机器学习

Machine learning

第九章 概率图模型

Probabilistic Graphical Model

授课人：周晓飞
zhouxiaofei@iie.ac.cn
2020-12-05

第九章 概率图模型

9.1 有向图模型：贝叶斯网络

9.2 无向图模型：马尔可夫随机场

9.3 学习与推断

9.4 近似推断

9.5 实例模型

第九章 概率图模型

9.1 有向图模型：贝叶斯网络

9.2 无向图模型：马尔可夫随机场

9.3 学习与推断

9.4 近似推断

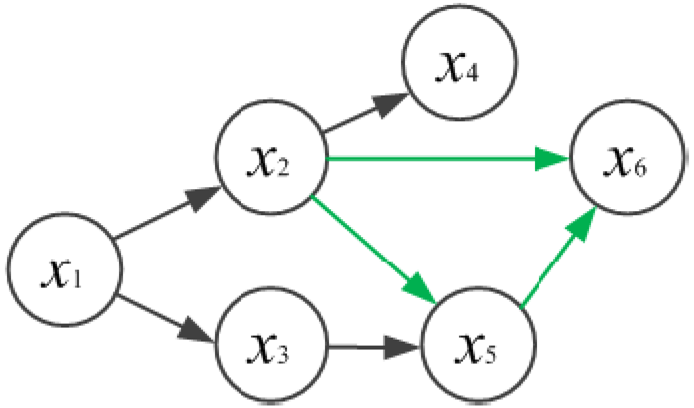
9.5 实例模型

有向图模型：贝叶斯网络

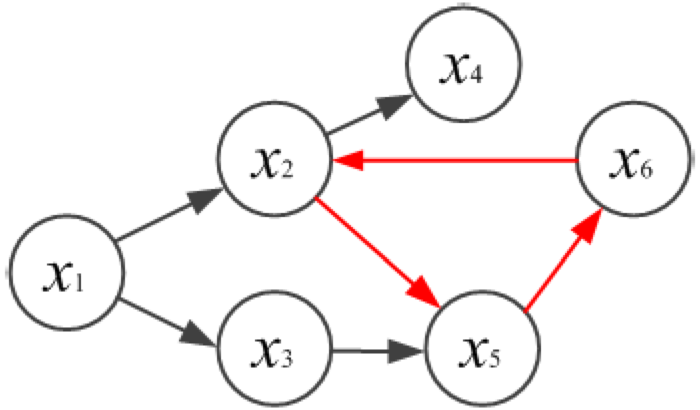
图结构：有向无环图（DAG）

结点：一个或一组随机变量。

边：随机变量之间的单向、直接影响（加班 → 生病）。



YES



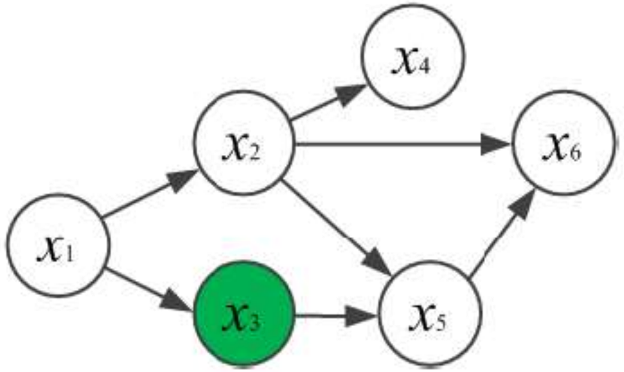
NO

有向图模型：贝叶斯网络

图结构：有向无环图（DAG）

结点：一个或一组随机变量。

边：随机变量之间的单向、直接影响（加班 → 生病）。



- 当前结点：x_3
- 父结点：$\{x_1\}$
- 子结点：$\{x_5\}$
- 祖先结点：$\{x_1\}$
- 后代结点：$\{x_5, x_6\}$
- 马尔可夫毯：$\{x_1, x_2, x_5\}$

祖先：所有长辈节点

后代：所有后继结点

贝叶斯网 MB：子结点、父结点、子结点的父节点

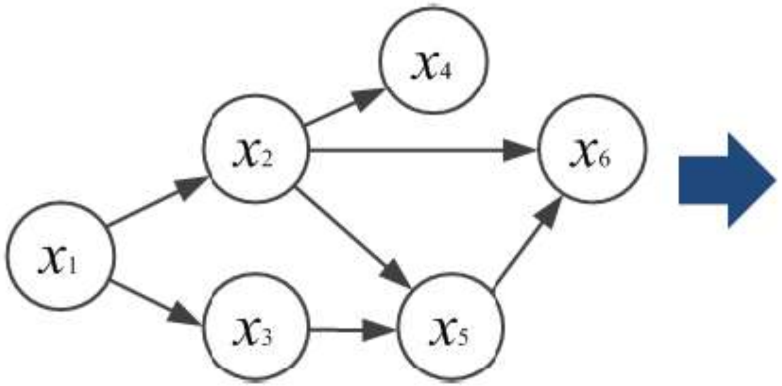
有向图模型：贝叶斯网络

联合概率分布

分解形式：

$$P(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i \mid \mathbf{x}_{\pi i})$$

其中，$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$；$\mathbf{x}_{\pi i}$ 为 x_i 所有父结点构成的集合。

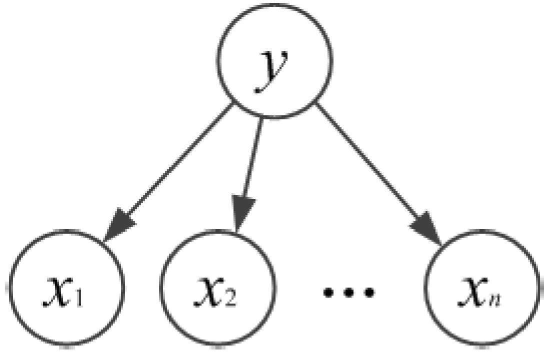


$$\begin{aligned}&P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)\\ = &P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_1)P(x_4|x_2)\\ &P(x_5|x_2, x_3)P(x_6|x_2, x_5)\end{aligned}$$

