

基于脊线模态法和 RRT 算法的蛇形机械臂避障控制研究^①

王 钧^{②***} 常 健^{③*} 李 斌^{*} 王 聰^{*} 刘 春^{*} 张良全^{***}

(* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(** 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110169)

(*** 中国科学院大学 北京 100049)

(**** 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要 相较于传统机械臂,蛇形机械臂具有高灵活性的优势,尤为适合各类非结构化的工作环境。但非结构环境要求蛇形机械臂具有更强的避障能力和适应性。为解决蛇形机械臂的避障轨迹规划问题,提出了一种基于脊线模态法和快速扩展随机树(RRT)的控制算法。分析并建立其运动学模型,研究了机械臂各关节角度变化与绳索长度变化的关系。采用脊线模态法得到了机械臂末端满足期望位姿的空间脊线,并利用二分法拟合空间脊线,由此获得蛇形机械臂的逆解。与经典的雅可比迭代法相比,脊线模态法具有计算简单、效率高、充分反映机械臂几何特征的优点。在脊线模态法的基础之上,对于存在碰撞的空间脊线,进行部分关节调整,生成一条新的无碰撞的期望空间脊线。采用无需建立空间模型的 RRT 算法生成绕过障碍的轨迹。最后在 Matlab 环境下进行仿真,分析角度绳长变化关系,对脊线模态法和避障轨迹生成进行验证。

关键词 蛇形机械臂; 绳索驱动; 脊线模态法; 快速扩展随机树(RRT)

0 引言

随着科学技术的进步,新一代的仿生机器人将遇到一系列的挑战^[1]。替代人在恶劣环境下工作,仿生机器人表现出了良好的应用前景^[2]。现今越来越复杂的工作环境,如太空探索、资源勘探、管道检查、水下工作等,对仿生机器人的工作内容有了更高的要求。目前,研究者通过模仿蛇的生理机构,研究出具有高自由度的蛇形机械臂。为了突出蛇形机械臂的高灵活性,降低机械臂主体的重量,多采用绳索驱动^[3-4]。与传统机械臂相比,蛇形机械臂对复杂的工作环境具有更强的避障能力和适应性。

蛇形机械臂属于多冗余机器人,其逆运动学求

解和轨迹规划具有一定难度,被国内外学者广泛研究。目前运动学求逆通常采用雅可比迭代法^[5-7],但是对多冗余机械臂,存在求解雅可比伪逆困难、计算量巨大的问题。王俊刚等人^[8]针对多冗余蛇形机械臂提出了一种末端跟随运动的逆解算法。根据末端的运动,依次计算出其他关节的运动。与雅可比迭代法相比,末端跟随算法计算量得到了降低,但它只适用于基座能够平移的蛇形机械臂。董云等人^[9]将遗传算法与解析法结合提出了计算量小、适应性强的逆解算法,但是其针对的是平面三自由度冗余机械臂,对于三维空间高自由度机械臂无法快速获得最优解。相比于传统求解方法,脊线模态法可以得到机械臂末端满足期望位姿的脊线,同时反映机械臂的宏观几何构型,具有效率高、计算简单的

① 辽宁省自然科学基金(20180520002)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士;研究方向:蛇形机械臂运动控制研究;E-mail: wangzhen1@sia.cn

③ 通信作者,E-mail: changjian@sia.cn

(收稿日期:2019-11-13)

优点,且对末端姿态有精确的定义,适用于非闭环构型的冗余机械臂的逆解求解。Chirikjian 等人^[10-11]提出了使用“脊线”对多冗余机械臂的运动学进行研究,用空间脊线来表示机械臂的几何特征。Fahimi 等人^[12]改进了 Chirikjian 脊线模型的模态参数方程组,提高了脊线模态法的效率。

而对于机械臂的轨迹规划问题,祁若龙等人^[13]将轨迹规划转化成多目标优化求解问题,并用遗传算法求解。但是随着自由度的增加,遗传算法的待求解参数数量增加,碰撞检测的计算成本也会增加,计算时间随之成倍增加。Zhou 等人^[14]利用蚁群算法规划出机械臂末端的无碰撞最短路径,但是对于更复杂的障碍布局易出现无解的情况。此外,轨迹规划的方法还有人工势场法^[15]、快速扩展随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)算法^[16]、强化学习算法^[17]等。其中,RRT 算法是基于采样查询的规划方法,通过随机采样,不断查询,最终生成一条不发生碰撞的路径,同时避免了对空间的模型建立,具有无需精确的数学模型、适用高维空间等优点,尤为适用于多冗余机械臂高维空间的轨迹规划。

结合脊线模态法和 RRT 的控制算法的优点,本文提出适合于复杂作业空间的蛇形机械臂避障的算法。算法主要利用脊线模态法实现多冗余蛇形机械臂的逆运动学求解,并在此基础之上进行关节自适应调整,最后利用 RRT 算法进行轨迹生成。

