arXiv:2303.02134v1 [cs.HC] 3 Mar 2023

EyeLink 1000 眼动追踪数据滤波：比较启发式、Savitzky-Golay、无限脉冲响应和有限脉冲响应数字滤波器

预印本

Mehedi H. Raju*
德克萨斯州立大学，601 University Drive，圣马科斯，得克萨斯州 78640，美国
m.raju@txstate.edu

Lee Friedman
德克萨斯州立大学，601 University Drive，圣马科斯，得克萨斯州 78640，美国
lfriedman10@gmail.com

Troy M. Bouman
机械工程与工程力学系，密歇根理工大学，美国密歇根州霍顿市 Townsend Dr. 1400号，邮编49931，
tmbouman@mtu.edu

Oleg V. Komogortsev德克萨斯州立大学，美国得克萨斯州圣马科斯市 University Drive 601号，邮编78640，ok11@txstate.edu

2023年3月6日

摘要

在此前的一份报告中， [Raju 等人， 2023] 我们得出结论：如果目标是在眼动追踪记录中保留扫视、微扫视和平滑追踪等事件，那么正弦波频率低于 100 赫兹（-3 dB）的数据属于信号，而高于 100 赫兹的数据属于噪声。我们比较了 5 种滤波器保留信号和去除噪声的能力。具体而言，我们比较了 EyeLink 1000（SR-Research，渥太华，加拿大）提供的专有 STD 和 EXTRA 启发式滤波器、Savitzky-Golay（SG）滤波器、无限脉冲响应（IIR）滤波器（低通巴特沃斯滤波器）以及有限脉冲响应（FIR）滤波器。对于每种非启发式滤波器，我们都系统地寻找了最优参数。IIR 和 FIR 滤波器均为零相位滤波器。文中提供了全部 5 种滤波器的均值频率响应曲线和振幅谱。此外，我们还考察了这些滤波器对一段含噪记录的影响。我们的 FIR 滤波器具有所有滤波器中最陡的滚降。因此，与其他滤波器相比，它能更有效地保留信号并去除噪声。基于此，我们建议使用我们的 FIR 滤波器。多份报告表明，滤波会增加信号的时间自相关。为探究这一点，我们还根据自相关（具体而言是前 3 个滞后）对这些滤波器进行了评估。在所有滤波器中，STD 滤波器引入的自相关最少。

关键词 眼动追踪 · 傅里叶变换 · 频率响应 · 滤波器

1 引言

根据 Raju 等人 [2023], 的研究，对于扫视、微扫视和平滑追踪的研究，100 赫兹以上的频率分量可视为噪声。这一结论基于多种分析：（1）对不同频率分量进行视觉分析；（2）分析各频带所解释的方差百分比；（3）详细研究低通滤波对扫视峰值速度的影响。根据这些分析结果，我们得出结论：由低于 100 赫兹的正弦波频率构成的信号，对于观察眼动事件和测量扫视峰值速度至关重要

*通讯作者

事件以及测量扫视的峰值速度。100 赫兹以上的正弦波频率可视为噪声（另见 Bahill 等人 [1981], Mack 等人 [2017]）。

1993年，Stampe [1993] 提出了两种用于视频眼动仪系统的“启发式”滤波器。一种标记为标准（STD），另一种标记为增强（EXTRA）。多家制造商[2] 多年来一直采用这些滤波器。在某个（未知）时间点，SR-Research 对这两种原始启发式滤波器都进行了修改。不过，修改日期和具体内容均属专有信息。

Mack 等人 [2017] 评估了移动平均（MA） [Kalman、 1960], Savitzky-Golay（SG） [Savitzky 和 Golay，以及低通巴特沃斯滤波器（BW）[Butterworth, 1930]滤波器。MA滤波器和SG滤波器均属于有限脉冲响应（FIR）类滤波器[Chauhan 等人，2018年，Chatterjee 和 Roy，2018年，Mack 等人， 2017]。他们比较了有限脉冲响应滤波器（MA和SG）与无限脉冲响应滤波器（Butterworth）在扫视运动[3]中的表现。这些作者指出，对于1000赫兹的数据，BW的表现优于所考察的各种MA或SG滤波器。基于他们的分析，我们决定进一步研究SG和Butterworth滤波器（无限脉冲响应类型）。此外，我们还评估了一种Mack 等人未曾评估过的标准有限脉冲响应低通滤波器 [2017][4]。
本研究的主要目标是确定最有效的滤波方法，以保留100赫兹以下的眼动信号，并消除被视为噪声的100赫兹以上频率分量。我们根据启发式滤波器和数字滤波器保留信号及消除噪声的能力，比较二者的有效性。核心分析是比较所有滤波器的频率响应曲线。此外，由于已有充分证据表明，滤波通常会增加时间自相关 [Roy等人， 1997][5]，我们还比较了采用所有类型滤波器处理后的信号的自相关函数。

2 方法

2.1 受试者

共招募了23名受试者（男性17名，女性6名），年龄中位数为28岁（范围：20至69岁）。大多数（N=14）参与者视力正常，另有9名受试者需要视力矫正。参与者来自实验室工作人员、正在修读计算机编程课程的本科生以及实验人员的朋友。本研究经得克萨斯州立大学机构审查委员会批准，所有参与者均提供了知情同意。

我们报告了两个数据集，第一个数据集标记为“Fixation”数据集。该数据集最初包含15名受试者的数据。然而，由于眨眼和其他技术问题，最终仅分析了9名受试者的数据。第二个数据集（“RS”）包含受试者完成随机扫视任务时的数据。RS 数据集由9名受试者组成。

