

浅析 BigDog 四足机器人

丁良宏 王润孝 冯华山 李 军

西北工业大学,西安,710072

摘要:根据 BigDog 四足机器人目前已经公开的技术资料,对 BigDog 机器人的整体概况和主要核心技术点进行了分析。机械系统重点分析了 BigDog 的结构特性和运动特性,以及由此产生的高功率密度问题;通过剖析 BigDog 液压驱动系统基本构成,发现结构仿生的缺陷限制了 BigDog 机动性能的进一步提升。研究表明,复杂地形条件下 BigDog 的运动控制首先取决于姿态的检测和地形的感知,姿态安全是 BigDog 实现持续纵向运动的前提条件。基本行走控制算法研究表明,液压系统的输出特性,能良好地满足 BigDog 的动力需求;通过几种典型的运动状态分析,对 BigDog 的控制实现过程进行了诠释。因非结构化环境移动机器人的智能性主要取决于导航系统的设计,故重点分析了 BigDog 的导航系统,特别是全自主导航部分。最后结合课题组四足机器人的研究经历,对四足机器人的研发提出了一些建议。

关键词:BigDog 四足机器人;液压执行器;仿生学;运动控制;导航;LittleDog

中图分类号:TP242.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.05.001

Brief Analysis of a BigDog Quadruped Robot

Ding Lianghong Wang Runxiao Feng Huashan Li Jun

Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

Abstract: Based on the current technical information of a BigDog quadruped robot which was released, the overall profile and the core technology of the BigDog robot were analyzed herein. Structural characteristics, motion characteristics and high power density issues arising from these were analyzed emphatically in the mechanical system. The basic components of the BigDog's hydraulic drive system were analyzed briefly. Biomimetic structure defects restricted the BigDog's maneuverability to further promotion. In rough terrain, the motion control of BigDog firstly depends on the detection of body posture and perception of the terrain. Security posture is the prerequisite for BgDog's continuous longitudinal motion. The basic walking control algorithm was analyzed briefly. The output characteristics of the hydraulic system just meet BigDog's dynamic requirements. Control implementation process was known by analyzing several typical states of motion. Navigation system of BigDog, in particular fully autonomous navigation part is the emphasis. In unstructured environments, the intelligence of mobile robot mainly depends on the design of navigation system. At last, based on author's research experience on quadruped robot, some suggestions of the research and development on the quadruped robot were proposed.

Key words: BigDog quadruped robot; hydraulic actuator; bionics; locomotion control; navigation; LittleDog

0 引言

2005 年秋天美国波士顿动力公司(Boston Dynamics)首次公开其历经十余载所研制的仿生四足机器人 BigDog,在互连网上引起了全球公众的关注和热议^[1-6]。BigDog 是由美国国防部高级研究计划署(DARPA)提供资金资助,波士顿动力公司承担研制的仿生四足机器人样机,它是仿照人类生活中常见的四足哺乳动物狗的结构,利用现代科技方法制造成的一种机械狗。从 Big-

Dog 的相关视频中可以看到,它具有较高的运动速度、较大的负载能力和超强的机动性能。即便在复杂的非结构化环境中,仍然能够保持自如的行进状态,令人叹为观止。在 BigDog 初始样机实现之后,美国海军陆战队和陆军又追加了更多的资金用于进一步的研发,把 BigDog 列为未来战场的装备之一,预计将来可能会出现在实战中。

BigDog 机器人最引人注目的就是它出众的运动能力,多步态行走、小跑、跳跃 1m 宽的模拟壕沟、爬越 35°的斜坡,能适应山地、丛林、海滩、沼泽、冰面、雪地等复杂危险的地形。目前最大运

动速度为 10km/h, 预期可达 18km/h, 完全能够满足步兵分队徒步急行军的速度要求。BigDog 的另一显著优势, 是能够承载较大的负荷, 标准载荷 50kg, 而且不降低运动性能。BigDog 还有一个更为专业的名字——机械骡 (mechanical mule), 意指机器人运输装备骡马化。用于战地环境随同步兵前行, 并携带各种后勤补给, 这也是美国军方当前对 BigDog 的设计使用要求。

BigDog 是目前陆地移动机器人领域中为数不多的初具功能化的实用机器人。除了基本的运动能力之外, 各种辅助功能也在逐步完善之中。同时, 进一步提升主要性能指标和拓展应用范围的科研工作也在进行中。

在 BigDog 问世之后的 5 年中, 其研发团队先后公开发表 4 篇学术论文, 发布了大量的图片和网络视频, 使更多的人了解了 BigDog 机器人, 同时这些资料也成为机器人领域其他科研人员分析 BigDog 的主要信息来源。BigDog 四足机器人为什么能表现出如此出众的运动能力, 是所有从事机器人研究的人员都十分关注的问题。在已公开的 BigDog 的技术资料中, 哪些技术点是最为关键的? 是形成运动能力最为核心的研究内容? 本文结合本课题组四足机器人的研究经历, 再通过细致地分析 BigDog 的相关技术资料, 尝试从专业的角度来解答这些问题。

1 结构和液压系统

BigDog 四足机器人示意图见图 1。



图 1 BigDog 四足机器人

BigDog 运动能力出众, 关键是选择液压执行器作为关节驱动元件, 并从根本上改进了传统液压系统所存在的若干缺陷, 再把液压执行器与四足机构合理巧妙地整合在一起, 形成了 BigDog 既强壮有力又不乏灵活柔韧的完美机体。

1.1 结构和运动特性

BigDog 共计有 20 个自由度, 其中主动驱动自由度为 16 个, 是主要的力和扭矩输出装置; 4

个足底自由度是完全被动的, 可以提高腿部对地形的适应性。所以, 总输出功率 12.5kW 的发动机主要是向 16 个液压执行器输出功率。具体到每条腿及髋部, 包括髋部横向(侧滑)、纵向(前进) 2 个自由度, 膝关节纵向自由度, 踝关节纵向自由度。

