

脳から学ぶべき知的能力は何か

What kind of artificial intelligence could be inspired from brains?

山川宏^{*1}

Hiroshi Yamakawa

^{*1} (株)富士通研究

FUJITSU LABORATORIES LTD.

Human brains can integrate different kind of information flexibly to predict target unknown values. Flexible frame generations are key issues to implement these abilities on computers. Experts stock various frames that are specialized to task domains. These frames seem to be unconsciously accumulated in a particular area of neocortex through long term training. I analyzed components of frames to invent automatic frame generations techniques. I hypothesize minimum units of frames, which I call 'fremons', are sets of four values connected by three kinds of relationships appropriately. For predicting a certain unknown target value several frames are generated dynamically by gathering and combining a lot of stored fremons that can connect to a certain target value. Such functions seem to be executed by mammal's neural circuits including neocortex. Therefore development of artificial frame generation technique can become promising, by referring the recent and future fruits of neuroscience which are progressing rapidly.

1. はじめに

ヒトの持つ優れた知能の仕組みを解き明かし、その工学的実現を目指す「脳型コンピュータ」は、人工知能における大目標の一つであろう。本稿においては、未だ脳の全容解明には遠いながらも進展が著しい神経科学の現状を踏まえ、ヒトや動物の脳の神経メカニズムの如何なる部分に着目することが、現状計算機で未実現の知的能力の解明を促進し、工学的技術としての利用に近づきうるかにつき、その道筋を検討する。

次章では、脳から学ぶべき知的能力として、現状の計算機で未実現、なおかつ神経科学で未解明だが、同時に今後の神経科学の進展により新たなる知見が得られる可能性も考慮すべきであることを述べる。そして大脳新皮質での情報統合による予測の柔軟な学習能力が、その有力候補であることを述べる。

引き続き三章では、直観力は長年の熟練により予測機能を柔軟に獲得する一例であり、その神経科学的な基盤としては大脳新皮質における将棋の盤面情報を柔軟に組み合わせさせた特徴量の生成が重要であることを議論する。

四章では、特徴量生成の柔軟性は、そこで考慮する変数値集合(「暗黙フレーム」と呼ぶ)の柔軟な選択操作に基づくと考えられる。そして暗黙フレームを構成する最小単位を4つの変数値間における二次の関係を含むフレモンであると仮定し、それらを組み合わせることで予測したい変数値に応じて暗黙フレームを動的に探索する手法の可能性について述べる。

以上より、計算機が脳から学ぶべき知的能力としてはヒトの大脳新皮質を中心として実現される異種情報の統合による予測機能の柔軟な獲得能力が有望であり、これは人工知能の基本問題であるフレーム問題の解決にも関連することを議論する。

2. 脳から学ぶべき知的能力は何か

現状の計算機で未実現の知的能力をヒトや動物の脳から学ぶべき可能性は、近年の神経科学の進展により以前よりも高まっているだろう。以下本章では三つの観点から、脳から学ぶべき見込みが比較的高い知的能力について議論する。

2.1 計算機で未実現の知的能力

脳から新たな知的能力を学ぶには、現状の計算機で未実現の知的能力に着目すべきであろう¹。こうした機能の候補として、常識推論、創造性、画像理解、言語理解、情動、意識、他者理解、権利/義務、モラルなど多岐にわたるが、これら能力の多くは複合的である。一方で、神経科学分野の研究では基本的に事実やメカニズムの解明を目的とする。よって複合的機能に着目すると、既存情報技術を用いた説明や構成論的アプローチが主眼となり、新たな情報技術の発掘には結びつき難い。

計算機で未実現の知的能力にアプローチするには、まずは要素的な課題に着目したいので、人工知能分野における基本問題に立ち返るのが良いだろう。代表的な二つの問題は、推論時に考慮すべき情報の枠組みを決定する際の困難さに関わるフレーム問題と、知的システムにおける内部の記号系と外界の事物との結び付けに関わる記号接地問題がある。

2.2 未解明な高次脳機能への着目

知的能力のヒントを得ようとするなら、高次脳機能を担う大脳、小脳、大脳基底核、海馬(もしくはそれを含む神経回路)への着目が有望だろう。しかしこれらの基本機能が既存の情報技術により概ね説明可能ならば斬新な知的能力のアイデアが得られる可能性は低い。例えば大脳基底核に対しては強化学習、小脳に対しては制御理論などにより概ね機能説明がなされており期待が薄い。一方で大脳新皮質とそこに現れるスパースなスパイクによる高次元情報表現に対しては、圧縮センシングやベイジアン学習等の情報理論的な説明も試みられつつも、満足のいく計算理論の解明には至っていない。逆に言えば、知的能力についての斬新なヒントを潜めている有力部位である。

