

Дистилляция на многодоменных выборках

К. М. Баязитов

Выпускная квалификационная работа
03.03.01 — Прикладные математика и физика
Научный руководитель: д.ф.-м.н. В. А. Семенов
Научный консультант: к.ф.-м.н. А. В. Грабовой

25 апреля 2022 г.

Слайд об исследованиях

Исследуется задача построения моделей глубокого обучения на основе предобученных моделей на выборках из близких генеральных совокупностей.

Цель исследования —

Адаптация моделей машинного обучения при переходе к данным из близких генеральных совокупностей.

Предложенный метод —

Дистилляция моделей в случае когда выборки учителя и ученика из разных генеральных совокупностей.

Решение

Предлагается при обучении модели ученика использовать не только метки учителя и истинные метки, а также связь между двумя выборками.

Базовая постановка задачи дистилляции

Заданы

1) выборка:

$$\mathcal{D} = (\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad \mathbf{X} \in \mathbb{X}, \quad \mathbf{Y} \in \{1, \dots, R\},$$

2) модель учителя \mathbf{f} из параметрического семейства функций:

$$\mathfrak{F} = \{\mathbf{f} | \mathbf{f} = \text{softmax}(\mathbf{v}(\mathbf{x})/T), \mathbf{v} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^R\}.$$

Требуется выбрать модель ученика \mathbf{g} из параметрического семейства функций:

$$\mathfrak{G} = \{\mathbf{g} | \mathbf{g} = \text{softmax}(\mathbf{z}(\mathbf{x})/T), \mathbf{z} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^R\}.$$

Оптимизационная задача:

$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w} \in \mathbb{W}} \mathcal{L}(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{f}),$$

где \mathcal{L} — функция ошибки.

Постановка задачи дистилляции для многодоменной выборки

Заданы

1) исходный и целевой наборы данных:

$$\mathfrak{D}_s = (\mathbf{X}_s, \mathbf{Y}_s), \quad \mathbf{X}_s \in \mathbb{X}_s, \quad \mathbf{Y}_s \in \mathbb{Y},$$

$$\mathfrak{D}_t = (\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t), \quad \mathbf{X}_t \in \mathbb{X}_t, \quad \mathbf{Y}_t \in \mathbb{Y},$$

2) модель учителя на выборке большей мощности:

$$\mathbf{f} : \mathbb{X}_s \rightarrow \mathbb{Y}', \quad \mathbb{Y}' \text{ — пространство оценок}$$

3) связь между исходной и целевой выборками:

$$\varphi : \mathbb{X}_t \rightarrow \mathbb{X}_s.$$

Требуется получить модель ученика для малоресурсной выборки:

$$\mathbf{g} : \mathbb{X}_t \rightarrow \mathbb{Y}'.$$

Предложенный метод

Предлагается при обучении модели ученика использовать

1) ответы модели учителя

$$\mathbf{f} : \mathbb{X}_s \rightarrow \mathbb{Y}',$$

2) связь между выборками

$$\varphi : \mathbb{X}_t \rightarrow \mathbb{X}_s.$$

Функция ошибки, учитывающая метки учителя и связь между выборками

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{f}, \varphi) = & -\lambda \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R \mathbb{I}[y_i = r] \log g^r(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}) \\ & - (1 - \lambda) \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R (f \circ \varphi)^r(\mathbf{x}_i) \log g^r(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}), \end{aligned}$$

где λ — метапараметр, задающий вес дистилляции, \mathbb{I} — индикаторная функция.
Оптимизационная задача:

$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w} \in \mathbb{W}} \mathcal{L}(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{f}, \varphi).$$

Экспериментальные данные

Заданы выборки:

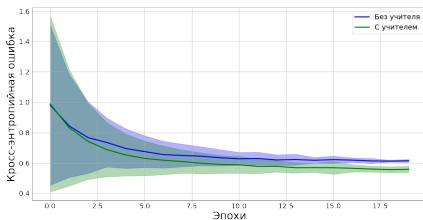
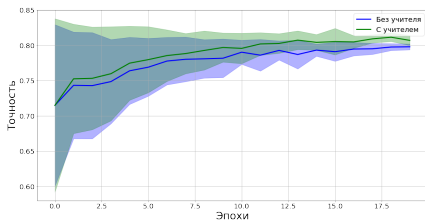
- 1) FashionMNIST — набор изображений предметов одежды,
- 2) MNIST — набор изображений рукописных цифр.