本文首先对蛇形机械臂进行结构特性设计及运动模型的建立,其次利用脊线模态法实现机械臂的运动学逆解以及研究避障轨迹规划,最后在 Matlab 环境下进行仿真分析。

1 机械臂结构设计及运动学模型建立

1.1 结构设计

蛇形机械臂采用蜿蜒型^[18]如图 1 所示。整体机械臂由若干段刚性臂杆构成,各臂杆之间由关节连接,具有很好的灵活性及刚度。

蛇形机械臂的驱动方式为绳索驱动,即驱动器电机与机械臂本体分离,驱动器通过绳索进行驱动

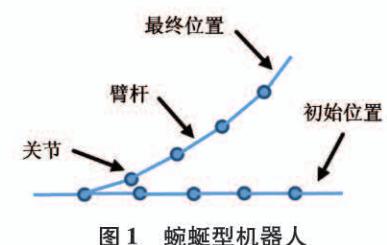


图 1 蜿蜒型机器人

力的传递。绳索驱动有效地减少了机械臂本体的质量与体积。蛇形机械臂的整体结构^[19]如图 2 所示,机械臂关节为万向节类型,单个万向节关节具有 2 个自由度,整个机械臂通过 8 个关节模块串联在一起。基座包含电机和丝杠,电机带动丝杠旋转拉动绳索。

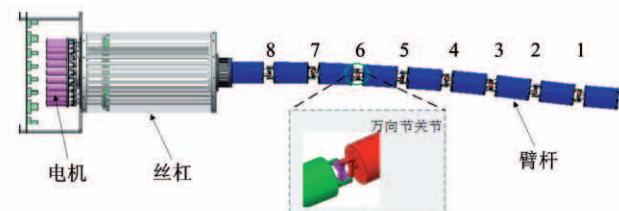


图 2 蛇形机械臂整体结构图

1.2 运动学模型建立

蛇形机械臂单个关节通过 3 根绳索驱动,整个机械臂共有 24 根绳索。绳子在底端圆盘的分布如图 3 所示。

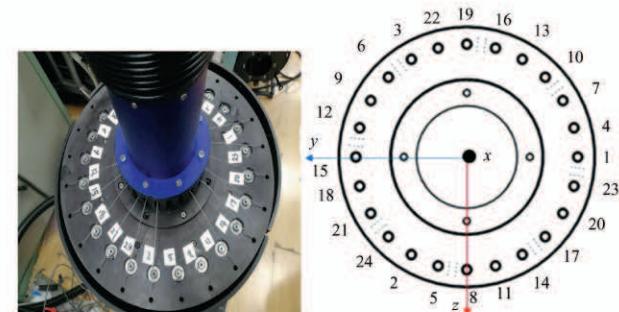


图 3 绳索圆盘分布

图 2 中关节的序号从右向左依次为 1、2、3、4、5、6、7、8,圆盘半径为 r 。根据右手定则,在图 3 中建立的坐标系,第 i 个关节对应的 3 根绳索的坐标矩阵为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{d}_{3i-2} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -r\cos(\frac{\pi}{12}(i-1)) \\ -r\sin(\frac{\pi}{12}(i-1)) \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{d}_{3i-1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ r\cos(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}(i-1)) \\ r\sin(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}(i-1)) \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{d}_{3i} &= \begin{bmatrix} 0 \\ r\cos(-\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}(i-1)) \\ r\sin(-\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}(i-1)) \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

对单个关节进行分析, 关节角度变化与绳索变化的示意图如图 4 所示。 $l_1 h_1$ 、 $l_2 h_2$ 、 $l_3 h_3$ 即表示 3 根绳索, 万向节关节的 2 个角度与 3 根绳索的长度是相对应的。

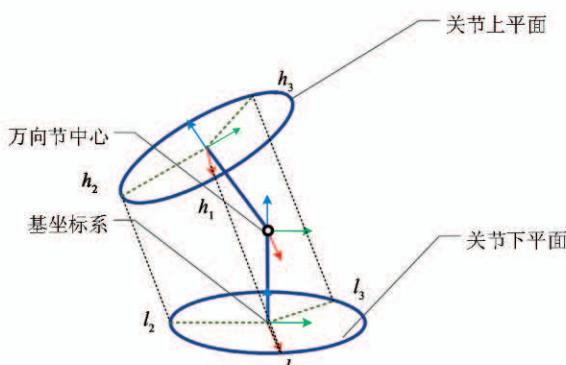


图 4 关节角度与绳长示意图

通过坐标变换法由角度变化得到绳索变化。根据图 4 利用改进型 D-H 法建立单个关节的坐标系, 如图 5 所示。

万向节中心到关节的上平面和下平面的距离均设为 l , 对于第 i 个关节旋转的 2 个角度为 θ_{zi} 和 θ_{yi} , 相对应的变换矩阵为

$${}^0 \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_{zi}\cos\theta_{yi} & -\sin\theta_{zi} & \cos\theta_{zi}\sin\theta_{yi} & l + l\cos\theta_{zi}\cos\theta_{yi} \\ \cos\theta_{yi}\sin\theta_{zi} & \cos\theta_{zi} & \sin\theta_{yi}\sin\theta_{zi} & l\cos\theta_{yi}\sin\theta_{zi} \\ -\sin\theta_{yi} & 0 & -\cos\theta_{yi} & -l\sin\theta_{yi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过式(1)求得关节上平面 3 点 h_1 、 h_2 、 h_3 相对自身坐标系的坐标, 然后根据变换矩阵, 求出相对图 5 中基坐标系的坐标。

$${}^0 \mathbf{h} = {}^0 \mathbf{T}_i {}^3 \mathbf{h} \quad (3)$$

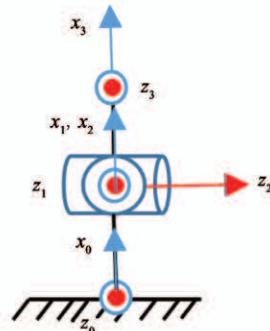


图 5 单关节坐标系

通过两点距离求出当前角度状态下 $l_1 h_1$ 、 $l_2 h_2$ 、 $l_3 h_3$ 的距离。其他关节绳索的长度同理可得。同时蛇形机械臂的运动是存在耦合的。例如 1 号关节对应的 3 根绳索长度变化是所有关节对这 3 根绳索长度变化之和。所以最终给定 16 个角度, 则 24 根绳长变化如式(4)所示, 其中 j 为图 3 中的绳索序号。

