

TM-0297

知識獲得と演繹・帰納・発想

国藤 進, 横森 貴
(富士通)

May, 1987

©1987, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03) 456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

知識獲得と演繹・帰納・発想

國藤 進、橋森 貴（富士通国際情報社会科学研究所）

〔概要〕 筆者の一人は、人間の問題解決・推論過程の記号論的本質を演繹・帰納・発想とみなしている。そのような問題意識が、人工知能研究で最も大切な研究課題のひとつである知識獲得支援システムの構築に有用なことを、様々な角度で実証してきた。まず2章で、演繹・帰納・発想の簡単な解説を行う。3章では、演繹・帰納・発想と密接な関連がある仮説推論の知識獲得への応用を述べる。ついで4章では、学習研究の新しい研究動向として、当研究所の協力開発研究「知識獲得システム」グループの研究活動を紹介する。最後に、演繹・帰納・発想に関する今後の課題を要約する。

1. はじめに

人間の問題解決・推論過程の記号論的本質は演繹・帰納・発想にあると言われている（Yonemori 81, Kunifuji 86a, Arikawa 86）。本稿は、論理プログラミング言語Prologを用いた知識獲得支援技術の研究開発の途上で得られた知見を、演繹・帰納・発想機構の解明という見地からまとめたものである。まず2章では、人間による問題解決・推論過程の記号論的本質である演繹・帰納・発想の簡単な解説を行う。3章では、演繹・帰納・発想と密接な関連がある仮説推論の知識獲得への応用を述べる。4章では、当研究所の協力開発研究「知識獲得システム」グループの研究活動方針を示し、学習研究の新しい潮流を紹介する。最後に、知識獲得支援のための基礎技術確立をめざして、演繹・帰納・発想に関する今後の課題を要約する。

2. 問題解決と推論

2.1 人間の論証過程

人間の論証過程を、最も厳密な論理学の体系の中で、初めてふれたのはアリストテレスの分析論である。彼はその中で論証の方法として、演繹法(deduction)・帰納法(induction)・発想法(abduction)(あるいは還元法(retroduction))という3つの推論過程を挙げている。そのうち演繹法の体系は、その後中世に至るまで、学問の明晰な方法論として、順調すぎるほど順調に成長していった。他の2つの方法論は、長い間、まどろみの時代を過ごした。近世になってベーコンやミルが帰納法の体系の再発見を行い、20世紀に入って推測統計学や科学哲学といった学問の世界で、帰納論理の急速な整備（Kitagawa 48）が行なわれた。発想法の体系化については、19世紀後半から20世紀初頭にかけて幾多の著作を残した独創的な哲学者パースの活躍を待たねばならなかった。

2.2 記号学と情報学

ブラグマティストC.S.パースは、先駆的な記号学者として、人間の探求（問題解決）活動の全過程を演繹論理、帰納論理、発想論理（Yonemori 81）の立場から体系化した。

彼の記号学によれば、人間の探求過程とはある未知の問題（驚くべき事実）に遭遇した人間が、その問題を説明する仮説を発見し（発想）、その仮説から導き出される合理的な帰結を推論し（演繹）、そして導出された帰結を検証する（帰納）過程である。演繹論理、帰納論理、発想論理の情報学との関連を論じたのが北川の情

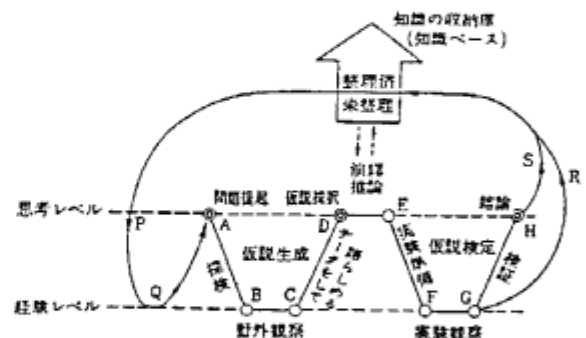
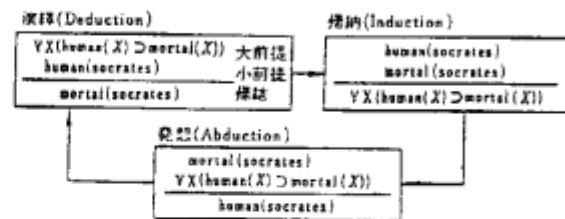