2.2 数据收集

在数据收集过程中，参与者被安排在距离一块19英寸（48.26厘米）的电脑屏幕550毫米处（474×297毫米，分辨率为 1680×1050 像素），并在屏幕上呈现视觉刺激。数据通过安装在支架上的 EyeLink 1000眼动追踪器（由位于加拿大安大略省渥太华的 SR Research 提供）采集，并以单眼模式运行，以记录优势眼的运动。参与者的优势眼通过 Miles 方法 [Miles， 1930]确定。采样率为1000赫兹。对于每位受试者，共记录了三种注视数据：（1）未滤波；（2）STD滤波；（3）EXTRA滤波。
在注视任务中，参与者观看一个直径为 0.93^o 的白色圆圈作为视觉刺激。圆圈位于第一眼位上方3.5^o 处，处于屏幕水平中央。参与者被要求将视线保持在静止的点上30秒。

在随机扫视任务中，参与者被要求注视同一个在显示器上随机移动的目标，其在水平方向和垂直方向的视角范围分别为 $\pm 15^o$ 和 $\pm 9^o$ 。相邻目标位移之间的最小幅度为 2^o 视角。每次记录时，目标位置都会随机设定，以确保目标均匀覆盖整个显示区域。目标跳动之间的延迟变化范围为

[2]SR-Research（加拿大渥太华）、Tobii（瑞典斯德哥尔摩）以及SMI的XVIEW系统。[3]值得注意的是，Mack 等人 [2017] 在合成扫视上测试了所有滤波器。[4]Das等人 [1996] 评估了中值滤波器与移动平均滤波器组合使用对降低平滑追踪中的前庭性眼球运动速度噪声的效果。[5]另请参阅Friedman等人的研究：https://digital.library.txstate.edu/handle/10877/15303, ActualArXivSubmission.pdf

1 秒至 1.5 秒，并从均匀分布中随机选取。随机扫视任务持续 30 秒[6]。

2.3 注视数据的信号处理

所有注视记录均持续 30 秒（30,000 个样本）。我们使用这些注视时段生成振幅谱，并确定下文讨论的若干滤波器的频率响应。片段选择分为两个步骤。第一步，我们使用六点差分法计算速度 $velocity = (x_{t+3} - x_{t-3})/dt$[Bahill 等人， 1982]。随后，我们筛查每位受试者的记录，找出其中速度均未超过 25 度/秒的 2048 个样本长度片段的最大数量。为降低片段中出现扫视或其他快速事件的可能性，我们舍弃了包含速度超过 25 度/秒的片段。16 名受试者中有 4 名，我们找不到任何符合条件的 2048 个样本片段。其余受试者则各有 1 至 4 个片段。我们使用这些 2048 个样本的片段进行傅里叶分析。使用快速傅里叶变换（FFT）时，采样率与片段大小（即区块大小）的比值决定频率分辨率。对于 2048 个样本的片段，我们可以区分从 0 到 500 赫兹之间的 1024 个不同频率。由于这些分析的噪声相当大，我们决定将 2048 个样本的片段拆分为 8 个各含 256 个样本的片段。这样仍可获得约 4 赫兹的合理频率精度，同时也能增加用于求平均的片段数量（我们有 27 个 2048 个样本的片段，这些片段生成了 216 个各含 256 个样本的片段，可据此求平均）。请注意，我们求平均时使用的是幅度谱，而非复数 FFT 数据。

2.4 数字滤波器设计

表1：数字滤波器规格

滤波器名称	滤波器特性
Savitzky-Golay（SG）	窗口长度=11，多项式阶数=2
无限脉冲响应（IIR）	巴特沃斯型，阶数=7 截止频率（-3dB） = 100，零相位
有限脉冲响应（FIR）	系数数量、抽头数 = 80 截止频率（-3dB） = 100，零相位

由于我们希望保留 100 赫兹以下的频率分量并去除高于此频率的噪声，因此选择了 100 赫兹作为截止频率。当我们提到“截止”频率时，指的是 -3dB（dB = 分贝）点，这在信号处理文献中是标准定义。在 -3dB 点，信号会降低 50%。

在为 SG滤波器选择最终的参数组合（阶数和窗口长度）之前，我们考察了阶数为 2 至 9、窗口长度为 5 至 91（仅取奇数）的 SG滤波器的频率响应。为了实现 SG滤波器，我们使用了 SciPy[Virtanen 等人， 2020]中的 Python 内置函数。我们寻找的是 -3dB 点接近 100 赫兹的滤波器。我们发现有 4 组参数符合这一标准。这 4 组参数产生的频率响应都很相似，因此我们选择了阶数和窗口大小最低的一组参数（阶数为 2，窗口大小为 11）。通常认为，SG滤波器在阻带中会产生明显的振铃 [Kennedy， 2020] （见图 1）。在测试各种潜在参数设置时，我们注意到，较高的阶数会产生更少且更宽的振铃旁瓣；增大窗口大小则会产生更多、更小（以分贝计）且更窄的振铃旁瓣。

对于我们的无限脉冲响应滤波器，我们选择了一个阶数为 = 7、截止频率为 100 赫兹的巴特沃斯低通滤波器。我们选择 7 阶，是因为它的滚降陡峭，而且看起来很稳定。我们使用单位圆测试 [7] 正式检查了该无限脉冲响应滤波器的稳定性。

