

苏雷 张磊 邵建根 等. 楼梯清洁机器人的爬楼规划研究 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版) 2023 47(1): 77-81.

SU Lei ZHANG Lei SHAO Jiagen et al. The stair climbing planning of stair cleaning robot [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science) 2023 47(1): 77-81.

文章编号: 1000-5862(2023)01-0077-05

楼梯清洁机器人的爬楼规划研究

苏 雷¹ 张 磊^{1*} 邵建根² 邵建新¹ 刘 宇¹ 刘海涛¹

(1. 南通大学机械工程学院 江苏 南通 226019; 2. 南通明诺电动科技股份有限公司 江苏 南通 226631)

摘要: 为使圆周平动脚式楼梯清洁机器人能完成稳定的下楼动作, 该文研究了其爬楼步态规划方法. 首先基于几何法建立机器人爬楼的运动学模型; 然后将爬楼梯的过程分为 2 个阶段, 并针对这 2 个阶段的运动机理分别采用不同的规划方法; 再基于运动学模型计算出各关节的角度, 并搭建 PID 控制系统对机器人进行控制; 最后联合 Adams 和 Matlab 进行仿真验证. 研究结果表明: 楼梯清洁机器人能够实现稳定下楼功能.

关键词: 楼梯清洁机器人; 楼梯攀爬; PID 控制; 仿真

中图分类号: TP 311 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.01.10

0 引言

近年来, 随着现代化、城市化进程的加快, 城市高楼林立, 繁重的楼道清洁工作引发了人们的关注. 为减轻楼道清洁工作, 国内外学者对楼梯清洁机器人进行了大量的研究, 但这些楼梯清洁机器人普遍存在结构复杂、清洁能力差等问题, 最终都没能推向市场. 文献[1]设计了一款升降式楼梯清洁机器人, 以升降式爬楼结构为载体, 用 2 套弓形结构交替抬升驱动进行楼梯攀爬操作, 但其结构臃肿且防跌落问题没有得到较好的处理; 文献[2]利用平行四边形变形原理设计了一款楼梯清洁机器人, 该机器人清洁模块结构简单, 只通过清洁刷进行清洁工作, 没有相应的吸尘结构, 清洁能力较差.

本课题组研发的圆周平动脚式楼梯清洁机器人^[3]能够较好地清洁楼梯台阶面和休息平台, 并且对其关键技术进行了相关的研究^[4-6]. 目前对楼梯清洁机器人如何稳定上下楼的问题鲜有人研究.

文献[7]提出了一种基于 stable limit cycle model(稳定极限循环模型)的双足机器人爬楼梯间歇控制, 通过对人体动力学建模, 将该模型作为期望轨迹模型, 然后设计一种间歇控制器使得模型输出的关

节角度与期望输出的关节角度之差在期望区间内, 实现机器人稳定地模拟人类上楼梯的运动; 文献[8]计算出 WT 轮椅机器人在攀爬楼梯过程中各种模式下的 Lagrange 动力学方程以及保持轮椅座椅水平的各关节广义坐标的规划轨迹, 并结合计算力矩法设计出 WT 轮椅机器人的主动张紧力控制, 实现机器人能够爬楼梯的功能; 文献[9]提出了一种运用变长倒立摆模型来实现双足机器人爬楼梯步态规划的方法, 并运用虚拟样机进行动态步行仿真. 但以上方法并不适配于楼梯清洁机器人. 针对上述问题, 本文以本课题组研发的楼梯清洁机器人^[3]为对象, 采用多项式拟合和基于 1 阶杆变长倒立摆模型的爬楼规划策略, 设计了一个基于力矩控制的 PID 控制器对关节转动进行控制, 最后通过联合 Adams 和 Matlab 进行仿真验证^[10-15]. 验证结果表明: 该楼梯清洁机器人能够实现稳定下楼功能.

1 机器人下楼梯运动规划

圆周平动脚式楼梯清洁机器人模型如图 1 所示, 由小臂、大臂和机体构成, 电机安装在机体上, 2 个对称的小臂和大臂分布在两侧支撑机体上. 电机通过驱动轴驱动大臂和小臂旋转.