図1 問題解決・推論過程

輯学の論理 (Kitagawa 69) である。バース哲学と情報学の論理に言及しつつ、川喜田は問題解決学 (Kawakita 70) を提唱するが、それは図 1 に示されるような人間の問題解決過程の分析からなる。このような過程を支援する知識情報処理システムを構築するため、演繹・帰納・発想という探求過程を支援するシステムを作るということを最終目標とするのが著者らの立場である。



2.2 演繹・帰納・発想の機械化

上述のような観点からすると、図 2 で示されるような演繹・帰納・発想 (Kunifuji 86a, 86b) の既存計算機システム上での実現方式に注目したい。既存の計算機システム上で演繹的あるいは帰納的な推論機構を実現するには、限られた論理の世界を前提とすれば、分解証明法あるいはモデル推論法というアルゴリズムを用いればよいことが知られている。発想的推論機構実現のための統一原理は

図 2 発想・演繹・帰納の推論図式

現時点ではほとんど知られていないが、その中核をなす仮説選定や類推の機械化については、最近、Poole ら (Poole 85, 86) や原口ら (Haraguchi 86a, 86b) がそれらの基礎理論を構築中であり、その機械化のための突破口がようやく見えてきたところである。

3. 仮説推論から知識獲得への接近

3.1 仮説推論

バースによって指摘 (Kunifuji 85c) されているように一般に仮説生成とは、経験的知識である観測事実 "O" と一般的知識である既知の公理 "H ⊢ O" (ただし "⊢" は証明可能を意味する) とから、未知の知識である仮説 "H" を推測する記号処理過程である。すなわち、仮説生成を一階述語論理の用語法を用いて直観的に説明すると、次のような推論図式となる。

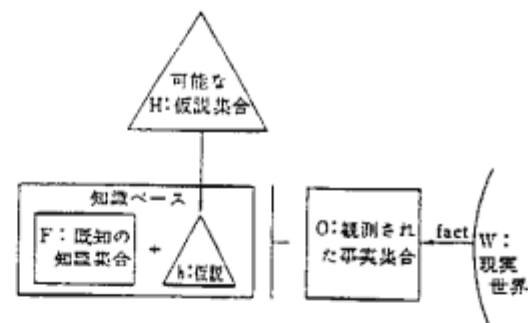


図 3 仮説推論

$$\begin{array}{ll} O & (1) \\ \hline H \vdash O & (2) \\ H & (3) \end{array}$$

この推論図式を一階述語論理の枠組みの中で形式的に理解しようとしたのが、仮説推論の枠組みである。仮説推論では図 3 のように、与えられた観測事実の集合 "O" を説明する適切な仮説 "h" を、前もって与えられた可能な仮説集合 "H" の部分集合の基礎例集合から適切に選択していく。すなわち仮説推論とは、次のような推論図式 (Kunifuji 85b) のことである。

O, H, F を一階述語論理の節で表現された互いに独立な観測事実集合、前もって与えられた可能な仮説集合、およびその問題を解くのに利用可能な既知の知識集合とする。ここに " $F \vdash H \not\vdash O$ " (ただし " $\not\vdash$ " は証明不可能を、" $\square$ " は矛盾を、" $+$ " は和集合を意味する) とは限らない。" $F + H \vdash O$ " の場合の仮説推論図式は、いわゆる暗黙推論の推論図式を意味し、非単調推論ではむしろこの場合に関心がある。

このとき、「仮説 h が観測事実集合 O を説明可能である」とは、次の場合、しかもその場合に限る。

$$\textcircled{1} F \not\vdash O \text{ (ただし } F \not\vdash \square \text{) かつ} \quad (4)$$

- ② 与えられた H に対して、適切な部分集合 H' が存在し、しかも θ を H' に対する代入で基礎例を生成するものとするとき、次のような h が存在する。

$$h = H' \cdot \theta, H' \subseteq H, F \vdash h \vdash O \text{ (ただし } F \vdash h \not\vdash \square \text{)} \quad (5)$$

ここに " $\subseteq$ " は部分集合を意味する。式(4)は(無矛盾な)既知の知識集合 F のみからは観測集合 O が証明できないことを意味する。また式(5)は理論 h を、仮説集合 H の部分集合 H' の基礎例からなる集合から適切に選べば、(無矛盾な) F と h との和集合から O が証明できることを意味する。