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=1}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 16l \quad j = 1, 2, 3$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=2}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 14l \quad j = 4, 5, 6$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=3}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 12l \quad j = 7, 8, 9$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=4}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 10l \quad j = 10, 11, 12$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=5}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 8l \quad j = 13, 14, 15$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=6}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 6l \quad j = 16, 17, 18$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=7}^8 \| {}^0 \mathbf{T}_n \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j \|_2 \right) - 4l \quad j = 19, 20, 21$$

$$\Delta L_j = \left(\sum_{n=8}^8 \| {}_3T_n d_j - d_j \|_2 \right) - 2l \quad j = 22, 23, 24 \quad (4)$$

2 机械臂的逆运动学

蛇形机械臂属于多冗余机械臂,本文首先采用脊线模态法确定蛇形机械臂的空间脊线,其次通过二分法将各个关节拟合在空间脊线上,最后通过几何法计算出各个关节的角度,实现逆解。

2.1 脊线模态法

脊线模态法基于微分几何,用来确定机械臂的空间脊线,如图 6 所示,其函数表达式为

$$x(s, t) = \int_0^s L u(\sigma, t) d\sigma \quad (5)$$

其中, s 表示脊线归一化的长度参数, $s \in [0, 1]$; L 为脊线的实际长度; $u(\sigma, t)$ 为脊线在 σ 处的单位化的切线向量。其中, 脊线的起始坐标就是 $x(0, t)$, 终点坐标为 $x(1, t)$ 。脊线上的点对应的切向量用式(6)表示为

$$\begin{aligned} \mu &= [x'(s) \quad y'(s) \quad z'(s)] \\ &= [\sin K \cos T \quad \cos K \cos T \quad \sin T] \end{aligned} \quad (6)$$

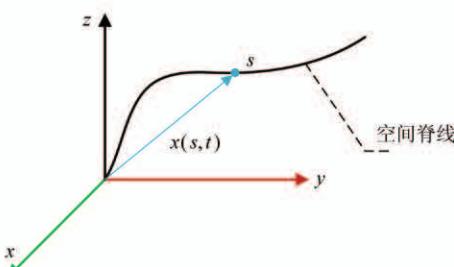


图 6 空间脊线

K 和 T 的定义如图 7 所示。定义空间脊线的起始点为坐标原点,所以空间脊线上的任一点可以表示为

$$x(s, t) = \begin{bmatrix} x(s, t) \\ y(s, t) \\ z(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^s L \sin K(\sigma, t) \cos T(\sigma, t) d\sigma \\ \int_0^s L \cos K(\sigma, t) \cos T(\sigma, t) d\sigma \\ \int_0^s L \sin T(\sigma, t) d\sigma \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此,通过确定 K 与 T 得到空间脊线的整体构

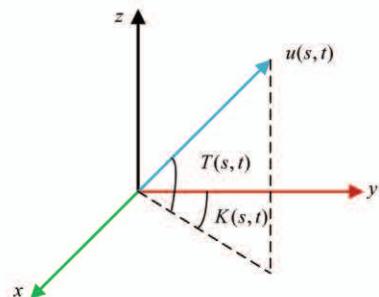


图 7 K 与 T 角度的定义

型。 K 与 T 可表示为

$$\begin{aligned} K(s, t) &= a_1 \sin(2\pi s) + a_2 (1 - \cos(2\pi s)) \\ &\quad + b_{1k} (1 - \sin(\frac{\pi}{2}s)) + b_{2k} \sin(\frac{\pi}{2}s) \\ T(s, t) &= a_3 (1 - \cos(2\pi s)) + b_{1t} (1 - \sin(\frac{\pi}{2}s)) \\ &\quad + b_{2t} \sin(\frac{\pi}{2}s) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中 a_1 、 a_2 、 a_3 为模态协同参数, $[b_{1k}, b_{1t}] = [K(0, t), T(0, t)]$ 为起始位置的 2 个角度, $[b_{2k}, b_{2t}] = [K(1, t), T(1, t)]$ 为脊线末端的 2 个角度。 b_{1k} 、 b_{1t} 、 b_{2k} 、 b_{2t} 是根据期望目标确定的。得到合适的模态协同参数就可以确定 K 与 T 。本文采用数值解析法来求解模态协同参数。在 $s = 1$ 情况下将式(7)对 t 求导, 整理得:

$$\dot{x} = J(\mathbf{a}) \dot{\mathbf{a}} \quad (9)$$

其中, \dot{x} 为 $[\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T$, $\dot{\mathbf{a}}$ 为 $[\dot{a}_1 \quad \dot{a}_2 \quad \dot{a}_3]^T$, $J(\mathbf{a})$ 为 3×3 的模态雅可比矩阵:

$$J(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} J_{11} &= \int_0^1 L \cos(K(\sigma, t)) \cos(T(\sigma, t)) \sin(2\pi\sigma) d\sigma \\ J_{12} &= \int_0^1 L \cos(K(\sigma, t)) \cos(T(\sigma, t)) (1 - \cos(2\pi\sigma)) d\sigma \\ J_{13} &= \int_0^1 -L \sin(K(\sigma, t)) \sin(T(\sigma, t)) (1 - \cos(2\pi\sigma)) d\sigma \\ J_{21} &= \int_0^1 -L \sin(K(\sigma, t)) \cos(T(\sigma, t)) \sin(2\pi\sigma) d\sigma \\ J_{22} &= \int_0^1 -L \sin(K(\sigma, t)) \cos(T(\sigma, t)) (1 - \cos(2\pi\sigma)) d\sigma \\ J_{23} &= \int_0^1 -L \cos(K(\sigma, t)) \sin(T(\sigma, t)) (1 - \cos(2\pi\sigma)) d\sigma \end{aligned}$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{32} = 0$$

$$J_{33} = \int_0^1 L \cos(T(\sigma, t)) (1 - \cos(2\pi\sigma)) d\sigma$$

根据式(9)建立迭代公式:

$$\mathbf{a}_{m+1} = \mathbf{a}_m + \alpha J^{-1}(\mathbf{a}_m)[\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_m] \quad (11)$$

其中, α 为控制收敛率的常数, m 为迭代次数, $J^{-1}(\mathbf{a}_m)$ 为式(10)中 3×3 的模态雅可比矩阵的逆矩阵, \mathbf{x}_d 为脊线末端期望位置, \mathbf{x}_m 为当前求解的位置。收敛系数 α 和迭代总次数根据经验选择, 直到期望位置与当前求解的位置的误差满足精度要求, 则得出合适的模态协同参数。模态协同参数确定之后, 即得到一条末端满足期望位姿的空间脊线。

2.2 关节拟合

得到满足期望目标的空间曲线之后, 通过关节拟合, 将蛇形机械臂的各个关节点尽可能地拟合到空间曲线上。本蛇形机械臂有 8 个关节, 起点为坐标原点, 终点即为所求空间脊线的终点, 需要在曲线上拟合 7 个点。同时保证相邻两点之间的距离为单个臂杆的长度, 本文采用二分法从终点倒推, 依次查找其他关节点的空间坐标, 流程图如图 8 所示。

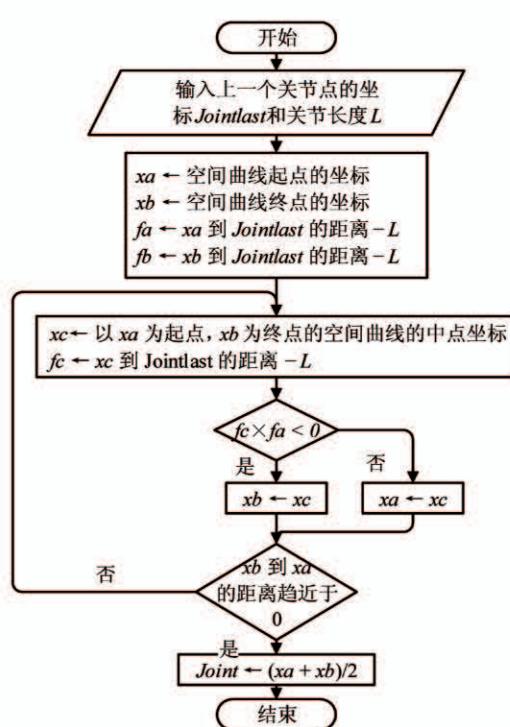


图 8 二分法算法流程图

通过二分法计算得出蛇形机械臂所有关节点的空间坐标, 之后利用坐标变换法依次求出每个关节对应的 2 个角度值, 将所有角度带入式(4)获得 24 根绳索的长度。

3 机械臂的避障轨迹规划

在各类非结构化的工作环境中, 要使蛇形机械臂从初始位置到达期望位置, 机械臂需要具有良好的避障能力。根据脊线模态法得到一条期望的空间脊线。蛇形机械臂的轨迹规划问题就可以转化为从初始位置的脊线生成到期望脊线的轨迹, 同时充分考虑障碍的影响。以下对不同位置的障碍展开研究。

3.1 障碍在脊线上的避障策略

本文用圆球来表示障碍, 设定障碍圆球的半径为 r_0 。对于碰撞检测, 脊线上存在某点到障碍圆球的圆心的距离小于 r_0 , 则说明碰撞。利用脊线模态法生成的空间脊线上存在障碍, 则可以利用蛇形机械臂高自由度的特性, 通过旋转部分关节, 从而绕过障碍, 形成一条新的空间脊线。

如图 9 所示, 当障碍半径较小时, 通过计算, 只需要调整 2 个关节即可绕过障碍。即以关节 5 的起点、关节 6 的终点连线为旋转轴, 对两关节进行旋转, 直到关节曲线避过障碍。图中障碍存在这个脊线上, 脊线模态法初始生成的空间脊线与障碍发生碰撞, 障碍上方的脊线表示调整 2 个关节之后的脊线。该脊线与其他未发生碰撞的脊线构成了一个新

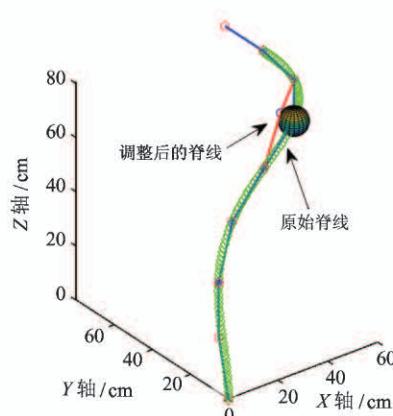


图 9 障碍在关节曲线上

的绕过障碍的空间脊线。调整 2 个关节,计算简便,同时各个关节角变化量小,但对于障碍半径较大的情况,旋转 2 个关节无法避开障碍,则可以选择调整 4 个关节,以此类推。

