

基于数字化的施工现场巡逻机器人开发研究

张红路 于宝洋 黄 龙 马一峰
中国二十二冶集团有限公司 河北唐山 063000

摘 要: 基于当前数字化高速发展, 施工现场不稳定危险频出的背景下, 研究和开发智能巡逻机器人具有重要意义。本文以施工现场巡逻为例, 以节约人力成本, 提升施工现场安全为中心, 推动国家智能化、数字化发展为目标进行探索研究。

关键词: 数字化; 人工智能; 巡逻机器人; 施工现场

1. 研究背景

国家“十四五”发展规划, 推动数字化发展, 加快我国数字化转型为本次智能巡逻机器人研究提供理论依据和策略建议。近年来, 物联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等技术加速创新, 日益融入经济社会发展各领域全过程, 世界主要国家和地区纷纷加快数字化转型战略布局。加快推进数字化转型, 是“十四五”时期建设网络强国、数字中国的重要战略任务。近期, 中央网络安全和信息化委员会印发的《“十四五”国家信息化规划》, 部署了“构建产业数字化转型发展体系”重大任务, 明确了数字化转型的发展方向、主要任务、重点工程, 为未来五年我国数字化转型发展提供了有力指导。

因此, 我们要全面推进信息技术在国民经济和社会发展各领域的广泛应用, 加快数字化发展, 为建设社会主义现代化强国、实现第二个百年奋斗目标贡献力量。

2. 研究内容

具体研究内容如下:

2.1 通过使用动力学建模, 找到各物理量数学关系, 使机器人能够自由运动。

对于机器人的轮式运动, 可做出如下理想化假设:

- ①体质量等效集中于质心位置;
- ②忽略腿部运动对于轮式运动的影响;
- ③忽略腿部连杆的质量;
- ④驱动轮与地面是无滑动的滚动摩擦。

基于上述理想化假设, 可将轮腿式双足机器人的轮式运动等效简化为摆长可变的双轮倒立摆模型, 如图1-1所示。

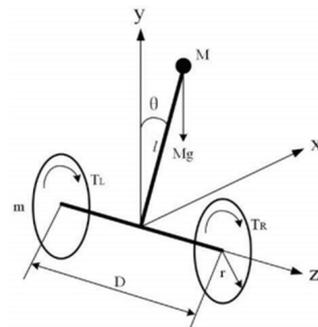


图1-1 双轮倒立摆模型

2.2 通过使用“LQR”控制算法, 计算机器人左右驱动轮最大力矩, 使其满足实际要求。

依据 Soildworks 模型, 当关节电机角度为 150° 时测量得到各物理参数表如图2-1。

参数符号	参数值	参数单位
m	1.5	kg
M	6	kg
r	0.074	m
I	2788.825×10^{-6}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
l	0.1	m
J_z	153013.57×10^{-6}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
g	9.8	m/s^2
J_y	182050.38×10^{-6}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
D	0.523	m

图2-1 各物理参数表

从图中得知, 机器人在1秒左右到达目标转向角度, 此过程对于机器人的速度和俯仰角度等状态变量的影响非常小。因此当左右驱动轮的最大力矩为 1.2N·m, 满足实际要求。

