

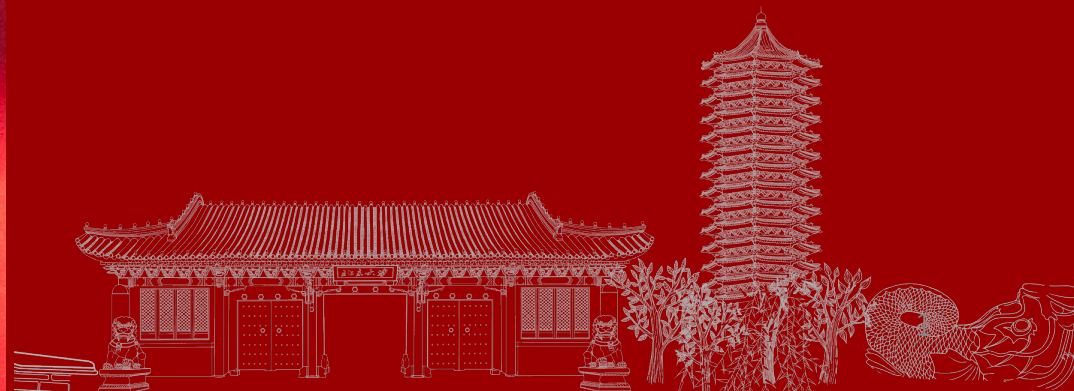
人工智能引论

11. 决策树与随机森林

授课教师

张牧涵

2024年4月1日



目录

- **决策树**

- 什么是决策树
- 划分准则：信息增益、增益率、基尼系数
- 连续属性

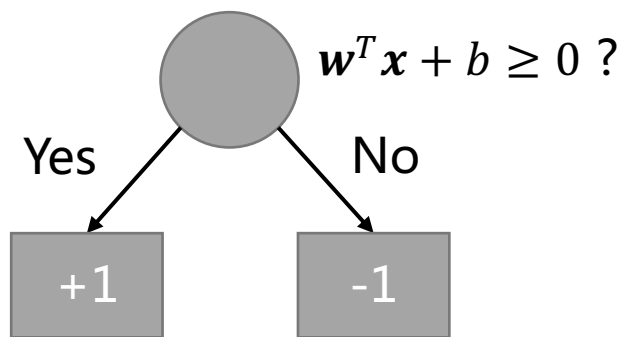
- **回归树**

- 连续标签

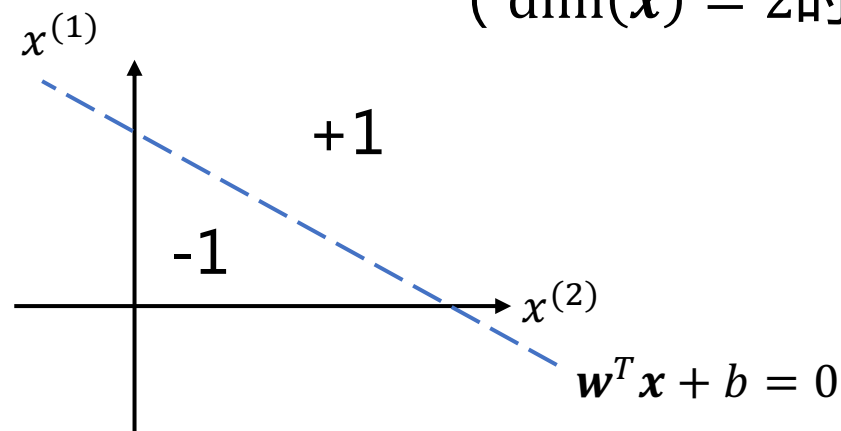
- **随机森林**

- 线性模型： $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b$
 - 在分类任务中，分类逻辑为：
$$\begin{cases} y = +1 & \text{if } f(\mathbf{x}) > 0 \\ y = -1 & \text{if } f(\mathbf{x}) \leq 0 \end{cases}$$

以“树”的形式表示该逻辑



以在特征空间中的分类边界表示该逻辑
($\dim(\mathbf{x}) = 2$ 时)



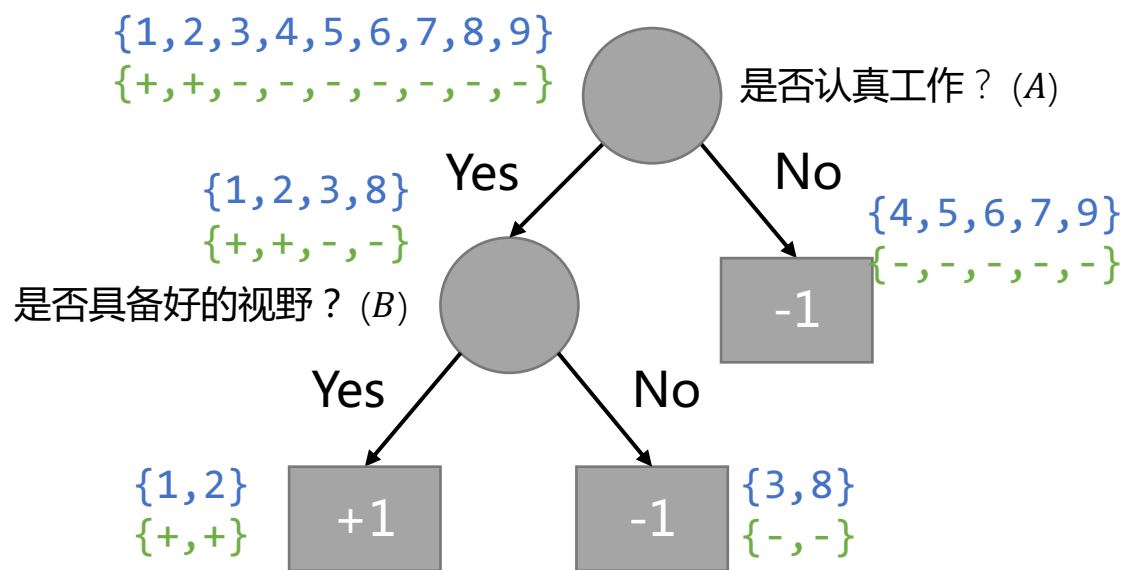
线性模型仅能给出简单（单层）的“树”，或简单的线性分隔超平面——
是否可以设计出具有比 $\text{sign}(\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b)$ 逻辑更复杂的分类模型？