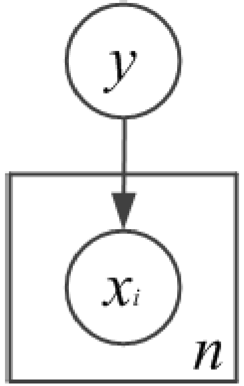
有向图模型：贝叶斯网络

示例：朴素贝叶斯

$\mathbf{x}=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$ 为特征向量，y 是类别标签。



普通变量关系图

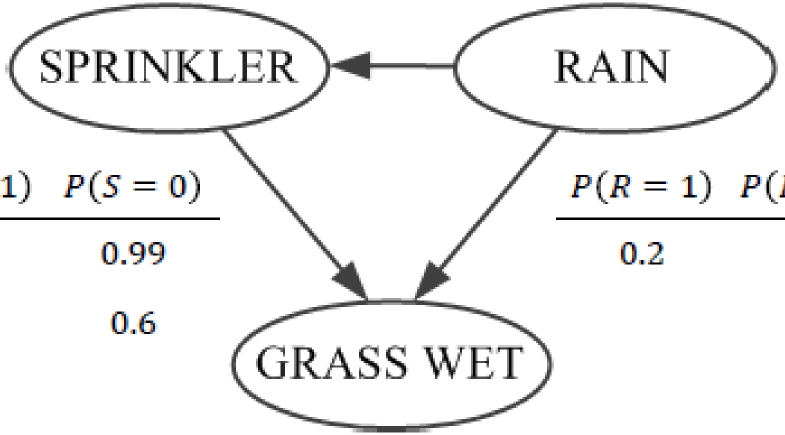


盘式记法

$$P(\mathbf{x},y)=P(y)\prod_{i=1}^{n}P(x_i\,|\,y)$$

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

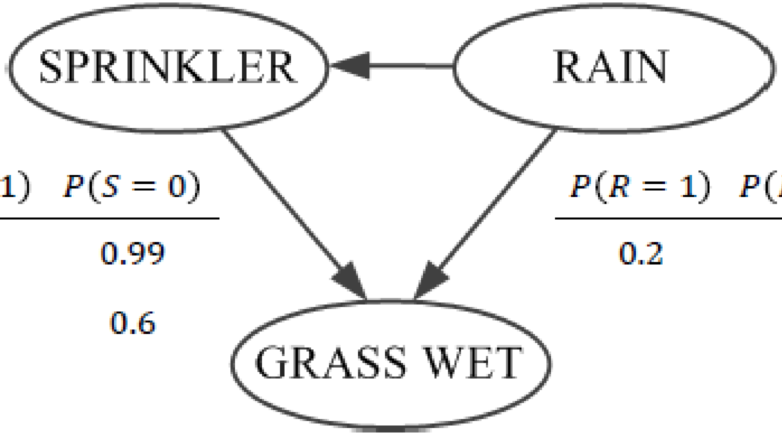
S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

- 同时观测到下雨、给草坪浇水、草坪湿的概率有多大?
- 当已知不下雨时，观测到草坪湿的概率有多大?
- 当观测到草坪湿以后，推测下雨的概率有多大?
- 当观测到草坪湿以后，推测给草坪浇过水的概率有多大?

。。。 。。。

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

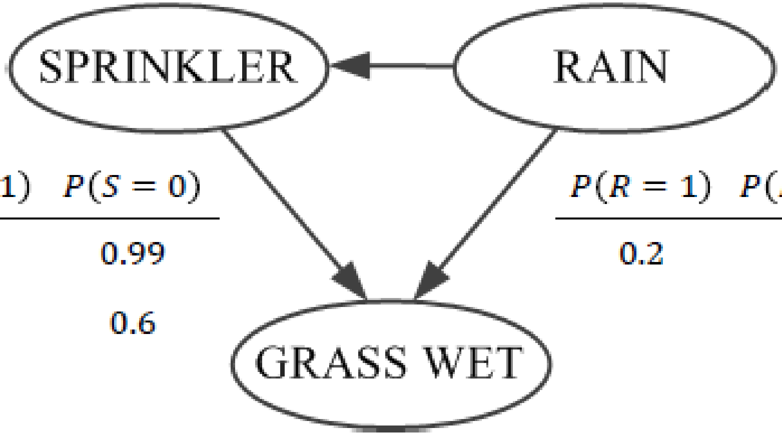
、

S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

$$P(G,S,R) = P(G \mid S,R)P(S \mid R)P(R)$$

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

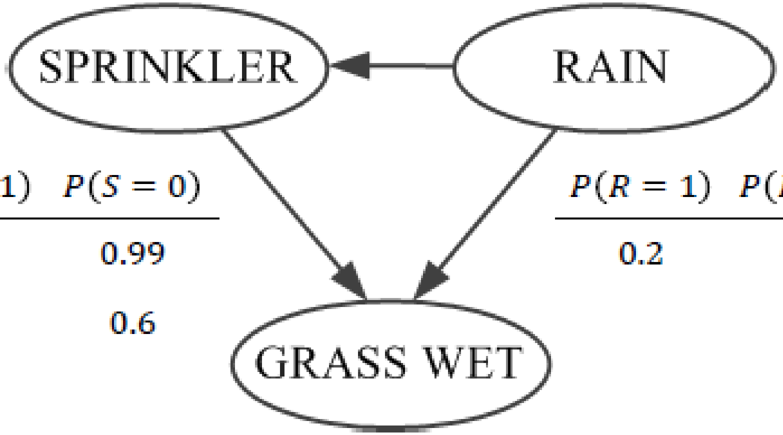
$$P(G,S,R)=P(G\mid S,R)P(S\mid R)P(R)$$

同时观测到下雨、给草坪浇水、草坪湿的概率有多大?

$$\begin{aligned}
&P(G=1,S=1,R=1)\\
&=P(G=1|S=1,R=1)P(S=1|R=1)P(R=1)\\
&=0.99\times 0.01\times 0.2=0.00198
\end{aligned}$$

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

$$P(G,S,R)=P(G\mid S,R)P(S\mid R)P(R)$$

当已知不下雨时，观测到草坪湿的概率有多大?

