

两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制研究

李修宇¹, 李金凤²

(1.安徽工商职业学院, 合肥 231131; 2.安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了提高两轮自平衡机器人重心偏移的自适应调整和控制能力, 提出基于反馈均衡误差补偿和参数融合的两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制方法。采用运动目标参数规划方法构建两轮自平衡机器人的运动学和力学模型。通过反演积分补偿控制技术, 实现对两轮自平衡机器人重心偏移的反馈均衡误差补偿和参数融合调节, 根据参数融合结果, 实现对两轮自平衡机器人重心偏移的自适应控制。仿真实验结果表明, 提出方法实现了两轮自平衡机器人的重心偏移自适应控制, 并且具有良好的鲁棒性和平滑性。

关键词: 两轮; 自平衡机器人; 重心偏移; 自适应控制; 运动学

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1007-984X(2023)04-0001-05

由于两轮自平衡机器人在运动过程中极易受到使用者重心偏移的影响, 为此, 对其输出稳定性提出了更高的要求。如何在提高两轮自平衡机器人的输出稳定性和参数的自适应调节能力的同时, 实现机器人重心偏移自适性控制引起了学者的广泛关注^[1]。

目前, 实现两轮自平衡机器人重心偏移控制方法大多是建立在对其运动学模型分析基础上, 采用融合参数识别方法调节重心偏移参数, 通过空间参数均衡控制, 实现对其特征分析和惯性参数融合, 达到提高输出稳定性的目的。其中, 宁桂英等^[2-3]将改进差分进化算法应用于两轮自平衡机器人重心偏移自适性控制中, 这两种方法均是结合对两轮自平衡机器人的运动学和惯性力矩参数分析, 实现重心偏移的自适应控制, 但该方法控制该类型机器人时重心偏移值的稳定性不高, 自适应性不好。针对此问题, 本文提出基于反馈均衡误差补偿和参数融合的两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制方法。采用运动目标参数规划方法构建运动学和力学模型, 利用反演积分补偿控制技术, 实现两轮自平衡机器人重心偏移的反馈均衡误差补偿和参数融合调节, 根据参数融合结果以实现两轮自平衡机器人的重心偏移自适应控制。

1 两轮自平衡机器人运动误差补偿

1.1 重心偏移误差检测

为了实现两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制, 结合误差分析法构建运动力学总体结构, 如图 1 所示, 选取两轮自平衡机器人重心偏移控制对象, 并对其运动过程中重心偏移进行误差检测^[4]。

图 1 中, v_l 为自平衡机器人左轮速度, v_r 为自平衡机器人右轮速度。设两轮自平衡机器人学习时间为 τ , 学习步长为 k , 在机器人加上移动底盘后, 根据图 1 所示的总体结构, 得到其控制信号传输截断误差为

$$Q = -\frac{2}{\tau} \sum_{k=1} [r_k - y_k] \frac{y}{v} - x_k \quad (1)$$

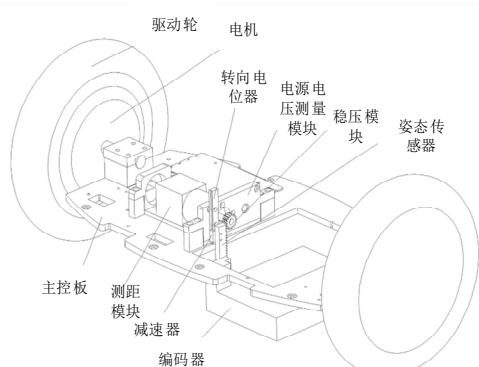
式中: r 为自平衡机器人运动半径; v 为自平衡机器人运动速度; y 为自平衡机器人的左部轮倾斜角度; x 为右部轮倾斜角度。根据两轮自平衡机器人的加速度和速度等参数传感采样结果, 根据式(1)得到的控制信号传输截断误差, 获取机器人腿部机构的移动角度辨识输出为

收稿日期: 2023-03-15

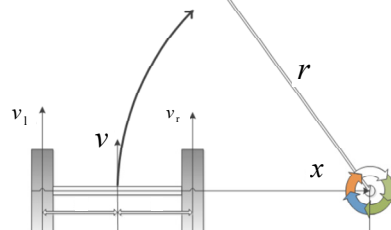
基金项目: 2022 年高校优秀青年人才支持计划项目 (gxyq2022274); 2022 年安徽省科学研究重点项目 (2022AH052792)

