

4. 寄稿

4.1 免疫系に学んだ情報処理システム

生体高次情報系 准教授 渡邊 裕司

コンピュータとの出会い

私がコンピュータと出会ったのは、1980年代前半の小学校高学年の時であった。この時代は、家庭用ゲーム機とともにパソコンが一般の家庭でも見られるようになった頃である。その時に友達の家にあった NEC の PC-6001 が最初に触れたコンピュータであった。ゲームが主な目的であったものの、プログラミングにも大変興味を抱いた。そのため中学生の時に、ファミリーコンピュータ（任天堂 1983 年発売、14,800 円）などの家庭用ゲーム機ではなく、FM-NEW7（富士通 1984 年発売、99,800 円）という高価なパソコンをねだって買ってもらった。BASIC というプログラミング言語でプログラムを書いて、意図したとおりに動いたり動かなかったりすることに楽しみを覚えた。

その後しばらくプログラミングする機会は減ったが、大学 4 年生の研究室配属の際に、コンピュータでプログラミングするだけでなく当時最先端のニューロ、ファジィ、ロボットを研究していた内川嘉樹研究室を希望し、幸運にもそこに所属することができた。内川研究室の石黒章夫助手（現在東北大学の教授）のグループに所属して、そこで出会ったのが石田好輝先生の書かれた免疫系の工学的応用（人工免疫システム）に関する論文であった¹⁾。国内外であまり行われていなかった研究分野であったため興味を惹かれて、現在まで続く私の主な研究対象となっている。

博士課程修了後、複雑系の研究で有名なアメリカのサンタフェ研究所から帰られて豊橋技術科学大学の教授になられていた石田先生のもとで運よく助手として採用された。石田先生本人から人工免疫システムのみならず、複雑系、セルオートマトン、囚人のジレンマなど私があまり知らなかった研究についてのご教示いただいた。

以下では、「人工免疫システム」と私の最近の研究対象である「免疫型診断モデル」について詳しく説明する。

人工免疫システムと大学時代の研究

ご存知のように生物の免疫系の役割は、細菌やウィルスやがん細胞など体内外の異物（抗原）を識別し、排除し、さらに記憶することである。そのためにリンパ球や顆粒球やマクロファージなど多種多様な免疫細胞群が免疫反応を担い、さらに各細胞が自律的に相互作用しながら、精微かつ複雑な自律分散適応システムを構築している。

生物の免疫系が持つ機能や仕組みからヒントを得た計算モデルや情報処理システムをまと

めて人工免疫システム (Artificial Immune Systems: AIS) と呼び、そこで使われているアルゴリズムを免疫アルゴリズム (Immune Algorithm: IA) と呼ぶ。IA は、脳神経系に学んだニューラルネットワーク (Artificial Neural Network)、遺伝進化系を模擬した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) に代表される進化論的計算手法などと同様に生物の知見に基づく手法である。AIS 研究の起源は、1980 年代に免疫記憶を説明するために J. F. Farmer らが行った理論免疫学の研究にあるといわれる²⁾。その後、免疫系の様々な特徴 (自己・非自己の識別、自然免疫と獲得免疫、抗原-抗体反応、免疫記憶と免疫寛容、T リンパ球の選別など) から着想された多くの IA が提案され、2002 年から始まった AIS に関する国際会議 (International Conference on Artificial Immune Systems: ICARIS) などで活発に議論されている。IA としては、特に「免疫ネットワーク」「ネガティブ選択」「クローン選択」の 3 つのメカニズムに着目した研究が行われている。

私が特に着目しているのは「免疫ネットワーク」である。免疫ネットワーク (イディタイプネットワーク) とは、リンパ球の膨大なレパートリーを免疫系がいかに維持するかを説明するために、1974 年に N. K. Jerne (1984 年にノーベル生理学・医学賞を受賞) が提唱した説である³⁾。Jerne は、抗体が抗原と同じたんぱく質構造を持つことから、自然界に存在する膨大な数の抗原部位 (エピトープ) が、生体自身が作り出した抗体分子上にも「内部抗原部位 (イディオトープ)」として存在すると仮定した。そして、この抗体上の内部抗原部位を通じて、抗体は単にばらばらに体液中を浮遊しているのではなく、異なる抗体間で相互に認識し合っていると唱えた。

