

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802380

# 基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制研究

田小玲

(广东工业大学 华立学院 广州 511325)

**摘要:** 软体机器人进行末端位姿调节时受到稳态误差干扰,导致软体机器人刚度独立控制问题性不好,为了提高软体机器人的末端位姿调节的稳定性,提出一种基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制方法。采用刚体力学分解方法构建软体机器人的动力学分析模型,采用严格反馈控制方法进行软体机器人的末端位姿记忆性控制,利用比例-积分控制器进行软体机器人的末端圆周标定,采用机器人的逆运动学模型进行软体机器人的刚体独立性调节,在关节空间上通过纠偏量与编程轨迹的自适应镇定性调整实现机器人的末端位姿反馈修正,实现软体机器人的优化控制。仿真结果表明,采用该算法进行软体机器人刚度独立控制的稳态性较好,纠偏能力较强。

**关键词:** 末端圆周标定;软体机器人;刚体;控制

**中图分类号:** TN972;TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 086006

## Research on independent stiffness control of soft robot based on end cylindrical calibration

Tian Xiaoling

(Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

**Abstract:** In order to improve the stability of the terminal position and pose adjustment, the software robot is disturbed by steady-state error, which leads to the problem of independent control of the stiffness of the software robot. An independent stiffness control method for soft robot based on end circle calibration is proposed. The rigid body mechanics decomposition method is used to construct the dynamic analysis model of software robot, and the strict feedback control method is used to control the terminal position and pose memory of software robot. The scale integral controller is used to calibrate the end circle of the software robot, and the inverse kinematics model is used to adjust the rigid body independence of the software robot. In the joint space, the end position and attitude feedback correction of the robot is realized by adjusting the deviation correction and the adaptive stabilization of the programming trajectory, and the optimal control of the software robot is realized. The simulation results show that the algorithm has good steady-state stability and strong deviation correction ability for independent stiffness control of software robots.

**Keywords:** end circle calibration; soft robot; rigid body; control

## 0 引言

随着智能控制技术的发展,机器人作为人工智能体的典型,在进行人工智能操作中发挥重要作用。软体机器人采用无关节、质软、柔顺的刚体构件设计,实现连续软体机器人的智能设计,软体机器人在外科手术、建筑坍塌搜救等领域都发挥重要作用。软体机器人的智能控制中,需要进行刚度独立控制,结合软体机器人的运动学关系模型设计,实现软体机器人的末端位姿智能调节,研究软体机器人的刚度独立控制方法在机器人的人工智能设计研究中具有重要意义<sup>[1]</sup>。

近年来,对软体机器人的刚度独立控制方法研究受到人们的极大关注,主要有模糊神经网络控制方法、积分控制方法、微分控制方法、粒子群进化控制方法等<sup>[2-3]</sup>,结合位姿参量调整实现软体机器人的稳定性控制。文献[4]提出一种基于稳态误差跟踪修正的软体机器人模糊控制方法,采用目标位姿的误差补偿方法,实现软体机器人的智能控制,但该方法在软体机器人的末端圆周控制中的抗干扰性不好。文献[5]中提出一种基于稳态误差跟踪自适应修正的软体机器人的刚度控制方法,采用自适应反演积分控制模型进行运动控制优化,采用激光传感融合跟踪识别方法,实现软体机器人的位姿调节,但该方法进行软体机器人的末

端位姿控制的自适应性不好。针对传统方法存在的弊端,本文提出一种基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制方法。采用刚体力学分解方法构建软体机器人的动力学分析模型,采用严格反馈控制方法进行软体机器人的末端位姿记忆性控制,采用机器人的逆运动学模型进行软体机器人的刚体独立性调节,在关节空间上通过纠偏量与编程轨迹的自适应镇定性调整实现机器人的末端位姿反馈修正,实现软体机器人的优化控制。最后进行仿真实验分析,展示了本文方法在提高软体机器人的刚度独立控制能力方面的优越性。

## 1 软体机器人运动学建模和控制参量分析

### 1.1 软体机器人运动学建模

为了实现对软体机器人的刚度独立化控制,提高机器人控制的人机交互性和智能性,软体机器人采用正运动学模型进行三维控制控制建模,构建机器人的末端坐标系,采用机器人的正运动学控制分析方法进行软体机器人的在线运动参量调节,结合末端圆周标定方法,进行软体机器人的轨迹跟踪和运动规划,得到软体机器人的末端圆周标定模型,如图 1 所示。

