

AdaBoost 算法

张腾

2022 年 6 月 19 日

指数损失

设特征空间 $\mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^d$, 类别标记集合 $\mathcal{Y} = \{\pm 1\}$, 对二分类模型 h , 其泛化错误率为

$$\begin{aligned} R(h) &= \mathbb{E}_{(\mathbf{x}, y)}[\mathbb{I}(y \neq \text{sign}(h))] = \int \sum_{y \in \mathcal{Y}} \mathbb{I}(y \neq \text{sign}(h)) \mathbb{P}(\mathbf{x}, y) d\mathbf{x} = \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\sum_{y \in \mathcal{Y}} \mathbb{I}(y \neq \text{sign}(h)) \mathbb{P}(y|\mathbf{x}) \right] \\ &= \mathbb{E}_{\mathbf{x}}[1 - \mathbb{P}(\text{sign}(h)|\mathbf{x})] \end{aligned}$$

故对 $\forall \mathbf{x}$, 贝叶斯最优分类器

$$\text{sign}(h) = \arg \max_{y \in \mathcal{Y}} \mathbb{P}(y|\mathbf{x}) = \begin{cases} +1, & \text{若 } \mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x}) > \mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x}) \\ -1, & \text{其它} \end{cases}$$

现将 0-1 错误率替换为指数损失 $\exp(-yh(\mathbf{x}))$, 即最小化

$$\sum_{y \in \mathcal{Y}} \exp(-yh(\mathbf{x})) \mathbb{P}(y|\mathbf{x}) = \exp(-h(\mathbf{x})) \mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x}) + \exp(h(\mathbf{x})) \mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x})$$

令关于 $h(\mathbf{x})$ 的梯度 $-\exp(-h(\mathbf{x})) \mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x}) + \exp(h(\mathbf{x})) \mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x}) = 0$ 可得

$$\begin{aligned} \exp(h(\mathbf{x})) &= \sqrt{\frac{\mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x})}{\mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x})}} \implies h(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \ln \frac{\mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x})}{\mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x})} \\ &\implies \text{sign}(h) = \begin{cases} +1, & \text{若 } \mathbb{P}(y = +1|\mathbf{x}) > \mathbb{P}(y = -1|\mathbf{x}) \\ -1, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned}$$

这表明若 h 最小化指数损失, 则分类器 $\text{sign}(h)$ 可达到贝叶斯最优错误率, 取指数损失作为 0-1 错误率的替代损失是合理的。

AdaBoost 算法

Boosting 是一族可将弱学习器提升为强学习器的算法, 弱学习器是指泛化性能略优于随机猜测的学习器, 例如在二分类问题上精度略高于 50% 的分类器。

该族算法的工作机制是先在初始训练集上训练出一个基学习器 (base learner), 再根据基学习器的表现对训练样本的权重分布进行调整, 使得先前基学习器预测错的样本在后续受到更多关注, 然后基于

调整后的权重分布训练下一个基学习器；如此重复进行，直至基学习器数目达到事先指定的值 T ，最终将这 T 个基学习器进行加权线性组合。AdaBoost [1] 就是该族算法的著名代表。

设训练数据集 $\mathcal{S} = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i \in [m]}$ ，基学习器 $h_t : \mathcal{X} \mapsto \mathcal{Y}$ ，其加权线性组合为

$$H_T(\mathbf{x}) = \sum_{t \in [T]} \alpha_t h_t(\mathbf{x})$$

在算法的第 t 轮，当前的分类器组合为 $H_t(\mathbf{x}) = H_{t-1}(\mathbf{x}) + \alpha_t h_t(\mathbf{x})$ ，AdaBoost 最小化指数损失

$$\begin{aligned} \sum_{i \in [m]} \exp(-y_i H_t(\mathbf{x}_i)) &= \sum_{i \in [m]} \exp(-y_i H_{t-1}(\mathbf{x}_i) - y_i \alpha_t h_t(\mathbf{x}_i)) \\ &= \sum_{i \in [m]} \exp(-y_i H_{t-1}(\mathbf{x}_i)) \exp(-y_i \alpha_t h_t(\mathbf{x}_i)) \\ &\propto \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \exp(-y_i \alpha_t h_t(\mathbf{x}_i)) \end{aligned}$$

