

PVDF 薄膜传感器滑动信号的积分简化识别算法

刘伟¹, 丁力平¹, 翟建军¹, 武新光², 贺鋆轩²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 西安北方惠安化学工业有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:将 PVDF 压电薄膜作为传感元件, 设计滑觉传感器模块, 用于反馈机器人抓取时物体的相对滑动状态感知。针对其触觉、滑觉信号难以区分的问题, 分析了现有方法的缺点和局限性, 设计了一种基于积分简化的滑动信号识别算法, 将信号曲线与坐标轴围成的面积作为考量标准, 可实时、高效地识别滑动信号, 通过试验验证了算法的可行性。研究表明, 当信号的 δ 值超过 40% 时即可视为产生了滑动。该算法可以为实现机器人末端执行器柔顺抓取技术中的滑觉检测提供参考。

关键词: PVDF 压电薄膜; 滑觉传感器; 信号处理; 滑动识别

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2020)03-0175-04

Integrally Simplified Recognition Algorithm of sliding signal of PVDF Thin Film Sensor

LIU Wei¹, DING Liping¹, ZHAI Jianjun¹, WU Xinguang², HE Junxuan²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Xi'an North Hui'an Chemical Industry Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The PVDF piezoelectric thin film as the sensing element is used to design a sliding sensor module, which is used to feedback the sliding state of the object grasped by robot. Aiming at the problem that it is hard to distinguish the tactile and sliding signals, the shortcomings and limitations of the existing methods are analyzed. A sliding signal recognition algorithm based on integral simplification is proposed. The area enclosed by the signal curve and the coordinate axis are taken as the consideration standard which is used to identify slip signals efficiently. The feasibility of the algorithm is verified by experiments. The research result shows that it can be regarded as slip when the recognition value of the signal exceeds 40%. The reference is provided for the sliding detection in the robot gripper gripping.

Keywords: PVDF piezoelectric thin film; sliding sensor; signal processing; sliding recognition

0 引言

传感器是机器人与工作环境直接产生作用的必备媒介, 通过模仿人类的感知, 反馈接触、滑动、温度等信息, 进而使机器人完成物体抓取等操作任务。而检测机械手与物体间的滑动, 是实现夹持力柔顺控制和高精度抓取的关键所在。

常见的触滑觉传感器^[1]主要有电容式、压阻式、磁敏式、光纤式等, 但这几类传感器因为精度不高、标定复杂、难以集成等逐渐被淘汰。目前, 压电式应用最广, 特别是近年来研发的聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 薄膜, 由于其压电能力强、柔性好、强度大、耐力学冲击、耐腐蚀和可任意分割等优点得到广泛应用^[2]。它能同时检测触觉和滑觉信号, 但两者耦合在一起, 分离上存在一定困难。

辛毅、田红英等人^[3]利用 PVDF 薄膜构建了基于 LabVIEW 的触滑觉识别系统, 获得了典型的触觉信号和滑觉信号的变化曲线; 张立勋等人^[4]利用斜率和方差的计算

对 PVDF 薄膜产生的信号进行处理, 区分物体的碰撞和滑动。但是, 因物体的表面粗糙度等因素各不相同, 采用阈值或斜率这类绝对值的方法判别具有一定的局限性; 而方差法需要采集足够多的信号才能提高算法的准确性, 在实时性方面不够好。

本文以 PVDF 压电薄膜作为传感元件, 将其用于检测上、下料机器人末端执行器柔顺抓取过程中物体的滑动信息, 并设计一种基于积分简化的滑动信号识别算法, 通过多次试验, 确定物体产生滑动时的信号阈值, 为夹持力控制和调整提供准确实时的反馈。

1 PVDF 压电薄膜的传感原理

PVDF 是一种含氟聚合物, 极化之后有很强的压电特性, 经过多年的发展已经成为最具潜力的聚合物压电材料^[5]。

如图 1 所示, 将 PVDF 薄膜沿 x 方向单轴拉伸, 沿 z 方向极化, 处理之后可作为压电传感元件使用。使用时, 薄膜表面受力产生的微振动会使其携带的电荷量发生变化,

通过放大和处理转化为电压信号,即可以为控制系统提供反馈信息。

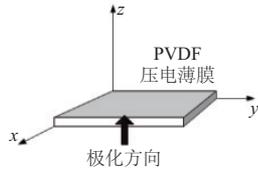


图1 PVDF 薄膜极化示意图

压电方程^[6]反映了晶体电学量和力学量之间的相互关系。处理后的薄膜压电常数矩阵为:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

此时外加电场为 0,其压电方程表示为:

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (i=1\sim 3, j=1\sim 6) \quad (2)$$

