

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

Проблема

Аппроксимация 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

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

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{\nu \cdot t}], \quad \mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^{W_P \times H_P \times C_P}.$$

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

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{\mu \cdot t}], \quad \mathbf{s}_i \in \mathbb{R}^{W_S \times H_S \times D_S}.$$

Необходимо построить отображение

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{k_i - \nu \cdot \Delta t}; \mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{i-1}) = \mathbf{s}_i - \mathbf{s}_{i-1} = \mathbf{\Delta}_{i-1},$$

$$i = 1, \dots, \mu t, \quad k_i = \frac{i \cdot \nu}{\mu}.$$

Снимок \mathbf{s}_i зависит только от $\mathbf{p}_{k_i - \nu \Delta t}$ и \mathbf{s}_{i-1} .

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}_{k_i - \nu \Delta t}; \mathbf{s}_{i-1}) = \mathbf{\Delta}_{i-1}, \quad i = 1, \dots, \mu t.$$

Число снимков в выборке $N = N_S - \mu \Delta t - 1$.

Модель, функция потерь и решение

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

$$\mathcal{L}_{ijk}(\mathbf{w}_{ijk}, \Delta t) = \sum_{\ell=2}^{N_S - \mu \Delta t} (f_{ijk}(\mathbf{x}_\ell, \mathbf{w}_{ijk}) - (v_{ijk}^\ell - v_{ijk}^{\ell-1}))^2 + \alpha \|\mathbf{w}_{ijk}\|_2^2$$

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

- $\mathbf{x}_\ell = [x_1^\ell, \dots, x_d^\ell]^\top \in \mathbb{R}^d$ — признаки изображения;
- $\mathbf{w}_{ijk} = [w_1^{ijk}, \dots, w_d^{ijk}]^\top \in \mathbb{R}^d$ — вектор параметров;
- $\mathbf{s}_\ell = [v_{ijk}^\ell] \in \mathbb{R}^{W_S \times H_S \times D_S}$ — снимок фМРТ.

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 $\nu = 25$. Частота снимков $\mu = 1.64$.

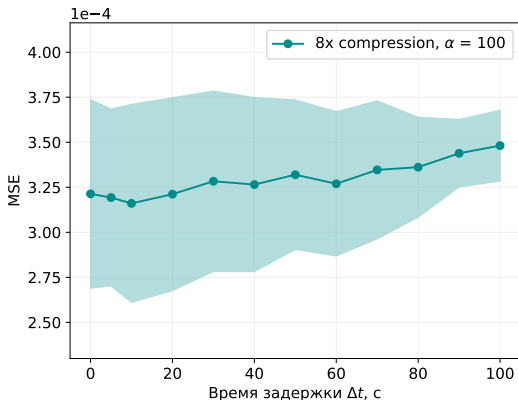
¹Ссылка на датасет

Зависимость от гиперпараметра Δt

Зависимость метрики MSE от гиперпараметра Δt .

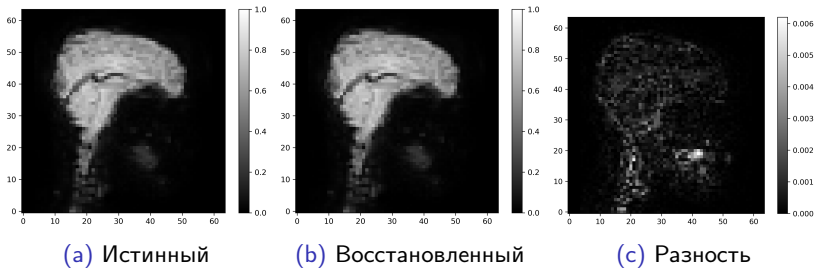
Использовалось предварительное 8-кратное сжатие снимка.

Производилось усреднение по испытуемым. Обозначены границы среднеквадратичного отклонения.



Наблюдается минимум MSE при $\Delta t = 10$ с.

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



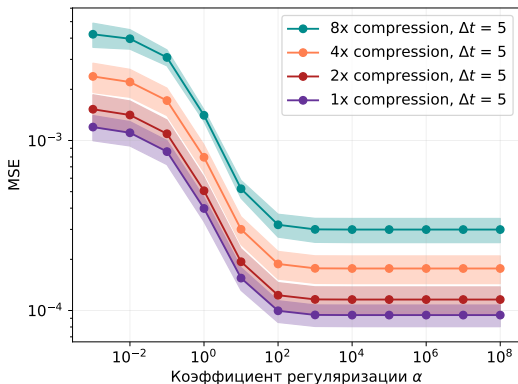
Значения вокселей лежат в отрезке $[0, 1]$, поэтому ошибка порядка $10^{-3} \div 10^{-2}$ свидетельствует о достаточно точном предсказании.

Зависимость от коэффициента регуляризации

Зависимость метрики MSE от коэффициента регуляризации α .

Рассматривались коэффициенты сжатия 1, 2, 4 и 8.

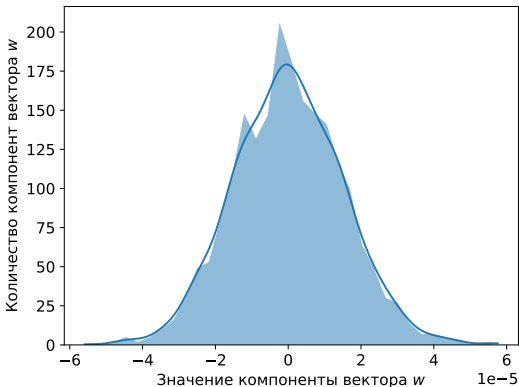
Производилось усреднение по испытуемым. Обозначены границы средноквадратичного отклонения.



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.

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.

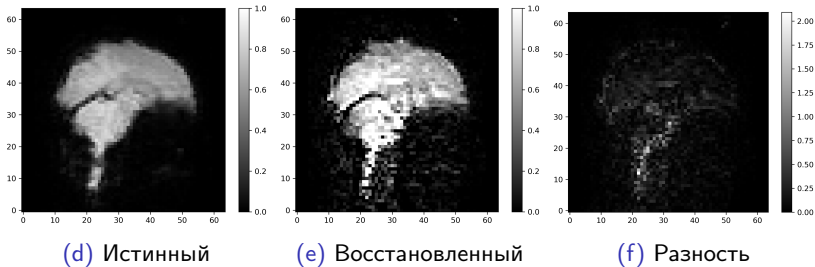
Матрица весов	Истинная	Подмешанная ¹
MSE	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$

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 **X** взята матрица случайных чисел из $[0, 1)$. 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}

- Построен метод аппроксимации последовательности снимков фМРТ по видеоряду, просматриваемому человеком.
- Справедлива гипотеза о линейной зависимости между данными.
- Подтверждена гипотеза о взаимосвязи снимков в последовательности.
- Проверена гипотеза инвариантности весов модели относительно человека.