この免疫ネットワーク説からヒントを得た IA として、私が大学時代に考案したのが「免疫ネットワークに基づくロボットの行動選択アルゴリズム」である⁴⁾。この IA は、生体の免疫系が異なる抗原に対して適切な抗体を選択しているように、ロボットが異なる状況に対して複数ある要素行動モジュール (ある状況に対して前進、左右回転などの基本的行動を記した if-then ルール) の中から適切な行動を選択するためのアルゴリズムである (図 1)。同図の両者を比較すると、ロボットのセンサが検出する外部ならびに内部環境に関する情報を抗原とみなし、要素行動を抗体とみなすことである相関性がみえてくる。ここで要素行動間の相互作用を抗体間の刺激・抑制作用で捉え直すことによって、免疫ネットワークの概念を用いた行動選択アルゴリズムを構築した。コンピュータシミュレーションと移動ロボットを使った実験によって一応の成功は確認できた。しかし、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなど他の手法と比較した場合に優れているとは言い難く、「免疫系を用いるメリットは?」「なぜロボット制御に対して免疫系なのか?」といった質問に明確に答えることができなかった。また、提案アルゴリズムの収束性や最適性など理論的裏付けも不十分であった。このままアルゴリズムの改良を目指しても見込みが少なく、研究の行き詰まりを感じた。

そこで豊橋技術科学大学の助手になってからは、免疫系の本来の役割である診断・防御機能に立ち返り、石田先生が提案された「免疫型診断モデル¹⁾」をもとにして、モデル改変や新たな応用を目指すことにした。免疫型診断モデルは、免疫ネットワークから着想を得た自律分散診断モデルである。この診断モデルでは、相互にテストし合うユニットからなるシステムに対して、そのテスト結果ならびにユニットの活性・非活性をもとに、ダイナミカルモデルによって各ユニットの正常・異常を判定する。以下で例を挙げながら詳述する。

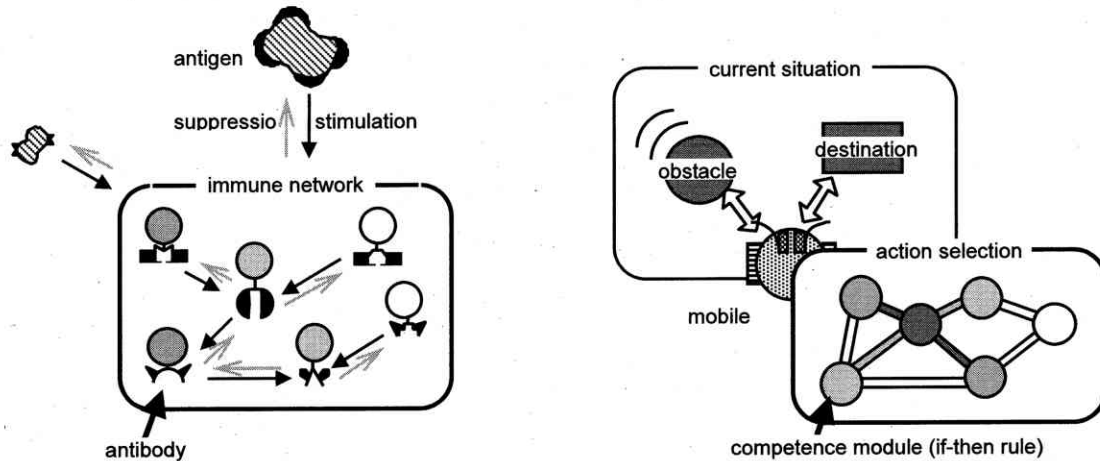


図1：免疫ネットワーク（左図）と自律移動ロボットの行動選択（右図）

免疫型診断モデルとその応用⁵⁾

まずは簡単な犯人捜しのパズルを挙げる。ここでは、容疑者が自白しないために、お互いに信用できるかどうかの証言をもとに犯人（抗原）を捜す。例えば、図2に示す5人の容疑者からなる相互証言の関係において、容疑者 i から j への矢印が「+」ならば相手を信用できる（犯人でない）と証言し、逆に「-」ならば相手を信用できない（犯人である）と証言しているとする。犯人でなければ正しい証言をするが、犯人は正しい証言をするとは限らない。この例では、犯人は正反対の証言つまり潔白者に「-」を、共謀者に「+」を与えるとする。これにより同図に示すように矢印の双方向で同じ証言結果となり、ここでは容疑者4と5が犯人である。

