

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.010

四足机器人智能交互控制研究

刘 蝉, 巴腾跃, 刘德龙, 邱旭阳

(北京机械设备研究所, 北京 100854)

摘要: 针对四足机器人在辅助作业背景下,通过远程遥控或地面站控制难以满足人机灵活交互需求的问题,在研究实现四足机器人基本步态控制基础上,结合无线定位和激光雷达感知环境赋予机器人避障和人员跟随功能,采用 Openpose 姿态识别方法,通过视觉传感器进行人机交互,实现不同姿态对机器人基本运动行为和跟随任务的控制,并基于 ROS 系统开展不同环境条件下交互识别和控制效果测试,姿态识别速度为 20 帧/s,理想环境下准确度大于 90%,机器人反应时间小于 1 s。

关键词: 四足机器人;步态控制;人员跟随;姿态识别;人机交互

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0062-05

Intelligent Interaction Control of Quadruped Robot

LIU Chan, BA Tengyue, LIU Delong, QIU Xuyang

(Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: In auxiliary operations quadruped robots cannot satisfy the needs of the flexible human-computer interaction through remote or terrestrial control. Based on the basic gait control of quadruped robots, the functions of obstacle avoidance and personnel follow for robots are developed by combining the algorithms of wireless positioning and laser radar perceived environment. Then, by using the Openpose gesture recognition method, the control of basic motion and follow-up task with different attitudes is realized through human-computer interaction on vision sensors. And the interaction identification and control effect under different environmental conditions are tested under the ROS frame. The results show that the gesture recognition speed is 20 frame/s, the recognition accuracy in the ideal environment is greater than 90%, and the robot's reaction time is less than 1 s.

Key words: quadruped robot; gait control; personnel follow; pose recognition; human-computer interaction

早在 20 世纪 60 年代,美国一个研究报告便指出:在自然界的许多地形中,轮、履式的底盘行驶受限,而很多四足动物却能行走自如,这与其落足点离散、腿部肌肉可减振降噪、脊柱能缓冲并传递能量等特点有关,肯定了足式机器人在地形适应性上不可取代的优势。近年来,随着驱动技术、逆向工程和智能控制等技术的高速发展,开发灵活机动的四足机器人成为新的研究热点^[1-2]。经过近 60 年的发展,该研究已经完成了从理论样机、实验样机到

物理样机的转变,并成功走向商业化^[3-4]。

国外针对机器人的研究起步较早,发展相对成熟,美国从 1980 年开始研发第一款高性能移动机器人到 2016 年推出一系列具有颠覆性意义的机器人,历时 36 年。其中,波士顿动力公司在 DARPA 计划资助下为军方开发的 BigDog^[5],是第一台先进的复杂地形四足机器人,其后续相继研发出奔跑型机器人 WildCat,体型更加轻便、运动更加灵活的 Spot、SpotMini 系列机器人^[4]。瑞士、意大利、俄罗

收稿日期: 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

通信作者: 刘蝉,女,工程师, E-mail: lcyinchen@163.com。

引用格式: 刘蝉,巴腾跃,刘德龙,等. 四足机器人智能交互控制研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 62-66.
LIU Chan, BA Tengyue, LIU Delong, et al. Intelligent interaction control of quadruped robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 62-66.

斯、韩国、日本等国家都纷纷推出了自主研发的四足机器人。中国该方向研究虽起步晚,但从2010年研制出国内第一台液压驱动的四足仿生机器人开始,至今经过短短几年的发展,我国便至少有十家单位具备研发高性能整机四足机器人的能力,并在国际上取得了非常耀眼的成绩。其中典型产品有云深处科技的“绝影”系列机器人^[6],其在国际同类产品已经达到先进水平,而宇树科技的Laikago、Aliengo、A1系列机器人,在体型和运动控制上并不逊色,且价格更加亲民。

除去对四足机器人本体性能,如承载力、续航时间、稳定性和静默性的改善,智能化也是它走向实际应用的必须发展点之一,即使其在感知外界环境、适应复杂地形及人机交互等方面更加智能。而上述的多数四足机器人研发公司早期将更多的精力投入在了机器人本体性能的提升上,将产品作为通用平台出售。在智能化发展上,与由其提供平台的高校、教学服务等研究单位多处于相对缓慢的探索阶段,且因未知环境感知和本体自主控制的复杂性,距离实现可落地应用的成熟智能化产品还较远。这也是早期四足机器人研发难以军用,导致许多公司减小其体型与成本,转向民用市场的主要原因之一。