BigDog 的髋部和腿部是实现四足机器人运动的基本单元体(图 2), 每个单元体主要包括: 髋部、大腿、小腿、踝肢体、足及 4 个液压执行器。髋部、大腿、小腿和踝肢体顺次利用 3 个横向铰接销串联构成腿部的基本框架, 髋部利用 1 个机身纵向的铰接销与机身相连; 这些销子在髋部和肢体的

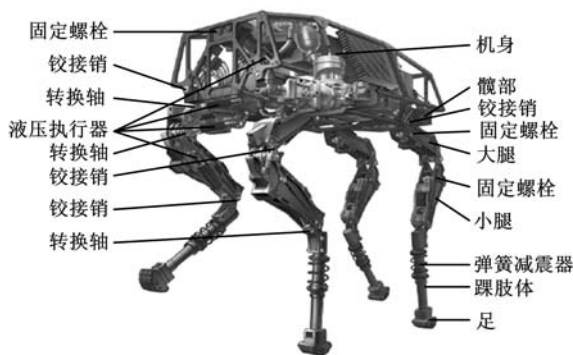


图 2 髋部和腿部体系结构

运动时充当转轴, 是 BigDog 实际上的转动关节。4 个液压执行器输出端轴套机构分别与髋部、大腿、小腿、踝肢体的转动部件相连, 执行器的固定端通过螺栓分别与机身、髋部、大腿、小腿连接。BigDog 的大腿粗短, 平衡位置接近水平, 靠近机身; 小腿和踝肢体较为细长, 平衡位置位于机身投影面四角; 髋部为细长条状物, 内置于机身纵向首尾两侧。小腿的液压执行器以踝关节为轴, 推拉踝肢体作旋转运动, 借助转换轴把直线运动转换为旋转运动; 大腿下侧液压执行器以膝关节为轴, 推拉小腿转动; 大腿上侧执行器以髋部和大腿之间的铰接销为轴, 推拉大腿转动, 固定端位于髋部下侧; 机身首尾两端上方斜置的执行器以髋部机身铰接销为轴, 推拉髋部转动。其中, 髋部的转动意味着腿部生成横向运动, 腿部整体绕机身转动, 偏离机身纵向, 形成侧滑。大腿上侧液压执行器为髋部纵向驱动器, 由于活塞杆运动输出端远离转动关节, 所以大腿运动摆幅最小, 便于大扭矩输出。从构造原理上看, BigDog 的髋部和各肢体工作装置与普通的挖掘机毫无二样, 大腿如同动臂, 髋部、小腿和踝肢体如同斗杆; 主要的差别在于 BigDog 机构更加精致、布局更加紧凑。

四足机器人在行走时不论每条腿有多少个自由度, 都可以把它简化为只有一个自由度的直腿,

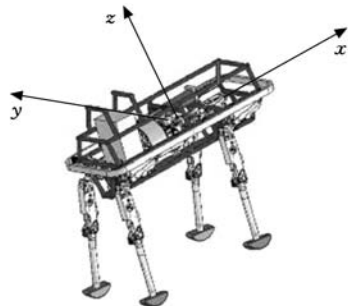


图3 四自由度简化模型

如图3所示。髋部纵向驱动器拉动这条直腿旋转,直腿支撑地面,以支撑点为圆心完成一个由后至前的单摆旋转运动。切向拉力为机器人的机身提供一个前进方向斜上方—水平—斜下方这样变化的力,重心在地面的反作用力下被撑过单摆的最高点,产生位移。这个拉力始终有水平方向的分力,借助地面的反作用力,实现机身的水平运动;还包括一个在重力方向变化的先升后降的分力,导致机身出现起伏的运动特性。直观上,四足机器人在行进过程中,重心始终处于颠簸起伏的状态。这个特性也是所有足类机器人明显区别于其他移动机器人的显著特性,比如轮式、履带等机器人只有在非结构化环境,地面崎岖不平时才能呈现上述特性,而四足机器人在任何可行走路面都呈现这个特性。四足机器人的重心在运动过程中周期性的起伏,意味着行走过程中要全程控制自身的重量,消耗机器人发动机大量的功率,对于纵向行走而言,这种消耗其实是无用功。实际上四足机器人消耗在这方面的无用功要超过用于水平行走的有用功。选择四足这种结构,是希望机器人在行进时可以抬腿越过不适合落足的位置,有选择地下脚,从而到达轮式或者履带式机器人无法行走的地域。因此,只要选择了这种结构,就必须面对重心起伏大的功率消耗问题。除 BigDog 之外几乎所有的四足机器人在设计时都无法根本解决这个痼疾,即无法提供足够功率来保证除基本水平运动以外的巨大无用功消耗。BigDog 采用液压驱动这种强功率输出方式,从根本上解决了这一难题。

BigDog 在行进时为了提高运动速度,同时便于腿部支撑重心越过单摆旋转最高点,机身通常会略微前倾,这样同相位步态后腿需要伸长一些。前腿作为主要的支撑杆,后腿配合前腿支撑重心越过最高点,也防止了同时出现2个主支撑杆可能造成的内耗。前腿的落足点必须超过髋部纵向关节转轴的投影点,锁住膝、踝关节,由髋部纵向驱动器输出扭矩,拉动机身前进;后腿根据速度和

地形的情况,落足点可以在转轴投影点的前方、正下方和后方,主要还是髋部纵向驱动器输出扭矩,当腿长需要增大时,膝、踝关节配合输出扭矩伸展关节,更多时候靠力锁住关节,保持姿势。这样看来,BigDog 虽有16个驱动器,但在如对角步态行走时,驱动系统的功率主要集中在两条支撑腿的髋部纵向驱动器实施输出,后腿的膝、踝关节只有配合伸长腿部时才输出一定的扭矩,迈步腿只需要消耗少量的功率用于摆腿。那么随之而来的问题是,发动机能否在这一时段把全部或者可能最大的功率通过油压的传输输送到这2个驱动器。BigDog 显然是具备这个油压分配输出能力的,它把功率输送到当前主要输出扭矩的驱动器,实现功率的合理分配。BigDog 机载动力系统的高功率密度是很值得分析的,以下的数据对比可以深刻地反映出四足机器人的设计难度。BigDog 目前最大运动速度可以达到10km/h,并且发动机与机体处于分离状态,机体重量低于70kg。假设此时发动机按照12.5kW最大功率的2/3输出,可知当前的功率密度高达119kW/t。同为陆地移动装置的第三代主战坦克M1A2的功率密度只需要17.5kW/t,而公路最大运动速度可超过70km/h。把这两种移动装置各自极限速度状态进行对比,可知BigDog的运动效率只有M1A2履带式坦克的1/48。从传统移动装置的设计来看,足类这种效率过低的运动执行机构基本不被考虑,这也是四足机器人发展缓慢的一个重要原因。因此,纯机械制造的四足机器人若想获得一个较快的速度和良好的机动性能,大幅度提高发动机的功率密度是一个首要的先决条件。