有限脉冲响应滤波器始终稳定。对于我们的 FIR滤波器，我们选择了 80 个抽头。我们根据 Bellanger [提出的以下公式确定了抽头数（N_{taps}） 2000]。

$N_{taps} \approx \frac{2}{3} \cdot log_{10} \cdot [\frac{1}{10(\delta_1 \delta_2)}] \cdot \frac{fs}{\Delta f}$

这里， N_{taps} =抽头数（滤波器阶数）

δ_1 = 通带纹波δ_2 = 阻带抑制fs =采样率

Δf = 过渡带宽。

[6]关于受试者和数据收集流程的更多详情，请参见 Raju 等人 [2023]。[7]此测试使用 MATLAB 函数 isstable。

对于 IIR 滤波器，我们使用了 Butterworth（BW）低通滤波器。BW 滤波器在通带内具有最大平坦响应，在阻带内没有纹波。此外，与有限脉冲响应滤波器相比，BW 滤波器不具有任何线性相位响应 [Mack 等人， 2017]。Mack 等人接着说道：

> “从最佳滤波器列表中可以观察到一个普遍现象：采样率越高，巴特沃斯滤波器越常见；到了 1 千赫，其他类型的滤波器便完全消失了。这可以通过考察信号的平滑度来解释。采样率越高，数据中的噪声就越多。与两种 FIR 滤波器相比，巴特沃斯滤波器的滚降更陡，因此能够更有效地抑制这类高频噪声，使信号更加平滑..... ”[Mack 等人， 2017], 第 2159 页。

通常，低通数字滤波器会产生相位和延迟效应。我们的 FIR 和 IIR 滤波器都是零相位、零延迟的。零相位滤波器可以通过以下方式构造：先让信号沿正向通过滤波器，再将滤波后的序列反转，并再次通过滤波器。此过程会使滤波器的阶数加倍，并消除相位和延迟效应。

表1列出了我们使用的滤波器及其特性。

2.5 滤波器频率响应的估算

我们希望估算这五种滤波器各自的频率响应。对于设计的有限脉冲响应和无限脉冲响应滤波器，可以直接根据滤波器系数计算频率响应。由于采用了零相位设计，我们将滤波器阶数加倍后，直接获得频率响应。

对于所有滤波器，我们先对未滤波数据进行 FFT。将此 FFT 记为“A”。我们还计算了每个滤波后的数据集的 FFT，并将滤波后信号的 FFT 记为“B”。我们通过比值法计算滤波器的频率响应 C， $C = \frac{B}{A}$。

2.6 滤波前后注视的傅里叶分析

为了进一步研究滤波器的影响，我们使用这五种滤波器对注视数据进行了滤波。随后，我们使用 FFT 计算了所有这些滤波后（及未滤波）信号的振幅谱[库利和图基， 1965]。这些振幅谱显示了滤波器如何影响滤波后保留的信号振幅。

如前所述，输入的注视数据由 216 个数据块组成，每个数据块长 256 个样本。首先，使用一个 2^{nd} 阶多项式对每个片段进行去趋势处理。这些多项式的残差均值为零。随后，对每个注视片段应用汉宁窗。接着，我们对每个去趋势并加窗后的注视片段进行 FFT。所得频谱的频率分辨率为 ≈ 4 (3.90625) 赫兹。采样率为 1000赫兹时，只能计算 0 至 500 赫兹范围内的频谱 [香农， 1949]。频率分辨率为 3.90625 赫兹时，所得频谱长度为 128 个点。我们对全部 216 个注视片段的振幅谱取平均，由此得到相对平滑的振幅谱。

2.7 滤波对时间自相关的影响研究

众所周知，低通滤波会增加时间自相关 [Roy等人， 1997]（另见脚注 4）。我们认为，考察滤波方案对时间自相关的影响会很有帮助。对于每个注视片段，我们计算了最多 5 个滞后的自相关函数（ACF）。对于每组滤波后的自相关值，我们绘制其中位数。由于皮尔逊 r 相关系数并非处于线性尺度，在进行统计检验之前，我们使用 Fisher-Z 变换对所有 ACF 估计值进行了转换。针对前 3 个滞后，我们检验了未滤波数据与滤波后数据的自相关估计值之间差异的统计显著性。我们采用了弗里德曼检验。对于统计显著的弗里德曼检验，我们进一步进行了多重比较，以比较所有滤波级别。为控制多重比较，我们采用了图基 HSD 检验。

2.8 滤波对位置讯号和速度影响的研究

为了展示我们的滤波器对实际位置轨迹的影响，我们研究了三种滤波器（SG、IIR、FIR）对一段包含扫视的未滤波示例片段的影响。在“RS”数据集中，我们从 9 名受试者中选出了记录噪声最多的一位。之所以展示此例的瞬时速度（$velocity = \frac{x_t - x_{t-1}}{dt}$），是因为速度计算中它的噪声最大。