上述の仮説推論の枠組みに対して、次のような問題が國藤ら [Kunifuji 85b] によって提起された。

- (a) 無矛盾性管理問題： 知識ベース KB ($\equiv F \vdash h$) の無矛盾性をどのようにして保持していくか。ここに " $\equiv$ " は " $\rightarrow$ かつ $\leftarrow$ " の意味である。
- (b) 仮説選択問題： 可能な仮説集合 H から適切な仮説 h を選択する仮説選択の評価基準は何なのか。
- (c) 仮説同定問題： 複数の仮説が選択されるとき、新たな観測事実の集合 O' を用いて、単一の仮説へ絞り込むための評価基準は何なのか。
- (d) 融合仮説解消問題： (b), (c) の評価基準にもかかわらず複数の融合する仮説が生成されるとき、そのどちらを採用するかを決定するための評価基準は何なのか。
- (e) 帰納推論問題： そもそも観測事実集合 O から、" $F \vdash H \vdash O$ " となるような仮説集合 H をどのようにして生成していくか。通常、" $F \vdash H \not\vdash \square$ " を前提として理論が構築されている。
- (f) 仮説推論の枠設定問題： 観測事実集合 O と既知の知識集合 F との対応付けをどのようにして発見していくか。
- このような問題提起に対する部分的解答が、文献 [Kunifuji 85c] に与えられている。

3.2 知識獲得支援システムとの関係

仮説推論に関する問題(a)～(f)のうち、著者らは、既に(a), (d)～(f)に関する研究を部分的に含む知識獲得支援のための基礎技術として、知識同化・調節機構

[Kunifuji 85, Kitakami 84] やトランザクション管理機構 [Kitakami 85] を実現してきた。ここではそれらの諸機構と仮説推論との関連を、図4に示す。図4の各機能は、問題(a), (d)～(f)の一部を解決するために導入された。すなわち、問題(a)を解決支援するためには無矛盾性管理機構が必要であり、また問題(b)～(f)を解決支援するためには、与えられた問題向けの各種の知識調節機構の実現が必要である。ここに従来行なっていた知識同化機構 [Kunifuji 85] は、現実世界からの知識(規則や事実)を人間というフィルタを経由して取り

出し、それが正しいと仮定し、既知の知識ベース F に無矛盾かつ系統的に挿入する過程の管理機構として実現される。当然のことながら知識同化機構はその一部として無矛盾性管理機構を包含し、後者はしばしば矛盾型メタ知識と呼ばれるメタ知識ベースを用いて管理されている。また知識調節機構 [Kunifuji 85, Kitakami 84] は世界から与えられる観測された事実が正しいと仮定し、それを説明する仮説を帰納推論アルゴリズムによって自動構築していく過程の管理機構として実現されてきた。さらにトランザク

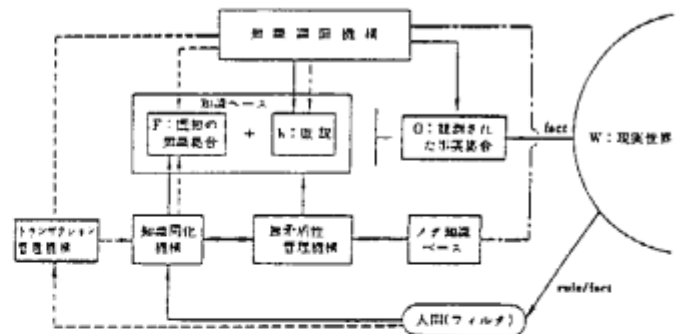


図4 知識獲得と仮説推論

ション管理機構 (Kitakami 85) は人間というフィルタ経由の外から与えられた知識 (規則や事実) が正しいと仮定し、それを知識同化機構を通して F に挿入するとき、その知識に関連するトリガ型メタ知識と呼ばれるデーモンが起動され、それに付知識調節機構が稼働し F が別の F' に更新される過程の管理機構として実現される。そこにおいては、あるトランザクションという単位での同化と調節の機構が同時に働くことが要請される。以上述べたように、仮説推論は知識同化・調節機構やトランザクション管理機構といった知識獲得支援機構と密接な関連を持つ。

