

Информативные априорные предположения в задаче привилегированного обучения

Нейчев Радослав Георгиев

Московский физико-технический институт
Факультет управления и прикладной математики
Кафедра интеллектуальных систем

Научный руководитель:
д.ф.-м.н, В.В. Стрижов

21 июня 2018

Цели исследования

Цель исследования: создать метод построения моделей оптимальной сложности для задач распознавания и прогнозирования.

Проблема: Неустойчивая сходимость параметров моделей в зависимости от начальной инициализации.

Требуется предложить метод построения моделей, который

- ▶ соблюдает баланс между точностью и сложностью модели,
- ▶ использует дополнительную (априорную) информацию на этапе обучения и учитывает объекты, априорная информация о которых отсутствует (использует неполные описания объектов).

- ▶ Фильтрация объектов в задаче многоклассовой классификации.
Object selection in credit scoring using covariance matrix of parameters estimations. A. Aduenko, A. Motrenko, V. Strijov, *Annals of Operations Research*, 2018.
- ▶ Использование привилегированного обучения применительно к SVM.
Learning using privileged information: Similarity control and knowledge transfer. V.Vapnik, R.Izmailov. *JMLR*, 2015.
- ▶ Обобщение подходов Вапника и Хинтона к привилегированному обучению.
Unifying distillation and privileged information. B.Schlölkopf, V.Vapnik, D.Lopez-Paz, L.Bottou. *ICLR*, 2016.

Постановка задачи декодирования, прогнозирования и классификации

Заданы матрица объект-признак \mathbf{X} и целевая матрица \mathbf{Y} .

$$\left[\begin{array}{c|ccc} \hat{\mathbf{y}}' & \mathbf{x}'_0 & \mathbf{x}''_0 & \dots \\ \mathbf{y}'_1 & \mathbf{x}'_1 & \mathbf{x}''_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}'_m & \mathbf{x}'_m & \mathbf{x}''_m & \dots \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|ccc} \hat{\mathbf{y}} & \mathbf{x}_0 & & \\ \hline 1 \times r & 1 \times n & & \\ \mathbf{Y} & \mathbf{X} & & \\ \hline m \times r & m \times n & & \end{array} \right].$$

Оптимальная модель $\hat{\mathbf{f}} : \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{y}$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^r$ минимизирует заданную функцию ошибки S при ограничении на сложность,

$$\hat{\mathbf{f}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{f} \in \mathfrak{F}} S(\mathbf{f}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}), \text{ при } |\hat{\mathbf{f}}|_c \leq M_c.$$

Предлагается использовать *привилегированную априорную информацию* при построении $\hat{\mathbf{f}}$.

Шлюзовая функция $\pi_k(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \rightarrow [0; 1]$
определяет правдоподобие k -й модели на \mathbf{x} .

$$\pi_k(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \sigma(\mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}), \mathbf{V}) = \frac{\exp \mathbf{v}_k^\top \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega})}{\sum_{k'=1}^K \exp \mathbf{v}_{k'}^\top \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega})},$$

где $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_K, \boldsymbol{\omega}]$, σ — softmax,
 $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega})$ — преобразование над \mathbf{x} .

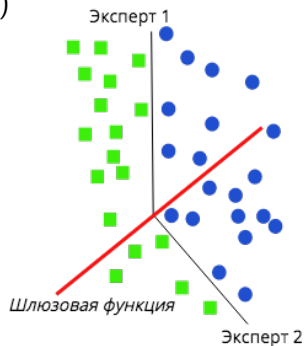
Смесь экспертов: $\mathbf{f}_{\text{ме}}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \pi_k(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \mathbf{k}(\mathbf{x})$.

Апостериорное распределение на \mathbf{y} :

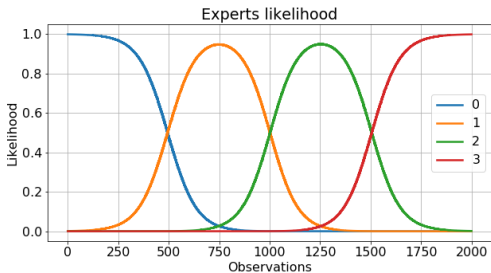
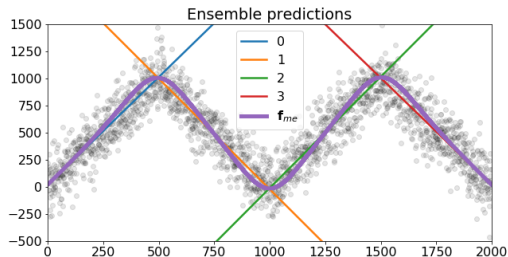
$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^K p(k|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) p(\mathbf{y}|k, \mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) =$$

$$= \sum_{k=1}^K \pi_k(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \exp\left(-\frac{1}{2\beta_k} (\mathbf{y} - f_k(\mathbf{x}, \mathbf{w}_k))^2\right), \text{ где}$$

$$\mathbf{y} \sim \mathcal{N}(\mathbf{f}_k(\mathbf{x}, \mathbf{w}_k), \beta_k), \quad \boldsymbol{\theta} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K, \mathbf{V}, \boldsymbol{\beta}].$$



