

# 制限付き疑似ベイジアンネットを用いた文脈自由文法解析の試み

Parsing context-free grammars using Quasi Bayesian Cognitive circuits

高橋直人 一杉裕志  
Naoto Takahashi Yuuji Ichisugi

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

We have proposed a prototyping method using Quasi Bayesian Networks and Quasi Bayesian Cognitive circuits for modeling higher cognitive functions of human being. In this article we show that Quasi Bayesian Cognitive circuits are capable of processing context-free grammars with syntactical ambiguities.

## 1. はじめに

失語症の症例研究や、fMRI を使った観察などから、ヒトの言語能力は大脳皮質の一部（いわゆる言語野）が担っていると考えられる [Kemmerer 15]。また近年の計算論的神経科学においては、大脳皮質がベイジアンネット的計算を行っているという仮説が注目を集めている [Lee 03, 一杉 11]。筆者らはこの仮説に基づき、ベイジアンネットを用いて、ヒトの言語能力のモデルを作成しようとしている [高橋 16, 一杉 17]。

言語能力などの高次認知機能をベイジアンネット等の機械学習技術を用いてモデル化する際には、たとえ小規模なプロトタイプであってもハイパーパラメタの調整など非本質的な作業を伴う点が問題となる。また実装上の問題や、局所解・過適合の問題などが関係してくるため、意図した結果が得られない場合に問題の切り分けが難しい。

そこで筆者らは、ベイジアンネットを用いてヒトの高次認知機能をモデル化する際に本質的な部分に専念できるよう、疑似ベイジアンネット (Quasi Bayesian Networks; QBN) および制限付き疑似ベイジアンネット (Quasi Bayesian Cognitive circuits; QBC) を用いるプロトタイピング手法を提案した [一杉 16a, 一杉 16b]。疑似ベイジアンネットは、確率値の 0 と非 0 のみを区別するように簡略化したベイジアンネットである。また制限付き疑似ベイジアンネットは、疑似ベイジアンネットの条件付確率表に制限を加え、結合パラメタ数の爆発を抑えたものである。どちらのベイジアンネットも、Java プログラムのソースコード中に埋め込むドメイン固有言語 (Domain Specific Language; DSL) として実装されている。制限付き疑似ベイジアンネットが曖昧性のない文脈自由文法を扱えることはすでに示した [一杉 16a] が、本稿では曖昧性のある文脈自由文法も扱えることを示す。

## 2. 統語解析用ベイジアンネット

図 1 に、統語構造的に曖昧な文 “Time flies like an arrow.” を解析するための小さな文法を示す。最後の an arrow の部分には統語的曖昧性がないので 1 要素として扱うこととすると、この文の入力要素数は 4 となる。このように入力要素数が 4 で、要素間の統語構造に曖昧性のある文を解析する制限付き疑似ベイジアンネットを図 2 に示す。

図中の円で示された部分は制限付き疑似ベイジアンネットのノードである。図 2 には P ノード (白) と J ノード (灰色) の 2 種類が示されている。各ノードは、自分と直接接続されてい

ID	生成規則	ID	生成規則
S0	S → NP VP	VP0	VP → V PP
NP0	NP → time	VP1	VP → V NP
NP1	NP → flies	VP2	VP → VP PP
NP2	NP → an arrow	V0	V → time
NP3	NP → NP NP	V1	V → flies
NP4	NP → NP PP	V2	V → like
PP0	PP → P NP	P0	P → like

図 1: “Time flies like an arrow.” を解析するための文法。命令文は主語を欠いた S, すなわち VP と解釈する。

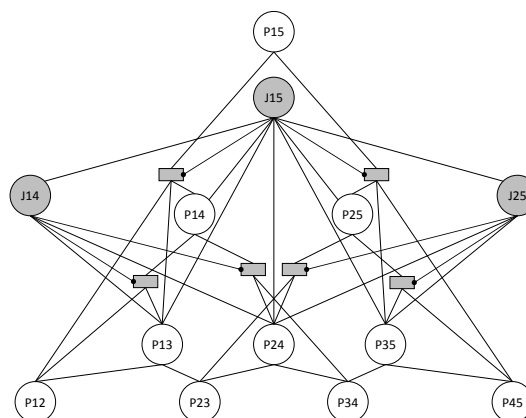
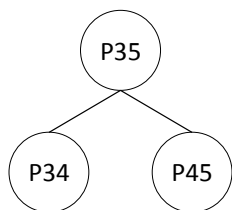


