

Поиск зависимостей в биомеханических системах

Зыков Тимур Алексеевич

Московский физико-технический институт

Курс: Автоматизация научных исследований/
Инн. прак. (научный трек)

Эксперт: д.ф.-м.н. В. В. Стрижов

Консультант: Д. Д. Дорин

Весна 2024

Предварительные сведения

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) — это метод нейровизуализации, который измеряет активность мозга путем выявления изменений, связанных с кровотоком. Существует несколько ограничений. Временное и пространственное разрешение — время измерений фМРТ происходит с задержкой, что затрудняет регистрацию быстрых нейронных событий. Шум — сигналы фМРТ могут быть слабыми по сравнению с фоновым шумом, что может повлиять на точность результатов.

Цель исследования

Требуется предложить метод прогнозирования показаний фМРТ по прослушиваемому звуковому ряду. Провести анализ решения. Для анализа предложенного метода проводится вычислительный эксперимент на выборке, полученной при томографическом обследовании большого числа испытуемых.

Постановка задачи

Обозначим частоту снимков фМРТ $\mu \in \mathbb{R}$. Задана последовательность снимков

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{\mu t}], \quad \mathbf{s}_\ell \in \mathbb{R}^{X \times Y \times Z}, \quad (1)$$

где X, Y и Z — размерности воксельного изображения.

Задана частота дискретизации $\nu \in \mathbb{R}$, количество каналов $k \in \mathbb{N}$ и продолжительность $t \in \mathbb{R}$ аудиоряда. Задан непрерывный по времени сигнал

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{\nu t}], \quad \mathbf{p}_\ell = \begin{pmatrix} p_\ell^1 \\ p_\ell^2 \\ \vdots \\ p_\ell^k \end{pmatrix}, \quad p_\ell^k \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

Постановка задачи

Задача состоит в построении отображения, которое бы учитывало задержку Δt между снимком фМРТ и аудиорядом. Формально, найти такое отображение \mathbf{f} , что

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{k_\ell - \nu \Delta t}; \mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{\ell-1}) = \mathbf{s}_\ell, \quad \ell = 1, \dots, \mu t, \quad (3)$$

где для ℓ -го снимка фМРТ номер соответствующего сигнала k_ℓ определяется по формуле

$$k_\ell = t\nu = \frac{\ell}{\mu}\nu. \quad (4)$$

Baseline модель

Будем восстанавливать функцию \mathbf{f} , в предположении марковского свойства. Эмбеддингами аудиоряда будут мел-кепстральные коэффициенты.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k_\ell - \nu \Delta t - g}, \dots, \mathbf{x}_{k_\ell - \nu \Delta t}) = \mathbf{s}_\ell - \mathbf{s}_{\ell-1} = \boldsymbol{\delta}_\ell \quad \ell = 2, \dots, \mu t, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\delta}_\ell = [s_{ijk}^\ell - s_{ijk}^{\ell-1}] = [\delta_{ijk}^\ell] \in \mathbb{R}^{X \times Y \times Z}$ — разность между двумя последовательными снимками.

Для каждого экземпляра сигнала имеем вектор размерности \mathbf{d} :

$$\mathbf{x}_\ell = [x_1^\ell, \dots, x_d^\ell]^\top \in \mathbb{R}^d, \quad \ell = 1, \dots, \frac{\nu t}{h}.$$

Учитывая (4), суммарное число пар (сигнал, снимок) равно $N = \mu(t - \Delta t)$. Таким образом, для каждого voxеля задана выборка

$$\mathfrak{D}_{ijk} = \{(\mathbf{x}_\ell, \delta_{ijk}^\ell) \mid \ell = 2, \dots, N\}.$$

Baseline модель

Рассмотрим каждый воксель независимо $Y_{ijk} \in \mathbb{R}^N$ - воксели, $X \in \mathbb{R}^{N \times d}$. Предполагаемая зависимость