为探索智能交互对四足机器人的控制效果,本文在已有的机器人本体上,研究其运动步态模型,在实现基于ROS平台的机器人基本运动控制和行人跟随功能后,采用OpenPose姿态识别的方法,使得机器人通过视觉传感器识别人员的姿态指令,并根据不同姿态执行相应的运动行为及跟随功能。

1 四足机器人运动控制

当前对四足机器人的运动控制方法主要包括基于静态稳定的控制方法、基于动力学模型的控制方法和基于生物神经调节机制和行为特性的控制方法三种。其中基于动力学模型的控制方法一般分为逆动力学控制和虚拟模型控制。前者需要机器人的逆动力学方程,但四足机器人的动态运动过程中存在拓扑结构时变、多关节驱动等问题,因此动力学方程极为复杂、控制时计算量大,且环境复杂,难以精准建模。后者是一种动态控制方法,其“虚拟腿”模型通过一个外部力(虚拟力)作用在指定位置,使其与关节力矩在系统上产生相同的效果。

根据已有四足机器人平台的特点和实现运动控制的目的,本文对机器人采用动力学模型控制,在交互过程中,机器人执行对角步态^[7]运动。一个步态周期可分为摆动相和支撑相,腿机构空中摆动

的时间段为摆动相,腿机构支撑于地面时间段为支撑相,摆动相与支撑相时间相等,各占一半的步态周期。时序图如图1所示,处于对角线上的两条腿动作完全一样,即同时处于摆动相或支撑相。

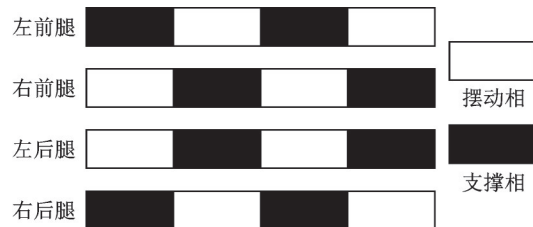


图1 对角步态运动时序图

Fig.1 Timing diagram of diagonal gait movement

对角步态运动逻辑说明如图2所示,其中左前腿1与右后腿4为一组,右前腿2与左后腿3为一组。根据该运动逻辑,本文设计了一种基于复合摆线形式的足端轨迹规划方法,通过建立虚拟控制模型仿真求解机器人运动过程中所有关节的参数值,然后输入实体机器人进行运动控制,并且为保证机器人稳定运动,同时根据足端力传感器和IMU等反馈的数据调整关节控制参数。在实现对角步态基础上,再调节步态速度和幅度,赋予机器人不同的运动速度及转动功能。

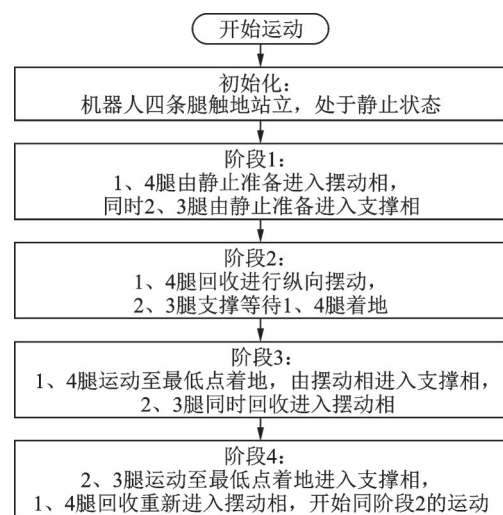


图2 对角步态运动逻辑

Fig.2 Movement logic of diagonal gait

此外,为利于后续机器人交互控制,将机器人运动过程中各关节控制参数的解析计算按运动类型封装,如前进、后退和旋转等。机器人从而在交互控制或执行任务时,上层算法以运动类型和运动速度的方式不断发送信息给底层解析,得到各个关节的控制参数后传给电机控制模块,机器人连续变动关节执行相应运动。

2 人员跟随

为研究人机交互对机器人任务级功能的控制,同时考虑到伴随保障是室外环境下对足式机器人的主要应用需求之一,本文基于信号到达角度(Angle of arrival, AOA)^[8]定位模块和激光雷达赋予其人员跟随和简单避障功能。

2.1 基于 AOA 定位的人员跟随

AOA 是一种通过标签或移动站测量基站方位角和仰角来实现定位的技术,具体采用的定位模块将 2 个基站集成在一个小芯片上(图 3),标签由被跟随人携带,基站则安装在四足机器人前上方,以减少其他器件对接收信号的干扰。

