

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905271

直流电源激励下的电路高分辨力应变信号处理*

孙会娇^{1,2}, 代煜^{1,2}, 张建勋^{1,2}, 姚斌^{1,2}

(1. 南开大学人工智能学院 天津 300350; 2. 南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300350)

摘要:针对应变信号测量中存在的噪声与直流漂移问题,在研究应变信号漂移特性的基础上,提出了一种适用的直流漂移消除方法,即根据信号的局部极值点进行分段,而后对各段进行多项式拟合;对漂移消除后的信号采用一维双边滤波进行降噪处理,提出了双边滤波最优参数的选择方法,并以信噪比为指标对双边滤波的降噪性能进行了评估。利用实验检验了提出方法的有效性,实验数据为微创外科手术机器人力传感器的应变信号。实验结果表明,经改进的分段多项式拟合方法有效去除了直流漂移;双边滤波方法不仅适用于信号的动态滤波,也保证了良好的滤波效果;使用本文提出的应变信号处理方法后,力传感器的分辨力优于2 g。

关键词:直流漂移消除;多项式拟合;微弱信号处理;高分辨力;一维双边滤波

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

High resolution strain signal processing for the circuit under DC source excitation

Sun Huijiao^{1,2}, Dai Yu^{1,2}, Zhang Jianxun^{1,2}, Yao Bin^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Institute of Robotics & Automatic Information system, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problems of noise and direct current (DC) drift in strain signal measurement, a suitable DC drift cancelation method is proposed based on studying the DC drift characteristics of strain signal. The signal is segmented according to local extremum points, and then polynomial fitting is performed on each segment. The one-dimensional bilateral filtering is adopted to perform noise reduction processing for the drift cancelled signal, and the optimal parameter selection method of the bilateral filtering is proposed, and the de-noising performance of the bilateral filtering is evaluated with signal-to-noise ratio (SNR) as the index. The effectiveness of the proposed method was verified with experiment, in which the experiment data was the strain signal acquired from a force sensor in the minimally invasive surgery robot. Experiment results show that the improved piecewise polynomial fitting method effectively remove the DC drift of the strain signal, and the bilateral filtering method not only is suitable for the dynamic filtering of the signal, but also ensures excellent filtering effect. With the proposed strain signal processing method the resolution of the force sensor is better than 2 g.

Keywords: DC drift cancelation; polynomial fitting; weak signal processing; high resolution; one-dimensional bilateral filtering

0 引言

目前,应变信号的检测技术应用非常广泛^[1],应变信号放大电路通过把压力、位移、加速度等物理量转换为应变信号的输出,而后对应变信号进行放大等处理,从而达到对这些物理量进行测量的目的^[2]。与交流电源激励下

的应变信号放大电路相比,直流电源激励下的电路具有结构简单的突出优点。

应变计桥路的输出信号极其微弱,很多幅值只有微伏级别,极易受到噪声污染。噪声一是由电路及电子元器件本身的热噪声引起,二是由周围环境中的干扰源产生。另外,采集到的信号往往具有不稳定性,表现为存在明显的直流漂移。输出的电信号很微弱,无法直接测量,

必须经过几千甚至几万倍的放大才能满足采样设备的接收范围^[3];然而,高放大倍数下,信号中混杂着的噪声和直流漂移成分也随之被放大,极易与有用信号混叠在一起,导致信号测量精度偏低。有用信号一般为低频信号,和直流漂移所在的频段接近,且噪声通常具有随机性,使用普通的滤波器难以将其完全去除。因此,为了有效提取有用信号,保持信号完整性^[4],必须对采样信号进行直流漂移消除与降噪处理。