3.3 診断型/設計型知識獲得支援システムへの適用

ここでは、仮説推論の診断型/設計型知識獲得支援システム (Kobayashi 86) への適用について指摘する。まず診断型知識システム (Poole 85, Kunifuji 86c) の場合、次のような知識獲得支援機構を付与することが重要と考えられる。

- ① 観測事実集合 O の説明に成功した可能仮説集合 H の一部を既知の知識集合 F に組み込み、可能仮説を既知知識へプルアップする機構の導入
 - ② 正の観測事実と負の観測事実のそれぞれから可能仮説集合 H やメタ知識集合へ一般化する機構の導入
 - ③ O そのものに順序関係を導入し、推論のスピードアップを図ること
 - ④ H や F 内に選好順序や確信度といった情報構造を導入し、それに応じた知識獲得支援機構の構築
 - ⑤ 確率的帰納推論や近似推論のような別種の学習スキームを用意し、そのスキームに合った知識獲得支援機構を再構築すること
- 他方、設計型知識システム (Finger 86) の場合、次のような知識獲得支援機構を付与することが重要と考えられる。

- ① 設計目標集合 O の説明に成功した設計可能集合 H の一部を世界モデル集合 F に組み込み、設計仮説を F へプルアップする機構の導入
- ② 設計問題特有の巨大な H を刈り込むための制約集合の知識獲得
- ③ O そのもの (仕様!) を分かり易く、例えば自然言語で仕様記述することを可能にする機構の導入
- ④ H や F に問題特有の構造を導入し、それに応じた知識獲得支援機構の構築
- ⑤ ユーザの直観を明確化するのに役立つインタフェース等を用意し、それらを用いユーザの使い易い知識獲得支援機構を再構築すること

4. 学習研究の最近の話題

4.1 学習スキーム

当研究所の「知識獲得システム」グループ (リーダー: 横森 貴、メンバー: 高田裕志、榎原原文、石坂裕毅) は、帰納や類推のプログラムを実用的な知識表現のクラスに適用しようとする、計算量が爆発する問題が余りに多く、それらのプログラムが実用的でないことに着目し、新たに帰納的推論に基づく図 5 のような「学習スキーム」を提案している。

この学習スキームをさらに詳しく説明すると、学習システムは、以下のような構成要素からなる。

- (1) 学習 (推論) 対象の領域の設定: どのような領域における概念を学習するのかを規定する。
- (2) 仮説の表現空間: 推論対象となる概念を表現するための方法を定める。形式言語の推論 (Yokomori 87) を例にとると、

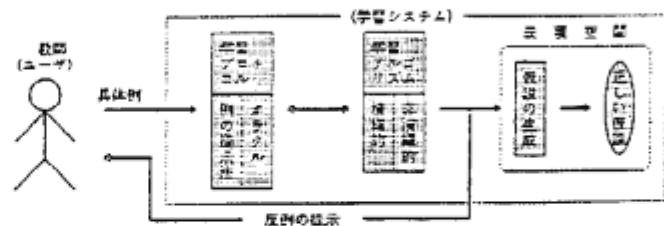


図5 学習スキーム

言語を表現する方法として、“形式文法”、“(抽象)機械”等が一般的に用いられるが、もちろん、プログラミング言語あるいは一階述語論理等で表現することも可能である。

〔3〕学習アルゴリズム： アルゴリズム論でいう演繹的なアルゴリズムと、たとえば確率的な要素を含む非演繹的なアルゴリズムとが考えられる。

〔4〕学習プロトコル： 学習が行われる状況(前提条件)を規定する。例の提示法は、具体例の種類(正・負の文字列、正・負の構造体(項、木、グラフ等)、計算過程例、確率分布付き文字列等々)、あるいは利用可能なオラクルの能力(メンバシップ質問に答える能力、反例を提示する能力等)を規定する。

これらの要素を一つずつ具体的な設定に固定していくことにより、様々な帰納的推論の問題が得られる。実際、これまでに行われている研究のほとんどは、この枠組みによって説明される。帰納的推論による学習システムの研究には、これらの学習システムの各構成要素を適切な設定に選択する事が重要であり、また得られたシステムが(インタフェース部分も含めて)効率的なものである事が要求される。したがって、効率の良いシステムが得られるような学習スキームの設定条件をいかにして見出すかが重要な問題になる。