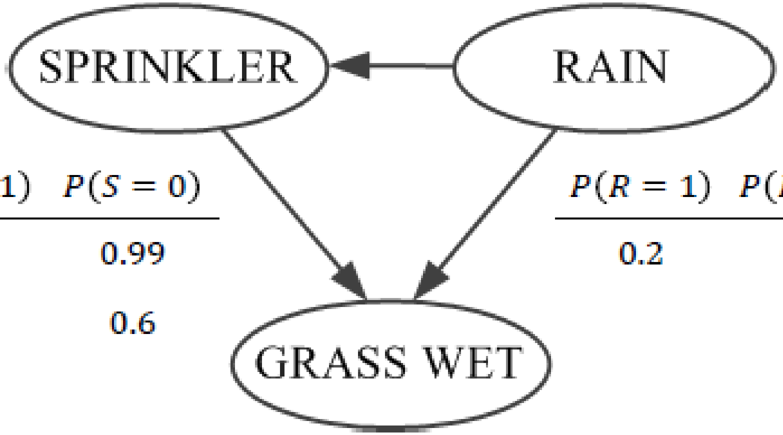
$$P(G=1|R=0)$$

$$=\frac{P(G=1,R=0)}{P(R=0)}=\frac{\sum_{S\in\{1,0\}}P(G=1,S,R=0)}{P(R=0)}$$

$$=\frac{0.288+0}{0.8}=0.36$$

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

$$P(G,S,R)=P(G\mid S,R)P(S\mid R)P(R)$$

当观测到草坪湿以后，推测下雨的概率有多大？

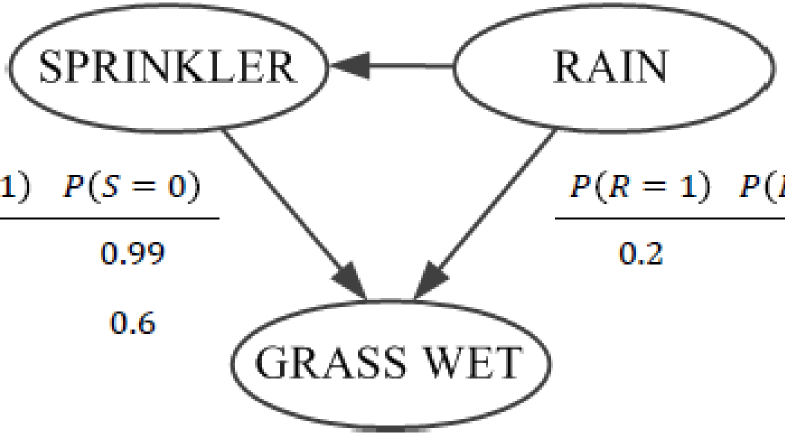
$$P(R=1|G=1)$$

$$=\frac{P(G=1,R=1)}{P(G=1)}=\frac{\sum_{S\in\{1,0\}}P(G=1,S,R=1)}{\sum_{S,R\in\{1,0\}}P(G=1,S,R)}$$

$$=\frac{0.00198+0.1584}{0.00198+0.288+0.1584+0.0}\approx 0.3577$$

有向图模型：贝叶斯网络

示例：草坪问题



R	$P(S=1)$	$P(S=0)$
1	0.01	0.99
0	0.4	0.6

$P(R=1)$	$P(R=0)$
0.2	0.8

S	R	$P(G=1)$	$P(G=0)$
1	1	0.99	0.01
1	0	0.9	0.1
0	1	0.8	0.2
0	0	0.0	1.0

$$P(G,S,R)=P(G\,|\,S,R)P(S\,|\,R)P(R)$$

当观测到草坪湿以后，推测给草坪浇过水的概率有多大?

$$P(S=1|G=1)$$

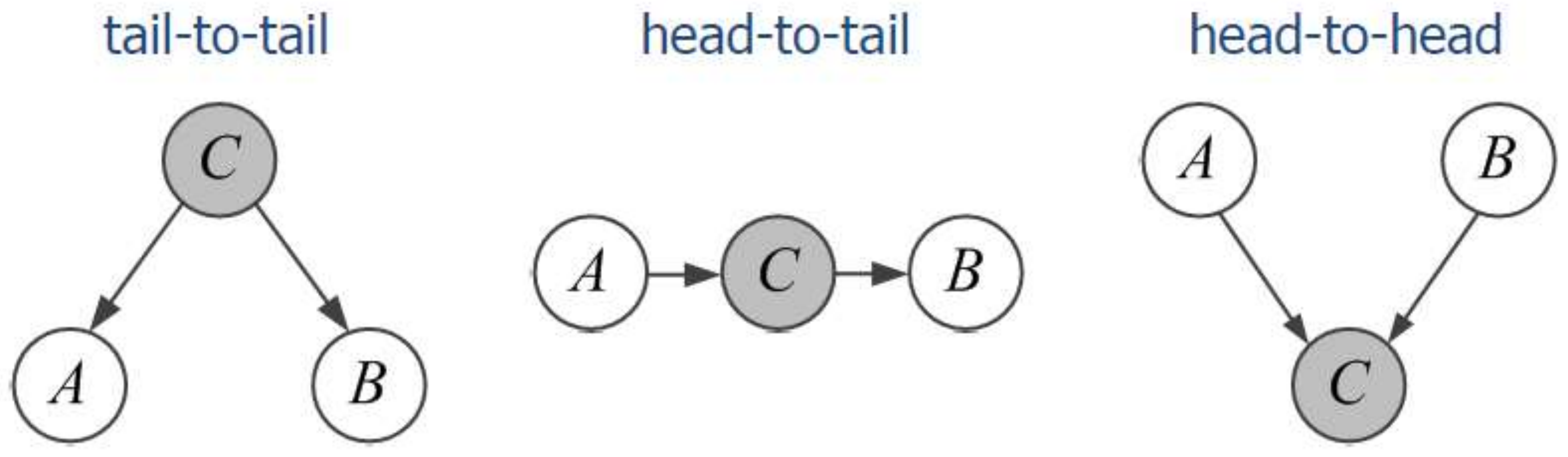
$$=\frac{P(G=1,S=1)}{P(G=1)}=\frac{\sum_{R\in\{1,0\}}P(G=1,S=1,R)}{\sum_{S,R\in\{1,0\}}P(G=1,S,R)}$$

$$=\frac{0.00198+0.288}{0.00198+0.288+0.1584+0.0}\approx 0.6467$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。