其中 $\mathcal{D}_t(i) \propto \exp(-y_i H_{t-1}(\mathbf{x}_i))$ 是上一轮的分类器组合 H_{t-1} 在样本 (\mathbf{x}_i, y_i) 上的归一化指数损失（在训练数据集上构成一个分布），亦是本轮样本 (\mathbf{x}_i, y_i) 的权重。注意 $y_i, h_t(\mathbf{x}_i) \in \{\pm 1\}$ ，进一步化简有

$$\begin{aligned} \sum_{i \in [m]} \exp(-y_i H_t(\mathbf{x}_i)) &\propto \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \exp(-y_i \alpha_t h_t(\mathbf{x}_i)) \\ &= \exp(-\alpha_t) \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i = h_t(\mathbf{x}_i)) + \exp(\alpha_t) \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i \neq h_t(\mathbf{x}_i)) \\ &= \exp(-\alpha_t) \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) + (\exp(\alpha_t) - \exp(-\alpha_t)) \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i \neq h_t(\mathbf{x}_i)) \\ &= \exp(-\alpha_t) + (\exp(\alpha_t) - \exp(-\alpha_t)) \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i \neq h_t(\mathbf{x}_i)) \end{aligned}$$

其中最后一个等号是因为 \mathcal{D}_t 是一个分布。注意第一项与 h_t 无关，故

$$h_t = \arg \min_h \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i \neq h(\mathbf{x}_i))$$

即基分类器 h_t 的选取应最小化加权错误率，记 $\epsilon_t = \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i) \mathbb{I}(y_i \neq h_t(\mathbf{x}_i))$ ，令关于 α_t 的梯度

$$-\exp(-\alpha_t) + (\exp(\alpha_t) + \exp(-\alpha_t)) \epsilon_t = 0$$

可得

$$\exp(2\alpha_t) = \frac{1}{\epsilon_t} - 1 = \frac{1 - \epsilon_t}{\epsilon_t} \implies \alpha_t = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \epsilon_t}{\epsilon_t}$$

得到 α_t 和 h_t 后，下一轮的样本权重

$$\mathcal{D}_{t+1}(i) \propto \exp(-y_i H_t(\mathbf{x}_i)) \propto \mathcal{D}_t(i) \exp(-y_i \alpha_t h_t(\mathbf{x}_i))$$

伪代码见算法 1。

Algorithm 1: AdaBoost 算法

输入: 训练数据集 $\mathcal{S} = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i \in [m]}$, 基学习算法 \mathcal{L} , 迭代轮数 T

- 1 $\mathcal{D}_1(i) \leftarrow 1/m$; // 初始化权重分布
- 2 for $t \leftarrow 1$ to T do
 - 3 $h_t \leftarrow \mathcal{L}(\mathcal{S}, \mathcal{D}_t)$; $\text{// 在 } \mathcal{S} \text{ 上以权重 } \mathcal{D}_t \text{ 训练 } h_t$
 - 4 $\epsilon_t \leftarrow \mathbb{P}_{(\mathbf{x} \sim \mathcal{D}_t, y)} \mathbb{I}(h_t(\mathbf{x}) \neq y)$; // 计算加权错误率
 - 5 if $\epsilon_t > 0.5$ then break ; $\text{// 若基分类器比随机猜测还差则中止算法}$
 - 6 $\alpha_t \leftarrow \frac{1}{2} \ln \frac{1-\epsilon_t}{\epsilon_t}$; $\text{// 计算 } h_t \text{ 的权重系数}$
 - 7 for $i \leftarrow 1$ to m do
 - 8 if $h_t(\mathbf{x}_i) = y_i$ then
 - 9 $\mathcal{D}_t(i) \leftarrow \mathcal{D}_t(i) \exp(-\alpha_t)$;
 - 10 else
 - 11 $\mathcal{D}_t(i) \leftarrow \mathcal{D}_t(i) \exp(\alpha_t)$;
 - 12 end
 - 13 end
 - 14 $s \leftarrow \sum_{i \in [m]} \mathcal{D}_t(i)$;
 - 15 for $i \leftarrow 1$ to m do $\mathcal{D}_{t+1}(i) \leftarrow \mathcal{D}_t(i)/s$; // 归一化权重
 - 16 end

输出: $\text{sign}(\sum_{t \in [T]} \alpha_t h_t(\mathbf{x}))$

求解异或问题

设基学习器为决策树桩 (decision stump), 即只有一层的决策树, 数据集

$$\mathcal{S} = \left\{ (\mathbf{x}_1 = (+1, 0), y_1 = +1) \quad (\mathbf{x}_2 = (-1, 0), y_2 = +1) \right. \\ \left. (\mathbf{x}_3 = (0, +1), y_3 = -1) \quad (\mathbf{x}_4 = (0, -1), y_4 = -1) \right\}$$

