

基于螺旋弹簧的柔性杆形状感知技术

刘 琪

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了实现柔性杆形状的动态感知, 研究了螺旋弹簧变形的检测方法, 实现了对螺旋弹簧三维变形的实时感知。根据采集到的螺旋弹簧表面离散点的应变数据, 计算出簧丝的曲率和挠率, 建立了递推方程, 将螺旋弹簧变形形状重建出来。建立了一套实验系统, 验证了所提出方法的正确性, 应变信息由簧丝表面上的应变片采集, 采集到的应变信息直接输入到计算机, 并通过 VC++ 程序处理, 实时绘制出螺旋弹簧变形后的形状。研究表明, 该研究提出了一种有效获取在不可见环境下的形状解决方案, 具有一定的理论和实际意义。

关键词: 形状感知; 柔性杆; 螺旋弹簧; 形状重构

中图分类号: TH135; TP216

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)08-0060-04

Shape sensing technique based on the Helical Spring deformation detection

LIU Qi

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at realizing shape sensing of flexible stem, the detection method of helical spring deformation was investigated, by which the automatic perception for the helical spring deformation was realized. According to the detected strains of the discrete points on the surface of helical spring, the curvature and torsion of spring line were calculated, the recurrence relationship was established, and the spring deformation was obtained. An implementation system for the verification of the proposed method was established. The strain collected by strain gauge mounted on the surface of the helical spring was directly input into computer system, and it was processed by VC++ program, then the shape of the helical spring was dynamically displayed on the computer screen. The result shows that this work presents an efficient solution for the shape acquirement in invisible environment, and it is well expected that the proposed method is beneficial for the kind of problems.

Key words: shape detection; flexible stem; helical spring; shape reconstruction

0 引 言

弹性杆件空间位置和形状姿态感知技术的探索具有重要的科学意义和实用价值。在逆向工程中可以实现产品形状的快速输入与重建; 在虚拟现实应用中可以准确地检测到数据手套的位置, 以及数据手套中手指的形态和位置; 在医疗领域传统的结肠诊疗中, 通过改造结肠内窥镜, 使之具有显示结肠内窥镜在病人体内的形态的能力, 就可以为医生进行实施检查和治疗提供很大的方便。这些形状感知设备的共同特点都需要一种实时检测弹性杆件变形的形状感知技术和形状重建技术。目前主要采用磁场定位、光纤光栅传感等^[1-2] 技术来获得柔性杆的实时形状, 这些技术所采用

的设备都很昂贵, 同时所采用的信号调制解调处理技术也十分复杂, 因此有研究者采用电测应变原理, 实现了柔性杆弯曲参数的检测, 但这种方法不能有效地检测柔性杆的扭变参数^[3]。

本研究提出了一种新型的柔性杆, 基于电阻应变传感器的形状感知方法, 实现同时检测柔性杆的弯曲变形和扭转变形。采用可拉伸压缩的疏圈圆柱螺旋弹簧作为柔性杆, 电阻应变片分布在簧丝表面上, 通过建立簧丝表面应变与弹簧变形之间的关系, 获得弹簧的变形形状。

1 弹簧簧丝表面应变与弹簧变形关系

右旋螺旋弹簧受力分析简图如图 1 所示, 取过弹

簧轴线的任意平面 V 所截取的上半部分弹簧为研究对象,在平面 V 与簧丝中心线的交点 o 处建立坐标系 $o-tnb$,其中 t, n, b 分别为簧丝中心线在 o 点处的切线、法线与副法线。 n 和 b 组成簧丝中心线的法平面 V' ,即弹簧簧丝的横截面 A ,因此,平面 V' 与平面 V 之间的夹角就是弹簧的螺旋升角 α, D 为弹簧中径。