从动力学角度看,BigDog的持续纵向运动意味着大功率的不断输出,髋部纵向是主要的功率输出装置;机身调整姿态时,多数在原地或者小范围空间移动,机体消耗的功率降低,主要靠各个关节力输出来支撑机体。当BigDog遭遇测滑或复杂路面时,髋部横向驱动器及膝关节和踝关节驱动器就要发挥它的作用。这3个部位的关节主要是帮助机器人调整机身姿态,通过多冗余自由度的变化提高机器人适应复杂路面的能力,或者遭遇险情时协助髋部纵向驱动共同实现功率输出,从而移动机身。这3个部位在运动时,关节的转角比较大,相应形成的肢体运动幅度也较大,有利于机器人适应崎岖不平的地面。所以,BigDog的16个液压执行器有比较明确的分工。髋部纵向主要负责扭矩的输出,摆幅通常较小,剧烈运动时也可实现较大的摆幅,是核心驱动器;髋部横向主

要是协助调整机身姿态,只有在侧滑的情况下,输出大扭矩,摆动幅度比较大,多数时间处于平衡位置;小腿和踝肢体主要负责调整机身姿态,同时因其细长且摆幅大,是机器人纵向迈步和增大步幅的主要实现机构,采用力输出的方式控制,遭遇复杂地形时也会输出扭矩协助髋部纵向驱动器。

1.2 液压系统

在 BigDog 推出之前,其实已有许多研究人员想到了利用液压驱动器实现对四足的关节驱动。这是因为,传统的电机驱动无法满足四足机器人快速运动的设计要求。原因有以下几点:①电机的功率相对不足,按照 BigDog 的尺寸结构,最多可以选择 200~400W 的电机,与 BigDog 液压平均每个驱动器可达 800W 相比仍显很低,且无法实现总功率的变化分配输出;②电机的工作状态不理想,电机通常只有转速达到一定值才能实现额定功率输出,而足类机器人关节摆幅通常只有 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,因而电机始终处于低速、小转角、往复加减速的工作状态,低功率输出且自身内耗太大;③电机的附带装置太多,既占空间又增加重量,增大了机身的设计难度;④需要拖电缆或者背负电池,不利于野外环境的自由行走。电机曾被大量用于足类机器人的驱动,但都远远达不到 BigDog 的运动状态。

传统的液压系统也存在若干痼疾,在四足机器人这样的移动装置中使用至少有两点显得尤为突出:①漏油或者密封问题;②冲击载荷导致的漏油问题进一步加剧,同时机械部分的形变会影响活塞杆直线往复运动的精度。四足机器人在运动的过程中,作为一个主要靠机械打造的刚性体,与地面因为撞击而产生可观的冲击载荷,而且载荷的大小和方向都始终呈现无规律的变化,这种工作状态对于传统液压系统而言是完全不能容忍的。BigDog 恰恰克服了这一点,波士顿动力公司所设计和制造的这套液压驱动系统,应该是 BigDog 机器人前期研究最大的技术突破点。从策略上讲,就是单纯机器人设计无法解决的问题,要回到最基础的研究领域,从基本的液压系统的改进方面下手,进而再把它应用到机器人的驱动实现过程中。

BigDog 的液压驱动系统是由一个变量活塞泵在汽油发动机的驱动下同时对 16 个液压执行器实施油压的输出,以达到功率输出的目的。这个环节关键的技术点在于如何实现快速并且变化的油压分配,从而实现力和扭矩的分配和输出,这也是 BigDog 的核心技术之一。液压传动有 2 个

特性:液压系统的油压大小取决于外界负载,执行元件的速度取决于液压系统的流量。这 2 点恰好与四足机器人肢体的负载及关节的转动相对应。发动机根据机器人机体各关节所承载的负荷及转速,控制自身转速进而控制活塞泵的油压输出,适应机器人运动时变化的动力需求,并具有预测的能力。机器人的运动速度越快,或者机体姿态变化越剧烈,相应的油压输出就越大,反之亦然,这也是 BigDog 适应地形变化能力强的一个重要原因。BigDog 的液压系统最大油压输出可达 20.68MPa(3000PSI),属高压输出。主液压系统油路下接并联的 16 个子液压执行器,每个执行器的响应频率达到 500Hz,可以满足关节快速定位的要求。相较传统的液压装置,BigDog 的液压执行器要小巧精致得多,满足了四足机器人驱动器个头小、力量大的设计要求。

图 4 所示是一个基本的液压执行元件,执行器右端是一个轴套机构,活塞杆是直线往复运动,而机器人的肢体是旋转运动,所以运动需要转换。以铰接销为转轴,活塞杆推拉肢体,执行器所在肢体的框架充当铰杆,形成运动转换。活塞杆外侧另有 2 根辅助杆,同步往复运动,分担活塞杆承受的冲击载荷。轴套机构和关节转轴由于载荷大,易磨损,对材质的选择要求很高。液压执行器把主液压系统油路的油压引入到子系统中,根据所在关节的载荷需求,具有航天品质的 2 级电液伺服阀调整本单元的油压和流量输出,实现力和扭矩的变化输出,并可双向输出。