Выборка	Пояснение	Размер выборки
FashionMNIST-Train	Обучающая часть	60000
FashionMNIST-Big	Многоресурсная часть	59000
FashionMNIST-Small	Малоресурсная часть	1000
FashionMNIST-Test	Тестовая часть	10000
MNIST-Train	Обучающая часть	60000
MNIST-Big	Многоресурсная часть	59000
MNIST-Small	Малоресурсная часть	1000
MNIST-Test	Тестовая часть	10000

Анализ дистилляции на малоресурсной части

- 1) Модель учителя аппроксимирует FashionMNIST-Big,
- 2) Модель ученика аппроксимирует FashionMNIST-Small.

На графиках показаны метрики точности и кросс-энтропийной ошибки модели ученика.



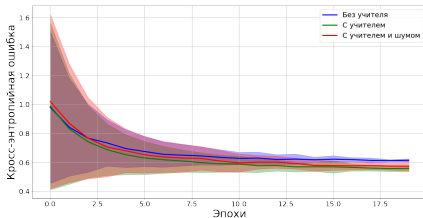
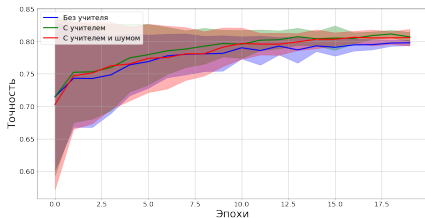
Модель, использующая метки учителя, показывает лучшее значение точности и кросс-энтропийной ошибки, чем модель без учителя.

Анализ дистилляции с нормальным шумом

- 1) Модель учителя аппроксимирует FashionMNIST-Big с шумом $\mathcal{N}(0, \frac{1}{10})$,
- 2) Модель ученика аппроксимирует FashionMNIST-Small без шума.

В качестве отображения φ используется нормальный шум $\mathcal{N}(0, \frac{1}{10})$.

На графиках показаны метрики точности и кросс-энтропийной ошибки модели ученика.



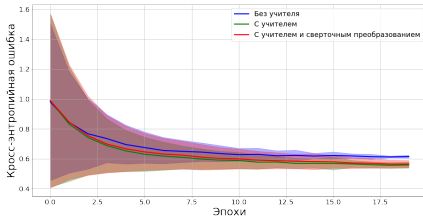
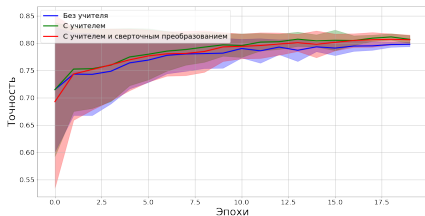
Модель, использующая метки учителя с применением шума, показывает лучшее значение точности и кросс-энтропийной ошибки, чем модель без учителя.

Анализ дистилляции со сверточным преобразованием

- 1) Модель учителя аппроксимирует FashionMNIST-Big со сверточным преобразованием с параметром $dilation = 2$,
- 2) Модель ученика аппроксимирует FashionMNIST-Small без шума.

В качестве отображения φ используется сверточное преобразование с $dilation = 2$.

На графиках показаны метрики точности и кросс-энтропийной ошибки модели ученика.



Модель, использующая метки учителя со сверточным преобразованием, показывает лучшее значение точности и кросс-энтропийной ошибки, чем модель без учителя.

Вариационный автокодировщик

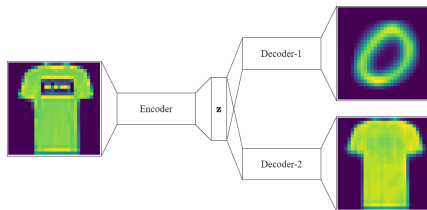
Отображение φ аппроксимируется моделью автокодировщика.

Функция ошибки для обучения автокодировщика:

$$\mathcal{L}_{VAE}(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^I \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim q(\mathbf{z}|\mathbf{x}_i, \alpha)} \log p(\mathbf{x}_i | \mathbf{z}, \beta_{MNIST}) \\ + \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim q(\mathbf{z}|\mathbf{x}_i, \alpha)} \log p(\mathbf{x}_i | \mathbf{z}, \beta_{FashionMNIST}) - \text{KL}(q(\mathbf{z}|\mathbf{x}_i, \alpha) || p(\mathbf{z})),$$

