

知能情報基礎論分野

山本 章博

研究室：工学部10号館 401室, 402室

Web：<http://www.i.kyoto-u.ac.jp/~akihiro>

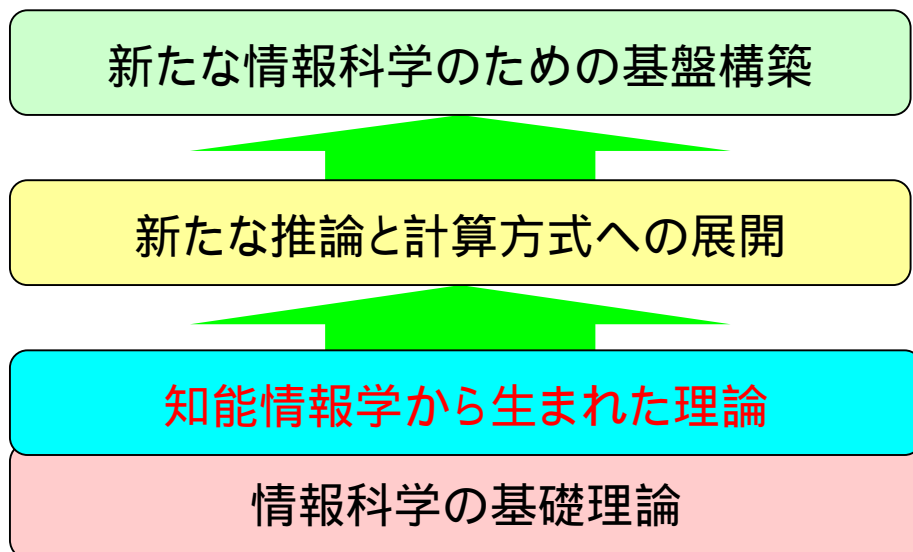
Email：akihiro (at) i.kyoto-u.ac.jp （(at)は@を示します）

はじめに

知能情報基礎論分野では、人間が行っている様々な推論を論理と数学的手法を用いて定式化し、その性質を解明すること、さらにはその推論を用いて情報を適切に取り扱い、また適切な情報を創出する方式を与えることにより、新たな情報学のための基盤を構築することを目標に研究を進めています。

具体的な研究内容は**帰納論理**(または帰納論理プログラミング)です。ここでは論理を用いて帰納推論を定式化し、さらに帰納推論を用いて論理を展開します。帰納的な推論としては、機械学習やその一部である計算論的学習、知識発見、データ・マイニングなどがあります。

人間の高次推論の定式化に興味のある方、機械学習、知識発見、数理論理、(計算)数学を知能情報処理の視点から分析し利用することに興味のある方、そして新たな情報学基盤理論の構築に意欲のある方を募集します。本分野に関心を持っていただけた方は、上記に遠慮無くご連絡ください。



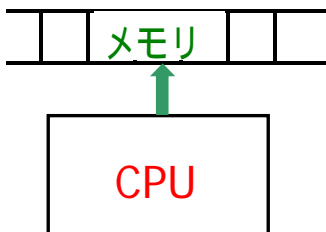
帰納論理(帰納論理プログラミング)

計算は数学的な手法で定式化された人間の知的な行為の一つであり、その定式化によって計算機は開発されています。この計算の定式化は、数学における論証の定式化である数理論理学と強い関係を持っていますが、この論証は**演繹推論**です。数理論理学は、いわゆる“人工知能”の基礎として利用され、教科書において基本的な項目として必ずといっていいほど取上げられています。人工知能や情報学で**論理**ということばを用いれば、普通はこの数理論理学で生まれた演繹推論のための形式的論理体系を指します。

“人工知能”では、アブダクションや仮説推論など、演繹推論以外の推論で論理を基盤技術としてその定式化と性質の解明が行われたものが数多くあります。**帰納論理**(帰納論理プログラミング)の研究は、**帰納的な推論**を論理によって定式化し、その性質を解明することを目標とします。辞書には、**帰納(的推論)を観測された事実を説明する一般的な規則を求める推論**と説明しています。情報学で扱っている帰納的な推論としては、機械学習やその一部である計算論的学習、知識発見、データ・マイニングなどがあります。帰納論理とは、これらの帰納的な推論が原理としている推論方式を論理を用いて定式化し、その性質を論理の手法を用いて明らかにすること、さらには逆に学習を用いて論理を展開する研究です。

帰納的推論の研究では、形式言語理論や帰納関数論を道具として発達してきましたし、現在も展開されています。そのような状況下で、論理を基盤とした展開を求める理由は、帰納が演繹の逆、または、非常に密接な関係を持つ推論であると古くから認識されているからです。帰納論理の研究とは、そのような帰納的推論の計算としての側面とその正当性を論理の手法で与えること、さらに帰納的な推論の中に用いられている論理性を明らかにします。