目前,有关信号放大调理电路输出电信号的直流漂移消除方法的研究较少,关于直流漂移的消除方法,主要集中于电化学噪声技术在腐蚀领域的应用研究,主要方法有:移动平均消除法^[5]、线性拟合消除法^[6]、多项式拟合消除法^[7-9]、小波去除直流漂移法^[10]。移动平均消除法由于计算平均值数据的窗口选择不当,被认为不适合直流漂移的消除;线性拟合法只有在漂移线性特征较好时才适用;多项式拟合法易于实现、适用范围广、去除漂移的效果较好,但灵活性差,对于信号波动趋势大的情况拟合效果较差;文献[9]提出了分段多项式拟合方法,即对一段时间内的采样信号以恒定大小的窗口进行分段,并对各分段曲线进行多项式拟合,但当信号中存在较大波动时,利用该方法拟合时会产生较大偏离甚至拟合失败;小波去除直流漂移方法的精度与多项式拟合法基本相当^[11]。

为提高信号的采集精度,针对信号中的直流漂移,在研究了应变式力传感器输出信号漂移特性的基础上,本文提出一种针对信号中的局部极值点进行分段的多项式拟合的漂移消除方法,在局部极值点处设置分段点并拟合出漂移趋势,进一步消除漂移。针对信号中的噪声,本文采用一维双边滤波进行降噪处理,设计评价指标对滤波器的最优参数进行了选取,同时通过降噪处理前后信号的信噪比对滤波器的降噪效果进行了定量分析。将消除直流漂移和降噪的方法应用于处理微创外科手术机器人力传感器输出的应变信号,以提高传感器的分辨力为目标检验了本文方法的有效性。

1 直流漂移检测与消除

当采样信号由于外界输入呈动态变化时,往往伴随有局部极值点,因此所采用的直流漂移消除方法应能够适用于信号的动态变化,并能够有效区分有用信号与直流漂移成分。对此,本文提出了一种针对信号中的局部极值点进行分段的多项式拟合漂移消除方法,方法的流程如图1所示。消除直流漂移的步骤如下。

1) 通过对漂移与有用信号频谱的分析,对原始采样信号进行低通滤波及降采样,滤除有用信号,得到几乎只含直流漂移成分的信号。

2) 低通滤波后,通过求导得到导数为0的点,这些点即为信号中的局部极值点。

3) 在局部极值点处设置分段点,如图1所示,得到不等距分段区间 L_1, L_2, L_3, \dots ,依次对各区间的曲线进行多项式拟合。将相邻局部极值点的信号幅度差除以这两点之间的时间差值,如果所得的商大于某一域值,这两点之间的信号是有用信号而不属于直流漂移。

4) 将各分段拟合后的曲线连接起来,生成一条跟随原始曲线漂移趋势的新曲线。

5) 对新曲线进行升采样处理,利用原始信号减去对应漂移线上的漂移量,即得到漂移消除后的信号。

对信号进行分段多项式拟合的原理简单,实现较容易,但应注意分段多项式拟合方次 m 的选取问题。文献[8]指出,对于直流漂移的消除,实际上并不需要很高方次精确地拟合,只将其总体的漂移趋势拟合出来消除即可。

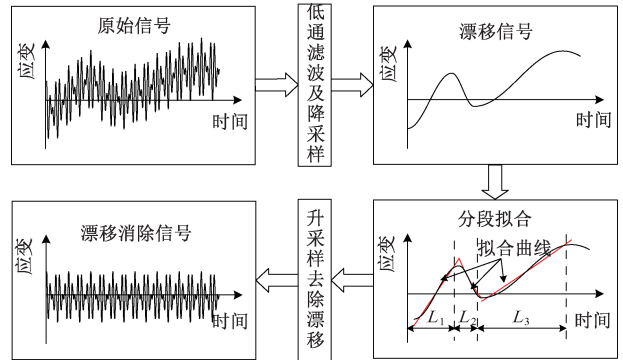


图1 直流漂移消除流程

Fig.1 DC drift cancellation process

2 双边滤波原理及参数选择

2.1 双边滤波原理

双边滤波器(bilateral filter, BF)是一种基于局部、非线性、非迭代的滤波方法^[12]。双边滤波由空间域核函数和值域核函数组成,前者由几何空间距离决定^[13],后者由时域上采样点的值域决定。本文将BF应用于一维信号的处理中,同时结合高斯函数钟形曲线定义了滤波点的定义域。