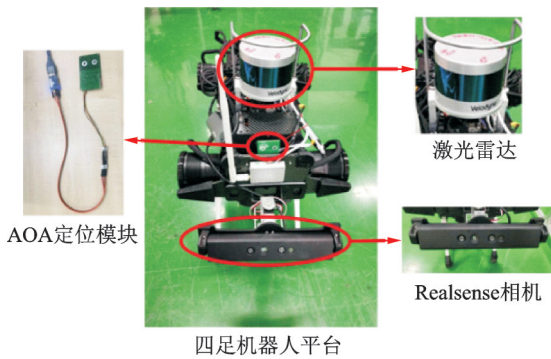


图 3 交互控制传感器部署

Fig.3 Interactive control sensors deployment

基站根据接收到的标签角度信号,计算出人员相对基站的距离、弧度等信息,并通过串口发送给机器人处理器。处理器接收数据后,根据基站反馈的“数据质量”对接收到的数据初步筛选,后采用卡尔曼滤波对信号预处理,处理后发布的 AOA 信息帧率约为 10 帧/s。

基于上述发布的标签距离和方向数据,通过控制机器人前进速度和旋转角度两个参数减少基站与标签间距离,以实现稳定跟随,其主要跟随逻辑如下:

(1) 根据标签距离和偏角大小线性计算机器人控制参数,跟随速度随距离(偏角)增大而增大;

(2) 跟随过程中,当相距人员较远($>20\text{ m}$,定位信息不准确)或已跟上人员($0.6\sim 0.8\text{ m}$)时,停止跟随,当距离更小时($<0.6\text{ m}$),机器人后退,以与人员保持安全距离范围;

(3) 机器人每次接收单一类型运动控制指令,在整体跟随上,以偏角参数优先,即偏角较大时,先旋转至较小范围内,再前进跟随,当偏角较小时,与距离对比择优控制机器人跟随运动。

2.2 结合雷达感知的避障绕行

四足机器人前方安装有 16 线的激光雷达

(图 3),机器人在运动过程中可扫描周围环境构建局部三维地图,在室内环境下可提前构建地图,机器人运动时可实时更新环境中动态障碍物,规划路径以实现避障^[9]。但考虑到人员伴随功能更多应用在室外未知环境,因此本文机器人执行人员跟随任务时,在避障上并不利用三维激光雷达构建地图作路径规划,而是直接利用近距离感知的障碍物雷达数据进行避障绕行,其主要避障逻辑如下:

(1) 跟随过程中,机器人以人员位置为目标移动,当障碍物进入预设的距离范围内,则启动避障环节,绕过障碍物后再继续跟随人员;

(2) 将雷达扫描的机器人前方环境数据按角度划分为左、前、右个方向,将三方向数据聚类以确定障碍物位置,从而控制机器人左右转或后退等来避障;

(3) 避障绕行过程根据扫描的障碍物大小及人员方向确定避障策略,即避障同时也尽量靠近人员。

该避障策略适合绕开树木、行人和薄墙等简单障碍物,其不同于基于地图的路径规划,能在复杂结构障碍下避障。但其计算量更小,且人机伴随作业有人员对环境的判断与引导辅助,该避障功能符合应用需求,在未知环境下更实用。

3 姿态识别

姿态识别是通过联系检测到图片中人体的关键点来区分人体姿态。人体关键点通常对应人体上有一定自由度的关节,比如颈、肩、肘、腕、腰、膝和踝等,通过对人体关键点在三维空间相对位置的计算,来估计人体当前的姿态。

3.1 Openpose 原理

本文采用的姿态识别方法是在美国卡耐基梅隆大学开源的 Openpose^[10]人体姿态识别项目基础上,为满足四足机器人嵌入式开发板的低计算力和实时性要求,进行了提速处理的姿态识别工程实现。

识别原理为对输入的一帧图像,首先经过卷积神经网络(Convolutional neural networks, CNN)进行特征提取,然后通过两分支的多阶段 CNN,上分支用来预测关节点置信度图(Part confidence maps),下分支用来预测关节点亲和力(Part affinity fields, PAF),在每个阶段之后,来自两个分支的预测以及图像特征被连接用于下一阶段;然后应用非最大抑制算法计算热图中的峰值,值作为该关节点的置信度分数;基于上述获得的关节点信息(位置,分数)和 PAF,对每一肢体所对应的两个关节