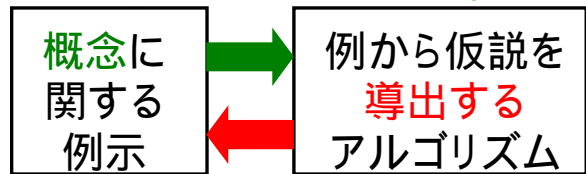
Computer



Learner



例(データ) d_1, d_2, d_3, \dots



仮説(推定) h_1, h_2, h_3, \dots

$$\begin{array}{l}
 \leftarrow gf(F, w) \quad gf(x, y) \leftarrow p(x, z), f(z, y) \\
 \leftarrow p(F, \dots) \\
 \leftarrow f \quad \text{論理 (演繹推論)} \quad m(y) \\
 \leftarrow p(D, w), m(w) \quad p(D, A) \leftarrow \\
 \leftarrow m(A) \quad w = A \\
 \leftarrow w = A
 \end{array}$$

Learning with Logic
 Logic for Learning
 (L4 帰納論理)

仮説の生成と選択

帰納論理の研究は、帰納推論を次の2つのフェーズに分けることから始めます。

- 観測事実(例)を説明できる仮説の生成
- 適切な(好ましい)仮説の選択

例えば、白鳥 s_1 、 s_2 が白いことを観測したときに、“全ての白鳥は白い”と結論したいとします。一階述語論理によって表現すると

B : swan(s_1) swan(s_2) という背景知識のもとで、

E : white(s_1) white(s_2) という事実が観測されたとき(例として与えられたとき)

H : x (swan(x) white(x)) という規則を導出する

こととなります。この操作を**仮説の生成**とよびます。B H から E への証明を(一階述語論理の体系で)構成することができますから、仮説の生成は**結論から前提を導く推論**になります。

一つの観測事実(例)を記述する仮説は一般には複数個あります。例えば x white(x)も仮説になりますし、(swan(s_1) white(s_1)) (swan(s_2) white(s_2)) も仮説になります。帰納推論ではその複数個の仮説の中から、より適切なもの、より好ましい**仮説を選択**します。この選択の適切さを与えるために**計算論的学習**という分野において提示された枠組みを利用します。計算論的学習とは、帰納推論を計算理論を利用して定式化し、解析する研究分野です。そこでは帰納推論を定式化する際に、下表の5項目を設定する必要があるとしています。

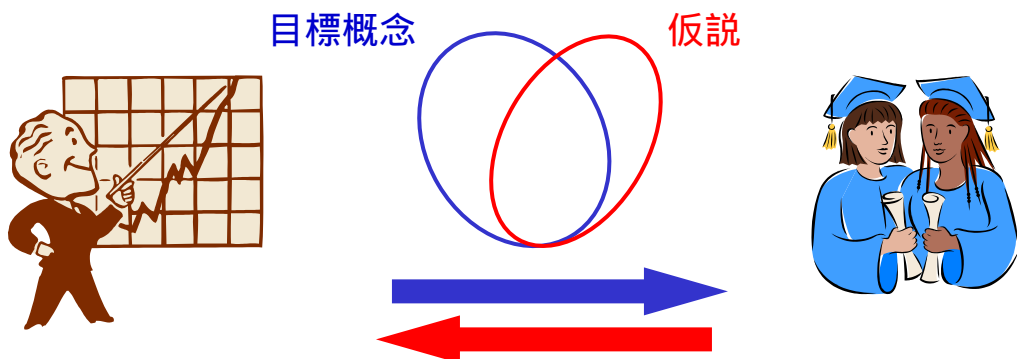
統計的推定の理論をご存知の方は、パラメトリック推定がこの枠組に当てはまることに気付かれると思います。帰納論理では、上の二つの項目は論理によって定義されますので、残りの3項目、すなわち**学習モデル**を設計してゆきます。

計算論的学習

統計的推定

帰納論理

概念空間	パラメータ付分布	論理的解釈
仮説空間	パラメータ	論理式
データ	データ	正例, 負例
学習アルゴリズム	推定(最尤法など)	帰納論理
推論の正当性	統計的一致性	極限同定など



Learning with Logic (仮説の生成)

論理体系は数理論理学を中心に様々なものが提案され、その性質が分析されていますが、これらは主に演繹推論を定式化することを目的としています。帰納推論における仮説生成に利用するためには、体系を変形したり、従来はあまり用いられていない性質を解明する必要があります。