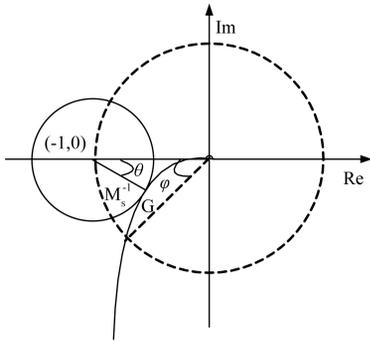


图 1 软体机器人的末端圆周标定模型

在初始轨迹最大偏差,采用轨迹完全重规划调节方法进行机器人的稳定性控制,构建机器人的被控对象模型,采用逆运动学实时计算方法,进行末端位姿自适应调节,采用刚体力学分解方法构建软体机器人的动力学分析模型<sup>[6]</sup>,计算出软体机器人的运动状态空间方程为:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_{RM} \\ \dot{V}_{RM} \\ \dot{\theta}_P \\ \dot{\omega}_P \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{RM} \\ V_{RM} \\ \theta_P \\ \omega_P \\ \delta \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ B_2 & B_2 \\ 0 & 0 \\ B_4 & B_4 \\ 0 & 0 \\ B_6 & -B_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_L \\ C_R \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$A_{23} = \frac{-M_P^2 L^2 g}{M_P J_{P\theta} + 2(J_{P\theta} + M_P L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (2)$$

$$A_{43} = \frac{M_P^2 g L + 2M_P g L (M_R + J_R/R^2)}{M_P J_{P\theta} + 2(J_{P\theta} + M_P L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (3)$$

$$B_2 = \frac{(J_{P\theta} + M_P L^2)/R + M_P L}{M_P J_{P\theta} + 2(J_{P\theta} + M_P L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (4)$$

$$B_4 = \frac{-\frac{R+L}{R}M_P - 2(M_R + J_R/R^2)}{M_P J_{P\theta} + 2(J_{P\theta} + M_P L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (5)$$

$$B_6 = \frac{D/2R}{J_{P\theta} + \frac{D^2}{2R}(M_R R + J_R/R)} \quad (6)$$

建立四杆机器人运动惯性坐标系,采用质心运动状态的前馈控制方法,进行软体机器人运动学建模。

### 1.2 软体机器人的末端位姿记忆参量分析

采用严格反馈控制方法进行软体机器人的末端位姿记忆性控制,采用比例-积分控制器进行软体机器人的末端圆周标定<sup>[7]</sup>,机器人的末端位姿参量调节满足 2 个条件: 1)机器人的末端测量矩阵需满足二自由度灵敏度要求。2)形状参数和驱动长度使用  $I_2$  范数,设软体机器人的运动圆周轨迹  $Q$  为  $R^m$  处的任意  $q$  点的集合,表示为控制曲率矢量  $d_1, d_2, \dots, d_q$ 。软体机器人的末端位姿调节的灵敏度函数为:

$$M_s = \max_{0 \leq \omega < \infty} \left| \frac{1}{1 + C_2(j\omega)P(j\omega)} \right| \quad (7)$$

令  $F$  为软体机器人自适应控制的参量分布有限域,  $\omega$  为输入到机器人关节控制器的旋转惯量,机器人的独立刚体运动闭环传递函数  $H_2$  和  $H_3$  共同标记为  $x$ ,以阻尼力矩参量为约束指标进行软体机器人传感信息的自适应寻优<sup>[8]</sup>,若取  $q = 4, b_2 = b_{-2} = 1, b_1 = b_{-1} = 2, b_0 = 0$ ,软体机器人的惯性传导系数为  $a_k$ ,如果  $\mathbf{A} = (a_{i,j})_{i,j=1}^m, \mathbf{B} = (b_{i,j})_{i,j=1}^m$ ,得到末端位姿控制的驱动-响应式:

$$\text{State}(K, N) \quad 0 = -\mu p_{k,N} + \lambda p_{k-1,N} + r p_{k,N-1} \quad (8)$$

$$\text{State}(K, n) \quad 0 = -r p_{k,n} + \lambda p_{k-1,n} + r p_{k,n-1}, \quad (2 \leq n \leq N-1) \quad (9)$$

$$\text{State}(K, 1) \quad 0 = -r p_{k,1} + \lambda p_{k-1,1} \quad (10)$$

引入幅值裕度和相位裕度,建立软体机器人的运动姿态分布特征方程,得到软体机器人刚度独立控制的二阶模型为:

$$\begin{cases} Q_1(s) = M^{-1}(s)f_1(s) \\ Q_2(s) = M^{-1}(s)f_2(s) \end{cases} \quad (11)$$