收稿日期: 2022-09-17

基金项目: 上海交通大学海洋交叉学科课题(SL2020MS013) 和南通市基础科学研究计划(JC20202073) 资助项目.

通信作者: 张 磊(1973—), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 主要从事机器人新型机构设计、智能控制研究. E-mail: zhangleint@ntu.edu.cn

爬楼的工作原理如图 2 所示,大臂围绕机体旋转,同时驱动小臂旋转,当小臂落至下一台阶时,机体将被大臂驱动离开当前台阶,直至落在下一台阶,完成了整个向下攀爬运动。



图 1 机器人模型

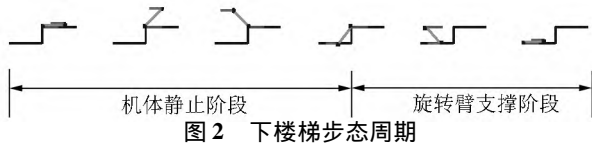


图 2 下楼梯步态周期

机器人在楼道里的清洁工作主要是以下楼方式进行的,故本文研究的目的是下楼的步态规划。机器人进行下一阶楼梯的运动可以分解成机体静止阶段和旋转臂支撑阶段。机体静止阶段始于小臂离开当前台阶,结束于小臂接触下一台阶。旋转臂支撑阶段始于小臂接触下一台阶,结束于机体接触下一台阶。假设忽略大臂和小臂的质量,机器人机体质量集中于质心位置。

1.1 机体静止阶段的运动规划

机器人在小臂接触地面时,有一个垂直于地面向上的冲击力。为减小冲击力,本文采用多项式拟合的方法,对机体静止阶段的关节运动进行拟合,得到相应运动的平滑轨迹。

由于大臂关节和小臂关节在机体静止阶段的最终时刻旋转的角度相等,且初始时刻角度都为 0,为简化计算,令大臂关节旋转的角度 θ_1 等于小臂旋转的角度 θ_2 。则关节运动的轨迹为

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (1)$$

其中 θ 的约束条件为

$$\begin{cases} \theta(0) = 0, \\ \dot{\theta}(0) = 0, \\ \ddot{\theta} = 0, \\ \theta(t_0) = \omega_1. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)~(2)得

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ a_1 = 0, \\ a_2 = 0, \\ a_3 = \omega_1 / (3t_0^2). \end{cases}$$

关节运动由 3 个阶段构成,分别为加速阶段、匀速阶段和减速阶段。设 T_d 为机体静止阶段时间 t_0 为加速(减速)阶段时间。

加速阶段($0 < t < t_0$):

$$\begin{cases} \theta(t) = \omega_1 t^3 / (3t_0^2), \\ \dot{\theta}(t) = \omega_1 t^2 / t_0^2, \\ \ddot{\theta}(t) = 2\omega_1 t / t_0^2. \end{cases}$$

匀速阶段($t_0 < t < T_d - t_0$):

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_1 + \omega_1(t - t_0), \\ \dot{\theta}(t) = \omega_1, \\ \ddot{\theta}(t) = 0. \end{cases}$$

减速阶段($T_d - t_0 < t < T_d$):

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_2 + \omega_1(t - T_d)^3 / (3t_0^2) + \omega_1 t_0 / 3, \\ \dot{\theta}(t) = \omega_1(t - T_d)^2 / t_0^2, \\ \ddot{\theta}(t) = 2\omega_1(t - T_d) / t_0^2, \end{cases}$$

其中 $\theta_1 = \omega_1 t_0 / 3$, $\theta_2 = (3T_d - 5t_0) \omega_1 / 3$ 。

由以上条件得,小臂关节运动轨迹为

$$\begin{cases} x_{xb}(t) = L_2 \cos \theta(t), & 0 < t < T_d, \\ z_{xb}(t) = L_2 \sin \theta(t), & 0 < t < T_d, \\ x_{xb}(t) = L_2 \cos \theta(T_d), & T_d < t < T, \\ z_{xb}(t) = L_2 \sin \theta(T_d), & T_d < t < T. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 旋转臂支撑阶段的运动规划