2.3 使用VMC控制算法, 计算机器人高度调节运动和翻滚角, 使其满足实际要求。

在 Simulink 中搭建腿部运动的仿真控制模型, 如图3-1所示, 当末端执行力映射到关节电机力矩的系数取最

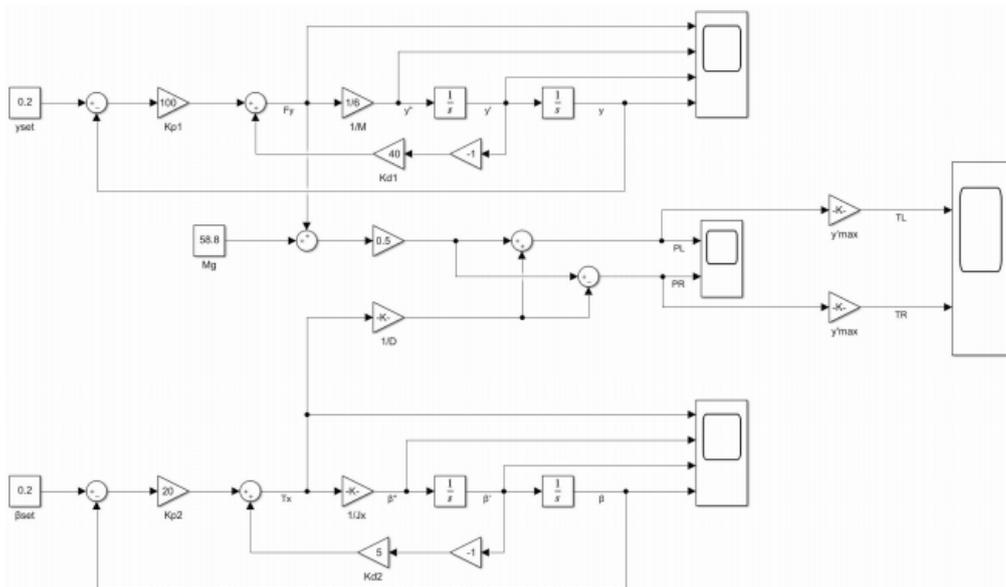


图 3-1 腿部运动的 Simulink 仿真控制模型

大值时，左右侧关节电动力矩随末端执行力变化的情况。

由图中可以看出最大力矩为 $5.4\text{N}\cdot\text{m}$ ，在所选电机的峰值扭矩范围内，满足实际要求。

3. 创新点

机器人采用 ARM Cortex-M4 微控制器，其适用于高密度计算的场景能够高效的浮点数计算，使得数据处理更为快速和准确。同时机器人采用先进的电源管理技术，支持多种低功耗模式，例如：sleep/stop/standby 等。通过合理的电源配置和管理，实现了低功耗运行，延长了使用时间。

为了实时监控施工现场环境，其配备了先进的图传系统，通过稳定信号源连接可实时观看现场情况，确保第一时间记录当时的状况。通过配备高敏感度报警式烟雾感知器，可全天候监测现场烟雾情况，如发生火灾等重烟雾事件，可第一时间将警报信息传输到项目部。

本课题将轮腿式双足机器人的腿部运动分为支撑相和跳跃相两种情形分别进行动力学建模。支撑相情形下左右驱动轮在腿部运动的过程中始终保持与地面接触，此时腿部连杆运动速度相对较慢，且左右腿部连杆在伸缩运动结束后会稳定在目标状态保持静止，高度调节运动和地面自适应运动均属于支撑相。

跳跃相则是指机器人跳跃运动过程，此情形下机器人的驱动轮在起跳后会离开地面，跳跃过程中腿部连杆以很快的速度进行伸长再收缩运动。

对于机器人的腿部运动，做出如下理想化假设：①

机体质量等效集中于质心位置。②忽略轮式运动对于腿部运动的影响。③忽略腿部连杆的质量。④腿部运动过程中，机器人始终保持平衡状态，即俯仰倾角始终为零。⑤同一侧的两个关节电机响应同步，控制力矩大小相等，方向相反。

机器人腿部运动控制采用虚拟模型控制（VMC）方法。通过添加弹簧-阻尼虚拟组件来建立腿部运动所需的虚拟力，然后通过虚拟力求出腿部连杆末端执行力，最后由末端执行力计算出每个关节电机所需的驱动力矩。