図 2: 入力要素数 4 の文を統語解析する制限付き疑似ベイジアンネット。



ノード番号	P34	P45	P35
可能な値の組み合わせ	V → like P → like	NP → an arrow NP → an arrow	VP → V NP PP → P NP

図 3: P ノードの親子関係 (一部) と、そのときに許される値の組み合わせ。P34 と P45 の値が上記以外の組み合わせであるとき、P35 は「このノードは使用されていない」ことを示す特殊な値をとる。

るノードの値を参照し、それらの組み合わせに基づいて自らの値を決定する。また長方形で示された部分はゲートと呼ばれ、J ノードからの指示に基づいてスイッチングボックスのように動作する。これによって P ノード間の親子関係が決まる。

P ノードは CYK パーザ [言語 10] のセルに相当し、各生成規則 (の ID) を値としてとる。たとえば図 3 において、ノード P34 とノード P45 の値がそれぞれ V → like と NP → an arrow の場合、ノード P35 の値は VP → V NP となる。

J ノードは、可能な全部分木の中から取舍選択を行うことで、最終的な解析木の構造を決定する。たとえば図 4 で単語列 “P12 P23 P34” が [P12 [P23 P34]] のように解析される場合、P24 を親とする部分木は使われるが、P13 を親とする部分木は使われない。一方で同じ単語列が [[P12 P23] P34] のように解析される場合は、反対に P13 を親とする部分木は使われるが、P24 を親とする部分木は使われない。

このような場合、J14 は P13 と P24 の値の組み合わせに応じて以下のいずれかが真となるように、ゲートに対して指示を出す。

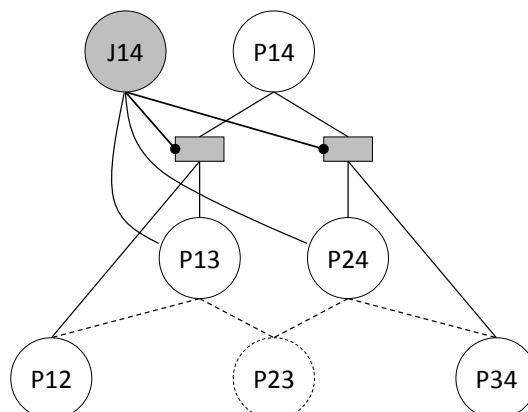
1. P12 と P24 だけが P14 の子ノードになる。
2. P13 と P34 だけが P14 の子ノードになる。
3. P14 は子ノードを持たず、他のノードからも使用されない状態となる。

以上では情報がボトムアップ (単語から文の方向) に伝わり、と暗に仮定して説明したが、制限付き疑似ベイジアンネットワークはベイジアンネットワークの性質を引き継いでいるので、実際の情報は双方向に伝達される。したがって、最上位の文法範疇を固定し、それを構成するような単語列を選択するといった使い方も可能である。

このネットワークのパラメタ数は、単語数に対して多項式のオーダーで抑えられており、指数関数的に増大することはない。また、

1. 上位層のノードほど入力単語数が多い。すなわち受容野が広い。
2. 上位層のノードは、下位層のノードよりも複雑な情報を表現している。

という、脳の視覚野や深層ニューラルネットワークと共通の特徴を持っている。これは認知モデルとして好ましい性質の 1 つと言える。



J14	P13	P24	P14:P12	P14:P13	P14:P24	P14:P34
2	I	-	入	切	入	切
3	-	I	切	入	切	入
I	-	-	切	切	切	切

図 4: J14, P13, P24 の各ノードに許される値の組み合わせと、そのときのゲートの開閉状態。I はノードが使用されない状態、- は任意の値が許される状態、入はノード間の接続あり、切はノード間の接続なしを表す。

ノード	取りうる値	元の生成規則
P12	NP0	NP → time
	V0	V → time
P23	NP1	NP → flies
	V1	V → flies
P34	V2	V → like
	P0	P → like
P45	NP2	NP → an arrow
	S0	S → NP VP
	VP0	VP → V PP
	VP1	VP → V NP
P15	VP2	VP → VP PP
	PP0	PP → P NP

