

引用格式:甄冒发,徐振峰,谢宇.多自由度机器人惯性误差反馈融合闭环控制[J].微电子学与计算机,2020,37(12):77-80.
[ZHEN M F, XU Z F, XIE Y. A closed-loop control method for inertial error feedback fusion of multi-degree-of-freedom robot[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(12): 77-80.]

多自由度机器人惯性误差反馈融合闭环控制

甄冒发,徐振峰,谢宇

(合肥学院 先进制造工程学院,安徽 合肥 230601)

摘 要:多自由度机器人受到环境突变性以及自身构件扰动的影响,导致控制失稳.为了提高多自由度机器人的稳定性,提出基于误差反馈融合跟踪的多自由度机器人闭环控制方法.构建多自由度机器人惯性跟踪的参数辨识模型,结合多因素约束参数融合方法进行多自由度机器人的驱动机构部件柔性控制,建立机器人惯性误差反馈的自适应控制律,构建机器人的受力参数优化分析模型和动力学模型,结合误差反馈自适应修正和惯性补偿方法进行多自由度机器人闭环控制过程中的参数自适应寻优,根据参数寻优结果进行机器人的位姿自适应调整,实现机器人的稳定性控制.仿真结果表明,采用该方法进行多自由度机器人控制的误差较小,控制稳定性和鲁棒性较强,可以快速收敛到稳定状态.

关键词:多自由度机器人;惯性;误差;反馈;融合跟踪;闭环控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)12—0077—04

A closed-loop control method for inertial error feedback fusion of multi-degree-of-freedom robot

ZHEN Mao-fa, XU Zhen-feng, XIE Yu

(Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China)

Abstract: The multi-degree-of-freedom robot is affected by the abrupt change of environment and disturbance of its own components, which leads to instability of control. In order to improve the stability of the multi-degree-of-freedom robot, a closed-loop control method of multi-degree-of-freedom robot based on error feedback fusion tracking is proposed. A parameter identification model for inertial tracking of a multi-degree-of-freedom robot is established, flexible control of drive mechanism components of the multi-degree-of-freedom robot is carried out by combining a multi-factor constraint parameter fusion method, an adaptive control law for inertial error feedback of the robot is established, a mechanical parameter optimization analysis model and a dynamic model of the robot are established, parameter adaptive optimization in the closed-loop control process of the multi-degree-of-freedom robot is carried out by combining an error feedback adaptive correction method and an inertial compensation method, and the robot position and posture adaptive adjustment is carried out according to the parameter optimization result, so that the stability control of the robot is realized. The simulation results show that the control error of the multi-degree-of-freedom robot using this method is small, the control stability and robustness are strong, and it can quickly converge to a stable state.

Key words: multi-degree-of-freedom robot; Inertia; Error; Feedback; Fusion tracking; Closed loop control

1 引言

随着人工智能技术的发展,各类型机器人的控制智能性越来越高,为了提高机器人对环境的自适应能力,需要进行机器人的多自由度设计和智能控制设计,结合环境的变换进行参数的自动调整和优化辨识,提高机器人的环境稳定性,相关的多自由度机器人的人工智能设计和优化控制方法研究受到人们的极大重视^[1].

传统方法中,对多自由度机器人的控制方法主要有模糊 PID 控制方法、智能积分控制方法以及鲁棒控制方法等^[2,3],建立多自由度机器人的参数辨识和信息融合模型,结合传感器信息采样和智能控制律设计,实现多自由度机器人的姿态融合跟踪控制. 文献[4]中提出基于非线性严格反馈跟踪补偿识别的多自由度机器人的智能控制方法,但该方法进行多自由度机器人控制的误差反馈性能不好,自适应性不强. 文献[5]中提出基于延时脉冲估计的多自由度机器人惯性误差融合的跟踪控制方法,但该方法进行多自由度机器人控制的环境适应性不好,时延较大.

针对上述问题,本文提出基于误差反馈融合跟踪的多自由度机器人闭环控制方法.

