

文章编号: 1001-0920(2011)10-1577-04

形状记忆合金丝编织网气动肌肉机构及其阻抗控制

金英连¹, 王斌锐^{1,2}, 吴善强¹, 严冬明¹

(1. 中国计量学院 机电工程学院, 杭州 310018; 2. 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 气动肌肉是仿生机器人研究的重点, 为此, 设计了形状记忆合金丝编织网气动肌肉机构. 通过等效气缸和等效动力学分析, 建立了输出力模型, 设计了含位置PID内环的阻抗控制, 并建立了阻抗模型, 通过拉氏变换和频域分析给出了稳定条件. 理论分析表明, 合金丝的收缩可增大气动肌肉的输出力和调节刚度. 在Matlab上开展阻抗参数对柔顺性影响的仿真实验, 结果表明刚度对于接触力影响最大, 阻抗控制可实现接触力和位置的协调控制.

关键词: 形状记忆合金; 气动肌肉; 柔顺控制; 刚度调节

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Mechanism and impedance control of pneumatic muscle with shape memory alloy braided sleeve

JIN Ying-lian¹, WANG Bin-rui^{1,2}, WU Shan-qiang¹, YAN Dong-ming¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, China. Correspondent: WANG Bin-rui, E-mail: wangbinrui@163.com)

Abstract: Pneumatic muscle(PM) is the research focus of bionic robot. Therefore, the fiber knitted sleeve of PM is replaced with shape memory alloy(SMA) and the mechanism is designed. Through equivalent translation to deformable cylinder, static driving force model is established. Through equivalent analysis of contraction, damping and elastic element of PM, dynamics driving force model is derived. An impedance control scheme with inner position PID loop is designed for active compliant in Cartesian space. And impedance adjustment target is built based on damping-spring model. By Laplace transform and frequency domain analysis, stable condition of impedance control is given. On Matlab, the control simulations of varying impedance parameters are done to analyzing impact of parameters to compliant character. Simulation results show that generalized rigid is the main impact factor of contact force, and impedance control proposed can achieve harmony complain of force and position.

Key words: shape memory alloy; pneumatic muscle; compliant control; stiffness adjustment

1 引言

气动肌肉与人体肌肉有类似的力学特性, 在仿生机器人中应用前景较好^[1-2]. 文献[3]从仿生学角度建立了气动肌肉的模型, 由于刚度低, 气动肌肉调节精度不高, 且只能作伸缩运动^[4]. [5]研究用径向安装的尼龙卡箍和轴向分布的碳纤维来提高气动肌肉的驱动性能. [6]利用圆环和玻璃纤维来改善气动肌肉的力位控制性能. [7]开展了气动肌肉驱动特性实验和基于BP网络的位置跟踪控制. [8]对气动肌肉和人工肌肉的性能进行了对比. 目前, 对于气动肌肉的被动柔顺研究较多, 主动柔顺研究较少, 通过改进编织网

来增强气动肌肉特性的研究也较少. 气动肌肉驱动机器人末端在约束环境中运动时, 对接触力的柔顺要求和位置伺服精度要求之间是矛盾的, 需通过阻抗控制来协调. [9]研究通过关节刚度调节来改善主动柔顺性. [10]采用奇异摄动方法来研究冗余柔性关节机器人的笛卡尔阻抗控制. 目前阻抗控制研究是热点, 主要有基于奇异摄动、积分流形、被动性理论、反步法设计等方法^[11].

本文首先设计了形状记忆合金丝(SMA)编织网气动肌肉的机构, 并通过合理分布合金丝, 增强了气动肌肉的驱动特性. 建立了静态和动态驱动力模型,

收稿日期: 2010-07-05; 修回日期: 2010-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50905170); 浙江省自然科学基金项目(Y1090042); 机器人学国家重点实验室开发基金项目(RL0200918).

作者简介: 金英连(1975-), 女, 讲师, 硕士, 从事驱动控制、智能检测等研究; 王斌锐(1978-), 男, 副教授, 博士, 从事仿生机器人、智能控制等研究.

设计了适合 SMA 气动肌肉的主动柔顺阻抗控制算法, 并建立了仿真实验平台, 开展变阻抗参数柔顺性对比实验, 明确参数对柔顺控制性能的影响. 最后通过样机实验验证了控制算法的有效性.