表 1: 図 2 における最下位および最上位の P ノードが取りうる値。

親	子 1	子 2
S0	NPx	VPx
NP3	NPx	NPx
NP4	NPx	PP0
VP0	Vx	PP0
VP1	Vx	NPx
VP2	VPx	PP0
PP0	P0	NPx

表 2: 中間層 P ノードの条件付き確率表。子 1 と子 2 の値の組み合わせが合致した場合のみ、親は表に示した値を取りうる。添字の x はワイルドカード。

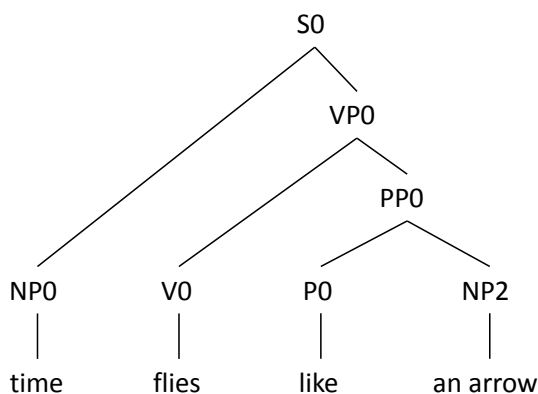


図 5: 「光陰矢のごとし」に相当する解析木。

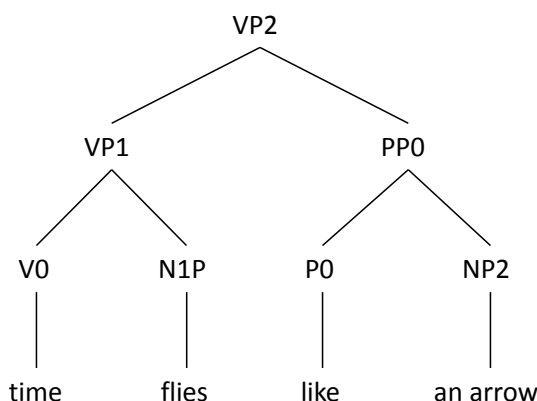


図 7: 「蠅の速度を矢のように測れ」に相当する解析木。

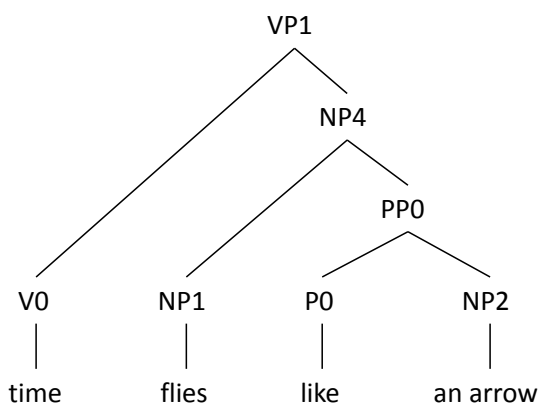


図 6: 「矢に似た蠅の速度を測れ」に相当する解析木。

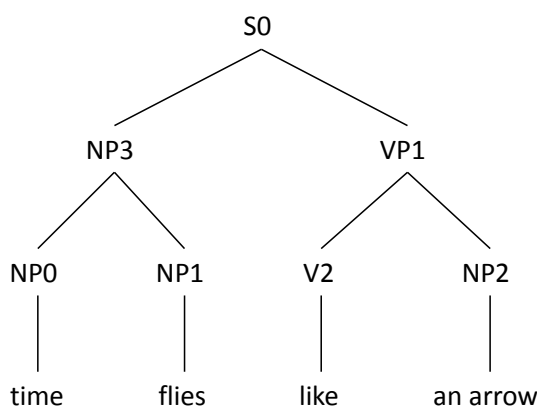


図 8: 「トキバエは矢を好む」に相当する解析木。

### 3. 実験

図 2 の制限付き疑似ベイジアンネットの最下位および最上位のノードが取りうる値、すなわち非 0 の確率を持つ値を表 1 のように定める。また他の P ノードの条件付き確率表としては、図 1 の文法に基づいた表 2 を与える\*1。

この場合に各 P ノードが取りうる値の組み合わせを、図 5 から図 8 に図形化して示す。可能な 4 種類の構文木すべてが出力されていることがわかる。

### 4. 関連研究

ベイジアンネットを用いて確率的文脈自由文法の解析を試みた例がある [Pynadath 98] が、パラメータ数や推論に必要とされる時間が、単語数に対して指数関数的に増えるという問題があった。