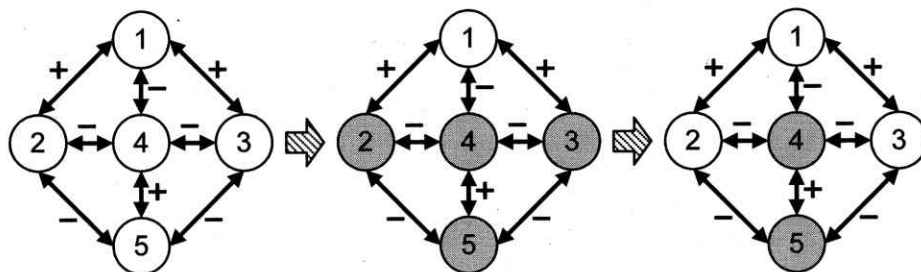


図2：相互診断の例（犯人捜しのパズル）

この例で犯人を捜すために、まず容疑者 i に信用度 $R_i \in \{0,1\}$ を与え、信用度が 1 であればシロ（潔白者）、0 ならばクロ（犯罪者）と判定する。各容疑者において相手からの証言結果を単純に合計して、その合計が正のとき $R_i = 1$ 、負のとき $R_i = 0$ とすると、容疑者 1 以外は合計が負となりクロになる。つまり容疑者 2 と 3 に対して冤罪（誤報）が起こる。そこで、犯人の証言は信用できないことから、証言結果に自分を評価した「相手の信用度」を重みづけして集票し、その集票結果から信用度更新を繰り返すと、 R_i は以下のように変化する。

- (1) 初めはすべての容疑者がシロつまり $R_i = 1$ とする（図 2 の左）。
- (2) 各容疑者において証言結果に相手の信用度（この時点ではすべて 1）を重みづけした合計が正のとき R_i を 1 に、負のとき 0 に更新すると、容疑者 1 以外は $R_i = 0$ （クロ）になる。
例えば容疑者 2 では $(+1) \times 1 + (-1) \times 1 + (-1) \times 1 = -1$ より $R_2 = 0$ になる（図 2 の中）。
- (3) 更新された信用度を用いると、容疑者 1 から出ている矢印以外は 0 が重みづけられる。つまり現時点で容疑者 1 からの証言結果のみを用いることになる。たとえば容疑者 2 では $(+1) \times 1 + (-1) \times 0 + (-1) \times 0 = 1$ となり、 $R_2 = 1$ （シロ）に戻る。容疑者 4 と 5 は $R_i = 0$ （クロ）のままである（図 2 の右）。
- (4) 同様に更新しても R_i は変化せず、正しい診断に収束する。

図 2 は、単純に評価結果の多数決を行うと誤報となる一方で、重みづけによって正しい診断に収束する一例である。免疫型診断モデルの第 1 の特徴は、この信用度の重みづけつまり信用度できるユニットのみが相互作用に参与することである。免疫系と対応させるならば、「信用度」は抗原や免疫細胞の「濃度」、「正負の評価結果」は細胞間の「刺激・抑制」とみなすことができ、活性化され濃度（信用度）の高い細胞のみが相互作用し、最終的には抗原（犯人）の濃度を減らすことになる。

さらに、上記の離散的なモデルを連続系の動的モデルで捉え直すと、ユニット i の信用度 R_i は、以下のダイナミカルモデルによって変化する：

$$\frac{dr_i(t)}{dt} = \sum_j T_{ji} R_j + \sum_j T_{ij} R_j - \frac{1}{2} \sum_{j \in \{k: T_{ik} \neq 0\}} (T_{ij} + 1) \quad (1)$$

$$R_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(-r_i(t))} \quad (2)$$

ここで、 $r_i \in (-\infty, \infty)$ は媒介変数であり、式(2)により信用度 $R_i \in [0,1]$ へ変換される。また、 T_{ji} は、ユニット j がユニット i をテストした結果であり、テストが正しければ 1、間違っていれば -1、存在しなければ 0 とする。具体的なテスト方法は適用する問題によって決める。

式(1)の右辺の第 1 項は、ユニット i が他からの評価を総合している項であり、テスト結果

T_{ji} に相手の信用度 R_j を重みづけする。右辺第2、3項はユニット i が他を評価することにより、他から反射的に評価されているものを総合している項である。これは、「反射効果」と呼ばれ、免疫型診断モデルの第2の特徴である。この効果は、ある人が信用の高い人に対してうそつきだという、逆にその人自身の信用が低く評価されてしまうことに相当する。なお、ある種のエネルギー関数を用いることで、このモデルでは信用度 R_i の0または1への収束性が保証されている。

免疫型診断モデルは、まずはセメントプラントのセンサ診断に応用された。具体的には、実際の工場にあるセメントプラントのプレヒーティングタワーにおいて、各サイクロンの出力にある温度センサの故障診断に適用された。温度センサの自動的な診断は、個別に監視するといったような簡単な方法で実現することは困難である。例えば、温度の値 T はプロセスの状況によるため、 $T_{min} < T < T_{max}$ のような上限下限のしきい値を設定した式を使うことはできない。しかし、専門家が故障センサをたやすく見つけることができる主な理由は、それぞれのセンサを個別に見ているのではなく、センサ全体の状態を評価するからである。そこで、センサ間の関係式を導出して相互診断のネットワークを構築し、免疫型診断モデルを用いた。様々なシミュレーションを行った結果、正しい診断が得られることが確認された。