2 控制约束参数模型和驱动机构部件柔性控制

2.1 控制约束参数辨识模型

为了实现多自由度机器人惯性误差反馈融合跟踪闭环控制,首先构建多自由度机器人惯性跟踪的参数辨识模型,结合多因素约束参数融合方法,进行机器人的自适应跟踪和控制,可以将多自由度机器人的被控约束参量模型分为确定性部分和非确定性部分^[6],采用线性二次型最优控制的方法,得到多自由度机器人控制的性能指标函数为:

$$\begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}Kx(k - \tau_k) \\ z(k) = \mathbf{C}x(k) + \mathbf{D}Kx(k - \tau_k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为三轴期望加速度; $\mathbf{B}$ 为指向性系数; $\mathbf{C}$ 为动力参数; $\mathbf{D}$ 为结构系数; K 为参考位置误差; τ_k 表示时延. 根据对多自由度机器人转速及欧拉角参考因素的影响,结合控制通道的解耦特性,得到多自由度机器人惯性误差反馈融合的状态空间模型为:

$$\begin{cases} x(k+1) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}_1)x(k) + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}_1) \\ \quad Kx(k - \tau_k) + \mathbf{F}_1\omega(k) \\ z(k) = \mathbf{C}x(k) + \mathbf{D}Kx(k - \tau_k) + \mathbf{F}_2\omega(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\omega(k) \in R^n$, 表示多自由度机器人的控制力矩, 即 $\omega(k) \in L_2(0, \infty)$, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ 为适当维数的权系数分布矩阵, 表示俯仰角、俯仰角速度的关系; 变量 n 为正整数; $\Delta\mathbf{A}_1, \Delta\mathbf{B}_1$ 为电机基础转速及欧拉系数增益, 在三轴参考位置误差作用下, 得到输出的控制增益为:

$$\Delta\mathbf{A}_1 = G\mathbf{F}\mathbf{A}_1, \Delta\mathbf{B}_1 = G\mathbf{F}\mathbf{B}_1 \quad (3)$$

式中, $G \in R^{n \times l}$, $\mathbf{A}_1 \in R^{l \times p}$, $\mathbf{B}_1 \in R^{l \times q}$ 为状态方程矩阵系数; $F \in R^{l \times l}$ 为惯性误差反馈调节参数, 为位置环系数, 根据参数融合结果, 进行相应的姿态扰动补偿, 当满足 $F^T F \leq I$, 在参考模型变量 r, l 的约束下, 记:

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}_1, \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}_1 \quad (4)$$

根据上述分析, 建立控制约束参数辨识模型, 结合惯性误差反馈融合结果, 进行多自由度机器人的控制约束参量融合和控制律的优化设计, 提高机器人的惯性误差调节能力^[7].

2.2 驱动机构部件柔性控制

结合多因素约束参数融合方法进行多自由度机器人的驱动机构部件柔性控制, 建立机器人惯性误差反馈的自适应控制律^[8], 假设多自由度机器人的姿态闭环状态反馈满足 $\omega(k) \in L_2(0, \infty)$, 得到姿态控制矩阵为 $\|z(k)\|_2 \leq \gamma \|\omega(k)\|_2$. 采用动力学模型线性化规划方法, 得到系统转移函数为:

$$V_k = x^T(k)Px(k) + \sum_{i=k-\tau_k}^{k-1} x^T(i)K^T RKx(i) \quad (5)$$

式中, P, R 为正定的实对称矩阵. 在卡尔曼滤波过程中, 建立 *Lyaapunov* 函数进行控制过程中的自适应寻优, 沿 V_k 方向进行机器人的柔性跟踪和时滞补偿, 得到过去和当前的观测量为:

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= Vx(k+1) - Vx(k) \\ &= x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)(P - \\ &\quad K^T RK)x(k) - x^T(k - \tau_k)K^T RKx(k - \tau_k) \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\omega(k) = 0$ 时

$$\Delta V_k = \Phi_1 \Pi_1 \Phi_1^T < 0 \quad (7)$$

采用转动轴心跟踪补偿的方法^[9], 得到轴线到转轴的距离 $S_r(t)$:

$$S_r(t) = S(t) * h(t) + n_s(t) \quad (8)$$

式中, $n_s(t)$ 为多自由度机器人的柔性变刚度扰动强度, 根据上述分析, 建立机器人惯性误差反馈的自适应控制律, 构建机器人的受力参数优化分析模型和动力学模型, 实现驱动机构部件柔性控制^[10].