4.2 学習可能性概念

学習可能性概念の形式的定義として、“極限における同定”という概念が支配的であり、事実これまでに知られている帰納的推論に関する仕事のほとんどは、この考え方に基づいている [Gold 67]。しかしながら「知識獲得支援グループ」では、最近Valiant によって提案された学習可能性を一種の“確率的事象”としてとらえる学習可能性概念 (Valiant 80) の定義に注目した。彼の基本的な考え方を、図6に示す。

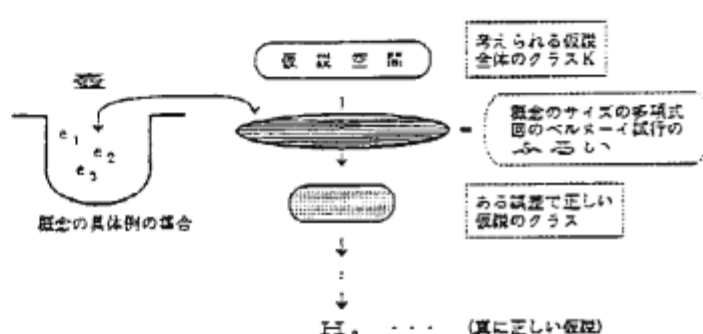


図6 確率的学習モデル

初期設定として、仮説空間Kは考えられる可能な仮説全体からなる。また、壺には、推論しようとする概念の具体例（一般には、正・負両方）が入っている。アルゴリズムは、壺から具体例 e_i をひとつずつ取り出して、それと矛盾する仮説をKから排除し、 e_i を元に戻す。そして、このいわゆる“ベルヌーイ試行”をある回数繰り返す。Valiantの結果によると、プール関数(概念)の幾つかのクラスは、その概念のサイズの多項式回のベルヌーイ試行によって、ある誤差の範囲内で正しい仮説のクラスに絞り込むことができる。また、このようにしてベルヌーイ試行を限りなく繰り返していくと、誤差も限りなくゼロに近づいていく。したがって、この学習モデルは、従来のGoldによる“極限同定”の拡張モデルであると見ることができる。

4.3 今後の研究課題

前述のように、学習システムの構成は「学習システム=学習プロトコル×学習アルゴリズム」であり、「学習プロトコル=例の提示法×オラクル」、かつ「学習アルゴリズム=演繹的アルゴリズム+非演繹的アルゴリズム」であった。したがって「学習システム=(例の提示法×オラクル)×(演繹的アルゴリズム+非演繹的アルゴリズム)」なる等式を得る。

今後の研究課題は、上記等式における各パラメタをいかに具体化して行って、得られた学習システムの具体例が効率良く動くようにするか、ということである。ここに、“効率良く”は非常に重要な要請である。「知識獲得システム」グループは、この効率

の問題を、理論的にはいわゆる“多項式時間推論”を意味すると理解する。したがって、多項式時間で動作するようなアルゴリズムによる学習システムを構築することが、第一の目標ということになる。そのための例の提示法、オラクル、そして最も重要なアルゴリズムをいかに見出すかが、今後の大きな課題である。

純粋に演繹的なアルゴリズムによる学習システムでは、多項式時間という効率の条件は、理論的な見地からは、ある意味で譲れない限界であるが、現実的な意味（より正確には、実働するシステムを構築するという意味）においては、非演繹的なアルゴリズムの導入を考えなければならないかも知れない。あるいはまた、特殊なクラスに限定して有効な、効率の良いアルゴリズムを開発するのも重要である。すなわち、純粋に演繹的なアルゴリズムによって、多項式時間で帰納的に推論可能な概念のクラスは、非常に限られた簡単なクラス（あるいは、非常に特殊なクラス）であるということからして、著者らがなすべきことは、これら基礎的な概念のクラスを出発点として、あらかじめ仮定されたある種の（プリミティブな）操作を適用して行くことによって、より複雑な概念のクラスを構築していくことであろう。

