

文章编号 1004-924X(2001)06-0542-04

微型机器人蛇行游动机构的系统仿真

卢永奎, 许 , 吴月华, 杜华生, 杨 杰

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 提出了一种微型机器人模型。笔者首先对该机器人模型进行了动力学分析, 在此基础上提出了该微型机器人游动机构的控制理论, 并对该系统进行了仿真。

关键词: 形状记忆合金; 微型机器人; 动力学模型; 系统仿真

中图分类号: TP242 文献标识码: A

1 引言

微型机器人在医疗仪器领域内的应用是微型机器人发展的一个重要方向。根据腔内手术实际需要, 我们设计了形状记忆合金(SMA)驱动的管道微型机器人系统^[1, 6, 7]。如何灵活而准确的驱动形状记忆合金机器人是一个非常重要的课题。本文提出一个 SMA 微型机器人模型, 建立机器人的蛇行游动机构, 在模型运动行为的动力学分析和 SMA 元件的实验测试的基础上, 提出了 SMA 元件自动控制方法, 并对该系统进行了仿真。

2 机器人结构与运动简介

机器人是一个串-并联的多关节模型。在每一关节中, 三根双向 TiNi 形状记忆合金弹簧对称分布于圆周上, 做为导向驱动元件。弹簧的两端固接在关节面上。关节面之间用在轴向具有一定弯曲刚度的软芯连结。机器人由多个关节串接而成。

例如, 在某一关节中, 当形状记忆合金弹簧分别通电加热时, SMA 元件发生相变, 伸缩。如果各个 SMA 元件伸缩量的不同, 关节将向某一方向弯曲。若加热停止, 合金自然冷却, 在合金回复

变形和弹簧自身弹性变形的作用下, 关节会恢复到初始状态。我们对 SMA 元件的通电流进行控制, 使机器人弯曲到我们需要的角度, 达到蛇行游动的效果。在实际运动过程中, 多个关节互相协作, 向前运动时, 后一关节重复前一关节的弯曲角度, 前一关节向前弯曲新的角度, 多个关节就会达到整体的弯曲效果。

3 机器人的弯曲角度分析

机器人模型是一个多关节系统, 各个关节的结构是相同的, 因此机器人的运动模式可通过对单关节运动的动力学分析获得。图 1 是机器人关节结构原理图。图 2(a) 是单个关节的弯曲模型。其中, 角 α 和 θ 分别为关节的弯曲方向和在该反方向上的弯曲角度; F_i ($i = 1, 2, 3$) 是在弯曲过程中三根形状记忆合金产生的力; L 是关节长度; E_k 是关节的弹性模量。图 1(b) 为关节的截面图, 阴影部分表示软芯。建立如图所示坐标系 O-XY, 可知三根形状记忆合金元件在坐标系中的位置 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) 、 (a_3, b_3) 分别为:

$$a_1 = 0; a_2 = -\frac{\sqrt{3}}{4}d_h; a_3 = \frac{\sqrt{3}}{4}d_h$$

$$b_1 = \frac{1}{2}d_h; b_2 = b_3 = -\frac{1}{4}d_h$$

收稿日期: 2001-08-20; 修订日期: 2001-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69785009)

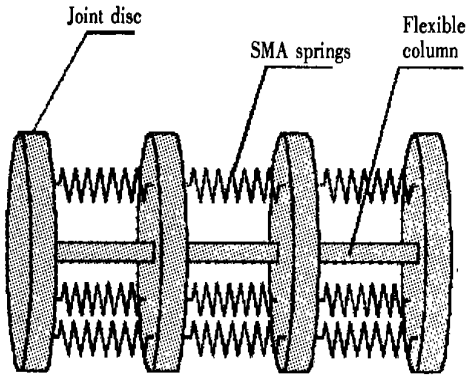


Fig. 1 Theoretical structure of the robot section

其中, 力 F_i 是随着合金相变变形而变化的非线性量。

为简化计算, 将关节作为弯曲梁来计算, 以此计算出弯曲角度 θ :

$$\theta = \frac{(\sum_{i=1}^3 \frac{d_h}{2} F_i \sin \alpha_i) \cdot L}{E_k \cdot I} \quad (2)$$