3 结果

3.1 滤波器频率响应分析

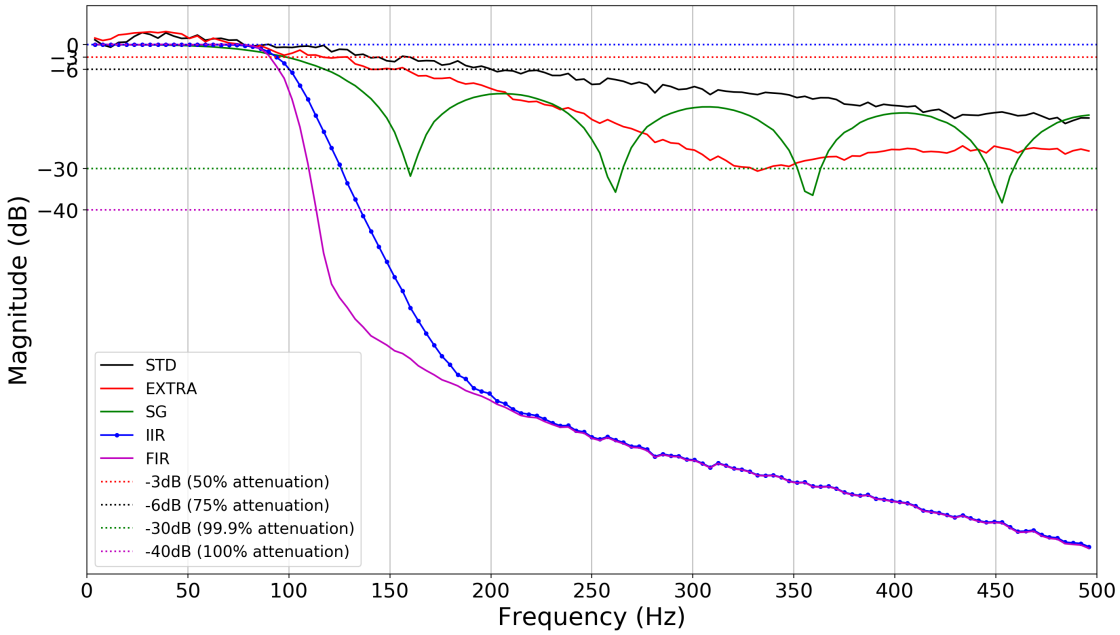


图 1：所有滤波器（EyeLink 启发式滤波器和数字滤波器）的频率响应。在 -3 dB 时，信号减少 50%；在 -6 dB 时，信号减少 75%；以此类推，如图例所述。

图 1 展示了 STD、EXTRA、SG、IIR 和 FIR 滤波器的频率响应。图中的 Y 轴单位为分贝（dB，参考值为 = 1）。黑线表示 STD 滤波器的频率响应。红线表示 EXTRA 滤波器的频率响应。绿线表示 SG 滤波器的频率响应。蓝线和洋红线分别表示 IIR 和 FIR 滤波器的频率响应。可以看出，所有滤波器都能很好地保留信号（低于 100 赫兹的频率）。然而，各滤波器去除噪声相关频率的程度有很大差异。显然，FIR 和 IIR 滤波器的滚降比其他滤波器陡峭得多。只有 IIR 和 FIR 滤波器能达到 -30 分贝（剩余信号振幅为 0.1%）。IIR 在 127 赫兹处达到这一水平，FIR 则在 110 赫兹处达到。SG 滤波器在 158 赫兹处达到这一水平，EXTRA 滤波器则在 332 赫兹处达到。STD 滤波器始终未达到这一衰减水平。

显然，数字滤波器在降低高频的同时，不会影响低频，效果好得多。与数字滤波器相比，启发式滤波器去除高频信号的速度要慢得多。STD滤波器在 500 赫兹处剩余噪声的最大振幅为 -18 dB（剩余信号的 1.58%）；而 EXTRA滤波器为 -25 dB（剩余信号的 0.32%）。对于 IIR滤波器，在 135 赫兹处，信号有效地降至 0^o 振幅（-40 dB）；对于 FIR滤波器，则在 114 赫兹处降至该振幅。FIR滤波器的频率响应比其他所有滤波器都更陡。

3.2 未滤波信号与滤波信号的傅里叶分析

图 2 展示了全部 5 种信号类型的平均振幅谱。所有信号在极低频率（1–30 赫兹）下的振幅都高得多。所有经过滤波的信号在 100 赫兹以上的振幅都较低。未滤波信号的振幅在约 150 赫兹时达到最低点，随后随着频率接近 500 赫兹，噪声频率的振幅实际上有所增加。经过 STD 滤波器处理的信号，其振幅从约 50 赫兹到 500 赫兹逐渐下降。与 STD 滤波器相比，EXTRA 滤波后的信号去除了更多噪声频率。SG 滤波器在阻带中出现明显的振铃。经过 IIR 滤波器处理的信号，其振幅在约 75 至 150 赫兹之间急剧下降，并在 150 赫兹以上基本保持为 0.000。经过 FIR 滤波器处理的信号，其振幅在约 75 至 120 赫兹之间急剧下降，并在 125 赫兹以上基本保持为 0.0。

