

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

18 мая 2025

Мотивация и актуальность

- ▶ Современные методы фМРТ позволяют исследовать динамику мозговой активности с высоким пространственным разрешением.
- ▶ Аудиостимулы являются естественным и легко контролируемым типом раздражителя для изучения мозговых процессов.
- ▶ Прогнозирование фМРТ-сигнала по аудио ряду открывает путь к новым интерфейсам мозг–компьютер и углублённому пониманию гемодинамики.
- ▶ Актуальность: сочетание нейронаук и машинного обучения требует надежных моделей задержки и аппроксимации.

Анализ области

- ▶ Ранее была исследована зависимость между видео и фМРТ изображениями в работе:
Dorin D , Kiselev N. et al. Forecasting fMRI Images From Video Sequences: Linear Model Analysis // Health Information Science and Systems. – 2024.
- ▶ Также известны многие статьи где главным инструментом исследования подобных моделей является глубокое обучение, например: **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

Цель работы

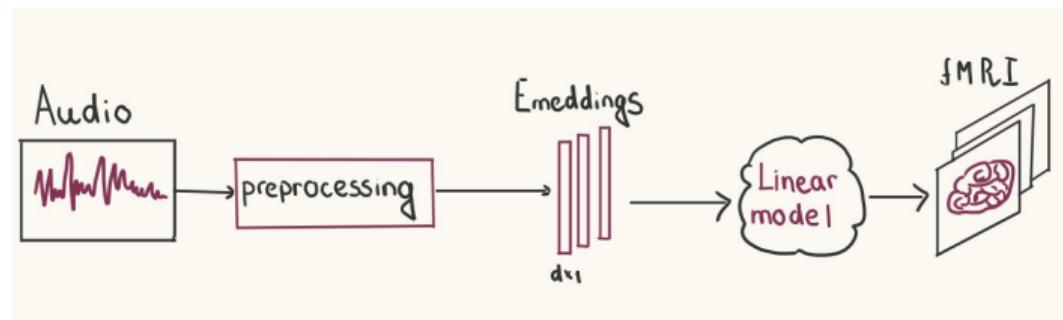
Исследуется:

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:



Краткое описание проделанной работы

1. Обзор предметной области и формализация задачи
2. Постановка целей и задач исследования
3. Применение линейной модели для прогнозирования фМРТ-изображений
4. Анализ распределения весовых коэффициентов модели
5. Определение оптимального значения гемодинамической задержки
6. Фокусировка анализа на зонах мозга, ответственных за восприятие аудио, для уточнения задержки
7. Оценка ошибок, обсуждение ограничений и определение перспектив дальнейшего развития

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

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

Baseline модель

Эмбеддингами 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:

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

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

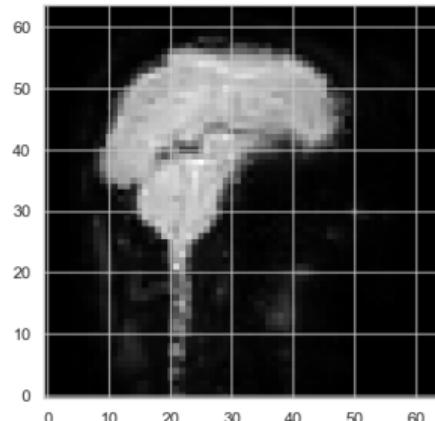
Цель:

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

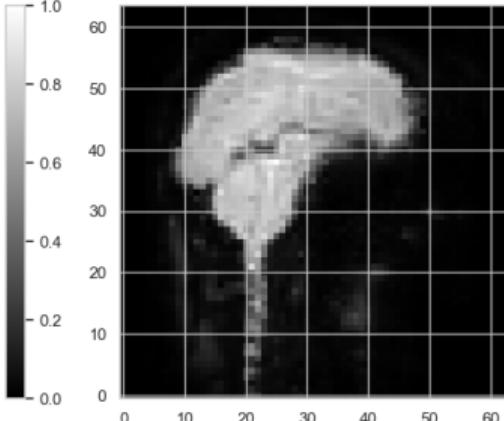
Выборка:

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.

