运动与躯干质心运动解耦, 可以实现主动隔振, 在起伏不平地形移动时能保持躯干运动的平稳性。
- 4) 可以用腿迈过障碍, 避免质心上下浮动所需的额外能耗。

纵观自然界, 大型陆生动物大多为四足动物, 无论在峭壁、丘陵、草原, 还是沙漠, 总能见到四足动物的身影, 这充分表明了自然选择对四足移动方式的认可。四足机器人以四足动物为仿生对象, 具有像四足动物那样灵活运动的潜在能力, 既有比双足机器人更好的稳定性, 又有比六足机器人更简单的机构, 是一种实用、有广阔应用前景的移动机器人。几十年来, 国内外学者对四

足动物的运动规律进行了研究分析并设计出多台四足机器人, 虽然受理论发展水平和材料、驱动机构性能的限制, 目前四足机器人的运动性能与四足动物相比仍有较大差距, 但也取得了很多可喜的成果, 四足机器人的改良仍需要坚持不懈的努力。

1 国内外四足机器人发展现状

从 20 世纪 60 年代起, 国内外学者设计开发了一系列四足机器人样机^[1,2], 比较有代表性的是美国 MIT Raibert 于 1984 年设计的四足机器人^[3], 该机器人腿部采用伸缩结构, 使用气缸实现触地缓冲和跳跃, 基于虚拟腿和三部分控制方法实现了动态平衡, 能使用 trot, pace 和 bound 步态快速稳定奔跑^[4],

如图 1 所示。

意大利理工学院从 2007 年开始研发 HyQ 液压驱动四足机器人^[5](图 2), 该机器人长 1 m, 宽 0.5 m, 腿伸展后身高 0.98 m, 自重 70 kg, 采用电机和液压混合驱动, 实现在崎岖地形的稳定爬行^[6]和有腾空相的 trot 步态, 并能在一定的外界扰动下保持稳定^[7]。

MIT 设计了一款能高速奔跑的四足机器人 Cheetah^[8], 该机器人具有低达 0.5 的能耗系数 (Cost of Transport), 经过优化后发布的改进版 Cheetah v2 四足机器人(图 3), 能在 bound 步态下以 8km/h 的速度前进并自主跳过 0.46 m 高的障碍。

除此之外, 还有一些可以在野外环境中运行的四足机器人, 其中以美国



图 1 Raibert 设计的四足机器人
Fig. 1 Raibert's quadruped robot

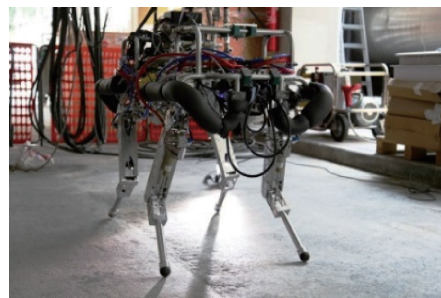


图 2 HyQ 四足机器人
Fig. 2 Quadruped robot HyQ

BostonDynamics 的成果最为显著,其研发的 BigDog(图4)^[9]四足机器人,最大负重 154 kg,能爬 35°斜坡,能以 trot 步态在冰面、石子地、雪地、沙地和积水路面行走,以 crawl 步态爬越空心砖堆,以

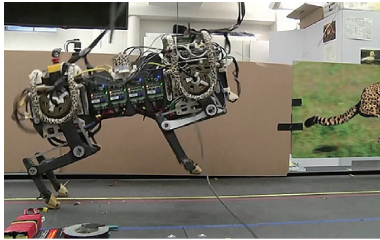


图3 MIT Cheetah v2 四足机器人
Fig. 3 Quadruped robot MIT Cheetah v2



图4 BigDog 四足机器人
Fig. 4 Quadruped robot BigDog



图5 LS3 四足机器人
Fig. 5 Quadruped robot LS3

bound 步态跳过沟壑,在受到侧踹时仅通过几步调整即可恢复平衡,表现出惊人的性能。

BostonDynamics 随后研发了具有更强负重能力(181 kg)和续航能力(32.2 km)的四足机器人 LS3(图5),它拥有更强的抗扰动能力,能够在摔倒后原地站起,能实时探测地形信息并在线调整落足点位置,可识别领航员并完成人员跟随。

BostonDynamics 还研发了具有高速移动能力的 WildCat 四足机器人(图6),该机器人能以 bound 和 gallop 步态在较平坦的路面奔跑,可实现步态切换,最高速度达 25.7 km/h。

