

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0265

基于软体机器人冗余自由度的实时避障位置控制

倪 杭, 王贺升, 陈卫东

(上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 研究了如何利用软体机器人空间运动的冗余性, 解决控制末端位置时环境中存在障碍物的问题. 首先建立了软体机器人的运动学分段常曲率模型, 设计了实现实时避障和末端位置控制双重任务的控制算法. 算法中在障碍区周围划分警戒区, 基于机械臂上标记点的位置反馈, 分别给出末端无碰撞风险时的运动策略, 以及当末端和中间点进入警戒区时的运动策略, 并利用雅可比矩阵的广义逆求出应施加的控制变量. 利用李亚普诺夫定理证明了逆雅可比法控制的稳定性. 最后, 在 2 维空间进行了实验, 结果显示末端可以到达目标点, 并且末端与机械臂体能够避开障碍物, 验证了避障算法的有效性和位置控制的稳定性.

关键词: 软体机器人; 冗余自由度; 分段常曲率模型; 避障; 位置控制

中图分类号: TP241

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-03-0265-07

Real-time Obstacle Avoidance and Position Control for a Soft Robot Based on Its Redundant Freedom

NI Hang, WANG Hesheng, CHEN Weidong

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The problem of obstacle avoidance for a soft robot is studied by using the motion redundancy of the soft robot when the tip of the soft robot is controlled to the desired position. The kinematic model of the soft robot based on piecewise constant curvature hypothesis is established. And a controller for both position control of the tip and real-time obstacle avoidance is designed based on this model. In the algorithm, a warning zone is artificially divided around the obstacle. With the position feedback of the marker points on the soft robot, the moving strategy of the tip when it's outside the warning zone, and the moving strategies of the middle points as well as the tip when they're inside the warning zone are given. The required control parameters are solved by the generalized inverse matrix of the Jacobian matrix. Then the stability of the inverse Jacobian control is verified using Lyapunov theory. Finally, experiments are implemented in 2-D space. The results show that the tip can reach the target point, and meanwhile the soft robotic arm successfully avoids the obstacle, which verifies the effectiveness of the obstacle avoidance algorithm and the stability of position control.

Keywords: soft robot; redundant freedom; piecewise constant curvature model; obstacle avoidance; position control

1 引言 (Introduction)

软体机器人由柔软和可延展的材料制成, 拥有无穷多自由度, 具有很强的灵活性和运动能力, 在狭小受限的空间也能够工作, 并且能够与环境安全友好地交互. 这些特点使得软体机器人在搜索营救、医疗手术等方面具有很大优势. 躲避障碍物是在机器人执行任务时的普遍问题, 软体机器人也不例外. 如何对软体机器人进行合理建模、如何利用软体机器人的冗余自由度是本文的关键问题和研究目的.

为了简化软体机器人的模型, 软体机器人的运动学建模中常常应用分段常曲率假设^[1]. 文 [2] 给出了连续型机械臂与空间曲线的形状对应关系, 详细推导了如何用机械臂的参数描述空间曲线. 文 [3] 提出了连续型机器人的运动学模型, 并作了详细的解释和推导. Zheng 等^[4] 从生物解剖学入手, 模拟章鱼真实运动时肌肉的形态建立了软体机器人的 3 维运动模型. 文 [5] 对硅胶材质的一款仿章鱼手线驱柔性机械臂给出了驱动量与末端操作空间变量的运动学关系. 在对软体机器人的动力学模型研究中, Wang 等^[6] 分析了柔性臂受外力时的

轴向应变及应力、弯曲应变及应力和扭转应变及应力, 以及柔性臂的惯性力和重力, 最后基于凯恩方法给出了线驱硅胶柔性机械臂的3维动力学模型.

在冗余度机器人的优化控制中, 研究者们最常用的方法是目标函数梯度投影法^[7-8]. 文[9-10]提出的避障方法中, 由机械臂的位置反馈来计算机械臂与障碍物的相对距离, 找出机械臂上与障碍物距离最近的点, 然后由该点坐标计算避障势函数, 代入目标函数梯度投影公式中求得关节变量的解. 文[10]针对离散超高冗余连续体机器人的避障提出一种实时的控制方法, 当某一模块将发生碰撞时, 驱动前一模块使其避开, 并对后面的模块重新优化配置, 消除因避障而产生的末端与目标的误差.

