

Восстановление снимков фМРТ по просматриваемому видеоряду

Никита Сергеевич Киселев

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

Курс: Автоматизация научных исследований
(Моя первая научная статья)/Группа 003, весна 2023

Эксперт: А. В. Грабовой

Цель исследования

Проблема

Восстановление показаний датчиков фМРТ при взаимодействии человека с внешним миром.

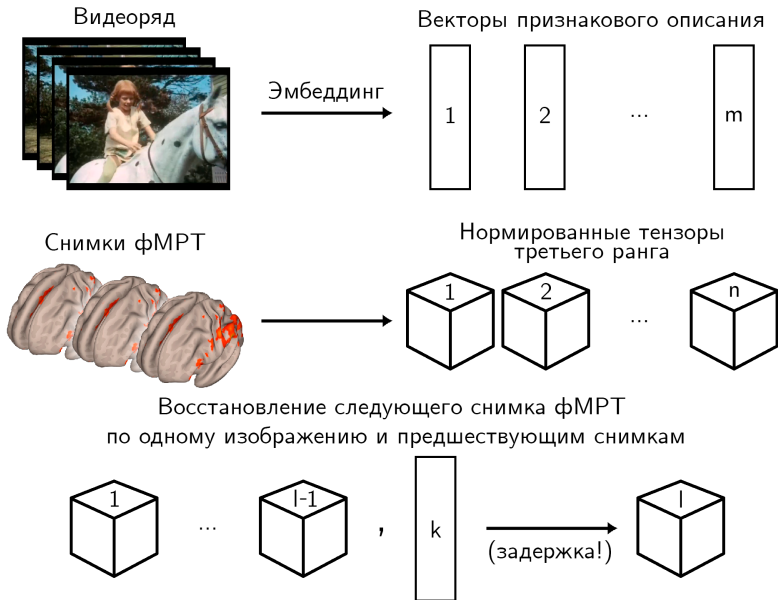
Цель

Аппроксимация последовательности снимков фМРТ по видеоряду, просматриваемому человеком.

Предлагается

- 1 Восстановление изменения снимка фМРТ с учетом времени задержки Δt .
- 2 Исследование свойств построенного метода и проверка гипотез.

Постановка задачи



Постановка задачи

Пусть задана частота кадров $\nu \in \mathbb{R}$ и продолжительность $t \in \mathbb{R}$ видеоряда.
Задан видеоряд

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{\nu t}], \quad \mathbf{p}_\ell \in \mathbb{R}^{W \times H \times C}.$$

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

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

Необходимо построить отображение, которое бы учитывало задержку Δt между снимком фМРТ и видеорядом, а также предыдущие томографические показания.

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

$$\ell = 1, \dots, \mu t, \quad k_\ell = \frac{\ell \cdot \nu}{\mu}.$$

Предположение марковости:

Снимок \mathbf{s}_ℓ зависит только от изображения $\mathbf{p}_{k_\ell - \nu \Delta t}$ и снимка $\mathbf{s}_{\ell-1}$, тогда

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

Отображение $\mathbf{g} : \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{S}$ представимо в виде композиции

$$\mathbf{g} = \varphi \circ \psi,$$

$\psi : \mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}^d$ — векторизация изображения,

$\varphi : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbf{S}$ — восстанавливаемое отображение.

Для векторизации используется ResNet152 без последнего линейного слоя. Суммарное число пар (изображение, снимок): $N = \mu(t - \Delta t)$.

Таким образом, для каждого вокселя задана выборка

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

- $\mathbf{x}_\ell = [x_1^\ell, \dots, x_d^\ell]^\top \in \mathbb{R}^d$ — признаки изображения;
- $\delta_\ell = [\delta_{ijk}^\ell] \in \mathbb{R}^{X \times Y \times Z}$ — разность между двумя последовательными снимками фМРТ.