6. おわりに

人間の演繹・帰納・発想の過程を支援する知識獲得支援システムを構築することを最終目標とするとき、仮説の生成や仮説の検定を基本メカニズムとする学習システムがその骨格をなすであろうことは、容易に想定される。本稿では、そのような認識にたち仮説推論や帰納推論の最新の話題を紹介した。そこでの研究戦略は、基本的にはより透明な説得力あるフレームワーク／スキーマを提案し、それに基づき各種の知識獲得支援システムを構築することであった。特に、最新の話題としていかにして多項式時間アルゴリズムを見出すかというテーマに関する調査結果も示した。人間が頭脳の中で利用しているバイオ素子の情報処理速度は、間違いなく現在の計算機が利用しているVLSI等の素子の情報処理速度に比し、数桁遅い。それにも係わらず、帰納や（類推を含む）発想といった高次の情報処理能力においては、人間の方が遙かに的確な推論能力を示す。ここに、認知科学者の手を借りつつ、知識工学者が挑戦し解決しなければならない最大の研究課題が存在する。知識の学習メカニズム解明という課題の解決は、人間のみならず機械にとっても本質的な興味深い学習研究のシーズを提供するであろう。

【謝辞】 本稿をまとめるにあたって、日頃ご指導いただく北川敏男会長、榎本 馨所長に感謝します。また日頃何かとご討論いただき、有益なコメントをいただいた当研究所「知識獲得支援システム」グループ（高田裕志、梶原原文、石坂裕毅）の諸氏に感謝します。なお本研究の一部は、第5世代コンピュータ・プロジェクトの一環として行われたものである。

【参考文献】

- [Arikawa 86] 有川節夫：帰納推論と類推－理論と応用－、渕 一博監修知識情報処理シリーズ第2巻“知識の学習メカニズム”、共立出版、1986.
- [Finger 85] Finger, J.J. and Guneserath, M.H.: RESIDEE: A Deductive Approach to Design Synthesis, Stanford HPP Memo hpp 85 1, Jan. 1985.
- [Gold 67] Gold, E.M., Language identification in the limit, Information and Control 10, 447-474 (1967).
- [Haraguchi 86a] 原口 誠：類推の機械化について、古川康一・溝口文雄共編：知識の学習メカニズム、共立出版、pp.125-154, 1986.
- [Haraguchi 86b] 原口 誠、有川節夫：類推の定式化とその応用について、人工知能学会誌、Vol.1, No.1, pp.132-139, 1986.
- [Kawakita 70] 川喜田二郎、牧島信一編著：問題解決学－KI法ワークブック、講談社、1970.

- [Kitagawa 48] 北川敏男：統計学の認識、白揚社、1948.
- [Kitagawa 69] 北川敏男：情報学の論理、講談社、1969.
- [Kitakami 84] Kitakami, H., Kunifuji, S., Miyachi, T., and Furukawa, K.: A Methodology for Implementation of a Knowledge Acquisition System. Proc. of the 1984 International Symposium on Logic Programming, Atlantic City, U.S.A., Feb. 6-9, 1984.
- [Kitakami 85] 北上 始、國藤 進、宮地泰造、古川康一：論理型プログラミング言語Prologによる知識ベース管理システム、情報処理、11月、1985.
- [Kobayashi 86] 小林重信：知識工学、昭晃堂、1986.
- [Kunifuji 85] 國藤 進、北上 始、宮地泰造、古川康一：知識工学の基礎と応用〔第4回〕-Prologにおける知識ベース管理-、計測と制御、Vol.24, No.6, 53-62, 1985.
- [Kunifuji 86a] 國藤 進：演繹・帰納・発想の推論機構化をめざして、測 一博監修知識情報処理シリーズ第2巻“知識の学習メカニズム”、共立出版、1986.
- [Kunifuji 86b] 國藤 進、古川康一：学習システム研究の現状と課題、計測と制御、Vol.25, No.9, 1986年9月.
- [Kunifuji 86c] 國藤 進、鶴巻宏治、古川康一：仮説選定機構の一実現法、人工知能学会誌、Vol.1 No.2, 1986年12月.
- [Poole 85] Poole, D., Alejunas, R. and Goebel, R.: Theorist: A Logical Reasoning System for Defaults and Diagnosis, in Knowledge Representation (Cercone, N.J. and McCalla, G. (eds.)), IEEE Press, 1985.
- [Poole 86] Poole, D.L.: Default Reasoning and Diagnosis as Theory Formation, University of Waterloo, Technical Report CS-86-08, March 1986.
- [Valiant 84] Valiant, L.G.: A Theory of the Learnable, CACM, 27-11, pp.1134-1142, Nov. 1984.
- [Yokomori 87] Yokomori, T.: Inductive Inference of Context-free Languages - Context-free Expression Method, IJCAI'87, Milano, Aug. 1987.
- [Yonemori 81] 米盛裕二：パースの記号学、勁草書房、1981.