Смесь экспертов на синтетических данных



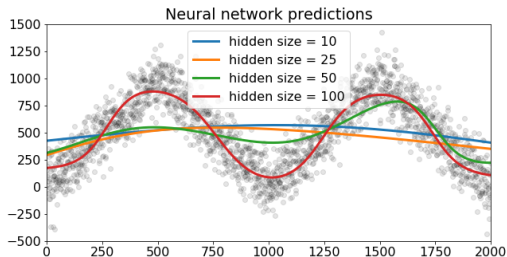
$$\mathbf{f}_{me} = \sum_{k=1}^K \pi_k \mathbf{f}_k,$$

$\pi(\mathbf{x}, \mathbf{V})$ — нейросеть с одним скрытым слоем из 50 нейронов,

$$\mathbf{f}_k = \mathbf{w}_k \mathbf{x} + b_k$$

$$|\mathbf{f}_{me}|_C \sim 10^2$$

Сравнение нейросетей на синтетических данных

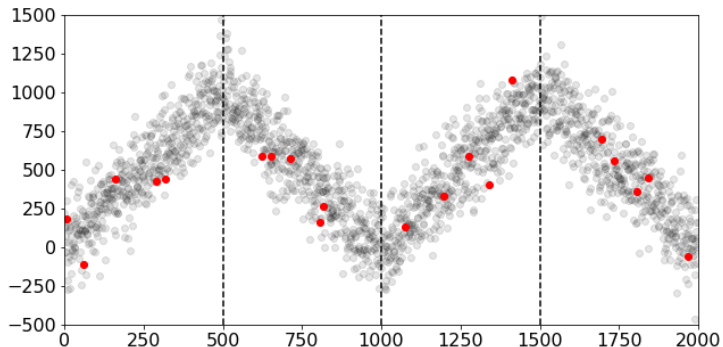


$$|\mathbf{f}_{\text{NN}}|_C \sim 10^4,$$
$$S(\mathbf{f}_{\text{me}}) \approx S(\mathbf{f}_{\text{NN}}),$$
$$|\mathbf{f}_{\text{me}}|_C \ll |\mathbf{f}_{\text{NN}}|_C.$$

Лишь экземпляр \mathbf{f}_{NN} с размером скрытого слоя 100 смог адекватно описать данные.

Проблема: Параметры мультимодели \mathbf{f}_{me} очень плохо сходятся (\sim в 10% запусков со случайной инициализацией параметров).

Решение: использовать привилегированную информацию о принадлежности некоторых объектов к различным экспертам. Случайные 5 точек для каждого сегмента зафиксированы за различными экспертами



С привлечением привилегированной информации сходимость достигается \sim в 76% запусков.

Мета-обучение (distillation)

Пусть для некоторых объектов \mathbf{x} доступна *привилегированная* информация \mathbf{x}^* . Введем функции ученика $\mathbf{f}_s \in \mathfrak{F}_s$ (student) и учителя $\mathbf{f}_t \in \mathfrak{F}_t$ (teacher):

$$\mathbf{f}_s : \mathbf{x} \longrightarrow \mathbf{y}, \quad \mathbf{f}_t : \mathbf{x}, \mathbf{x}^* \longrightarrow \mathbf{y}.$$

$$\mathbf{f}_s = \operatorname{argmin}_{\mathbf{f} \in \mathcal{F}_s} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[(1 - \lambda) S(\mathbf{y}_i, \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)) + \lambda S(\mathbf{s}_i, \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)) \right],$$

в задаче классификации (T — температура сглаживания):

$$\mathbf{s}_i = \sigma(\mathbf{f}_t(\mathbf{x}_i)/T), \quad S(\mathbf{y}_i, \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)) = - \sum_{k=1}^c \mathbf{y}_k \log \sigma(\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)), \quad \sigma — \text{softmax},$$

в задаче декодирования (\mathbf{T} — ширина окна):

$$\mathbf{s}_i = [\mathbf{f}_t(\mathbf{x}_i) - \mathbf{T}; \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_i) + \mathbf{T}], \quad S(\mathbf{y}_i, \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)) = \|\operatorname{mean}(\mathbf{y}_i) - \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)\|_2 \mathbb{I}(\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) \notin \mathbf{y}_i).$$

$|\mathcal{F}_t|_C \gg |\mathcal{F}_s|_C, \mathbf{x}^* = \emptyset$ — дистилляция (Хинтон).