BostonDynamics 在 2015 年推出一款轻型液压驱动四足机器人 Spot(图7),它自重只有 72.6 kg,采用电机带动液压泵的方式为整个机器人提供液压动力,既具有液压驱动高动态性、大输出的特点,又保留了电驱动安静、发热

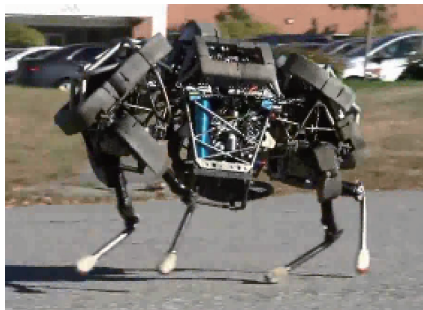


图6 WildCat 四足机器人
Fig. 6 Quadruped robot WildCat



图8 山东大学四足机器人
Fig. 8 Quadruped robot of Shandong University

少的优点,在室内室外均可运行,为设计高性能机器人提供了一种新思路。

国内四足机器人从 20 世纪 90 年代初开始起步,清华大学研制的 QW-1^[10]四足机器人,实现了静步态下的全方位移动;上海交通大学研制了 JTUWM^[11]系列四足机器人,完成了静步态、动步态下的运动分析与控制。2013 年,山东大学^[12](图8)、国防科技大学^[13](图9)、哈尔滨工业大学^[14](图10)、北京理工大学^[15](图11)和上海交通大学^[16](图12)研制了多台液压驱动四足机器人,无论是从移动速度还是负重能力方面,均较以往的电驱机器人有大幅提升。

四足机器人经过几十年的发展已逐渐由实验室走向应用,甚至奔赴战场。美国在这方面始终处于领先地位,其机器人已完成在野外环境下的测试,无论是在崎岖地形的表现还是运动灵活性,四足机器人的优势均已凸显,它们将在未来发挥越来越重要的作用。

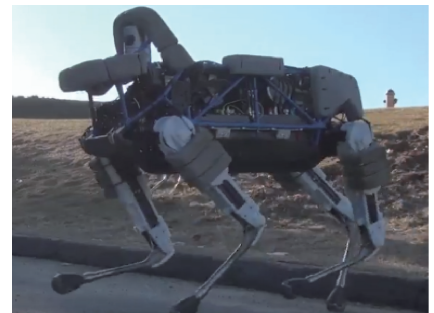


图7 Spot 四足机器人
Fig. 7 Quadruped robot Spot



图9 国防科技大学四足机器人
Fig. 9 Quadruped robot of National University of Defense Technology

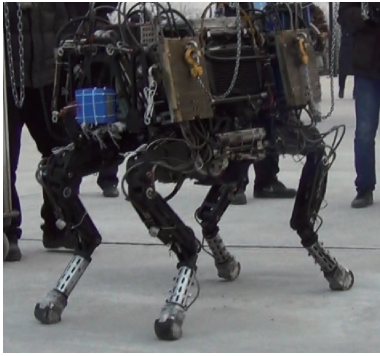


图10 哈尔滨工业大学四足机器人
Fig. 10 Quadruped robot of Harbin Institute of Technology

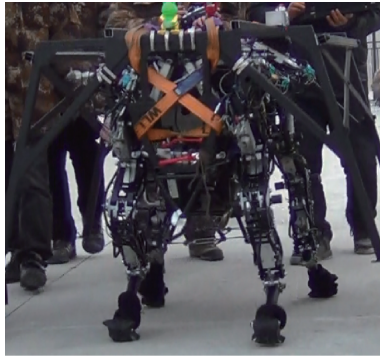


图11 北京理工大学四足机器人
Fig. 11 Quadruped robot of Beijing Institute of Technology

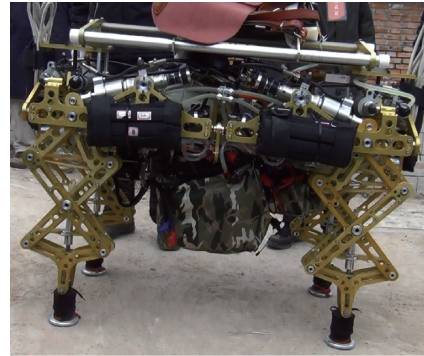


图12 上海交通大学四足机器人
Fig. 12 Quadruped of Shanghai Jiaotong University

2 四足机器人的关键技术

四足机器人的发展离不开各项技术的支撑,目前与四足机器人性能密切相关的主要涉及以下几个方面。

2.1 高强度机构设计技术

四足机器人在移动时每一步都会导致质心上下波动,足端触地时会受到地面的巨大冲击,尖峰值常达到站立状态的几倍到几十倍,因此坚固的机构是机器人正常运行的基本保证。虽然可以使用主动柔顺或被动柔顺的方法减弱冲击,但对于那些以驮运为目的的机器人来说,高强度的机构至关重要。