关于软体机器人的控制, 目前在实际应用中大多仍采用开环控制, 包括多步态机器人^[11]、蛇形机器人^[12]等. 在闭环控制方面, 有基于视觉的简单位置控制^[5], 基于视觉的在受限环境下的自适应位置控制^[13], 基于光纤布拉格光栅检测的柔性机械臂形状控制^[14], 基于神经网络模型辨识的控制^[15].

理论上讲, 软体机器人具有无穷自由度, 意味着, 末端在完成某项任务的同时手臂能够弯曲成任意形状. 在某些特定情况下, 如障碍物较多的环境下, 利用软体机器人的冗余自由度, 在使末端完成任务的同时可以避免碰撞的发生及其产生的损伤, 这也是软体机器人灵活性优势的有力体现. 但与离散连续体机器人相比, 软体机器人的驱动方式和模型有很大不同, 基于文[10]中的逆运动学方法对软体机器人进行控制十分困难. 针对这一问题, 对软体机器人进行合理建模、利用软体机器人的冗余自由度进行避障控制是本文的主要研究目的. 本文采取分段常曲率假设, 建立软体机器人的运动学模型, 基于这一模型利用逆雅可比法进行位置控制, 并通过划分警戒区实现实时避障.

2 运动学模型 (Kinematic model)

软体机器人没有明确的关节, 但可以将机械臂看作一条空间曲线, 曲线可以由一些参数 (如曲率等) 决定, 这些参数也称作虚拟关节变量. 而驱动变量是驱动线的长度变化量, 因此本文建立了两层映射来获得机器人的运动学模型.

2.1 机械设计

本文采用的软体臂在机械结构上模仿章鱼触手, 身体由医用硅胶向模具中灌制而成, 呈圆锥体形状, 在软体臂的中部和末端分别嵌入一个金属圆环, 内部利用驱动拉线来模拟章鱼触手里的纵向肌肉. 软体臂内部共使用8根驱动线进行驱动, 其中

4根驱动线固定在末端圆环, 另外4根固定在中部圆环上, 都以 90° 的间隔均匀分布在软体臂体内靠近表面处, 如图1所示. 8根驱动线的另一端从机体内引出, 缠绕在外围驱动装置的8个滑轮上. 滑轮由舵机驱动转动, 转动时改变驱动线的长度, 从而改变软体臂的形状^[16].

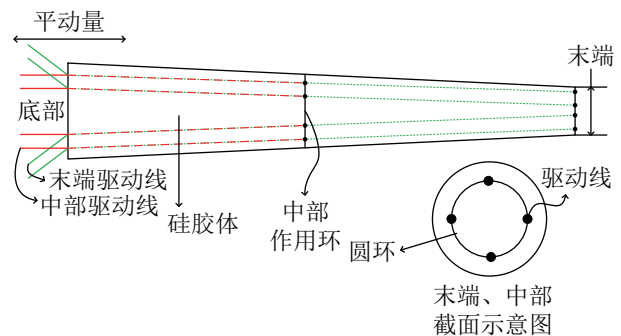


图1 机械结构示意图

Fig.1 The view of mechanical structure

2.2 两层映射

将固定在中部的驱动线标为1,2,3,4, 固定在末端的驱动线标为5,6,7,8. 并将机械臂前后部分各自平均分成 N_1, N_2 段, 假设各分段为常曲率曲线. 每一段圆弧的虚拟关节变量可以设为: 弯曲平面角 ϕ , 圆心角 θ , 圆弧半径 r . 如图2所示, 在上、下截面分别建立局部坐标系 $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 和 $o_ix_iz_i$, 以截面中心为原点, x 轴正方向为原点指向1号(5号)驱动线的方向, z 轴正方向为中心轴切线方向, 且指向下一截面, y 轴可由右手定则确定.