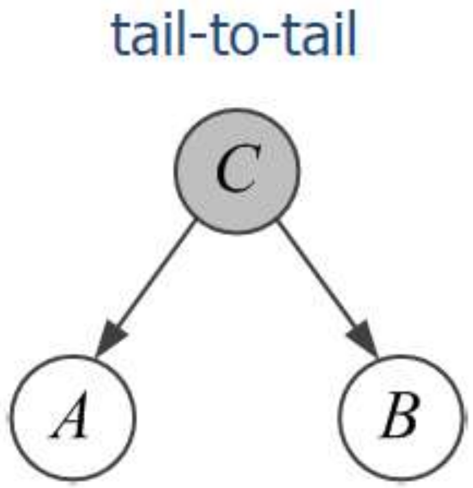


$A \perp B \mid C$ $A \perp B \mid C$ $A \not\perp B \mid C$ 或其任意后代

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。



$A \perp B \mid C$

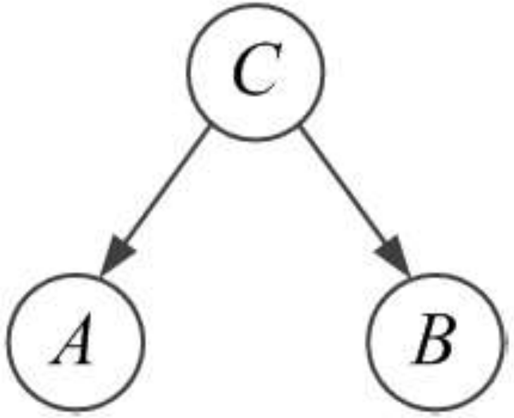
$$P(A,B|C) = \frac{P(A,B,C)}{P(C)} = \frac{P(C)P(A|C)P(B|C)}{P(C)} = P(A|C)P(B|C)$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。

tail-to-tail



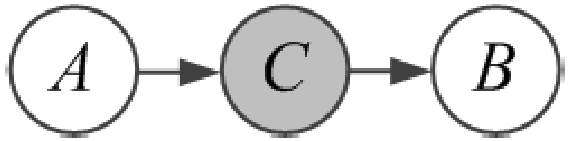
$$P(A,B) \neq P(A)P(B)$$

$A \not\perp B$

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。

head-to-tail



$A \perp B \mid C$

$$P(A,B|C) = \frac{P(A,B,C)}{P(C)} = \frac{P(A)P(C|A)P(B|C)}{P(C)} = \frac{P(A,C)P(B|C)}{P(C)} = P(A|C)P(B|C)$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。

head-to-tail

$$\begin{tikzcd} A \arrow[r] & C \arrow[r] & B \end{tikzcd}$$

$$P(A,B) \neq P(A)P(B)$$

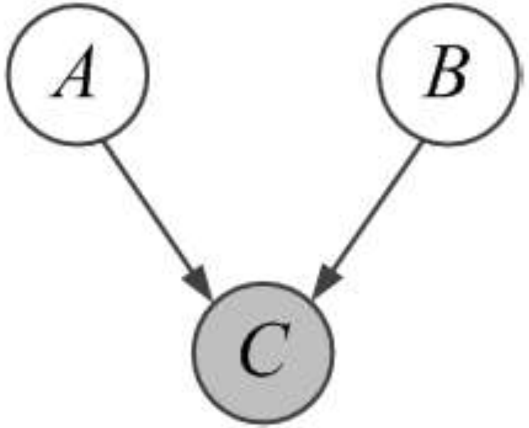
$$A \not\perp B$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。

head-to-head



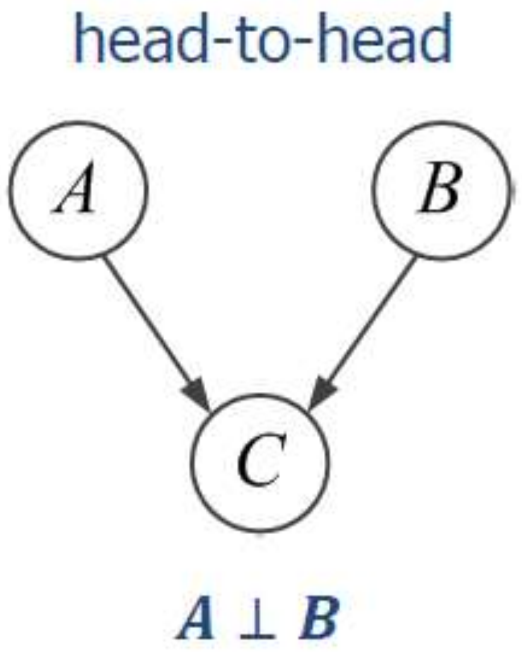
$A \not\perp B \mid C$ 或其任意后代

$$P(A,B|C) \neq P(A|C)P(B|C)$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

D-分离准则（D-separation criterion）：判断贝叶斯网络结点之间的条件独立性。



$$\begin{aligned} P(A,B) &= \sum_C P(A,B,C) \\ &= \sum_C P(A)P(B)P(C|A,B) \\ &= P(A)P(B)\sum_C P(C|A,B) \\ &= P(A)P(B) \end{aligned}$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

贝叶斯网络的全局马尔科夫性：给定结点集合 A，B，C，若 A 到 B 中结点的所有无向路径都是被 C 阻塞的（blocked），则称 A 和 B 被 C ***D*-分离（D-separated）**，即 A 和 B 关于 C 条件独立。