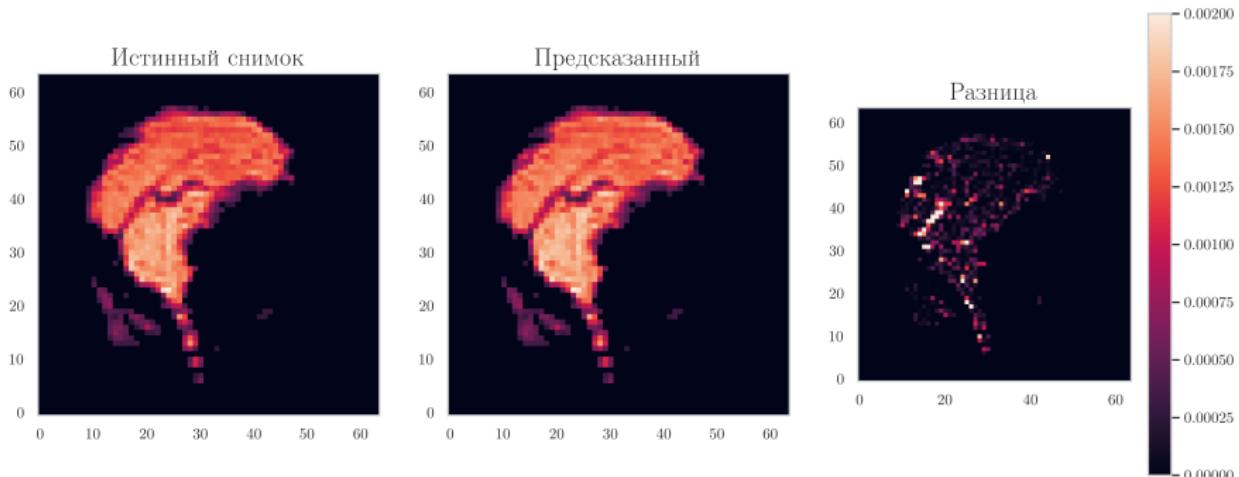
$$Y_{ijk} = X\theta + \varepsilon, \quad (6)$$

где $\theta \in \mathbb{R}^d$ - коэффициенты модели, $\varepsilon \sim N(0, \Sigma)$ - шум. Требуется найти параметры $\hat{\theta}$, при которых достигается максимум функции правдоподобия при заданных гиперпараметрах Δt и d , где d – размерность MFCC:

$$L_X(\theta) = \prod_{i=1}^N p(Y_i) \longrightarrow \max_{\theta} \quad (7)$$

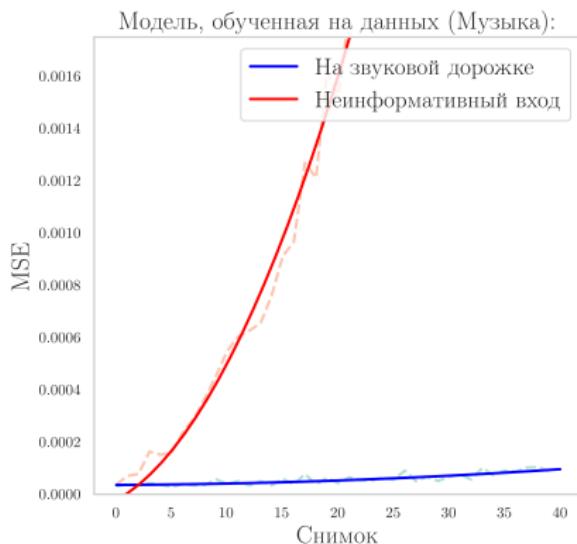
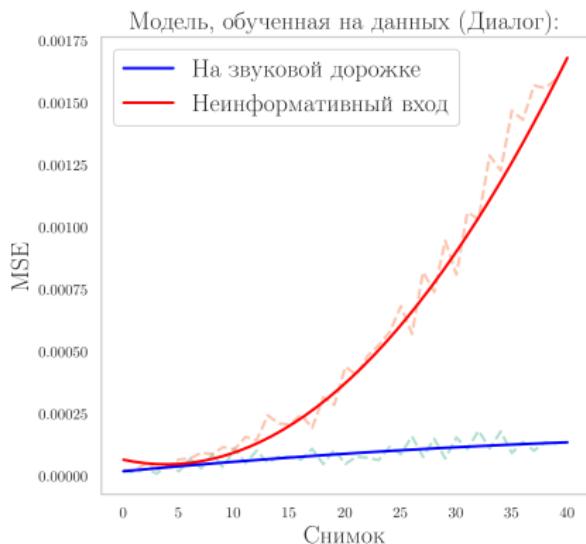
Пример работы алгоритма

Значения вокселей нормированы на отрезок $[0; 1]$. Ниже приведен пример работы алгоритма на снимках седьмого испытуемого. Все срезы по 20-й координате.