图 4 液压执行器

BigDog 机器人的运动效率主要取决于 3 个方面:运动方式造成的内耗、机械结构的传动效率和控制造成的内耗。运动方式的内耗包括重心的起伏、腿部相对机身的摆动等。机械部分主要包括 16 个主动关节和液压执行器内部及输出端运动转换机构。液压执行器采用低摩擦的液压动力密封器件提高缸体的传动效率;其余两部分取决于机械结构的加工和装配精度,以及轴、销、轴承等元件的材质和加工精度。此外,髋部和腿部的基本框架对加工的一致性要求也很高,最大程度降低了机体尺寸误差对运动造成的影响。

1.3 结构仿生学

机器人学是仿生学研究的一个主要分支。四

足机器人的 3 个基本系统——结构、运动控制和导航,无一例外都与动物(人)仿生学的研究有着密切的关系。BigDog 的前期研究工作主要集中在结构(驱动)的设计和运动的控制上,这也是实现机器人基本运动能力的 2 个主要方面。波士顿动力公司在哈佛大学仿生研究成果基础之上,把液压驱动与四足机器人的结构比较理想地整合在一起,也就造就了目前的 BigDog 四足机器人。BigDog 除了有较强的刚性以外,为了减少冲击载荷对整个机身的影响,必须增加减震系统,提高机器人的柔韧性,因此,BigDog 踝关节以下部分安装了弹簧减震系统。四足动物本身的肌体结构是非常复杂的,除了骨骼、肌肉之外,还有韧带、肌腱、跟腱等增加柔韧性和灵活性的器官。这些功能器官目前还无法在机器人身上真正地实现,即使关节部位往往也很难模仿,如动物和人的髋关节为多轴性关节,BigDog 采用常规技术无法实现,只能把髋关节的横向和纵向自由度分开实现。所以,人类只能尽量地模仿四足动物的肌体构造,实现四足机器人的运动功能。

1.4 小结

BigDog 的机械结构设计和驱动的选择,是实现运动的基本平台。只有先解决了这 2 个问题,后续的运动控制和导航的研究才能更有针对性,并且通过样机展现出来。

2 运动控制

BigDog 的运动控制取决于其特殊的机体构造。控制系统同时对 16 个液压执行器进行控制,多自由度耦合联动造成了肢体的千变万化,形成了机器人的各种动作姿势。这也是四足机器人对地形适应能力强的根本原因。但是,多余度变换复杂,增大了控制的难度。同时,四足的支撑结构不稳定,重心位置偏高,易发生偏移,运动控制相比轮式、履带式机器人,要困难得多。

四足机器人在运动过程中既要保证能够快速行进,同时还要控制重心的位置,保持机身的相对平稳。BigDog 运动控制的核心问题就是控制机体的平衡,建立机体与地形之间静态或动态的平衡系统,机器人的站立、行走、小跑以及各种运动状态间的相互转换,都必须保持平衡。

建立四足机器人的运动平衡主要考虑 3 个方面的因素,即自身姿态、地形状况和运动状况。BigDog 的运动控制包括姿态感知、地形感知和运动生成。前 2 步是在运动中寻找机体与地面之间的平衡状态,第 3 步是通过控制实现这个平衡。

2.1 姿态和地形的感知

姿态和地形的感知主要是借助各种传感器来完成,BigDog 总共携带至少 70 个各类传感器单元,大多数用来检测自身姿态和内部各机构组成的状态参数。四足机器人的多余度必须依靠大量的传感器来感知机身和肢体部分参数的变化,以此为依据作为运动控制的基本条件。

姿态感知包括机身和肢体两部分的状态检测。IMU 负责检测机身 3 个角度的变化和 3 个线加速度的变化,是机身状态检测的主要手段。16 个主动自由度的角度变化由关节编码器来完成。各个关节的负载由测压元件来检测。

地形感知主要包括踝肢体测压元件配合各个关节编码器感知,以及立体视觉装置感知。目前主要是通过力大小的变化再配合关节转动的角度来感应地形的变化。该方法是被动式,足底先接触地面再判断地形,对于简单的地形可以应对,但是对于复杂地面,需要避开某些深坑,选择落足点时,未来主要靠立体视觉。

此外,发动机和液压系统的检测也是运动控制必须考虑的。发动机转速和载荷要在预测和实际输出之间不断调整。液压系统的检测包括油温、油压和流量的检测等。

2.2 控制实施

BigDog 作为移动机器人,纵向的持续行走、跑等功能是研究追求的目标,由于地形的影响,机身的姿态需要经常调整,才能确保纵向运动的平稳性和连贯性。故 BigDog 的控制研究也主要围绕这两方面展开。

2.2.1 行走控制和步态调整算法

BigDog 的基本行走控制采用图 5 所示的流程实现。控制系统以髋部和腿部的单元体为单位,通过虚拟环境计算求出每条腿所承受的载荷和关节需要输出的扭矩,检测运动效果并反馈回虚拟部分,更新频率为 200Hz。首先,根据期望的行进速度,规划腿部运动到落足点过程的轨迹;其

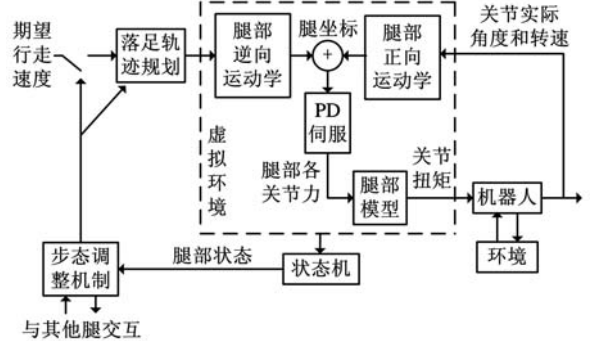


图 5 基本行走控制框图

次,在虚拟环境下,利用腿部当前的关节转角和转速作为正向运动学参数,与期望的规划进行比对,PD 伺服不断修正腿部各关节应输出的力,得到虚拟的腿部状态模型;最后,把虚拟求得的各个关节所需的扭矩指令发送至驱动系统,实现行走,并检测关节转角和转速。此外,虚拟过程通过状态机获得腿部状态,步态调整算法协调 4 条腿的位置,对步态进行修正,再把反馈信息发送回轨迹生成单元。同时步态调整算法负责腿之间的通讯,腿的初始状态转换为不同的稳定的四足行走步态,如对角、同侧和奔跑等。临近腿运动时避免运动区域重合,防止腿部发生碰撞,也包括摆动腿与支撑腿之间发生碰撞。步态调整算法还要降低机体运动的内耗程度,当迈步腿落地之后,支撑腿要及时离地,防止同时发力而形成类似于人腿劈叉这种不利于连续行走的动作。

