

特集 「21世紀のAIのための数理モデル」

パネル討論

「21世紀のAIのための数理モデル」：議論集

Symposium: Mathematical Models in Artificial Intelligence toward 21st Century

藤本 和則
Kazunori Fujimoto

NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories.
fujimoto@cslab.kecl.ntt.co.jp, <http://www.kecl.ntt.co.jp/icl/about/fujimoto/index-j.html>

山本 裕
Yutaka Yamamoto

京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University.
yy@i.kyoto-u.ac.jp, <http://www-ics.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~yy/index-j.html>

鷺尾 隆
Takashi Washio

大阪大学産業科学研究研究所
Institute of the Scientific and Industrial Research, Osaka University.
washio@ar.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www-moto.sanken.osaka-u.ac.jp/washprjp.html>

繁樹 算男
Kazuo Shigemasa

東京大学大学院総合文化研究科
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo.
kshige@bayes.c.u-tokyo.ac.jp, <http://face.c.u-tokyo.ac.jp/>

松嶋 敏泰
Toshiyasu Matsushima

早稲田大学経営システム工学科
Dept. of Industrial Management & Systems Engineering, Waseda University.
toshi@matsu.mgmt.waseda.ac.jp, <http://www.matsu.mgmt.waseda.ac.jp/users/www/prof/toshi-j.html>

パネル討論要領

名称：21世紀のAIのための数理モデル

日時：2000年7月5日(水) 10:30～12:30

会場：早稲田大学国際会議場

パネリスト：山本 裕 (京都大学教授), 鷺尾 隆 (大阪大学助教授), 繁樹算男 (東京大学教授), 松嶋敏泰 (早稲田大学教授)

司会：藤本和則 (NTT)

プログラム：

- (1) パネリストの講演 (1時間)
- (2) 議論1：司会 & パネリスト (30分)
- (3) 議論2：会場の参加者 & パネリスト (30分)

1. はじめに

本稿では、パネル討論で行われた議論のうち、特に重要なものをまとめて紹介します。2章ではプログラム(2)の「議論1」、3章ではプログラム(3)の「議論2」の内容をそれぞれ紹介します*。

2. 議論1：司会 & パネリスト

2.1 人工知能という領域の固有性： 多分野にまたがるAI

藤本 しばらく人工知能という研究領域の固有性について考えてみたいと思います。AIというのは知能を扱う研究分野だと思うのですが、例えば電気工学とか機械工学とかは、扱う客観的な実体があります。電気だったら電気を見るし、機械だったら機械を見る。それに対して、AIというのはそういう実体を見ている人間を見る。一つ上の階層に上がって人間のモデル化のプロセスを見るといった感じだと思います (図1)。

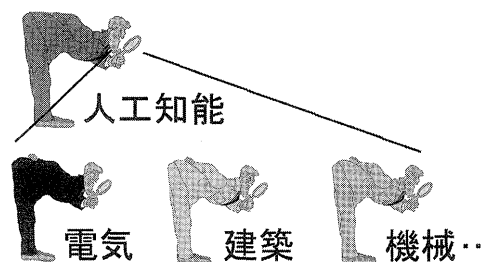


図1 人間のモデル化のプロセスを見る人工知能

* プログラム(1)の「パネリストの講演」については、本特集の各パネリストの執筆記事 [山本01, 鷺尾01, 繁樹01, 松嶋01]をご覧ください。パネリストが当日利用したスライドは、<http://www.kecl.ntt.co.jp/DSIU/math/>から取得できます。

そういう点からしますと、松嶋先生の御講演にありましたように、人工知能という領域には、さまざまな分野でできてきたモデルを集めて、このモデルはこの分野の

これに相当するなど判断して、モデルを整理していくような役割があるのではないかと思うのです。松嶋先生のお話では、情報論的学習理論の分野では、すでに、こうしたモデルの整理が進んでいるとのことですが、その進み具合はいかがでしょうか。

松嶋 今のところは、先ほどの例のように幾つかの成果が出てきていますので、順調に進んでいるとよいと思います（[松嶋 01] の2・3節参照）。

2・2 人工知能という領域の固有性：主観を扱う AI

藤本 人間の思考や行動、これは主観的な実体ですが、それを知能として設計しようとするときには、客観的な実体を扱う分野にはない固有な問題が出てくると思います。こうした主観的な実体を数理的に扱うにあたっては、私は、繁榊先生のお話にあった規範、記述、処方モデル（[繁榊 01] 参照）という考えが極めて重要になると思います（図2）。