对于平面 V 所截取的上部分弹簧,根据受力分析,弹簧顶端在受到轴向力 P 、径向力 P_r 、弯矩 M 和扭矩 T 等载荷作用时,在横截面 A 内将分解为沿 t, n 和 b 坐标方向的扭矩和弯矩,即 T_t, M_n 与 M_b ,以及沿 t, n 和 b 坐标方向的切向力、法向力和径向力,分别为 P_t, P_n 与 P_b 。

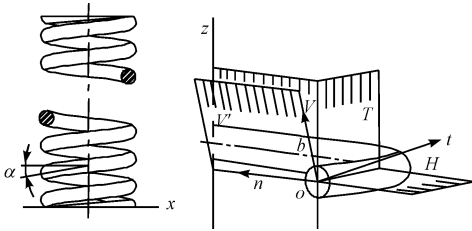


图 1 螺旋弹簧分析模型

根据材料力学知识,当螺旋升角较小和旋绕比较大时,弹簧簧丝的力学模型可以等效为弹性直梁,弹簧簧丝表面应变主要取决于横截面 A 所受的力矩^[4,5]。对于弹性直梁,弹簧簧丝的上表面应变 ε_1 、内表面正应变 ε_2 、切应变 ε_3 与截面所受力矩是成线性比例关系:

$$\varepsilon_1 = K_1 M_n \tag{1}$$

$$\varepsilon_2 = K_2 M_b \tag{2}$$

$$\varepsilon_3 = K_3 T_t \tag{3}$$

式中 K_1, K_2, K_3 —比例系数,这些系数取决于弹簧形状参数、材料性能等多个因素,通常采用实验标定法确定。

在材料的弹性极限范围内,弹簧在横截面 A 上变形量与载荷的关系为^[6]:

$$\Delta k_n = \frac{M_n}{EI} \tag{4}$$

$$\Delta k_b = \frac{M_b}{EI} \tag{5}$$

$$\Delta \tau = \frac{T_t}{GI_p} \tag{6}$$

式中 $\Delta k_n, \Delta k_b, \Delta \tau$ —沿 n, b, t 方向曲率与挠率的变化值。

将式(4)~式(6)分别代入式(1)~式(3)可以得到横截面 A 上变形量与弹簧簧丝表面应变之间的关系如下:

$$\varepsilon_1 = K_1 M_n = K_1 EI \Delta k_n \tag{7}$$

$$\varepsilon_2 = K_2 M_b = K_2 EI \Delta k_b \tag{8}$$

$$\varepsilon_3 = K_3 T_t = K_3 GI_p \Delta \tau \tag{9}$$

利用式(7)~式(9)就可以通过应变检测的方法,测得簧丝表面上一系列离散点的应变,进而得到各个检测位置的曲率与挠率变化信息。由于弹簧簧丝属于连续梁,因此可以通过曲线拟合的方法获得整个弹簧的变形情况。

2 曲率与挠率和整体变形的递推关系

假设在固定坐标系 $o-xyz$ 内,螺旋弹簧曲线方程为:

$$\begin{cases} x = r \cos t \\ y = r \sin t \\ z = ht \end{cases} \tag{10}$$

递推关系示意图如图 2 所示,将螺旋弹簧的起点 $Q(r, 0, 0)$ 固定。根据微分几何的知识, Q 点的切向量 $t = \{0, r, h\}$,主法向量 $n = \{-r, 0, 0\}$,主曲率方向沿 n 轴,曲率中心位置为 $P(r - (r^2 + h^2)/r, 0, 0)$ 。曲线的切向量与法向量确定的密切面 π ,建立密切平面的意义在于,在该处的曲线微段可以认为是在密切平面中弯曲的^[5],即可近似平面曲线拟合问题,使问题得以简化。

Q_1 点为 Q 点邻近的一点,当 Q_1 点趋近于 Q 点时,可以认为这个微小的曲线段 QQ_1 是圆弧段。设 QQ_1 之间的弧长为 ΔS ,则当 ΔS 足够小时,可近似认为: $\beta = \Delta S / |QP|$ 。