BigDog 持续的纵向运动都是借助以上控制方法实现的。BigDog 在平整地面直线运动时,可实现对角步态的跑动,速度在短时间内由零加速到 8km/h。整个过程加速均匀,机身纵向和水平都保持平稳,腿部动作协调连贯;在速度达到最大时,后腿伸长协助前腿支撑身体的动作非常明显。行走或慢跑时,为了减少重心起伏无用功的消耗,可以减小步幅加快频率,使机身的重心尽可能在支撑摆的最高点附近的高度运动。但是随着速度的提升,腿的步幅需要加大,重心起伏加剧;腿的摆动频率加大,摆腿消耗的功率增加;机械部分传动的消耗也增大。这几点不利的因素都限制了 BigDog 的速度进一步提升。

按照传统的足类机器人设计思路,BigDog 除了运动学模型之外应该还有一个动力学模型,但是在相关论文中并未出现。结合 BigDog 液压驱动系统以及电机的控制方法,对 BigDog 在动力学方面作如下的推断。充分利用液压传动的特性,把动力学的分析和计算转移到液压系统的控制中完成。液压系统的力和扭矩输出主要取决于终端执行器的负载,根据负载的大小和变化,调整发动机的转速,实现对液压总路油压的控制,再通过电液伺服阀控制进入单个执行器的油压、流量和流速等参数,实现根据负载的变化对应输出与之平衡的力和扭矩,还包括加速和减速的情况。

利用电机控制四足机器人,需要预测下一时段各个关节的负载,设定电机的输出,但这个输出无法达到液压快速实现与负载平衡的输出效果。电机的输出或大于终端的负载,或小于终端的负载,只在少数情况下两者刚好平衡。这就是常见

电机驱动足类机器人在行走时,机身多数会出现晃动的原因,即受力不平衡。而 BigDog 在运动过程中,除非遭受突然的外力作用,大多数情况下都能处于动态的平衡中,关键还是它的液压系统的适应能力发挥了决定性的作用。当 BigDog 加速时,输出的扭矩需要大于当前的负载,这是利用了伺服阀的控制流速的功能。当某个执行器所在肢体载荷突然增大,也可利用伺服阀的增压功能,实现在执行器中油压大于总路油压的性能。因此,传统的动力学模型对于 BigDog 而言,大部分的工作是由液压系统的控制来完成的。

2.2.2 姿态算法

BigDog 控制机身姿态主要是借助力矩的输出控制腿部肢体的姿势,使机体与地形之间保持平衡状态。主要包括两方面:一是各条腿的载荷尽可能均匀,把机身的重量平均分配到 4 条腿;二是机身的高度和姿势需要调整,重心尽可能位于机身投影面的几何中心,这个过程仍然需要腿部的运动来实现。具体地讲,姿态算法调整地面反作用力在腿部各肢节的分布,使各条腿所承受的竖直方向的载荷尽可能相等,并指向髋部,降低各个髋部的载荷,每个髋部驱动输出尽可能均匀。这样可以防止载荷集中于某条腿或某一关节,造成机身运动时失去平衡。当地形发生明显变化时,机身的高度和姿势就需要重新调整,防止重心向机身边缘倾斜,造成机身纵向或横向的倾翻,这个过程需要借助地形感知共同实现。利用测压元件和关节编码器来判断足底是否与地面接触,再结合关节角度的连续变化值,可以估测地形的崎岖程度。借助预测信息,姿态算法控制腿与崎岖的地面逐渐适应。姿态控制算法通过改变机身偏航、俯仰、横滚、高度等参数,使机器人适应地形的变化,协调一致。这样即使不借助视觉等高级传感器,只利用测压元件和关节编码器这样简单的传感器,也可以使 BigDog 具备较强的适应复杂路面的能力。处于斜坡行走时,注意调整机身高度和姿势,适应坡度的变化;上坡时机身前倾,下坡时机身后倾,斜坡等高线行走时机身内侧倾斜。

足底打滑时,意味着支撑腿与地面的反作用力突然降低,这时如果支撑腿的髋部驱动器仍然保持原有的扭矩输出状态,会造成机身失控,加剧机身倾斜程度。BigDog 采用牵引控制(traction control)系统,利用测压元件及时发现支撑腿的受力变化,迅速降低髋部扭矩输出,调整小腿和踝肢体的摆动,进入姿态调整过程,恢复平稳状态。此外,陡峭地形和崎岖程度高的地形,也要利用测压

元件和关节编码器预测,作为牵引控制系统的感知条件。

侧滑是机器人纵向运动时,机身突然遭受横向的外力,造成机身横向倾斜,髋部横向驱动器输出扭矩,腿部横向侧摆,形成了侧向滑步。线加速度计测出机身横向的加速度,支撑腿预测机身的横向速度,外侧腿迅速向倾斜方向摆动,根据速度和加速度预测摆腿的幅度。若外力过大,则要连续地走交叉步,直到侧向的速度降为零。这个情景通常只出现在纵向行走的过程中,由于左前腿和右前腿的步态相位刚好错开,降低了左前腿和右前腿横向干涉发生碰撞的可能性,后腿亦然。

姿态控制算法的核心点是保持机器人的平衡状态,行走控制和步态算法必须遵守这个前提条件。地形复杂时,优先考虑姿态的控制,其次是步态及运动速度。遭遇险情时,及时降低行走速度,控制系统利用驱动系统的快速响应能力,以调整机身姿态作为当前主要的控制输出,恢复稳定状态。只有在较平坦地形行走时,可降低姿态控制的权重,把提高行走速度作为主要的功能实现。所以,BigDog 的高速行走、小跑和跳跃等动作都是在平整地面完成的,而冰面打滑、机身横向侧滑都是在低行走速度下完成的。