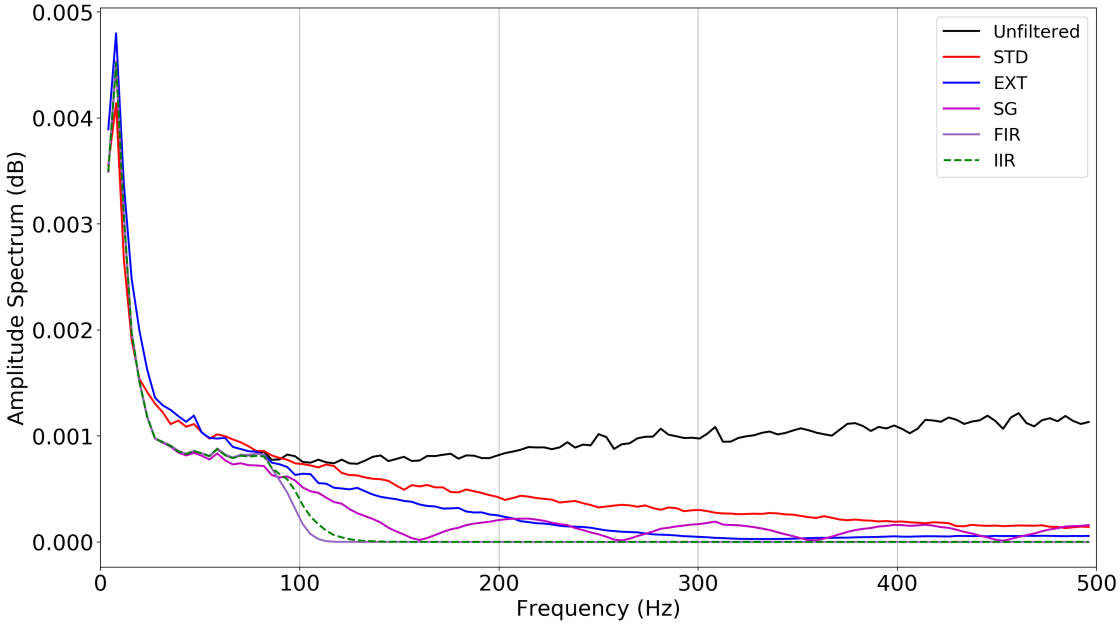


图2：未滤波信号及本报告中评估的所有滤波器的振幅谱。片段的选择如上所述。

3.3 滤波对时间自相关的影响

图 3 绘出了未滤波信号和滤波后信号前 5 个滞后的中位数自相关函数。在未滤波条件下，滞后 1 的时间自相关中位数为 ≈ 0.579；总计 216 个片段中，有 178 个在 $p < 0.05$ 水平上具有统计显著性。尽管未滤波数据显示出中等程度的时间自相关，但显然滤波器确实会引入更强的时间自相关。对全部 216 次注视在全部 5 个水平下进行滤波后，所有 216 个片段的滞后 1 时间自相关均在 $p < 0.0001$ 水平上具有统计显著性。

在图4中，我们展示了Fisher-Z变换值的箱线图。在（A）中，我们展示滞后1的结果，（B）为滞后2的结果，（C）为滞后3的结果。弗里德曼检验的P值均具有统计显著性（$p < 0.0001$）（见表2）。所有可能比较的结果均列于表2中。不具有统计显著性的比较以黄色突出显示。显然，几乎每一项比较都具有统计显著性。对于滞后1和2，额外和SG之间的差异不具有统计显著性。对于滞后1和3，额外和IIR之间的差异不具有统计显著性。对于滞后2，仅SG和IIR之间的差异不具有统计显著性。

3.4 滤波对位置讯号和速度影响的示例

在图 5 中，我们展示了三种滤波方案（SG、无限脉冲响应、有限脉冲响应）对随机扫视测试中一段噪声特别大的未滤波片段所产生的影响。由于启发式标准和 EXTRA 滤波器的功能属于专有技术，我们没有办法在本分析中使用它们。图 (A) 显示滤波器对原始信号的影响。图 (B) 表示 (A) 中未滤波位置通道的瞬时速度。图 (C) 显示这三种滤波器对 (A) 中已滤波信号的瞬时速度所产生的影响。无限脉冲响应和有限脉冲响应滤波器在降低噪声方面远比 SG 滤波器有效。有限脉冲响应与无限脉冲响应之间的差异非常细微。

4 讨论

在我们此前的论文中，[Raju 等人，2023] 我们确定，低于 100 赫兹的正弦波构成信号，而高于 100 赫兹的正弦波构成噪声。在本文中，我们比较了应用于由 EyeLink 1000 眼动追踪设备记录的眼动注视信号的 5 种滤波器的频率响应。我们得出结论：如果滤波的目标是保留信号并去除噪声，那么我们的 FIR 滤波器是最佳选择。这一点从各种滤波后信号的频率响应和振幅谱中显而易见。一段包含扫视且噪声特别大的记录的目视检查结果也支持这一结论。绝大多数（82%）未滤波信号都表现出具有统计显著性的时间自相关，但所有

