

新型变刚度软体手臂的设计及控制

项超群, 张 颖, 郭少飞, 郝丽娜
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 软体机器人具有机构重构性、适应性及灵活性. 基于气动系统的软体机器人具有质轻、功率密度比高、人机交互安全性高等优点, 设计了一种由伸长型及收缩型气动肌肉组成的新型变刚度软体机器人手臂. 根据该软体手臂的运动特性建立了运动学模型, 利用 MATLAB 软件分析了手臂的工作空间. 搭建控制实验测试平台, 完成了手臂的轨迹运动控制实验, 实验结果表明: 跟踪阶跃信号上升时间小于 2 s, 稳态平均误差为 0.002 8 rad(0.16°), 正弦信号跟随响应曲线平均误差为 0.015 9 rad(0.911°), 手臂具有良好的可控性.

关 键 词: 软体机器人; 变刚度; 伸长型气动肌肉; 收缩型气动肌肉; 运动控制

中图分类号: TP 241.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)01-0093-05

Design and Control of a Novel Variable Stiffness Soft Arm

XIANG Chao-qun, ZHANG Ying, GUO Shao-fei, HAO Li-na
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: HAO Li-na, professor, E-mail: haolina@me.neu.edu.cn)

Abstract: Soft robot arms has unique capabilities in reconfigurability, adaptability, flexibility and dexterity. In particular, pneumatic soft robotic systems have advantages such as light weight, high power to weight ratio, and having inherent safety in physical human-robot interaction. A novel design of a soft robotic arm consist of both contractile and extensor pneumatic artificial muscle (PAM) was presented. Kinematic model of this arm was established, and the workspace was analyzed using MATLAB. Experiment setup was established, and motion control experiment of the arm was carried out. Experimental results showed that steady state mean error of tracking step signal is 0.002 8 rad(0.16°), rise time is less than 2 s; mean error of tracking sine signal is 0.015 9 rad(0.911°), which means this arm has good controllability.

Key words: soft robot; variable stiffness; expansive PAM; contractile PAM; motion control

自动化技术在许多应用中变得越来越重要. 作为自动化技术重要主题之一的机器人技术, 无论是在制造业领域还是个人护理方面, 都在迅速发展. 传统刚性机器人具有执行动作类型有限, 并且在非结构化和高度拥挤的环境中存在工作受限等不足, 由于软体机器人具有结构的固有柔顺性、灵活性、多功能性及安全性, 因此适合应用在刚性机器人难以工作的环境中. 本文所设计的软体机器人比传统的刚性机器人具有较高的灵活性.

通常软体机器人的驱动策略不干预机器人本体柔顺性, 例如, 软体机器人的驱动方式有绳索驱动、形状记忆合金驱动^[1]或气动驱动. 气动驱动有 OctArm, Festo 公司的仿生助力手(BHA)和超冗余机器人^[2-3]. BHA 的尼龙结构质轻并具有柔顺性, 但当与外部物体相接触时, 为保持位置形状其必须保证具有一定的刚度, 而由气动肌肉制作组成的 OctArm 接触到外部物体时具有更好的柔顺性. 这两种软体机器人的设计灵感都来自称为静水骨骼的流体性的支持系统, 如章鱼触手、大象鼻子、哺乳动物舌头等都是典型的静水骨骼结构, 均能产生伸长、收缩、弯曲和扭转等基本运动^[4]. OctArm 由 9 根气动肌肉(PAM)和薄刚性圆盘组成^[5-6]. 气动肌肉是一种由内部橡胶管和外部编织网组成的双层结构的驱动器. 气动肌肉的初始

编织角 φ 是一个极其重要的参数,当 $\varphi > 55^{\circ}44'$ 时,PAM 为伸长型,当 $\varphi < 55^{\circ}44'$ 时,PAM 为收缩型^[7].当气动肌肉充气时,第一种气动肌肉产生轴向伸长运动,第二种气动肌肉产生轴向收缩运动.

随着人类与机器人近距离的物理交互领域的发展,机器人与人类交互的安全性问题成为越来越关键的问题.提高机器人的灵活性,实现其变刚度特性,减轻机器人质量等是提高人机合作安全性有效的解决方案^[8].变刚度的结构是指其在遇到外部力的时候能够在阻碍或顺从之间发生转换.变刚度已成为很多机器人研究的关键问题^[9].在某些情况,变刚度通过控制算法实现,例如 LWR III 机器人^[10].在其他情况下应用变刚度驱动器来实现^[11],该驱动器能够在维持位姿不变的情况下,改变机构的刚度,但是该种增加安全性的方法,会产生高的速度及能量消耗,并且尺寸偏大,其安全性受到了质疑^[8].气动肌肉具有质轻、高功率密度及结构柔软等特性,因此选用气动肌肉作为本文机器人手臂的驱动器.由气动肌肉组成的机器人具有柔软和质轻的特点,符合人机交互的机器人所具备的要求.