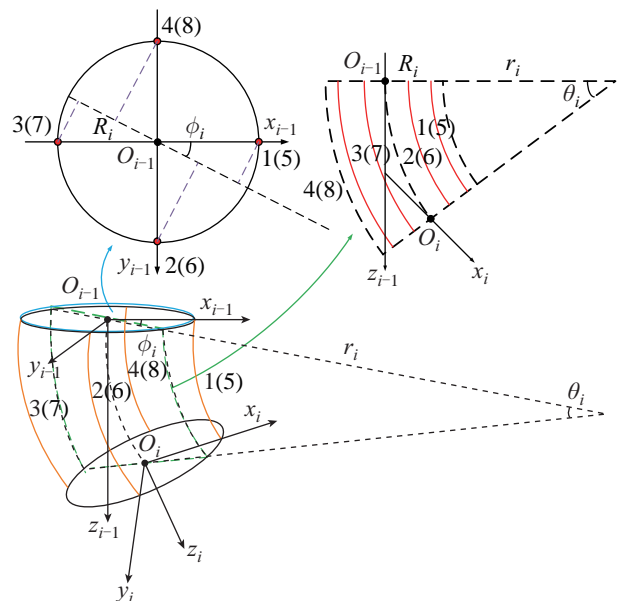


图2 第*i*段软体机械臂参数示意图

Fig.2 Parameters of the *i*-th segment of the soft manipulator

由文[5]的分析可以得到第*i*段虚拟关节变量

与驱动变量的关系:

$$\phi_i = \arctan \frac{q_{4(8)} - q_{2(6)}}{q_{3(7)} - q_{1(5)}} \quad (1)$$

$$\theta_i = \frac{\sqrt{(q_{3(7)} - q_{1(5)})^2 + (q_{4(8)} - q_{2(6)})^2}}{2 N_{1(2)} R_i}, \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, N_1 \quad (N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2)$$

$$r_i = \frac{2(L_{m(e)} - q_{m(e)})R_i}{\sqrt{(q_{3(7)} - q_{1(5)})^2 + (q_{4(8)} - q_{2(6)})^2}}, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N_1 \quad (N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2)$$

其中 q_i 表示第 i 根驱动线的伸缩量, q_m, q_e 表示前、后两部分驱动线的平均伸缩量, L_m, L_e 表示前、后两部分驱动线的原长, R_i 表示第 i 段上(下)截面的半径.

通过式 (1) ~ (3) 建立了驱动变量与虚拟关节变量的关系.

根据图 2, 通过几何分析不难得出, 坐标系 $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 到坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 经过了以下 5 步基本的旋转平移变换:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}T_i = & \text{rot}(z, \phi_i) \text{rot}(y, \frac{\theta_i}{2}) \text{trans}(z, \|o_{i-1}o_i\|) \cdot \\ & \text{rot}(y, \frac{\theta_i}{2}) \text{rot}(z, -\phi_i) \end{aligned} \quad (4)$$

则坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 相对于基坐标系 $o_0 x_0 y_0 z_0$ 的齐次变换矩阵为

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N \quad (5)$$

通过式 (4)、(5) 建立了虚拟关节空间与工作空间的映射.

2.3 速度关系: 微分运动学

根据刚体运动学, 可以得到第 i 段的局部角速度和局部线速度:

$$\begin{cases} {}^{i-1}\omega_i = {}^{i-1}\dot{z}_i \times {}^{i-1}z_i \\ {}^{i-1}v_i = {}^{i-1}\dot{P}_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中 ${}^{i-1}z_i$ 是机械臂中心轴在第 i 个截面处的切向量 z_i 在坐标系 $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 下的表示. ${}^{i-1}P_i$ 是 o_i 相对于上一坐标系的位置向量.

由局部速度可以推出第 i 段的全局速度为

$$\omega_i = \begin{cases} {}^{i-1}\omega_i, & i = 1 \\ \omega_{i-1} + R_{i-1} {}^{i-1}\omega_i, & i > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$v_i = \begin{cases} {}^{i-1}v_i, & i = 1 \\ v_{i-1} + \omega_{i-1} \times R_{i-1} {}^{i-1}\omega_i + R_{i-1} {}^{i-1}v_i, & i > 1 \end{cases} \quad (8)$$

对式 (1) ~ (3) 求偏微分可得到虚拟关节变量与

驱动变量之间的速度关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{r}_i \end{bmatrix} = J_{iq}^{\phi, \theta, R} \dot{q} \quad (9)$$

