

Аппроксимация данных ФМРТ из звукового временного ряда

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

17 апреля 2025

Цель работы

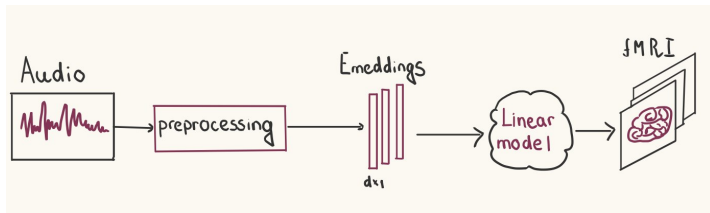
Исследуется:

Проанализировать зависимость между данными фМРТ и соответствующими аудио рядами. Оценить время гемодинамической ответной реакции уровня кислорода в крови.

Требуется:

Предложить метод прогнозирования показаний фМРТ по прослушиваемому звуковому ряду. Учесть гемодинамическую задержку при построении модели.

Решение:



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 $\nu \in \mathbb{R}$ и продолжительность $t \in \mathbb{R}$ аудиоряда. Задан аудио временной ряд

$$\mathbf{P} = [p_1, \dots, p_{\nu t}], \quad p_\ell \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

Пусть Δt — гиперпараметр задержки, k_ℓ — номер сигнала, соответствующего ℓ -му снимку фМРТ.

Постановка задачи

Формально, необходимо найти такое отображение \mathbf{f} , что

$$\mathbf{f}(p_1, \dots, p_{k_\ell - \nu \Delta t}; \mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{\ell-1}) = \mathbf{s}_\ell, \quad \ell = 1, \dots, \mu t, \quad (3)$$

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

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

Эмбедингами аудиоряда будут mfcc коэффициенты. То есть для каждого экземпляра сигнала имеем вектор размерности d :

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

Используем предположение марковости для восстановления отображения \mathbf{f} :

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

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 снимками.

С учётом задержки получаем $N = \mu(t - \Delta t)$ пар (сигнал, снимок). Задана выборка:

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

Baseline модель

Ставится задача регрессии

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

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

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

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

Требуется найти параметры $\hat{\theta}$, доставляющие максимум функции правдоподобия

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

Вычислительный эксперимент

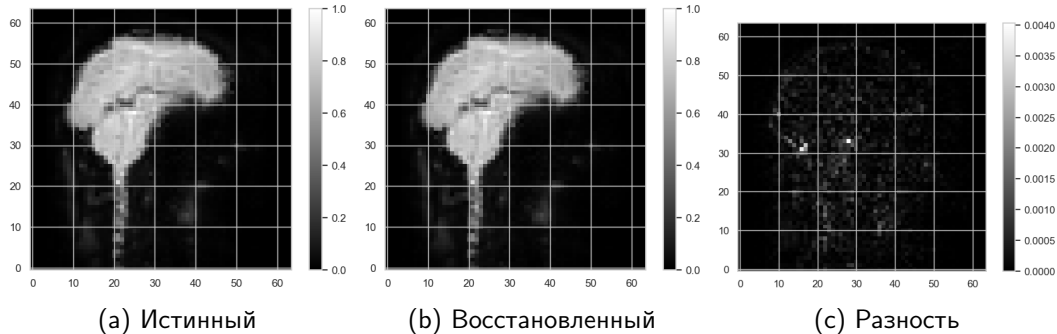
Цель:

Проверить возможность установления зависимости между аудио временным рядом и временным рядом фМРТ изображений, получить оптимальное значение гиперпараметра Δt — гемодинамической ответной реакции.

Выборка:

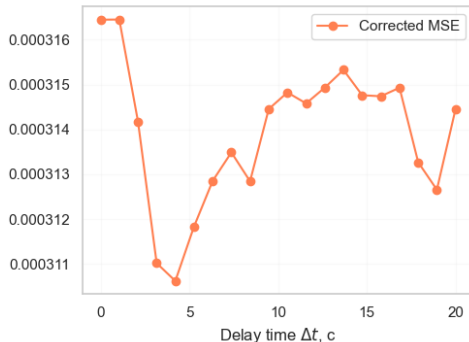
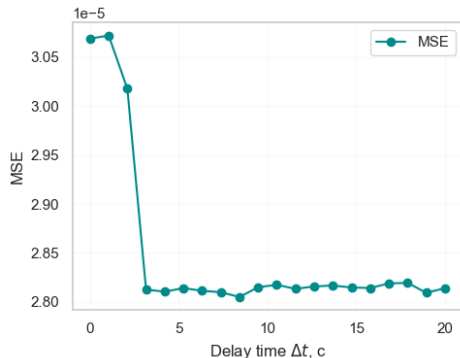
В качестве датасете берётся медицинский набор данных, который включает в себя фМРТ 30 участников в возрасте от 7 до 47 лет во время простомотра одного и того же аудио визуального фрагмента.

Демонстрация работы алгоритма



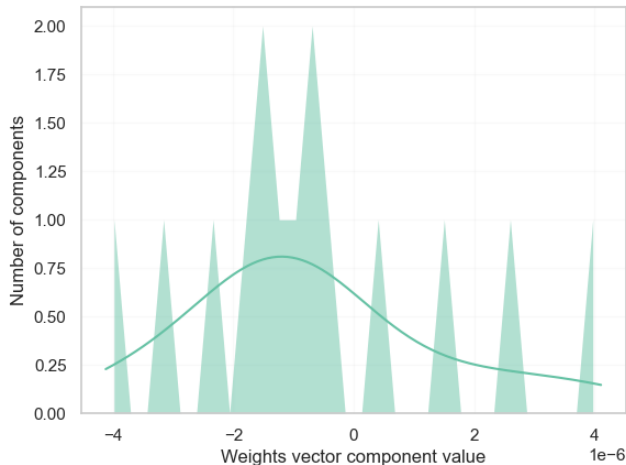
Значения в вокселях нормализованны на отрезок $[0, 1]$, поэтому ошибка $MSE = 7.46 \cdot 10^{-4}$ говорит о достаточно хорошем качестве работы алгоритма.

Анализ гиперпараметра гемодинамической задержки



После корректировки MSE на области мозга, отвечающей за восприятие аудио, наблюдается чётко выраженный минимум в районе 5 секунд, что согласуется с нейробиологическими сведениями.

Анализ распределения весов



Веса модели не сосредоточены вокруг какого-либо определенного значения, что указывает на невырожденное распределение.

- ▶ Был разработан алгоритм аппроксимации временного ряда фМРТ-изображений на основе аудиального сигнала.
- ▶ Результаты эксперимента продемонстрировали наличие зависимости между показаниями датчиков фМРТ и аудио рядом.
- ▶ Анализ весовых коэффициентов модели показал их невырожденность, что свидетельствует о способности модели учитывать широкий спектр характеристик.
- ▶ Был найден гиперпараметр гемодинамической задержки Δt .

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. **Daniel A and Gonzalez-Castillo, Javier and D'esposito, Mark and Bandettini, Peter A**, The continuing challenge of understanding and modeling hemodynamic variation in fMRI