式中: T 为应力(N/m^2); D 为电位移(C/m^2); d 为压电应变常数矩阵。

PVDF 压电薄膜的电荷输出是指它所有方向上的应变在极化方向上作用的响应^[7]。试验中所用压电薄膜极化方向沿薄膜厚度方向,将其贴附在机械手指的内表面。此时,传感器有横向和纵向两个方向上的受力,故其输出电荷可表示为:

$$Q = (d_{31} S_1 + d_{32} S_2) \cdot EA \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为压电应变常数; S_i 为应变($i=1,2$); E 为弹性模量; A 为传感器电极覆盖的面积。

2 滑觉传感器信号处理电路

传感器的信号处理电路如图 2 所示。电路以多级 TL081 运放作为核心元器件,分为电荷变换级、适调级、低通滤波器、末级功放、过荷级等几个部分^[8-9]。

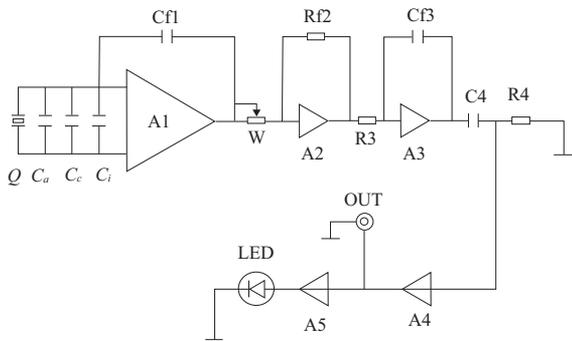


图2 信号处理电路示意图

整个信号处理电路可视为一个具有深度负反馈的运算放大器,其等效电路如图 3 所示。

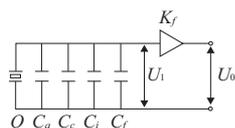


图3 信号处理等效电路

K_f 为放大电路的开环增益,则传感器输入电荷与电路输出电压之间的关系可用下式来表示:

$$U_0 = -K_f U_1 = -\frac{K_f Q}{C_1} \quad (4)$$

式中: U_0 为电路输出电压; U_1 为等效输出电压; Q 为传感器电容的电荷量; K_f 为放大器开环增益; C_1 为等效电容。

由米勒定理可知,等效电容与反馈电容的关系为:

$$C_1 = C + (1 + K_f) C_f \quad (5)$$

式中: $C = C_a + C_c + C_i$; C_a 为传感器自身电容; C_c 为电缆电容; C_i 为输出电容。

从本节推导也可以看出,PVDF 压电薄膜传感器的输出只与电荷量有关。薄膜振动产生电荷量越多,电压信号越大;反之,电荷逐渐释放,输出电压降为初始值。

3 基于积分简化的滑动信号识别算法

理论上,由于压电薄膜的电容特性^[10],机械手与物体之间接触力变化产生的传感器信号呈跳跃式,且持续时间很短,如图 4(a)所示;有相对滑动时,薄膜表面产生微振动,传感器信号呈连续式,持续时间较长,如图 4(b)所示。

实际抓取过程中,机械手与物体接触碰撞产生的信号对滑动状态的检测会产生干扰,因此,设计有效的滑动识别算法,区分接触和滑动信号,才能准确地反馈滑动状态,这对实现柔顺抓取至关重要。

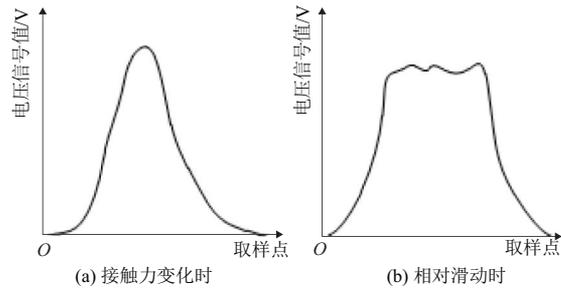


图4 理想电压信号曲线示意图

目前常用的方法有斜率识别和方差识别。斜率法以采样起始点和极值点之间的斜率作为识别标准,然而实际上不同物体表面各不相同,信号极值波动较大,接触和滑动引起的信号难以直接区分。方差法能够反映信号趋势,在一定程度上对两者进行区分,但是需要采集到足够多的数据才能提高算法的准确度,耗时较长,实时性不高。两种方法均有一定的局限性,本文设计了一种积分简化的识别算法,能够实时高效地判断物体滑动程度。检测到的传感器电压信号如图 5 所示。

