

气压驱动软体机械臂运动建模研究

冯 静

梧州学院机械与资源工程学院 广西梧州 543002

摘 要: 针对柔性材料的变形特点和软体机械臂的运动特性,对气动软体机械臂的运动进行分析建模,在传统的 D-H 法基础上,提出一种基于分段常曲率(PCC)理论和 Cosserat 梁理论的运动建模方法。

关键词: 气动;软体机械臂;运动;建模

引言

近年来随着机器人技术的不断发展,人们对于机器人操作性能的要求也越来越高。传统的刚性机械臂由于其刚性结构的限制,在执行很多特定任务时表现出局限性,而软体机械臂则可以用在一些复杂环境和危险任务中。例如,在医疗领域,软体机械臂由于其柔顺性可以用于手术操作,减少对患者的损伤;在救援、军事领域,软体机械臂可以用于狭小空间的操作以及执行特殊任务,如搜索、救援等,提高救援效率。然而,在对软体机械臂进行深入研究和探索过程中,国内外学者们迎来了一波挑战,遇到了一些问题。例如,如何实现精确的运动控制和感知能力,如何保证操作的安全性和稳定性等。我们需要进一步研究和优化软体机械臂的设计和控制方法,以实现更加广泛的应用。

1 研究背景

近年来,许多学者从仿生学中汲取灵感,应用智能材料设计制造了仿生软体机器人,创办了《Soft Robotics》著名刊物,且在国际顶尖杂志上发表了诸多相关文章。软体机械臂是一种新型的机器人技术,其灵感来源于自然界中仿生动物,如蛇、象鼻、章鱼臂等,因其类似于软体动物柔顺、安全的运动特点,其结构简单、重量轻、可塑性强,具有较高的灵活性和适应性,可以适应复杂的环境,在制造维修、安检以及医疗等领域展现出广阔的应用前景,成为仿生软体机器人领域研究热点之一。

软体机械臂通常由软体材料、驱动器和控制系统等组成。其中,软体材料是机械臂的主体结构,通常由柔性材料组成,它具有较好的柔性和顺应性,可以更好地适应环境变化。驱动器是用来驱动机械臂运动的装置。控制系统则是用来接收指令并控制机械臂的运动。目前,软体机械臂的研究主要集中在材料选择、结构设计、驱动控制等方面。

软体机械臂运动控制是一个相对较新的研究领域,它结合了软体机器人技术、运动控制理论和先进制造技术等多个领域的知识。传统的刚性连杆机械臂运动主要发生在关节位置,通过关节间的相

对旋转和相对移动获得机械臂的末端位姿,可通过连杆长度和关节角等参数对机械臂的形状和位置进行直观几何描述^[1]。软体机械臂是由具有弹性的柔性材料组成,不仅可以连续弯曲,还可以伸缩变形,因为软体机械臂无法像刚性连杆机械臂一样利用关节运动获得目标位置和姿态,这种连续性使得其运动控制变得复杂起来。

对于传统刚性机械臂,D-H 法提供了一个通用的运动学模型。针对软体机械臂的材料性质和运动特性,国内外学者们对其运动控制方法展开了一系列广泛的研究,给出了多种不同形式的软体机械臂位姿的运动学模型。不同于刚性连杆机械臂,软体机械臂在其结构的多数点上都可以改变形状,因此其理论模型必然与传统机械臂有很大的不同。对于多余余度的软体机械臂,局部形状沿主干连续变化的情况需在运动学模型中有所反映^[1]。

美国约翰-霍普金斯大学 Chirikjian 和 Burdick 于 1994 年提出了一种模态方法对冗余机械臂进行运动学建模,在该模型中,冗余机械臂的姿态被描述成从基部出发,沿着机械臂中心线切矢量方向生长的一种背脊曲线,一旦根据末端位置确定了机械臂的弯曲曲线,即可采用分段拟合方法获得各个关节的参数。2003 年美国克莱门森大学 Hannan 和 Walker 通过假定每段象鼻机械臂不能伸展且弯曲曲率为常数的方法,将多余余度分解为多个以关节形式连接的杆件,从而利用 D-H 法建立软体机械臂运动学模型。2006 年, Jones 和 Walker^[2]对基于 D-H 法建立的软体机械臂运动学模型进行了修正,并提出了一种与连续体机器人形状相关的几何建模法。