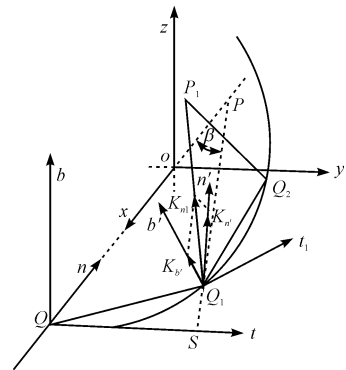


图 2 递推关系示意图

在密切面 π 中,利用向量关系可以求得 Q_1 在 $Q-xyz$ 坐标系中的位置。设 η 为沿 t 轴的单位矢量, S 为 PQ_1 延长线与 t 轴的交点。考虑到 $\angle QPS = \beta, P$ 点在法线 n 上,因此有:

$$\vec{QS} = \eta |\vec{QP}| \tan \beta \tag{11}$$

$$\vec{PS} = \vec{QS} - \vec{QP} \quad (12)$$

然后在 $\triangle PQQ_1$ 中, 可以得出:

$$\vec{PQ}_1 = \frac{\vec{PS}}{|\vec{PS}|} |\vec{QP}| \quad (13)$$

$$\vec{OQ}_1 = \vec{OP} + \vec{PQ}_1 \quad (14)$$

通过以上向量关系, 就可以得到 Q_1 点的空间位置。

为求 Q_2 点位置, 坐标系需从 $Q-tnb$ 变换到 $Q_1-t_1n_1b_1$ 。首先将坐标系 $Q-tnb$ 绕法向量 n 旋转 β 角度, 再将坐标原点从 Q 点移动到 Q_1 点位置, 从而确定了 t_1 的位置, 然后坐标系在法平面内绕着 t_1 轴扭转角度 θ , 得到坐标系 $Q_1-t_1n_1b_1$ 。 θ 为 Q_1 相对于 Q 扭转的角度, 其变化值 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \frac{T_t \Delta s}{GI_p} = \Delta s \Delta \tau \quad (15)$$

在坐标系 $Q_1-t_1n_1b_1$ 下, Q_1 点曲率分量 $K_{n'}$ 和 $K_{b'}$ 合成主法向量 K_{n_1} , 得到 n_1 轴的位置, 副法线 $b_1 = t_1 \times n_1$, 这样确定了新坐标系 $Q_1-t_1n_1b_1$ 。曲率分量 $K_{n'}$ 和 $K_{b'}$ 的变化值可由式(4)和式(5)得到。 t_1 轴与 n_1 轴确定新的密切面 π_1 , 在 π_1 上应用求 Q_1 点位置的方法得到新的离散点 Q_2 。

利用以上方法可以求出一系列离散点 Q_3, Q_4, \dots, Q_n 的空间位置, 将离散点连接起来就得到螺旋弹簧的变形曲线。

在整个弹簧长度范围之内布置一系列应变检测点, 位于检测点之间的离散点处的应变数据采用插值方法求得^[7]。只要应变片的数量足够, 就可以根据弹簧表面上的应变片数据, 精确地重构出螺旋弹簧变形后的三维形状, 再通过动态地采集应变数据, 就可以建立弹簧的三维动态模型。

3 实验系统

为了检验本研究提出的螺旋弹簧形状感知技术的正确性, 笔者设计了一个实验系统, 如图 4 所示。实验采用右旋弹簧, 节距 12 mm, 中径 46 mm, 弹簧材料为普通弹簧钢, 钢丝直径 4 mm。在弹簧的簧丝表面设置 6 个测量点, 其中 3 个均布在下端圆周上, 另外 3 个在中部圆周上。在簧丝测量点上表面以及内表面以及与簧丝轴线平行的位置上各贴一片应变片^[8], 以测量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 贴片方式如图 3(a) 所示。在相同测量位置外侧与轴线平行位置贴一双轴 45° 应变片, 以测量 ε_3 , 贴片方式如图 3(b) 所示。