1.2.1 质心运动轨迹规划 在旋转臂支撑阶段,为保证机器人运动的平稳性,设机体和小臂一直保持水平。

机器人在下楼梯的过程中,其质心高度不断变化,对机器人的质心运动轨迹用 1 阶杆变长倒立摆模型(见图 3)进行简化。

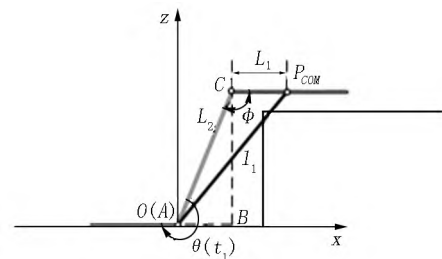


图 3 机器人倒立摆模型

机器人的质心到小臂关节中心点的距离 l_1 为摆长 l_1 为旋转臂支撑阶段初始时刻摆长 l_2 为旋转臂支撑阶段最终时刻摆长 L_1 为大臂关节中心到质心的水平距离 L_2 为大臂长度 H 为楼梯高度.

旋转臂支撑阶段初始时刻见图 4.

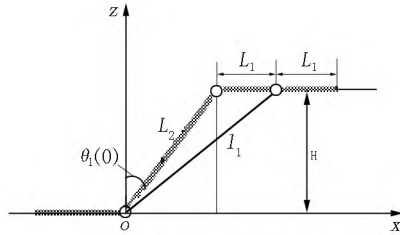


图 4 旋转臂支撑阶段初始时刻

由几何关系得

$$l_1 = \sqrt{(\sqrt{L_2^2 - H^2} + L_1)^2 + H^2}. \quad (4)$$

旋转臂支撑阶段最终时刻见图 5.

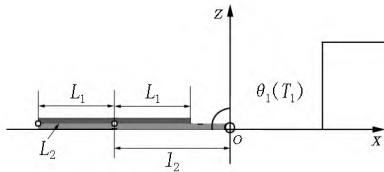


图 5 旋转臂支撑阶段最终时刻

由几何关系得

$$l_2 = L_2 - L_1. \quad (5)$$

由式(4) ~ (5) 得

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 - 2L_1L_2 - 2L_1\sqrt{L_2^2 - H^2}}.$$

设 $\theta_1(t_1)$ 为摆长与 z 轴的夹角 $t_1 = t - T_d$, 由倒立摆运动方程得

$$\ddot{\theta}_1(t_1) - g \sin \theta_1(t_1) / (l(t_1)) = 0. \quad (6)$$

令 $l(t_1) = l_1$. 由几何关系得初始条件.

在旋转臂支撑阶段初始时刻 $t_1 = 0$ 时, 有

$$\theta_1(0) = \arccos(H/l_1). \quad (7)$$

在旋转臂支撑阶段最终时刻 $t_1 = T_1$ ($T_1 = T - T_d$) 时, 有

$$\theta_1(T_1) = \pi/2. \quad (8)$$

由式(6) ~ (8) 得

$$\theta_1(t_1) = (\pi e^{\sqrt{gT_1/l_1}/2} - \arccos(H/l_1)) e^{\sqrt{gT_1/l_1}} / (e^{2\sqrt{gT_1/l_1}} - 1) + (\pi e^{-\sqrt{gT_1/l_1}/2} - \arccos(H/l_1)) e^{-\sqrt{gT_1/l_1}} / (e^{-2\sqrt{gT_1/l_1}} - 1).$$

假设摆长的变化为线性变化, 则

$$l(t_1) = l_1 + t_1(l_2 - l_1)/T_1.$$

由式(3) 和式(4) 可得 机体质心轨迹为

$$\begin{cases} x(t_1) = l(t_1) \sin \theta_1(t_1), \\ z(t_1) = l(t_1) \cos \theta_1(t_1). \end{cases}$$

1.2.2 关节运动轨迹 根据机体质心轨迹 $(x(t_1), z(t_1))$ 和几何关系, 可得在旋转臂支撑阶段的大臂(小臂) 关节角 $\theta(t_1)$.