2 SMA 编织网气动肌肉机构与模型

2.1 SMA 气动肌肉机构

本文设计的 SMA 编织网气动肌肉机构模型如图 1 所示. 图 1 中, F 为气动肌肉输出的驱动力, θ 为编织网的编织角, M 为负载质量, x 为驱动器的行程.

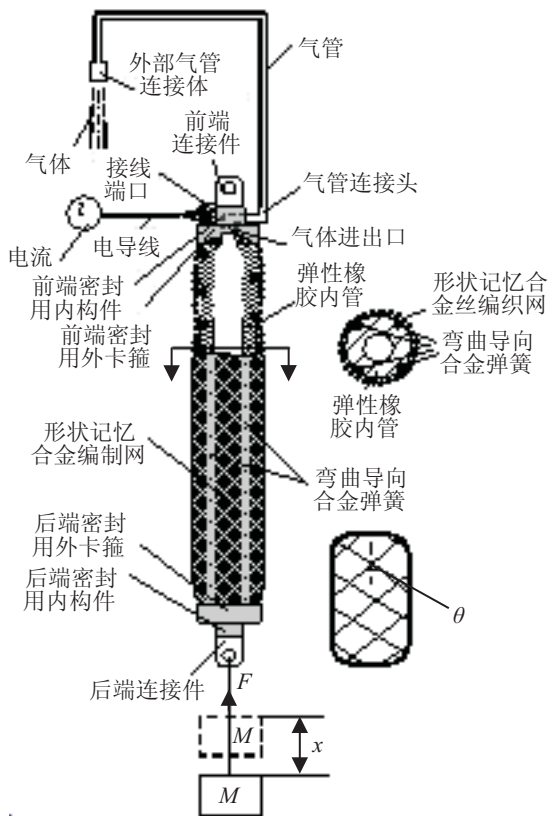


图 1 形状记忆合金丝编织网气动肌肉机构

在弹性橡胶管外依次紧密轴向安装弯曲导向 Ti-Ni 合金弹簧和合金丝编织网等构成变形网. 气动肌肉的力学特性除了与内腔压力有关外, 还与编织网的结构参数有关^[3]. 在橡胶内管受气压膨胀时, 变形网在被动变形基础上, 可加入主动变形来约束气动肌肉的变形, 从而实现特性可调节.

2.2 静态驱动力模型

将气动肌肉等效为可变形的气缸. 假设膨胀后为理想圆柱体, 且忽略橡胶弹力、摩擦力. 通过对编织网的受力分析, 建立轴向和径向力平衡方程为

$$\begin{aligned} nF_t \cos \theta &= \frac{\pi}{4} D^2 p + F, \\ 2nF_t \sin \theta &= \pi D^2 p / \tan \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: F_t 为合金丝的内部拉应力, p 为气动肌肉内腔的压力, D 为气动肌肉的直径, n 为单根合金丝的缠绕

圈数.

根据圆柱体的几何关系, 由式 (1) 可得

$$F = \frac{1}{4n^2\pi} p (3L^2 - l_{SMA}^2). \quad (2)$$

其中: L 为气动肌肉长度, l_{SMA} 为单根合金丝的长度. 由于采用了形状记忆合金丝制作编织网, l_{SMA} 为主动可调变量, 随形状记忆合金丝温度变化.

2.3 动态驱动力模型

为了更准确地描述气动肌肉伸缩中的驱动力, 由图 1 所示状态综合考虑橡胶管的弹性、摩擦等因素, 可将 SMA 气动肌肉动态模型等价为收缩元、阻尼元和弹性元的组合模型为

$$M\ddot{x} = F(p) - B(p)\dot{x} - K(p)x - Mg. \quad (3)$$

其中: g 为重力加速度; $F(p)$ 为非线性的收缩元, 且有

$$F(p) = \frac{1}{4n^2\pi} p [3x^2 - (1 - \varepsilon_{SMA})^2 l_0^2], \quad (4)$$

$$\varepsilon_{SMA} = (l_0 - l_{SMA}) / l_0, \quad (5)$$

ε_{SMA} 为合金丝的收缩率, l_0 为初始长度; $B(p)$ 为阻尼元, $K(p)$ 为弹性元, 且有

$$B(p) = \begin{cases} B_{i0} + B_{i1}p, & \dot{x} \geq 0; \\ B_{d0} - B_{d1}p, & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$K(p) = K_0 + K_1p. \quad (7)$$

$B_{i0}, B_{i1}, B_{d0}, B_{d1}, K_0, K_1$ 为常系数, 在实际中应根据实验测量得到.

