



「AI マップ—人工知能における基本的問題」へのコメントと回答

Comments on “AI Map—Fundamental Issues in Artificial Intelligence” and Their Answers

本誌 Vol. 10, No. 3, pp. 340-346 の橋田浩一氏の AI マップ「人工知能における基本的問題」は、人工知能研究がいずれにせよ相手にしなければならない本質的な問題について、彼流のやり方で問題提起を行った意欲的な論文であったが、当然ながらそれは橋田氏の主観に基づいており、適切なものの見方であるという保証はない。そこで、2人の研究者にコメントを求め、さらに、それらのコメントに対する橋田氏の回答を執筆いただいた。それによって、読者の理解が深まり、問題点がより明確になれば幸いである。

ここでは、まず、橋田氏の記事の意味するところを簡単におさらいし、やや大局的な感想を述べることによって、議論の導入部としようと思う。

橋田氏の記事のなかであげられている基本的問題は、AI システム一般の設計原理に関するものであるが、AI そのものの定義がそうであるのと同様に、その問題が具体的にどのようなものであるのかよくわからず、そもそも解法と呼べるものが存在するののかもわからない。それゆえ、では一体何をすればいいのか、ということまでは明確には読み取れない。しかしながら、これらの問題が擬似問題 (quasi problem) かということ、そうではなさそうである。これまでの AI システムは、これらの問題を考えなくてすんだのではなく、考えなくてすむ程度までシステムの射程自体を矮小化していたのだった。例えば、橋田氏の記事で述べられている「文脈に関する厚み」をまじめに実現したのではなく、システムの直面する文脈を、明示的に制御できる程度まで限定したのである。それによってできることは当然かなり限定されるが、システムのタスクやドメインがその範囲内であれば、さしあたって何とかあったのである。

しかし、システムのスケラビリティとは、システムがどれだけ多くの文脈に適応できるかによって決まると考えられるので、スケラブルなシステムを構築するためには、文脈に関する厚みを何らかの形で実現する必要がある。文脈の多様性（あるいは環境の複雑性）がシステムの設計の複雑性を大きく上回る場合、やはり橋田氏の記事にある（挙動あるいは構造の）創発性が不可欠な性質となる。ただし、何をすれば創発が可能になるか、という創発性の設計の問題は、結局のところ、文脈に関する厚みの実現の問題と等価であり、問題がより考えやすくなったとはあまり感じられない。しかし、例えば、人工生命でいわれるところの進化システムが、挙動と構造の両方の創発性を実現し、多様な文脈（環境）に適応する可能性を高めていることは一つのヒントになるだろう（ただし、創発システム＝進化システムということではない）。

また、橋田氏が長年提唱してきている制約は、宣言的な記述の枠組み、あるいは創発性（挙動の複雑性と設計の複雑性との比の増加）そのものの要因になるということとはよく理解できるとしても、それが創発性の設計にどのように寄与するのか、事例ベース推論や類推がまがりなりにも実現している評価や決定のメカニズムをどのように実現するか、などに関する明確な指針がほしいところであろう。

ところで、文脈に関して厚いシステムをもたらす本質が、環境からの多様な情報を扱い、多様な挙動を生成する能力にあるということは、納得できる話である。そのとき、多様な情報のなかから、適切な挙動の決定のために必要なものを見つけること、いわゆる注視点制御の問題が生じることも、容易に想像できることであろう。では、その注視点制御のメカニズム自体をどうやって制御するのか、そのときは注意の問題は生じないのか、生じる場合、それを扱うさらに一段メタなメカニズムが必要なのか、というような疑問（これは橋田氏のいう注意の循環の話と同じことである）が発生するだろう。橋田氏のいう制約は、この注視点問題の堂々巡りを解消する情報処理のメカニズムを与えてくれるのだろうか（これについては橋田氏は今後の研究課題であると述べている）。

結局のところ、知能を知能たらしめる要因である思考とか意識とかの問題は、一人称的な問題であり、それは本来、科学的な方法論にはなじまないと思われる。これは、AI システムの設計原理は、人間の知能に関する作業仮説を超えることは永遠にないことを意味するのだろうか。しかし、橋田氏によると、一見一人称的な問題であるか見えながら実はそうでもなさそうな話もあるから、そんなに明確に分けられる話でもなさそうだ、という意見もある。ともかく、具体的なシステムの挙動を観察して、現象論的に分析するやり方は、さしあたって問題