4 蛇行游动机构的控制理论

形状记忆合金是指具有形状记忆效应的合金, 如 TiNi 合金、Cu-Zn-Al 合金等。而所谓的形状记忆效应是指材料会记忆它在高温相状态下的形状, 不管它在低温相状态下如何变形, 只需达到一定的温度就会马上恢复到原来在高温相状态下的形状。由于形状记忆合金可集传感器、驱动及执行机构于一身, 因而是一种很好的智能材料。如果控制加热和冷却, 可以获得重复性很好的设定的循环动作。用 SMA 制作的热-机械动作元件具有独特的优点, 如结构简单、体积小、成本低廉、控制方便等。

在负载恒定的情况下, 形状记忆合金的相变状态(对应于工作长度)和其电阻存在着——对应的关系, 此时采用电阻反馈方式可以实现对合金的闭环控制, 取得较好的控制效果。

在相变过程中的某一温度下, 如果加在 SMA 元件上的负载在一定的范围内, 则 SMA 也会象普通金属一样产生弹性变形。当除去负载, SMA 元件会恢复为变形前的状态。如果温度不变, 在弹性变形过程中合金将不会发生相变。因此, SMA 的每一个电阻值唯一对应于该合金的一个无负载下的自由长度 L 和该自由长度下的弹性系数 K 。自由长度、弹性系数和电阻之间的非线性关系 $L = \varphi(R)$, $K = \varphi(R)$ 可以通过实验获得。在控制中, 形状记忆合金弹簧可以看作弹性系数实时变化的线性弹簧, 而在任意的一个工作时刻弹性系数大小都是唯一确定的, 可由反馈电阻得知。由此, 可以实现对 SMA 元件的实时线性控制。

机器人是通过外部的脉冲恒流源对形状记忆合金加热来驱动的, 我们给每个 SMA 都连接到一个脉冲恒流源上, 通过调整脉冲恒流源的电流的占空比来控制 SMA 的温度, 因为 SMA 在不同的温度下伸缩不同, 这样我们通过调整 SMA 的

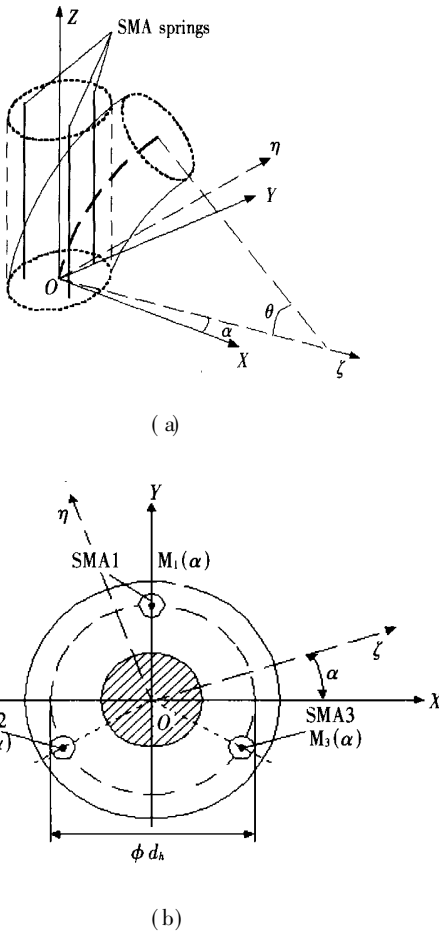


Fig. 2 Single joint module of bending (a) and the section of the module (b).

为了简化控制系统, 在任一时刻, 只需要加热其中的两根 SMA 即可, 第三根用彼此之间的力来驱动, 根据力学关系, 弯曲方向 α 可由力 F_i 推出:

$$\tan \alpha = \frac{F_1 b_1 + F_2 b_2 + F_3 b_3}{F_1 a_1 + F_2 a_2 + F_3 a_3} \quad (1)$$

温度就可以控制 SMA 的工作长度, 当三根不同的 SMA 的长度不同时, 该节机器人就会向较短的一侧弯曲, 这样我们通过调整三个 SMA 的工作长度就可以控制该节机器人的弯转角度, 可以使机器人向需要的方向弯曲, 形成整体的蛇行游动的效果。

5 系统仿真

笔者在仿真中建立了 SMA 机器人的运动模型^[2-5], 同时计算了机器人工作时的各种参数, 其中包括温度, 电阻, 弹性模量、对每根 SMA 的加热的恒流源的电流占比。