3 气动肌肉的主动柔顺控制

将外界环境等效为弹性系统, 则气动肌肉驱动的机器人末端与外界环境的接触力为

$$F_{out} = \begin{cases} K_e(x - x_l), & x > x_l; \\ 0, & x \leq x_l. \end{cases} \quad (8)$$

其中: F_{out} 为接触力, K_e 为环境刚度, x 为机器人末端的位置 (与气动肌肉驱动器行程对应), x_l 为初始环境位置.

主动柔顺控制主要有力/位混合控制和阻抗控制^[12]. 阻抗控制是在位置控制基础上, 将力的偏差转变为位置的修正值. 针对由一对拮抗安装的 SMA 编织网气动肌肉驱动的机器人单关节, 使其末端在约束空间中运动. 本文设计的笛卡尔空间阻抗柔顺控制如图 2 所示.

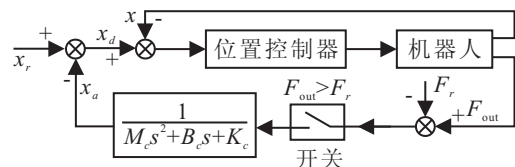


图 2 阻抗控制原理

图 2 中, F_r 为接触力的期望值, x_r 为位置的期望

值, x_a 为位置的修正量, x_d 为修正后的位置期望平衡点. 为了保证控制的时效性, 位置控制器采用增量 PID 控制算法. 只有当接触力超过了期望值后, 才开始对位置进行修正. 机器人末端在实际受限运动中若要实现位置的期望值, 则实际接触力往往会大于期望值, 所以接触力误差定义为

$$F_e = F_{out} - F_r. \quad (9)$$

阻抗控制的本质是对 x_a 与 F_e 建立阻抗关系, 将接触等效为机器人末端附着在阻尼-弹簧系统上, 则目标阻抗关系可建立为

$$M_c \ddot{x}_a + B_c \dot{x}_a + K_c x_a = F_e, \quad (10)$$

其中 M_c , B_c 和 K_c 分别为接触关节区域的广义惯性、广义阻尼和广义刚度参数.

由于气动肌肉驱动器末端平动位移不是很大, 行程范围较小, 式 (10) 为二阶线性微分方程, 求拉氏变换后可得到频域内阻抗关系为

$$[M_c s^2 + B_c s + K_c]^{-1} F_e(s) = x_a(s). \quad (11)$$

通过对式 (11) 的频率特性分析可得, 实现末端由自由空间到约束空间的稳定过度, 阻抗参数需满足

$$k = K_e / K_c \gg 1, \quad \zeta = B_c / (2\sqrt{K_c M_c}) \geq 0.5(\sqrt{1+k} - 1). \quad (12)$$

其中: ζ 为阻尼比; k 为刚度比. 为了实现接触过程的稳定, 接触区广义刚度应远小于环境刚度, 广义阻尼要足够大. 当机器人末端和环境接触稳定后, $x_d = x$, $\ddot{x}_a = \dot{x}_a = 0$, 根据式 (8)~(10) 可得

$$K_c(x_r - x) = F_{out} - F_r = K_e(x - x_l) - F_r. \quad (13)$$

机器人末端的实际位置为

$$x = (K_c x_r + K_e x_l + F_r) / (K_c + K_e). \quad (14)$$

将式 (14) 代入 (13) 的左半部分, 可得接触力的稳态误差为

$$F_e = K'(x_r - x_l - F_r / K_e), \quad (15)$$

其中

$$K' = K_c K_e / (K_c + K_e). \quad (16)$$

4 气动肌肉阻抗控制实验

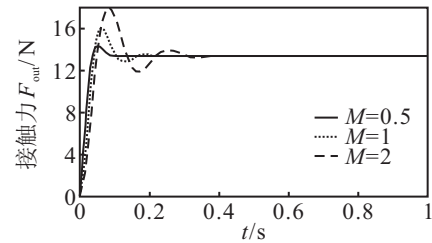
4.1 阻抗参数对柔顺性影响的仿真实验

仿真采用 Matlab/Simulink, 时间为 1 s. 初始状态时, 末端刚好与环境接触, 接触力 $F_{out} = 0$, 且速度和加速度均为 0. 仿真参数如表 1 所示.