3 多自由度机器人闭环控制优化

3.1 受力参数优化分析模型和动力学模型

在上述进行机器人控制参数辨识模型分析的基础上,进行控制律的优化设计,构建机器人的受力参数优化分析模型和动力学模型,结合误差反馈自适应修正和惯性补偿方法进行自适应控制律设计,假设机器人作为一个四连杆机构,用 4×4 的齐次矩阵 ${}^I\mathbf{T}_0(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 表示机器人的动力参数分布,约简为 $(= {}^I\mathbf{T}_0(\theta_1, \theta_2, \theta_3))$,通过模型参数识别的方法,得到多自由度机器人变刚度关节驱动矩阵为:

$${}^0\mathbf{T}_7(q_1) = \prod_{i=1}^7 {}^{i-1}\mathbf{T}_i(q_i) = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,构建机器人的连接轴、变刚度模块,在多自由度空间中,得到在惯性误差扰动下机器人的变刚度关节驱动状态函数:

$$q_1 = \theta_4 = \text{atan2}(\pm p_{4y}, \pm p_{4x}) \quad (10)$$

$$q_2 = \theta_5 = \text{atan2}(-p_{4z}, c_1 p_{4x} + s_1 p_{4y} - l_s) \quad (11)$$

通过模糊度辨识模型,建立多自由度机器人的循环运动的控制对象模型,采用最优的参数估计方法进行控制过程的自适应寻优和反演控制,并对气动参数进行在线估计,得到多自由度机器人的误差反馈跟踪结果描述为:

$${}^4\mathbf{T}_5^{-1}(q_i) \cdot {}^4\mathbf{T}_7 = \prod_{i=6}^7 \mathbf{T}_i(q_i) \quad (12)$$

式中,升力系数 q_i ; 扭力系数 $\mathbf{T}_i(q_i)$, 上式相当于多自由度机器人的 IK 解析方程式,对方程式进行优化解算,进行误差反馈自适应修正和跟踪识别。

3.2 误差反馈自适应修正及控制律优化

结合误差反馈自适应修正和惯性补偿方法进行多自由度机器人闭环控制过程中的参数自适应寻优,得到机器人结构构件控制的耦合系数矩阵和刚度矩阵为:

$$\mathbf{Z}_c \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & U_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & V_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据对姿态环状态反馈结果,得到环境适应度系数表示为 $q_i^0, q_i^1, q_i^2, L, q_i^m (i = 1, 2, L, 6)$, 根据上述分析,根据位置控制器输出与姿态控制器的迭代输出,进行多自由度机器人的惯性误差补偿,得到反馈控制输出如下:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & \text{if } j \in d_k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

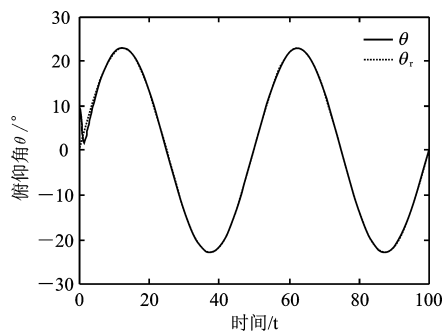
$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (15)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (16)$$

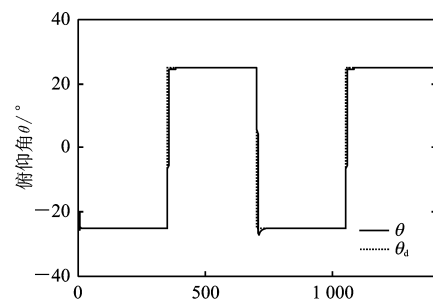
式中, $[\tau_{is}(t)]$ 表示惯性力矩; d_k 表示耦合系数; ρ 表示姿态环状态反馈系数。综上分析,建立了多自由度机器人惯性误差反馈融合跟踪闭环控制的优化控制律,根据参数寻优结果进行机器人的位姿自适应调整,实现机器人的稳定性控制。

4 仿真实验与结果分析

为了验证本文方法在实现多自由度机器人惯性误差反馈和融合跟踪控制中的应用性能,进行仿真实验分析,实验采用 Matlab 仿真工具进行机器人控制算法设计,假设扩展卡尔曼滤波参数的初始条件为: $\mathbf{X} = [0.12 \ 0.25 \ 0.15 \ 0.45]^T$, 线性反馈控制的初试迭代次数为 $\epsilon_1 = 0.1$, 控制器反馈增益 12 dB, 力矩系数为 $0.018 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, 等效阻尼系数为 $0.97 \text{ N} \cdot \text{ms/rad}$, 对多自由度机器人惯性误差修正的迭代步长为 20, 根据上述参数设定,进行多自由度机器人闭环控制,测试过程中,在控制指令端输入正弦信号和方波信号,得到跟踪性能如图 1 所示。