最终可以得到各点位姿与驱动变量的速度关系:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = J_{iq}^{v, \omega} \dot{q} \quad (10)$$

3 控制器设计 (Controller design)

3.1 实时避障和位置控制算法

位置控制采取逆雅可比法. 而冗余自由度机器人不能直接通过对雅可比矩阵求逆来获得关节的速度. 由文 [17] 可知冗余自由度机器人的逆运动求解可表示为

$$\dot{\Theta} = J^+ \dot{X} + (I - J^+ J) \dot{b} \quad (11)$$

其中 J^+ 为雅可比矩阵的广义逆, \dot{b} 为任意向量, $I - J^+ J$ 是雅可比矩阵 J 的零空间, 即 $J \cdot (I - J^+ J) = 0$. 不难看出, 式 (11) 右边第 2 项不影响末端的运动, 因此这一项又被称作机器人的关节自运动项. 利用这一关节自运动项, 在进行末端位置控制的同时, 可实现机械臂避障的目标.

软体机器人并没有明确的关节, 在运动时机体是连续变形的. 那么, 某时刻软体臂上一点的运动和该点附近一小段区间内的运动可以看作是近似相同的. 因此这里在软体机械臂上取一系列离散点为控制对象, 实验结果也证明了这样选取能够满足避障的目的. 为了便于计算, 在求常曲率运动学模型时, 将机械臂分为 m 个常曲率段, 将反馈点设在每个常曲率段的截面处.

如图 3 所示, 设障碍物的坐标为 x_o , 障碍物的半径为 r_o , 给障碍物的外围划分一个球形警戒区, 半径为 r_s . 机械臂上共分布 m 个标记点, 并在中部圆环处设置一个标记点, 末端为第 m 个标记点, 末端以前到机械臂根部的标记点称为中间点.

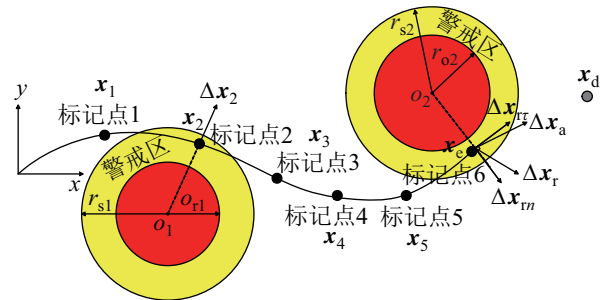


图 3 当机械臂中间点和末端侵入警戒区时的运动策略
Fig.3 The moving strategies for middle and end points when getting into warning zone

设计如下控制方案:

1) 采样时间 Δt 内中间点的运动控制

当除了末端之外的第 i 个标记点进入障碍物 j 的警戒区时, 采取的控制运动为

$$\Delta \mathbf{x}_i = \lambda (r_{sj} - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{oj}\|) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{oj}}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{oj}\|}, \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, m-1$$

其余时刻, 即标记点在警戒区以外时, $\Delta \mathbf{x}_i = 0$.

2) 采样时间 Δt 内末端的运动控制

末端与中间点不同, 除了需要避障外, 主要任务是到达目标位置 \mathbf{x}_d , 因此控制方案复杂一些.

在警戒区以外时, 末端的运动为

$$\Delta \mathbf{x}_e = \frac{\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e}{\|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e\|} \quad (13)$$

当末端进入警戒区时, 末端的运动应分解为两部分, 一部分是目标点对末端的吸引作用下的运动 $\Delta \mathbf{x}_a$, 另一部分是障碍物排斥作用下的运动 $\Delta \mathbf{x}_r$:

$$\Delta \mathbf{x}_e = \Delta \mathbf{x}_r + \Delta \mathbf{x}_a \quad (14)$$

其中 $\Delta \mathbf{x}_a$ 和 $\Delta \mathbf{x}_r$ 的具体求法如下:

$$\Delta \mathbf{x}_a = k \frac{\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e}{\|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e\|} \quad (15)$$