2008 年,斯坦福大学 Camarillo 等利用反力学模型的方法构建了驱动位移和关节形状的线性映射,并基于此给出了逆运动学求解方法。2010 年, Webster 和 Jones 又对连续体机器人的设计方法、正运动学及逆运动学建模进行了总结,分析了众多常曲率特征建模法(如弧几何法、D-H 法、积分表示法、指数坐标法等)的特点。2015 年,法国里尔综合理工学院 Escande 等^[3]采用圆弧几何的方法,建立了气动两段仿生机械手 Robotino XT 的正运动学模型。本文对上述学者们提出的各种建模方法进行研究探索,提出一种正运动学

模型,该模型采用了基于传统 D-H 法的分段常曲率理论和 Cosserat 梁理论。

2 单段臂建模

不同于传统刚性连杆关节型机械臂,由于所设计的软体机械臂为柔性材料,作为致动器的主要组成部分,本体的弯曲变形具有连续性和高度冗余的自由度。因此,传统的 D-H 法无法对软体机械臂进行运动学分析,对于它的运动学描述只能采用连续体方程^[4]。对于软体机械臂的运动控制,主要有两种基本方法:正向运动学和逆向运动学,正向运动学主要根据机器人关节角度计算机器人末端位置和姿态;逆向运动学则是根据机械臂末端的位姿和关节状态,反推机器人手臂或关节的移动路径,从而实现对物体的精准操控。本次结合传统 D-H 法,采用分段常曲率假设和 Cosserat 梁理论对单段软体机械臂建立正向运动学模型^[5]。

本次研究的气动软体机械臂可分为多段机械臂,每段臂均由硅胶材料制成,每段臂带有三个压力驱动腔室,这三个腔室在横截面上间隔 120° 均匀并联分布,如图 1-a 和 1-b 所示。

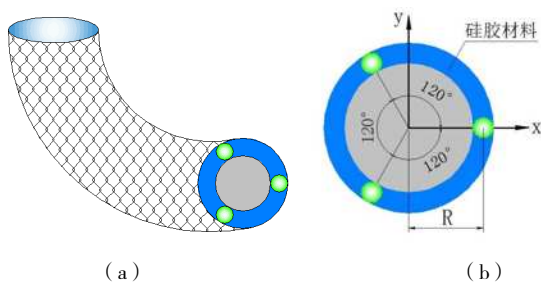


图 1 软体机械臂横截面

三个气腔室内的空气压力决定了机械臂在三维空间中的弯曲、伸缩及方向。相比传统的刚性连杆机械臂而言,软体机械臂是一种复杂的空间曲线结构,本次采用分段常曲率方法对其进行运动学建模,将其简化成多段曲率半径不同、弯曲角度不同的圆弧串联而成,如图 2-a 和 2-b 所示。

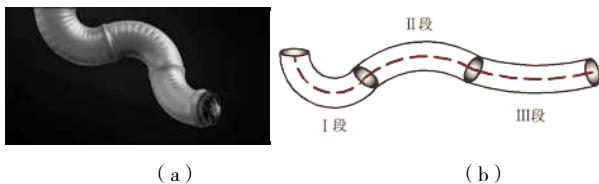


图 2 软体机械臂分段示意图

分段常曲率法是一种假设,用于建立连续体机械臂的正逆运动学求解几何模型^[4-5]。分段常曲率法假定组成机械臂的单段圆弧等曲率,即同一段圆弧内各点具有相同的曲率半径。对单段机械臂进行正运动学建模,配置空间关节变量 K 用弧形参数表示, $K = [\kappa \ \varphi \ s]^T$, 其中 κ 代表圆弧曲率; φ 代表单段臂绕 Z 轴的偏转角; s 代表圆弧弧长。

ρ 表示圆弧的曲率半径; α 表示单段臂圆弧弯曲角,如图 3-a 和 3-b 所示。

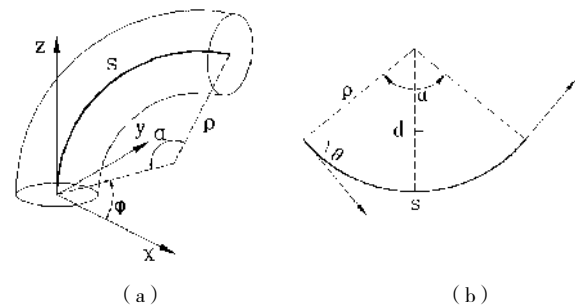


图 3 单段臂弧形参数

这些几何参数之间的关系如式 1、式 2、式 3 所示:

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{s}{\rho} = \kappa s \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\alpha}{2} = \frac{\kappa s}{2} \quad (3)$$

本次将单段软体机械臂等效为具有 5 个关节的虚拟刚性连杆机械臂,将单段臂的连续运动分解成 5 个关节的相对转动和相对移动,通过几何关系将弧形参数转化为 D-H 法参数表中的关节角度 θ 和相邻两连杆之间的偏距 d ,使末端位姿与机械臂形状关联起来。关节 1、2 的关节变量与关节 4、5 的关节变量之间的耦合关系,如图 4 所示。

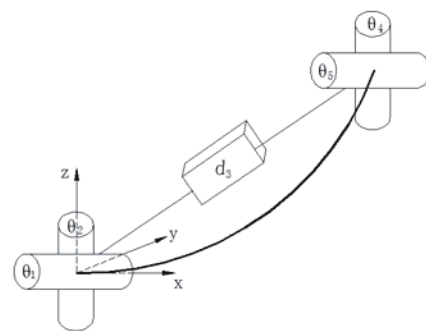


图 4 虚拟刚性连接模型^[2]

虚拟刚性连接模型对应的 D-H 参数表如表 1 所示。

表 1 D-H 参数表

关节	a	a	d	θ
1	0	0	0	θ_1
2	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_2
3	0	$-\frac{\pi}{2}$	d_3	0
4	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ_4
5	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_5

其中 $\theta_3 = -\theta_1$; $\theta_4 = -\theta_2$ 。

软体机械臂的齐次变换矩阵如式 4 所示, 式中 c_i 表示 $\cos \theta_i$; s_i 表示 $\sin \theta_i$ 。

$$T_0^5 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_4 c_5 + c_1 s_2 s_4 c_5 - s_1 s_5 & -c_1 c_2 c_4 s_5 - c_1 s_2 s_4 s_5 - s_1 c_5 & c_1 c_2 s_4 - c_1 s_2 c_4 & -c_1 s_2 d_3 \\ s_1 c_2 c_4 c_5 + s_1 s_2 s_4 c_5 + c_1 s_5 & -s_1 c_2 c_4 s_5 - s_1 s_2 s_4 s_5 + c_1 c_5 & s_1 c_2 s_4 - s_1 s_2 c_4 & -s_1 s_2 d_3 \\ s_2 c_4 c_5 - c_2 s_4 c_5 & -s_2 c_4 s_5 + c_2 s_4 s_5 & s_2 s_4 + c_2 c_4 & c_2 d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

D-H 参数与弧形参数之间的关系可用式 5 表示:

$$[\theta_1 \ \theta_2 \ d_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T = f_1(\kappa, \varphi, s) = \left[\varphi \quad -\frac{\kappa s}{2} \quad \frac{2}{\kappa} \sin\left(\frac{\kappa s}{2}\right) \quad \frac{\kappa s}{2} \quad -\varphi \right]^T \quad (5)$$

用软体机械臂弧形参数来表示的齐次变换矩阵, 如式 6 所示:

$$T_0^5 = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi (\cos(\kappa s) - 1) + 1 & \sin \varphi \cos \varphi (\cos(\kappa s) - 1) & \cos \varphi \sin(\kappa s) & \frac{1}{\kappa} \cos \varphi (1 - \cos(\kappa s)) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos(\kappa s) - 1) & \sin^2 \varphi \cos(\kappa s) + \cos^2 \varphi & \sin \varphi \sin(\kappa s) & \frac{1}{\kappa} \sin \varphi (1 - \cos(\kappa s)) \\ -\cos \varphi \sin(\kappa s) & -\sin \varphi \sin(\kappa s) & \cos(\kappa s) & \frac{1}{\kappa} \sin(\kappa s) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