なさそうであるから、今後も人間の行動の観察による仮説の生成と、具体的な AI システムによるその検証の繰返しによって、AI 研究を促進していかなければならないだろう。

最後に、情報のモノ性あるいは身体性と、それに基づく部分性こそが、AI という企てを可能にしていると同時に、AI 研究の困難さも等しくもたらしている、という橋田氏の見解には賛同できると思うのだが、どうであろうか。AI とは、そのような部分性に起因する、一人称的な問題を内包した試みなのである。

(編集委員：長尾 確)

《コメント》

1. 松原 仁氏 (電子技術総合研究所 推論研究室主任研究官)

1. はじめに

橋田氏と筆者はかなり長い間にわたっての共同研究者で、常日頃から橋田論文のテーマについて議論を繰り返してきた。筆者も「人工知能の大問題」ワークショップに参加していたこともあり、橋田論文の主張には大筋で同意する。ただし、いくつかの点については見解が異なるので、それらについてコメントしたい。また、橋田氏の独特の書き方ゆえに(はっきりいえば難しい書き方ゆえに)、彼のいわんとするところが読者にちゃんと伝わっているかあやしいところがあるので、確認のためのコメントも付け加えたい。

2. バックグラウンドとしての自然言語処理

橋田氏はもともと自然言語処理の枠組みとして制約を取り上げ、それを知能全般の枠組みまで広げようとしている。彼は自然言語処理を専門にしてきたために、意識的か無意識的かは別として、人工知能の典型的な問題として自然言語処理がつねに頭にあるものと思われる。筆者は人工知能の典型的な問題として自然言語処理を思い浮かべることはけっしてない。最初に学んだ画像理解、知能ロボット、などをつねに思い浮かべる。筆者の立場からは、自然言語処理は知能のなかでかなり特殊な問題に思える。橋田氏と筆者のこのようなバックグラウンドの違いが、知能全般の枠組みとしての制約に対する意識の差を生んでいるものと思う。

例えば、橋田論文のなかに「自然言語処理のような組合せ的な複雑性の高い作業がこうした設計法で実現できるとは思わない」という箇所がある。この文章は Brooks や Rosenschein のロボットの多様性が不十分であることを指摘したものである。彼らのロボットに多様性が欠けているという指摘自体は筆者もまったく同感であるが、それは自然言語処理が実現できないからではなく、この方法ではまともなロボットが設計で

きないという理由からである。自然言語処理が実現できないことは、知能全般の枠組みの一次近似としてそれほど大きな問題ではないと思う。橋田論文でしばしば触れられているように、(大人の)人間という知的システムは種としての進化や個としての学習によってできたものである。人間が進化の過程で自然言語処理ができるようになったのはごく最近のことであり、他の動物のようにそれ以前にできるようになったこと(例えば画像理解であり、さらにさかのぼれば障害物回避)のほうが圧倒的に多い。ほとんど最後に実現された機能である自然言語処理を中心にすえ、進化をさかのぼる方向で一般化させていくという研究の方法論が妥当かどうかはよく考える必要がある。Brooks のように障害物回避から進化させるという研究方法論も極端で無理があるが、自然言語からさかのぼるのも極端であるように感じられる。

人間以外の動物でも実現されている機能を具体化できる枠組みをまず作り、その上に「自然言語処理のような組合せ的な複雑性の高い作業」ができるような枠組みをかぶせるという設計の方法論も検討の余地であろう。一度に自然言語処理対応の枠組みにいくよりも妥当かもしれない。障害物回避にも自然言語処理にもとらわれない中間的な枠組みをうまく設定することこそ人工知能の基本的問題と考える。

3. 制約に基づく設計の是非

知的なシステムはあるレベルで制約に基づくシステムとみなすことができる、というのが橋田論文の主張である。対象が自然言語であれば、人間は自然言語を理解して発話するというように処理には解析と生成の二つのモードが存在する。その二つのモードで使われている知識は実は同じ制約が逆方向に適用されているものである、という主張は確かに説得力がある。しかし、画像を対象にすると、人間は画像を理解している

が画像を生成してはいない。そのような知識まで制約で表現することに、果たしてどういう意味があるのかがすぐにはわからない。もっとも、画像を外部に対しては生成しないものの、内部ではイメージとして生成している可能性はある。その生成のモードで使われている知識が理解のモードのものと同じ可能性はあり得る。しかしそれはあくまで間接的な対応に過ぎない。

