

Поиск зависимостей в биомеханических системах

Зыков Тимур Алексеевич

Московский физико-технический институт

Курс: Автоматизация научных исследований/Группа 124

Эксперт: В. В. Стрижов

Консультант: Д. Д. Дорин

Весна 2024

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.

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.

Предварительные сведения

В качестве датасета будем использовать данные iEEG, собранные у большой группы людей во время просмотра короткометражного аудиовизуального фильма. Он включает записи функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) 30 участников в возрасте от 7 до 47 лет.

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

Воспользуемся решением, представленным в работе 2023 года.
Будем восстанавливать функцию, в предположении марковского
свойства

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

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 2,
стереозвук:

$$\mathbf{x}_\ell = [x_1^\ell, x_2^\ell]^T \in \mathbb{R}^2, \quad \ell = 1, \dots, \nu t.$$

Учитывая (5), суммарное число пар (звук, снимок) равно
 $N = \mu(t - \Delta t)$. Таким образом, для каждого вокселя задана
выборка

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

Baseline модель

Поставлена элементарная задача восстановления регрессии

$$y_{ijk} : \mathbb{R}^g \rightarrow \mathbb{R}. \quad (6)$$

Используется линейная модель с вектором параметров

$$\mathbf{w}_{ijk} = [w_1^{ijk}, \dots, w_g^{ijk}]^\top \in \mathbb{R}^g :$$

$$f_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{w}_{ijk}) = \langle \mathbf{x}, \mathbf{w}_{ijk} \rangle. \quad (7)$$

Требуется найти параметры, доставляющие минимум функционалу потерь $\mathcal{L}_{ijk}(\mathbf{w}_{ijk})$ при заданных гиперпараметрах Δt и g , где g – ширина окна сигналов:

$$\hat{\mathbf{w}}_{ijk} = \arg \min_{\mathbf{w}_{ijk}} \mathcal{L}_{ijk}(\mathbf{w}_{ijk}). \quad (8)$$

Пример работы алгоритма

Рассмотрен 20-ый срез по первой координате 37-го снимка в последовательности 7-го испытуемого. Так как значения voxелей нормированы на отрезок $[0; 1]$, то ошибка порядка 10^{-6} свидетельствует о достаточно точном предсказании.

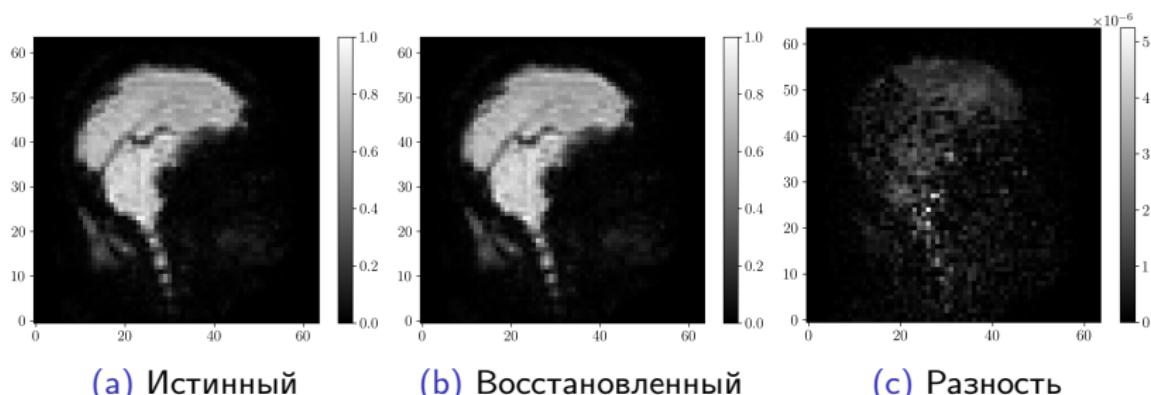


Рис.: Срез снимка фМРТ из тестовой выборки

Дальнейший план работы

- ▶ Предоставить другой метод. Текущий бейзлайн обучен в предположении марковости. Еще одним недостатком решения является потеря пространственной информации. Для улучшения качества будем использовать информацию о соседних voxелях, а не предсказывать их независимо. Для решения этой проблемы можно использовать идею сверток;
- ▶ Проверить гипотезу инвариантности весов модели относительно человека;
- ▶ Выделить шумовые области мозга;
- ▶ Провести корреляционный анализ тестом Гренджера;

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
- ▶ <https://github.com/intsystems/2023-Project-112/>