一维BF中,可将空间域核函数化简为定义域核函数:

$$G_{\sigma_x}(1 x_j - x_i |) = \exp\left(-\frac{1 x_j - x_i |^2}{2\sigma_x^2}\right), j \in \Omega \quad (1)$$

式中: x_i 为当前处理的中心数据点索引; x_j 为中心数据点邻域内的一点; σ_x 为高斯核函数的宽度参数, σ_x 值越大,表示参与滤波的采样点越多,平滑效果越好。由式(1)可以看出,空间距离越大,定义域核函数代表的滤波权重

越小。

值域核函数为:

$$G_{\sigma_r}(|f(x_j) - f(x_i)|) = \exp\left(-\frac{|f(x_j) - f(x_i)|^2}{2\sigma_r^2}\right),$$

$$j \in \Omega \quad (2)$$

式中: $f(x_i)$ 为点 x_i 的应变值; σ_r 为采样点值域的权系数参数, 根据值域差异分配权值, 赋予值域差距大(如边缘)的采样点较小权重, 减弱其对滤波结果的影响。

如式(3)所示, 为采样点坐标 j 的定义域 Ω , 表示采样点 x_i 左邻域 $N/2$ 宽度的范围。

$$\Omega_x(N) = \{i - N/2 < j < i\} \quad (3)$$

式中: N 表示高斯核的采样窗口大小, 与 σ_s 的取值有关, 高斯函数钟形曲线中, 在 $[-3\sigma_s, 3\sigma_s]$ 区域内包含超过 99.7% 的数值分量, 其外的数值可忽略, 且窗口大小通常取最近的奇数, 因此, N 的取值范围表示为 (Ent 函数表示向下取整):

$$N = \text{Ent}(2 * 3\sigma_s + 1) \quad (4)$$

BF 的加权系数为定义域核函数和值域核函数的乘积, 如式(5)所示。

$$W = \sum_{j \in \Omega} G_{\sigma_s}(|x_j - x_i|) G_{\sigma_r}(|f(x_j) - f(x_i)|) \quad (5)$$

BF 在点 x_i 处的计算公式为:

$$F(\sigma_s, \sigma_r) =$$

$$\frac{1}{W} \sum_{j \in \Omega} G_{\sigma_s}(|x_j - x_i|) \times G_{\sigma_r}(|f(x_j) - f(x_i)|) f(x_j) \quad (6)$$

BF 滤波中, 空间域核函数使得滤波后信号的整体平滑性较好, 同时值域核函数使得边缘信息得到了较好保留。双边滤波结合了经典的低通滤波器和边缘保持功能, 可对高频噪声起到抑制作用, 故可将其用于应变信号的降噪处理。

2.2 BF 最佳参数选择

双边滤波应用于信号处理时, 其滤波性能受空间域参数 σ_s 和值域参数 σ_r 的影响较大。为获得最佳滤波效果, 应根据实际情况选择最佳参数, 对于最优滤波参数的选择问题, 目前没有较明确的理论依据, 这些参数通常通过反复试验获得。文献[14]中提出了经验学习的思想, 详尽地分析了滤波效果与双边滤波参数 σ_s 和 σ_r 的依赖关系, 但该文献及后续涉及双边滤波参数选取的文献中均是基于二维图像处理中的参数选取, 对此, 在将双边滤波应用于一维应变信号处理前, 本文 BF 的最优参数进行了选取。

选取一组原始采样信号, 对其进行 BF 最优参数选取。如式(7)所示, 信号的均方差为空间域参数 σ_s 和值域参数 σ_r 的函数, 通过改变参数 σ_s 和 σ_r 的值来改变 BF 的权值系数, 得到不同 σ_s 和 σ_r 值下的均方差值, 进一步确定出参数 σ_s 和 σ_r 的取值范围, 当信号的均方差取得