さらに大脳新皮質における興味深い特徴として、運動野・感覚野・連合野などの様々な部位において多様な情報処理を実行しつつも、解剖学的には比較的均一な点がある(どの部位も、機能分化した六層構造と、柱状に分割されたカラム構造をもち、その基本的アーキテクチャは哺乳類全般で共通である)。

連絡先: 山川宏, (株)富士通研究, 〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4-1-1, Tel: 044-754-2674, Fax: 044-754-2645, E-mail: ymkw@jp.fujitsu.com

¹ある機能の全体としては同一機能を実現していても、詳細にみれば実装手段が異なるために、脳から学ぶべき機能が存在するという場合もあるだろう。

よって大脳新皮質からは、汎用的な情報処理とそれに対する学習機構の発見が期待できる。また大脳新皮質が備えた知的能力は異種情報の統合による予測機能の柔軟な獲得能力と目される。なぜなら、夜に進出した太古の哺乳類が、視覚が使えない闇の中で外界を的確に把握するために聴覚・嗅覚・触覚といった感覚を統合させる機能として大脳新皮質を進化させたことが知られているからである。

よって大脳新皮質は、知識領域に依存しない、汎用的かつ柔軟な予測能力を学ぶのに適切な部位と考えられる。

2.3 神経科学における動物実験の急進展

近年の神経科学においては、測定技術の進展が著しい。例えば測定電極のマルチチャンネル化や二光子励起顕微鏡、遺伝子工学や分子生物学の発展の恩恵を受けた、オプトジェネティクス等の手法等により神経細胞やその集団に対して様々な刺激や可視化ができるようになってきている。特に、生きたままの動物(in vivo)での神経活動とその機能を詳細に探る素地等が整ってきている。こうしてモデル動物を用いた実験により新しい成果の蓄積が急速に進んでいる[Eriksen 2006, UAR]。しかしこうした手法の多くはヒトには適用できず、一般健常者に利用可能な測定手段はfMRI, EEG, PET, NIRS, TMS等の非侵襲脳活動測定手法に限られる。現在の脳測定技術の状況では、動物にも存在する知的能力に着目したほうが脳から学びやすい。

2.4 本章のまとめ

推論のために考慮すべき情報の取捨選択に関わるフレーム問題は、大脳新皮質の汎用的な知的能力として想定しうる異種情報統合による予測機能の柔軟な獲得能力と表裏一体の関係にある。哺乳類では、この能力のレベルは異なるものの普遍的に存在すると考えられるので、近未来において動物脳実験で新たな成果が見出され、解明に拍車がかかる可能性が高い。

一方で、言語能力にかかわる記号接地問題は、その能力はヒト以外では一部の高等動物が素朴な能力をもつに留まり、動物実験からのアプローチには限界がある。よって近未来において新しい手がかりを得るにはやや難しい状況である。

以上より、神経科学の発展状況を踏まえて、斬新な知的能力を脳から学ぼうとするならば、大脳新皮質の柔軟な予測能力に着目し、そこからフレーム問題を解決する緒を得ようとするのが有望であろう。

3. プロ棋士の予測能力を支える特徴量生成

3.1 将棋プロ棋士の直観とその獲得の柔軟さ

ヒトが柔軟な予測能力を発揮する最たる例としては、創造的活動中にひらめきを得る瞬間などが思い浮かぶ。一方で、熟練者が長期の鍛錬で獲得した直観力の発揮(たとえば将棋のプロ棋士が対局を通じて安定して最善の一手を導き出す)は、その時点では柔軟性を欠いたパターン認識能力のように見える。

しかし、プロ棋士の直観力は盤面全体から戦況を把握する大局観に裏打ちされているとしばしば語られており、その認識能力自体は広い範囲からの情報を統合しており、こうした直観力を熟練により獲得する段階では、対局外での研究活動において得られる新たな気づきなどを通じ、膨大な可能性の中から柔軟に情報を統合する予測機能を獲得していると思われる。

理化学研究所 BSI と富士通及び富士通研究所と共同で進めた[将棋プロジェクト]では、プロ棋士に固有な直観力の神経科学的な基盤の解明を進めた。プロ棋士とアマ棋士の比較実験から、脳波測定の結果からは盤面をみて約 0.2 秒後に前頭