2.3 典型运动场景分析

2.3.1 冰面打滑

运动控制与机械结构是紧密相联的,良好的运动控制性能只有在能力强的样机平台上才能充分地展示出来。在 BigDog 所有视频中,负载状态下在冰面打滑摔倒后经反复调整姿态最终重新站立这一段,展现了 BigDog 运动能力最佳的一面。BigDog 机器人的姿态和地形快速感知、运动控制算法快速生成、牵引控制快速调整扭矩输出、液压传输快速响应、液压大功率输出、机体结构刚柔相济等优点在极短时间内全部呈现出来。因此分析这一段机器人所经历的变化过程,可以更好地了解 BigDog 机器人运动的实现过程。过程分析如下:

(1)进入冰面后,运动速度过快导致冰面无法提供足够的摩擦力而足底打滑,造成机身大幅度倾斜,机器人摔倒。

(2)IMU、关节编码器、测压元件检测获取机身倾斜的角度、各肢体角度及载荷,获取当前的姿态信息。

(3)牵引控制系统利用感知的信息,降低髋部扭矩输出,防止机身进一步倾斜。

(4)运动控制系统快速计算各个驱动器应输

出的扭矩、关节转动的角度,求出恢复平稳站立状态所需的参数值。

(5)运动控制指令发送至驱动系统,发动机通过液压泵把油压快速分配传输至各个驱动单元。

(6)16 个液压执行器根据各自所需,控制各个关节旋转,驱动肢体运动,机身试图重新恢复站立平稳状态;

(7)若再次失稳,回到步骤(2),如此反复直到站稳为止。

以上过程都是在非常短的时间内顺次完成的,且多次循环。可以看出整个机体的快速响应能力非常之高,但最关键的还是驱动系统强大的力和扭矩输出。在这个打滑失稳的过程中,机器人极易侧扣而失败,各个液压驱动器必须提供足够的力和扭矩输出,才能保证各部分肢体能够快速运动,在机器人进一步倾斜之前重新恢复平衡,实现运动控制的目标。针对可能出现的类似险情,BigDog 团队已把机器人的自翻正能力列为下一步研究的重点,即使机器人发生侧扣也可以自调整重新站立,大大增强了 BigDog 的野外生存能力。

2.3.2 跳跃

BigDog 跳跃 1m 宽模拟壕沟的运动过程可分为三阶段,即助跑、起跳和落地。首先,跳跃需要较高的水平速度,BigDog 采用奔跑步态,前后腿为同相位步态,既利于加速,又便于跳跃,无需步态转换。后腿发力,伸直,离地,机身前倾;同时前腿逐渐伸直,跟随后腿离地,机身在空中调整水平状态。机身在空中滑行一段距离后,机身后仰,后腿先着地,前腿随后落地。起跳之前一步,有一个蓄势待发的过程,后腿离地之后,前腿稍微延时片刻,借助机身前倾更大的前冲力,离地腾空;机身由前倾急剧变化为后仰,后腿落到前腿起跳位置,发力,快速离地腾空;腿部在空中收紧,防止刮擦,机身借助惯性在空中滑行,同时调整俯仰变化转为水平状态。机器人腾空到最高点后,机身开始前倾,前腿舒展,准备着陆。前腿与地面接触以后,稍做停顿,又快速离地,缓解重力方向的冲击,机身前倾的俯仰角历经一个起伏的变化过程,同时向前滑行,后腿落在前腿的首次着陆处,机身转为水平,恢复奔跑状态。这个奔跑跳跃的连贯动作充分展现了 BigDog 大腿强劲的爆发力,液压执行器的大扭矩输出发挥了关键的作用;对比一般行走,髋部纵向执行器输出行程增大,大腿摆幅相应加大,以获取地面更大的反弹力。控制系统根据动物仿生学运动的变化过程,及时调整各个

肢体在运动中的姿态变化,以保证动作的连贯性,同时降低冲击载荷对机体特别是腿部的冲击。

3 导航

2005 年之前,导航并不是波士顿动力公司研究的重点,最初的导航系统是由 NASA—JPL 提供的,也就是 MER 火星探测器上所采用的以立体视觉为主的导航系统。随着 BigDog 结构和运动控制系统的不断完善,导航的重要性也越发显得突出。BigDog 是面向野外非结构化或者战地环境而设计的,所以机器人的环境识别和自身定位是必需解决的问题。

实际使用中,BigDog 采用了人员前方引导,机器人随后跟进的策略实现。对路面的感知和自身的定位由机器人自身完成。因而,BigDog 具有自主运动能力,采用自主导航外加人工引导的方式实施运动。用于导航的传感器主要包括:GPS、SICK—LIDAR 平面激光扫描仪、IMU、Point-Grey 立体视觉相机等 4 种。GPS 作为美国军事领域最通用的全局导航定位系统是必不可少的。LIDAR 平面激光扫描仪用于机器人追踪引导人员,实现跟踪的导航方式,这种用法也是 BigDog 的新创意。IMU 测量机身 3 个角度和 3 个线加速度的变化量,用于局部定位,BigDog 因为速度快,是移动机器人领域为数不多的利用了线加速度的机器人。立体视觉是 BigDog 所有导航传感器中最为重要的组成部分,担负着检测机身位姿变化和路面识别 2 个功能,之前在 MER 火星探测器上已经成功实现这两点。

3.1 立体视觉^[7-8]

立体视觉目前在机器人非结构化环境的导航研究主要包括 3 个部分:测量障碍物距离、视觉测程、构建环境地图,其中测程是三者的核心。BigDog 的视觉导航研究目前主要是围绕测程而展开。视觉测程是利用追踪前后帧图像中同一特征点的过程,来获取机器人运动前后的变化量,也就是估测机身空间 6 个自由度的变化量来实现机器人的局部定位。此外,针对四足机器人的运动特性,又增加了地形重建的功能,便于选择落足点,防止路面存在深坑等可能会对机器人造成的伤害。视觉测程可弥补陀螺仪零点漂移对角度测量的影响,以及关节编码器对位置变化测量的困难。所以对于 BigDog 机器人而言,立体视觉兼顾了障碍物测距、地形感知和还原,以及位姿检测 3 个方面。