- 决策树是一种常见的机器学习方法
- 定义：决策树是一种树形结构，包含一个根节点、若干个内部节点和若干个叶节点。其中：
 - 根节点包含样本全集
 - 每个非叶节点对应于一个（特征）属性测试；其包含的样本集合根据属性测试的结果被划分到子节点中
 - 每个叶节点对应于决策结果（取多数类）

决策树

- Example :

- 属性集： $\{A: \text{是否认真工作 } (\pm 1), B: \text{是否具备好的视野 } (\pm 1), C: \text{是否喜欢吃香蕉 } (\pm 1)\}$
- 标签：是否是一个好的科学家 ($y \in \{\pm 1\}$)
- 一个可能的决策树：



序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

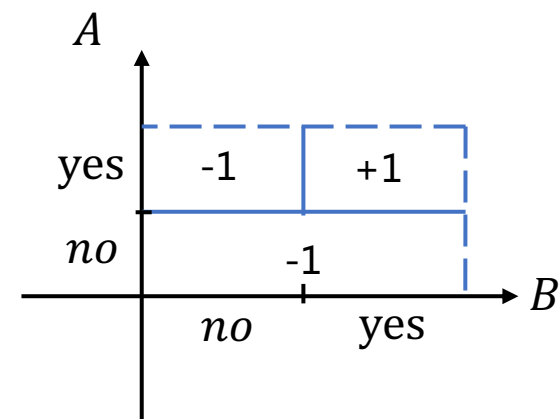
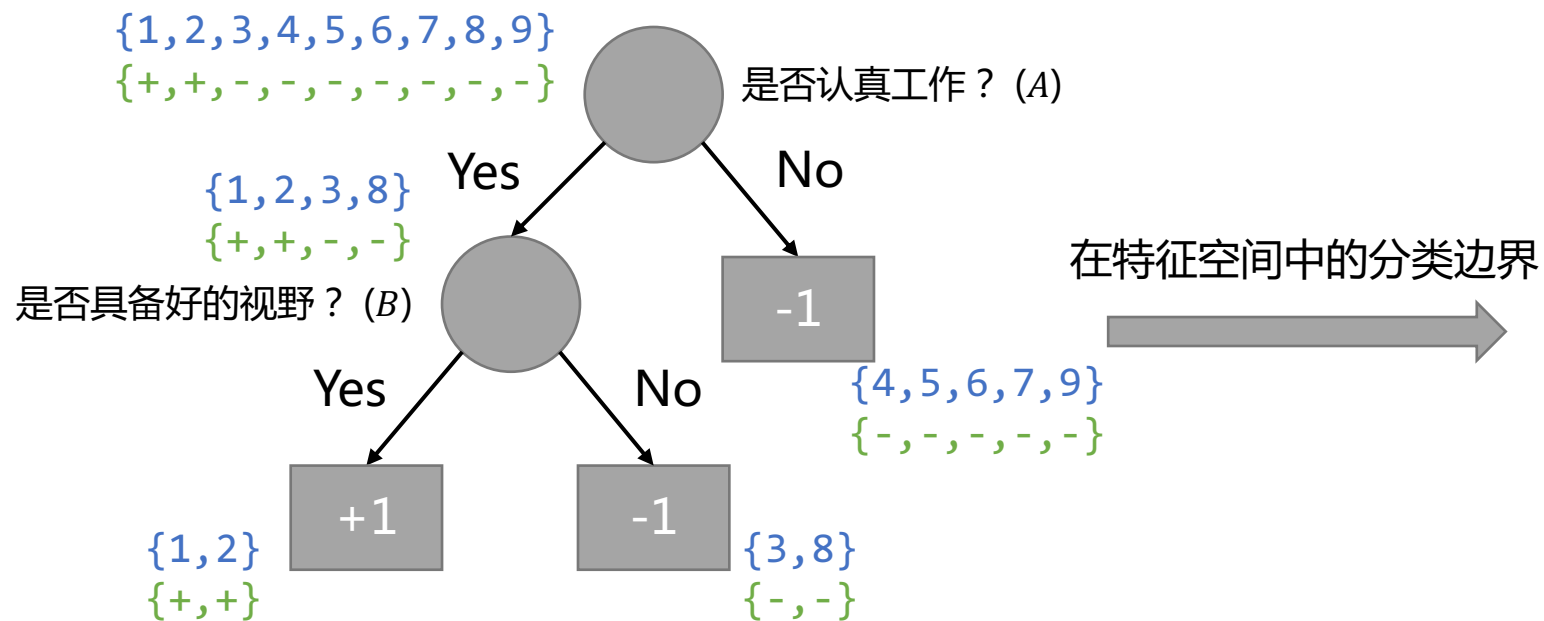
表：训练数据

注：

{1,2...}表示data point序号
{+ -}表示data point标签

决策树

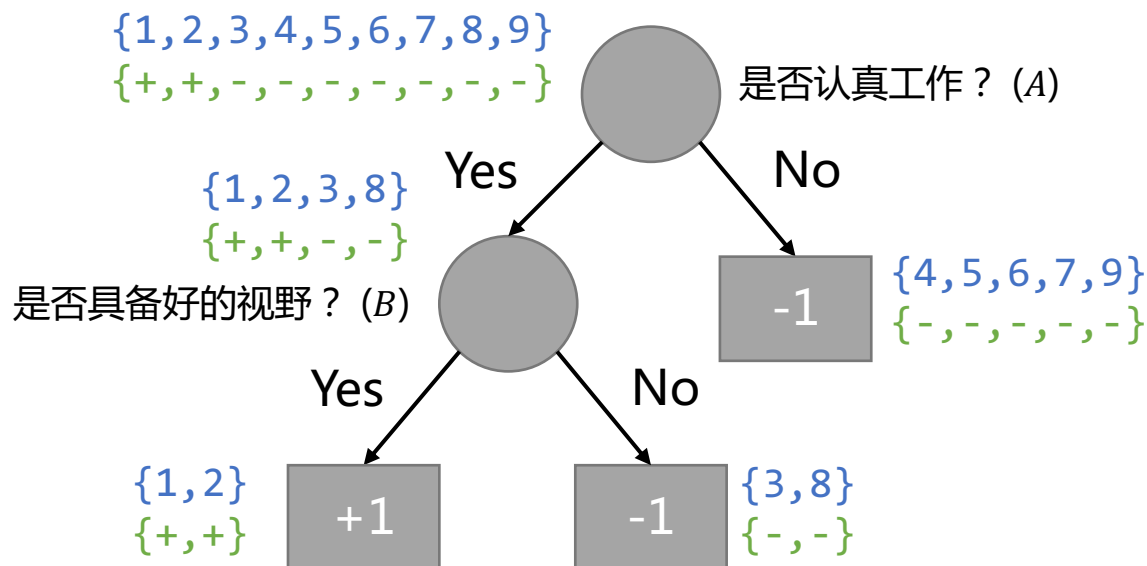
- Example :