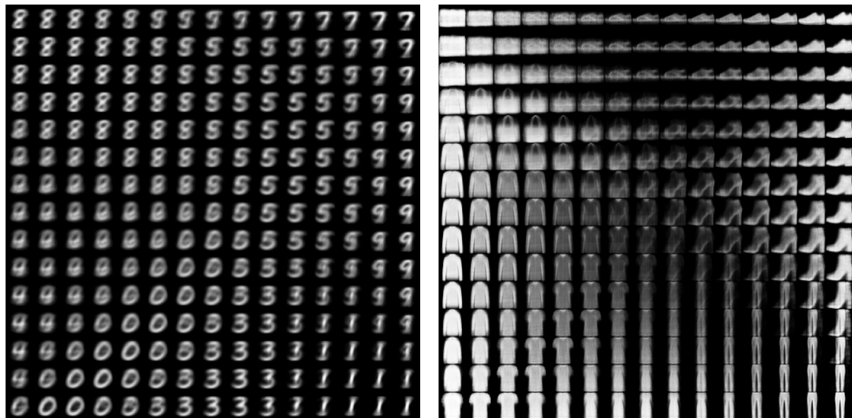
где $p(\mathbf{z}) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ — априорное распределение, $q(\mathbf{z}|\mathbf{x}, \alpha)$ — вероятностный кодировщик, $p(\hat{\mathbf{x}}|\mathbf{z}, \beta)$ — вероятностный декодировщик.

Вариационный автокодировщик генерирует новые объекты — изображения цифр и одежды для одного изображения одежды.



Визуализация сгенерированных изображений автокодировщиком

Проанализируем изменение выхода модели при изменении случайного вектора в скрытом представлении. Для визуализации рассмотрим скрытое представление размерности 2:

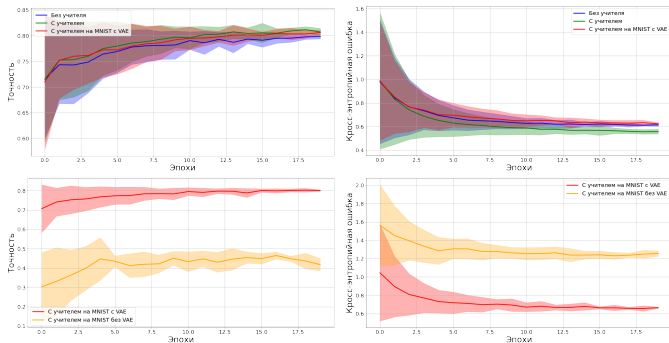


Видно, что классы одежды и цифр соответствуют друг другу.

Анализ дистилляции на основе вариационного автокодировщика

- 1) Модель учителя аппроксимирует MNIST-Big,
- 2) Модель ученика аппроксимирует FashionMNIST-Small.

На графиках показаны сравнения метрик точности и кросс-энтропийных ошибок модели ученика в зависимости от использования автокодировщика, аппроксимирующего отображение φ .



Без использования отображения φ модель становится более шумной с явным снижением качества аппроксимации.

Анализ дистилляции на расширенной синтетически сгенерированной выборке

На основе выборки FashionMNIST-Small с помощью модели вариационного автокодировщика генерируется новая выборка GeneratedMNIST объектов цифр.

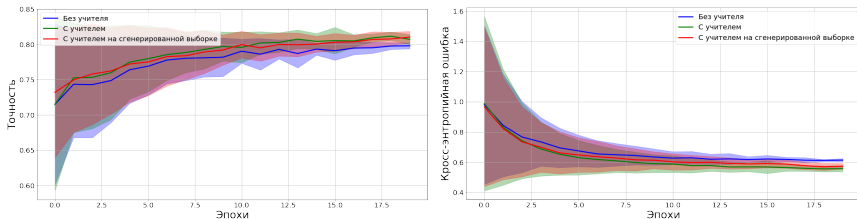
Выборка	Пояснение	Размер выборки
GeneratedMNIST-Train	Обучающая часть	60000
GeneratedMNIST-Big	Многоресурсная часть	59000
GeneratedMNIST-Small	Малоресурсная часть	1000
GeneratedMNIST-Test	Тестовая часть	10000

Анализ дистилляции на расширенной синтетически сгенерированной выборке

- 1) Модель учителя аппроксимирует GeneratedMNIST-Big,
- 2) Модель ученика аппроксимирует FashionMNIST-Small.

В качестве отображения φ используется выход вариационного автокодировщика, переводящего изображения одежды в изображения цифр.

На графиках показаны метрики точности и кросс-энтропийной ошибки модели ученика.



Модель, использующая метки учителя с применением вариационного автокодировщика, показывает лучшее значение точности и кросс-энтропийной ошибки, чем модель без учителя.

Выводы

1. Рассмотрена задача снижения сложности модели при ее переносе к новым данным меньшей мощности из близкой генеральной совокупности.
2. Рассмотрен подход на основе дистилляции моделей глубокого обучения.
3. Предложен подход для случая, когда модели учителя и ученика заданы на выборках разной мощности с известным отображением между выборками.
4. Проведен вычислительный эксперимент по анализу качества предложенного метода.
5. Предложен метод генерации выборки из близкой генеральной совокупности на основе вариационного автокодировщика.