为了增强目标点对末端的吸引作用, $\Delta \mathbf{x}_r$ 分为 2 项, 一项是沿障碍物中心与末端连线并远离障碍物的方向 $\Delta \mathbf{x}_m$, 另一项是与前者垂直但趋向目标点的方向 $\Delta \mathbf{x}_{rt}$:

$$\Delta \mathbf{x}_r = \Delta \mathbf{x}_{rt} + \Delta \mathbf{x}_m \quad (16)$$

其中,

$$\Delta \mathbf{x}_m = \mu_1 (r_{sj} - \|\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{oj}\|) \frac{\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{oj}}{\|\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{oj}\|} \quad (17)$$

$\Delta \mathbf{x}_{rt}$ 应满足以下条件:

$$\Delta \mathbf{x}_{rt} = \mu_2 r_{oj} \frac{\Delta \mathbf{x}'_{rt}}{\|\Delta \mathbf{x}'_{rt}\|} \quad (18)$$

其中 $\Delta \mathbf{x}'_{rt}$ 满足以下条件:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}'_{rt} \cdot \Delta \mathbf{x}'_m = 0 \\ \Delta \mathbf{x}'_{rt} \cdot (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e) > 0 \\ \Delta \mathbf{x}'_{rt} = \arg \min_{\Delta \mathbf{x}'_{rt}} \frac{\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e}{\|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e\|} \cdot \frac{\Delta \mathbf{x}'_{rt}}{\|\Delta \mathbf{x}'_{rt}\|} \end{cases} \quad (19)$$

由式 (12) ~ (19) 得到各标记点在每个采样时间内的期望运动后, 还要求出相应驱动变量的解. 通过微分运动学的分析, 可以得到机器人上各标记

点的雅可比矩阵. 根据式 (11), 当采样时间较小时, 在 Δt 内有

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e + \boldsymbol{\beta} \quad (20)$$

其中 $\boldsymbol{\beta}$ 为关节自运动项, 且满足机械臂避障的要求, 则有

$$\mathbf{J}_e \boldsymbol{\beta} = \mathbf{0} \quad (21)$$

$$\mathbf{J}_i \boldsymbol{\beta} = \mathbf{J}_i \Delta \mathbf{q} - \mathbf{J}_i \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e, \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (22)$$

\mathbf{J}_e 为末端的雅可比矩阵, \mathbf{J}_i 为机械臂中间标记点 $1, 2, \dots, m-1$ 的雅可比矩阵. 联立式 (21)、(22) 可得:

$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{J}^+ \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_i \Delta \mathbf{q} - \mathbf{J}_i \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}^+ = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_e \\ \mathbf{J}_i \end{pmatrix} \quad (23)$$

最终得到每个采样时间内的控制律为

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e + \mathbf{J}^+ \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_i \Delta \mathbf{q} - \mathbf{J}_i \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e \end{pmatrix} \quad (24)$$

整个控制方案的框图如图 4 所示.

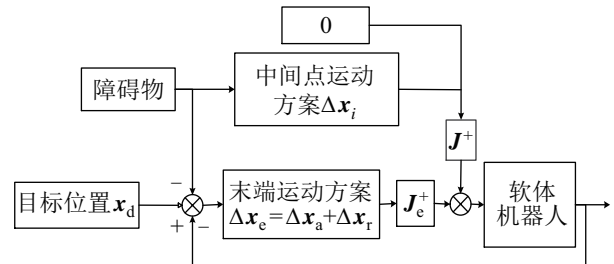


图 4 实时避障与位置控制框图

Fig.4 The block diagram of real-time obstacle avoidance and position control

3.2 稳定性分析

前面已经分析过, 式 (24) 中的第 2 项为关节自运动项, 不影响末端的运动, 因此对末端与目标位置的误差没有影响. 另外, 障碍物对末端运动的影响只在末端进入障碍物警戒区时发生, 而且在设计末端避障算法时, 保证了末端不会因进入局部极小点而一直处于警戒区内, 因此当时间足够长时, 末端的运动是不受障碍物的影响的.