关节调整分为 3 种情况进行研究。(1) 障碍靠近期望终点,那么在这个期望位姿的空间脊线是无法调整的。在满足要求的情况下,可以更换终点的姿态,生成新的关节曲线。(2) 障碍靠近起始点,则只能对 2 个关节进行调整。(3) 其他情况,首先进行 2 个关节调整,如果对 2 个关节调整后无法避开障碍,则进行 4 个关节的调整。流程图如图 10 所示,图中 n 为机械臂的关节总数。通过分析距离障碍圆心最近的关节序号的大小进行分类讨论。

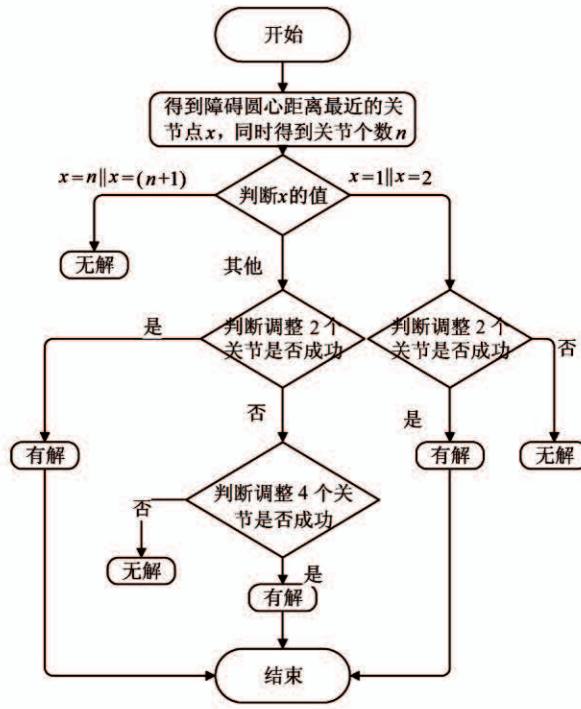


图 10 关节调整流程图

调整 4 个关节的主要思路是先将中间关节调整成能够拟合一条弧线,之后进行旋转避障。5 个关节点设为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 和 L_5 。首先选择 L_1 、 L_3 、 L_5 所在的平面建立坐标系, L_1 、 L_5 点的绝对位置始终保持不变。设单个连杆长度为 L , 先构造以 L_1 、 L_3 、 L_5 为顶点,两边为 $2L$ 的等腰三角形如图 11 所示,同时求出当前坐标系相对基坐标系的变换矩阵。

根据等腰三角形的性质求得 L_3 的坐标,之后进行循环操作,即 L_3 沿着 z 轴负方向减小一个步长。

直至 L_3L_5 的距离等于 L_2L_4 的距离,即保证这 5 个关节点在弧线上,如图 12 所示。

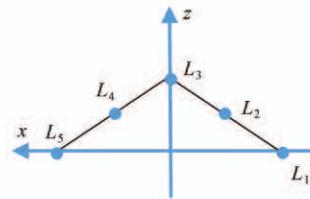


图 11 L_1 、 L_3 、 L_5 构成等腰三角形

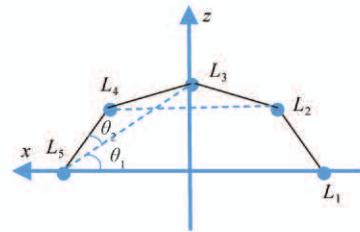


图 12 压缩、拟合圆弧

对 L_2 、 L_3 、 L_4 3 点进行初步调整之后,以 L_1 和 L_5 连线为旋转轴,其他 3 点绕旋转轴进行旋转,直到关节线避开障碍。最后得到 5 个关节点的绝对坐标,与其他关节点形成新的空间脊线,如图 13 所示。原始脊线被调整后生成无碰撞的空间脊线。

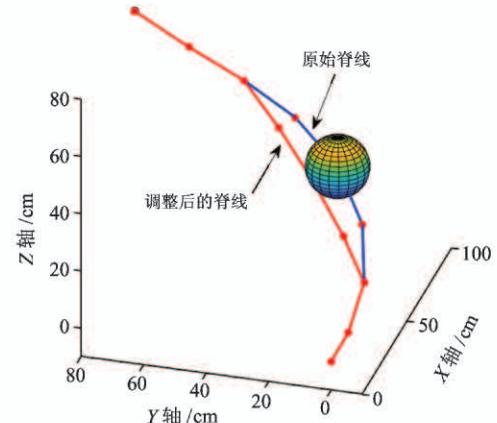


图 13 调整 4 个关节避障

3.2 障碍在其他位置的避障策略

通过上节的分析,解决了期望目标空间脊线上存在障碍的问题。而对于其他位置的障碍,即机械臂从初始位置到达最终位置的过程中存在的障碍,本文采取 RRT 算法生成绕过障碍的路径轨迹。RRT 算法中初始角度矩阵与期望角度矩阵维度为 16。算法在十六维的空间中快速探寻出无碰撞的轨