3.2 全自主导航

人工引导的方式实质仍旧是遥控导航,导航最终环节——路径规划需要人工协助完成。BigDog 已开始探索完全脱离人工干预、自主实现环境感知和路径规划的全自主导航研究。当前主要研究内容包括:自主识别环境信息,规划机器人躲避和绕过障碍物的路径,步态控制追踪已规划的路径。激光和视觉传感器检测出障碍物的位置和距离,并一直追踪障碍物的位置变化;构建消耗地图,标出障碍物的位置,利用消耗地图规划出机器人到达阶段目标的路径,机器人与障碍物之间要留出安全距离;路径跟踪算法负责协调控制系统,生成适当的步态算法,控制机器人的速度和位移,使机器人按照规划好的路径运动。

立体视觉装置全程提供机器人正前方 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 范围的图像信息,利用测量景深的功能,还原三维地形图,作为基本的环境地图,同时检测低位置的障碍物。立体视觉、关节编码器和 IMU 共同实现机器人位姿变化的检测,即空间 6 个自由度的变化量,实现局部定位。激光扫描雷达扫描机身水平高度范围内的场景,利用点云分割算法剔除误扫描的地面信息,这样可以识别机身高度范围的障碍物,并且随着机器人移动在视野范围之内始终追踪这些障碍物。

路径规划包括 4 个部分:①记忆障碍物的位置;②生成消耗地图;③稳定路径;④平滑路径。记忆系统随着机器人视野的变化,更新记忆存储中的障碍物,增新的同时剔除无用的,对于视野外仍然有利用价值的障碍物需要保留。构建机器人周围的二维栅格地图,包括机身后侧刚经过的环境,与路径规划算法同步迭代更新;计算出每个栅格机器人穿越的消耗值,当某一值较大而周围的价值又明显较小时,可确定为障碍物或者目标。采取 3 项措施确保路径规划的生成稳定可靠:利用上一步规划的机器人投影位置衔接下一步的规划,跳过当前步,防止机器人横向徘徊;为确保路径跟随的连续性,利用前 2.5s 至上一步规划的完整路径预测下一步的路径规划,防止地面干扰腿部造成的机身航向偏移对路径规划的影响;利用一段较长的走过的规划路径,可以缩减生成新的路径规划所用时间,简单环境可行。采用规整的栅格生成的路径通常在连接处会有方向突变,造成方向控制的紊乱;连接处的轨迹需要曲线光滑,同时每次规划再粗略地使用这个光滑连接,可以缩减下一步规划时间,最后生成平直光顺的路径轨迹。事实上,以上路径规划的过程与人或者动

物遭遇相同场景时采取的规划思路非常相似。导航规划实质上是利用仿生学,把与人或者动物相似的连续路径规划思维过程采用技术的方法重现,应用到机器人之上。

BigDog 是目前非结构化环境移动机器人领域中,少数敢于尝试在树林这样的环境中采用全自主导航方式实施运动的机器人。尽管在 26 次实验中取得了 23 次成功的良好结果,但这并不意味着这种导航方式已完全满足 BigDog 的实用要求。机器人的全自主导航运动是人类研究机器人的终极目标,但在目前的研究框架内,要达到人类智能水准的导航能力是很难实现的。原因很简单,机器人的大脑,即计算机及相关程序,还无法达到人类和动物的大脑对环境识别和决策规划的高度。虽然视觉装置可以采集图像信息,但对于图像的分析 and 处理还是要依靠图像处理算法,而图像处理技术目前仍处于发展阶段。此外,最关键的一点,是人和动物具备对视觉场景关键信息瞬间识别和判断的能力,而机器人目前还远达不到这样的高度。当然,随着人工智能和计算机技术的快速发展,以及人类对于自身大脑的结构和功能的认识,机器人的智能水平还是可以慢慢提高的。目前主要还是以大量的环境实验为基础,不断修改导航系统的各种算法,提高对环境细节的识别能力,积累更多的先验信息,来应对一些常见的环境识别和路径规划问题。

3.3 LittleDog 的导航研究

LittleDog 也是波士顿动力公司所开发的四足机器人,其实质是 BigDog 实验室环境下的替代版,提供给美国高校用于 BigDog 的导航和运动控制研究。当前主要的研究内容是复杂环境地形的感知和运动控制研究,斯坦福大学、麻省理工学院等高校目前正在承担这项研究^[9-11]。从图 6 可看出 LittleDog 在实验环境下所遭遇的地形复杂程度远超过 BigDog 实际所面临的环境难度。利用立体视觉精确地还原三维地形,把地形信息作为已知条件,再引入学习机制, LittleDog 经过反复实验,可以逐步适应这样的环境条件,选择最佳的行走路径。在实验室里模拟更加困难的环境



图 6 LittleDog 四足机器人

来考验机器人,从实验中找到解决的方法,再应用到 BigDog 的实物样机中,可以大幅提高研究的效率。实现阶梯蹦跳、走梅花桩等对运动控制和地形识别能力要求极高的复杂动作,是 LittleDog 当前最主要的研究目标,已取得阶段性进展^[12-14]。

3.4 小结

非结构化环境移动机器人的导航研究是一项极具挑战性的工作。理想化的导航系统是以不变应万变,以有限的算法处理任意变化的环境特征;目前的导航现状是以万变应不变,不断地改进算法和补充先验信息,但也只能处理某一静态的特定场景,局限性很大。因此,非结构化环境的导航研究首先必须明确环境,然后针对该环境的结构特征开展算法的研究。BigDog 的导航研究特别是全自主导航部分,对于提升这个领域的研究水平具有很好的推动作用。

