



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解
Author(s)	鈴木, 譲
Description	ERATO湊離散構造処理系プロジェクト : 2010年度初冬のワークショップ (ERATO合宿) . 2010年11月29日 (月) ~12月1日 (水) . 札幌北広島クラッセホテル.
Relation	2010年度科学技術振興機構ERATO湊離散構造処理系プロジェクト講究録. p.424-427.
Issue Date	2011-06
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/48347">https://hdl.handle.net/2115/48347</a>
Type	conference presentation
File Information	09.suzuki-nu.pdf



概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解

---

鈴木 譲

---

2010年11月30日

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 1 / 23

概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

概要

- ① 確率的推論
- ② Junction Tree
- ③ 領域グラフ
- ④ 一般化因数分解の応用

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 2 / 23

概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

確率的推論

確率空間  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$

確率論の公理

- $P(\{\}) = 0, P(\Omega) = 1$
- $0 \leq P(A) \leq 1, A \in \mathcal{F}$
- $A \cap B = \{\} \implies P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

$\{X_i\}_{i=1}^N: X_i(\Omega) < \infty$  なる確率変数  $X_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  の列

$P_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N) := P(X_1 = x_1, \dots, X_N = x_N),$   
 $x_1 \in X_1(\Omega), \dots, x_N \in X_N(\Omega)$

確率的推論:  $N$  とともに指数的な計算が必要

$$P_{X_i}(x_i) := \sum_{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_N} P_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N)$$

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 3 / 23

概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

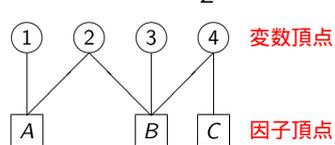
確率分布の因子グラフによる表現

$\mathcal{M}$ : 有限集合 (因子頂点の集合)  
 $\mathcal{N} := \{1, \dots, N\}$  (変数頂点の集合)  
 $\mathcal{N}(a) \subseteq \mathcal{N}$ : (因子頂点  $a \in \mathcal{M}$  に隣接する変数頂点の集合)

$$X_a(\Omega) := \prod_{j \in \mathcal{N}(a)} X_j(\Omega), f_a: X_a(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, a \in \mathcal{M}$$

$$P_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N) = \frac{1}{Z} \prod_{a \in \mathcal{M}} f_a(\mathbf{x}_a), \mathbf{x}_i \in X_i(\Omega), \mathbf{x}_a \in X_a(\Omega)$$

例:  $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, 4\}, \mathcal{M} = \{A, B, C\}$

$$P_{X_1, X_2, X_3, X_4}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \frac{1}{Z} f_A(x_1, x_2) f_B(x_2, x_3, x_4) f_C(x_4)$$


一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 4 / 23

概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

確率伝播

$\mathcal{M}(i) \subseteq \mathcal{M}$ :  $i \in \mathcal{N}$  に隣接する因子頂点の集合  
 $i \in \mathcal{N}, a \in \mathcal{M}$   
 $n_{i \rightarrow a}, m_{a \rightarrow i}: X_i(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$

$$n_{i \rightarrow a}(x_i) := 1, m_{a \rightarrow i}(x_i) := 1, x_i \in X_i(\Omega)$$

$$n_{i \rightarrow a}(x_i) := \prod_{c \in \mathcal{M}(i) \setminus \{a\}} m_{c \rightarrow i}(x_i)$$

$$m_{a \rightarrow i}(x_i) := \sum_{\mathbf{x}_{a,i} \in X_{a,i}(\Omega)} f_a(\mathbf{x}_{a,i}, x_i) \prod_{j \in \mathcal{N}(a) \setminus \{i\}} n_{j \rightarrow a}(x_j)$$

$$X_{a,i}(\Omega) := \prod_{j \in \mathcal{N}(a) \setminus \{i\}} X_j(\Omega)$$

$$b_i(x_i) := \frac{1}{Z_i} \prod_{a \in \mathcal{N}(i)} m_{a \rightarrow i}(x_i)$$