如果机器人控制的空间位姿参量  $e_{s1}$  独立于末端圆周误差  $e_{s2}$ ,那么  $\phi_{ki}$  独立于  $e_{st}$  等情况,采用闭环 PI 型迭代学习方法,可以得到机器人的刚度独立控制传递函数为:

$$\begin{cases} C_1(s) = \frac{\lambda_2 s + 1}{\lambda_1 s + 1} \\ C_2(s) = \frac{\prod_{i=1}^{i=n} (T_{mi}s + 1)}{K_m(\lambda_2 + L_m)s} \end{cases} \quad (12)$$

注意到机器人的无力矩驱动控制项  $\Psi_1(d_1(t))$  是矩阵  $K(Z_1 + Z_2 + Z_3)^{-1}K^T$  和矩阵  $WZ_1^{-1}W^T$  的关联积分项,在运动规划中,软体机器人的运动状态分布在双足、腿部、手臂,构建机器人控制系统的超稳定约束条件为:

$$0 < \Delta K < 1 + \frac{\lambda_2}{L_m} \quad (13)$$

上述描述则为极限分析模型中双曲微分方程的无搜索数学规划性模型,结合模糊搜索方法,进行软体机器人的末端圆周标定<sup>[9]</sup>。

## 2 控制算法优化

### 2.1 机器人的末端圆周标定控制

在采用刚体力学分解方法构建软体机器人的动力学分析模型的基础上,进行机器人的控制算法优化,本文提出一种基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制方法,采用双曲微分方程的稳定解进行机器人的末端圆周标定,得到机器人的模糊过程滞后时间常数  $L = \Delta L \cdot L_m$ , 设  $G_0$  和  $\alpha_0$  分别是软体机器人的速度和加速度耦合控制系数,采用一阶泰勒展开<sup>[10]</sup>,得到软体机器人的动力学超稳定回归参数为:

$$A_1 = \frac{\rho_1 \delta \eta - \delta^3 (1 - \delta) \rho_1 \mu_2 - \rho_1 \rho_2^2 \delta^2}{\mu_1 \delta (1 - \delta) \eta} (\rho_1 - c_1) \quad (14)$$

给定机器人初始位形  $\theta_{\text{start}} \in C_{\text{free}}$  (自由 C-空间),若系统稳定,机器人的路径跟踪的最大灵敏度为  $M_s$ , 机器人的末端圆周标定的空间分布函数满足:

$$\delta \cdot p_1 - 2p_2 + \rho_2 A_2 - \delta \rho_1 A_1 + c_2 + c_r = 0 \quad (15)$$

$$\rho_2 (p_2 - c_2 - c_r) - \delta \cdot (1 - \delta) \mu_2 A_2 = 0 \quad (16)$$

令  $\frac{\partial \pi_r}{\partial p_2} = 0, \frac{\partial \pi_r}{\partial A_2} = 0$ , 通过求软体机器人的运动学规划的自适应调节参数,得到机器人的超稳定性平衡解为:

$$\delta \cdot p_1 - 2p_2 + \rho_2 A_2 - \delta \rho_1 A_1 + c_2 + c_r = 0 \quad (17)$$

$$\rho_2 (p_2 - c_2 - c_r) - \delta \cdot (1 - \delta) \mu_2 A_2 = 0 \quad (18)$$

采用幅相裕度控制方法<sup>[11]</sup>,机器人在刚度独立通知的连续路径映射为  $q_1 = [q_1, \dots, q_7]^T$ , 利用一阶泰勒展开近似  $e^{-Ls} = 1 - L_m s$ , 在极限分析模型下,得到机器人的末端圆周标定输出为:

$$g'_a(u) = A_a \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j(u-t)^2 \text{csc}\alpha] g(t) dt = A_a \int_{-\infty}^{+\infty} h(u-t) g(t) dt \quad (19)$$

式中:  $L_m$  是软体机器人的滞后时间;  $T_{mi}$  是机器人圆周标定的第  $i$  个离散采样  $x(m/\Delta x)$  的时间常数。