2.2 高带宽作动器设计技术

四足机器人的各关节均由作动器驱动,因而机器人的动态性能在很大程度上依赖作动器的带宽,尤其是当机器人奔跑和跳跃时,需要各作动器高速运动,若带宽不足则可能导致机器人无法实现跳跃,甚至无法保持动态稳定。目前的高性能四足机器人普遍采用液压驱动方式,利用液压驱动带宽高、输出力大、运动精确的优点,保证机器人的动态性能。

2.3 高能量密度动力源制造技术

动力源是机器人走出室外、无缆运行的必备部分,功率大、重量轻的动力源可有效减轻机器人自重,降低对机构强度的要求,提升机器人的动态性能和负重能力,因而增加其功率密度尤为重要。目前小型机器人常采用锂电池作

为动力源,大型机器人常采用内燃机。

2.4 噪声抑制技术

机器人在运行的过程中会产生各种噪声,如工控机风扇、作动器、减速器、发动机、散热器都会发出噪声,然而过大的噪声一方面会对人造成不适,另一方面会限制机器人的应用范围,因而应当采取措施降噪,如增加消音器,对噪声进行隔离等。

2.5 柔性控制技术

现在机器人越来越多地采用柔性控制。与传统精确位置控制不同,柔性控制的特点是各关节可随外力变化而发生位移,避免因微小位移偏差导致输出力大幅变化,很适合与外界物体交互,如夹持物体、足端触地缓冲等。实现柔性的方式分为被动和主动柔顺。被动柔顺通常利用机构形变实现对外力的顺应,而主动柔顺则是基于力控制方法主动规划。主动柔顺对传感器和作动器的带宽要求较高,但控制更灵活。

2.6 自平衡控制技术

四足机器人在行走时具有支撑腿数量少、稳定裕度低的特点,因而保持平衡成为控制系统的基本任务。依据是否考虑质量和惯性力,四足机器人的平衡判定准则可分为静态稳定判据和动态稳定判据。常见的静态稳定判据包括SSM^[17]、ESM^[18]、NESM^[19]、CESM^[20]、TESM^[20]和SAL^[21]等,但随着对机器人运动速度要求的提高,静态稳定判据难以

满足要求,动态稳定判据逐渐占据主导地位,如ZMP^[22-24]、DSM^[25]和LAR^[26]等。

2.7 复杂地形步态规划方法

步态规划是四足机器人运动控制的核心,对四足机器人的越障能力和移动速度起到至关重要的作用,目前的步态规划方法主要包括基于中央模式发生器^[27](Central Pattern Generator)的控制方法和基于模型的控制方法。中央模式发生器是对生物运动机理进行模拟,使用微分方程模拟相互抑制的神经元产生周期振荡,从而控制各关节周期运动。基于模型的方法首先建立机器人的运动学和动力学模型,然后依据地形信息规划各关节运动,进而实现机器人的运动。

2.8 目标识别与避障方法

四足机器人在自主行走时需要对其周围的目标进行识别,区分领航员和障碍,以此实现人员跟随和自动避障^[28]。准确、实时的识别能力可以保证机器人稳定、安全的自主运行,常用的传感器有摄像头、激光雷达等。

2.9 定位与导航技术

使用定位与导航技术可以使四足机器人实现自主导航,在地图上指定目标点,由机器人自主规划完成移动任务^[29]。四足机器人的自主导航与传统移动机器人的自主导航类似,虽然没有轮式里程计,但可以使用腿足式步程计代替。

3 四足机器人的发展趋势

目前已有一些四足机器人展示出惊人指标,随着理论的发展和技术的进步,它们的性能仍会进一步提升。

3.1 移动速度更快

美国BostonDynamics研发的Cheetah机器人在2012年初创造了29 km/h的速度纪录,成为最快的腿足式机器人,而该机器人的最新记录达45.5 km/h,超过了人类的百米世界纪录。通过提升作动器的带宽,减轻腿部转动惯量和增加动力源功率可以使机器人运动更快,实现更高的速度。