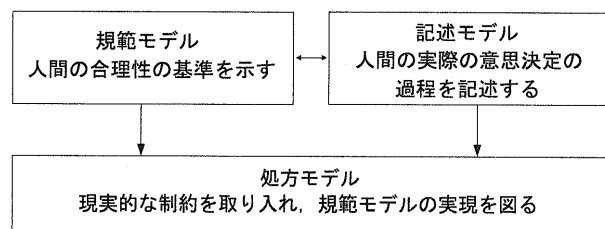


図2 規範、記述、処方のモデル

ただ、人工知能という分野から見ると、これらのモデルには、知能を「設計する」という視点が欠けているように思えます。人工知能の目標は、思考や行動を説明することではなく、設計することでしょうから、規範、記述、処方のモデルを役立てながら知能を設計する理論の確立が、AIがやるべき固有な問題としてあるのではないかと思います。

繁榊 知能を設計する視点というのは目的関数がリアルにあって、ある制約条件のもとにそれを最適化する姿勢をもつということですね。処方モデルの考えは、現実的な制約を取り入れて規範モデルの実現を図るという意味で、設計の視点を含んでいると思います。ただ、心理学では「現実的な制約」として人間の認知能力のリソースの不足を扱うことが多く、計算機パワーに関する制約などはあまり対象としないと思います。この点が人工知能という設計と異なる点でしょう。

2・3 人工知能の設計論

藤本 人工知能の設計論を創ろうとしたとき、人間の知的な振舞いを説明するためのモデルと、そうした振舞いを設計するためのモデルとがともに重要になってくるように思います。説明するためのモデルというのは文科系、例えば心理学とかでかなりやられています。ただ、なか

なかそれを設計のモデルとして使うことができない、いざ設計しようとなると、説明のモデルというのは全く無視して、設計のための変数を別に用意する。なぜ、人間の行動、思考を説明するモデルというのは、人工知能設計のためのモデルとして使えないのでしょうか。

山本 繁榊先生から規範モデルのお話がありましたが、制御の分野でも規範モデルという考えがあります。これは、規範モデルの入出力に近づけるようにプラントの入出力を制御するといったものです。ただ、プラントのモデルが規範モデルと違ってある種特性（非最小位相性）をもっている場合には、いくら制御を頑張っても性能限界にすぐに達してしまっていて、規範モデルに近づき得ないことがわかっています。その辺のところ明らかにされていないと、記述モデルが頑張ってみても、設計しようとするとうまくならないということが起こるのではないかと思います。このように、設計論を確立するには、がんばれば必ず設計できるのか、あるいは、どうがんばっても設計できないのか、が明らかになっていることが重要だと思います。

2・4 人工知能のための数理モデル

藤本 人工知能での数理モデルのあり方について、何かございますでしょうか。

鷲尾 AIのモデルというのは工学的なモデルで十分かという私はそうは思いません。ある場面にだけ適応性が高く、精度が良いモデルをつくっても、AIではなかなか使えない。ちょっと状況が変わればもう使えなくなってしまいます。AIのモデルを目指すのであれば、現実のある程度の範囲と対応がとれている、数理的にいうと、同型性を保っているようなモデルを使っていかないといけないと思います。多少精度が悪くても、多少複雑であってもいいと思います。AICとかMDLを使っている皆さん、シンプルネスを追求されるのですけれども、それをやると、使えるモデルの可能性、状況を切り捨てることになるのです。精度の良さやシンプルネスもある程度重要ですが、もっと現実との同型性みたいな対応が、ちゃんとモデルの構造としてとれているのかということもAIでは議論していかないといけないのではないかと。

それから、与えられているデータの中だけで数理モデルを考えるということは、AIでは現実的ではなくて、人間というのは結局自分で取ってくるわけですから。モデリングに必要なデータが不足していたら、測定したり、アクションを起こして取ってくるわけですから。そういうことも含めたモデル化の方法論というのを考えていかないと破綻を来すのかなというのが私の考えです。それは、山本先生がおっしゃった可制御性、可観測性などにも関係するのですけれども。