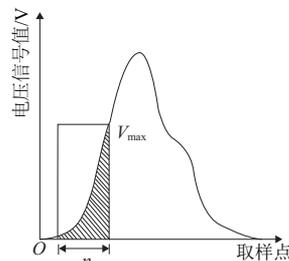


图5 积分简化算法识别示意图

在一个采样区间 nT 内 (n 为采样周期数, T 为采样周期), 电压信号的极值为 V_{\max} , 矩形部分面积为 S , 与曲线及坐标轴围成的阴影部分面积为 S_V , 则两者可以分别表示为:

$$S = nTV_{\max} \quad (6)$$

$$S_V = \int_{T_1}^T V dt \quad (7)$$

那么, 物体的滑动程度 δ 可以表示为

$$\delta = \frac{S_V}{S} \times 100\% \quad (8)$$

考虑到积分计算的复杂程度, 为提高算法的效率, 将积分进行如下简化:

$$S_V = \sum_{i=1}^n V_i T \quad (9)$$

代入(8)式可得:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{nV_{\max}} \times 100\% \quad (10)$$

可见, δ 值的大小即可以反映物体的滑动程度, 而且值越大滑动程度越大。

理想情况下, 积分简化算法识别过程如图 6 所示。图 6(a) 为接触力信号识别, 图 6(b) 为滑动信号识别。显然当取样区间相同时, 滑动信号的 δ 值远大于接触力信号的 δ 值。

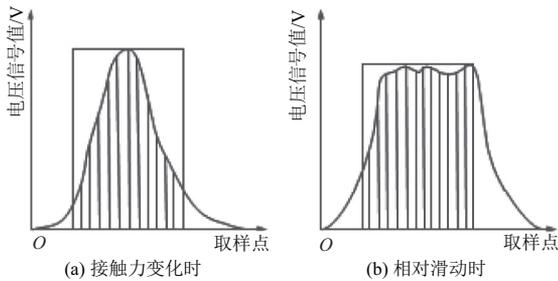


图 6 理想曲线的积分简化算法识别示意图

通过试验发现传感器输出信号的初始值不为 0, 因此为了避免对滑动信号的识别造成影响, 去除了阴影部分面积中初始值与坐标轴围成的部分, 修改后的滑动信号识别算法为:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n V_i - nV_0}{n(V_{\max} - V_0)} \times 100\% \quad (11)$$

4 试验验证及结果分析

试验所用美国某公司生产的 PVDF 压电薄膜如图 7 所示, 厚度为 $150 \mu\text{m}$ 。薄膜一端铆接两根导线, 分别连接压电薄膜的两面, 导线与电荷运算放大器相连组成滑觉传感器。

将压电薄膜紧贴在机械手内表面, 当其与物体有接触或者相对滑动时, 产生的电荷经过调节电路处理之后转化为电压信号, 通过 UMAC 控制器采集数据到上位机进行处理, 试验系统整体如图 8 所示。

通过试验得到的传感器输出波形如图 9 所示, 对采集到的数据进行处理得到结果如下:



(a) 试验用传感器 (b) 电荷放大器

图 7 PVDF 压电薄膜

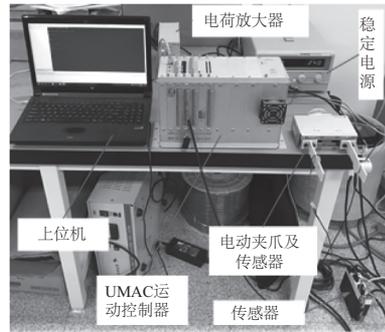


图 8 滑动信号识别试验系统

- 1) 由图 9(a) 可以看出, 抓取过程中机械手刚接触到物体时由于碰撞传感器信号突然增大, 随后快速降低并在初始值附近波动, 利用式 (11) 积分简化算法计算出此时 $\delta = 20.7\%$;
- 2) 随着夹持力增大, 完成物体的预夹紧并尝试向上抬起如图 9(b) 所示, 物体仍有滑动产生, 此时的 $\delta = 46.1\%$;
- 3) 当夹持力增大到夹紧物体时无滑动产生, 如图 9(c) 和图 9(d), 传感器信号几乎没有波动, δ 值约为 0。

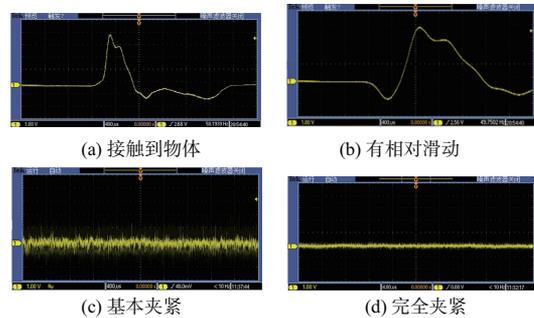


图 9 滑觉传感器输出信号

为了验证该积分简化算法的先进性及实用性, 以滑动信号识别的准确度和实时性作为两个衡量指标, 对同一次抓取试验采集到的有效数据, 分别利用阈值法、斜率法及方差方法进行识别。经过多次试验, 其中某 5 次结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 阈值法识别结果					单位: V
编号	1	2	3	4	5
接触时	2.68	3.00	3.27	2.58	3.81
滑动时	2.56	2.77	2.42	2.69	2.60