如图 1(a) 所示。由于决策树桩只有一层, 即只能挑选两个特征其中之一并以某一阈值进行分裂, 因此分界面为平行于坐标轴的直线, 最多分对三个样本。

第 1 轮所有样本权重均为 $1/4$, 因此分对任意三个样本即可, 不妨设学到的决策树桩为

$$h_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} -1, & \text{若 } x_1 > -0.5 \\ +1, & \text{其它} \end{cases}$$

如图 1(b) 所示, 此时 \mathbf{x}_1 被分错, \mathbf{x}_2 、 \mathbf{x}_3 、 \mathbf{x}_4 被分对, 故加权错误率和 h_1 的权重系数分别为

$$\epsilon_1 = \frac{1}{4}, \quad \alpha_1 = \frac{1}{2} \ln 3 = \ln \sqrt{3} \approx 0.55$$

权重分布更新

$$\left[\frac{1}{4} \exp(\ln \sqrt{3}), \frac{1}{4} \exp(-\ln \sqrt{3}), \frac{1}{4} \exp(-\ln \sqrt{3}), \frac{1}{4} \exp(-\ln \sqrt{3}) \right] \xrightarrow{\text{归一化}} \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6} \right]$$

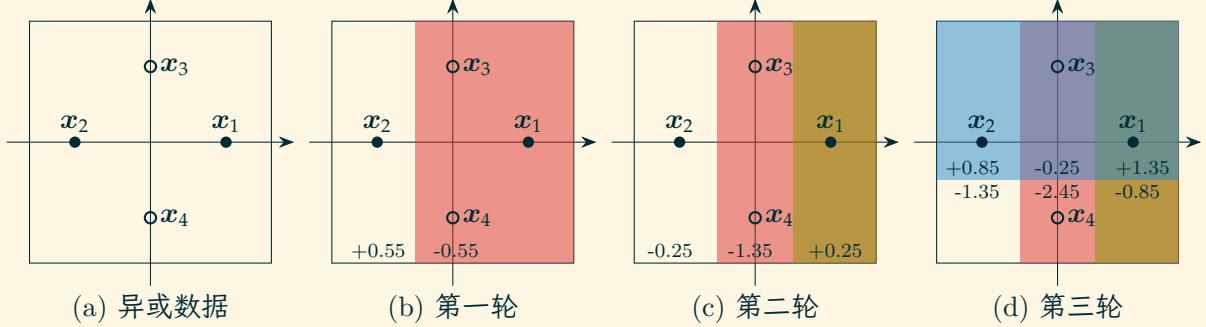


图 1: 用 AdaBoost 求解异或问题

第 2 轮, x_1 权重最高, 决策树桩分对三个样本且必须分对 x_1 , 不妨设学到的决策树桩为

$$h_2(x) = \begin{cases} +1, & \text{若 } x_1 > +0.5 \\ -1, & \text{其它} \end{cases}$$

如图 1(c) 所示, 此时 x_2 被分错, x_1, x_3, x_4 被分对, 故加权错误率和 h_2 的权重系数分别为

$$\epsilon_2 = \frac{1}{6}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} \ln 5 = \ln \sqrt{5} \approx 0.80$$

权重分布更新

$$\left[\frac{1}{2} \exp(-\ln \sqrt{5}), \frac{1}{6} \exp(\ln \sqrt{5}), \frac{1}{6} \exp(-\ln \sqrt{5}), \frac{1}{6} \exp(-\ln \sqrt{5}) \right] \xrightarrow{\text{归一化}} \left[\frac{3}{10}, \frac{1}{2}, \frac{1}{10}, \frac{1}{10} \right]$$

第 3 轮, x_2 权重最高, x_1 次之, x_3 和 x_4 最低, 因此本轮的决策树桩放弃 x_3 和 x_4 其中一个, 分对其余三个即可, 不妨设学到的决策树桩为

$$h_3(x) = \begin{cases} +1, & \text{若 } x_2 > -0.5 \\ -1, & \text{其它} \end{cases}$$

如图 1(d) 所示, 此时 x_3 被分错, x_1, x_2, x_4 被分对, 故加权错误率和 h_3 的权重系数分别为

$$\epsilon_3 = \frac{1}{10}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{2} \ln 9 = \ln 3 \approx 1.10$$

不难发现此时 $\text{sign}(0.55 \cdot h_1 + 0.80 \cdot h_2 + 1.10 \cdot h_3)$ 已可将所有样本都分对。

参考文献

- [1] Robert E. Schapire, Yoav Freund, Peter Bartlett, and Wee Sun Lee. Boosting the margin: A new explanation for the effectiveness of voting methods. In Proceedings of the 14th International Conference on Machine Learning, pages 322–330, Nashville, TN, 1997.