作者简介: 李修宇 (1990-), 男, 安徽六安人, 助教, 硕士, 主要从事机械设计、机械加工研究, zllbwen@163.com。

$$X = -\frac{2}{\tau} \sum_{k=1} [r_k - y_k] x_k + \frac{2Q}{W} \quad (2)$$



(a)两轮自平衡机器人结构



(b)动力学分析

图1 运动力学总体结构

式中： X 为腿部机构的移动角度； W 为自平衡机器人的单项微位移距离。结合式(1)(2)机器人腿部机构的移动角度辨识输出结果，得到两轮自平衡机器人运动过程中重心位移控制的舍入误差为

$$A = \sum_{k=1} r_k \delta + \frac{2Q}{1-X} \quad (3)$$

式中： δ 为左部轮移动时的旋转角速度。在小扰动约束下^[5-7]，输入式(3)的重心位移控制的舍入误差，得到两轮自平衡机器人重心偏移的误差为

$$b = \sum_{k=1} r_k \delta - 3\eta^2 + \frac{J}{A} \quad (4)$$

式中： η 为编码传输过程中差错率； J 为机器人右部轮旋转角度。根据式(4)对两轮自平衡机器人运动过程重心偏移的误差检测，为实现两轮自平衡机器人重心偏移的误差补偿提供数据支持。

1.2 重心偏移误差补偿

结合所检测的误差数据与运动学参数，进行两轮自平衡机器人重心偏移的空间规划，实现重心偏移的误差补偿。基于运动状态下的力学参数寻优结果、式(4)的两轮自平衡机器人重心偏移误差和图1的动力学模型，按照最优补偿条件给出了重心偏移时力学参数的最优补偿值为

$$B = \frac{-3\eta^2}{b^3} + \sum_i \alpha_i K(x_i) \quad (5)$$

式中： α_i 为各动作下机器人左右轮重心偏移绝对误差； $K(x_i)$ 为机器人各动作状态 x_i 下的偏移幅度。在利用式(5)得到机器人重心偏移时相关运动参数补偿值的基础上，进行两轮自平衡机器人重心偏移的空间规划，得到自平衡机器人的误差补偿式为

$$D = \sum_{j=1} w_j B^2 + \frac{3\eta^2}{b^3} - \sum_j \alpha_j K(x_j) \quad (6)$$

式中： w_j 为机器人重心偏移的误差补偿权重。根据分析，实现了机器人的重心偏移误差补偿，以此为基础调整所构建自适应控制模型的相关参数，实现模型整体优化。

2 自平衡机器人重心偏移控制模型优化

2.1 重心偏移模型构建

结合两轮自平衡机器人重心偏移的误差补偿，构建自适应控制模型^[8]，如图2所示。

图2中， λ 为机器人重心偏移距离； j 为机器人各个动作下的重心位置。结合式(6)的机器人重心偏移的误差补偿值实现对两轮自平衡机器人重心偏移位置的控制，得到参数调整目标输出值为

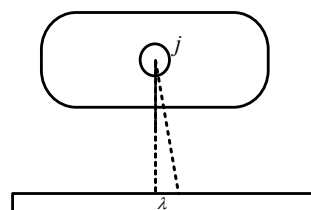


图2 自适应控制模型示意图

$$H = \sum_{j=1} \omega_j B^2 + \frac{3\eta^2}{b^3} - \frac{2D^2}{(\lambda + 2\delta)} \quad (7)$$

式中： δ 为重心距离调节阈值。引入解析法和寻优控制方法，以式(7)的参数调整目标输出值为基础，得到两轮自平衡机器人重心偏移的距离调整微分方程为

$$F = \sum_{j=1} \omega_j (\lambda + 2\delta) + \frac{1-\tau}{H} \quad (8)$$

式(8)为约束分布权重系数。采用联合参数寻优识别方法，对式(8)的重心偏移距离调整结果进行纠正，得到机器人重心位移纠正的目标值为

$$G = \sum_{k=1} \varepsilon_k \left(\frac{1-\tau}{H} + \sqrt{2\theta} \right)^2 - \frac{2\varepsilon F}{\delta_j} \quad (9)$$