通过以上分析可知, 只需要证明式 (24) 所对应的末端控制律的稳定性, 这里将采用李亚普诺夫的方法:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_e(t) - \mathbf{x}_d(t) \quad (25)$$

将末端控制律写成关于误差的速度形式:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_e^+ \Delta \mathbf{x}_e = -\mathbf{K} \mathbf{J}_e^+ (\mathbf{J}_e \mathbf{J}_e^T)^{-1} \mathbf{e}(t) \quad (26)$$

其中 $K = k \frac{1}{\|x_e - x_d\|}$. 构造李亚普诺夫函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} e^T(t) k e(t) \quad (27)$$

显然, 式 (27) 所示的李亚普诺夫函数是恒大于等于 0 的, 且只有当 $e(t)$ 所有分量都为 0 时 $V(t)$ 等于 0. 因此李亚普诺夫函数 $V(t)$ 是正定的. 对 $V(t)$ 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{e}^T(t) K e(t) \\ &= (J_e \dot{q}(t))^T K e(t) \\ &= (-J_e J_e^T (J_e J_e^T)^{-1} K e(t))^T K e(t) \\ &= -K^2 e^T(t) e(t) \end{aligned} \quad (28)$$

由式 (28) 可以看出 $\dot{V}(t) \leq 0$, 李亚普诺夫函数的导数是负定的. 由李亚普诺夫定理可知系统是稳定的, 当时间趋于无穷大时, 末端与目标点的位置误差趋近于 0.

4 实验数据 (Experimental data)

为不失一般性, 并且能够说明问题, 本文在 2 维平面上实施了 2 组对照实验.

4.1 无障碍的位置控制实验

为体现避障算法的有效性, 并检验运动学模型, 首先做了一组无障碍物的位置控制对照实验. 实验结果如图 5 ~ 7 所示.

图 5 展示了在机械臂运动过程中末端与目标点的距离误差, 可以看出随着时间的推移, 误差越来越小. 而且, 在前期误差减小速度快, 后期误差减小速度放缓. 控制律的本质为 PD 控制, 因此当末端距目标点较远时运动速度较快, 当接近目标点时速度逐渐变慢, 这也体现了控制算法是收敛的. 从图 6 看出, 在 y 方向上的控制出现超调, 可以减小线长伸缩量的增益使超调减小.

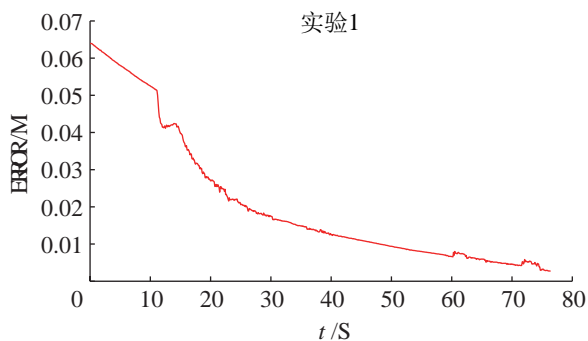


图 5 无障碍物时末端与目标点的距离误差
Fig.5 The distance error between the end-effector and the desired point when no obstacle exists

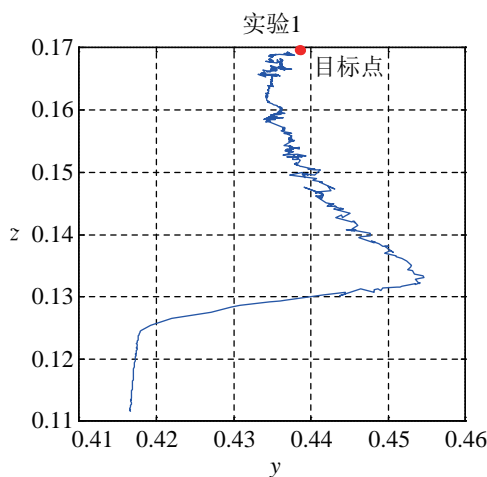


图 6 无障碍物时末端在 y - z 平面上的轨迹
Fig.6 The trajectory of the end effector in y - z plane when no obstacle exists