上記と関係するが、知的なシステムがあるレベルで制約に基づくシステムとみなせるということは、ただちに知的なシステムは制約に基づいてインプリメントしなければならない、あるいはインプリメントすべきである、ということも含意しないように思う。このように感じてしまうのは、橋田論文が制約の重要性を何度も強調しながら、制約をより効率的なものへと変換していく具体的なメカニズムを（いまの時点で）提供していないからであろう。制約は、橋田氏の表現を借りれば「情報の流れを捨象した」非常に一般的な枠組みである。制約のレベルにまで「後退」すれば、知識の記述能力ならびに説明能力の一般性を確保できることは直観的に納得できる。しかし制約まで後退することで、一時的にせよ効率を犠牲にしているのも確かである。改めていうまでもないが、よく使われる知識が効率良く処理されてこそ知的といえる。ぜひ、効率の悪い一般的な制約を効率の良い特殊な制約へと変換するメカニズムを提示してほしいものである。強力な学習メカニズムを備えた制約システムとなって初めて説得力が出ると思う。これまでのプログラム変換の技術だけではその学習メカニズムとして不十分なのは明らかである。

4. 制約と類推

橋田論文では多様性を実現するための枠組みとして制約と類推（事例）が同じレベルに並んでいるが、果たしてこの二つは同じレベルにくるべきものなのか疑問である。橋田論文の他のところにあるように、橋田氏の枠組みをとれば事例を制約として柔軟な制約充足を行うことが類推に相当するはずである。だとすれば、制約はある機能を実現するための枠組みであり、類推は実現されるべき機能ということになる。この二つのレベルは異なるはずである。そもそも、橋田論文でどういう理由で類推が上げられたのか理解に苦しむ。橋田氏が主張したいことと類推はほとんど関係が

ないように思える。

5. 一般フレーム問題

一般フレーム問題は人間にもコンピュータにも完全には解決できない[松原 89]ので、人間がしている現実的な解決をコンピュータにもできるようにすることが人工知能の目標になる。橋田論文だけからは、制約によって一般フレーム問題が解決できるかのように読める。けれども、(橋田氏も当然了解しているはずだが)制約で知識を記述しただけではフレーム問題の現実的な解決はできない。

よく使われる知識が効率の良い形で表されていれば、橋田氏の言い方であれば効率の良い制約として表されていれば、一般フレーム問題の現実的な解決ができたことになる。文脈の厚みという話に関連づければ、よく生じる文脈では非常に効率良く処理が行われ、たまにしか生じない文脈では非効率的ではあるがなんとか処理は行われる、というのが知的であることになる。一般フレーム問題は、知識の形としての制約だけでなく、知識の中身にも関係しているのである[橋田 94]。

制約が一般フレーム問題の現実的な解決のための潜在的な枠組みであるのは認める。前述のように制約を効率の良い形に変換するメカニズムが備わって一般フレーム問題へ対応できるようになる。筆者は、一般フレーム問題の現実的な解決の鍵は学習メカニズムのほうにあると考える。

6. おわりに

結局橋田論文は、人工知能は難しい、すなわち知能の人工的な設計は難しい、ということを改めて確認した論文であろう。これはもちろん橋田氏一人が悲観的なためではなく、人工知能はやはり難しいのである。人工知能研究者はこの厳しい事実を正面から受け止め、しかもあきらめることなく前進を図るのみである。

◇ 参考文献 ◇

- [松原 89] 松原 仁, 橋田浩一: 情報の部分性とフレーム問題の解決不能性, 人工知能学会誌, Vol. 4, No. 6, pp. 695-703(1989).
- [橋田 94] 橋田浩一, 松原 仁: 知能の設計原理に関する試論—部分性・制約・フレーム問題—, 認知科学会編集, 認知科学の発展 Vol. 7, pp. 159-201(1994).