最小值时的 σ_s 和 σ_r 即为最优滤波参数。

$$S_d = \text{Std}[F(\sigma_s, \sigma_r)] \quad (7)$$

3 实验分析

3.1 实验装置

本文提出的直流漂移消除方法在用于微创手术机器人的力传感器中得到了应用, 用以去除应变信号中的直流漂移成分, 实现信号滤波前的预处理, 后续对去漂信号进行双边滤波, 得到降噪处理后的信号。

本文的原始信号来源于一种具有力感知功能的四自由度微创外科手术机械手, 如图 2 所示, 该机械手是天津大学等单位研制的“妙手”微创手术机器人^[15]的组成部分。机械手通过左端的快速转换接口安装于微创外科手术机器人的主机机械臂末端^[16-17], 图中虚线圆圈处即为应变片的粘贴位置, 应变片与力信息采集电路板上的固定电阻组成单臂电桥, 负责将力信号转换为电压信号输出。

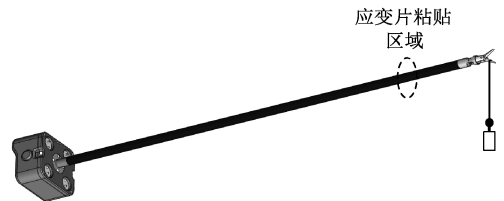


图2 具备力感知功能的微创外科手术机械手
Fig.2 The minimally invasive surgical manipulator with force sensing function

采样前首先将微创外科手术机器人机械手和力信息采集电路板固定于标定平台上, 以采样频率 $F_s = 1 \text{ kHz}$ 进行采样。采集的信号通过串行通讯接口实时传送至上位机并保存, 以采样时长为 1 s 的采样信号为一组进行处理, 经多次运行程序记录并取平均值, 每组数据进行漂移消除和双边滤波降噪处理所需的时间约为 0.08 s。

3.2 应变信号的直流漂移消除

当电路的放大倍数设置为 50 800 倍时, 在未加载砝码的条件下, 对力传感器进行应变信号采集, 选取采样时长约 16 s 的信号, 得到如图 3 所示的去除了直流分量后的频谱图。可以观察到, 直流漂移的频率很低, 频带几乎在 0.2 Hz 以下, 其余频率点上为近似白噪声的普通信号干扰; 实际的手术操作中, 医生的打结速度约为每分钟 80~90 个结, 相当于打结时采集的力信息的频率在 1.3~1.5 Hz 左右。据此, 设计低延迟 IIR 低通滤波器以滤除有用信号。

对应变信号低通滤波处理后进行降采样, 进而求得得到函数的局部极值点, 在极值点处设置分段点并对各段曲线进行多项式拟合, 多项式拟合方次为 $m = 3$, 可较

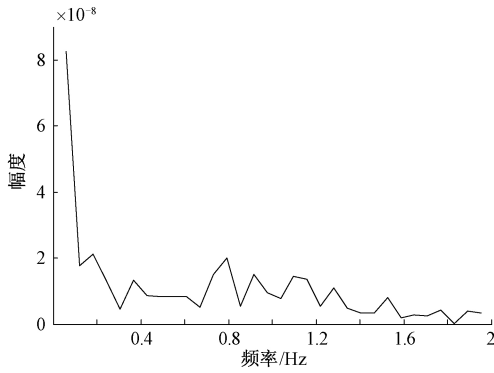


图 3 未加砝码时采样信号频谱

Fig.3 The spectrum of the sampled signal without weight loading

好地拟合出直流漂移趋势。对不同放大倍数下采集的加载 20 g 砝码的数据进行了漂移消除处理,图 4 所示为不同放大倍数下的原始应变信号与漂移消除信号的对比。其中,图 4(a)、(c) 分别表示放大倍数为 19 900 倍时的原始信号与漂移消除后的信号,图 6(b)、(d) 表示放大倍数为 50 800 倍下的原始信号与漂移消除后的信号。图 4 中中部凸起是由于在机械手末端加载了质量为 20 g 的砝码(上升沿表示加载,下降沿表示卸载)。