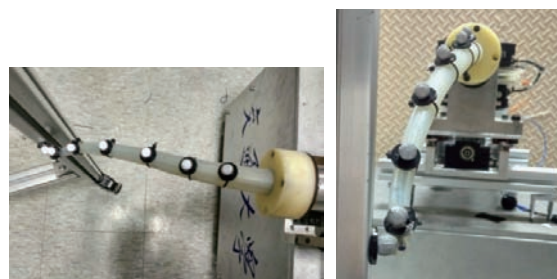


图 7 无障碍物位置控制实验结果

Fig.7 The result of none-obstacle position control experiment

4.2 实时避障的位置控制实验

实验 2 在位置控制的基础上加入避障任务. 结果如图 8 ~ 12 所示. 图 8 展示了末端与目标点的距离随时间的变化情况. 对比图 5, 可以看到在第 40 s 时, 本来逐渐减小的误差开始增大. 结合图 9、图 10 可以看到, 这是因为此时末端和中间点进入了障碍物的警戒区, 控制算法采取了排斥作用.

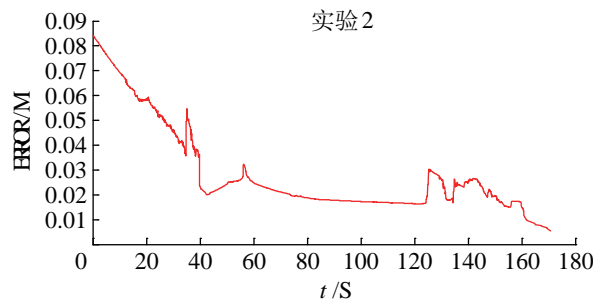


图 8 有障碍物时末端与目标点的距离误差
Fig.8 The distance error between the end-effector and the desired point when an obstacle exists

实验中, 为了确保末端能够尽快到达目标点, 式 (12) 中调节中间点避障步长的 λ 取值较小. 当末端和中间点都进入障碍物的警戒区时, 首先保证末

端迅速逃离警戒区. 在第 120 s 后, 当末端完全逃离警戒区时, 中间点还处于警戒区内, 这时使中间点远离障碍物的控制作用成为主要的排斥力, 在与目标点对末端的吸引作用二者的共同作用下, 最终使末端到达目标点.

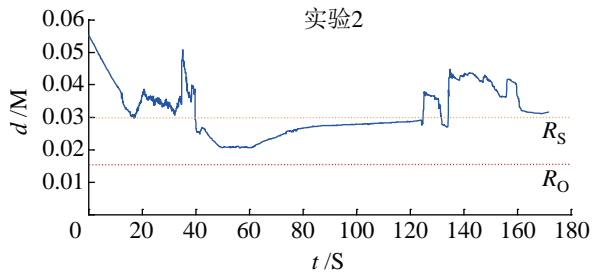


图 9 末端与障碍物中心的距离

Fig.9 The distance between the end-effector and the obstacle centre

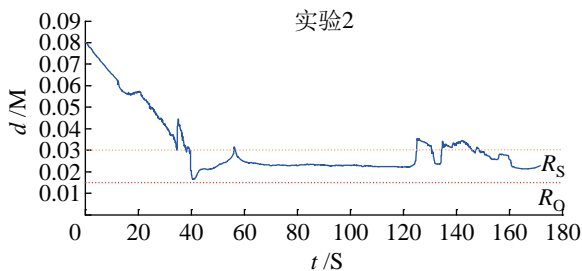


图 10 中间点与障碍物中心的距离

Fig.10 The distance between the middle points and the obstacle centre

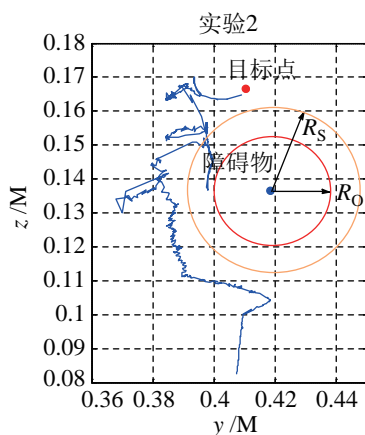


图 11 有障碍物时末端在 y - z 平面上的轨迹

Fig.11 The trajectory of the end-effector in y - z plane when an obstacle exists

在给障碍物设定警戒区时, r_s 不能太小, 以便及时产生相当的排斥作用; r_s 也不能太大, 排斥作用太大, 将会导致末端无法准确到达目标点位置. 调节式 (17) 的 μ_1 和式 (19) 的 μ_2 , 利用软体机器人的冗余自由度, 可以使机器人在避障时避免局部极小点.