Модель, функция потерь и решение

Используется линейная модель с вектором параметров

$$\mathbf{w}_{ijk} = [w_1^{ijk}, \dots, w_d^{ijk}]^T \in \mathbb{R}^d :$$

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

Квадратичная функция потерь с коэффициентом L_2 -регуляризации $\alpha \in \mathbb{R}$:

$$\mathcal{L}_{ijk}(\mathbf{w}_{ijk}, \Delta t) = \sum_{\ell=2}^N (f_{ijk}(\mathbf{x}_\ell, \mathbf{w}_{ijk}) - \delta_{ijk}^\ell)^2 + \alpha \|\mathbf{w}_{ijk}\|_2^2,$$

Требуется найти параметры, доставляющие минимум функционалу потерь при фиксированном Δt :

$$\hat{\mathbf{w}}_{ijk} = \arg \min_{\mathbf{w}_{ijk}} \mathcal{L}_{ijk}(\mathbf{w}_{ijk}, \Delta t).$$

Решение для каждого вокселя находится методом наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{w}}_{ijk} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T \Delta \mathbf{v}_{ijk}.$$

- $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_N^T]^T = [x_j^i] \in \mathbb{R}^{(N-1) \times d}$ — матрица объекты-признаки;
- $\Delta \mathbf{v}_{ijk} = [\delta_{ijk}^2, \dots, \delta_{ijk}^N]^T \in \mathbb{R}^{N-1}$ — вектор изменения вокселя в снимках.

Вычислительный эксперимент

Цель

- ❶ Проверка работоспособности предложенного метода.
- ❷ Исследование зависимости качества восстановления от гиперпараметра Δt .
- ❸ Проверка гипотез:
 - линейная зависимость между данными;
 - взаимосвязь снимков в последовательности;
 - инвариантность весов модели относительно человека.

Данные

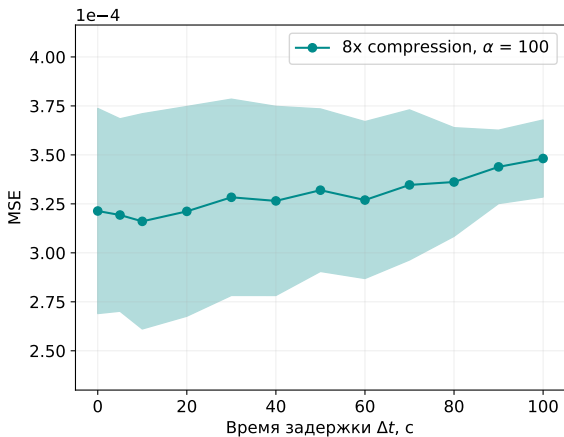
Реальное фМРТ-обследование¹ 30 испытуемых разного пола и возраста. Каждый из них просматривал короткий аудиовизуальный фильм. Продолжительность фильма $t = 390$ с, частота кадров $\nu = 25$ с⁻¹. Частота снимков фМРТ $\mu = 1.64$ с⁻¹.

Производится предварительное сжатие снимка фМРТ с помощью сверточного слоя MaxPool3D. Значения вокселей нормализуются на $[0; 1]$.

¹ Julia Berezutskaya et al. (2022). Open multimodal iEEG-fMRI dataset from naturalistic stimulation with a short audiovisual film. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01173-0>

Зависимость от гиперпараметра Δt

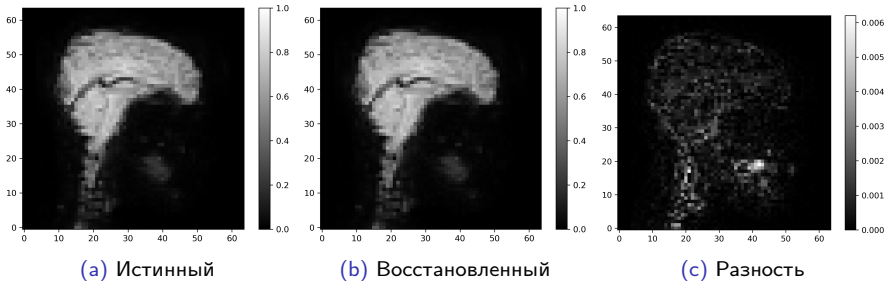
Зависимость метрики MSE от гиперпараметра Δt . Использовалось предварительное 8-кратное сжатие снимка. Производилось усреднение по испытуемым. Обозначены границы среднеквадратичного отклонения.



Качество восстановления зависит от значения Δt . Наблюдается характерный минимум при $\Delta t \approx 10$ с.

Восстановленный снимок

Срезы истинного и восстановленного снимков из тестовой выборки. Можно наблюдать разность между ними.