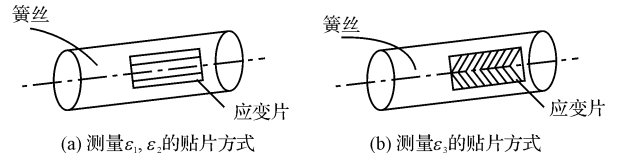


图 3 电阻应变片粘贴示意图

在实际测量中, 只能采集到有限的离散点曲率与挠率数据, 为了拟合出整条曲线的形状, 必须得到整条曲线上的曲率与挠率数据。为了得到更多的数据, 在两个离散点之间的曲率与挠率数据采用线性插值^[9]法, 因而在采样点的两侧曲率数据连续, 保证了拟合后的数据在采样点处连续且光滑。

传感器测量系统由信号调理放大电路、A/D 采集卡和计算机组成, 如图 4 所示。电桥信号经过放大滤波后, 由 A/D 采集卡实时采集, 采集卡与计算机通过 USB 口交换数据, 通过标定实验获得电桥输出电压与曲率、挠率变化值之间的转换关系, 最后由计算机根据实时采集信号计算出各点的曲率、挠率并绘制形状曲线三维形状。

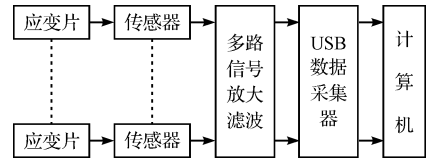


图 4 应变测量系统示意图

在本研究中, 数据采集速率设置为 30 kHz, 数据处理程序采用多线程技术, 开辟数据采集子线程和数据处理子线程^[10]。数据采集线程不间断的采集数据, 当采集完成指定长度的数据时, 就向数据处理线程发送同步消息。数据处理线程迅速响应并对这批数据进行计算、弹簧形状重建等操作, 这样保证了很好的实时性。

弹簧形状重建软件采用 VC++ 语言结合 OpenGL 技术开发^[11]。三维弹簧模型采用一系列首尾相连的圆柱体构成, 程序根据实时获得的电测应变数据计算螺旋弹簧曲线上离散点的空间位置, 然后改变弹簧模型上所有圆柱体两端点的坐标, 从而动态地显示弹簧的形态。当离散点选取比较密集时, 螺旋弹簧的模型还是比较逼真的。

弹簧变形形状检测试验情况如图 5 所示, 当往弹簧顶端施加径向力或弯矩使其弯曲, 计算机实时显示弹簧的变形情况。由于应变片数量较少, 实验中没有对电测应变的检测精度与误差进行校验, 但从图中可以看出, 计算机软件重构的弹簧变形情况与实际弹簧变形情况基本一致。

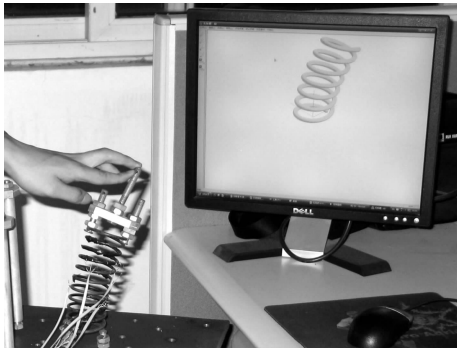


图 5 螺旋弹簧弯曲形状重构图

4 结束语

本研究采用电测应变和计算机处理的方法实现了一种基于螺旋弹簧的柔性杆形状感知方法,成功地实现了弹簧杆变形形状感知、三维实时重构和可视化显示,并通过实验得到了验证。采用电测应变的方法具有硬件系统原理简单,易于实现,算法的程序代码易于编制等优点。柔性杆形状感知技术在虚拟现实和计算机辅助设计输入设备研制、医疗器械研制、人体姿态记录设备研制等技术领域具有较大的实用价值。

(上接第 18 页)

