

Декодирование и анализ нейробиологических данных

Анастасия Яновна Герман

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А. В. Грабовой

Научный консультант : Дорин Д.Д.

Кафедра интеллектуальных систем ФПМИ МФТИ

Специализация: Интеллектуальный анализ данных

11 марта 2025

Функциональная Магнитно Резонансная Томография (фМРТ)

фМРТ измеряет изменения в кровотоке и активности мозга, связанные с нейронной активностью. Это позволяет исследовать, какие области мозга активируются во время выполнения различных задач или в ответ на стимулы.

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, а также предыдущие томографические показания. Формально, необходимо 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

Эмбеддингами аудиоряда будут мел-кепстральные коэффициенты mfcc. То есть для каждого экземпляра сигнала имеем вектор размерности \mathbf{d} :

$$\mathbf{x}_\ell = [x_1^\ell, \dots, x_d^\ell]^\top \in \mathbb{R}^d, \quad \ell = 1, \dots, \frac{\nu t}{h}. \quad (5)$$

Будем восстанавливать функцию \mathbf{f} , в предположении марковского свойства.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k_\ell - \nu \Delta t - g}, \dots, \mathbf{x}_{k_\ell - \nu \Delta t}) = \mathbf{s}_\ell - \mathbf{s}_{\ell-1} = \boldsymbol{\delta}_\ell \quad \ell = 2, \dots, \mu t, \quad (6)$$

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.

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

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

Baseline модель

Поставлена элементарная задача восстановления регрессии

$$y_{ijk} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}. \quad (7)$$

Рассмотрим каждый воксель независимо $\mathbf{Y}_{ijk} \in \mathbb{R}^N$ — воксели, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{N \times d}$. Предлагаемая зависимость

$$\mathbf{Y}_{ijk} = \mathbf{X}\theta + \varepsilon, \quad (8)$$

где $\theta \in \mathbb{R}^d$ - коэффициенты модели, $\varepsilon \sim N(0, \Sigma)$ - шум.

Требуется найти параметры $\hat{\theta}$, доставляющие максимум функции правдоподобия при заданных гиперпараметрах Δt и d , где d – размерность MFCC:

$$L_X(\theta) = \prod_{v=1}^N p_\theta(Y_{ijk}^v) \longrightarrow \max_\theta \quad (9)$$

Пример работы алгоритма

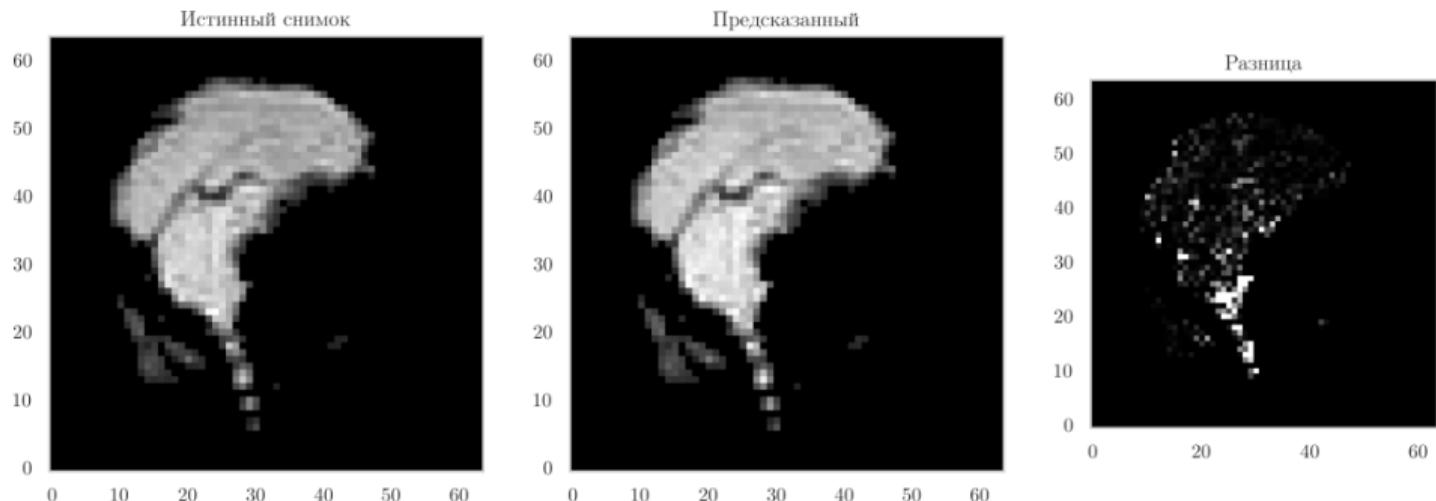


Рис. 1: Пример работы алгоритма

Литература

1. **Dorin D , Kiselev N. et al.** Forecasting fMRI Images From Video Sequences: Linear Model Analysis // Health Information Science and Systems. – 2024.
2. **Julia Berezutskaya and Mariska J. Vansteensel and Erik J. Aarnoutse and Zachary V.**, Open multimodal iEEG-fMRI dataset from naturalistic stimulation with a short audiovisual film
3. **Mingqian Zhao Baolin Liu**, An fMRI-based auditory decoding framework combined with convolutional neural network for predicting the semantics of real-life sounds from brain activity
4. **Yun Lianga, Ke Bo, Sreenivasan Meyyappan, Mingzhou Ding**, Decoding fMRI data with support vector machines and deep neural networks
5. **E. Raichle, Marcus**, The Brain's Dark Energy