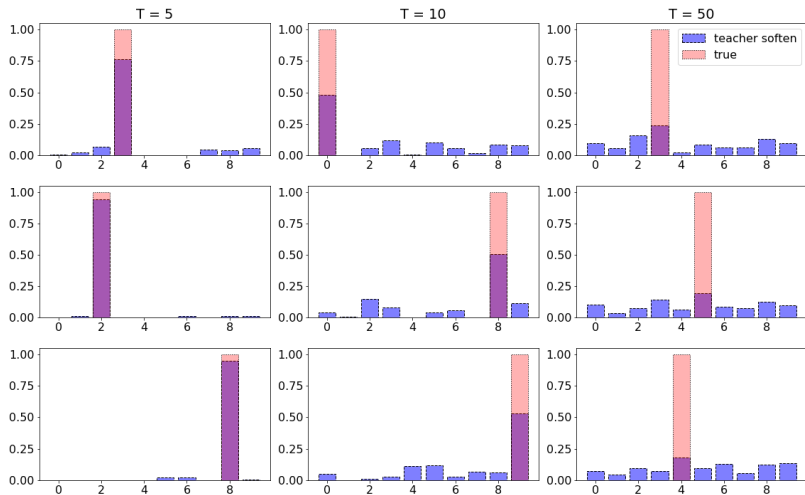
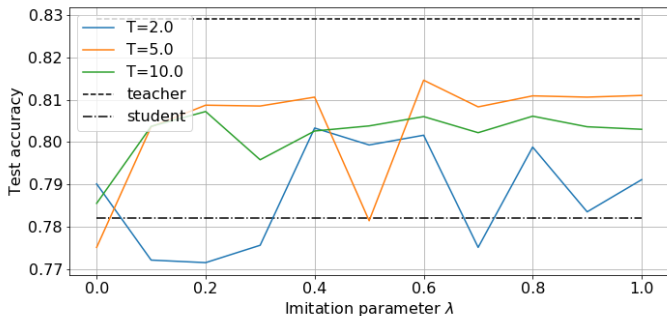
$|\mathcal{F}_t|_C \ll |\mathcal{F}_s|_C, \mathbf{x}^* \neq \emptyset$ — привилегированное обучение (Вапник). 

Иллюстрация сглаженных предсказаний учителя \mathbf{s}_i в зависимости от значения параметра T на примере классификации датасета MNIST.



Качество классификации ученика, обученного методом дистилляции в зависимости от параметров T и λ .



Обучающая выборка — 500 изображений из датасета MNIST, \mathbf{x}^* — исходные изображения, \mathbf{x} — изображения с разрешением в 4 раза меньше, \mathbf{f}_t и \mathbf{f}_s — нейросети с двумя скрытыми слоями из 50 нейронов и ReLU-активациями. Число параметров ученика значительно меньше, чем учителя:

$$|\mathbf{f}_s|_C = 1.5 \cdot 10^3 \ll 1.5 \cdot 10^4 = |\mathbf{f}_t|_C.$$

Заключение

- ▶ Предложен метод построения модели меньшей сложности с использованием привилегированной информации.
- ▶ Предложенный метод позволяет использовать частично доступные данные.
- ▶ Создан фреймворк, позволяющий применять дистилляцию для обучения сторонних моделей.

Публикации по теме:

- ▶ *Выбор оптимального набора признаков из мультикоррелирующего множества в задаче прогнозирования.* Нейчев Р.Г., Катруца А.М., Стрижов В.В., Заводская лаборатория, 2016.
- ▶ *Heterogeneous model selection for multiscale time series forecasting.* R.Neychev, A.Motrenko, E.Gaussier and V.Strijov, Рассматривается редколлегией Journal of Applied Mathematics and Computation.
- ▶ *LHCb trigger streams optimization.* R.Neychev, N.Kazeev, A.Panin et al, CHEP-2016 proceedings.
- ▶ *Machine-Learning-based global particle-identification algorithms at the LHCb experiment.* R.Neychev, D.Derkach et al, Journal of Physics: Conference series, 2017

Сопутствующие результаты:

Разработана и запущена в эксплуатацию автоматическая система прогнозирования энергопотребления ДЦ компании Яндекс.

Backup

Априорные знания — информация о предметной области/ограничениях на решение, не представленная в обучающей выборке в явном виде.

Привилегированная информация — дополнительная информация об объектах обучающей выборки, доступная только на этапе обучения.

Сложность модели $|f|_{C \cdot |C}$ используется оценка числа простейших арифметических операций на единичном входе