对于在 y 方向上的虚拟力 F_y ，设弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数为 k_{p1} ，阻尼系数为 k_{d1} ，则用弹簧-阻尼虚拟组件来表示虚拟力 F_y 的方程为：

$$F_y = k_{p1}(y_{set} - y) + k_{d1}(0 - \dot{y}) \quad (4.17)$$

对于绕 x 轴的虚拟力矩 T_x ，设弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数为 k_{p2} ，阻尼系数为 k_{d2} ，则用弹簧-阻尼虚拟组件来表示虚拟力矩 T_x 的方程为：

$$T_x = k_{p2}(\beta_{set} - \beta) + k_{d2}(0 - \dot{\beta}) \quad (4.18)$$

通过虚拟力计算腿部连杆末端执行力的方程已在第二章中进行推导，将式（4.17）和式（4.18）代入式（2.27）中得到：

$$\begin{cases} P_L = \frac{K_{p1}(y_{set}-y) - K_{d1}\dot{y} - Mg}{2} + \frac{K_{p2}(\beta_{set}-\beta) - K_{d2}\dot{\beta}}{D} \\ P_R = \frac{K_{p1}(y_{set}-y) - K_{d1}\dot{y} - Mg}{2} - \frac{K_{p2}(\beta_{set}-\beta) - K_{d2}\dot{\beta}}{D} \end{cases} \quad (4.19)$$

由末端执行力计算出每个关节电机所需驱动力矩的公式见式（2.30）。

根据式(2.25)、式(2.26)和式(4.19),可在Simulink中搭建腿部运动的仿真控制模型(见vmc.slx),如图4-8所示。其中 y'_{\max} 是关节电机角度 α 从 $150^\circ \sim 240^\circ$ 所对应 y' 当中的最大值乘0.5(由jacobi.m计算得到),TL和TR表示当末端执行力映射到关节电机力矩的系数取最大值时,左右侧关节电机力矩随末端执行力PL和PR变化的情况。通过观测Scope中的输出值来调节弹簧-阻尼虚拟组件的弹性系数和阻尼系数,最终设定 $k_{p1}=100, k_{d1}=40, k_{p2}=20, k_{d2}=5$ 。

4. 技术评估方法

本文对机器人轮式运动进行计算。计算方法需要考虑一下几个方面:(1)左右驱动轮的最大力矩;(2)机器人高度调节运动和地面自适应力;(3)机器人翻滚角力矩。

首先通过动力学方程建立控制模型,再使用Simulink搭建控制方框图进行仿真计算,根据仿真结果调整控制参数,最后分析本系统在该参数下的控制效果。

对于因腿部运动导致重心高度发生变化的非线性情况,则是采用区间插值的方法,将重心高度分为三个区间,不同区间采用不同的LQR反馈参数,同一区间使用相同的参数,保障机器人在各个高度下均能实现良好的控制效果。

5. 预期效益

本研究将投入施工现场质量安全管理,从而节省了

人力资源,提高了施工现场质量安全管理效率。

结束语

通过使用动力学建模、VMC控制算法结合施工现场质量安全情况,制作出一款专为现场质量安全管理工作智能化巡逻机器人,预计本产品面世后,将为施工现场质量安全管理工作提供极大的便利。因作者在本专业方向研究深浅,故含有原理、公式错误的地方欢迎专家指正。研发平台为唐山道桥及地基基础技术创新中心。

参考文献

- [1]董立国,侯继红,黎浩阳,等.基于BP神经网络的农业大棚巡逻机器人定位研究[J].机电工程技术,2024,53(07):56-59+63.
- [2]胡兵,王德文,刘欣.基于ROS的巡逻机器人系统设计[J].无线互联科技,2024,21(12):69-72.
- [3]陈静,翟曦,赵紫薇.基于5G通信技术的巡逻机器人定位误差自动补偿方法[J].计算机测量与控制,2023,31(11):266-272.DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.11.040.
- [4]靳荔成,刘一莹,白瑞峰,等.面向校园多机器人协同巡查的路径规划虚拟仿真实验设计[J].实验技术与管理,2023,40(03):93-99.DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2023.03.016.