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 5 / 23

概要 確率的推論 Junction Tree 領域グラフ 一般化因数分解の応用

因子グラフがループをもつとき、もたないとき

ループをもたないとき

- $N$  に比例する時間で確率伝播が収束
- $\{b_i\}_{i \in \mathcal{N}} = \{P_{X_i}\}_{i \in \mathcal{N}}$

ループをもつとき

- 一般には、NP 困難
- 一般には、 $\{b_i\}_{i \in \mathcal{N}} \neq \{P_{X_i}\}_{i \in \mathcal{N}}$

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解 6 / 23

### 確率的推論は NP 困難

#### 確率的推論の決定問題版 PRD

$P_{X_i}(x_i) > 0$  否か

3SAT から PRD へ多項式時間還元

- リテラル  $L := U \cup \bar{U}$ ,  $U = \{u_1, \dots, u_N\}$ ,  $\bar{U} = \{\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_N\}$ , 節  $c_j \subseteq L, |L| = 3, j = 1, \dots, M$  充足可能 (各  $c_j$  が真のリテラルを含む  $U \rightarrow \{真, 偽\}$  が存在 ただし,  $u$  が真なら  $\bar{u}$  は偽)
- $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ ,  $\mathcal{N} = \{0, 1, \dots, N\}$  の因子グラフの確率分布  $P_{X_0}(1) > 0$

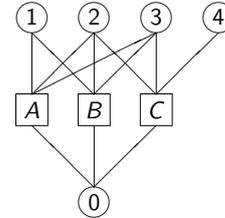
PRD: NP 完全  $\implies$  確率的推論 PR: NP 困難

### 確率的推論は NP 困難 (続)

例:  $c_A = \{u_1, u_2, u_3\}, c_B = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2, u_3\}, c_C = \{u_2, \bar{u}_3, u_4\}$

$$P_{X_0 X_1 X_2 X_3 X_4}(x_0, x_1, x_2, x_3, x_4) = \frac{1}{Z} f_A(x_0, x_1, x_2, x_3) f_B(x_0, x_1, x_2, x_3) f_C(x_0, x_2, x_3, x_4)$$

- $i = 1, 2, 3, 4$  で,  $x_i = 1 \iff u_i$  が真
- $x_0 = 1$  のとき,  $a = A, B, C$  で,  $f_a(x_0, x_1, x_2, x_3) = 0 \iff c_a$  が偽



### Junction Tree

$$P_{X_1 \dots X_N}(x_1, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N P(X_i = x_i | X_k = x_k, k \in \pi(i))$$

$$\pi(i) \subseteq \{1, \dots, i-1\}, i = 1, \dots, N$$

確率分布  $P_{X_1 \dots X_N}$  から定義される無向グラフ  $G = (V, E)$

$$V := \{1, \dots, N\}$$

$$E := \{\{i, k\} | i \in V, k \in \pi(i)\}$$

$G$  の極大クリーク木  $T = (V_G, E_G)$

$V_G$ :  $G$  の極大クリーク ( $V$  の部分集合であらわす) の集合  
 $E_G := \{\{U, U'\} | U \cap U' \neq \emptyset, U, U' \in V_G\}$

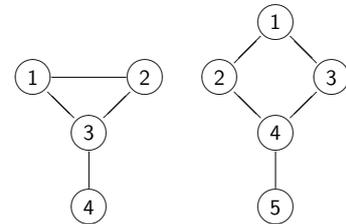
$G$  の極大クリーク木  $T = (V_G, E_G)$  が Junction Tree

$G$  の頂点が  $T$  の連結された頂点に含まれる (RIP)