当分野ではこれまで、人工知能研究でよく用いられる**導出(融合, resolution)原理**を推論規則とする節論理を中心に、**論理プログラミング**、書換えシステム、型、適切さの論理(relevant logic)を利用しています。今後の展開ではラフ集合論なども利用する計画です。

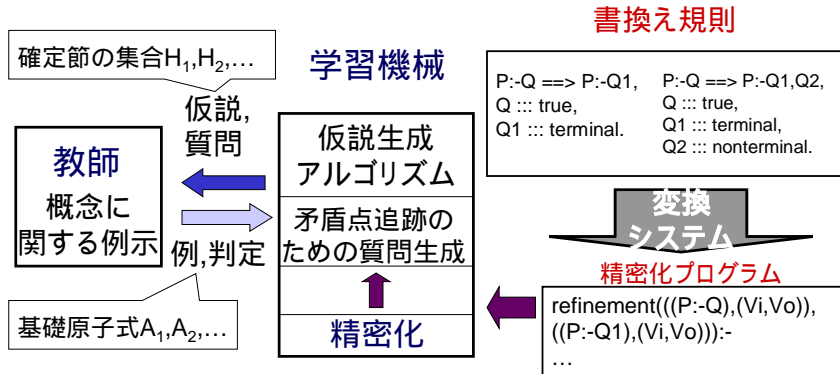
Logic with Learning (仮説の選択)

本分野では、論理体系を利用した学習モデルを構成する際に、生成された仮説を選択する行為をも論理的推論とみなすことを目標にしています。これは帰納推論を

$$x \quad y \quad \text{hypothesis}(x) \quad (\text{sample}(y) \quad \text{entails}(x, y))$$

とメタな論理式で表現した上で、存在 と含意 に帰納推論としての解釈を与えていることとなります。学習モデルとしては、**極限同定モデル**をはじめ、**質問学習**を利用し、尤度に相当する**嗜好性**を利用した推論を論理の中に組込んでいきます。反単一化やデータマイニングで有名なアプリオリ・アルゴリズムも組み込み対象になります。

質問学習への書換えと型の利用



論理プログラミングへの帰納推論の組み込み

以下のリストの要素を並び替えて順列を作ってください

入力されなかった要素は探索されません

[bound,roof,length,shape,load_s,load_n,wheel]

| [bound,roof,length,shape,load_s,load_n,wheel].

多頻出か判定する頻度を何%以上にするか入力してください

| 20.

AMSS = [bound,east],[roof,closed],[shape,rectangle],[wheel,2]

continue? y/n

| y.

ここで、続けることを選択すると
新たな多頻出な文を出力する

AMSS = [bound,west],[roof,open],[length,short],[load_n,1],[wheel,2]

数学と帰納論理

帰納論理は数学，特に可換環論や数学基礎論と密接な関係を持っています。

可換環論では多項式環などのイデアルが**有限基底**であることが知られていますが，この事実は正データ学習からの極限同定による形式言語(半群)の帰納推論可能性の特別な場合になります。形式言語などの半群は情報科学では広く利用されています。本分野では，昨年，数学者との共同研究により，ある種の**特異点解消**についても同様の理論が成立していることを示しました。

この理論の鍵は，極限同定という帰納推論の正当性を代数構造によって保障することにあり，そのために選択公理(の弱い形)を利用します。今後はこのような数学基礎論で知られている公理と極限同定の関係について明らかにしていく予定です。

実数値関数を帰納推論においても，**連続性と計算可能性・帰納推論可能性**の関係が次第に明らかにされています。当分野でも，他研究機関の協力を得ながら，この関係の研究を進めています。

計算論的学習

概念空間
仮説空間
データ
学習アルゴリズム
推論の正当性

多項式環

イデアル
有限基底
正例
Buchberger Alg.
極限同定

特異点解消

ニュートン図形
頂点の集合
テーラー展開
ニュートン図形の構成
極限同定

参考文献

- [1] 有村博紀, 平田耕一, 山本章博 : 帰納論理プログラミングと証明補完, bit別冊「発見科学とデータマイニング」, 34-44, 2000.
- [2] S.-H.Nienhuys-Cheng and R.de Wolf : Foundations of Inductive Logic Programming (Lecture Notes in Computer Science 1228), Springer, 1997.
- [3] N.J.Nilsson : Artificial Intelligence: A New Synthesis, Morgan Kaufmann, 1998. (特に Part III: Knowledge Representation and Logic).
- [4] 山本章博 : 帰納論理プログラミングの基礎理論, 人工知能学会誌, 12(5), 13--22, 1997.
- [5] 山本章博 : 帰納論理プログラミングの基礎理論とその展開, コンピュータソフトウェア, 2006