### 2.2 软体机器人的刚体独立性调节与控制律优化

采用比例-积分控制器进行软体机器人的末端圆周标定<sup>[12-14]</sup>,得到软体机器人的刚体独立性调节极限分析模型中的双曲微分方程的稳定解,为:

$$E[e_{sk}] = 0 \forall s = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p \quad (20)$$

$$E[e_{s1k1} e_{s2k2}] = \begin{cases} \frac{m}{p} \sigma_s^2 \\ 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma, \rho$  分别是控制调节参数  $a, b, c, d$  的阶,在末端执行器中,为了克服软体机器人的刚度输出稳态误差的干扰,采用模糊约束项  $D(c) \equiv c^d \text{mod} n \equiv (m^e)^d \text{mod} n \equiv m^{ed} \text{mod} n$  进行自适应调节,得到软体机器人运动控制输出惯性力矩常数  $K_b^{bw}(S), K_d^{dp}(S), D_{a,p}, M\alpha_{a,b}$ , 幅相裕度控制参数  $A_0, \varphi_0$  的取值可有下式决定:

$$F_a[e^{j\pi(2f_0 t + k_0 t^2)}] = G_a(u - v \sin\alpha) e^{-j\frac{v^2}{2} \sin\alpha \cos\alpha} + j u v \cos\alpha = \sqrt{\frac{1 + i \tan\alpha}{1 + k_0 \tan\alpha}} \cdot \exp\left[ i\pi \frac{u^2(k_0 - \tan\alpha) + 2u f_0 \sec\alpha - f_0 \tan\alpha}{1 + k_0 \tan\alpha} \right] \quad (22)$$

采用机器人的逆运动学模型进行软体机器人的刚体独立性调节<sup>[15]</sup>,在关节空间上通过纠偏量与编程轨迹的自适应镇定性调整,得到优化的控制律为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{v}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2K_m K_c b_2 / R & a_{23} & 2K_m K_c b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2K_m K_c b_4 / R & a_{43} & 2K_m K_c b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ v_m \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m b_2 \\ 0 \\ K_m b_4 \end{bmatrix} U_\theta \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\dot{\delta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -DK_m K_c b_6 / R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m b_6 \end{bmatrix} U_\delta \quad (24)$$

将  $\sin q_i$  和  $\cos q_i$  分别标记为软体机器人的初始位置  $s_{q_i}$  和  $c_{q_i}$ , 并简记为  $s_i$  和  $c_i$ , 在 7 自由度运动空间内,基于末端圆周标定方法,实现软体机器人的刚度独立控制。

## 3 仿真实验与结果分析

为了测试本文方法在实现软体机器人刚度独立控制优化中的应用性能,进行仿真实验,实验采用 Matlab 7 设计,采用三轴电子罗盘 LSM303DLH 进行软体机器人的位置参数采集,机器人的末端位姿轨迹采集的时间间隔为 0.23 s,机器人的质量为  $M_b = 1.6 \times 10^4$  kg, 惯性转矩为  $m_r = 1.13 \times 10^4$  kg, 末端圆周的标定半径为  $R = 2.05$  m, 轨迹分布的长度为  $l = 1.87$  m, 根据上述仿真环境和参数设定,进行软体机器人刚度独立控制,得到机器人的末端位姿参数采样结果如图 2 所示。