### Junction Tree (続)

任意の無向グラフ  $G$  について、以下の各条件は同値

- $G$  が chordal
- $G$  が分解可能
- $G$  が再帰的に単純
- $G$  の接合木が存在



条件を満たす

条件を満たさない

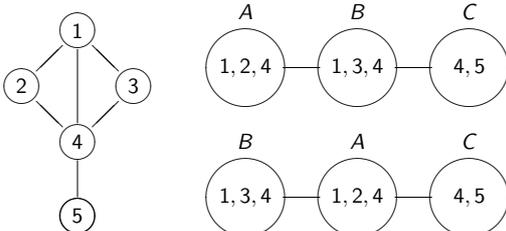
### Junction Tree の構成方法

$G$  の接合木  $T = (V_G, E_G)$  が存在しないとき、 $G$  に辺を加えて chordal にする

#### Kruscal のアルゴリズムの適用

$U, U' \in V_G$  間の重みを  $|U \cap U'|$  とし、ループができない限り、重みの大きいものから辺を結ぶ

(例)  $A = \{1, 2, 4\}, B = \{1, 3, 4\}, C = \{4, 5\}$



### Junction Tree を用いた確率推論の効率化

- $G$  の接合木  $T = (V_G, E_G)$  が存在しないとき、chordal 化
- Junction Tree  $T = (V_G, E_G)$  を構成における確率伝播

#### 効率化・最適化をはかりたい

- $G$  に辺を加えても確率的推論の解は変わらないが、計算量が増える
- $T$  の各頂点 (極大クリーク) のサイズ (含んでいる  $G$  の頂点の数) が小さくなるように chordal 化をはかる

#### Partial K-Tree (NP 完全)

$G = (V, E)$  および正整数  $K$  に対して、 $E \subseteq E'$  となる chordal な  $G' = (V, E')$  で、 $G'$  の各極大クリークのサイズが高々  $K$  以下のものが存在するか。

### 因子グラフから領域グラフへ: シナリオ

$\mathcal{R}$ : 領域  $R(\subseteq \mathcal{N} \cup \mathcal{M})$  の集合 (領域の定義は、次のスライド)  
 $c_R$ : 領域  $R$  の領域定数

$$c_R = 1 - \sum_{R' \in A(R)} c_{R'}$$

$$\mathbf{x}_R \in X_R(\Omega) := \prod_{i \in \mathcal{N} \cap R} X_i(\Omega)$$

$$\prod_{a \in \mathcal{M}} f_a(\mathbf{x}_a) = \prod_{R \in \mathcal{R}} F_R(\mathbf{x}_R)^{c_R}$$

例)

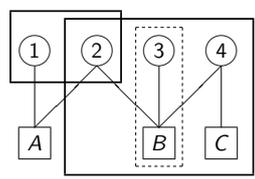
$$P_{X_1 X_2}(x_1, x_2) P_{X_3 | X_2}(x_3 | x_2) = \frac{P_{X_1 X_2}(x_1, x_2) P_{X_2 X_3}(x_2, x_3)}{P_{X_2}(x_2)}$$

### 因子グラフから領域の集合を構成

領域  $R$

$$a \in \mathcal{M} \cap R \implies \mathcal{N}(a) \in R$$

を満足する  $R \subseteq \mathcal{M} \cup \mathcal{N}$

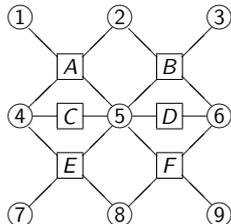


□ 領域, □ 領域でない

### 領域グラフ: 領域を頂点とする DAG

領域グラフ: DAG ( $V, E$ )

- $V = \{R \in \mathcal{R}\}, (R, R') \in E \implies R \supseteq R'$
- $\mathcal{N} \cup \mathcal{M}$  の同じ要素を含む  $R$  が連結



$$f_A(x_1, x_2, x_4, x_5) f_B(x_2, x_3, x_5, x_6) f_C(x_4, x_5) f_D(x_5, x_6)$$

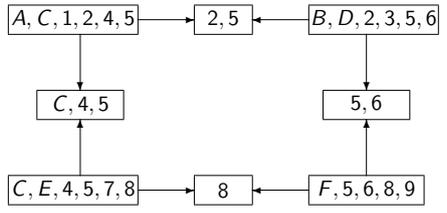
$$\cdot f_E(x_4, x_5, x_7, x_8) f_F(x_5, x_6, x_8, x_9)$$