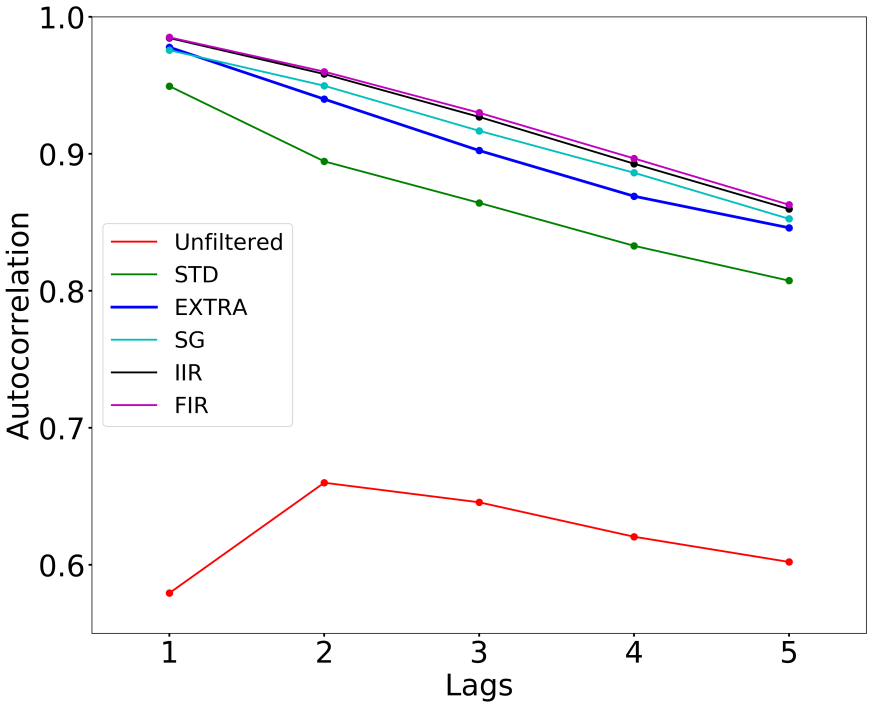


图 3：滤波对未滤波和滤波注视片段的时间自相关中位数的影响。

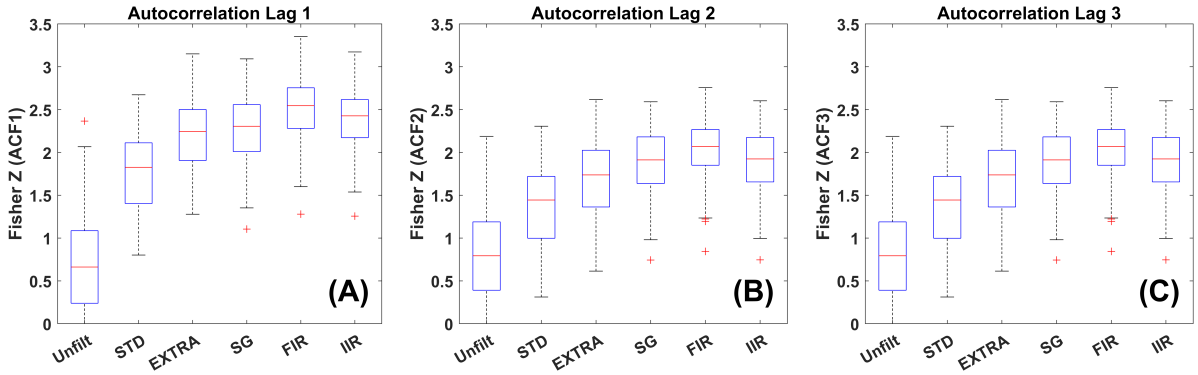


图 4：自相关结果分析。图中数值为原始自相关经费舍尔 Z 变换后的值。三个箱线图比较了所有滤波器。（A）箱线图表示自相关函数滞后 1。（B）箱线图表示自相关函数滞后 2。（C）箱线图表示自相关函数滞后 3。