气动软体机械臂的运动模型基于 Cosserat 梁理论, 驱动空间变量 $Q = [P_1 \ P_2 \ P_3]^T$, 其中 P_1 、 P_2 、 P_3 分别代表三个气腔室的压力。各腔室压力用矢量 F_i 表示, $F_i = [0 \ 0 \ P_i]^T$, 其中 i 代表气腔室的序号。因为 F_i 与 Z 轴平行, 垂直于横截面, 其对 Z 轴的力矩为零, 其产生的力矩会导致机械臂的纯弯曲。由于三个腔室直径和压力在同一段机械臂中是恒定的, 因此产生的力矩也是恒定的。忽略重力等外力的影响, 三个腔室压力产生的总弯矩 M 在单段臂任何横截面上都具有相同的数值。

三个腔室压力对横截面产生的总弯矩 M 如式 7 所示:

$$M = \sum_{i=1}^3 r_i \times F_i \quad (7)$$

r_i 表示腔室 i 相对于横截面中心轴的矢量位置;

$r_i = \left[R \cos\left(\frac{2\pi}{3}i\right) \ R \sin\left(\frac{2\pi}{3}i\right) \ 0 \right]^T$, 其中, R 表示横截面中心到腔室中心的距离, 如图 1-b 所示。

根据欧拉-伯努利公式, 横截面上总弯矩 M 的大小与曲率 κ 成正比, 具体关系如式 8:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (8)$$

其中, E 表示材料的杨氏模量; I 表示横截面惯性矩。

由于硅胶是变形材料, 三个腔室的压力会导致软体机械臂轴向的伸缩变形。沿着臂轴方向的伸长量 ΔL 可以用胡克定律来计算, 如式 9 所示:

$$\Delta L = L_1 - L_0 = \frac{F_R}{EA} L_0 \quad (9)$$

其中 F_R 是横截面上三个腔室产生的总压力, 它是每个腔室压

力 F_i 所产生的合力, $F_R = \sum_{i=1}^3 F_i$; L_0 表示未充气状态下机械臂初始

轴向长度; L_1 为充气后机械臂的轴向长度; A 是截面中硅胶部分的面积, 即总截面面积减去三个腔室截面面积, 如图 5 所示。

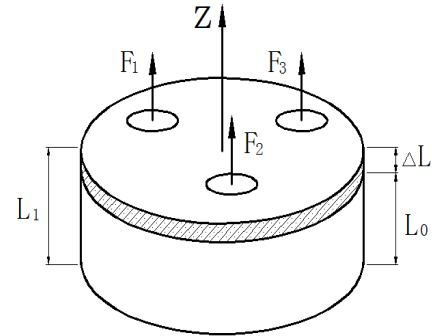


图 5 机械臂轴向变形

工作空间变量 $X = [x \ y \ z]^T$ 表示末端位置。正运动学模型将驱动空间变量 Q 映射到配置空间关节变量 $K = f_2(Q)$, 最后映射到工作空间变量 $X = f_3(K)$ 。末端位置 X 如式 10 所示:

$$X = \left[\frac{1}{\kappa} \cos \varphi (1 - \cos(\kappa s)) \quad \frac{1}{\kappa} \sin \varphi (1 - \cos(\kappa s)) \quad \frac{1}{\kappa} \sin(\kappa s) \right]^T \quad (10)$$

3 总结

软体机械臂运动控制的研究具有重要的理论意义和实际应用价值, 如何提高机械臂的感知能力和智能水平也是今后研究的主要方向。未来的研究可以进一步探索软体机械臂的顺应性和灵活性, 同时, 也可以将软体机械臂与其他类型的机器人进行融合和创新应用, 拓展其应用领域和应用场景。

参考文献:

- [1]杨妍, 刘志杰, 韩江涛等.软体机械臂的驱动方式、建模与控制研究进展[J].工程科学学报, 2022, 44 (12): 2124-2137.
- [2]Jones B A, Walker I D.Kinematics for multisection continuum robots[J].IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22 (1): 43-55.
- [3]Escande C, Chettibi T, Merzouki R, et al.Kinematic calibration of a multisection bionic manipulator[J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20 (2): 663-674.
- [4]赵起.气动软体机械臂力学建模与性能分析[D].哈尔滨工业大学, 2022.
- [5]王凌, 张印, 谢雨鑫等.复杂环境下软体机械臂的运动学解耦与避障方法[J].装备制造技术, 2022 (12): 9-12+44.

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2021KY0672);