若一条无向路径包含结点 x 满足以下条件之一，则称其是阻塞的：

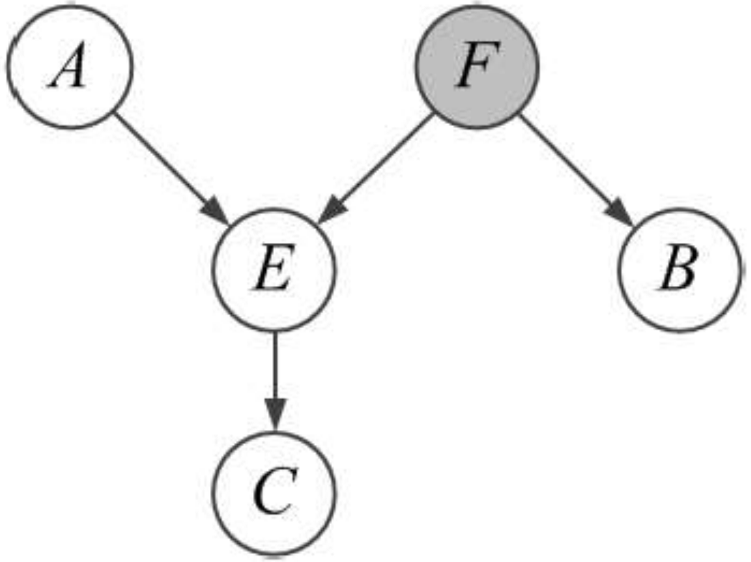
（1）x 是 tail-to-tail 或 head-to-tail 结点，并且 x 包含在 C 中。