山本 鷲尾先生がおっしゃった話は非常に興味深いと思います。AIで特徴的なのは、普通の工学の問題と違って世界が閉じていないことだと思います。一方、ある程

度工学的に成功しようと思うと、世界モデルはこの範囲までにしておきますということがないと、なかなか整合性のある議論をしにくい。どのあたりに妥協点を見いだすかというのが重要で、完全に開いてしまうとどうしようもないところに行ってしまうと思うのです。

繁梲 どのあたりで切るかというのはケース・バイ・ケースで、AICが単純化というのは必ずしもそうではない。AICを信仰する人はそういうと思います。どのモデルが一番いいかという基準もない状況で、ベイズ統計的な答えが一応あります。どのモデルが正しいかどうかというのではなくて、モデル自体の正しさをも事後確率で評価できる。積分だらけになりますけれども。そうしますと、ある状況でどれがいいかというのは何でしょうかという基準を、目的関数が決まっていれば決められる。これは、素朴ですが私はAICやBICよりはよいと思います。ベイズ統計学の立場からいえば、そういうふうな一つの答えを出せるのではないかと思います。

2.5 人工知能における連続と離散

藤本 人工知能における連続と離散という話について、ちょっと考えたいと思います。実世界というのは、やはり連続だと思えます。時間的にも連続だし、空間的にも連続です。それに対して、人間がやっている思考、推論というのは離散と考えられていると思います。例えば、テーブルの上にカップがあるとか、鳥が飛ぶとか、そのレベルでいうと離散的にやっている。連続のものを離散で考えている以上、人間はある意味でサンプリングしていることになります。実世界から一部だけ取り出して、推論して、その結果に逆変換をかけて連続のものを復元していると思えるわけです(図3)。

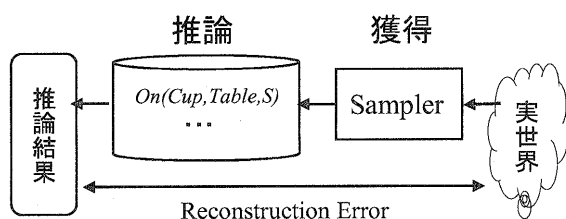


図3 実世界を扱う推論系

一方、人工知能の推論の研究では、実世界から一部を取り出した後どう推論するかについて、非常に興味を持たれてきたと思います。しかし、系全体で見ると、どう取られてきたのか、どういうふうにならしたのかというのをなしにして、推論のやり方の良し悪しは議論できないと思うのです。推論というのは獲得とともに論じる必要があるのではないかと思います。鷲尾先生の御講演が、これをすごく端的に表していると思います([鷲尾 01]の2章参照)。我々は、情報処理の過程というのにすごくアテンションしがちですけれども、それがどう

いうふう測定されて、記号化されて、数量化されてここに来たのかという部分が、実は非常に重要なのではないかと思います。

山本 私は現実のロジックとか、人間の行動パターンというのは、とってきた離散のところでのロジックの展開というのも重要ですけども、多分アナログレベルのほうで動いていると思います。論理はそのとおりですが、私は同意しないとか、そういう理屈が出てきますよね。そういうのは、多分アナログのほうのロジックは納得していない。アナログのほうにはそれなりのダイナミクスがあって、それを離散化したところでの論理展開、形式論理のマニピュレーションでは拾い切れないものが往々にしてあるから、そのあたりの説得力が足りないという事態が起こったりするのではないかと想像しています。

繁梲 鷲尾先生が講演で話されたのは、尺度化という意味でのサンプリングですね。しかし、今、藤本さんが話題にされたのは、それよりもっと幅広い話だと思います。現実世界からカップとかテーブルを取ってくるサンプリングというのは認知全般ですよ。それは、もともと何の意味もないようなカップや、テーブルなどを我々が見るということで、これは非常に大きい問題です。認知に関して、いろいろな学説があるのですけれども、AIはそこまで問題を大きくせずに、もっとドライでいいと思います。ただし、個々の研究者がこのような認知科学に関心をもち、研究することは大いに必要であり、ブレークスルーのきっかけになるかもしれません。