以图 2 的数据采集为输入,采用严格反馈控制方法进行软体机器人的末端位姿记忆性控制和参数自镇定性调节,得到参数优化输出,如图 3 所示。

分析图 3 得知,采用本文方法进行机器人控制,输出控制参数的抗干扰性较好,滤波调节能力较强。采用末端圆周标定方法进行机器人刚度控制,得到末端圆周标定控制

输出如图 4 所示。

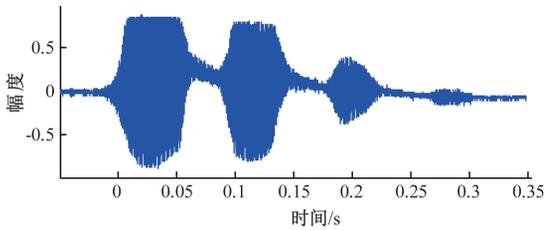


图 2 机器人的末端位姿参数采样

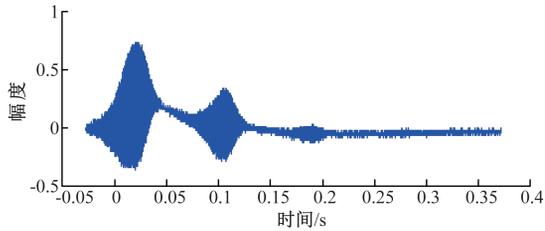


图 3 机器人的控制参数优化输出

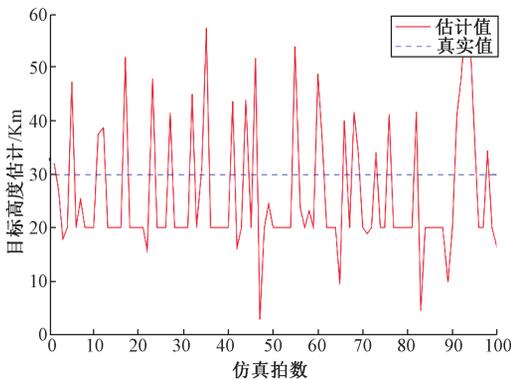


图 4 末端圆周标定控制

分析图 4 得知,采用本文方法进行末端圆周轨迹跟踪,在关节空间上通过纠偏量与编程轨迹的自适应镇定性调整,实现机器人的末端位姿反馈修正。采用不同方法进行机器

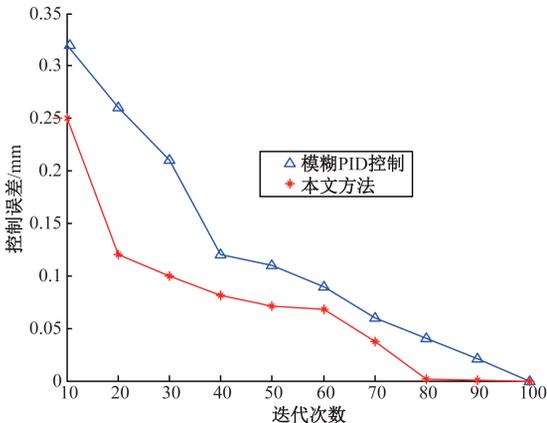


图 5 控制性能对比

人控制,得到控制性能曲线对比,如图 5 所示。分析得知,本文方法进行软体机器人刚度控制的误差较小,收敛性较强。

## 4 结 论

软体机器人的智能控制中,需要进行刚度独立控制,结合软体机器人的运动学关系模型设计,实现软体机器人的末端位姿智能调节,本文提出一种基于末端圆周标定的软体机器人刚度独立控制方法。采用刚体力学分解方法构建软体机器人的动力学分析模型,采用严格反馈控制方法进行软体机器人的末端位姿记忆性控制,采用比例-积分控制器进行软体机器人的末端圆周标定,采用机器人的逆运动学模型进行软体机器人的刚体独立性调节,在关节空间上通过纠偏量与编程轨迹的自适应镇定性调整,实现机器人的末端位姿反馈修正。研究得知,本文方法进行软体机器人刚度独立控制的稳态性较好,纠偏能力较强,控制误差较低。

## 参考文献

- [1] 王华,康荣杰,王兴坚,等. 软体弯曲驱动器设计与建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 1053-1060.
- [2] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3): 778-789.
- [3] 樊继壮,于庆国,袁博文,等. 软体仿蛙游动机器人关节式气动致动器研制[J]. 机器人, 2018, 40(5): 578-586.
- [4] 马宇,蔡远利. 基于多 LPV 模型的调度离线鲁棒预测控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1468-1474.
- [5] 史瑞东,张秀丽,姚燕安. 基于 CPG 的沙漠蜘蛛机器人多模式运动控制方法[J]. 机器人, 2018, 40(2): 146-157.
- [6] 司媛媛,何斌. 基于 CPG 和小脑模型的双足机器人行走控制[J]. 系统仿真技术, 2017, 13(1): 6-10.
- [7] 王俊刚,汤磊,谷国迎,等. 超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法及其性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 18-25.
- [8] TANG L, WANG J, ZHENG Y, et al. Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation[J]. The International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(5): 1-12.
- [9] 孙克辉,贺少波,董燕青. 简化洛伦兹混沌系统的追踪同步控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(4): 393-397.
- [10] 郑纪彬,朱文涛,苏涛,等. 一种新的高速多目标快速参数化检测算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 381-387.
- [11] 任晓敏,李东新. 基于多速率 LMS 算法的语音自适应滤波器[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(9): 68-73.

- [12] 杨季三,徐贵力,董文德,等.微波叶尖间隙传感器信号校准研究[J].仪器仪表学报,2018,39(10):193-201.
- [13] 张笑笑,储昭碧,董学平.基于滑动平均的并联 Buck 变换器均流控制[J].电子测量与仪器学报,2018,32(10):177-182.
- [14] 黄敏,马飞扬,刘广哲,等.应用于飞机测试的 EtherCAT 测试系统实时性测试及分析[J].电子测量

技术,2018,41(20):93-97.

- [15] 张俊锋,苏健军,姬建荣,等.热容式热流密度传感器的研制及应用[J].中国测试,2018,44(10):125-129.

### 作者简介

田小玲,硕士,讲师,主要研究方向为嵌入式技术、人工智能。

E-mail:tianxling1@163.com