点之间的PAF信息进行积分得到该肢体的置信度,完成肢体连接;最后将多人解析转换为图问题,利用匈牙利算法进行部图匹配,将一个人的关节点连接起来,合并为整体骨架。

为提高姿态识别速度,同时避免重新训练模型,本文主要通过对输入图像预处理,调节识别关节点个数、去除图像校正及人体候选阈值等参数的修改,减少非必要运算来提高识别速度。

3.2 姿态识别控制

常见的整体骨骼检测包含识别15、18和25个身体/脚步的关键点检测,运算时间与检测出的人物数无关,但与检测关键点个数有关。本文选取检测人体的15个关节点(检测点对应关系为0-鼻子,1-脖子,2-右肩,3-右肘,4-右手腕,5-左肩,6-左肘,7-左手腕,8-胯中心,9-右胯,10-右膝,11-右踝,12-左胯,13-左膝,14-左踝)。根据识别的关节点位置信息,通过计算关节点间的位置关系,共设置识别6种姿势,分别对应控制四足机器人的5种运动行为和人员跟随功能,对应关系如图4所示,因考虑机器人高度和视场角问题,该6种姿态主要根据人体上身的关节位置计算划分。



图4 不同姿态对机器人运动的控制关系

Fig.4 Control relationship of different postures on robot movement

4 机器人运动控制实验

在已有的四足机器人平台上,基于ROS框架进行人机交互与运动控制功能开发^[1],以话题的方式进行节点间图像和数据信息传递,其中主要有两条执行路线,如图5所示:一是四足机器人的运动控制,主要包括机器人运动控制参数输出节点(Robot_control),和到具体底层各关节运动执行参数的解析(CtrlPara_parse);另一个是基于Realsense摄像头读取图像的姿态识别,主要包括图像读取(Realsense_ros)、关节点检测(Openpose_ros)和姿态分类(Pos_analysis)节点。执行过程中,机器人通过相机不断读取外界图像,预处理后以话题形式将图像发布,Openpose_ros节点读取图像进行关节点检测,将检测结果发布,姿态分类

节点计算相关关节点的位置关系,确认姿态类型并输出。在上述过程中,四足机器人控制线处于等待或执行上一条姿态控制状态,在执行过程中并行读取姿态识别结果,当判断到其他姿态命令,修改上层控制参数,发给CtrlPara_parse模块解析底层的各关节运动参数,控制机器人执行相应运动。

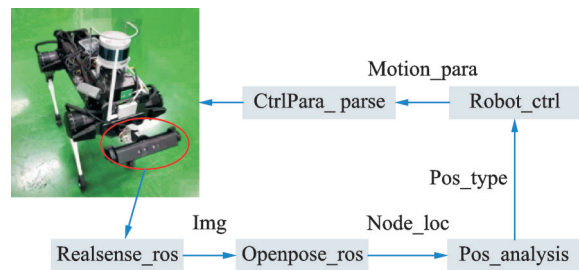


图5 四足机器人交互控制流程

Fig.5 Quadruped robot interactive control process

实验过程中,在四足机器人的嵌入式计算平台TX2上,姿态识别的帧率能达到20帧/s,满足人机交互需求。姿态识别效果如图6所示,即便较暗条件,视野内人体不完全时,机器人依旧可稳定识别人体关节,但准确划分姿态类型需要检测到相关的所有关节点。

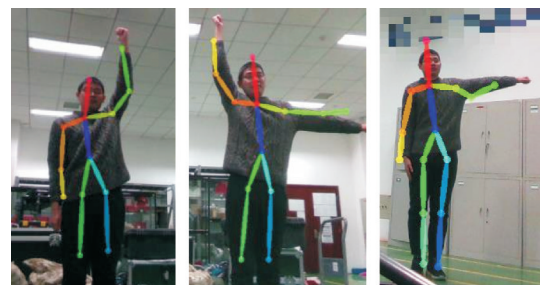


图6 姿态识别效果图

Fig.6 Gesture recognition effect

在具体的机器人运动控制上,其控制参数发送频率为50帧/s。当机器人处于静止状态时,姿态识别结果判断周期与识别频率一致为20帧/s。当机器人处于运动状态时,对姿态识别结果的判断频率为2帧/s,以保证其执行当下运动的流畅性。

实验过程中,针对简单的基本运动控制逻辑,如前进后退、左右转等交互控制,机器人在识别到姿态命令后仅执行短时间的相应运动,只有连续识别到姿态后会保持持续运动,中途也可通过“停止”姿态来控制机器人立刻停止运动。为降低误检测,本文设置的Openpose关节点检测的置信度较高,导致人员距离机器人较远或人员处于较强背光条件下无法检测到人体关节点,具体针对不同距离和环境采集到人体图像的姿态识别效果测试如表1所示。