决策树

- Example :

- 在该分类树中， A 与 B 均能很好地将训练样本不断划分为标签“纯度 (purity)”更高的子集。

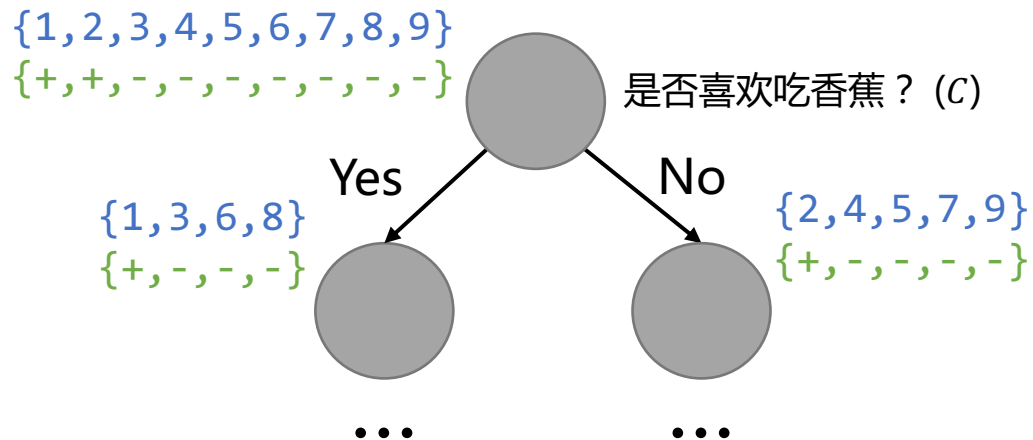


- 理想情况下，每个叶节点只包含同类别的训练样本

决策树

- Example :

- 另一个可能的决策树 :



序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

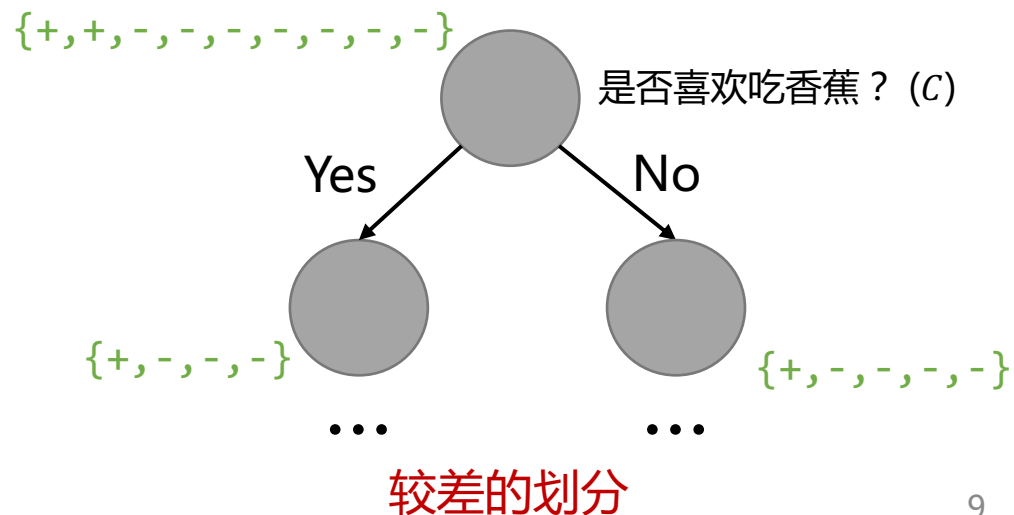
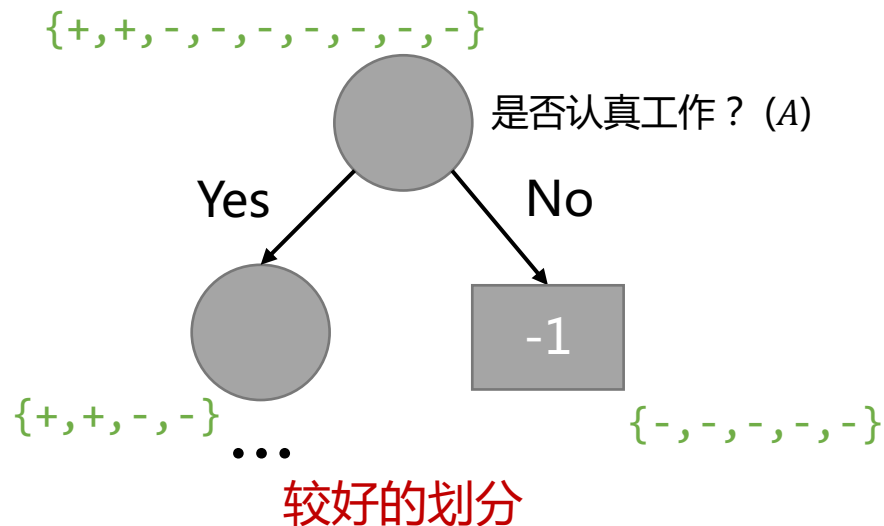
- 在该分类树中, *C*划分前后, 样本集合中的标签“纯度”并没有显著提升
 - *C*属性本身 (是否喜欢吃香蕉) 与预测目标 (是否是一个好的科学家) 没有直接联系

如何选择出最优划分属性?