如图 3 所示, 在 $\triangle ABC$ 中,

$$l(t_1) = \sqrt{x(t_1)^2 + z(t_1)^2}.$$

在 $\triangle ACP$ 中 根据余弦定理有

$$\varphi(t_1) = \arccos((L_1^2 + L_2^2 - l(t_1)^2) / (2L_1L_2)),$$

则

$$\theta(t) = 2\pi - \varphi(t_1).$$

2 控制系统的设计

为实现机器人的稳定下楼, 使用力矩控制的方法让机器人按照上述所规划的运动轨迹进行运动. 通过检测输出的角度作为反馈, 与目标角度之差使用 PID 进行控制, 然后转化为机器人的输入力矩, 对机器人进行驱动, 以达到稳定控制的效果. 控制系统如图 6 所示.

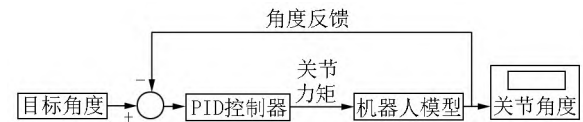


图 6 控制系统

PID 的控制规律为

$$T = k_p e + k_d \dot{e} + k_i \int e dt,$$

其中 T 为驱动力矩; k_p 、 k_d 、 k_i 分别为比例增益、微分增益、积分增益; e 为关节角误差.

PID 参数确定: 使用临界比例法调节 PID 参数, 先调节 k_p 由小到大直至阶跃响应产生等幅振荡, 然后参照经验公式计算出调节器的参数 K_p 、 T_i 、 T_d , 结合 PID 公式计算出 k_p 、 k_d 、 k_i , 最后代入系统中进行微调^[13]. 得到的 PID 参数分别为 $k_p = 1$ $k_d = 0.02$, $k_i = 0.01$.

3 联合仿真及其分析

为测试该模型的性能, 联合 Adams 和 Matlab 对机器人进行仿真. 首先在 Adams 软件里建立机器人动力学模型, 并给定关节约束和驱动力矩, 然后将机器人模型导入 Matlab 软件的 Simulink 模块中, 接着将图 6 的控制系统在 Simulink 中搭建, 仿真控制系统如图 7 所示.

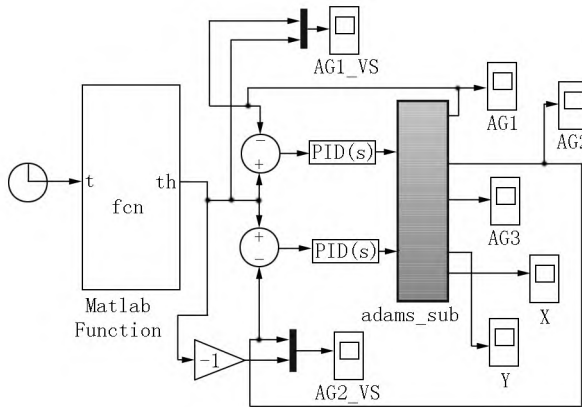


图7 仿真控制系统

在图7仿真控制系统中,adams_sub模块表示为机器人模型,Matlab Function模块表示为目标角度.

在Simulink中设置仿真时间为14 s,仿真步长为0.001 s.在仿真结束后,通过输出图像可以观测机器人的相关参数,如图8~图9和表1所示.