表1 不同条件下Openpose姿态识别效果

Table 1 Openpose gesture recognition effect under different conditions %

测试环境	距离		
	1~3 m	3~6 m	6~10 m
室内明亮环境	>90	>90	>80
室外晴朗环境	>90	>90	>80
室外较强背光	>80	>50 (漏检增加)	基本无法 识别

测试结果发现,只要机器人准确识别到姿态类型后,便可准确做出相应运动,且反应时间小于1 s。

此外,通过姿态交互开启四足机器人的跟随避障功能,以验证人机交互对机器人任务级运动的控制和研究开启其他计算后对姿态识别性能的影响。当四足机器人识别到“行人跟随”姿态指令后,通过跟随定位模块进行行人定位,根据目标的距离和方位,自动调整选择转向或前后退行为及运动速度进行跟随,并同时采用激光雷达检测障碍物进行简单避障。在四足机器人的计算平台上,测试发现,开启跟随功能后,较大数据传输的激光雷达检测并未对姿态识别帧率和精度造成明显的影响,而且可成功通过姿势控制机器人停止跟随或直接切换到其他基本的运动控制状态。

5 结 论

通过Openpose识别不同姿态,实现了对四足机器人不同基础运动和简单任务的交互控制,并对比了不同环境条件下的姿态识别精度。该研究更多专注于对四足机器人交互控制功能的整体实现,距离应用还有许多细节性问题需进一步研究,如当机器人视野内有多个人员时,如何准确锁定指挥者姿态。此外,该交互功能基于视觉图像,姿态识别的关节检测细微,识别目标距离有限,受环境影响也较大,对于室内交互应用尚可,但对于复杂室外环境交互,其可靠性还难以满足实用需求。

参考文献:

[1] 汪世庆,单鑫,刘逸驰.四足机器人的发展现状及趋势[J].科研与教育,2020,4:227-228.
WANG Shiqing, SHAN Xin, LIU Yichi. Development status and trend of quadruped robot[J]. Research and Education, 2020, 4:227-228.

[2] SANDEEP B, TAMIL S T. Design and development of an automous quadruped robot[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1012(1):012016.

[3] 王吉岱,卢坤媛,徐淑芬,等.四足步行机器人研究现状及展望[J].制造业自动化,2009,31(2):4-6.
WANG Jidai, LU Kunyuan, XU Shufen, et al. Research situation and prospect on quadruped walking robot[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(2):4-6.

[4] 刘京运.从Big Dog到Spot Mini:波士顿动力四足机器人进化史[J].机器人产业,2018(2):109-116.
LIU Jingyun. From Big Dog to Spot Mini: The evolutionary history of Boston power quadruped robots[J]. Robot Industry, 2018(2):109-116.

[5] WOODEN D, MALCHANO M, BLANKESPOOR K, et al. Autonomous navigation for bigdog [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). [S.l.]: IEEE, 2010:4736-4741.

[6] 朱秋国.“绝影”机器人助力智慧安防[J].中国测绘,2019(3):31-33.
ZHU Qiuguo. “Picture” robot helps smart security[J]. China Surveying and Mapping, 2019(3):31-33.

[7] 陈久朋,金红军,张道义,等.一种四足机器人对角步态仿真分析[J].电子科技,2020,33(5):37-41,80.
CHEN Jiupeng, JIN Hongjun, ZHANG Daoyi. Diagonal gait simulation analysis of a quadruped robot[J]. Electronic Science and Technology, 2020, 33(5):37-41, 80.

[8] 张怡,席彦彪,李刚伟,等.基于卡尔曼滤波的TDOA/AOA混合定位算法[J].计算机工程与应用,2015(20):62-66.
ZHANG Yi, XI Yanbiao, LI Gangwei, et al. TDOA/ AOA hybrid positioning algorithm based on Kalman filter in NLOS environment[J]. Computer Engineering and Applications, 2015(20):62-66.

[9] ZHU B, ZHANG J, WANG Y, et al. A pedestrian detection and tracking method for robot equipped with laser radar[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2020. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110604.

[10] CAO Z, SIMON T, WEI S E, et al. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). [S.l.]: IEEE, 2017:1302-1310.

[11] 郭欣桐,战艺.基于ROS的服务型机器人新型控制方式[J].电子世界,2016(11):8-9.
GUO Xintong, ZHAN Yi. A new control mode of service robot using robot operating system[J]. Electronics World, 2016(11):8-9.