4 建议

国内四足机器人的研究大多采用电机作为驱动装置,造成机器人行走速度较慢、机动性能差,无法达到 BigDog 那样的运动状态,也制约了控制和导航的进一步研究。从 BigDog 的分析中可以看出,只有从根本的驱动方式改进上着手,足类机器人的运动能力才能得到大幅度的提高。四足机器人的基本研究思路可归纳为 4 点:驱动、结构、运动控制和导航。综合前面的分析,提出如下建议。

(1)驱动和结构。采用高功率密度的驱动装置,如液压系统,利用高性能伺服装置实现力和扭矩平稳快速输出;设计精致紧凑的仿生机体结构,以减轻质量,关节部位兼顾强度和灵活性,提高传动效率;设置缓冲减震装置,增强柔韧性。

(2)控制。提高控制系统与外部环境的柔顺性,增强机器人适应复杂地形的能力;针对复杂地形和险情遭遇引入牵引控制,设置应急动作程序;采用状态机配合步态控制生成算法。

(3)导航。建立以立体视觉为核心的导航系统,结合激光、IMU、GPS 共同实现环境的感知和机身定位;采用视觉测程、构建三维环境地图等方法,针对非结构化环境特征设计算法体系;由自主导航配合人工导航逐步向全自主导航拓展。

以上建议的中心仍然是机体结构及驱动装置的设计和实现,只有拥有一基本运动能力强的样机平台,四足机器人的研究才能得以全面展开。

5 结语

本文尝试从专业角度解读 BigDog 四足机器

人,围绕 BigDog 的核心技术进行分析,试图找出其运动能力超强的原因。目的是为国产四足机器人的研究提供一些参考和建议。BigDog 机器人实际研究所包含的信息量远远超过本文所提到的几点。由于 BigDog 早已被美国军方立项,即将列装,所以一些关键技术的相关论文中会有所保留。随着国内在四足领域研究的深入,相信会逐步掌握四足机器人的研究方法。

BigDog 的设计实现从总体上看并没有超出常规的技术范畴,所采用的各种技术方法在以往的机器人或者其他领域都曾出现过。针对四足机器人的特性,个别技术实现了较大的突破和创新,还有些技术直接引用了其他领域的尖端成果。综上所述,BigDog 的成功之处可概括为以下三点:①单项技术优势明显;②系统整合高效合理;③细节处理精益求精。

BigDog 作为当今世界最先进的四足机器人,虽然表现出很强的运动能力和遥遥领先于其他足类机器人的各项性能指标,但其与真正的四足哺乳动物相比,BigDog 的研究还有很长的路要走。比如速度还有待大幅度地提高,实现奔跑以后,还要具备在高速跑动中变向的能力,此外,复杂环境全自主导航运动的实现,也是所面临的技术瓶颈之一。

现代科技在过去的百年中得到了高速的发展,人类先后发明创造了如坦克、喷气式飞机和核航母等先进的移动装置,但真正与人类生活关系密切的四足哺乳动物的仿生研究制造才刚刚进入实质性的阶段。四足动物复杂的肌体构造,若用现代科技实现完全意义上的仿生还原,人类未来仍旧面临着巨大的技术挑战。

参考文献:

- [1] BigDog—the Most Advanced Rough—terrain Robot on Earth[EB/OL]. [2011-03-10]. http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html.
- [2] Buehler M, Playter R, Raibert M. Robots step outside[C]//International Symposium of Adaptive Motion of Animal and Machines. Ilmenau, Germany, 2005: 1-4.
- [3] Playter R, Buehler M, Raibert M. BigDog[C]//Proc. of SPIE. Orlando (Kissimmee), FL, USA, 2006:62302O.
- [4] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Big-dog, the Rough—terrain Quadruped Robot[C]//Proceeing of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control Seoul,

Seoul, Korea,2008: 6-9.

- [5] BigDog Overview[EB/OL]. [2011-03-10]. http://www.bostondynamics.com/img/BigDog_Overview.pdf.
- [6] Raibert M. Legged Robot & BigDog[EB/OL]. [2011-03-10]. http://www.coe.uncc.edu/~jm-conrad/ECGR6185—2008—01/notes/BigDogRobot_Presentation.pdf.
- [7] Wooden D, Malchano M, Blankespoor K, et al. Autonomous Navigation for BigDog[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage,USA, 2010: 4736-4741.
- [8] Howard A. Real-time Stereo Visual Odometry for Autonomous Ground Vehicles [C]//International Conference on Robots and Systems. Nice, France, 2008: 3946-3952.
- [9] Kalakrishnan M, Buchli J, Pastor P, et al. Learning Locomotion over Rough Terrain using Terrain Templates[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA, 2009: 167-172.
- [10] Kim Y. Getting the Position and the Pose Using Stereo Vision[EB/OL]. [2011-03-10]. <http://www.stanford.edu/class/cs229/proj2007/Kim—Getting the Position and the Pose Using Stereo Vision.pdf>.
- [11] Kolter J, Kim Y, Ng A. Stereo Vision and Terrain Modeling for Quadruped Robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan, 2009:1557-1564.
- [12] Shkolnik A, Levashov M, Manchester I, et al. Bounding on Rough Terrain with the LittleDog Robot[J]. The International Journal of Robotics Research,2011,30(2): 192-215.
- [13] Shkolnik A, Levashov M, Itani S, et al. Motion Planning for Bounding on Rough Terrain with the LittleDog Robot[EB/OL]. [2011-03-10]. <http://web.mit.edu/shkolnik/www/publications/LD—bounding.pdf>.
- [14] Byl K, Shkolnik A, Prentice S, et al. Reliable Dynamic Motions for a Stiff Quadruped[M]. Berlin: Springer Tracts in Advanced Robotics, 2009.

(编辑 何成根)

作者简介:丁良宏,男,1978年生。西北工业大学机电学院博士研究生。主要研究方向为四足机器人立体视觉导航、视觉测程。发表论文 2 篇。王润孝,男,1957 年生。西北工业大学副校长、教授。冯华山,男,1975 年生。西北工业大学机电学院助教、博士。李 军,男,1981 年生。西北工业大学机电学院博士研究生。