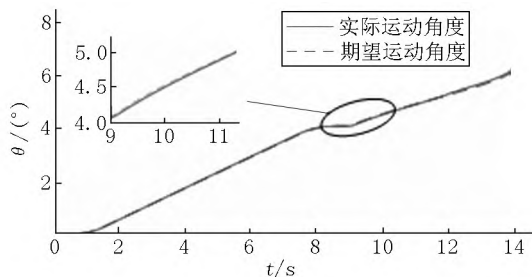


图8 大臂关节角跟踪曲线

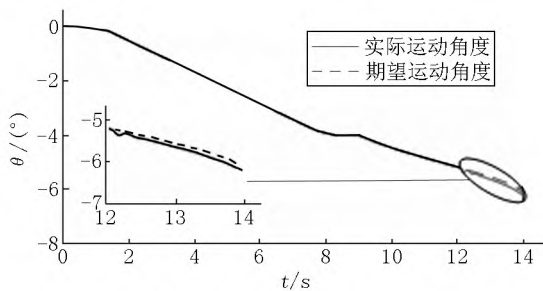


图9 小臂关节角跟踪曲线

表1 各关节角的性能指标

关节角	最大超调量/%	系统稳定时间/s
大臂关节角	0.93	2.6
小臂关节角	1.92	1.9

在图8~图9中,虚线表示各关节期望运动角度,实线表示各关节实际运动角度.表1显示,在PID的控制下,大臂关节角、小臂关节角的最大超调量分别为1%、2%,系统稳定时间分别为2.6 s、1.9 s.从图8~图9中可以看出:机器人在仿真过程中各关节运动角度与期望运动角度基本吻合,有较好的

追踪效果.

从图10~图11可以看出:在0.0~9.0 s内机器人为机体静止阶段,机体保持稳定,质心无位移.在9.0 s时小臂与下一届台阶接触并发生力的相互作用,质心位移发生变化.在9.0~11.3 s内机体在小臂和大臂的支撑下逐渐离开所在台阶面,质心水平位移沿着x轴负方向不断增大,质心垂直位移沿着z轴正方向不断增大.在11.3 s时机体离开所在台阶面,质心垂直位移达到z轴最高点.在11.3~14.0 s内,质心垂直位移由z轴最高点向z轴负方向不断减小.机器人下楼梯仿真如图12所示.