また因子グラフ上の loopy belief propagation を用いて、依存文法の解析精度を上げる研究 [Smith 08] や、組合せ範疇文法を解析する際の計算量を削減する研究 [Auli 11] なども見られるが、いずれも工学的有用性を求めるために構文解析に特化した因子を導入している。

一方我々は、大脳皮質の構造が領野によらず概ね均一である点を重視し、文法解析に固有の因子を導入することなく、汎用的な部品の組み合わせで各種の高次認知機能のモデル化を目指している。

\*1 通常のベイジアンネットの条件付き確率表と異なり、制限付き疑似ベイジアンネットにおける条件付き確率表は、確率が非 0 となる親ノードの値と、そのときの子ノードの値の組み合わせを指定する形で与える。

### 5. 議論

ヒトが CYK パーザのように文を並列解析しているかに関しては、さまざまな意見がある。

内省に基づく限り、意識に上る形で並列解析していないことは確かである。またヒトは、他人の発話を聞いた時にほぼ実時間で内容を理解する一方で、ガーデンパスセンテンスや多重の中央埋め込み文の理解には困難を示す。したがって文法的に可能なすべての組み合わせを試している可能性は低い。

ただし意味解析に関しては、無意識のうちに多義語のすべての意味にアクセスしているらしいことがプライミング効果を利用した実験からわかっている [Pinker 94] ので、構文解析に関しても無意識のうちにある程度の並列処理を行っている可能性はありうる。

制限付き疑似ベイジアンネットは可能な解釈をすべて選ぶだけであるが、真のベイジアンネットはそれら可能な解釈の中から一番もっともらしい組み合わせを高速に近似計算することができる。大脳皮質がベイジアンネット的な近似計算を行っているとは仮定すると、ヒトが持つ文理解の実時間性と、ある種の構文の理解に困難を示す現象の説明がつく。

通常の文に対しては文長に対して線形時間で解析が可能である代わりに、ガーデンパスセンテンスや中央埋め込み文の解析に失敗するような解析器をベイジアンネットで構築することができれば、それはヒト言語野のモデルとして有望であると言えるだろう。

---

## 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものである。

## 参考文献

- [Auli 11] Auli, M. and Lopez, A.: A Comparison of Loopy Belief Propagation and Dual Decomposition for Integrated CCG Supertagging and Parsing, in *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (2011)
- [言語 10] 言語処理学会 (編): デジタル言語処理学事典, 共立出版 (2010)
- [一杉 11] 一杉 裕志: 大脳皮質とベイジアンネット, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 3, pp. 412 – 415 (2011)
- [一杉 16a] 一杉 裕志: 疑似ベイジアンネットを用いた認知モデルのプロトタイピング手法の提案, 人工知能学会研究会資料 SIG-AGI-004-01 (2016)
- [一杉 16b] 一杉 裕志: 双方向回路 QBC による認知機能モデルのプロトタイピング, <https://staff.aist.go.jp/y-ichisugi/besom/20161027QBC.pdf> (2016)
- [一杉 17] 一杉 裕志, 高橋 直人, 尾崎竜史: 大脳皮質の計算論的モデルを用いた組み合わせ範疇文法パーザ実装の構想, 第 23 回言語処理学会年次大会 (2017)
- [Kemmerer 15] Kemmerer, D.: *Cognitive Neuroscience of Language*, Psychology Press (2015)
- [Lee 03] Lee, T. S. and Mumford, D.: Hierarchical Bayesian inference in the visual cortex, *Journal of Optical Society of America A*, Vol. 20, No. 7, pp. 1434–1448 (2003)
- [Pinker 94] Pinker, S.: *The Language Instinct*, William Morrow and Company (1994)
- [Pynadath 98] Pynadath, D. V. and Wellman, M. P.: Generalized Queries on Probabilistic Context-Free Grammars, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 1, pp. 65–77 (1998)
- [Smith 08] Smith, D. A. and Eisner, J.: Dependency Parsing by Belief Propagation, in *Proceedings of the 2008 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (2008)
- [高橋 16] 高橋 直人: ベイジアンネットを用いた疑似日本語の係り受け解析, 第 30 回人工知能学会全国大会 (2016)