迹。蛇形机械臂 RRT 算法的流程图如图 14 所示。

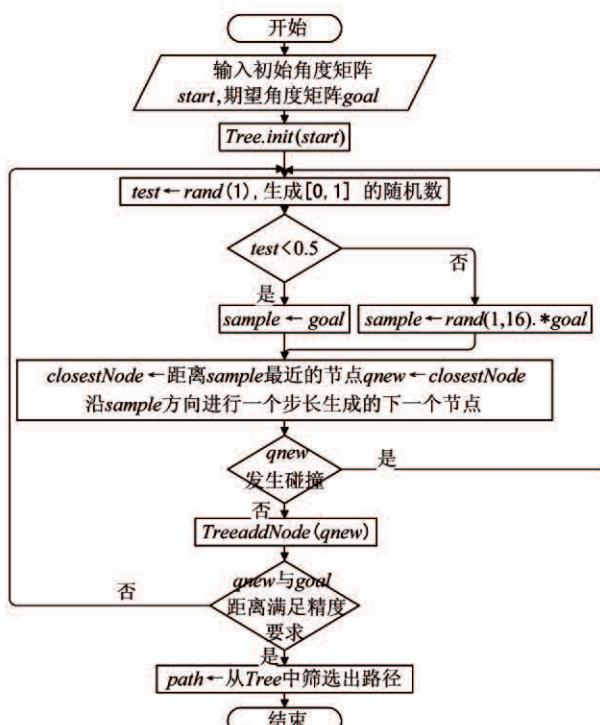


图 14 RRT 算法流程图

4 仿真分析

通过 Matlab 对蛇形机械臂进行仿真,主要包括角度变化与绳长变化映射关系、脊线模态算法、二分法关节拟合效果以及蛇形机械臂轨迹规划,进而验证这些方法的有效性。

对单个关节进行研究,分析角度变化与绳长变化的关系,根据前文图 2 所示,以 1 号关节为例,两个旋转角度为 θ_z 和 θ_y 。圆盘半径 r 为 6 cm,万向节中心到上下端面的距离 l 为 5 cm。两个角度变化的范围均为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 。单个角度变化影响的绳长变化如图 15 所示。从图 15 中上图可以看出,关节 1 在 θ_y 为 0 的情况下 θ_z 变化对 3 根绳索的影响,根据图 3,2 号绳索与 3 号绳索位置关于 y 轴对称,关节绕 z 轴旋转,2 号绳索与 3 号绳索长度变化是相同的, θ_z 变化过程中 1 号绳索伸长,2 号、3 号绳索缩短。从图 15 中下图可以看出,关节 1 在 θ_z 为 0 的情况下 θ_y 变化对 3 根绳索的影响,1 号绳索在 y 轴的负方向上,整体变化不大,2 号绳索逐渐伸长,3 号绳索逐渐缩短。仿真计算分析符合实际情况。

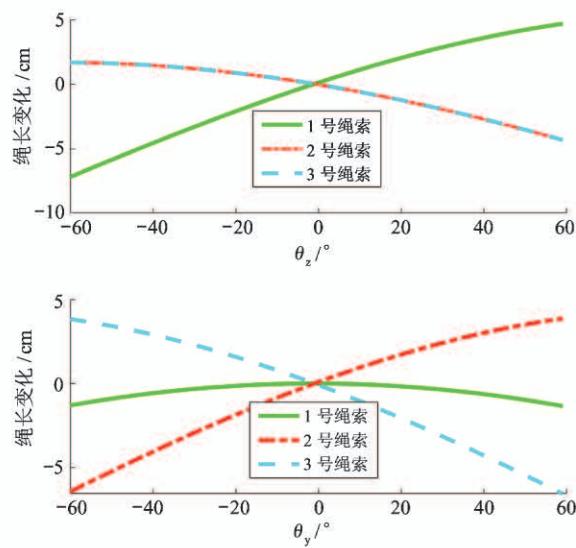


图 15 单关节角度绳长变化图

通过例子对脊线模态法和二分法关节拟合进行分析。单个臂杆的长度为 20 cm,根据脊线模态法,假设起始位置的两个角度 $[K(0, t), T(0, t)] = [\pi/2, 0]$ 切线方向平行于 x 轴,脊线末端的两个角度 $[K(1, t), T(1, t)] = [0, \pi/6]$,末端的位置设为 $[60, 80, 80]$,根据 2.1 节的计算步骤,得到 a_1 为 0.40、 a_2 为 0.13、 a_3 为 0.20。计算生成一条空间脊线,如图 16 所示。曲线为脊线模态法生成的空间脊线。通过二分法进行关节拟合,每个折线段表示单个臂杆。

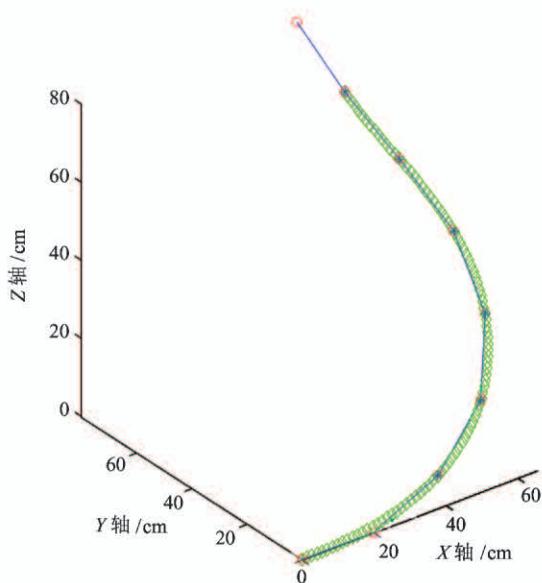


图 16 脊线模态法及关节拟合

对存在脊线上的障碍和其他位置的障碍进行分析,通过调整关节和 RRT 算法生成使末端到达期望位姿且无碰撞的轨迹,如图 17 所示。一簇脊线从右下到左上是算法生成的轨迹。两个圆球代表两种不同类型的障碍。对于存在初始期望脊线上的障碍,脊线调整 4 个关节生成绕过障碍的空间脊线,之后利用 RRT 算法生成图中的轨迹,使蛇形机械臂到达期望的目标。