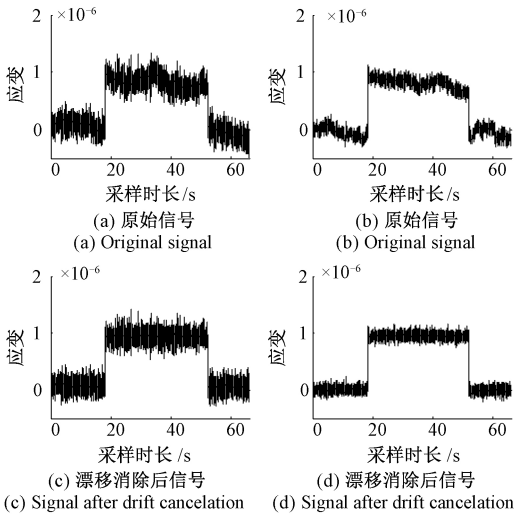


图 4 20 g 砝码载荷下不同放大倍数漂移消除对比
Fig.4 Comparison of the drift cancellation results for different gains under 20 g weight loading

通过图 4(a)、(b) 对比可以观察到,对于原始采样信号,直流漂移趋势随着放大倍数的增大略加明显。通过图 4(a)、(c) 以及图 4(b)、(d) 之间对比观察到,经本文方法进行直流漂移消除后,对于未加载砝码时的采样数据区间,曲线基本上以零点为基线波动,表明去漂效果显著,实现了数据滤波前的预处理。结合实际微创手术中

医生的动作需求,手术过程中施加的为动态变化的力,本文的漂移消除方法可适用于信号的动态变化。对于有用信号和直流漂移引起的局部极值点的区分,本文将相邻局部极值点的信号幅度差与这两点的时间差值作比,如果该比值大于设定的阈值 0.125×10^{-6} 时,认为这两点间的信号为有用信号,不属于直流漂移。

3.3 BF 降噪实验

1) BF 最佳参数选取

选取放大倍数为 19 900 倍时采集的加载 20 g 砝码的去漂信号(采样时长约 34 s)进行 BF 参数的选取,通过不断试验,将 σ_s 在 [10, 100] 内取值,将 σ_r 在 [0.1, 1] 内取值,得到降噪处理后信号的均方差与参数 σ_s 和 σ_r 的函数关系图,如图 5 所示。

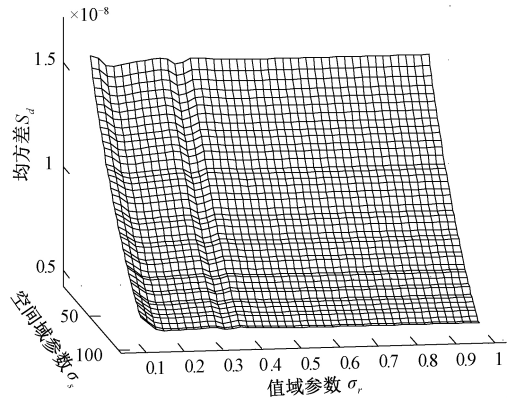


图 5 不同参数 σ_s 与 σ_r 下的降噪信号均方差
Fig.5 The mean square deviation of the de-noised signal for different parameters of σ_s, σ_r

由图 5 可以观察到,随着参数 σ_s 和 σ_r 取值的变化,信号的均方差也在不断变化,在 $\sigma_s = 98, \sigma_r = 0.3$ 时,降噪处理后信号的均方差取得最小值 5.35×10^{-9} ,由降噪处理前后信号的对比图中观察到,BF 对信号整体起到了平滑作用。同理,对放大倍数为 50 800 倍时采集的加载 20 g 砝码载荷的去漂信号进行参数选取,在 $\sigma_s = 96, \sigma_r = 0.2$ 时,降噪处理后信号的均方差取得最小值 6.965×10^{-9} 。