5 结束语

本研究设计了单神经元 PID 精梳机四轴同步控制系统,利用神经元内在的自学习和自适应能力,将神经元与传统 PID 算法的优点相结合,给出了单神经元 PID 控制算法,仿真和实验结果表明,单神经元 PID 控制算法能有效实现多电机的同步控制功能,系统具有较快的收敛度,较好的鲁棒性和较强的抗干扰能力。同时,该系统充分发挥了 MCF5235 在电机控制方面特有功能和优势,体现了 VxWorks 实时嵌入式操作系统卓越的实时性和极高的可靠性;该系统的设计,为实现多电机同步控制的高速运转、高精度定位提供了很好的借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 张承慧,石庆升,程 金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15): 59-63.
- [2] 傅 平,郭吉丰,丁 敬,等. 基于神经元自适应 PID 的超声波电机速度位置控制[J]. 电工技术学报,2007,22(2):28-33.
- [3] BANNOURA M, BETTELHEIM R, SOTA R. ColdFire Microprocessors and Microcontrollers[M]. Beijing: Publishing

参考文献 (References):

- [1] 张伦伟,钱晋武,沈林勇,等. 光纤光栅大曲率传感器的试验研究[J]. 仪表技术与传感器,2003(8):1-2.
- [2] ASARI V K, KUMAR S, KASSIM I M. A fully autonomous microrobotic endoscopy system[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*,2000,28(4):325-341.
- [3] 陈建军,沈林勇,钱晋武,等. 已知离散点曲率的曲线拟合递推方法[J]. 上海大学学报:自然科学版,2003,9(2):123-126.
- [4] 钟文彬,李柏林,晏星凡. 预应力圆柱螺旋弹簧弯曲弹性特性分析[J]. 机械设计,2008,25(1):24-27.
- [5] 杨 峰,许明恒. 基于 COSMOSWORKS 的圆柱螺旋弹簧的应力分析[J]. 机械,2008,35(8):36-37,46.
- [6] 张英会. 弹簧[M]. 北京:机械工业出版社,1982:162-178.
- [7] 吴家麟,杨东英,沈林勇,等. 基于曲率数据的曲线拟合方法研究[J]. 应用科学学报,2003,21(3):258-262.
- [8] 张文杰. 自由曲线、自由曲面的高精度自动测量、数据处理及误差分析方法的研究[D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,1995:58-69.
- [9] 王嘉力. 微型六维力/力矩传感器及其自动标定的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机器人研究所,2007:28-34.
- [10] 张伦伟. 基于光纤光栅传感器的智能内窥镜形状感知系统[D]. 上海:上海大学机电学院,2005:18-28.
- [11] 陶 薇,王 涛. 再现轨迹平面四杆机构的优化[J]. 轻工机械,2008,26(6):42-43. [编辑:张 翔]

House of Electronics Industry,2008.

- [4] 张 杨,于银涛. VxWorks 内核、设备驱动与 BSP 开发详解[M]. 1 版. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [5] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 刘金昆. 先进 PID 控制及 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [7] CHANG W D. Robust adaptive single neural control for a class of uncertain nonlinear systems with input nonlinearity[J]. *Information Sciences*,2005,171(1-3):261-271.
- [8] 高钟毓. 机电控制工程[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2002.
- [9] LIN F J, WAI R J, CHEN M P. Wavelet neural network control for linear ultrasonic motor drive via adaptive sliding-mode technique[J]. *IEEE Transactions UFFC*,2003,50(6):686-698.
- [10] LIN F J. A fuzzy neural network controller for parallel-resonant ultrasonic motor drive[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 1998,45(6):928-937.
- [11] FUNG R F, KUNG Y S, WU G C. Dynamic analysis and system identification of an LCD glass-handling robot driven by a PMSM[J]. *Applied Mathematical Modelling*,2010,34(5):1360-1381.
- [12] BOLOGNANI S, PERETTI L, ZIGLIOTTO M, et al. Commissioning of electromechanical conversion models for high dynamic PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010,57(3):986-993.

[编辑:柴福莉]