2. 國吉康夫氏（電子技術総合研究所 自律システム研究室主任研究官）

1. はじめに

重みづけに若干差はあるが、私には、橋田氏の問題意識、興味の対象、仮説に共鳴する点が多い*1。

本稿では、特に強く興味を共有し、かつ疑問があったり意見が異なる次の3点を中心にコメントする。①「文脈に関して厚い」と「制約ベース」の関係に関する橋田論文中の議論には納得できない。②「注意」が「制約の内容」とする議論はわかりにくい。また、難問である「注意の構成」の鍵がマルチエージェントにあることを、橋田氏より強く期待する。③「AIの立脚点である情報的見方と身体性に起因する情報の部分性とが矛盾し、困難なジレンマとなっている」という主張は、相互作用主義の観点からは成立しないように思える。

2. 文脈に関して厚いシステムは制約ベースか？

「レベルに関して厚い」(Havel) という概念のルーツは、フラクタルやカオスなどの「スケールに関して厚い」性質、すなわち、隠れた生成原理の働きで無限段階の尺度において相似または近似の(幾何学的)構造が繰り返し出現する性質にある。「レベルに関して厚い」といった場合、そこで保たれる構造とは何かという問題が生じる。さらに、「文脈に関して厚い」(佐藤)となると、「レベル」のような単純な順序構造を持たない「文脈」上で、どのような分布でどのような「構造」が保たれることを意味するのか、明確ではない。

したがって、「文脈に関する厚み」を「知の必要条件」とすることは、実は上のような同程度に難しい問いへの変換をしたことであって、この時点では何も明らかにはならない。もちろん、研究の焦点化にはなっており、上の問い(構造と文脈)に答える試みは非常に意

義深いだろう。

さて、「文脈に関して厚いシステムは、同一の情報対 X, Y に関して入出力が逆になるモジュールを含むので、制約ベースになる」という議論(341 ページ右下)には疑問が残る。「『厚み』を議論する際の『文脈』とは何かという解釈によるが、入出力反転関係と文脈に関する厚みとは、大きな隔りがある。上記の主張をするためには、文脈の厚みと制約の関係について、より完全な形で、正面から議論すべきではないか。

なお、以前より橋田氏が主張する「環境へ埋め込まれたシステムは制約ベースになる」という仮説は、次の意味で十分に納得できる。ロボットの場合なら、「行動とは(多様な)知覚と(多様な)運動の間の制約である」という言明に等しく、例えば能動知覚と知覚運動制御が表裏一体であることや、手先の作業を行うときに「腰を入れる」ことや、アフォーダンス(Gibson)の概念などと基本的に等しく、大変に自然な考え方である。

私の興味は、ロボットにおける上記の意味での制約システムの実現方法にある。入出力反転可能な知覚運動モジュールに、ノイズや不確定性用の適応性を加味したようなものを基本単位とした並列システムは、その一つの候補だろう。私はワークショップで「模倣の科学」を提唱したが*2、上記のようなシステムは、必然的に模倣能力を持つと予想している。その仕組みは、自発的知覚性運動制御に関して調節されたモジュールが、他のエージェントの身体運動起因の知覚入力を受ければ、それに対して適応学習に駆動されて引き込まれながら自己の身体運動指令を発するというものである。実はこの点については、大昔に J. Piaget [ピアジェ 88] が同化と調節による模倣の発現という話をしていいる。私は、模倣の解明こそ人工知能のグランドチャレンジと考えている。世界の分節化、学習の基本原則、コミュニケーションと協調の源、さらに共同注意形成のトリガーなどが集約された問題である[國吉 95]。

閑話休題、知的システムの構成として、ごく少数の種類の情報の間の変換をつかさどる(文脈に関して薄い)機能要素を多数用意し、具体的な文脈ごとに適切な部分集合を選択して稼働させ、組合せとして全体的機能を発現させるという手法(341 ページ右中)は、平凡かつ堅実だが、橋田氏自身指摘するように、選択と評価の部分が難題である。この部分を他から独立させてしまうと、おそらく解決不能になる。

カオス*3 が有望なのは、その構造がエージェントと

*1 ワークショップ討論を共有しているので当然かもしれない。その意味で、橋田論文の「著者が提出した論点にその場でなされたいくつかの議論を加味し、その後のいくばくかの思索を反映させた」という記述には微妙な語弊がある。討論者のおのが独自の切口と仮説のもとに議論を展開し、全参加者に共有されたのであるから、その旨を述べて、できれば各論点やアイデアごとに提案者名を明らかにすべきであろう。

*2 我田引水で心苦しいが、橋田論文を補足する意味で、ワークショップでの自分の論点を簡単に紹介することも期待されていると理解している。

*3 橋田氏は、ランダムネスとカオス、免疫系を気軽に同列に記述しているが、後二者はランダムではない。ランダムネスは構造がないので、スケールに関して厚くはない。カオスは、フラクタル構造を持つ場合があり、スケールに関して非常に厚い。きわめて高い適応力を持つ免疫系の探索原理も、ランダム探索ではなく、ビームサーチに近いものと聞いている。