2) BF 降噪性能评估

本文选用信号的信噪比(SNR)对信号的降噪效果进行评价。其中,信噪比的计算方法如式(8)所示^[18]:

$$SNR = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_s}{P_n}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{\sum_{i=1}^N s^2(i)}{\sum_{i=1}^N (\hat{s}(i) - s(i))^2}\right) \quad (8)$$

式中: $s(i)$ 为原始信号, \hat{s} 为降噪处理后的信号, P_s 为 $s(i)$ 的功率, P_n 为降噪处理后信号中所含噪声的功率。

在对应变信号进行 BF 降噪处理之前,设计仿真实验

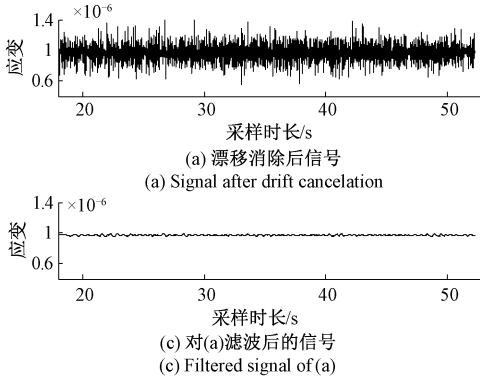
对双边滤波的降噪性能进行评估。仿真所用的有用信号为 5 和 7 Hz 正弦信号之和,向其叠加了直流漂移为 0.1 Hz 的正弦信号和零均值的高斯白噪声。同时改变漂移信号的幅度和白噪声的方差获得不同信噪比的信号,对该信号利用本文方法进行处理。处理前后信号的 SNR 如表 1 所示,表中的每一个数据均为 20 次仿真实验的平均值。

表 1 信号降噪处理前后 SNR 对比

Table 1 Comparison of SNRs before and after de-noising processing

处理前信噪比	1	5	10
处理后信噪比	3.363 1	11.374 2	15.312 3

分析表 1 可知,经最优参数下的 BF 降噪处理后,信号的 SNR 有了明显提高,且在时域上具有较好的滤波效果。据此,可将 BF 算法应用于对应变信号的降噪处理。



3) 应变信号降噪实验
加载 20 g 砝码时,对放大倍数为 19 900 和 50 800 倍下经直流漂移消除处理后的新信号分别进行了最优参数下的降噪处理。图 6 所示为两种放大倍数下的降噪处理前后效果对比,为便于观察分析,图 6(a) 和(b) 中数据分别取自 3.2 应变信号的直流漂移消除中图 4(c) 与(d) 中 18~52 s 的数据。分析图 6(c)、(d) 可以发现,BF 的降噪效果较好。如表 2 所示,不同放大倍数下,原始信号经过漂移消除与降噪处理后,信号的均方差均有了明显减小。

表 2 不同放大倍数下信号均方差对比

Table 2 Comparison of the mean square deviations for different gains

放大倍数	原始数据	去漂数据	滤波数据
19 900	9.309 7e-8	4.305 2e-8	5.35e-9
50 800	8.546 3e-8	2.595 3e-8	6.965e-9

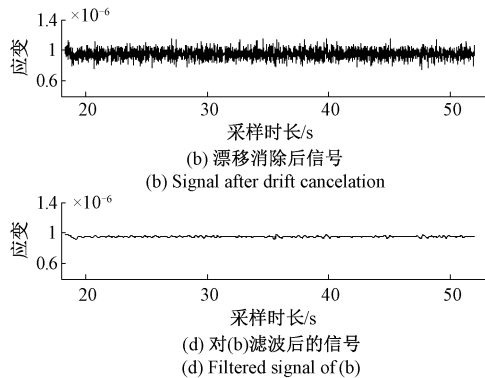


图 6 20 g 砝码载荷时不同放大倍数下滤波效果对比

Fig.6 Comparison of filtering results for different gains under 20 g weight loading