式中： θ 为调节重心参考的加速度； ε 为重心位移纠正系数。以式(9)的机器人重心位移纠正目标值为基础，离散化调整参数，并构建自平衡机器人重心位移的反演控制式^[9]为

$$R = \frac{1-\tau}{H} - \frac{2\varepsilon G}{F} \sqrt{2\pi u} \quad (10)$$

式中： u 为机器人整体姿态偏差度。根据式(10)自平衡机器人重心位移反演控制式得到一个反演闭环式为

$$r = \frac{EA}{S_i} - \sqrt{2\pi u} \sum_{j=1} \omega_j R^2 \quad (11)$$

式中： S_i 为机器人各动作下的角度检测分布点。通过式(11)的反演闭环式对两轮自平衡机器人重心角度偏移纠正，得到重心角度偏移的纠正模型为

$$L = J_i - \frac{\sqrt{2\pi u}}{S_i} - \sum_{i=1} a_i r \quad (12)$$

通过式(12)的重心角度偏移纠正模型对机器人进行控制，得到两轮自平衡机器人重心角度偏移的控制输出为

$$C = \sum_{i=1} a_i r + B^2 W - \log_3 \phi \quad (13)$$

式中： a_i 为各动作下机器人左右轮重心偏移角度； ϕ 为纠正系数。结合式(13)的两轮自平衡机器人重心角度偏移的控制输出结果，利用拟合控制方法^[10-12]对机器人重心位置与角度偏移进行纠正，得到两轮自平衡机器人重心偏移的位形控制函数为

$$T = B^2 W - \frac{C}{2\alpha} \log_3 \phi \quad (14)$$

式中： α 为角度控制系数。对比式(14)位形控制结果中的机器人重心偏移位形点的空间分布，得出位形修正函数为

$$q = B^2 W - \frac{\mu}{\log_2 \delta} \sqrt{3\phi T} \quad (15)$$

式中： μ 为位形控制阈值^[13-14]。根据式(15)的位形修正函数对机器人位置参数进行调整，得到重心控制模型为

$$\phi = \frac{\mu}{\log_2 \delta} (\lambda + 2\delta) + \sqrt{3\phi T} \quad (16)$$

至此实现了机器人重心偏移控制模型的构建，对误差进行均衡处理，实现自适应调节模型优化。

2.2 重心控制模型优化

结合位姿误差均衡调节的方法，对式(16)重心控制模型后的重心偏移进行测量，并得到测量矩为

$$P = \sum_{k=1} z_k \beta^2 - \log_3 \phi + \sqrt{3\lambda} \quad (17)$$

式中： z 为各姿态的偏移距离校正幅频； β 为旋转角度的校正幅频。根据式(17)的测量矩进行两轮自平衡机器人重心偏移误差均衡处理，得到重心调整的反馈约束式为

$$\mathcal{G} = \log_3 \phi + \sigma \sqrt{3\lambda} - P^2 \quad (18)$$

式中: σ 为动作反馈响应时间。根据式(18)的重心调整反馈约束结果, 得到机器人重心偏移的反馈信息融合结果为

$$t_i = \sigma\sqrt{3\lambda - g_i^2 + \mathcal{J}^2 S_i} \quad (19)$$

式中: g_i 为反馈信息 i 的融合阈值。根据式(19)的反馈信息融合结果实现两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制为

$$Y = \sigma\sqrt{3\lambda - g_i^2} + \frac{r_i(1 - \sigma^2)e^2}{1 + t_i} \quad (20)$$

式中: Y 为两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制后的重心偏移量; t_i 为机器人重心偏移控制反馈信息 i 回传时长; e 为机器人重心偏移的期望位姿参数。

根据两轮自平衡机器人重心偏移的自适应控制结果, 采用反演积分补偿控制技术, 实现对两轮自平衡机器人重心偏移的反馈均衡误差补偿和参数融合调节, 实现重心偏移自适应控制。算法的优化实现流程如图 3 所示。

本文通过反演积分补偿控制技术实现两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制的主要流程为

步骤 1: 两轮自平衡机器人动力学分析, 并获取重心偏移数据。

步骤 2: 利用位移传感器采集中心偏移数据。

步骤 3: 依据式(7)设定重心距离调节阈值, 如果大于等于设定阈值, 执行步骤 4; 反之, 进行步骤 6。

步骤 4: 读取位移偏差, 并利用式(8)输出误差计算结果。

步骤 5: 计算控制律后执行步骤 8。

步骤 6: 自适应调节重心偏移, 并利用式(18)反馈误差。

步骤 7: 依据式(20)补偿偏移。

步骤 8: 将补偿结果和控制律计算结果写入两轮自平衡机器人控制器, 实现自适应控制。

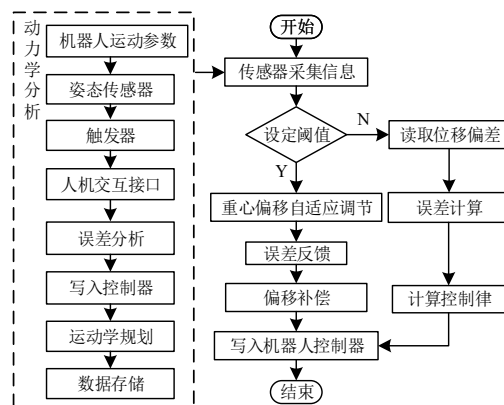


图 3 控制算法的优化实现流程

3 仿真测试分析

为了测试本文方法的应用性能, 通过 MATLAB 仿真软件进行测试, 设定两轮自平衡机器人的运动场地为半径 59 m 的圆形场景, 循环次数 $N=40$, 采用 6 自由度传感器实现对两轮自平衡机器人的控制参数采集, 其它相关参数设定如表 1 所示。