3.2 负重能力更强

四足机器人可以用来完成运输任务,或构成通用移动平台,如BigDog能在负重154 kg的情况下行走,LS3则可以负重181 kg。通过优化机构、增加功率和改进控制算法,可以使机器人负重能力进一步增加,提升实用型。

3.3 地形适应能力更好

目前的四足机器人已经具有相当强的地形适应能力,能在山地、灌木丛行走,甚至越过横倒的树干,但与动物相比仍不够灵活,如猫可以在奔跑过程中跳跃几倍于身高的高台,狗可以跑上墙面完成跑酷动作。在研究人员的努力下,四足机器人在不久的将来也会具备这些能力,甚至超越。

3.4 续航时间更长

腿足式机器人虽然地形适应能力

优于轮式机器人,但也往往需要消耗更多能量。美国康奈尔大学的Ranger在30小时49分钟内持续持续行走65 km,创造了腿足式机器人的续航记录。通过增加机器人的被动环节,减小质心上下浮动的范围,可以提高腿足式机器人的能量效率,延长续航时间。

3.5 环境感知更加自然

随着传感器技术的进步,四足机器人将拥有更全面的环境感知能力,在更复杂地环境中自主判断可通过区域并完成导航任务,可通过视觉、听觉与人类交互,增强自然交互功能。

3.6 驱动技术更加仿生

传统的气动、电动、液压驱动方式在工业应用中取得了较好的效果,但体积大、速度慢、功率密度低等缺点限制了机器人性能的提升,于是需要将新驱动技术引入机器人领域,打破瓶颈。人工肌肉是一种仿生驱动器,无需马达、齿轮等复杂装置,通过材料内部结构的改变而伸缩、弯曲、束紧或膨胀,体积小、重量轻,可以作为一种高性能的柔性驱动器。此外,一些新研制的可变形材料也可应用于机器人,如碳氮二维纳米片电极材料、石墨烯、液态金属等。使用新的驱动技术有望显著增加四足机器人的功率质量比,提升动态性能。

3.7 动态可控重构机构

模块化可控重构机构由若干个独立的机电模块组成,每个模块间都有接

口,通过每个模块在相邻模块上的移动实现构型的改变,系统可使用相同的模块组成多种构型,进而实现多种运动形式,既可以通过变形改变腿的长度,又可以在四足、双足甚至其他结构间灵活切换。可重构机器人正由需要手动拼装的静态可重构机器人发展为能够自动拼接的动态可重构机器人。

3.8 可控发育机构

可控发育机构可以使机器人具有比可重构机器人更灵活的变形机构,甚至实现自修复。美国麻省理工在这方面进行了初步探索,研制出一种先进变形材料,将聚氨酯泡沫放置在融化的蜡液中,通过蜡的融化与凝固实现材料的变形和自修复。虽然目前还没有能够应用于四足机器人的成熟技术,但可以试想一下,未来可以用一种可控的特殊材料通过生长的方式制造四足机器人本体。

4 结论

四足机器人经历了几十年的发展,已取得一些可喜成果,但相对于动物而言,其运动灵活性仍有较大差距,需要继续从仿生的角度新型驱动和结构方式、改进控制方法、提升环境适应能力。四足机器人的优势已经逐渐显现,未来必将有广阔的应用前景。

参考文献(References)

- [1] McGhee R B. Finite state control of quadruped locomotion[J]. Simulation, 1967, 9(3): 135-140.
- [2] Moshier R S. Test and evaluation of a versatile walking truck[C]//Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium. Washington DC, 1968: 359-379.
- [3] Raibert M H. Legged robots that balance[M]. Massachusetts: MIT press, 1986.
- [4] Raibert M H. Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot[J]. Journal of biomechanics, 1990, 23(Suppl 1): 79-98.
- [5] Semini C. HyQ: Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot[D]. Genoa, Italy: University of Genoa, 2010.
- [6] Semini C, Barasuol V, Boaventura T, et al. Towards versatile legged robots through active impedance control[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015. doi:10.1177/0278364915578839.
- [7] Barasuol V, Buchli J, Semini C, et al. A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 2554-2561.
- [8] Seok S, Wang A, Chuah M Y, et al. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT Cheetah Robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(3): 1117-1129.
- [9] Wooden D, Malchano M, Blankespoor K, et al. Autonomous navigation for BigDog[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 4736-4741.
- [10] 汪劲松, 易昕. QW-1型全方位四足步行机器人的设计及实验研究[J]. 机械工程学报, 1991, 27(5): 69-74.
- [11] 马培荪, 马烈. 全方位四足步行机器人JTUWM-II转弯步态控制的研究[J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(5): 87-92.
- [12] Rong X, Li Y, Meng J, et al. Design for Several Hydraulic Parameters of a Quadruped Robot[J]. Appl. Math, 2014, 8(5): 2465-2470.