3.4 分辨力测试及分析

在放大倍数为 50 800 倍时,对加载 2 g 砝码时测得的原始信号首先进行直流漂移消除,得到的新数据再进行 BF 处理,经多次测量计算得到,处理采样时长约 43 s 的应变信号时,加载 2 g 砝码载荷时的应变变化平均值约为 $0.300 8 \times 10^{-6}$ 。图 7 所示为加载 2 g 砝码原始信号与信号经过漂移消除与降噪处理后的对比。

由图 7 可以观察到,本文提出的滤波方法适用于力信号的动态加载过程。通过对应变信号的漂移消除与降噪处理,力传感器的分辨力可达到 2 g 甚至以下。

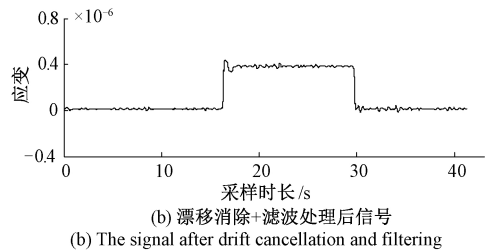
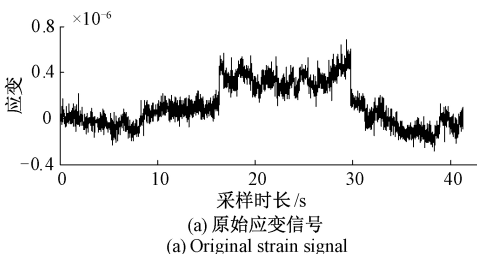


图 7 2 g 砝码载荷下原始信号与处理信号对比图
Fig.7 Comparison of the original signal and processed signal under 2 g weight loading



4 结 论

针对应变信号中存在的直流漂移,本文提出了一种改进的分段多项式拟合的漂移消除方法。该方法首先通过低通滤波滤除有用信号,再根据滤波后信号中低频部分的局部极值点进行分段,对各段曲线进行多项式拟合后得到信号漂移趋势,进一步消除漂移。对于应变信号中

存在的噪声,本文将BF应用于直流漂移消除后的应变信号的降噪处理中。最后将本文提出的直流漂移消除方法和降噪方法应用于具有高分辨力(分辨力优于2g)的微创手术机器人应变式力传感器应变信号的处理,实验结果表明,本文提出的直流漂移消除方法能够有效地去除信号中的直流漂移成分,利于提高采样信号的稳定性;BF方法能够有效抑制噪声,降噪效果较好。本文对应变信号的处理方法有效提高了采样信号的准确性与传感器的分辨率,为诸如应变信号类的微弱信号处理提供了一种新方案。