根据表 1 所示的仿真环境和参数设定, 在 MATLAB 平台上构建两轮自平衡机器人的运动规划模型, 得到仿真模型如图 4 所示。

由此得到两轮自平衡机器人的运动参数调节如图 5 所示。

分析图 5 可知, 本文方法进行两轮自平衡机器人重心偏移控制时, 随着控制时间的增加, 位姿偏差和角度偏差均降低至 0 左右, 未出现失控状态, 始终在纠正两轮自平衡机器人重心偏移, 验证了所提方法具有较好的自适应调节能力。

测试不同方法进行两轮自平衡机器人重心偏移控制的误差, 得到对比结果如表 2 所示, 分析表 2 可知, 本文方法进行两轮自平衡机器人重心偏移控制的误差较小。

表 1 系统参数设定

参数项目	值
质量/kg	46
机器人的运转载荷/kg	27
逆运动学空间参数	0.35
机器人的平衡弹簧刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	390
延迟时间/ms	2.5

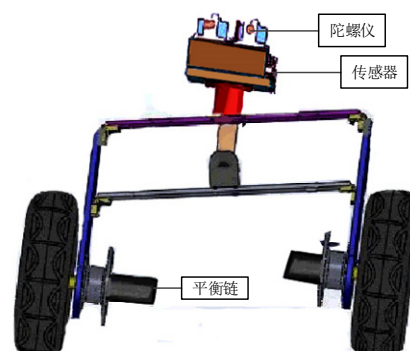


图 4 仿真模型

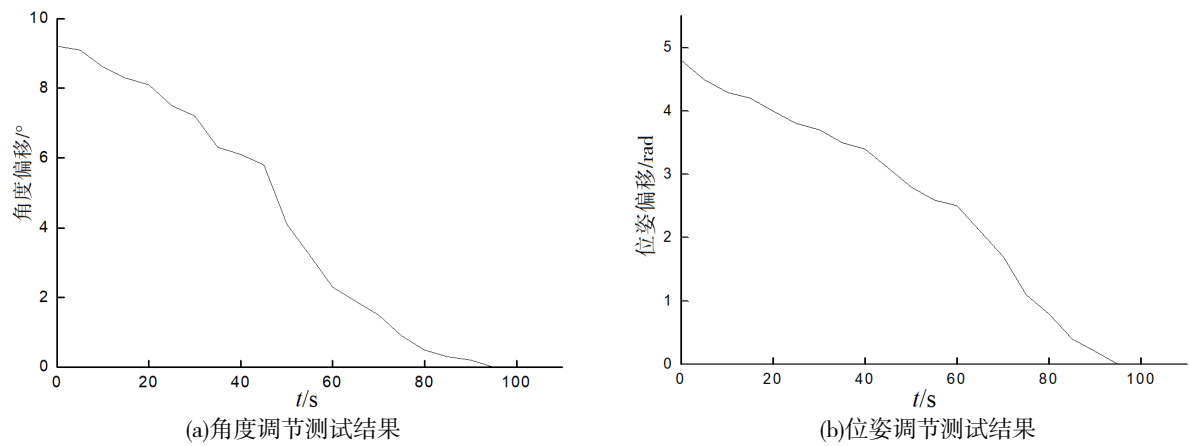


图 5 运动参数调节

表 2 两轮自平衡机器人重心偏移控制误差对比

迭代次数	本文方法	文献[4]	文献[5]	文献[7]
100	0.046	0.142	0.189	0.215
200	0.021	0.117	0.136	0.166
300	0.015	0.097	0.086	0.143
400	0.008	0.053	0.065	0.125
500	0	0.041	0.044	0.118

4 结论

本文提出了基于反馈均衡误差补偿和参数融合的两轮自平衡机器人重心偏移自适应控制方法，构建优化的两轮自平衡机器人自适应控制模型，通过对两轮自平衡机器人的控制运动学参数分析，进行两轮自平衡机器人的自适应控制。研究表明，本文方法进行两轮自平衡机器人重心偏移控制的自适应性较好，参数自动化调节能力较强。

参考文献：

[1] 王淑云, 朱雅娜, 阚君武, 等. 旋磁激励式预弯梁压电俘能器建模仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 224–230.