最优划分属性

- 如何选择出最优划分属性？
 - 一般而言，随着划分的不断进行，我们希望决策树的分支节点所包含的样本子集“纯度”不断增高
 - 若我们可以找到某一个属性 M ，根据属性 M 的不同取值对当前节点包含的样本集合进行划分后，每个子集都尽量只包含同类的标签
 - 则该属性 M 是一个较好的划分属性
 - **训练**：递归地使用当前最好的属性对训练集进行划分，直到纯度达到要求

序号	认真工作 A	视野 B	喜欢香蕉 C	好科学家 y
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×



纯度度量与划分准则

- 如何度量一个集合的纯度？
 - 信息熵 (Information entropy)
 - 基尼指数 (Gini index)
- 如何选择一个好的划分准则？
 - 信息增益 (Information gain)
 - 增益率 (Gain ratio)
 - (属性的) 基尼指数 (Gini index)

熵的基本知识

- 熵是热力学和信息论中的一个重要概念，用于描述系统的混乱程度或者不确定性。在信息论中，熵被定义为一个随机变量的不确定性
 - 注：以下均为信息论中定义的熵
- 对于离散型随机变量 X ，服从概率分布 $p(x)$ ，其信息熵定义为：

$$H(X) = - \sum_x p(x) \log_2 p(x) = \sum_x p(x) \log_2 \frac{1}{p(x)}$$

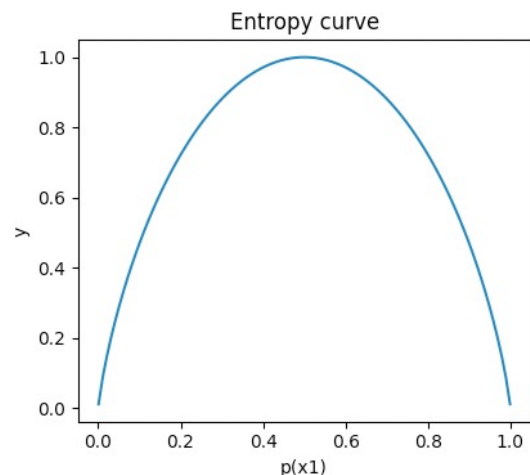
- 定义理解
 - 对于某一事件 $X = x$ ，其发生的概率 $p(x)$ 越小，则包含的“信息量”越大
 - 当 $X = x$ 为一确定事件，即 $p(x) = 1$ 时，其所包含的“信息量”最小（=0）
 - 因此可以用 $\log_2 \frac{1}{p(x)}$ 来描述该事件所包含的“信息量”
 - 信息熵 $H(X)$ 为系统内不同事件（ X 取不同值）的“信息量”的期望值 $\mathbb{E}_x[\log_2 \frac{1}{p(x)}]$

熵的基本知识

$$H(X) = - \sum_x p(x) \log_2 p(x)$$

- 熵的一些基本性质

- $H(X) \geq 0$ 恒成立
- 当且仅当 $p(x)$ 为一个“确定分布”时（即存在一个确定事件概率为1，其他事件概率为0）， $H(X) = 0$
- 由于 $\log_2 x$ 为凹函数，由琴生不等式可以得到： $H(X) = \mathbb{E}_x \left[\log_2 \left(\frac{1}{p(x)} \right) \right] \leq \log_2 \left(\mathbb{E}_x \left[\frac{1}{p(x)} \right] \right) = \log_2 n$ (n 为可能的事件个数)
 - 等号成立条件为 $\forall x, p(x) = \frac{1}{n}$
 - 即，所有事件等概率时，不确定性最大，此时达到最大熵 $\log_2 n$
 - 当 X 仅有两种可能的取值 x_1, x_2 时， $H(X)$ 随着 $p(x_1)$ 的变化曲线
 - 例如抛硬币，当正反两面等可能时不确定性最大



- 联合熵 (Joint Entropy)

- 在离散情况下，一个联合概率分布 $p(x, y)$ 的联合熵定义为：

$$H(X, Y) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(x, y)$$

- 联合熵描述一个联合概率分布的不确定程度。

- 条件熵 (Conditional Entropy)

- 条件熵描述在已知随机变量 X 的条件下随机变量 Y 的不确定性。
- 在离散情况下，且在已知随机变量 X 时，随机变量 Y 的条件熵为：

$$H(Y | X) = \sum_x p(x) H(Y | X = x) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(y | x)$$

- 条件熵 (Conditional Entropy)

$$H(Y | X) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(y | x)$$

- 推导过程：

$$\begin{aligned} H(Y | X) &= \sum_x p(x) H(Y | X = x) \\ &= - \sum_x p(x) \sum_y p(y | x) \log_2 p(y | x) \\ &= - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(y | x) \end{aligned}$$

熵的基本知识

- 条件熵与联合熵具有关系：

$$H(X, Y) = H(Y) + H(X | Y) = H(X) + H(Y | X) = H(Y, X)$$

- 证明

$$\begin{aligned} H(Y) + H(X | Y) &= - \sum_y p(y) \log_2 p(y) - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(x | y) \\ &= - \sum_y \sum_x p(x, y) \log_2 p(y) - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(x | y) \\ &= - \sum_x \sum_y (p(x, y) \log_2 p(y) + p(x, y) \log_2 (\frac{p(x, y)}{p(y)})) \\ &= - \sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(x, y) = H(X, Y) \end{aligned}$$

其中, $\sum_x p(x, y) = p(y)$ (边缘概率定义)

$$p(x | y) = \frac{p(x, y)}{p(y)} \quad (\text{条件概率定义})$$

熵的基本知识

- 互信息 (Mutual Information)

- 在离散情况下，两个随机变量 X 和 Y 的互信息为：

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

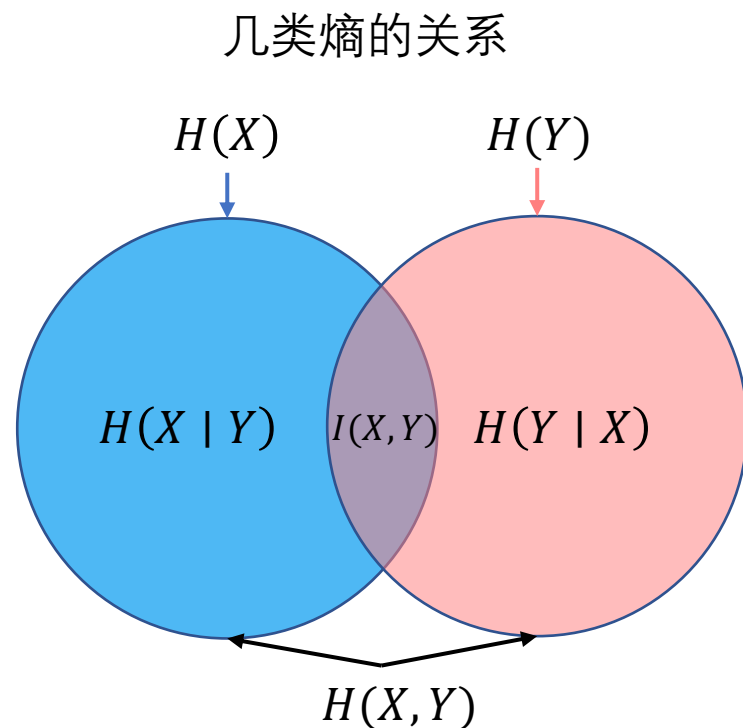
- 结合上式，有：

$$I(X, Y) = H(X) - H(X | Y) = H(Y) - H(Y | X)$$

- 由此可见，互信息描述 Y 中“包含” X
(或 X 中“包含” Y)的信息量

- 结合定义及前式，有若干结论：

- $I(X, Y) = I(Y, X)$
- $I(X, X) = H(X)$
- X, Y 相关性越强， $I(X, Y)$ 越大
- X, Y 相互独立时 ($p(x, y) = p(x)p(y)$)， $I(X, Y) = 0$