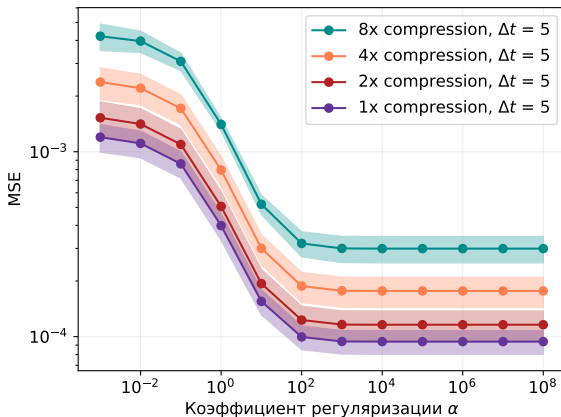


Усредненная по всем снимкам и вокселям $MSE = 1.09 \cdot 10^{-4}$. Значения вокселей лежат в отрезке $[0; 1]$, поэтому ошибка на одном снимке порядка $10^{-3} \div 10^{-2}$ свидетельствует о достаточно точном предсказании.

Зависимость от коэффициента регуляризации

Зависимость метрики MSE от коэффициента регуляризации α .

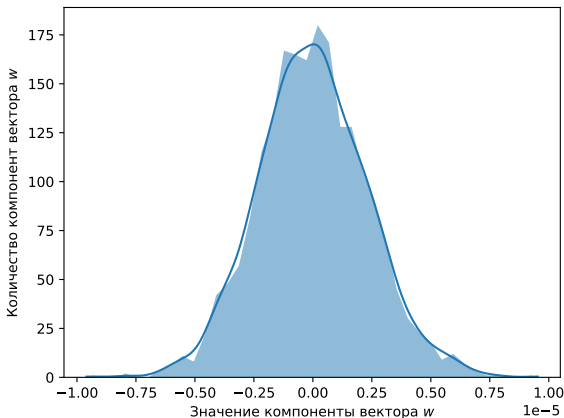
Рассматривались коэффициенты сжатия 1, 2, 4 и 8. Производилось усреднение по испытуемым. Обозначены границы среднеквадратичного отклонения.



Оптимальное значение коэффициента $\alpha \approx 100$.

Распределение весов в среднем по всем вокселям

График распределения значений компонент вектора весов модели.
Производилось усреднение по всем вокселям фиксированного снимка.



Веса модели распределены нормально, а не лежат в окрестности какого-то определенного значения.

Предположение: зависимость между видеорядом и снимками фМРТ у разных испытуемых имеет схожий характер, а время задержки Δt практически совпадает.

Проведена проверка гипотезы инвариантности весов модели относительно человека: можно ли восстановить снимок фМРТ одного испытуемого, используя матрицу весов другого. Использовалась метрика MSE на тестовой выборке.

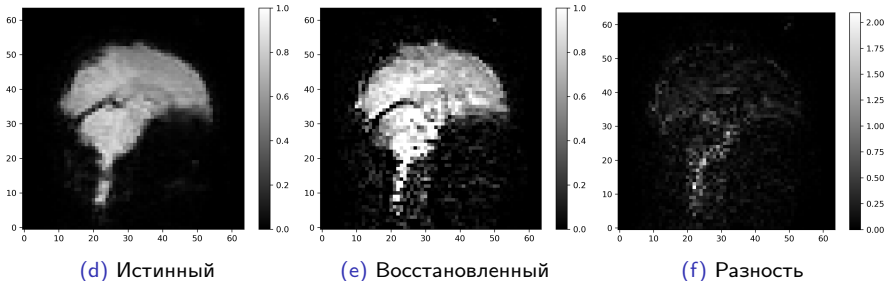
Матрица весов	Истинная	Подмешанная ¹
MSE	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$

Значения MSE практически совпадают. Это свидетельствует о справедливости рассматриваемой гипотезы.

¹Предсказание снимков одного человека с использованием весов модели другого

Проверка работы на случайном шуме

Рассмотрено качество работы метода на случайном шуме. В качестве матрицы объекты-признаки взята матрица случайных чисел $\mathbf{X} = [x_j^i]$, $x_j^i \sim U[0, 1]$. Ниже приведены срезы последнего снимка, восстановленного последовательно по всем предсказанным изменениям, и значения метрики MSE.



Выборка	Истинная	Случайный шум
MSE	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-1}

Большое значение MSE при работе на случайном шуме свидетельствует о наличии зависимости между видеорядом и снимками фМРТ, которую улавливает предложенная модель.

- ❶ Предложен метод аппроксимации последовательности снимков фМРТ по видеоряду, просматриваемому человеком.
- ❷ Проверены гипотезы:
 - о линейной зависимости между видеорядом и снимками фМРТ;
 - о взаимосвязи снимков в последовательности;
 - об инвариантности весов модели относительно человека.