### 領域グラフ (1): Junction Graph

- 有向経路の長さが高々1 ( $\mathcal{R} = \mathcal{R}_L \cup \mathcal{R}_S$ , 親  $\mathcal{R}_L$  と子  $\mathcal{R}_S$ )
- $c_R = 1 - d_R, R \in \mathcal{R}_S$  ( $d_R$ :  $R$  の親の頂点の数)

$$\mathcal{R}_L = \{\{A, C, 1, 2, 4, 5\}, \{B, D, 2, 3, 5, 6\}, \{C, E, 4, 5, 7, 8\}, \{F, 5, 6, 8, 9\}\}$$

$$\mathcal{R}_S = \{\{2, 5\}, \{C, 4, 5\}, \{5, 6\}, \{8\}\}$$



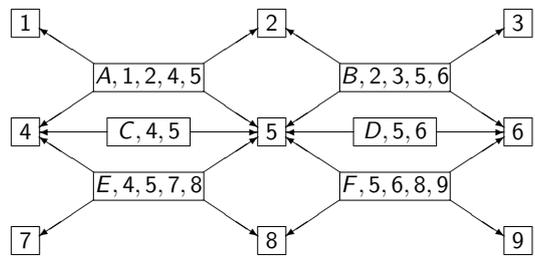
$$F_{AC1245}(x_1, x_2, x_4, x_5) F_{CE4578}(x_4, x_5, x_7, x_8) F_{BD2356}(x_2, x_3, x_5, x_6)$$

$$\cdot F_{F5689}(x_5, x_6, x_8, x_9) \cdot [F_{C45}(x_4, x_5) F_{25}(x_2, x_5) F_{56}(x_5, x_6) F_8(x_8)]^{-1}$$

### 領域グラフ (2): Bethe 近似

Junction Graph の特殊ケース

$$\mathcal{R}_S = \{\{i\} | i \in \mathcal{N}\}, \mathcal{R}_L = \{\{a\} \cup \{i \in \mathcal{N}(a)\} | a \in \mathcal{M}\}$$



$$F_{A1245}(x_1, x_2, x_4, x_5) F_{B2356}(x_2, x_3, x_5, x_6) F_{E4578}(x_4, x_5, x_7, x_8)$$

$$\cdot F_{F5689}(x_5, x_6, x_8, x_9) F_{C45}(x_4, x_5) F_{D56}(x_5, x_6)$$

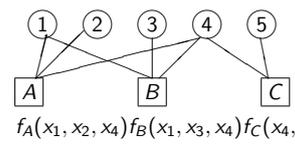
$$\cdot [F_2(x_1) F_4(x_4)^2 F_5(x_5)^5 F_6(x_6)^2 F_8(x_8)]^{-1}$$

### 領域グラフ (3): Junction Tree

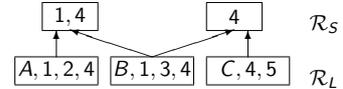
Junction Graph の特殊ケース

$R \in \mathcal{R}_S$  は、 $d_R = 2$  で、 $a \in \mathcal{M}$  を含まない

- $R \in \mathcal{R}_S$  が接続木の辺
- $\mathcal{M}$  の部分集合が、接続木の頂点としての役割を果たす

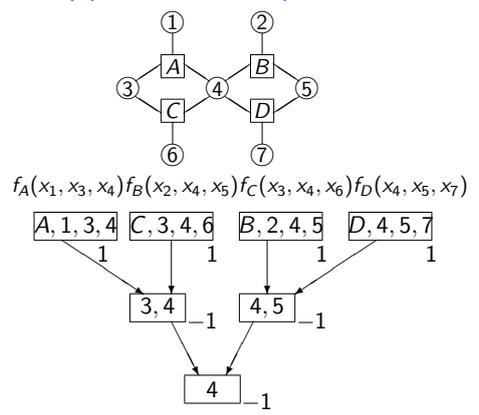


$$f_A(x_1, x_2, x_4) f_B(x_1, x_3, x_4) f_C(x_4, x_5)$$



$$\frac{F_{A124}(x_1, x_2, x_4) F_{B134}(x_1, x_3, x_4) F_{C45}(x_4, x_5)}{F_{14}(x_1, x_4) F_4(x_4)}$$