划分准则1：信息增益

- 用信息熵度量样本集合 D 的标签纯度：

$$H(D) = - \sum_{k \in [K]} \frac{|D_k|}{|D|} \log \frac{|D_k|}{|D|}$$

- $|\cdot|$ 表示集合元素数目， D_k 表示集合 D 中标签为 k 的子集， $[K]$ 为标签集（ K 分类）
- $H(D)$ 即为经验分布下标签的信息熵
- $H(D)$ 越低，样本集合 D 的纯度越高，当 D 中样本均属某一类 k 时， $H(D) = 0$

$\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
 $\{+, +, -, -, -, -, -, -, -\}$



$H(D) = ??$

划分准则1：信息增益

- 用信息熵度量样本集合 D 的纯度： $H(D) = - \sum_{k \in [K]} \frac{|D_k|}{|D|} \log \frac{|D_k|}{|D|}$
- 属性 A 对集合 D 的信息增益：

$$g(D, A) = H(D) - \sum_{i \in [m]} \frac{|D^{A=a_i}|}{|D|} H(D^{A=a_i})$$

- 其中，属性 A 的可能取值为 $\{a_i \mid i \in [m]\}$ ， $D^{A=a_i}$ 表示集合 D 中样本属性 A 取 a_i 的子集。
- 若记随机变量 Y 为标签、随机变量 X 为属性 A ，则：
 - 第二项为标签相对于属性的条件熵： $\sum_{i \in [m]} \frac{|D^{A=a_i}|}{|D|} H(D^{A=a_i}) = H(Y \mid X)$
 - 信息增益为标签与属性之间的互信息： $g(D, A) = I(Y, X)$
- 一般情况下，信息增益越大，则使用该属性进行划分所得到的“纯度提升”越大

划分准则1：信息增益

- 划分准则：选择信息增益最大的属性进行划分
- 对于该例，在根节点选择属性时：

$$D = \{\text{data}_1 \sim \text{data}_9\}$$

$$H(D) = \left(-\frac{2}{9}\log\frac{2}{9}\right) + \left(-\frac{7}{9}\log\frac{7}{9}\right) = 0.764$$

$$\begin{aligned} g(D, A) &= 0.764 - \left(\frac{4}{9}\left(-\frac{2}{4}\log\frac{2}{4} - \frac{2}{4}\log\frac{2}{4}\right) + \frac{5}{9}\left(-\frac{5}{5}\log\frac{5}{5} - 0\right)\right) \\ &= 0.764 - (0.444 + 0) \\ &= \mathbf{0.320} \end{aligned}$$

$$g(D, B) = 0.225$$

$$g(D, C) = 0.0026$$

序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

- 因此选择属性*A*作为划分属性。

划分准则1：信息增益

- 思考：若将“序号”（ I ）也列为属性之一.....

- 划分后的平均信息熵为0（每一个 I 的取值仅有一个样本），信息增益最高！
 - $g(D, I) = 0.764 - 0 = 0.764$
- 然而此时的决策树显然不具备任何泛化能力！
- 信息增益准则倾向于选择具备更多取值可能的属性
- 如何解决？

序号 I	认真工作 A	视野 B	喜欢香蕉 C	好科学家 y
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

划分准则2：增益率

- 解决方法：采用增益率作为划分准则。
- 属性A的增益率定义为：

$$g_R(D, A) = \frac{g(D, A)}{H_A(D)}$$

序号	认真工作A	视野B	喜欢香蕉C	好科学家y
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

- 其中， $H_A(D) = -\sum_{i \in [m]} \frac{|D^{A=a_i}|}{|D|} \log \frac{|D^{A=a_i}|}{|D|}$ 描述属性A本身的熵（不确定程度）
- $H_A(D)$ 不同于 $H(D^{A=a_i})$ ！前者以A作为“标签”衡量A的纯度，后者还是在衡量标签y本身的纯度（在 $D^{A=a_i}$ 上）
- 当属性A具备较多的取值时，其本身在D上的不确定性较高， $H_A(D)$ 较大，使得对应增益率较低；一定程度上缓解了属性本身带来的高信息增益
- 在候选属性集合F中选取使得划分后增益率最高的属性，即：

$$A_* = \operatorname{argmax}_{A \in F} g_R(D, A)$$

划分准则2：增益率

在上述例子中，

$$g(D, I) = 0.764 > g(D, A) = 0.320$$

然而

$$g_R(D, I) = \frac{0.764}{(-\frac{1}{9} \log \frac{1}{9}) * 9} = 0.241$$

$$g_R(D, A) = \frac{0.320}{(-\frac{4}{9} \log \frac{4}{9} - \frac{5}{9} \log \frac{5}{9})} = 0.323$$

$$g_R(D, I) = 0.241 < g_R(D, A) = 0.323$$

序号 <i>I</i>	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

- 根据增益率划分，仍旧应当选择A作为最优划分属性
- 增益率准则对可取值数目较少的属性有所偏好

划分准则3：基尼指数

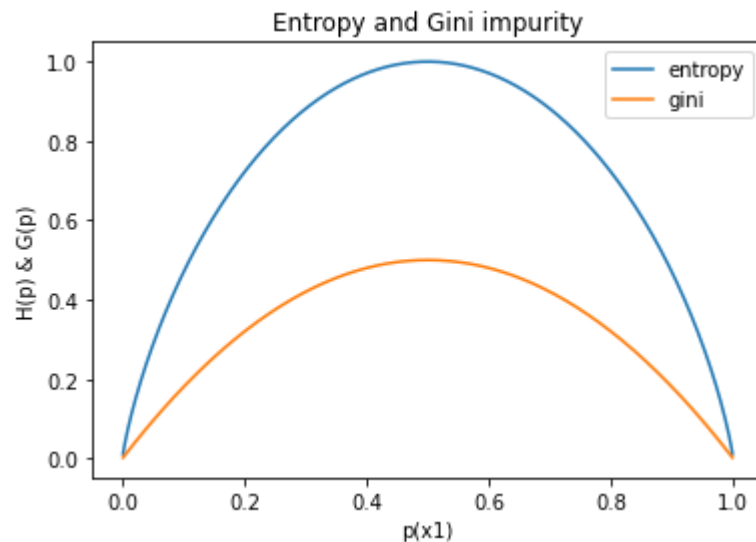
- 基尼指数 (Gini index)：另一种度量样本集合 D 纯度的方法

$$\text{Gini}(D) = \sum_{k \in [K]} \frac{|D_k|}{|D|} \left(1 - \frac{|D_k|}{|D|} \right) = 1 - \sum_{k \in [K]} \left(\frac{|D_k|}{|D|} \right)^2$$