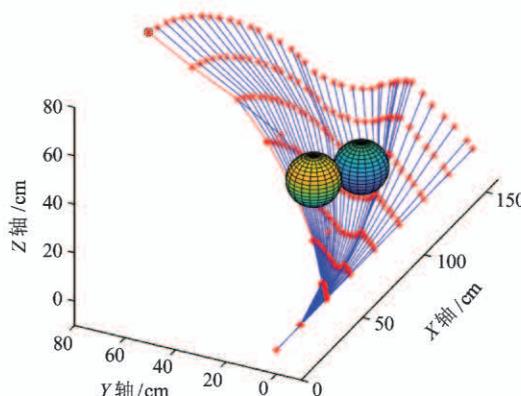


图 17 蛇形机械臂轨迹规划

从数值上分析图 17 中的轨迹无碰撞发生。图中两个障碍的半径设定为 10 cm, 蛇形机械臂从当前轨迹运动到下一个轨迹的时间为 0.1 s, 则两障碍圆心到每个轨迹的最短距离变化如图 18 所示。实曲线为存在脊线上的障碍圆心到机械臂的最短距离, 从初始位置到最终位置, 距离呈减小趋势。调整关节时考虑的是理想情况, 不发生碰撞就停止调整

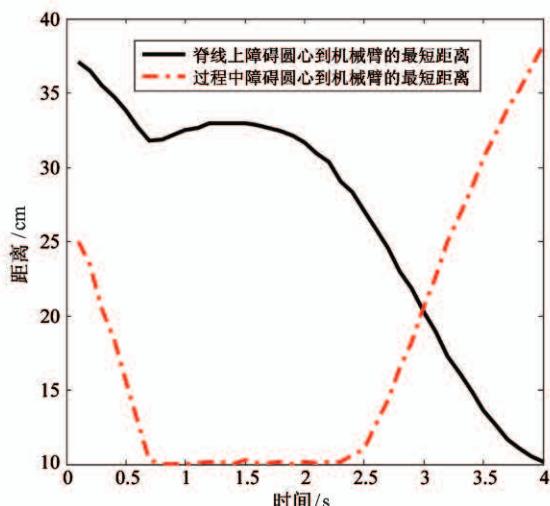


图 18 两障碍到所有轨迹的最短距离

关节, 脊线上存在某点在障碍的临界位置, 所以最终轨迹机械臂到圆心的距离逼近 10 cm。虚曲线为过程中障碍圆心到机械臂的最短距离, 数值先减小后增加。只要满足虚曲线每点对应的值大于 10 cm 即表明无碰撞发生, 算法生成的路径中有一段靠近障碍, 如图 17 所示, 因此虚曲线存在一部分距离接近于 10 cm。

对图 17 中机械臂运动中绳长变化进行分析。通过式(4)计算得出在蛇形机械臂运动过程中每条脊线对应的绳索长度, 24 条绳索长度变化如图 19 所示。图 17 中每条脊线末端两条线段变化较小, 即代表关节 7、关节 8 角度变化较小, 对应图 19 中绳索 19~24 长度变化较小。

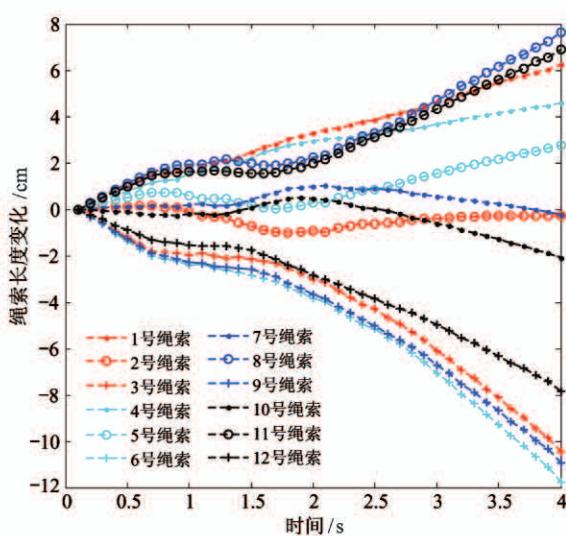
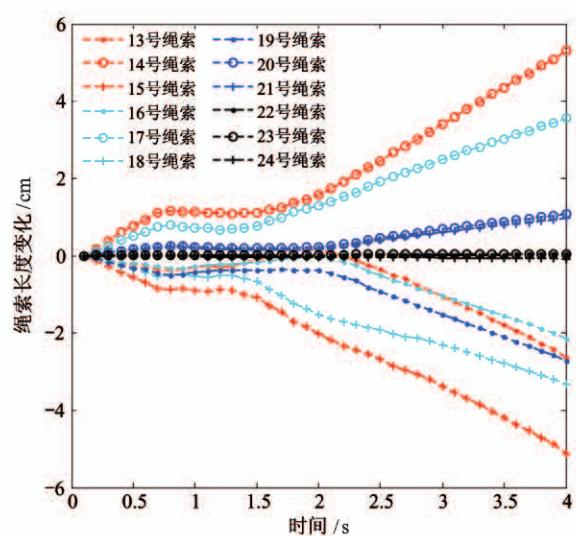