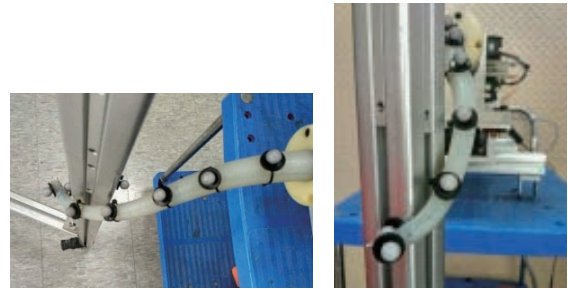


图 12 实时避障的位置控制实验结果

Fig.12 Result of the position control experiment based on real-time obstacle avoidance

5 结论 (Conclusion)

本文对线驱动软体机器人进行了运动学建模, 并在此基础上利用软体机器人的冗余性实现实时避障的位置控制任务. 从实验结果可以看出, 整个过程中, 无论是末端还是中间点都在障碍物半径之外, 最终末端与目标点的距离也在可接受误差范围内, 证明了实时避障的位置控制算法的稳定性和有效性. 利用软体机器人冗余自由度进行控制的工作还有很大的提高空间, 这一工作还可以拓展到 3 维, 另外更先进的驱动方式、机械结构, 更具有鲁棒性、更适合软体机器人的控制算法, 都可以使软体机器人更充分地发挥其灵活性方面的优势.

参考文献 (References)

- [1] Webster R J III, Jones B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(13): 1661-1683.
- [2] Mochiyama H, Shimemura E, Kobayashi H. Shape correspondence between a spatial curve and a manipulator with hyper degrees of freedom[C]//IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1998: 161-166.
- [3] Hannan M W, Walker I D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots[J]. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2): 45-63.
- [4] Zheng T J, Branson D T, Guglielmino E, et al. A 3D dynamic model for continuum robots inspired by an octopus arm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 3652-3657.
- [5] 俞晓瑾. 柔性机械臂的运动学和动力学建模及视觉伺服控制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Yu X J. Kinematics and dynamics modeling and visual servo control for soft robotic manipulator[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [6] Wang H S, Wang C, Chen W D, et al. Three dimensional dynamics for cable-driven soft manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2606547.
- [7] Dubey R V, Euler J A, Babcock S M. An efficient gradient projection optimization scheme for a seven-degree-of-freedom redundant robot with spherical wrist[C]//IEEE International Con-

- ference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 1988: 28-36.
- [8] 封岸松, 戴炬. 冗余自由度机械手的避障控制 [J]. 机器人, 2002, 24(3): 213-216.
- Feng A S, Dai J. Obstacle avoidance control about redundant manipulator[J]. Robot, 2002, 24(3): 213-216.
- [9] Ping G X, Wei B, Li X L, et al. Real time obstacle avoidance for redundant robot[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 223-228.
- [10] Motahari A, Zohoor H, Korayem M H. A new obstacle avoidance method for discretely actuated hyper-redundant manipulators[J]. Scientia Iranica, 2012, 19(4): 1081-1091.
- [11] Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(51): 20400-20403.
- [12] McMahan W, Jones B A, Walker I D. Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-Octor[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 2578-2585.
- [13] Wang H S, Yang B H, Liu Y T, et al. Visual servoing of soft robot manipulator in constrained environments with an adaptive controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2613410.
- [14] Wang H S, Zhang R X, Chen W D, et al. Shape detection algorithm for soft manipulator based on fiber bragg gratings[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(6): 2977-2982.
- [15] Li T, Nakajima K, Cianchetti M, et al. Behavior switching using reservoir computing for a soft robotic arm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 4918-4924.
- [16] Deng T, Wang H S, Chen W D, et al. Development of a new cable-driven soft robot for cardiac ablation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 728-733.
- [17] Liegeois B A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, 7(12): 868-871.

作者简介:

倪杭 (1995-), 女, 硕士生. 研究领域: 软体机器人的冗余度控制和鲁棒控制.

王贺升 (1980-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 视觉伺服, 机器人控制, 计算机视觉.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 服务机器人.