由于各种 SMA 的数据都是由试验测量而来, 由于不同的环境下, 不同的 SMA 的数据可能不一致, 我们把试验中测得的各种参数, 写入数据库当中, 当用户的数据与系统的数据不同时, 用户可对数据库中的数据进行修改, 或者添加, 可以删

除系统中的数据。

程序中我们建立了三个数据库, 分别用来存放不同长度下的温度变化、不同温度下的电阻变化、以及不同温度下的弹性模量变化的各种数据。

数据库中形状记忆合金的各种数据都是从实验中获得的, 都是离散的数据, 我们在实际中使用的数据是形状记忆合金在运动时客观存在的数
据, 不一定能恰好和我们在实验中测得的数据相吻合, 我们不可能在实验中测得足够细致的数据, 来满足我们的不同需要。我们的数据又必须在这些从试验中获得的数据中产生, 我们用到了拟合。我们采用的是多项式的最佳平方逼近的拟合。若拟合多项式为:

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \tag{3}$$

则参数

$$a_0, a_1, a_2, a_3$$

可从相应的拟合矩阵中得到:

$$\begin{pmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^n \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} & \sum_{i=0}^m x_i^{n+2} & \dots & \sum_{i=0}^m x_i^{2n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i y_i \\ \dots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n y_i \end{pmatrix} \tag{4}$$

这样, 我们就可以从数据库中有限的数据中得到形状记忆合金的关系曲线 $T = \varphi(R), L = \varphi(R), K = \varphi(R)$ 。

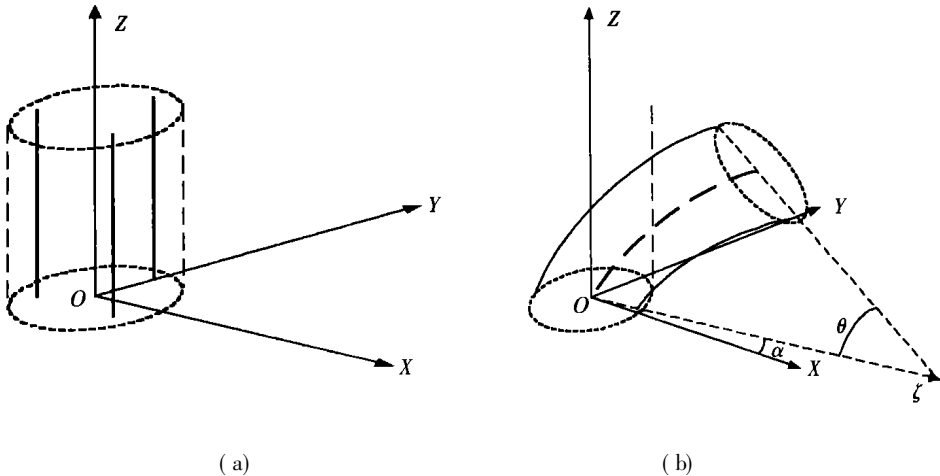


Fig. 3 Movement and the status of the single joint

设当前关节的弯曲状态由图 3 所示。建立坐标系 $O-XYZ$, N_i, S_i 和 S'_i 是 SMA 与关节面的联结点。由当前的弯曲目标参数 α 和 θ , 可以计

算出当前工作状态时三根 SMA 元件的工作长度 l_i :

$$l_i = \sqrt{(N_{ix} - S'_{ix})^2 + (N_{iy} - S'_{iy})^2 + (N_{iz} - S'_{iz})^2} \tag{5}$$

在公式(5)中, 各参数取值为:

$$\begin{cases} S_1 = \{0, R, L\} \\ S_2 = \{-\sqrt{3}R/2, -R/2, L\} \\ S_3 = \{\sqrt{3}R/2, -R/2, L\} \end{cases} \begin{cases} N_1 = \{0, R, 0\} \\ N_2 = \{-\sqrt{3}R/2, -R/2, 0\} \\ N_3 = \{\sqrt{3}R/2, -R/2, 0\} \end{cases} \begin{bmatrix} S'_{ix} \\ S'_{iy} \\ S'_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} S_{ix} \\ S_{iy} \\ S_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