環境の相互作用をモデル化する非線形力学系から自然に発生（創発）するからである。翻訳すれば、薄い相互作用の群を、全体としてある種のカオス力学系を構成するようにうまく設計しておけば、それだけでスケールに関する厚みが創発するという期待である*4。

3. 難問「注意の創発」とマルチエージェント

注意は知覚、推論、行為、学習のすべてに関与する。私の論点をより精密に言えば、実世界で行動するエージェントにおいては、最小限、知覚から身体運動に至る流れのなかのどこか一点において、情報選択がなされなければならない。これがなければ、エージェントはただ外界の法則に押し流されて受動的に変化していくのみである。この選択を入口で徹底的にやればむだな推論をせずにすむが、やりすぎれば、環境への埋込みを阻害する。かといって出口だけでするには、情報不足に陥る。したがって、流れのなかの至るところで行う必要が出てくる。環境相互作用が複雑になればなるほど、この選択は精密化される必要がある。

さて、「制約が多様な可能性の選択を含むので、注意の問題は制約の内容を問う問題である」という主張（342 ページ左上、右中）は、この論文中での制約概念について十分明確な定義がなされていないために、理解しにくい面がある。前者の「選択」は、環境相互作用の基本モードへの分解であり、後者の注意は、多数ある基本モードの選択的統合*5 の話であると解釈（誤解？）すれば、両者は区別されなければならない。

橋田氏は結局、注意をどのように構成するかを解を与えていない。これこそ人工知能の基本問題であり、非常な難題であるから無理もない。が、意思決定理論に基づく情報収集行為の制御が結局循環論法に陥るといふ指摘は重要である。これは注意の設計、学習の難しさの指標を与えている。注意の学習は、「単一エージェント対環境」の枠組みでは、解けないのかもしれない。「コミュニケーションや模倣、共同注意などの社会的メカニズムは、1 個の知的エージェント内部の分散並列システムにも適用できる原理を与える（343 ページ左下）」。「注意の学習や創造的学習は、孤立した個体では解決不能だが、マルチエージェント環境（進化を含む）では解決可能になるというのが私の直観である。例えば、異なる視点からの観察者が、協調行動の整合による報酬によってガイドされて適切な「焦点」（共同

注意）を形成する[大沢 94]、という過程は、循環論法なき注意の学習原理の有力な候補であると思われる。これは、同じ構造を保ったまま、1 個のエージェント内部に持ち込むことができそうである。すると、漠然と信じられてきた massive parallelism と知能の発現（特に学習）の基本原則との関連は、ナイーブな直観を超えて正しいのかもしれない。

4. 身体性と部分性

環境とエージェントの境界を動的に変えるという橋田氏の案は、ロボット屋にとっては斬新でおもしろい。身体経由の環境相互作用を徐々に内化する形の学習も、この枠組みで説明できるだろう。さらに極端なケースとして、内部で閉じたループの重要性については、私も従来より注目してきた。自己共鳴的に情報を流しているループは自己認識の座と想像できるし、空ループは、構造獲得レベルの学習のリソースとも想像できる。これらが環境と動的に接続・分離したり、新たな構造を獲得する仕組みが重要だろう。ここでも、既存ループに貼り付いて模倣的に構造を獲得するループなど、社会性からの類推が有用だろう。

最終章の議論はおもしろいが、私には、相互作用主義の立場からは成立しない議論に思える。

橋田氏の論旨は「AI は、物理学的詳細を『捨象』した情報のレベルで知を理解しようとしたが、身体という（本来無視すべき）物理的実体に起因する部分性が実は情報の起源であるので、根本的なジレンマに陥っている」である。

実はこの議論は粗すぎる。古典的 AI の起源は 2 段階に分けるべきである。①知を情報のレベルで理解する企て、②物理過程を一括して固定化し「捨象」（無視）する。そして、①は相互作用主義のもとでも有効であり、②は決定的な誤りであったというのが真相であろう。したがって、物理的身体の存在に起因する情報の性質を認め、これを理解しようとするには、何らジレンマはない。

環境相互作用は、環境の物理過程、身体の機能的構造や運動学、知覚系の物理的変換特性、神経系の伝達・変換特性、脳の解剖学的構造や機能分担や相互の連絡、等々、すべてを経由する。この経路上の一点だけ見ると、不確定性やノイズなどでつねに変動が生じている。また、冗長システムであるから、同じことをやるために何通りもの方法がありインスタンスごとに異なる場合がほとんどである。しかし、能動的なエージェントであれば、上記経路の全体にわたって動的に調節を行い、あるいは状況に応じて適切な方法を選択し、