（2）x 是 head-to-head 结点，并且 x(及 x 的任意后代均)不包含在 C 中。

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

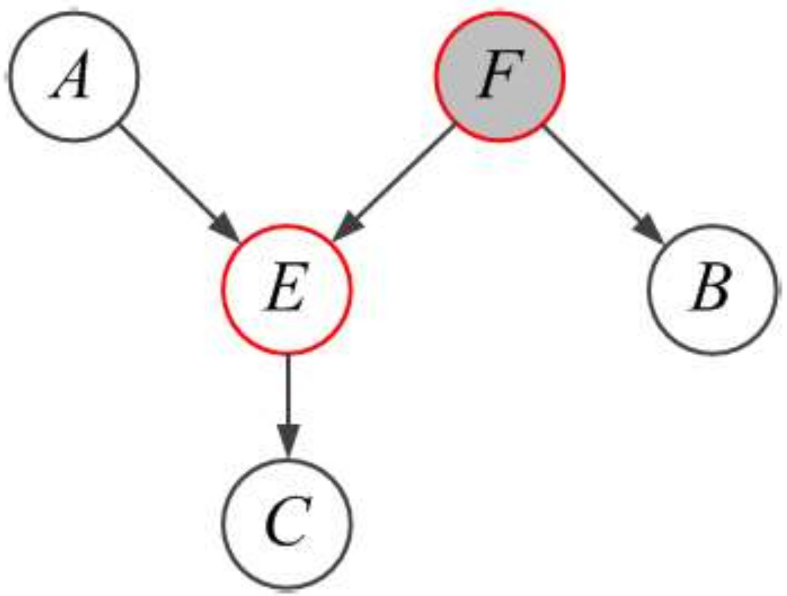
例子：A 和 B 是否关于 F 条件独立？



有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

例子：A 和 B 是否关于 F 条件独立？

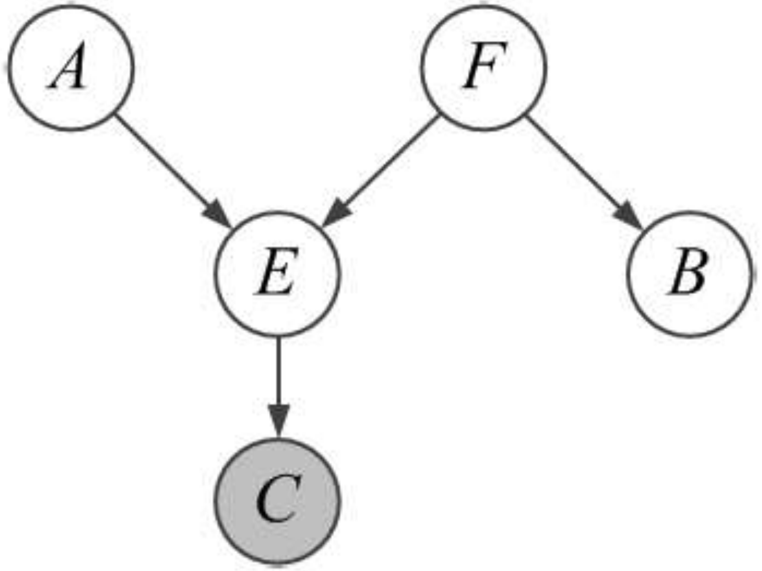


$$A \perp B \mid F$$

有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

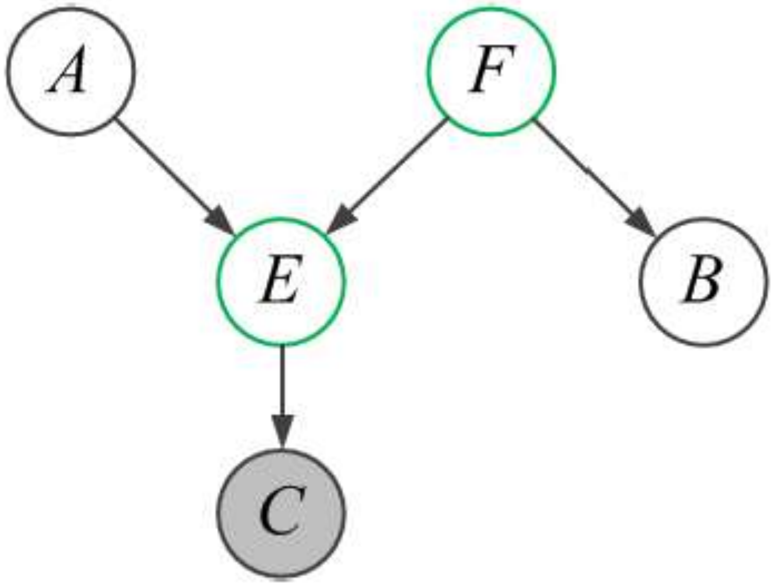
例子：A 和 B 是否关于 C 条件独立？



有向图模型：贝叶斯网络

条件独立性

例子：A 和 B 是否关于 C 条件独立？



$A \not\perp B \mid C$

条件独立性

贝叶斯网络的局部马尔科夫性：

（1）给定某变量的父结点，则该变量条件独立于所有其他非其后代结点。

$$x_v \perp x_{V\backslash\{v\}\backslash PA(v)\backslash DE(v)} \mid x_{PA(v)}$$