現状と今後

現実世界には多数の要素からなる複雑かつ大規模なシステムが数多くあり、このようなシステムに対しては中央集権的ではなく自律分散的な故障診断が要求される。この要求に応えるため、そして免疫型診断モデルの有用性をより示すために、私は石田先生とともに免疫型診断モデルの応用をいろいろと試みた。例えば、コンピュータネットワーク上で情報を収集するモバイルエージェントシステムに対する誤動作検出、分散型侵入検知システムにおける自己監視⁶⁾、自動車エンジンにおける吸入空気量の異常検出（トヨタとの共同研究）がある。また、基礎的研究として、免疫型診断モデルと他の診断モデルとの性能比較⁶⁾、診断対象のネットワーク構造による診断性能への影響なども調べた。

私が現在そしてしばらく行っていこうとしている研究対象は、呼び名が定着しつつあると言われる「無線センサネットワーク」である。センサネットワークとは、実世界の様々な物にセンサや無線通信機能を埋め込んだユビキタス社会において、多くのセンサデータの収集・統合を効率的に実現する技術である。センサデバイスの小型化、多機能化（無線化を含む）、廉価化に伴い、近年センサネットワークの研究は盛んに行われている（図3はCrossbow社が販売している無線センサキット）。私は特にセンサネットワークのセキュリティに関心がある。パソコンとは異なり各センサの処理能力や記憶容量には制限があるため、センサ単体でセキュリティ強度を高めることは難しい。そこで、センサ間の分散的な協調によって異

常や攻撃を検出する方法が必要とされる。ここで、センサを免疫細胞とみなせば、免疫型診断モデルだけでなく、免疫系に学んだ新たなアプローチを提案できるかもしれない。免疫型診断モデルでは異常の検出だけであるが、生物の免疫系では異物を検出した後にそれらを排除することによって正常な状態へ復帰することまでを行う。そこで、検出された故障センサに対して移動センサが代替することでセンシング領域を回復する方法、プログラムやデータを改ざんされたセンサに対して正常センサのもので書き換えて復旧する方法などを免疫的な観点から考案していきたい。

センサネットワークが信頼できるものになれば、その応用範囲はより広がると期待される。今後は無線センサネットワークを用いたホームセキュリティシステムや環境モニタリングシステムの構築など具体的な応用研究も併せて進める予定である。

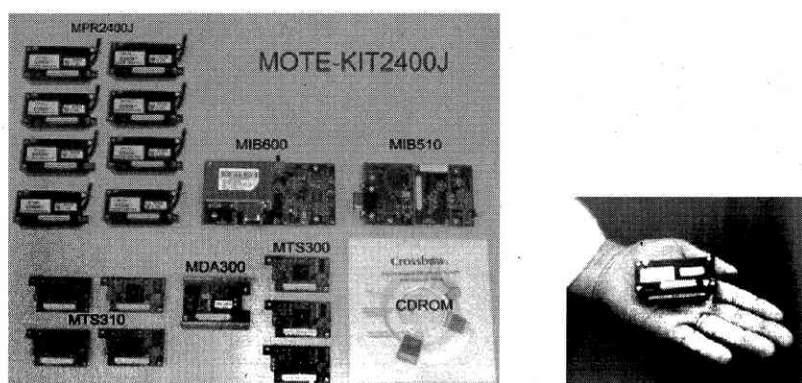


図3：市販の無線センサキット（Crossbow社のMOTE™）

参考文献

- 1) Y. Ishida: Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm: towards immune network PDP model, In Proc. International Joint Conference on Neural Networks, 777-782 (1990)
- 2) J. D. Farmer, N. H. Packard and A. S. Perelson: The immune system, adaptation, and machine learning, Physica, 22-D, 187-204 (1986)
- 3) N. K. Jerne: The immune system, Scientific American, 229-1, 52-60 (1973)
- 4) 石黒, 渡邊, 内川: 免疫ネットワークを用いた自律移動ロボットの行動選択の一手法, 日本機械学会論文集 (C編), 62-598, 235-242 (1996)
- 5) 石田: 免疫型システムとその応用—免疫系に学んだ知能システム—, コロナ社 (1998)
- 6) 渡邊, 石田: 分散型侵入検知システムにおける免疫型診断モデルを用いた自己監視, 計測自動制御学会論文集, 40-7, 729-738 (2004)