* 4 この章の最後で橋田氏は、制約や類推がカオスの上位構造だと述べているが、このときの「構造」が「厚み」の議論における「構造」と同じ意味とは思えない。

* 5 注意に統合の機能があることについては拙論[國吉 95] 参照。

全体としてある一定の相互作用を維持しようとする(まさに制約である)。

その意味での相互作用を理解することが、AIの使命たる「情報のレベルで知を理解する」ということであろう。そのためには、具体的物理的詳細を十分に観察し、そこから環境相互作用のレベルにおける不変構造(これが「情報」である)を抽出することが必要である。相互作用の種類が変われば、経由する各部分の意味合いはどんどん変わるから、そのつど、上の意味の観察をやり直さなければならない。

まとめると、相互作用主義は身体性を無視せず、したがって部分性を必然的に導入する。また、情報とは必然的に不変構造選択を含むので、つねに部分性を持つ。ここにジレンマはない。

5. おわりに

以上、橋田論文に対する疑問および反論を軸に、知の理解への私なりの展望も交えて議論した。

全体的補足として、私の印象では、このワークショップでの一つの結論は、注意が人工知能の基本問題であること、その学習は非常に難しく、社会的・進化的側面を導入することで初めて解決されるのではないか、ということであったと思う。

◇ 参考文献 ◇

- [國吉 95] 國吉康夫：実世界エージェントにおける注意と視点—情報の分節・統合・共有—, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 507-514(1995).
 [大沢 94] 大沢英一：焦点に基づくエージェント間の整合, 第4回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp. 33-36 (1994).
 [ピアジェ 88] ピアジェ, J.: 模倣の心理学: 黎明書房(1988).

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆ 《コメントに対する回答》 ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

橋田浩一氏 (電子技術総合研究所 自然言語研究室主任研究官)

1. はじめに

長尾・松原・國吉の3氏から数々の有益なコメントをいただいたので、以下ではそれらに答えてみたい。筆者の不注意な書き方から誤解を与えてしまった点もいくつかあるが、意見の相違と思われるものの多くは、制約の意味するところを我々がまだ十分理解していないために生じていると考えられる。もちろん「我々」にはかくいう私自身も含まれるので、制約に関してなるべく多様な観点を見い出すべく努めてみよう。

2. 自然言語とロボット

松原氏は、私の議論が知らず知らずのうちに私の専門である自然言語に引きずられざりみであることを指摘しているが、いわれてみれば確かにそうである。Brooksらのロボットに一般性がないことを指摘する際、自然言語処理を持ち出したのは不適切であり、松原氏のいうように、もっとロボットらしい能力に関する不備を指摘すべきであった。

ただし、自然言語処理にも画像理解にもロボティクスにも、制約の考え方は同様に妥当する。人間は画像を理解しているが生成していないとの理由から、松原氏は、画像を制約で扱うことに関して疑問を呈してい

るが、人間はある意味で画像を生成しているといえるのではないか。これは、松原氏のいうようにイメージとして生成しているという可能性も含むが、それだけではない。一般に、画像の理解は制約充足問題と考えるべきだという主張である。実際、例えばWaltzに始まる線画の解釈の研究はその線に沿うものだった。川人と乾[川人 90]の光学と逆光学のフィードバックを用いた視覚モデルは、人間が画像を生成しているという見方にいっそう近いが、このモデルも制約充足の一例と考えられる。画像を制約で扱うべきだと考える根拠は、線や色や形から一般常識にまで及ぶ多様な情報の間の相互作用が画像理解において必要とされるからであり、この事情は自然言語処理を含むAIのどの領域でも変わらない。

3. 多様性

では、そうした多様な相互作用を実現する(文脈に関する厚みを達成する)ために制約が必要なのはなぜか? 制約(の入出力反転可能性)と文脈に関する厚みとの間の関係が明確に読み取れないという指摘が國吉氏のコメントにあったので、この関係について改めて述べておきたい。