3. 議論2：会場の参加者 & パネリスト

Q.1 数理モデルのように単純なものより、知識ベースのような複雑なものが良いのではないかと？

鷲尾 それに関して言いますと、機械学習の分野で、例えばmemory based reasoningがありますが、あれは事例を全部データベースにためこんでおくわけです。その場合は、まさにおっしゃるように、データベース全体が一つの現実のモデルになっているわけです。そうした考えは、それはそれで、非常に大切だと思います。でもそれだけではだめで、人間の知的活動の中で数理モデルで記述できるところは、なるべく記述したほうがよいというのが私の考えです。できるだけ扱いやすい形で体系化していくべきだと思うのです。それを一生懸命、できるかどうかわからない分野に踏み込んで、100年かかっても200年かかってもやっていくという努力を、数理モデルの意味からのAIをやる人は怠るべきではない。その一方で、どうしても数理化できない部分はあるわけで、そうした部分を扱う研究も非常に大事だと思います。

山本 鷲尾先生に同感なのですが、例えば巨大なデータベースを用意して、それが一つのモデルであるという考え方は当然あると思います。ただ、数理モデルの良さは、モデル自身がハンドリングの対象であってほしいという

ところからきていると思います。そうでないとなかなか次のステップへの発展が難しいのではないかと思います。もう一つだけ付け加えておきたいのは、扱える範囲が小さくても、逆にきちっとした成功例が一つあることが、将来のいろいろな礎石になるのではないかという感想もちょっともつのです。例えば、線形系などは、世の中にそんなに存在しないわけですから、線形制御理論は、非常に小さい範囲を扱うものなのですが、この理論のおかげで、制御理論では多くの発展がありました。

松嶋 鷺尾先生から事例ベース推論の話がありました。私はそれは数理モデルだと思います。例えば、新しい事例が入ってくると、前の事例とどれが近いのかということをやります。そこには、距離という概念が入っていて、十分数理モデルといえます。ただ、それを意識して使っているか、使っていないかだけの違いだと思います。そのあたりを数理モデルとして捉えて研究する立場も重要であると思います。

Q.2 鷺尾先生の講演にあった許容する変換について、モデリングのあり方からどのようにお考えですか？

鷺尾 測定論の立場からいうと、変換というものの自体も我々にとって意味のある変換でないと、理解不可能なモデルができてしまう。例えば、スケール変換でいえば、比例尺度や間隔尺度の変換というのは、我々が日常で使っている変換で、非常に単純で人間にとって理解しやすい。変換の枠組みというのは、やはり、人間がかなり決めている。でも、人間が全く勝手に決めてしまうと、今度は全然現実と合わない。そこで、現実となるべく近似的に同型的な対応のとれるような変換を選びながら、理解可能なモデルとして人間が使っているのだと思います。例えば線形モデルというのは、人間にとって非常にわかりやすいモデルの一つです。でも、それだけでは単純すぎて困るから、現実との同型性がとれない部分があるから、ニューラルネットやベイジアンを使いましょうという話が出てくる。それぞれのレベルで我々が理解するために必要な変換なり、測定のプロセスを選んで使っていく。その部分は我々が握っている自由度だと思うのです。そこを、どういうふうによく選んでいくかというのは、数理モデルの考え方でも、AIの考え方でも非常に重要な部分ではないかと思います。

Q.3 記号処理的AIにダイナミクスが入っていないという点について、どのようにお考えですか？

鷺尾 我々が、現実のデータをどう測定して、情報をどう生産していくのかというところが重要だと思います。そこまでさかのぼって数理モデルとして扱っていかないとかならないと思っています。それから、先ほど山本先生がおっしゃっていた外乱というものを自分の中に取り込まないとダイナミクスを同定できないという話は、まさ

に重要な部分で、それは完全に今のAIに欠けている部分だと思うのです。そこをちゃんと入れていかないと、ダイナミクスを表現できるようなモデルというのは、シンボリックにもつくりえないのではないかと思います。

Q.4 知識の再利用というのはよく聞きますが、数理モデルの再利用はいつ頃可能になるとお考えでしょうか？

松嶋 経営の分野でサプライチェーンマネジメントや、在庫管理などをいろいろやっているのですが、そこでの問題は、モデル化さえすれば、あとはある種の制御理論の問題と同等になることがあります。先ほどもありましたように、人工知能学会もそういう複数の分野の研究の橋渡しする役割をもつ学会の一つでしょう。総合工学というか、モデル学というか、そういうようなものがどんどん発達してこないといけないのではないかと。そろそろそういう時期に来ているのではないかと思います。本当に、ここ10年かそれぐらいで、そういうことが徐々にでき上がってきてほしいという気持ちです。