[2] 宁桂英, 曹敦度, 周永权. 求解0–1规划问题的改进差分进化算法[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(1): 120–132.

[3] 顾涛, 李苏建. 基于两种改进差分进化的可修备件多级库存优化算法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 245–253.

[4] 宋英莉, 刘宣宇. 带有可调因子的NMSSPC算法的研究[J]. 控制工程, 2016, 23(9): 1443–1447.

[5] ZHANG R D, CAO Z, BO C, et al. New PID controller design using extended nonminimal state space model based predictive functional control structure[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(8): 3283–3292.

[6] WANG S, FU J Y, YANG Y, et al. An improved predictive functional control with minimum–order observer for speed control of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2016, 12(1): 1921–1932.

[7] LI S H, LIU H X, FU W S. An improved predictive functional control method with application to PMSM systems[J]. International Journal of Electronics, 2017, 104(1): 126–142.

[8] KHALILIPOUR M M, SADEGHI J, SHAHRAKI F, et al. Nonsquare multivariable non–minimal state space–proportional integral plus (NMSS–PIP) control for atmospheric crude oil distillation column[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 113: 140–150.

[9] 于哲, 王璐, 苏剑波. 基于干扰观测器的不确定线性多变量系统控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(11): 2643–2649.

[10] 牛国君, 曲翠翠, 潘博, 等. 含有广义饱和函数的全局渐近稳定非线性PID控制[J]. 机器人, 2020, 42(5): 568–582.

[11] 姜伟, 陈品超, 裘信国, 等. 新型旋转比例电–机械转换器静态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(04): 107–114.

[12] 李艺强, 叶俊勇, 罗晋. 基于级联卷积网络的紧固件异常检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(05): 171–179.

(下转第 10 页)

- [5] 王阳. 基于图优化的移动机器人 SLAM 建图算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [6] 陈正升, 王雪松, 程玉虎, 等. 基于 ROS 的自主移动机器人路径规划虚实结合实验平台[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(01): 77–82, 100.
- [7] ZHANG J N, ZHANG T Y, NIU Y, et al. Simulation and implementation of robot obstacle avoidance algorithm on ROS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2203(1): 129–134.
- [8] 李小明. 智能铁路巡检机器人系统设计与实现[J]. 电子元件与信息技术, 2022, 6(01): 231–235.

Coronavirus robot system

KAN Bao-qiang

(Department of I&T, Concord University College Fujian Normal University, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Wearing masks plays an important role in epidemic prevention and control. However, existing detection and warning means have disadvantages such as high work intensity, low efficiency, small coverage and poor timeliness. To this end, this paper designs and implements an artificial intelligence-based autonomous patrol warning robot system. It can autonomously patrol and monitor within a certain area and warn and remind people who do not wear masks. The experimental results show that the robot can effectively solve the current public places epidemic prevention patrol monitoring and early warning problem.

Key words: robot; mask detection; robot operation system

(上接第 5 页)

- [13] 任秉银, 魏坤, 吴卓琦. 机械臂视觉伺服路径规划研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(01): 1–10.
- [14] 梁政焄, 赵克刚, 裴锋, 等. 基于 MPC 的智能车轨迹跟踪算法[J]. 机械与电子, 2019, 37(01): 66–70.

Research on adaptive control of gravity center shift of two-wheeled self-balancing robot

LI Xiu-yu¹, LI Jin-feng²

(1. Anhui Business and Technology College, Hefei 231131, China;

2. Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, China)

Abstract: In order to improve the self-adaptive adjustment and control ability of gravity center deviation of two-wheeled self-balancing robot, an adaptive control method of center of gravity shift for two wheeled self-balancing robot based on feedback equalization error compensation and parameter fusion is proposed. The kinematic and mechanical models of the two-wheeled self-balancing robot are constructed by using the method of motion target parameter planning. Through the inverse integral compensation control technology, the feedback equalization error compensation and parameter fusion adjustment of the center of gravity shift of the two-wheel self-balancing robot are realized. According to the parameter fusion results, the adaptive control of the center of gravity shift of the two-wheel self-balancing robot is realized. The simulation results show that the proposed method realizes the adaptive control of the center of gravity shift of the two-wheeled self-balancing robot, and has good robustness and smoothness.

Key words: two rounds; self-balancing robot; gravity center offset; self-adaptation control; kinesiology