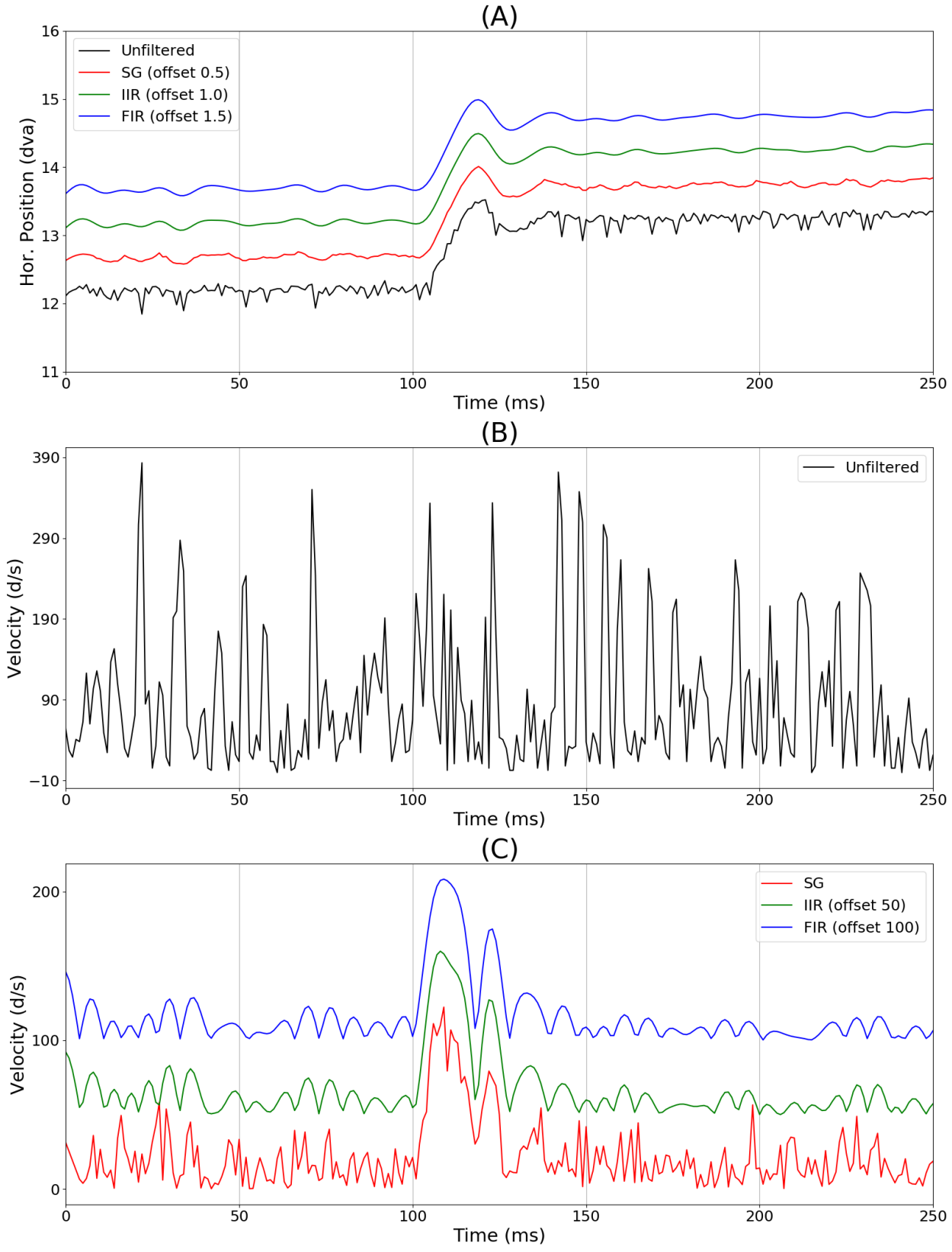


图5：滤波对位置信号和瞬时速度影响的示意图。我们选取了随机扫视任务记录中一段噪声非常大的片段。（A）水平位置信号，包括一次幅度为 ≈ 1.25视角度数（dva）的扫视；分别展示了噪声非常大的未滤波记录，以及同一记录经滤波后的位置信号。为便于观察，每个滤波版本均设置了偏移。（B）未滤波数据的速度（瞬时）通道。（C）滤波后数据的速度（瞬时）通道。无限脉冲响应速度通道偏移了每8秒50视角度数（d/s），有限脉冲响应速度通道偏移了100 d/s。

Tab表 2：检验滤波对时间自相关的影响：多重比较统计量 *

1st 滤波器	2nd 滤波器	自相关函数 1		自相关函数 2		自相关函数 3	
		$\tilde{\chi}^2 = 764.51^{\dagger}$		$\tilde{\chi}^2 = 706.7^{\dagger}$		$\tilde{\chi}^2 = 642.63^{\dagger}$	
		差异	P值	差异	P值	差异	P值
未滤波	STD	-1.407	0.0000	-1.222	0.0000	-1.3704	0.0000
未滤波	额外	-2.843	0.0000	-2.398	0.0000	-2.1806	0.0000
未滤波	SG	-2.722	0.0000	-2.829	0.0000	-2.9815	0.0000
未滤波	FIR	-4.537	0.0000	-4.380	0.0000	-4.25	0.0000
未滤波	IIR	-3.296	0.0000	-2.921	0.0000	-2.4676	0.0000
STD	额外	-1.435	0.0000	-1.176	0.0000	-0.81019	0.0001
STD	SG	-1.315	0.0000	-1.607	0.0000	-1.6111	0.0000
STD	FIR	-3.130	0.0000	-3.157	0.0000	-2.8796	0.0000
STD	IIR	-1.889	0.0000	-1.699	0.0000	-1.0972	0.0000
额外	SG	0.120	0.9853	-0.431	0.1590	-0.80093	0.0001
额外	FIR	-1.694	0.0000	-1.982	0.0000	-2.0694	0.0000
额外	IIR	-0.454	0.1181	-0.523	0.0426	-0.28704	0.6022
SG	FIR	-1.815	0.0000	-1.551	0.0000	-1.2685	0.0000
SG	IIR	-0.574	0.0179	-0.093	0.9956	0.51389	0.0493
FIR	IIR	1.241	0.0000	1.458	0.0000	1.7824	0.0000

* 高亮值在统计学上不显著。† 所有情况下 df=5, $p < 0.0001$。

我们的滤波器显著 增加时间自相关。如果选择滤波器是为了尽可能减少 t
额外的时间自 相关，那么启发式标准差滤波器是最佳选择。
当然，有些人可能不同意我们以 100 Hz 截止频率来区分信号和噪声的做法。尽管启发式滤波器没有输入参数，但信号发生器、有限脉冲响应和 IIR 滤波器都可以设计成具有任何合理的截止频率。

尽管FIR滤波器效果最好，但IIR滤波器（低通、 7th 阶Butterworth）表现也非常出色。启发式滤波器确实倾向于削弱100赫兹以上的信号，但这些滤波器的滚降非常缓慢且平缓。SG滤波器并不可取，因为它的滚降相对缓慢、平缓，而且阻带中的振铃很大。

Stampe [1993] 提倡使用启发式滤波器，而非其他线性滤波器。他认为数字低通滤波器会对眼跳检测产生负面影响，但没有提供任何证据来支持这一说法。我们认为，我们提出的数字滤波器能够改善事件检测，因为它可以保留扫视的形状并减少噪声。例如，我们认为，与未滤波数据相比，图5中的滤波后数据会让事件检测容易得多。不过，这仍是一个有待实证检验的问题。

我们研究了滤波对时间自相关的影响。如上所述，未滤波信号通常存在时间自相关。滞后1阶自相关（自相关函数）为 ≈ 0.58。STD滤波器的滞后1阶自相关为 ≈ 0.95，其余所有滤波器的滞后1阶自相关均为 ≈ 0.97。我们的滤波器导致时间自相关显著增加，这并不令人意外 [Roy等人， 1997] （另见上文脚注4）。我们认为，时间自相关的存在并不可取。不同的眼动追踪器可能会产生较低的时间自相关，但这一点尚未得到研究。虽然有些时间序列模型（ARIMA类模型）能够显著降低或消除时间自相关，但根据一些初步研究，这类模型所生成的非自相关信号极不可能对研究眼动的人有用。因此，至少目前，眼动研究者不得不接受时间自相关的存在。