まず、文脈とは利用可能な情報の分布である。認知

主体は、その文脈に依存して適応的な行為を選択しなければならない。広い範囲の文脈においてそれができるといことが文脈に関する厚みなのであった。適切な行為を選択するには、世界のありさまを知る必要があるが、そのための情報処理は、その文脈において利用可能な情報を入力として行われ、情報が流れる方向はどういう種類の情報が入力として利用可能かに依存する。ところが、文脈（利用可能な情報の組合せ）は非常に多い。前回の議論を再び用いると、最も簡単な場合として、情報が n 個の命題の真偽値である場合を考えると、文脈の種類は n の指数関数となる。したがって、粒度の大きな情報処理のモジュールにおいて情報の流れ（入出力）が固定されていると、そのようなモジュールが非常にたくさん必要になる。 n 個の情報の間の入出力関係を固定するモジュールによってあらゆる文脈に対処するには、そうしたモジュールが 2^n 個なければならない。つまり、大粒度のモジュールにおいて入出力の向きが固定したのでは、物理的に実現可能な設計の複雑性の範囲内で文脈に関する厚みを達成できないことになるだろう。文脈に関して厚いシステムが制約に基づく設計を持つとはこういうことである。制約は情報の流れの多様性を生む。

多様性を生むための方法として、私は制約と類推を同列に論じていたが、これは松原氏も指摘するように不適切な書き方だった。制約と類推は確かにレベルが違う。ただ、制約がある機能を実現するための枠組みであるのに対して、類推は実現されるべき機能だと松原氏は述べているが、これはおかしい。長尾氏も、類推を制約によって実現される機能と考えているふしがあるが、これも逆だと思う。類推は情報処理の一つの手法である。制約によって類推が実現されるわけではなく、類推（やその他の演算）によって制約が実現（維持）されるのである。類推は多様な情報の流れを生むから制約の実現に適している。

多様性に関連した話題として、國吉氏の脚注 3 からは、私がカオスを単なるランダムネスに含めているかのような印象が得られるかもしれないが、私のもとの論文を読めばそれが誤った印象であることがわかるはずである。また同脚注では、免疫系において単なるランダムネスが利用されているとの私の叙述への反論として、免疫系における探索がランダムでないことが述べられているが、これらは別に矛盾しない。私がいったのは、抗体のタンパク質の合成にまったく先見性がないということである。そうしてランダムに生成された抗体は既存の免疫システムのなかで選別されるが、選別はもちろんランダムではなく、ビームサーチに近い

ものといえるかもしれない。

4. 制約と学習

松原氏は制約をより効率的な制約に変換するメカニズムの必要性を説いており、私もそのようなメカニズムは必要だと思う。しかし、松原氏のこの議論の前提—制約に基づく設計はとりあえずは効率を無視している—には賛同できない。制約が情報の流れを捨象するということは、とりあえず情報処理の効率に目をつぶるということではなく、もっと強いというか積極的な主張なのである。その主張とは、一般的な計算のメカニズムと制約から効率の良い情報処理過程が創発する、ということである。簡単にいえば、制約は効率が良いということになる。

作業や領域に依存しない一般的な計算メカニズムが制約の処理に用いられることは、制約が情報の流れる向きを限定しないことから導かれる。情報の流れる向きを限定しないということは、情報処理の手順や制御に関する特別な指定を含まないということであり、それは、制約のモジュールや作業の種類に関して特定の手続きが存在しないことを意味するからである。

もちろん、制約をより良いものに変換するような学習メカニズムは必要であり、それによって計算の効率も向上する。しかし、学習メカニズムが必要なのは、初めからいきなり正しい制約の詳細を明示的に与えることが不可能だからであり、制約に基づく計算の効率が一般に悪いからではない。

松原氏は（一般）フレーム問題についても言及し、制約だけでフレーム問題の（実際的な）解になっていないことを指摘しているが、これは正しい。もしも、制約そのものがフレーム問題の解だと主張しているように私の前回の論述が読めたとなれば、それは私の書き方が適切さを欠いたためだろう（そうは読めないように書いたつもりではあるが）。しかし、制約がフレーム問題の実際的解決のための（十分条件ではないが）必要条件であることは確認しておきたい。つまり、制約は挙動の創発に必要であり、学習はその制約の構造の創発に必要であるから、制約も学習も同じく必要なのである。また、研究の現状では、制約の表現と処理の方法も学習の方法も同様に未知であり、どちらがより重要ということはないと思う。制約を学習する方法としては、帰納論理プログラミングと強化学習の統合、あるいは宣言的言語を用いた進化的プログラミングなどが有力な候補だろうが、これらについては残念ながらまだまとまった研究はないようである。