- $|\cdot|$ 表示集合元素数目， D_k 表示集合 D 中标签为 k 的子集， $[K]$ 为标签集（ K 分类）

$$\text{Gini}(D) \approx \sum_{k \in [K]} P(y = k)(1 - (P(y = k)))$$

- 反映随机抽取2个样本，其类别不一样的概率
- 类似于信息熵，当只有2种可能取值时，基尼指数和信息熵随取值概率的变化曲线如右图



划分准则3：基尼指数

- 集合 D 的基尼指数：

$$\text{Gini}(D) = \sum_{k \in [K]} \frac{|D_k|}{|D|} \left(1 - \frac{|D_k|}{|D|}\right) = 1 - \sum_{k \in [K]} \left(\frac{|D_k|}{|D|}\right)^2$$

- 属性 A 对集合 D 的基尼指数：

$$\text{Gini}(D, A) = \sum_{i \in [m]} \frac{|D^{A=a_i}|}{|D|} \text{Gini}(D^{A=a_i})$$

- 其中，属性 A 的可能取值为 $\{a_i \mid i \in [m]\}$ ， $D^{A=a_i}$ 表示集合 D 中样本属性 A 取 a_i 的子集
- 在候选属性集合 F 中选取使得划分后基尼指数最小的属性(平均纯度最大)，即：

$$A_* = \operatorname{argmin}_{A \in F} \text{Gini}(D, A)$$

划分准则3：基尼指数

- 对于该例，在根节点时选择属性时：

$$D = \{\text{data}_1 \sim \text{data}_9\}$$

$$\text{Gini}(D) = 1 - \left(\frac{2}{9}\right)^2 - \left(\frac{7}{9}\right)^2 = 0.346$$

$$\begin{aligned}\text{Gini}(D, A) &= \left(\frac{4}{9} \left(1 - \left(\frac{2}{4}\right)^2 - \left(\frac{2}{4}\right)^2 \right) + \frac{5}{9} \left(1 - \left(\frac{5}{5}\right)^2 \right) \right) \\ &= 0.222 + 0 \\ &= \mathbf{0.222}\end{aligned}$$

$$\text{Gini}(D, B) = 0.267$$

$$\text{Gini}(D, C) = 0.344$$

- 因此选择属性A作为划分属性

序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×

属性的离散到连续

- 数据的属性可以连续吗？
 - 是否认真工作 -> 每天工作时长

序号	认真工作 A	视野 B	喜欢香蕉 C	好科学家 y
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×



序号	平均每天 工作时长 A_c	视野 B	喜欢香蕉 C	好科学家 y
1	10	√	√	√
2	8	√	×	√
3	0	×	√	×
4	0	×	×	×
5	4	√	×	×
6	2	×	√	×
7	6	√	×	×
8	0	×	√	×
9	4	√	×	×

属性的离散到连续

- 使用离散化技术：二分法

- 假设连续属性 A 在训练样本集 D 上有 m 个取值，升序排序为 $\{a^1, a^2, \dots, a^m\}$
- 可建立 $m - 1$ 个候选划分点，合集为 $T_A = \{\frac{a^i + a^{i+1}}{2} | i = 1, \dots, m - 1\}$
- 选取一个划分点，将属性 A 二值化
- 对于每个候选属性，选择最大化信息增益的候选划分点作为实际划分点，得到该候选属性的信息增益；再选取信息增益最大的候选属性

$$A_*, t_* = \operatorname{argmax}_{A \in F, t \in T_A} g(D, A, t)$$

$$g(D, A, t) = H(D) - \left(\frac{|D^{A,t,+}|}{|D|} H(D^{A,t,+}) + \frac{|D^{A,t,-}|}{|D|} H(D^{A,t,-}) \right)$$

- 其中， $D^{A,t,+}$ 表示集合 D 根据属性 A 按 t 二分后取正的子集

序号	平均每天工作时长 A_c	视野 B	喜欢香蕉 C	好科学家 y
1	10	√	√	√
2	8	√	×	√
3	0	×	√	×
4	0	×	×	×
5	4	√	×	×
6	2	×	√	×
7	6	√	×	×
8	0	×	√	×
9	4	√	×	×

属性的离散到连续

- 以要求分为2类为例：只选取一个候选点，连续属性转为 $\{\pm 1\}$ 的离散属性。
- 如右图， A_c 有6个取值 $\{0,2,4,6,8,10\}$ ，5个候选划分点 $\{1,3,5,7,9\}$
- 当取划分点=3时，二分为5正4负
- 当取划分点=7时，取得最大信息增益

$$D = \{\text{data}_1 \sim \text{data}_9\},$$

$$H(D) = \left(-\frac{2}{9}\log\frac{2}{9}\right) + \left(-\frac{7}{9}\log\frac{7}{9}\right) = 0.764$$

$$g(D, A, t = 3)$$

$$= 0.764 - \left(\frac{5}{9} \left(-\frac{2}{5}\log\frac{2}{5} - \frac{3}{5}\log\frac{3}{5} \right) + \frac{4}{9} \left(-\frac{4}{4}\log\frac{4}{4} - 0 \right) \right) \\ = 0.225$$

$$g(D, A, t = 7)$$

$$= 0.764 - \left(\frac{2}{9} \left(-\frac{2}{2}\log\frac{2}{2} - 0 \right) + \frac{7}{9} \left(-\frac{7}{7}\log\frac{7}{7} - 0 \right) \right) = \mathbf{0.764}$$

序号	平均每 天工作 时长 A_c	认真工 作 $A_{t=3}$ (取 划分点3)	认真工 作 $A_{t=7}$ (取 划分点7)	好科学 家 y
1	10	√	√	√
2	8	√	√	√
3	0	×	×	×
4	0	×	×	×
5	4	√	×	×
6	2	×	×	×
7	6	√	×	×
8	0	×	×	×
9	4	√	×	×