参考文献

- [1] 陈诚,李建青,戴亚文,等.动态应变采集系统的设计及误差测试[J].自动化与仪表,2019,34(2):43-46.
CHEN CH, LI J Q, DAI Y W, et al. Design and error test of dynamic strain acquisition system [J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(2): 43-46.
- [2] 殷铸灵.低频小信号放大电路的研究[D].北京:北京邮电大学,2012.
YIN ZH L. Research on low-frequency amplifier for small signal [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [3] 石苗,吴永仁,管德赛,等. 10^{-4} 级微弱脉冲信号放大电路设计研究[J].国外电子测量技术,2019,38(2):46-49.
SHI M, WU Y R, GUAN D S, et al. Design and research of 10^{-4} level weak pulse signal amplification circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(2): 46-49.
- [4] 谢锐,裴东兴,姚琴琴.高频信号动态测试中的信号完整性分析[J].仪器仪表学报,2017,38(3):773-779.
XIE R, PEI D X, YAO Q Q. Signal integrity in high-frequency signal dynamic test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 773-779.
- [5] TAN Y J, BAILEY S, KINSELLA B. The monitoring of the formation and destruction of corrosion inhibitor films using electrochemical noise analysis (ENA) [J]. Corrosion Science, 1996, 38(10): 1681-1695.
- [6] MANSFELD F, SUN Z, HSU C H, et al. Concerning trend removal in electrochemical noise measurements [J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 341-352.
- [7] BERTOCCI U, HUET F, NOGUEIRA R P, et al. Drift removal procedures in the analysis of electrochemical noise [J]. Corrosion Science, 2002, 58(4): 337-347.
- [8] 邱于兵,黄家恠,郭兴蓬.多项式拟合法消除电化学噪声的直流漂移[J].华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(10):39-42.
QIU Y B, HUANG J Y, GUO X P. Trend removal in the analysis of electrochemical noise by polynomial fitting [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(10): 39-42.
- [9] 黄家恠,邱于兵,郭兴蓬.电化学噪声直流漂移的分段多项式拟合消除[J].中国腐蚀与防护学报,2009,29(1):9-14.
HUANG J Y, QIU Y B, GUO X P. Trend removal in the analysis of electrochemical noise by polynomial fitting with window technique [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(1): 9-14.
- [10] HUANG J Y, QIU Y B, GUO X P. Comparison of polynomial fitting and wavelet transform to remove drift in electrochemical noise analysis [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2010, 45(4): 288-294.
- [11] 张涛,杨延格,邵亚薇,等.电化学噪声分析方法的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2014,34(1):1-18.
ZHANG T, YANG Y G, SHAO Y W, et al. Advances of the analysis methodology for electrochemical noise [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(1): 1-18.
- [12] KUMAR B K S. Image fusion based on pixel significance using cross bilateral filter Signal [J]. Image and Video Processing, 2015, 9(5): 1193-1204.
- [13] 刘峰,沈同圣,马新星.交叉双边滤波和视觉权重信息的图像融合[J].仪器仪表学报,2017,38(4):1005-1013.
LIU F, SHEN T SH, MA X X. Image fusion via cross bilateral filter and visual weight information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 1005-1013.
- [14] ZHANG M, GUNTURK B K. Multi-resolution bilateral filtering for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(12): 2324-2333.
- [15] WANG W, LI J M, WANG SH X, et al. System design and animal experiment study of a novel minimally invasive surgical robot [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2016, 12(1):

73-84.

- [16] 代煜,张建勋.基于小波变换和维纳滤波的半导体器件1/f噪声滤波[J].物理学报,2011,60(11):185-190.
DAI Y, ZHANG J X. Reduction of 1/f noise in semiconductor devices based on wavelet transform and Wiener filter[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 185-190.
- [17] 付宜利,潘博.微创外科手术机器人技术研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(1):1-15.
FU Y L, PAN B. Research progress of surgical robot for minimally invasive surgery [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 1-15.
- [18] 王金海,岳晨飞,韦然,等.基于EMD的动态脉搏数据处理研究[J].仪器仪表学报,2016,37(增刊):34-39.
WANG J H, YUE CH F, WEI R, et al. Research in dynamic pulse data processing based on EMD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(s1): 34-39.

作者简介



代煜(通信作者),分别于2002年、2004年、2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位,硕士学位和博士学位,现为南开大学副教授,主要研究方向为面向手术机器人的智能感知技术。

E-mail:daiyu@nankai.edu.cn

Dai Yu (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 2002, 2004 and 2009, respectively. Now, he is an associate professor in Nankai University. His main research interest includes intelligent perception technology for surgical robot.



孙会娇,2017年于河北工业大学获得学士学位,现为南开大学硕士研究生,主要研究方向为医疗机器人,信号处理。

E-mail:nksunhj@163.com

Sun Huijiao received her B. Sc. degree in 2017 from Hebei University of Technology. Now, she is a M. Sc. candidate in Nankai University. Her main research interest includes medical robot and signal processing.



张建勋,分别于1984年和1987年于天津大学获得学士学位和硕士学位,1994年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,现为南开大学教授,主要研究方向为医疗机器人技术、智能机器人控制。

E-mail:Zhangjx@nankai.edu.cn

Zhang Jianxun received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Tianjin University in 1984 and 1987, respectively, received Ph. D. degree in 1994 from Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Now, he is a professor in Nankai University. His main research interest includes medical robot and intelligent robot control.