图 19 绳长变化



5 结 论

本文以蛇形机械臂为研究对象,研究得到机械臂各角度变化到绳索长度的函数关系。提出了一种基于脊线模态法和 RRT 算法的避障轨迹规划算法。采用脊线模态法得到满足期望位姿的空间脊线,通过二分法对空间脊线进行关节拟合。在脊线模态法的基础之上主要对存在于脊线上的障碍进行分析,通过调整关节得到不经过障碍的空间脊线,然后利用 RRT 算法生成无碰撞的轨迹。最后,通过 Matlab 仿真分析了单关节角度绳长的变化关系,并验证了基于脊线模态法与 RRT 的避障控制算法的可行性。在未来的研究中,将进一步改进蛇形机械臂的避障轨迹规划算法,优化调整关节的算法,探寻最优路径,降低蛇形机械臂的工作代价。

参 考 文 献

- [1] Yang G Z, Bellingham J, Dupontpe, et al. The grand challenges of science robotics [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14) : 1-14
- [2] 王国彪,陈殿生,陈科位,等. 仿生机器人研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报,2015,51(13) : 27-44
- [3] 马可,李斌,王聪,等. 蛇形机械臂的机构设计与关节驱动分析 [J]. 高技术通讯,2017, 27(11-12) : 958-965
- [4] Tang L, Wang J, Zheng Y, et al. Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14(5) : doi:10.1177/1729881417734458
- [5] Cobos-Guzman S, Palmer D, Axinte D. Kinematic model to control the end-effector of a continuum robot for multi-axis processing [J]. *Robotica*, 2017, 35(1) : 224-240
- [6] Trebua F, Virgala I, Pástor M, et al. An inspection of pipe by snake robot [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(5) : doi: 10.1177/1729881416663668
- [7] Whitney D E. Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses [J]. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 1969, 10(2) : 47-53
- [8] 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
- [9] 董云,杨涛,李文. 基于解析法和遗传算法的机械手运动学逆解 [J]. 计算机仿真,2012(3) : 239-243
- [10] Chirikjian G S, Burdick J W. A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(3) : 343-354
- [11] Walker I D, Choset H, Chirikjian G S. Snake-like and Continuum Robots [M]. Berlin: Springer, 2016: 481-498
- [12] Fahimi F, Ashrafiou H, Nataraj C. An improved inverse kinematic and velocity solution for spatial hyper-redundant robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(1) : 103-107
- [13] 郝若龙,周维佳,王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法 [J]. 机器人, 2014, 36(3) : 263-27
- [14] Zhou D, Wang L, Zhang Q. Obstacle avoidance planning of space manipulator end-effector based on improved ant colony algorithm [J]. *Springer Plus*, 2016, 5(1) : 1-13
- [15] 曹博,毕树生,郑晶翔,等. 改进人工势场法的冗余机械臂避障算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2019, 51(7) : 184-191
- [16] Ma C, Zhang Y, Zhao Q J, et al. 6R serial manipulator space path planning based on RRT [C] // The 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, China, 2016: 99-102
- [17] Wu J, Shin S, Kim C, et al. Effective lazy training method for deep q-network in obstacle avoidance and path planning [C] // 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Alberta, Canada, 2017: 1799-1804
- [18] Ahmadzadeh S R. Modeling of hyper-redundant manipulators dynamics and design of fuzzy controller for the system [C] // International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, Waltham, USA, 2005: 248-253
- [19] 张良全. 蛇形机械臂的运动与控制研究 [D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2018;17

Research on obstacle avoidance control of snake-like manipulator based on backbone mode method and RRT algorithm

Wang Zhen * *** ***, Chang Jian *, Li Bin *, Wang Cong *, Liu Chun *, Zhang Liangquan ****

(* State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(** Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169)

(*** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(**** College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract

Compared with the traditional manipulator, the snake-like manipulator has the advantage of high flexibility, especially suitable for complex work environments. However, the complex environment requires the snake-like manipulator to have greater obstacle avoidance ability and adaptability. To solve the obstacle avoidance trajectory planning problem of snake-like manipulators, a control algorithm based on backbone mode method and rapidly-exploring random tree (RRT) is proposed. The kinematics model is analyzed and established. The relationship between the change of the joint angle of the manipulator and the length of the rope is studied. The backbone mode method is used to obtain the spatial ridge of the end of the manipulator that meets the desired pose, and the joint curve is fitted by the dichotomy, thereby obtaining the inverse solution of the snake-like manipulator. Compared with the classical Jacobian iterative method, the backbone mode method has the advantages of simple calculation, higher efficiency and accurate reflection of the geometric characteristics of the manipulator. Joint adjustment is performed on base of the backbone mode method for the spatial ridges with collisions, and a desired spatial ridge is generated. The rapidly-exploring random tree algorithm which doesn't need to build the space model is used to generate a trajectory that bypasses the obstacle. Finally, the simulation is carried out in the Matlab environment to analyze the relationship between the length of the rope and verify the backbone mode method and the obstacle avoidance trajectory generation.

Key words: snake-like manipulator, wire-driven, backbone mode method, rapidly-exploring random tree (RRT)