标签的离散到连续

- 数据的标签可以连续吗？
 - 是否是一个好的科学家 -> 一个研究水平多高的科学家

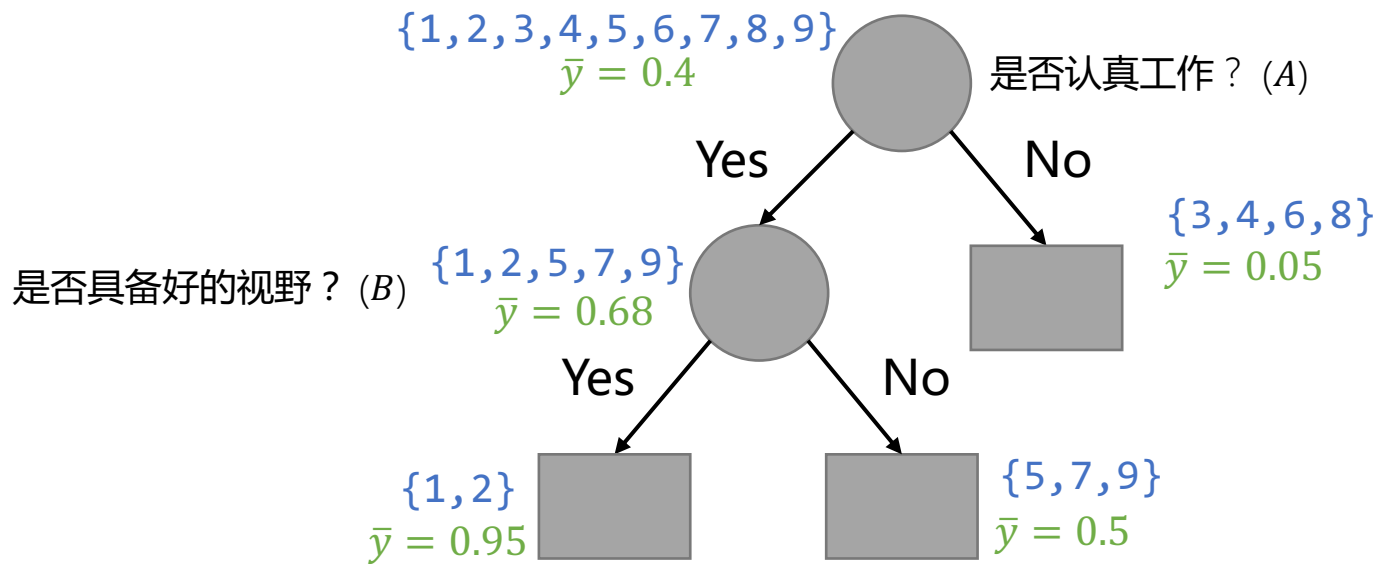
序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	好科学家 <i>y</i>
1	√	√	√	√
2	√	√	×	√
3	√	×	√	×
4	×	×	×	×
5	×	√	×	×
6	×	×	√	×
7	×	√	×	×
8	√	×	√	×
9	×	√	×	×



序号	认真工作 <i>A</i>	视野 <i>B</i>	喜欢香蕉 <i>C</i>	科学家水平 评分 <i>y</i>
1	√	√	√	1
2	√	√	×	0.9
3	×	√	√	0.1
4	×	×	×	0
5	√	×	×	0.5
6	×	×	√	0
7	√	×	×	0.5
8	×	√	√	0.1
9	√	×	×	0.5

标签的离散到连续

- 数据的标签可以连续吗？
 - 是否是一个好的科学家 -> 一个研究水平多高的科学家
- 分类问题 -> 回归问题
- 决策树 -> 回归树



序号	认真工作 A	视野 B	喜欢香蕉 C	科学家水平 打分 y
1	√	√	√	1
2	√	√	×	0.9
3	×	√	√	0.1
4	×	×	×	0
5	√	×	×	0.5
6	×	×	√	0
7	√	×	×	0.5
8	×	√	√	0.1
9	√	×	×	0.5

注： {1,2...}表示data point序号 \bar{y} 表示该节点预测的水平打分均值

标签的离散到连续

- 数据的标签可以连续吗？
 - 是否是一个好的科学家 -> 一个研究水平多高的科学家
- 分类问题 -> 回归问题
- 决策树 -> 回归树

	离散标签（分类问题）	连续标签（回归问题）
离散属性	决策树	回归树
连续属性	决策树+离散化技术	回归树+离散化技术

- 保留决策树的结构
- 通过 **L2 Loss** 重新定义集合 D 的纯度

- 离散：信息熵、基尼指数
- 连续：

样本均值 $\bar{y}_D = \frac{1}{|D|} \sum_{j \in D} y_j$

样本方差（未除以 $|D|$ ） $L(D) = \sum_{j \in D} (y_j - \bar{y}_D)^2$ $L(D, A) = \sum_{i \in [m]} L(D^{A=a_i})$

$$A_* = \operatorname{argmin}_{A \in F} L(D, A)$$

- 其中，属性 A 的可能取值为 $\{a_i \mid i \in [m]\}$ ， $D^{A=a_i}$ 表示集合 D 中样本属性 A 取 a_i 的子集。 \bar{y}_D 作为某节点标签的平均值，也表示该节点的预测标签。