我们建议 EyeLink 用户以 1000赫兹采集未滤波的数据。此外，我们建议 EyeLink 1000 用户使用我们的 FIR滤波器对数据进行低通滤波。这样既能保留所需的信号，也能去除噪声。
未来，使用其他常见的眼动追踪设备开展同类型研究，或许会很有意义。不同系统可能会使我们的分析得出不同结果。目前，我们的结果仅适用于 EyeLink 1000 眼动仪。

致谢

本研究由美国国家科学基金会资助，资助编号为 1714623（项目负责人：Oleg Komogortsev）。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。资助方未参与本研究的设计、数据收集、分析或解释、手稿撰写，也未参与是否发表研究结果的决策。

参考文献

Mehedi H. Raju、Lee Friedman、Troy M. Bouman 和 Oleg V. Komogortsev。确定眼动追踪时间序列中哪些正弦波频率对应信号，哪些对应噪声。*arXiv* 预印本，2023年1月。doi:10.48550/ARXIV.2302.00029。URL https://arxiv.org/abs/2302.00029。AT Bahill、A Brockenbrough 和 BT Troost。扫视眼动常模数据库的变异性与发展。《*Investigative Ophthalmology & Visual Science*》，21(1):116–125，1981年。David J Mack、Sandro Belfanti 和 Urs Schwarz。采样率与低通滤波器对扫视的影响——一种建模方法。《*Behavior Research Methods*》，49(6):2146–2162，2017年。Dave M Stampe。基于视频的瞳孔追踪系统的启发式滤波与可靠校准方法。《*Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*》，25(2):137–142，1993年。R. E. Kalman。一种线性滤波与预测问题的新方法。《*Journal of Basic Engineering*》，82(1):35–45，1960年3月。ISSN 0021-9223。doi:10.1115/1.3662552。URL https://doi.org/10.1115/1.3662552。Abraham Savitzky 和 Marcel JE Golay。通过简化的最小二乘法对数据进行平滑与微分。《*Analytical chemistry*》，36(8):1627–1639，1964年。Stephen Butterworth。论滤波放大器理论。《*Wireless Engineer*》，7(6):536–541，1930年。Mayur Chauhan、Pratik Thorwe、Monodeep J. Mukherjee 和 Y. Srinivas Rao。使用移动平均滤波器和256点FFT进行无线传感器网络的传感器数据分析。载于*2018*年第*9*届计算、通信与网络技术国际会议（*ICCCNT*），第1–7页，2018年。doi:10.1109/ICCCNT.2018.8493974。Ayan Chatterjee 和 Uttam Kumar Roy。采用巴特沃斯无限脉冲响应滤波器和Savitzky-Golay有限脉冲响应滤波器改进基于光电容积脉搏波的心率算法。载于*2018*年第*2*届电子、材料工程与纳米技术国际会议（*IEMENTech*），第1–6页，2018年。doi:10.1109/IEMENTECH.2018.8465225。Vallabh E Das、Cecil W Thomas、Ari Z Zivotofsky 和 R John Leigh。运动过程中眼动的测量：使用基于视频的眼动监测仪获取速度信号的滤波技术。《*Journal of Vestibular Research*》，6(6):455–461，1996年。André G Roy、Pascale M Biron 和 Michel F Lapointe。低通滤波对湍流速度信号功率谱和自相关函数的影响。《*Mathematical Geology*》，29(5):653–668，1997年。Walter R. Miles。成年人的眼优势。《*The Journal of General Psychology*》，3(3):412–430，1930年。doi:10.1080/00221309.1930.9918218。URL https://doi.org/10.1080/00221309.1930.9918218。A Terry Bahill、Jeffrey S Kallman 和 Jon E Lieberman。两点中心差分微分算法的频率限制。《*Biological cybernetics*》，45(1):1–4，1982年。Pauli Virtanen、Ralf Gommers、Travis E. Oliphant、Matt Haberland、Tyler Reddy、David Cournapeau、Evgeni Burovski、Pearu Peterson、Warren Weckesser、Jonathan Bright、Stéfan J. van der Walt、Matthew Brett、Joshua Wilson、K. Jarrod Millman、Nikolay Mayorov、Andrew R. J. Nelson、Eric Jones、Robert Kern、Eric Larson、C J Carey、Ilhan Polat、Yu Feng、Eric W. Moore、Jake VanderPlas、Denis Laxalde、Josef Perktold、Robert Cimrman、Ian Henriksen、E. A. Quintero、Charles R. Harris、Anne M. Archibald、Antônio H. Ribeiro、Fabian Pedregosa、Paul van Mulbregt 和 SciPy 1.0贡献者。SciPy 1.0：Python科学计算的基础算法。《*Nature Methods*》，17:261–272，2020年。doi:10.1038/s41592-019-0686-2。Hugh L Kennedy。通过有色噪声模型改善Savitzky-Golay滤波器的频率响应。《*Digital Signal Processing*》，102:102743，2020年。Maurice Bellanger。《信号的数字处理：理论与实践》。John Wiley & Sons，2000年。James W Cooley 和 John W Tukey。复傅里叶级数机器计算的一种算法。《*Mathematics of computation*》，19(90):297–301，1965年。C.E. Shannon。有噪声环境下的通信。《*Proceedings of the IRE*》，37(1):10–21，1949年1月。doi:10.1109/jrproc.1949.232969。URL https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969。