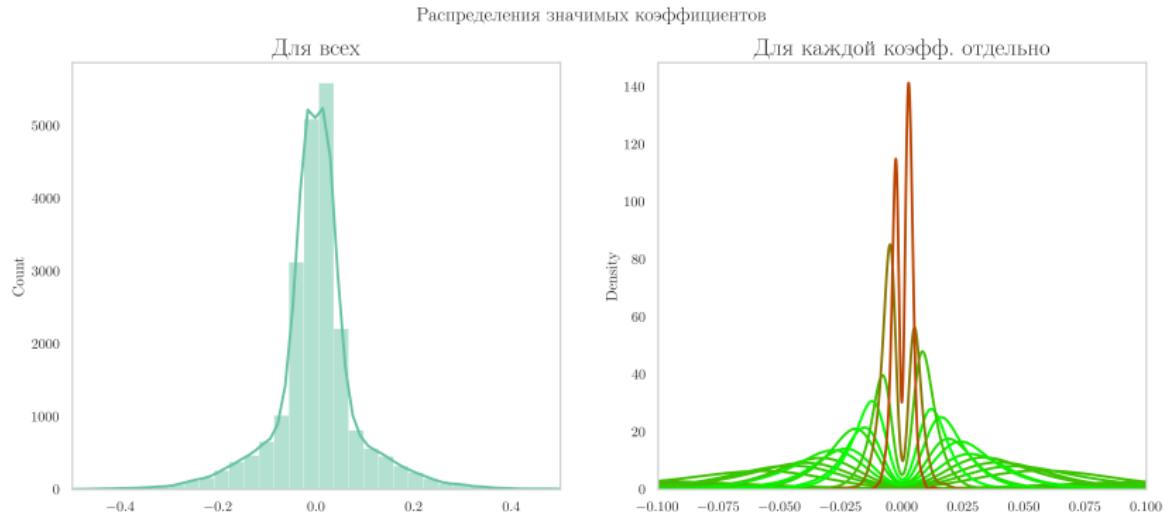
Анализ решения

Соседние снимки фМРТ отличаются на малую величину.
Сравним аналогичное решение с неинформативным входом
(случайная матрица) и алгоритм по метрике MSE.
Используется рекурсивный способ предсказания.



Анализ решения

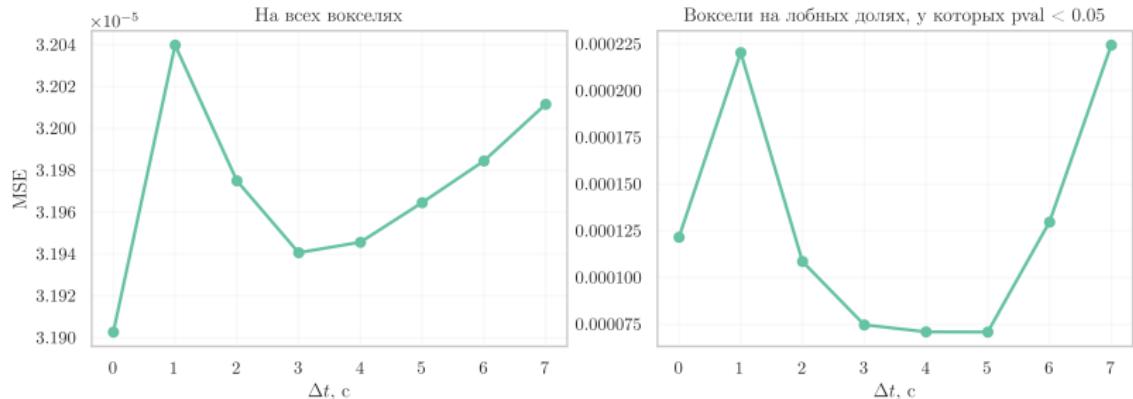
Распределения значимых коэффиц. модели, которая предсказывает по звуковой дорожке с музыкой.



Анализ решения

Выделим воксели, на которые звуковой ряд влияет по Грэнджеру. Оценим ошибку на пересечении этих вокселей и любой доли мозга. Наименьшая скорректированная MSE достигается при задержке 4-5 секунд, что согласуется с биологическими данными.

Зависимость MSE от времени задержки



Выводы

Предложенная модель работает лучше чем неинформативная модель. Следовательно, звуковая дорожка влияет на изменения вокселей. Распределения весов модели невырожденные. Корректировка на воксели, которые предположительно являются следствием по Грэнджеру, уменьшают шум и MSE согласуется с временным разрешением в 4-5 секунд для испытуемого.

Литература

- ▶ Overview of Functional Magnetic Resonance Imaging, Gary H. Glover
- ▶ Spatial and temporal limits in cognitive neuroimaging with fMRI, Menon, Ravi S and Kim, Seong-Gi
- ▶ Open multimodal iEEG-fMRI dataset from naturalistic stimulation with a short audiovisual film, Julia Berezutskaya
- ▶ A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch; S. S. Stevens; J. Volkmann; E. B. Newman; doi:10.1121/1.1915893;
- ▶ The neurovisualization methods in diagnostics of head injury. Part 1. Computer tomography and magnetic resonance imaging; Puras, Ju V and Grigorieva, EV; Russian journal of neurosurgery; 2014;
- ▶ Cognitive Crescendo: How Music Shapes the Brain's Structure and Function; Corneliu Toader, Calin Petru Tataru, Ioan-Alexandru Florian; doi:10.3390/brainsci13101390