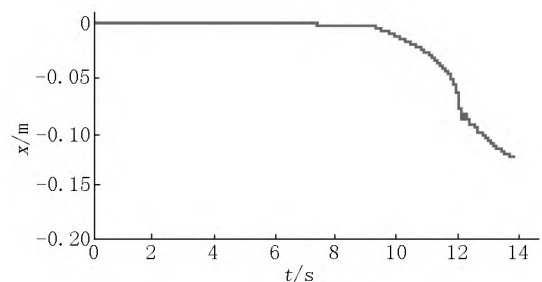


图10 质心水平位移

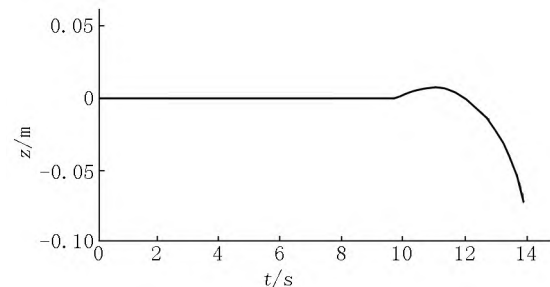


图11 质心垂直位移

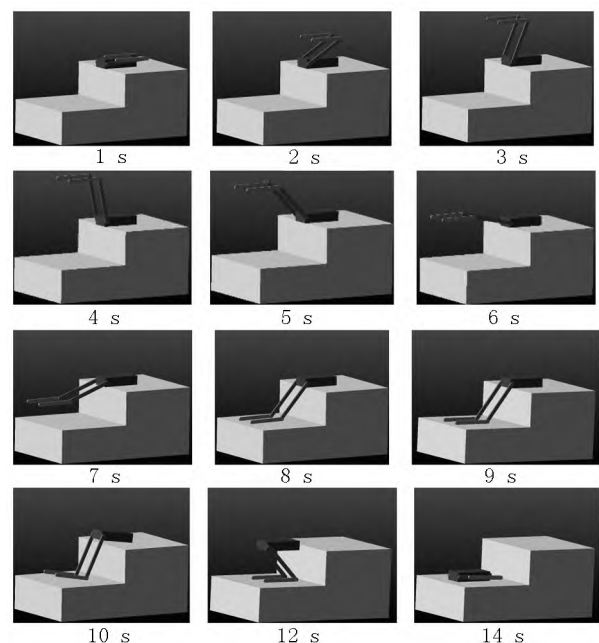


图12 机器人下楼梯仿真图

4 结论

本文根据本课题组前期设计的圆周平动脚式楼梯清洁机器人爬楼梯的运动机理, 基于几何法推导了机器人爬楼梯的运动学模型。将机器人爬楼梯的过程分为机体静止阶段和旋转臂支撑阶段2个阶段, 对机体静止阶段采用多项式拟合的规划方法, 对旋转臂支撑阶段采用基于1阶杆变长倒立摆模型的规划策略, 并基于运动学模型计算出各关节的角度。然后搭建了PID闭环反馈的控制系统对旋转臂进行控制。联合仿真结果表明本文研究的爬楼步态规划与控制方法能实现楼梯清洁机器人的稳定下楼。

5 参考文献

- [1] 叶日鸿, 周梓达, 赵凌翔, 等. 升降式楼梯清洁机器人的设计与分析 [J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(12): 92-97.
- [2] 贺廉云. 楼道清洁机器人的设计 [J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(8): 71-73.
- [3] ZHANG Lei, YANG Yuan, GU Yugang, et al. A new compact stair-cleaning robot [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(4): 45001-45010.
- [4] 刘井海, 张磊, 李红兵, 等. 楼梯清洁机器人休息平台路径规划研究 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 67-74.
- [5] 姚兴田, 徐冰辉, 张磊, 等. 楼梯清洁机器人从休息平台到下楼过渡方法的研究 [J]. 机械设计与制造, 2019(51): 131-134, 140.
- [6] 张磊, 杨元, 赵南生, 等. 楼梯清洁机器人防跌落防碰撞研究 [J]. 机械设计与制造, 2018(10): 240-244.
- [7] VATANKHAH M, KOBRAVI H R, RITTER A J R, et al. Intermittent control model for ascending stair biped robot using a stable limit cycle model [J]. Robotics Autonomous Systems, 2019, 121: 103255.
- [8] 王剑, 王挺, 姚辰, 等. WT 轮椅机器人攀爬楼梯过程动力学建模与控制 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 22-34.
- [9] 肖鹏, 吴飞, 杨前禄, 等. 基于变长倒立摆模型的双足机器人爬楼梯步态规划 [J]. 机械与电子, 2011(11): 71-75.
- [10] NAIR A S, EZHILARASI D. Performance analysis of super twisting sliding mode controller by ADAMS-MATLAB co-simulation in lower extremity exoskeleton [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020, 7(3): 743-754.
- [11] XU Fenghui, JIA Yongxing, JIA Zhidong, et al. Research on gait control algorithm of bionic hexapod robot system based on adams and matlab [J]. Earth and Environmental Science, 2019, 332(4): 42036.
- [12] ZHENG Yi, LIU Jixin, XIAO Maohua. Motion realization of a small diameter deep well rescue robot based on adams-matlab co-simulation [J]. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2022(11): 23-30.
- [13] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [14] WANG Jiajun. Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(1): 440-449.
- [15] 陈子明, 卢杰, 邓朋, 等. 一种稳定跳跃型机器人的设计与空中姿态控制 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 34-44.

The Stair Climbing Planning of Stair Cleaning Robot

SU Lei¹, ZHANG Lei^{1*}, SHAO Jianguan², SHAO Jianxin², LIU Yu¹, LIU Haitao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China;

2. Nantong Mingnuo Electric Technology Company Limited, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: The stair-climbing gait planning method is studied in order to make the circular translation feet stair cleaning robot complete the stable descending action. Firstly, the kinematics model of climbing stairs for the robot is established based on the geometric method. Secondly, the process of climbing stairs is divided into two stages, and different planning methods are used correspondingly. Then, each joint angle obtained by the kinematic model is controlled by the built PID control system. Finally, the simulation verification is carried out by Adams and Matlab. The results show that the robot can achieve the function of stably going downstairs.

Key words: stair cleaning robot; stairs climbing; PID control; simulation

(责任编辑: 冉小晓)