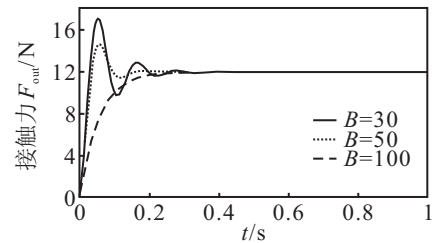
表 1 阻抗控制实验参数

参数	数值
x_l / m	0.0
$K_e / (N \cdot m^{-1})$	4000
F_r / N	10
x_r / m	0.01

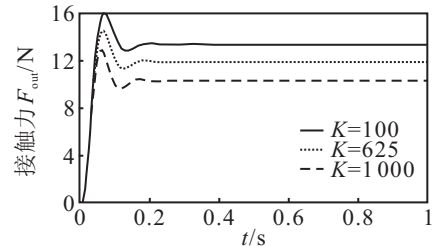
惯性参数对于接触力的影响实验中, 保持 $B_c = 50 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$, $K_c = 1000 \text{ N} / \text{m}$ 不变, 调节 M_c 依次为 2 kg, 1 kg, 0.5 kg. 阻尼参数对于接触力的影响实验中, 保持 $M_c = 1 \text{ kg}$, $K_c = 625 \text{ N} / \text{m}$ 不变, 调节 B_c 依次为 30 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$, 50 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$, 100 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$. 刚度参数对于接触力的影响实验中, 保持 $M_c = 1 \text{ kg}$, $B_c = 50 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$ 不变, 调节 K_c 依次为 100 N / m , 625 N / m , 1000 N / m . 实验结果如图 3 所示.



(a) 变惯性参数 M_c 时的接触力控制曲线



(b) 变阻尼参数 B_c 时的接触力控制曲线



(c) 变刚度参数 K_c 时的接触力控制曲线

图 3 变参数下的接触力控制曲线

惯性参数不会影响接触力的稳态值, 参数越大, 接触力的超调量也随之变大, 上升时间和稳定时间也随之变长, 系统振荡越剧烈. 惯性参数过大容易导致系统不稳定, 由于在末端到达期望位置前就受到了环境的约束, 在阻抗控制下, 接触力稳定在 13.4 N.

阻尼参数不会影响接触力的稳态值, 但对系统的稳定时间有较大的影响. 随着阻尼参数的增大, 接触力的超调量随之减少, 稳定过程的震荡次数也减少. 当 $B_c = 50 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$ 时, 阻尼比 $\zeta = 1$, 系统处于临界阻尼状态, 震荡次数少且稳定时间短. 当阻尼参数过大时, 系统进入过阻尼状态, 稳定时间随之变长, 不利于机器人的快速响应.

调节刚度参数可以改变接触力的超调量和稳定值, 影响系统的稳定误差, 但对于响应速度影响不大. 刚度参数越大, 系统稳态误差也随之变大. SMA 编织网气动肌肉的刚度可以通过 SMA 的通电加热主动调

节, 所以 SMA 气动肌肉更适合通过刚度调节来实现阻抗控制主动柔顺^[13].

4.2 样机的阻抗控制实验

利用 Ti-Ni SMA 合金丝和 Feston 气动肌肉制作样机, 参数如下: 气动肌肉末端期望位置 $x_r = 7.5$ mm, 期望接触力 $F_r = 5$ N, 末端安装 FSS 1500 NST 型触力传感器. 在目标值前方放置一刚性物体挡板, 即 $x_l = 6.5$ mm, 使末端到达目标值前与挡板接触. 实验选用 SMC 公司的 VQ 100 电磁阀, 并用单片机和 PWM 波来调节电磁阀开度.

实际中, 惯性参数和阻尼参数的在线实时调整较难实现. 由于 SMA 气动肌肉可方便地通过 SMA 主动变形来调节刚度, 样机实验中只调节刚度参数. 气动肌肉刚度在接触前维持较大值; 接触中, 刚度先变小后变大, 便于柔顺接触; 稳定前, 刚度保持一定的大值, 便于保持控制精度. 样机实验结果如图 4 所示.