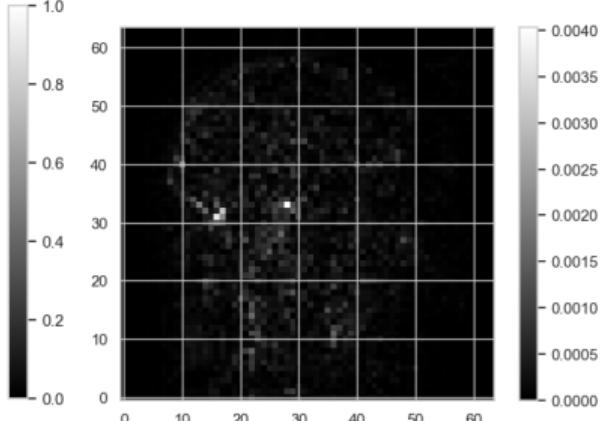
Демонстрация работы алгоритма



(а) Истинный



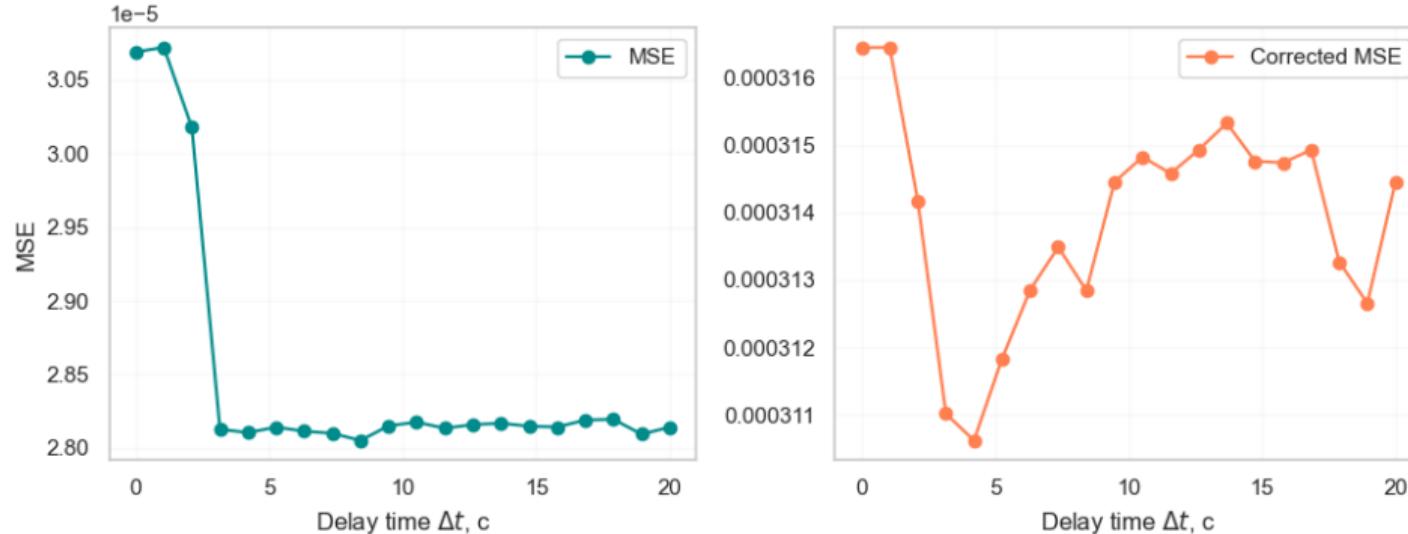
(б) Восстановленный



(с) Разность

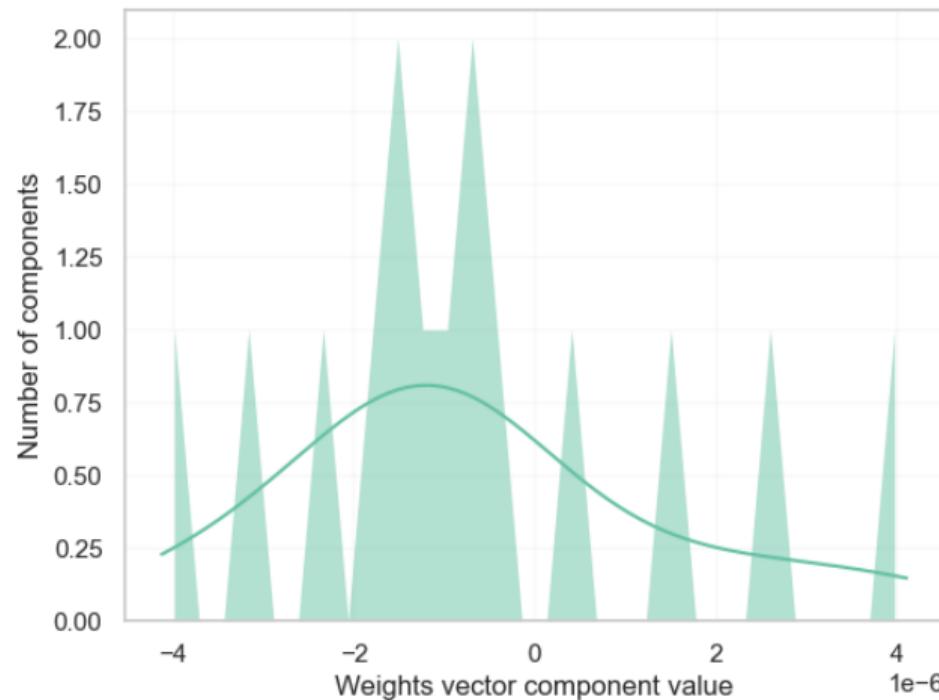
Значения в voxелях нормализованы на отрезок $[0, 1]$, поэтому ошибка $MSE = 7.46 \cdot 10^{-4}$ говорит о достаточно хорошем качестве работы алгоритма.

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.

Выводы

- ▶ 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 .
- ▶ В ходе работы была подтверждена возможность использования аудио-сигналов для прогнозирования фМРТ, что имеет высокую значимость для нейронаук и практических интерфейсов мозг–компьютер.

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. 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