Q.5 計算機技術の進歩と数理モデルのあり方との関係について、どのようにお考えですか？

繁樹 ベイジアン的な答えになりますけれど、モデルが複雑であってもいいというComplex Statistical Modelingが注目されてきています。AICで単純にモデルを最適化するという考え方には私はむしろ反対です。現実の問題解決のためには、Complex Statistical Model、これは階層モデルであったり、ネットワークモデルであったりしますが、これをマルコフ連鎖モンテカルロ法でやるという方向が有効だと思います。これは、コンピュータを前提とした複雑なモデルをも組み込むというものです。どのような水準の測定値があるかをよく認識し、Measurementモデルによって潜在変数をモデルに含めてよいと思います。これは、得られた測定値の尺度の水準を超えて潜在する本質的な構造を見いだそうとするアプローチであり、将来性があると思います。

松嶋 工学でモデルを使うとしても、結局は取り扱えないと困るのです。例えば、潜在変数とかパラメータの数が多くてとても計算できないようなモデルは、昔は扱えなかったわけです。でも、今お話があったように、例えばそれをシミュレーションで求めるとか、反復計算などを用いた数値計算で求められるという方法が出てきますと、別に陽に解析的に解けなくても十分モデルとして使えるわけです。そういう意味では、相当広範囲のモデルというか、複雑なモデルでも使えるような状況になってきている。計算機の進歩に従ってモデルも相当変わっていくと思います。

山本 例えば、カルマンフィルタというのは、ようやくマシンコンピュータシミュレーションが可能になったことを意識して、カルマンがそういう定式化を考えたわけです。それ

以前のウィナーフィルタでは、そういう解き方を考えなかったわけです。今、制御のモデルでどういうことが起こっているかという、モデリングに関しては、必ずしも計算機の進化はそう明確には効いていません。でも、解き方に関しては、昔は微分方程式か何かにして解こうとしたのが、とにかく行列不等式みたいなものを考えて、それを解かせるという方向にあります。ただ、ダイナミクスがあると解ける次元が、意外なものですが大体100次元くらいで止まってしまうのです。リライアブルにもうそれ以上解けないのです。オペレーションズリサーチでは、例えば1万次元のものを解こうとするのですけれども、制御だと100次元で、今のコンピュータが進歩しているといっても、ある意味でそのぐらいなのです。空間3次元のものを解こうとすると、とんでもない話になってしまう。もう1桁か2桁進歩してくれないと、モデルのほうに画期的なインパクトを与えることは、ひよっとしたらないのかなという感じもあります。

鷺尾 例えば、私がお話したようなモデリングはすごく単純に見えますけれども、あれは、あの式の範囲内で全部計算機でサーチをしているのです。膨大なデータと膨大な計算時間がかかるサーチとなっています。モデルは一見単純に見えるけれども、実際に計算機のパワーがないとそういうサーチはできない。やはり解き方という点からみると、どんどん新しいモデルが扱えるようになってきた。単純なモデルですら今まで解けなくて、扱えなかった問題がたくさんあると思うのです。

謝 辞

本パネル討論での議論に参加下さった皆様に改めて感謝の意を表します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [松嶋 01] 松嶋敏泰: 情報論的学習理論での数理モデル, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 252-255 (2001)
 [繁樹 01] 繁樹算男: 意思決定での数理モデル, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 249-251 (2001)
 [鷺尾 01] 鷺尾 隆: 法則式発見理論での数理モデル, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 245-248 (2001)
 [山本 01] 山本 裕: 現代制御理論での数理モデル, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 241-244 (2001)

2000年12月12日 受理

————— 著 者 紹 介 —————

- 藤本 和則 (正会員) は, 前掲 (Vol. 16, No. 1, p. 129) 参照.
 山本 裕 は, 前掲 (Vol. 16, No. 2, p. 244) 参照.
 鷺尾 隆 (正会員) は, 前掲 (Vol. 16, No. 2, p. 248) 参照.
 繁樹 算男 は, 前掲 (Vol. 16, No. 2, p. 251) 参照.
 松嶋 敏泰 (正会員) は, 前掲 (Vol. 16, No. 2, p. 255) 参照.