（2）给定某变量的马尔可夫毯（父结点，子结点，子结点的父结点），则该变量条件独立于其他变量。

$$x_v \perp x_{V\backslash\{v\}\backslash MB(v)} \mid x_{MB(v)}$$

第九章 概率图模型

9.1 有向图模型：贝叶斯网络

9.2 无向图模型：马尔可夫随机场

9.3 学习与推断

9.4 近似推断

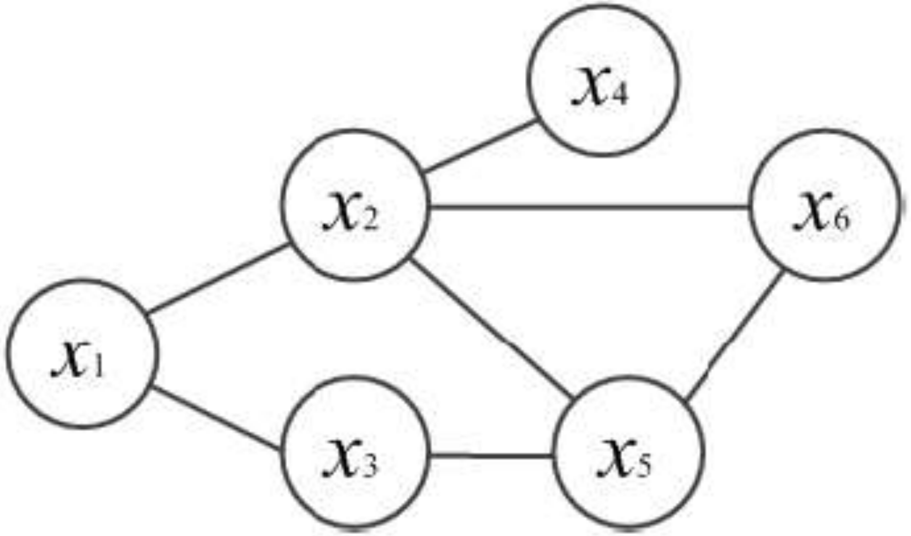
9.5 实例模型

无向图模型：马尔可夫随机场

图结构：无向图

结点：一个或一组随机变量。

边：随机变量之间的相互依赖（非“因果关系”）。

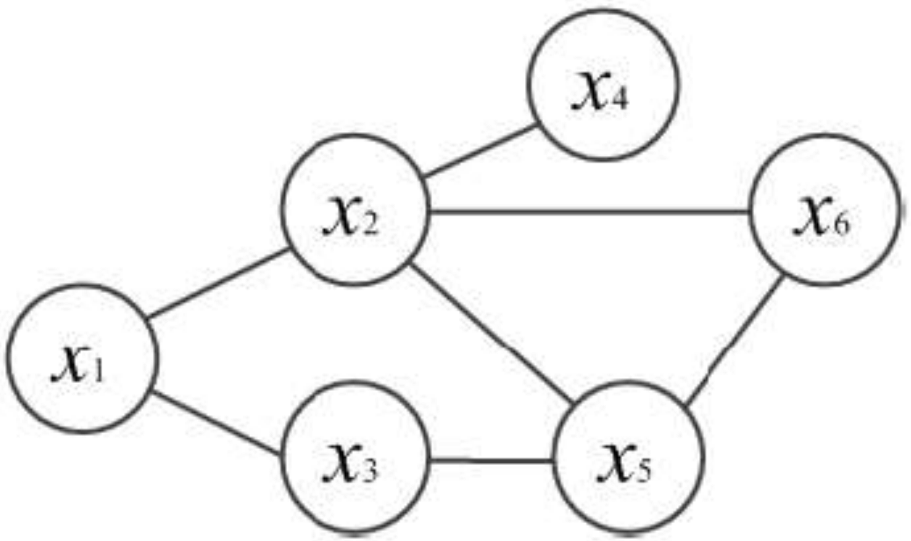


无向图模型：马尔可夫随机场

图结构：无向图

结点：一个或一组随机变量。

边：随机变量之间的相互依赖（非“因果关系”）。



团：对于图中的结点子集，若其中任意两个节点之间都有连边，则称该结点子集为一个团（clique）。

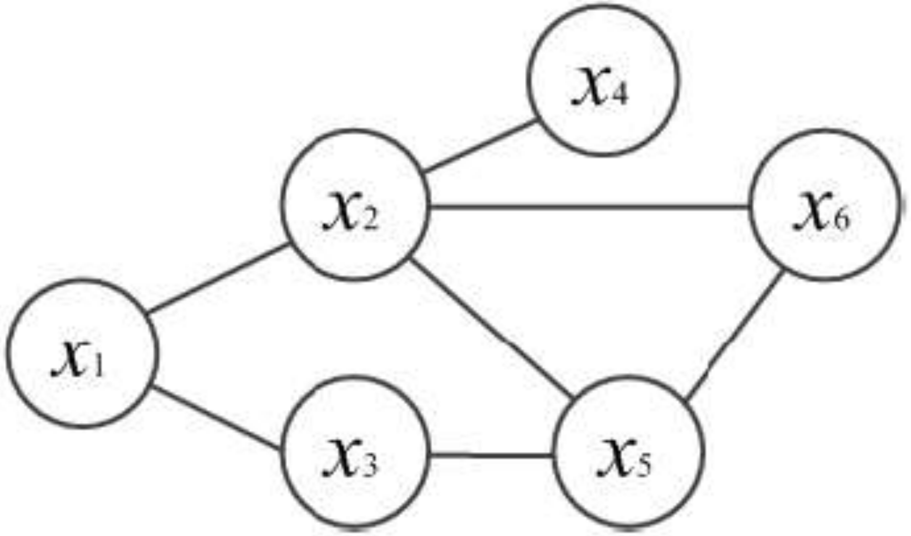
极大团：若在团中加入其他任意一个结点都不再形成团，则称该团为极大团（maximal clique）。

无向图模型：马尔可夫随机场

图结构：无向图

结点：一个或一组随机变量。

边：随机变量之间的相互依赖（非“因果关系”）。



极大团：$\{x_1, x_2\}$, $\{x_1, x_3\}$, $\{x_2, x_4\}$, $\{x_3, x_5\}$, $\{x_2, x_5, x_6\}$

无向图模型：马尔可夫随机场

联合概率分布

分解形式：

$$P(\mathbf{x}) = \frac{1}{Z}\prod_{C\in\mathbb{C}}\psi_C(\mathbf{x}_C)$$

其中，$\mathbf{x}=\{x_1,x_2,...,x_n\}$；$\mathbb{C}$ 为团集合，$\mathbf{x}_C$ 为团 C 对应的变量集合。

ψ_C 为定义在团 C 上的非负势函数（potential function）。

Z 是归一化因子：

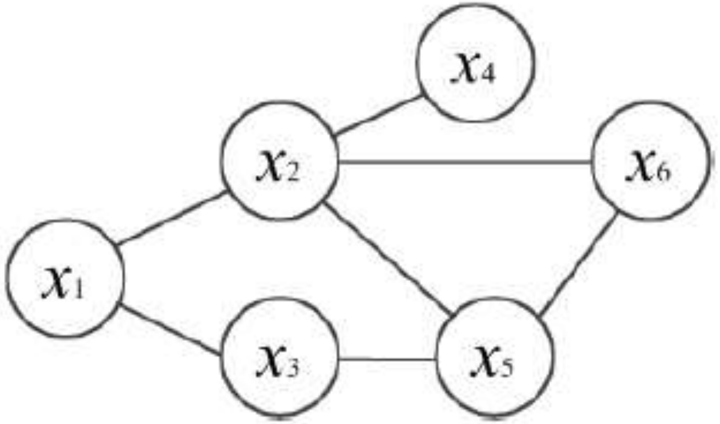
$$Z=\sum_{\mathbf{x}}\prod_{C\in\mathbb{C}}\psi_C(\mathbf{x}_C)$$

无向图模型：马尔可夫随机场

联合概率分布

分解形式：

$$P(\mathbf{x}) = \frac{1}{Z}\prod_{C\in\mathbb{C}}\psi_C(\mathbf{x}_C)$$



$$\begin{aligned}&P(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6)\\ =&\frac{1}{Z}\psi_{12}(x_1,x_2)\psi_{13}(x_1,x_3)\psi_{24}(x_2,x_4)\\ &\psi_{35}(x_3,x_5)\psi_{256}(x_2,x_5,x_6)\end{aligned}$$

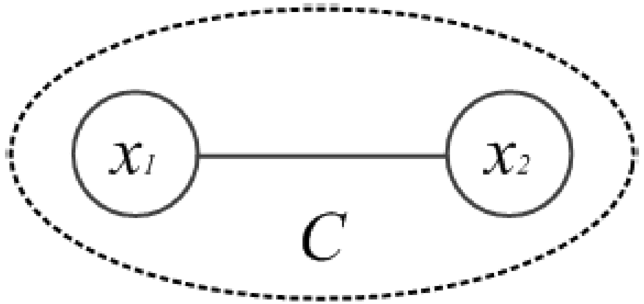
无向图模型：马尔可夫随机场

示例：最简单的马尔科夫随机场

$x_1, x_2 \in \{-1, 1\}$ ；$C = \{x_1, x_2\}$ 为团；$\psi_C(x_1, x_2) = e^{a x_1 x_2}$

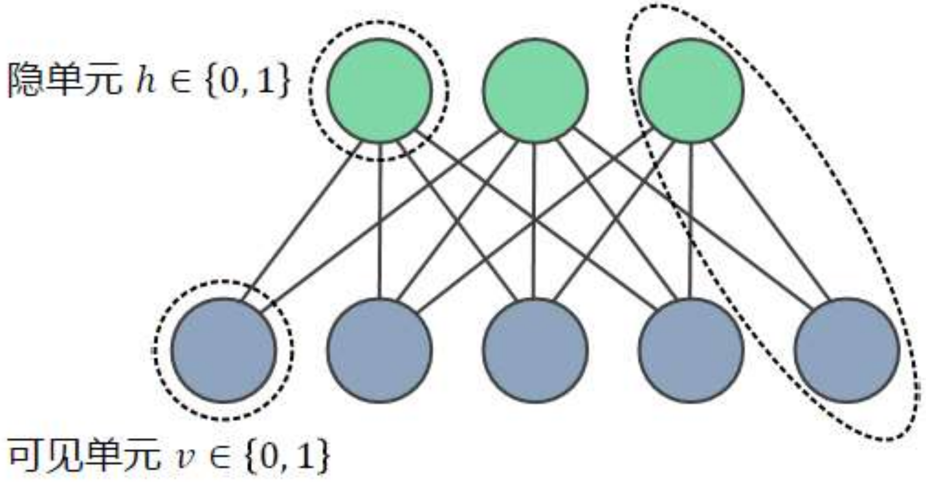
规一化因子 $Z = \sum_{x_1, x_2} \psi_C(x_1, x_2) = 2e^{a} + 2e^{-a}$