本文设计了由伸长型及收缩型气动肌肉组成的新型变刚度软体手臂,该结构可以实现其刚度与末端执行器位置的独立控制.

1 变刚度软体手臂的设计

新型变刚度软体手臂如图 1 所示,该手臂由圆周均布的 3 根收缩型气动肌肉及中间 1 根伸长型气动肌肉组成,通过 4 根气动肌肉的相互作用能实现不改变软体手臂空间位置的情况下改变手臂的刚度.文献[12]中的软体手臂也将气动肌肉安装在中间位置,但手臂的弯曲依靠绳索驱动,存在灵活性差、承载能力低、柔顺性差等问题.



图 1 变刚度软体手臂
Fig. 1 Variable stiffness soft arm

一般情况下收缩型气动肌肉的收缩率可达 25%,伸长型气动肌肉伸长率可达 40%.但在相同几何尺寸下,收缩型气动肌肉的输出力是伸长型气动肌肉的 3 倍左右.所以圆周方向布置收缩型气动肌肉,以增加手臂的承载能力.收缩型与伸长型的组合型软体手臂比单纯采用收缩型或伸长型气动肌肉的软体手臂能够产生更大的弯曲角度.因此,本文设计的变刚度软体手臂由伸长型气动肌肉与收缩型气动肌肉组成.

变刚度软体手臂一共由 4 根气动肌肉组成:圆周均布 3 根收缩型气动肌肉及中间 1 根伸长型气动肌肉.3 根收缩型气动肌肉距离中心 35 mm,圆周 120°均布.为了保持 3 根收缩型气动肌肉与中心位置等距,通过结扣的方式与伸长型气动肌肉相连接,结扣的材料为尼龙.这些结扣确保收缩型气动肌肉始终与伸长型气动肌肉连接在一起,并保持等间距布置,在轴向方向上每两个结扣之间距离约为 25 mm,图 2 为变刚度软体手臂结扣位置示意图.

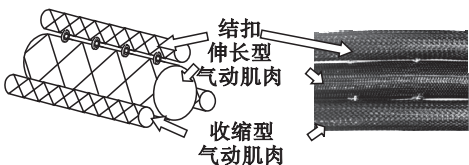


图 2 结扣位置示意图
Fig. 2 Placement of the nylon ties

该机构具有结构对称性,4 根气动肌肉中分别通入不同压强的压缩空气,手臂发生伸长、弯曲、偏转等组合变形运动,并能在运动中根据实际需求改变自身的刚度.手臂的主要结构尺寸及最大弯曲角如表 1 所示.

表 1 手臂尺寸和性能				
Table 1 Size and performance of arm				
手臂初始长度	手臂整体质量	伸长型气动肌肉直径/mm	收缩型气动肌肉直径/mm	最大弯曲角
mm	g			(°)
625	210.6	40	20	90

2 变刚度软体手臂的工作空间分析

2.1 运动空间模型的建立

与传统的刚性机器人不同,软体机器人并无连杆长度和关节变量概念,该手臂的末端位置和姿态变化是通过控制气动肌肉的长度实现的,据此建立了 4 根气动肌肉长度变化与手臂位姿之间

的关系模型。

本文根据气动肌肉的结构布局,假定软体气动手臂的弯曲运动能完全描述成一变曲率和圆弧长度的均匀圆弧^[13]。其位姿可由曲率半径 λ , 偏转角 θ 和弯曲角度 3 个几何参数唯一确定。手臂的模型如图 3 所示,上下两个圆盘分别为顶端圆盘和底部圆盘, O_1 为底部运动端圆盘圆心, O_2 为顶部固定端圆盘圆心, O_c 为手臂弯曲的圆弧圆心, 3 根收缩型气动肌肉与顶端圆盘的交点分别为 A_1, A_2, A_3 , 与底端圆盘的交点为 B_1, B_2, B_3 。在顶端圆盘中心处建立整体坐标系, 坐标原点位于 O_2 处, A_1 点位于 x 轴的正方向, z 轴和顶端圆盘垂直。4 根气动肌肉均未充气时的长度相等, 为 $L_0 = 625 \text{ mm}$ 。