- [13] Cai R B, Chen Y Z, Hou W Q, et al. Trotting gait of a quadruped robot based on the time-pose control method[J]. *International Journal of Advanced Robotics System*, 2013, 10(148).
- [14] Li M, Jiang Z, Wang P, et al. Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(2): 188-198.
- [15] Gao J Y, Duan X G, Huang Q, et al. The research of hydraulic quadruped bionic robot design[C]//Complex Medical Engineering (CME), 2013 ICME International Conference on. IEEE, 2013: 620-625.
- [16] Hu N, Li S, Huang D, et al. Crawling Gait Planning for a Quadruped Robot with High Payload Walking on Irregular Terrain[C]//Proceedings of the 19th IFAC World Congress, 2014. IFAC, 2014: 2153-2158.
- [17] McGhee R B, Frank A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits[J]. *Mathematical Biosciences*, 1968, 3: 331-351.
- [18] Messuri D, Klein C. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion[J]. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1985, 1(3): 132-141.
- [19] Hirose S, Tsukagoshi H, Yoneda K. Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain[C]//Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on. IEEE, 2001: 181-186.
- [20] Nagy P V. An investigation of walker/terrain interaction[D]. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University, 1992.
- [21] Pack D J, Kang H S. An omnidirectional gait control using a graph search method for a quadruped walking robot[C]//Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on. IEEE, 1995: 988-993.
- [22] Kalakrishnan M, Buchli J, Pastor P, et al. Fast, robust quadruped locomotion over challenging terrain[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 2665-2670.
- [23] Yazdani R, Majd V J, Oftadeh R. Dynamically stable trajectory planning for a quadruped robot[C]//Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on. IEEE, 2012: 608-613.
- [24] Zhang S, Gao J, Duan X, et al. Trot pattern generation for quadruped robot based on the ZMP stability margin[C]//Complex Medical Engineering (CME), 2013 ICME International Conference on. IEEE, 2013.
- [25] Lin B S, Song S M. Dynamic modeling, stability, and energy efficiency of a quadrupedal walking machine[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2001, 18(11): 657-670.
- [26] Won M, Kang T H, Chung W K. Gait planning for quadruped robot based on dynamic stability: landing accordance ratio[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2009, 2(2): 105-112.
- [27] Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review[J]. *Neural Networks*, 2008, 21(4): 642-653.
- [28] Bajracharya M, Ma J, Malchano M, et al. High fidelity day/night stereo mapping with vegetation and negative obstacle detection for vision-in-the-loop walking[C]//Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013: 3663-3670.
- [29] Ma J, Susca S, Bajracharya M, et al. Robust multi-sensor, day/night 6-DOF pose estimation for a dynamic legged vehicle in GPS-denied environments[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 619-626.

Development status and prospect of quadruped robots

MENG Jian¹, LIU Jinchang², RONG Xuwen¹, LI Yibin¹

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

2. High Technology Research and Development Center, Ministry of Science and Technology of People's Republic of China, Beijing 100044, China

Abstract In nature, there are many types of terrains on which traditional wheeled and tracked vehicles can not move, but mammals can freely. This has fully shown the advantages of the four legged moving method. Inspired by these animals, researchers have done much indepth study on quadruped robots, and have made substantial achievements. This paper reviews the development status of quadruped robots in domestic and abroad, summarizes the key technologies in this field, and points out the development tendency.

Keywords quadruped robot; development status; key technologies; development tendency

基金项目:国家自然科学基金项目(61233014);国家高技术研究发展计划项目(2015AA042201);山东省自然科学基金项目(ZR2013FQ003,ZR2013EEM027)

作者简介:孟健,博士后,研究方向为四足机器人控制系统,电子信箱:mengjian_1986@163.com;

李贻斌(通信作者),教授,研究方向为机器人技术、智能控制理论与计算机控制系统,电子信箱:liy@sd.u.edu.cn

(责任编辑 刘志远)