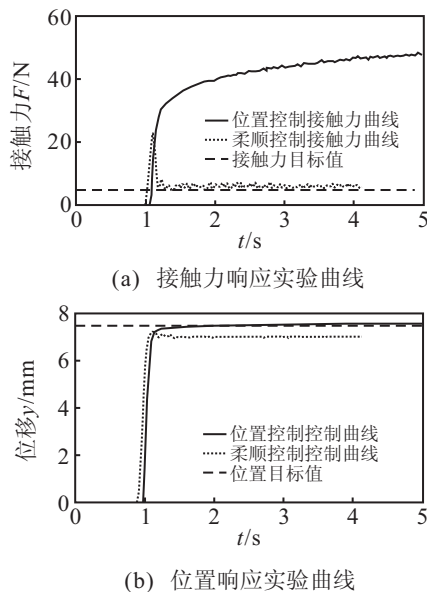


图 4 阻抗控制实验结果

由图 4 可见, 单纯位置控制的位置精度比较高, 但接触力会失控, 破坏环境约束. 虽然主动柔顺阻抗控制的位置精度比较差, 但可以对接触力进行柔顺控制. 所以, 阻抗控制牺牲了一定的位置精度来实现位置和接触力的协调柔顺控制. 摩擦和电磁阀开关响应时间是导致接触力响应曲线颤动的主要原因.

5 结 论

通过理论推导、仿真和样机实验, 可得如下结论:

1) SMA 合金丝的收缩率与气动肌肉的输出力呈非线性关系, SMA 收缩量大, 输出力也变大.

2) 刚度参数对接触力的柔顺性影响较大, SMA 编织网气动肌肉的刚度可通过 SMA 的主动变形来调节, 更利于实现阻抗控制.

3) 气动肌肉的阻抗控制虽会降低末端位置精度, 但可以实现位置和接触力的协调控制.

本文为 SMA 气动肌肉驱动机器人仿人接触碰撞提供了理论基础和实践参考.

参考文献(References)

- [1] Sivakumar Balasubramanian, Jeff Ward, Thomas Sugar, et al. Characterization of the dynamic properties of pneumatic muscle actuators[C]. Proc of 2007 IEEE Int Conf on Rehabilitation Robotics. Noordwijk, 2007: 764-770.
- [2] Kenji Kawashima, Takahiro Ai Ohkubo, Toshiyuki Miyata, et al. Application of robot arm using fiber knitted type pneumatic artificial rubber muscles[C]. Proc of 2004 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, 2004: 4937-4942.
- [3] Reynolds D B, Repperger D W, Phillips C A, et al. Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2003, 31(3): 310-317.
- [4] Park N C, Yang H S, Park H W, et al. Position/vibration control of two-degree-of-freedom arms having one flexible link with artificial pneumatic muscle actuators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(4): 239-253.
- [5] Norihiko Saga, Takashi Saikawa, Hideharu Okano. Flexor mechanism of robot arm using pneumatic muscle actuators[C]. Proc of 2005 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Niagara Falls, 2005: 1261-1266.
- [6] Taro Nakamura, Hitomi Shinohara. Position and force control based on mathematical models of pneumatic artificial muscles reinforced by straight glass fibers[C]. Proc of 2007 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Roma, 2007: 4361-4366.
- [7] 高建英, 彭光正, 范伟, 等. 基于 BP 网络的气动人工肌肉位置跟踪的研究[J]. 液压与气动, 2004, 28(5): 5-7. (Gao J Y, Peng G Z, Fan W, et al. Research on the position track of pneumatic muscle actuator based on BP neural network[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2004, 28(5): 5-7.)
- [8] 隋立明, 王祖温, 包钢. 气动肌肉与生物肌肉的力学特性对比研究[J]. 机床与液压, 2004, 32(6): 22-24. (Sui L M, Wang Z W, Bao G. A comparison of mechanical properties of pneumatic muscle with biological muscle[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2004, 32(6): 22-24.)
- [9] Choi T Y, Choi B S, Lee J J. Manipulator operation using joint stiffness adjusting by pneumatic muscles[C]. IEEE 2008 Conf on Human System Interactions. Krakow, 2008: 434-439.

(下转第1585页)