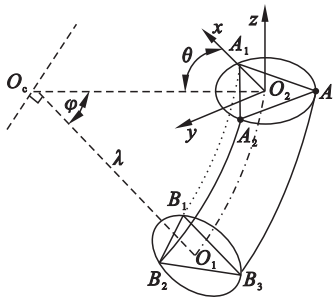


图3 几何关系示意图

Fig. 3 Geometric relationships

设中间气动肌肉充入一定压强的气体后手臂伸长 l_0 , 手臂所达到的长度为手臂初始时刻长度, 即手臂初始时刻长度为 $L_0 + l_0$ 。向其余 3 根气动肌肉中充气时, 手臂在空间中运动, 相对于初始时刻, 中间伸长型气动肌肉的长度变化量为 $l_0(t)$, t 为时间, 3 根收缩型气动肌肉的长度变化量为 $l_1(t)$, $l_2(t)$ 和 $l_3(t)$, 由于结构的对称性, 则 $l_0(t)$ 为

$$l_0(t) = \frac{l_1(t) + l_2(t) + l_3(t)}{3}. \quad (1)$$

3 根收缩型气动肌肉与顶端圆盘的交点在直线 $O_c O_2$ 进行投影, 投影点为 x_1^*, x_2^*, x_3^* , 过 O_c 点, 做一条垂直于偏转面 $O_c O_1 O_2$ 的直线, 沿着该直线方向, 将 4 根气动肌肉弯成的曲线弧向偏转面上投影, 其 x_1^*, x_2^*, x_3^* 投影位置关系如图 4 所示。

设 A_1, A_2, A_3 与圆心 O_2 的距离为 r , 则通过几何计算可以得到 x_1^*, x_2^*, x_3^* 与原点 O_2 的距离为

$$\left. \begin{aligned} |O_2 x_1^*| &= r \cos \theta, \\ |O_2 x_2^*| &= r \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right), \\ |O_2 x_3^*| &= r \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \theta\right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

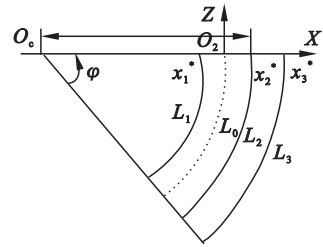


图4 手臂位置关系投影

Fig. 4 Location relationships projection of arm

根据弧长计算公式可知, 在手臂运动过程中, 每根气动肌肉长度的计算公式为

$$L_1 = L_0 + l'_0 - l_1 = (\lambda - o_2 x_1) \varphi = \{\lambda - r \cos(\theta)\} \varphi, \quad (3)$$

$$L_2 = L_0 + l'_0 - l_2 = (\lambda - o_2 x_2) \varphi = \{\lambda - r \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)\} \varphi = \left(\lambda + \frac{1}{2} r \cos \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} r \sin \theta\right) \varphi, \quad (4)$$

$$L_3 = L_0 + l'_0 - l_3 = (\lambda - o_2 x_3) \varphi = \left\{\lambda - r \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \theta\right)\right\} \varphi = \left(\lambda + \frac{1}{2} r \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} r \sin \theta\right) \varphi. \quad (5)$$

由式(3), 式(4)与式(5)可知, 在手臂的运动过程中, 由 3 根收缩型气动肌肉的长度变化, 可以得出曲率半径 λ , 偏转角 θ 和弯曲角 φ 。联立式(3)~式(5)可得

$$\lambda = \frac{[3(L_0 + l'_0) - l_1 - l_2 - l_3]r}{2\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_1 l_2 - l_2 l_3 - l_1 l_3}}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{2\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_1 l_2 - l_2 l_3 - l_1 l_3}}{3r}, \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(l_3 - l_2)}{l_2 + l_3 - 2l_1} \right], \quad (8)$$

$$L_0 + l'_0 + l_0(t) = \lambda \varphi = \frac{3L_0 + 3l'_0 - l_1(t) - l_2(t) - l_3(t)}{3}. \quad (9)$$

式(6)~式(9)为 4 根气动肌肉的长度所对应手臂在空间位置的关系。

2.2 工作空间分析

由于伸长型与收缩型气动肌肉通过结扣相连, 手臂运动过程中收缩型气动肌肉始终与伸长

型气动肌肉连接在一起,使得手臂产生运动,则 4 根气动肌肉的长度决定手臂的空间位置. 当气动肌肉充入 3×10^5 Pa 压强时,收缩型气动肌肉的收缩率可达 25%, 伸长型气动肌肉的伸长率可达 30%. 根据上述描述确定手臂末端端点空间位置分布,利用 MATLAB 软件绘制其工作空间如图 5 所示. 由图可以看出,手臂单方向最大转角超过 90° , 满足设计要求.