转移矩阵 T 为:

$$T = \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha V_{vers} \theta + \cos \theta & -\sin \alpha \cos \theta V_{sers} \theta & \cos \alpha \sin \theta & L_b \cos \alpha \sin \theta \\ -\sin^2 \alpha \cos V_{ers} \theta & \cos \alpha \cos \theta V_{ers} \theta & \sin \alpha \sin \theta & L_b \sin \alpha \sin \theta \\ -\cos \alpha \sin \theta & -\sin \alpha \sin \theta & \cos \theta & -[L - L_b(1 + \cos \theta)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V_{ers} \theta = 1 - \cos \theta$$

从数据库中拟合结果可得到形状记忆合金的关系曲线 $L = \varphi(R)$, $K = \psi(R)$, 以及上述公式求出当前 SMA 的工作长度, 可以计算出力 F'_i :

$$F'_i = K_i(l_i - L_i) \quad (8)$$

F'_i 就只是形状记忆合金的电阻 R 的函数。

三根形状记忆合金可以建立三个这样的方程, 由于在任意时刻, 都只需要同时控制两根 SMA 即可, 这样没有控制的一根 SMA 的电阻保持初始值, 这样组成的三个只有两个未知量, 就是两根 SMA 的电阻, 将上述 F'_i 代入公式(1)(2)中, 就可以获得一个关于 R 的二元方程组, 解出该方程组, 就可以得到三根 SMA 的 R , 由拟合曲线就可以得到其他各种参数。

笔者在仿真的过程中, 用梯度法(即最速下降法)来求解上述二元方程组。

若方程组为:

$$f_i = f_i(R_0, R_1) = 0, i = 0, 1$$

定义目标函数为:

(1) 选取一组初值的 R_0, R_1 。

$$R_i - \lambda \frac{\partial F}{\partial R_i} \Rightarrow R_i, i = 0, 1$$

(2) 计算目标函数

$$F = F(R_0, R_1) = \sum_{i=0}^1 f_i^2$$

(3) 若 $F < \xi$, 则此时的 (R_0, R_1) 即为所求解, 过程结束; 否则继续。

(4) 计算目标函数在该点处的偏导数:

$$\frac{\partial F}{\partial R_i} = 2 \sum_{j=0}^1 f_j \cdot \frac{\partial f_j}{\partial R_i}, i = 0, 1$$

然后再计算

$$D = \sum_{j=0}^1 \left(\frac{\partial F}{\partial R_j} \right)^2$$

(5) 计算

其中 $\lambda = F/D$ 。

重复步骤(2)~(5)直到达到满意的精度要求为止。

若某一步 $D = 0$, 说明遇到局部的极值点, 应换一个初值再试。

这样就可以求得当前运动角度的 SMA 的电阻, 根据拟合曲线, 可以求出弹性模量、原长、温度。

根据这些参数我们可以导出脉冲恒流源的脉冲电流的实时占空比的理论值:

$$t = \sqrt{\frac{h(T_{sma} - T_{gas}) 2\pi r_{sma} l_{sma} / \sin \alpha_{lifting \ angle}}{I^2 R}} \quad (9)$$

这样, 根据微型机器人当前的运动状态, 由电阻反馈的得到当前形状记忆合金的电阻, 同时根据事先由大量实验数据拟合而得到的电阻自由长度曲线, 得到当前形状记忆合金的实际自由长度; 另一方面, 由当前环境及形状记忆合金的几何关系, 通过解一系列方程组可以计算出当前形状记忆合金的理论自由长度, 由两者相比较就能够知道理论值和实际值的差值, 这个差值可以用来控制形状记忆合金的加热程度, 即加热恒流源脉冲电流的占空比。另外, 在系统仿真中, 给出了恒流源脉冲电流占空比的实时理论值。

6 仿真结果

我们在程序中动态的对驱动过程进行跟踪, 从数据库中读取形状记忆合金的参数, 由拟合的结果进行计算, 求解方程, 在程序中得到系统的各个参数, 程序运行的过程中, 系统的各个参数如图 4, 5, 6 所示:

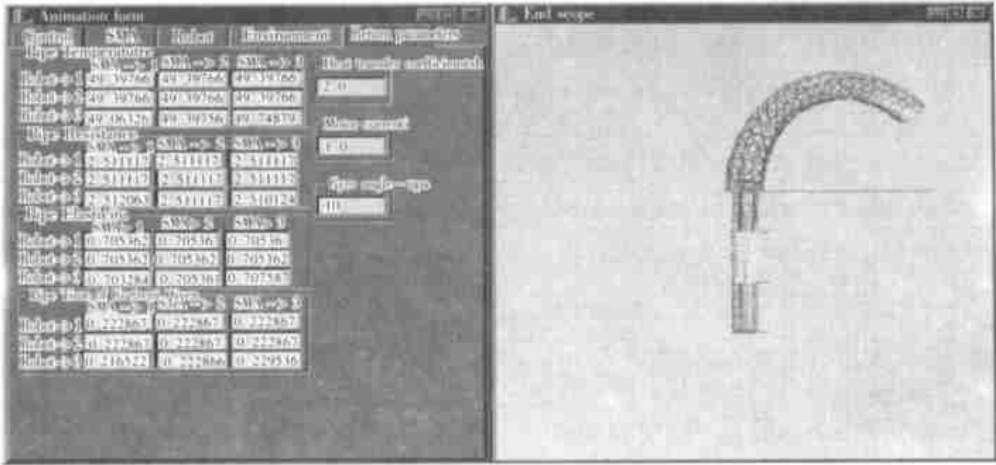


Fig. 4 System parameters of initialization

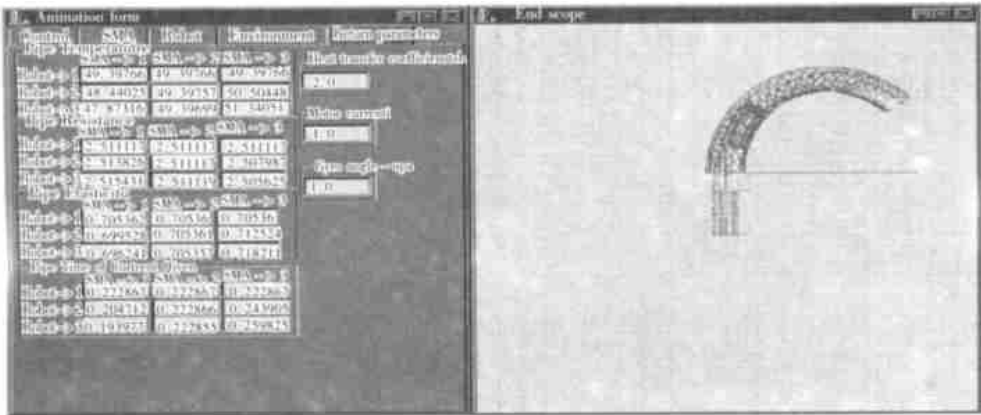


Fig. 5 System parameters in the course of movement



7 小 结

在微型机器人系统中使用形状记忆合金作为驱动器有方便灵活等特点。本文在对机器人模型运动行为动力学分析的基础上提出了针对形状记

忆合金弹簧元件的自动控制方法, 简化了对蛇行游动机构的控制, 是一种不使用力传感器就可对 SMA 机器人行为进行有效控制的方法。并对该系统进行了仿真, 从计算得到的各种参数在技术上都是可以实现的, 从理论上证明了控制理论的可行性。

参考文献:

- [1] 杨杰, 吴月华. 形状记忆合金及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993. 193- 229.
- [2] 王洵. 计算机图形学基础. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [3] 杨杰, 吴月华, 张松. SMA 大肠内窥镜的导向机理与控制计算[J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(1). 21- 26.
- [4] 奚梅成. 数值分析方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [5] 徐士良. 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [6] 孙麟治, 孙萍, 秦新捷, 等. 细小管道内爬行的微机器人[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 57- 63.
- [7] 徐锡林, 张艺. 形状记忆驱动型微机械手的设计研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 64- 73.

System Simulation of Snake Travelling

LU Yongkui, XU Min, WU Yuehua, DU Huasheng, YANG Jie

*Department of Precision Machinery and Precision Instrument,
University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)*

Abstract: The paper proposes a micro-robot model. Based on the kinetic analysis of the model, a control theory of the travelling mechanism of the robot is discussed, and the system is simulated.

Key words: shape memory alloy; micro-robots; kinetic models; system simulation

作者简介: 卢永奎(1975-), 男, 辽宁省人, 硕士生。E-mail: lyk@mail.ustc.edu.cn