(a) 正弦信号



(b) 方波信号

图1 机器人控制的俯仰角跟踪性能

分析图 1 得知,本文方法进行机器人的惯性误差反馈融合跟踪控制,无论参考输入端的控制质量为正弦信号或是方波信号,机器人姿态角的跟踪性能较好,测试收敛误差,得到结果如图 2 所示。

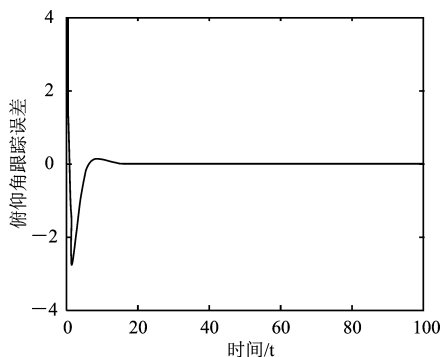


图 2 收敛误差测试

分析图 2 得知,本文方法进行机器人控制,误差较小,能在较短的时间内收敛到最优值。测试不同方法进行机器人惯性误差反馈融合跟踪控制的迭代误差,得到对比结果如图 3 所示。

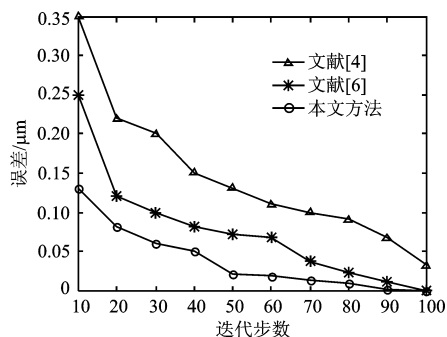


图 3 性能对比

分析图 3 得知,本文方法进行机器人控制的整体迭代误差呈减小趋势,收敛性较好,控制稳定性和鲁棒性较强,可以快速收敛到稳定状态,提高了机器人的稳定性和鲁棒性。

5 结束语

本文提出基于误差反馈融合跟踪的多自由度机器人闭环控制方法,建立控制约束参数辨识模型,结合惯性误差反馈融合结果,进行多自由度机器人的控制约束参量融合和控制律的优化设计,根据对姿态环状态反馈结果,建立多自由度机器人的循环运动的控制对象模型,采用最优的参数估计方法进行控制过程的自适应寻优和反演控制,提高机器人控制的稳定性和鲁棒性。本文方法进行机器人控制的整体迭代误差呈减小趋势,收敛性较好,具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] FAN J Z, YU Q G, YUAN B W, et al. Development of a Joint-like Pneumatic Actuator Applied to Soft Frog-inspired Swimming Robot[J]. ROBOT, 2018, 40(5): 578-586.
- [2] WANG H, KANG R J, WANG X J, et al. Design and modeling of a soft bending actuator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(5):1053-1060.
- [3] KOIVUMAKI J, MATTILA J. Stability-guaranteed impedance control of hydraulic robotic manipulators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 601-612.
- [4] KOIVUMAKI J, MATTILA J. Stability-guaranteed force-sensorless contact force/motion control of heavy-duty hydraulic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(4): 918-935.
- [5] GAO Q, WANG Z L, HU W J, et al. Gait simulation of snake robot based on CPG method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1374-1380.
- [6] CHEN Z H, WANG S K, WANG J Z, et al. Motion Drive and Multi-mode Control Method of an Electric Parallel Six Wheel-Legged Robot[J]. ROBOT, 2020, 42(5): 534-549.
- [7] KARSSSEN J G D, HABERLAND M, WISSE M, et al. The effects of swing-leg retraction on running performance: Analysis, simulation, and experiment [J]. Robotica, 2015, 33(10):2137-2155.
- [8] YANG J M, HOU Y H, SUN H Z, et al. Modified NSGA-II-DE with two-dimensional information ordering strategy and magnitude threshold[J]. Control and Decision, 2016, 31(9): 1577-1584.
- [9] SHANG W L, LI W X, CHEN C Y, et al. Fuzzing Method Based on Feature Matrix for Industrial Control Protocols[J]. Information and control, 2020, 49(4): 436-443,454.
- [10] SHI Y L, ZHANG X J, ZHANG M L. Design and Analysis of a Active-passive Variable Stiffness Flexible Joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 55-62.

作者简介:

甄冒发 男,(1969-),硕士,正高级工程师。研究方向为智能控制技术、模式识别技术及应用。E-mail:mzf1111@126.com
徐振峰 男,(1981-),博士,讲师。研究方向为智能控制。
谢宇 男,(1977-),博士,讲师。研究方向为模式识别与智能系统、卫星遥感监测。