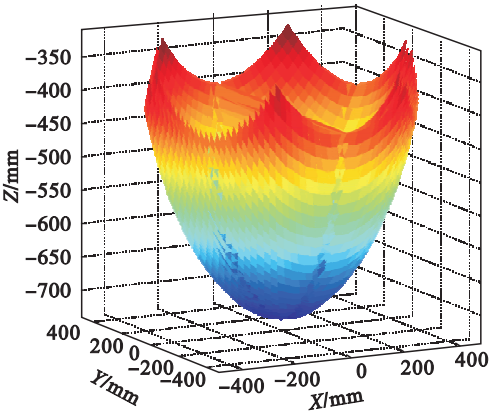


图 5 工作空间示意图
Fig. 5 Workspace of soft arm

3 变刚度软体手臂的运动控制实验

3.1 实验系统的搭建

变刚度软体手臂的实验装置如图 6 所示,手臂的末端角度传感器选用 CJMCU-999 自由度

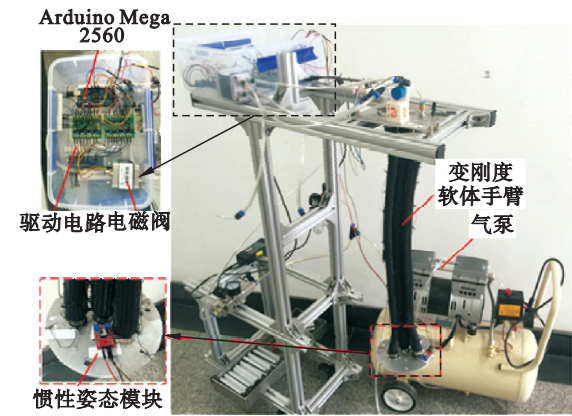


图 6 实验装置图
Fig. 6 Diagram of experimental device

惯性姿态模块,其测量范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,精度为 0.2° ;电磁阀选用意大利 Matrix 公司的三位三通电磁阀. 在控制过程中,利用 Arduino 对传感器数据进行采集并将数据反馈给上位机,经过数据采集、处理和运算后,从而实现对电磁阀的控制,控制系统简图如图 7 所示.

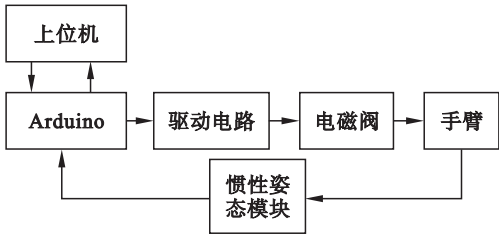


图 7 控制系统简图
Fig. 7 Schematic diagram of control system

3.2 实验结果及分析

根据该手臂的运动原理,对上述的 3 根收缩型气动肌肉及伸长型气动肌肉充入不同压强的气体,使手臂发生弯曲、偏转及伸长的组合运动. 为了验证手臂的可控性,进行了单方向弯曲运动控制实验. 根据齐格勒-尼科尔斯整定公式计算出 PID 参数, $P=1.8, I=2, D=0$. 在 0 负载的情况下,气泵的充气端压强维持在 3×10^5 Pa, 中间气动肌肉压强维持在 2×10^5 Pa; 对其中 1 根收缩型气动肌肉充气,使手臂弯曲角度分别对阶跃信号 $\pi/6$ 和正弦信号 $\phi = 3.14 \times (10\sin(t/4\pi) + 20)/180$ 进行跟踪,其实验对比结果如图 8 和图 9 所示.

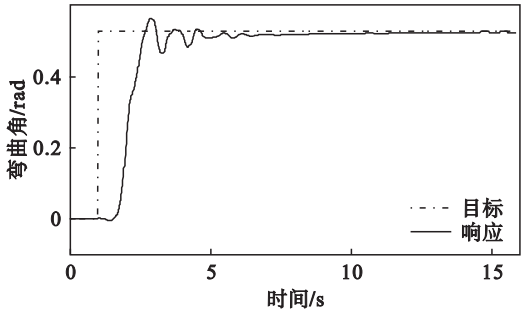


图 8 阶跃信号跟随响应曲线
Fig. 8 Experiment results of tracking step signal

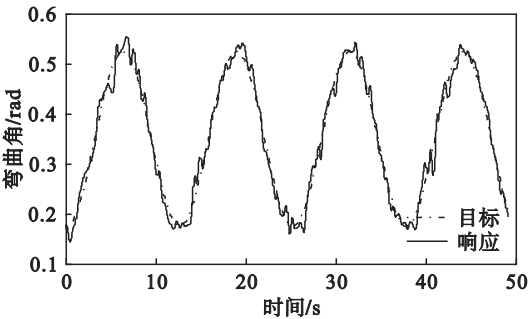


图 9 正弦信号跟随响应曲线
Fig. 9 Experiment results of tracking sine signal

由图 8 可见,手臂的定位控制精度较高,能够较快地到达目标位置,响应延时小于 2 s, 稳态平均误差为 0.0028 rad (0.16°), 即手臂具有较好的定位精度. 由图 9 可知,平均误差为 0.0159 rad (0.911°). 幅值误差及跟踪正弦信号的抖振主要 (下转第 107 页)