5. 制御と注意

では、制約に関する情報処理の制御はどのようにして得られるのだろうか。その制御の方法は、例えば統計的意思決定理論のような作業や領域に依存しない一般的な理論に基づいて定まるはずである。しかし、既存の決定理論によって情報処理の制御法(注意)を定式化できないことは前回に指摘したとおりであり、情報処理が不完全にしか行えないような場合に決定理論を拡張することが重要な研究課題となる。この課題は、注意をどのように定式化するかということと等しい。ちなみに長尾氏は、注意のメカニズム自体をどうやって制御するかという問題に言及しているが、これは前回に私が述べた注意における循環の問題である。私がここで言いたいのは、古典的な決定理論ではそのような循環が生じてしまうから、そうならないような新しい決定理論を見つけなければならないということである。

注意の問題は制約の内容を問う問題であるとの私の主張に対して國吉氏が疑問を提出しているが、この点については私の書き方が不注意だった。注意が制約の内容に帰着されるというのは、制約の内容から上述のような拡張版の決定理論によって注意が導かれる、ということである。しかし、その拡張版決定理論がない現状で、注意が制約の内容に帰着されるというのは、誤解のもとだろう。

一方、制約が選択を含むという私の論述を、國吉氏は、環境との相互作用を多くの基本モジュールに分解するという意味に解釈しているが、私の意図はそうではない。制約が選択を含むというのは、制約は可能性を限定(評価・選別)するという、もっと当り前のことにすぎない。例えば、文法という制約は、ある種の語列を正しい言語表現として選択する。ただし、いうまでもないと思うが、制約による選択が悉無的なものである必要はない。むしろ、確率的またはファジィな選択を考えるのが自然である。ちなみに、世界の有様に対応する確率のようなものと、認知主体自身の嗜好に対応する効用関数のようなものという、二つの要因の組合せからその選択が生ずると考えるのがよいように思われる。

國吉氏は、注意の問題を解決するにあたって社会的側面や進化的側面が不可欠であると述べている。これには私も基本的に同意するが、それは、制約のかなりの部分が模倣や遺伝によって得られる、あるいは、制約の効率的な獲得には生得的所与と社会的相互作用が必須である、という意味においてである。しかし当然

ながら、生得的能力や社会的相互作用の目録を作るだけでは注意の問題を解いたことにならない。それには注意の一般的な計算理論が必要であり、それは、上記のように、拡張された決定理論のようなものとなる。

6. 部分性と情報

AIは物理的身体を捨象した情報のレベルで知を理解しようとしているが、そもそも情報が有用なのは身体性から生ずる部分性のゆえであるという逆説を、前回に私は指摘した。國吉氏は、①知を情報のレベルで理解しようとするのと、②物理的身体を捨象すること、とを区別することによって議論を精密化したうえで、相互作用主義のもとでは②を前提とせずに①を保持することが可能であると述べている。この点について私と國吉氏との間に意見の相違はないと思う。

違っているのは「情報」という語の言葉遣いであるように思われる。私は上記の逆説を語るにあたって、「情報」をShannonの意味での、つまり古典的な情報の意味で用いているのに対し、國吉氏の「情報」の意味は、古典的AIを語る場合と相互作用主義を語る場合とで異なる。私が言いたかったのは、古典的な情報の概念のもとでは逆説が生ずるということであった。古典的な決定理論によって注意を定式化できないのも本質的には同じ問題である。國吉氏もいうように、相互作用主義はこうした困難を乗り越える可能性を持っている。ところが、それが依拠すべき新しい情報の概念を、我々はまだ手にしていない。繰返しになるが、この新しい情報概念を定式化することこそAIの最大の課題である。この課題は、注意の問題やフレーム問題を包摂しており、文脈に関する厚みの達成という問題をさらに言い換えたものと思われる。

7. おわりに

前回の私の論文に続いて今回いくつかの論点が提出されたが、「大問題」ワークショップにおける議論が以上で尽くされたわけではないし、またワークショップの議論がAIの問題を尽くしているわけでもない。ただし、文脈に関する厚みや注意の問題など、最も重要な問題に関する合意はほぼ成立しているのではないだろうか。今後も機会あるごとにこのような議論を盛り上げていけることを期待する。

◇ 参考文献 ◇

[川人 90] 川人光男, 乾 敏郎: 視覚大脳皮質の計算理論, 信学論, Vol. 5, J 73-D-II, pp. 1111-1121 (1990).