联合概率分布 $P(x_1, x_2) = \frac{1}{Z} \psi_C(x_1, x_2) = e^{a x_1 x_2} / (2e^{a} + 2e^{-a})$



无向图模型：马尔可夫随机场

示例：受限玻尔兹曼机

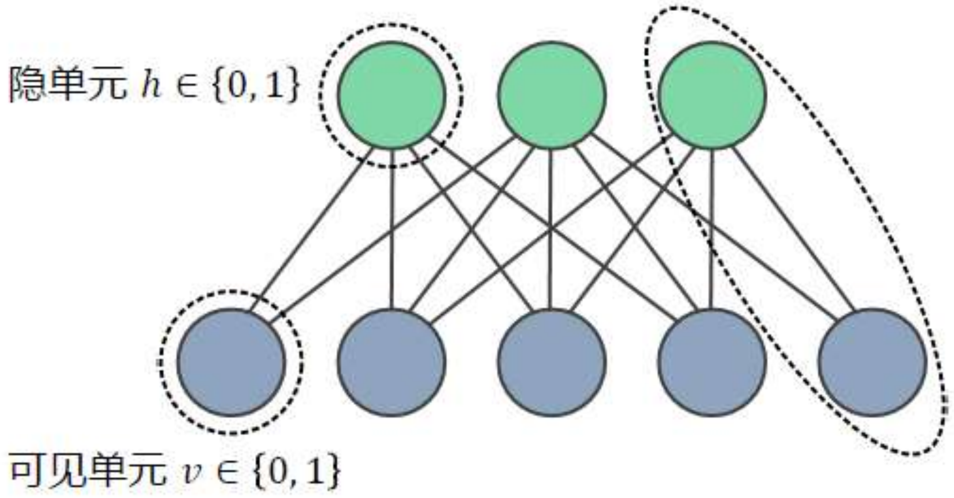


团集合：$\{\{v_i\},\{h_j\},\{v_i,h_j\}\}$

势函数：$\psi_V(v_i)=e^{a_i v_i}$　$\psi_H(h_j)=e^{b_j h_j}$　$\psi_{VH}(v_i,h_j)=e^{w_{ij}v_i h_j}$

无向图模型：马尔可夫随机场

示例：受限玻尔兹曼机



联合概率分布：
$$P(\mathbf{v},\mathbf{h}) = \frac{1}{Z}\exp\left(\sum_i a_i v_i + \sum_j b_j h_j + \sum_{i,j} w_{ij} v_i h_j\right)$$

无向图模型：马尔可夫随机场

示例：图像去噪

团集合：$\{\{x_i, y_i\}, \{x_i, x_j\}\}$

势函数：$\psi_{XY}(x_i, y_i) = e^{\eta_i x_i y_i}$ $\psi_{XX}(x_i, x_j) = e^{\mu_{ij} x_i x_j}$

无向图模型：马尔可夫随机场

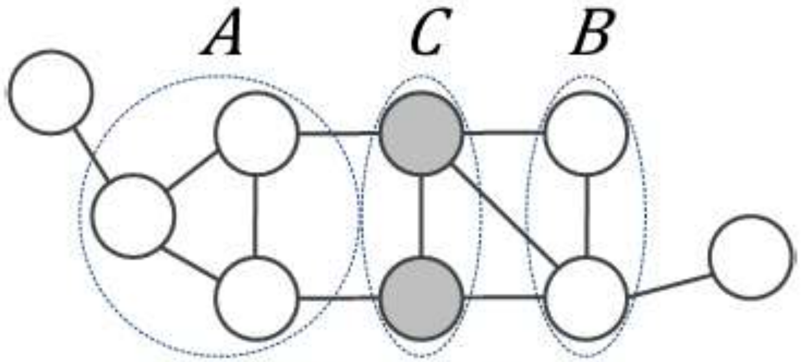
示例：图像去噪

联合概率分布：$$P(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{1}{Z}\exp\left(\sum_{i\in V}\eta_i x_i y_i + \sum_{ij\in E}\mu_{ij} x_i x_j\right)$$

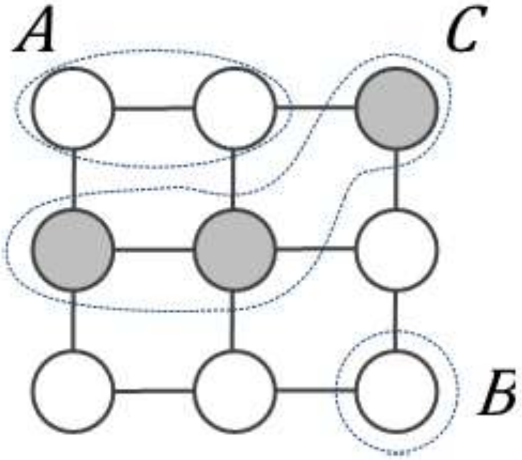
无向图模型：马尔可夫随机场

条件独立性

马尔可夫随机场的全局马尔科夫性：给定结点集合 A，B，C，若从 A 中的结点到 B 中结点必须经过 C 中的结点，则称 A 和 B 被 C 分离，即 A 和 B 关于 C 条件独立。



$A \perp B \mid C$



$A \perp B \mid C$

无向图模型：马尔可夫随机场

条件独立性

局部马尔科夫性：给定某变量的马尔可夫毯（邻接变量），则该变量条件独立于其他变量。

$$x_v \perp x_{V\backslash\{v\}\backslash MB(v)} \mid x_{MB(v)}$$

成对马尔科夫性：给定其他所有变量，两个非相邻变量条件独立。

$$x_u \perp x_v \mid x_{V\backslash\{u,v\}} \quad if\,(u,v) \notin E$$

本讲参考文献

1. 《统计机器学习--第九章：概率图模型》课件，王泉，国科大网络安全学院，2017。

致谢王泉！感谢王泉提供了《概率图模型》课件供本章教学参考！