領域グラフ (4): Kikuchi 近似 (世代数が 2 以上になる)



$$\frac{f_A(x_1, x_3, x_4) f_B(x_2, x_4, x_5) f_C(x_3, x_4, x_6) f_D(x_4, x_5, x_7)}{F_{34}(x_3, x_4) F_{45}(x_4, x_5) F_4(x_4)}$$

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解

領域グラフにおける確率伝播 (一般化確率伝播)

$$R \in \mathcal{R}, P \in \mathcal{P}(R), C \in \mathcal{C}(R), F_R(\mathbf{x}_R) := \left( \prod_{a \in R \cap \mathcal{M}} f_a(\mathbf{x}_a) \right)^{c_R}$$

$$n_{R \rightarrow P}(\mathbf{x}_R) = F_R(\mathbf{x}_R) \prod_{P' \in \mathcal{P}(R) \setminus \{P\}} M_{P' \rightarrow R}(\mathbf{x}_R) \prod_{C \in \mathcal{C}(R)} N_{C \rightarrow R}(\mathbf{x}_C)$$

$$m_{R \rightarrow C}(\mathbf{x}_C) = \sum_{\mathbf{x}_R \setminus \mathbf{x}_C} F_R(\mathbf{x}_R) \prod_{P \in \mathcal{P}(R)} M_{P \rightarrow R}(\mathbf{x}_R) \prod_{C' \in \mathcal{C}(R) \setminus \{C\}} N_{C' \rightarrow R}(\mathbf{x}_{C'})$$

$$N_{R \rightarrow P}(\mathbf{x}_R) := n_{R \rightarrow P}(\mathbf{x}_R)^{\beta_R} m_{P \rightarrow R}(\mathbf{x}_R)^{\beta_R - 1}$$

$$M_{R \rightarrow C}(\mathbf{x}_C) := n_{C \rightarrow R}(\mathbf{x}_C)^{\beta_C - 1} m_{R \rightarrow C}(\mathbf{x}_C)^{\beta_C}$$

$$p_R: R \in \mathcal{R} \text{ の親の頂点の個数, } q_R := \begin{cases} 1 & p_R = 0 \\ (1 - c_R) / p_R & p_R \neq 0 \end{cases}$$

$$\beta_R := (2 - q_R)^{-1}$$

領域グラフが Bethe 近似のとき、通常確率伝播に一致

(Yielda, et. al, 2005)

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解

一般的には NP 困難でも、因数分解でしのぎたい

理論:

- 無向グラフ → Junction Tree
- 因子グラフ → 領域グラフ

$$f(x_1, \dots, x_N) = \prod_{a \in \mathcal{M}} f_a(\mathbf{x}_a) = \prod_{R \in \mathcal{R}} F_R(\mathbf{x}_R)^{c_R}$$

$$N^* := \max_{R \in \mathcal{R}} |\mathcal{N} \cap R| \rightarrow \min$$

応用:

- 確率伝播
- 論理回路設計
- 遺伝的アルゴリズム (Mühlenbein, 2006)

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解

論理回路設計への応用

論理回路設計

$f: \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$  を少ない項数で記述したい

$\pi(i) \subseteq \{1, \dots, i-1\}$  が決まり、条件付確率の表

$$\{\theta_i(x_i | (x_k)_{k \in \pi(i)})\}, x_i \in X_i(\Omega), (x_k)_{k \in \pi(i)} \in \prod_{k \in \pi(i)} X_k(\Omega)$$

から MLF 式 ( $N$  の指数) を求めて、 $\lambda_i(x_i) := 0, 1, i = 1, \dots, N$

$$\sum_{x_1} \dots \sum_{x_N} \prod_{i=1}^N \lambda_i(x_i) \theta_i(x_i | (x_k)_{k \in \pi(i)})$$

計算時間を低減するには

因子頂点ごとではなく、領域ごとに条件付確率の表を用意

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解

まとめ

- Junction Tree は、領域グラフに一般化される
- 確率伝播というよりは、因数分解が重要
- NP 困難でもしのげるかもしれない

一般化確率伝播というよりは、一般化因数分解