回归树

- 对于该例，在根节点选择属性时： $D = \{\text{data}_1 \sim \text{data}_9\}$

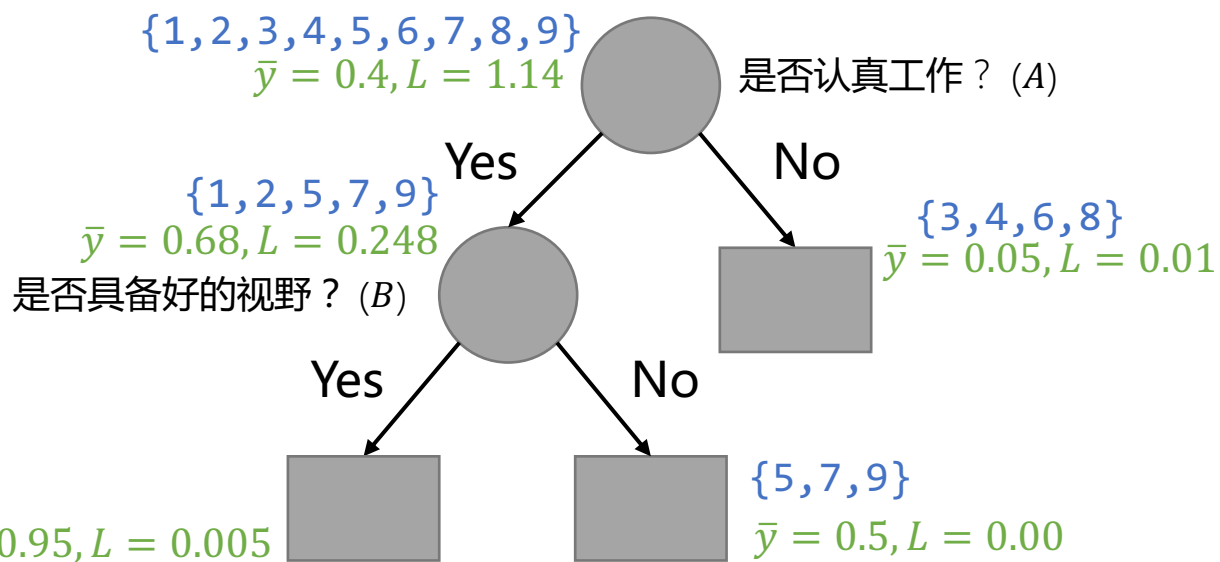
$$L(D) = (1 - 0.4)^2 + (0.9 - 0.4)^2 + 3 \times (0.5 - 0.4)^2 + 2 \times (0.1 - 0.4)^2 + 2 \times (0 - 0.4)^2 = 1.14$$

$$L(D, A) = (1 - 0.68)^2 + (0.9 - 0.68)^2 + 3 \times (0.5 - 0.68)^2 + 2 \times (0.1 - 0.05)^2 + 2 \times (0 - 0.05)^2 = \mathbf{0.258}$$

$$L(D, B) = 1.0275$$

$$L(D, C) = 1.068$$

- 因此选择属性A作为划分属性。



注：

$\{1, 2, \dots\}$ 表示data point序号

\bar{y} 表示该节点预测的水平打分， L 表示Loss值

序号	认真工作 A	视野 B	喜欢香蕉 C	科学家水平打分 y
1	√	√	√	1
2	√	√	×	0.9
3	×	√	√	0.1
4	×	×	×	0
5	√	×	×	0.5
6	×	×	√	0
7	√	×	×	0.5
8	×	√	√	0.1
9	√	×	×	0.5

树模型训练伪代码

Algorithm 1 How to build a decision tree

Input: Dataset D , Feature set \mathcal{F}

Output: Root Node $T = \text{BUILD_DECISION_TREE}(D, \mathcal{F})$

```
1: function BUILD_DECISION_TREE( $D, \mathcal{F}$ )
2:   if  $\mathcal{F} = \emptyset$  Or  $|D| = 1$  then
3:      $S \leftarrow \text{PURITY\_SCORE}(D)$ 
4:     return Leaf_Node  $N = \text{MAKE\_NODE}(D, S, \text{NULL})$ 
5:   end if
6:    $S_{\text{best}} \leftarrow \text{NULL}, A_{\text{best}} \leftarrow \text{NULL}$ 
7:   for  $A \in \mathcal{F}$  do
8:      $S = \text{PURITY\_SCORE}(D, A)$ 
9:      $(S_{\text{best}}, A_{\text{best}}) \leftarrow \text{BETTER\_SCORE}(S_{\text{best}}, S, A_{\text{best}}, A)$ 
10:  end for
11:   $\text{Array\_D} \leftarrow \text{PARTITION\_DATASET}(D, A_{\text{best}})$ 
12:  Node  $N = \text{MAKE\_NODE}(D, S_{\text{best}}, A_{\text{best}})$ 
13:  for  $i = 0 \rightarrow |\text{Array\_D}|$  do
14:     $T \leftarrow \text{BUILD\_DECISION\_TREE}(\text{Array\_D}[i], \mathcal{F} - A_{\text{best}})$ 
15:    Node  $N = \text{ADD\_CHILD}(N, T)$ 
16:  end for
17:  return  $N$ 
18: end function
19:
20: function PURITY_SCORE( $D, A$ )
21:   return Corresponding Purity_Score formula with  $D$  and  $A$  (omited if NULL)
22: end function
```

终止条件：属性集 F 为空，或只剩一个样本
也可以用一些提前终止条件，如深度达到某一上限、或纯度分数好于某一阈值

遍历所有当前属性集中的属性，计算纯度分数，选择分数最好的属性 A

按选择的属性划分样本集 D ，在每个子集 $D^{A=a_i}$ 上递归使用 $F - A$ 构建决策树

树模型训练伪代码

```
24: function BETTER_SCORE( $S_{best}, S, A_{best}, A$ )
25:   if  $S_{best} = NULL$  then
26:     return ( $S, A$ )
27:   end if
28:   if  $S$  is better than  $S_{best}$  according to Purity_Score formula then
29:     return ( $S, A$ )
30:   else
31:     return ( $S_{best}, A_{best}$ )
32:   end if
33: end function
34:
35: function PARTITION_DATASET( $D, A$ )
36:   return Array of  $D$  partitioned by  $A$ 
37: end function
38:
39: function MAKE_NODE( $D, S, A$ )
40:   return Node  $N$  with current dataset  $D$ , Purity_Score  $S$ , partition feature  $A$ (omited if NULL)
41: end function
42:
43: function ADD_CHILD( $N, T$ )
44:   return Node  $N$  with child  $T$ 
45: end function
```

集成学习(ensemble learning)

- 集成学习 = 多个个体学习器 + 结合策略
- 个体学习器
 - 例子：线性模型，决策树
 - 要求：“好而不同”
- 例子：随机森林

随机森林(Random forest)

- 个体学习器：决策树
- 结合策略：样本扰动+属性扰动
- 步骤：
 - 对于每一个决策树，对训练集进行随机采样得到一个独立的训练集（样本扰动）
 - 对于每一个决策树，只选择数据集中的一部分样本特征进行子树划分训练（属性扰动）
 - 最后，用所有训练好的决策树的平均预测（如多数类）作为对测试样本的输出

- **决策树**

- 比线性模型决策逻辑更复杂：非线性分类边界
- 划分准则：信息增益、增益率、基尼系数
- 连续属性（离散化，二分法）
- 连续标签（回归树，L2 Loss衡量纯度）
- 随机森林（集成多棵决策树）

- **下节课：神经网络**

谢谢



北京大学
PEKING UNIVERSITY