表 2 斜率法识别结果 单位: V

编号	1	2	3	4	5
接触时	0.53	0.71	1.24	0.64	1.09
滑动时	0.34	0.58	0.41	0.70	0.43

由表 1、表 2 的阈值法和斜率法识别结果可以看出,物体发生接触和滑动时传感器的电压信号大小,没有明显的界限和规律,多次试验的准确率均低于 10%。因此难以用来识别 PVDF 压电薄膜传感器的滑动信号。

在利用方差法识别时,同样取前 150 个有效数据点,得到的接触和滑动时信号没有明显区别,试验准确率较低,因此将取样点扩大到 300 个,识别结果如表 3 所示。接触时信号方差普遍在 1.2V^2 以上,而滑动时信号方差低于 1.0V^2 ,有一定的区分度。但是由试验数据可知,当采集的信号达到 400 个左右时物体已经滑落,可见方差法的实时性不能达到要求。

表 3 方差法识别结果 单位: V^2

编号	1	2	3	4	5
接触时	0.82	1.41	1.27	1.53	1.26
滑动时	0.77	0.92	0.80	1.15	0.65

表 4 为积分简化法识别结果,取样点为 150 个。可以看出接触信号与滑动信号的 δ 值具有明显的区别:当 $\delta < 23\%$ 时传感器输出的是接触力变化引起的信号,当 $\delta > 40\%$ 时产生的是滑动信号。对比方差法可知,取样点少了一半,实时性得到提高,并且几乎没有误判,准确度较高。

表 4 积分简化法识别结果 单位: %

编号	1	2	3	4	5
接触时	20.7	22.5	19.6	20.4	18.8
滑动时	46.1	53.4	41.9	50.6	43.5

5 结语

本文将 PVDF 压电薄膜作为检测机器人柔顺抓取过程中物体滑动程度的压电传感元件,利用调理电路对传感器信号进行处理,并基于其压电特性提出一种积分简化的

滑动识别算法,对采集到的数据进行处理,进而判断物体的滑动情况。通过抓取试验验证了算法的可行性和先进性,结论如下:

1) 与传统的阈值法、斜率法和方差法相比,本文提出的积分简化算法具有更高的准确性和实用性,识别速度提高近 1 倍;

2) 通过多次试验确定 δ 值超过 40% 时物体即发生了相对滑动,可以将这种传感器及滑觉信号识别算法应用到机器人抓取过程中物体的滑动检测,为实现柔顺抓取提供反馈。

参考文献:

- [1] HU H, HAN Y, SONG A, et al. A finger-shaped tactile sensor for fabric surfaces evaluation by 2-Dimensional active sliding touch[J]. *Sensors*, 2014, 14(3):4899-4913.
- [2] UEBERSCHLAG P. PVDF piezoelectric polymer[J]. *SensorReview*, 2001, 21(2):118-126.
- [3] 辛毅,田红英,蒋琪,等. 基于 LabVIEW 的 PVDF 压电薄膜触滑觉识别系统[J]. *压电与声光*, 2015, 37(5):793-795.
- [4] 张立勋,谭定忠,路敦民,等. 基于滑觉传感器和模糊控制的软抓取研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1999, 20(5):1-6.
- [5] MA C C, CHUANG K C, PAN S Y. Polyvinylidene fluoride film sensors in collocated feedback structural control: application for suppressing impact-induced disturbances[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 2011, 58(12):2539-2554.
- [6] 段秀华,王焕钦,钱玉洁,等. PVDF 压电薄膜新型微穿孔板主动吸声方法的仿真研究[J]. *机械设计与制造*, 2014(2):24-27.
- [7] 具典淑,周智,欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. *功能材料*, 2004, 35(4):450-452.
- [8] 蔡春风. 人体表面肌电信号处理及其在人机智能系统中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [9] 韩亚丽,高海涛,吴在罗,等. 基于 PVDF 的足底测力系统研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(6):67-71.
- [10] MOHAMMADI B, YOUSEFI A A, BELLAH S M. Effect of tensile strain rate and elongation on crystalline structure and piezoelectric properties of PVDF thin films[J]. *Polymer Testing*, 2007, 26(1):42-50.

收稿日期:2019-03-04