葉に活動が現われた[中谷 2010]。一方で fMRI の結果からは、視覚から入った将棋盤面のイメージが後頭葉の視覚領域で処理されるまではあらゆるヒトで共通であるが、プロ棋士はそれに引き続き大脳新皮質の頭頂部の一部である楔前部で将棋盤面の認識を行い、さらに大脳基底核の尾状核へ情報を送って次の一手を導き出していることが示唆された[Wan 2011]。

ヒトを対象とした非侵襲脳活動実験のみからは、熟達化による神経回路の経時変化は追えず、柔軟な予測機能に関わるチャンク[Gobet 2004]の獲得を直接には観察できない。しかし他の動物実験等の知見から尾状核は意思決定の中核と目されているので、逆にプロ棋士の楔前部には将棋の課題領域に固有な情報を適切に表現する特徴量が獲得されていると考えられる。

特徴量生成の重要性については、例えば[松尾 2006]らが予測性に関し[古川 2009]らがスキル獲得に関して議論している。

3.2 コンピュータ将棋における特徴量生成

コンピュータ将棋に目を向けると、昨年(2010年)の10月に、合議型コンピュータ将棋[杉山 2010]によるシステム「あから2010」が、初めて公の場にてプロのトップ棋士に勝利した。現在のコンピュータ将棋は、潤沢な計算処理能力を利用して演繹推論としての指し手の探索(読み)を広く深く行い、さらに棋譜データを用いて盤面評価関数を学習する。コンピュータ将棋はヒトを圧倒的に凌駕する探索能力を駆使することで、ようやくプロ棋士に伍する棋力を発揮できることは、裏をかえせばプロ棋士の盤面評価能力は圧倒的に計算機より優れていることを示唆している。

計算機による盤面評価能力は瞬時に実行出来るパターン認識機能であり、これはプロ棋士が優れている素早く次手を選択する直観力と同根であろう。何故なら、与えられた盤面に対して一つの駒を動かしたときの評価関数を瞬時に計算できれば、結果として素早く次手を選択できるからである。

現在はパターン認識の技術レベルは高いため、データからの学習による盤面評価関数の学習は容易に思える。そうであるにも関わらず盤面評価が難しいとすれば、そこに用いる適切な特徴量が用意することが難しいからであると考えざるを得ない。実際、コンピュータ将棋における機械学習導入の先駆けとなった Bonanza では盤面評価関数に用いる特徴量の探索範囲を拡大したことで棋力を向上できた¹。この事実も、逆に計算機にとっては有用な特徴量の柔軟な生成が困難であることを示している。

以上より、プロ棋士の優れた直観力は、コンピュータ将棋における盤面評価能力に対応し、計算機はそれに用いる特徴量の柔軟な生成が不得手である。一方で、前節で述べた[Wan 2011]の結果を踏まえれば、プロ棋士の楔前部(大脳新皮質の一部)にはコンピュータ将棋のレベルを遥かに上回る複雑で有効な特徴量が存在する。これよりプロ棋士は優れた特徴量の生成能力による直観力の獲得により棋力を高めていると思われる。

3.3 計算機によるフレームの自動決定の困難さ

知的システムが、入力やその履歴を利用することで、ある推定値を出力する過程は、中間出力の(前節で述べたように)特徴量を得る変換処理や、最終の推定値を得る推論処理といった要素処理で構成される。

個々の要素処理は、問題領域や情報モダリティ等に応じて多様である。ここで要素処理は予め(生体なら遺伝情報に基づき、計算機なら設計図に基づき)設計される場合も多いが、外部からの教示や模範例などに基づく学習を行うことも多い。いずれにしても要素処理毎に考慮する変数集合であるフレームを決定し

¹ 三駒関係を含む大凡一億通りの特徴量を取捨選択した。

た後において何らかの出力を得る、帰納推論・探索・最適化等の情報処理能力では計算機がヒトを凌駕している。

旧来よりフレーム問題として指摘されているが、計算機はヒトが行うような異種情報の統合による予測機能の柔軟な獲得は苦手である。この原因は個々の要素処理において考慮すべき変数をフレームとしてまとめ上げる能力の困難さを反映しているであろう。この問題を工学的に解決するには、計算機上でフレームを柔軟に自動生成する技術を実現する必要がある。

3.4 本章のまとめ

熟練者の直観力は異種情報統合による予測機能の柔軟な獲得能力の一つであろう。脳活動測定実験からみると、プロ棋士が直観力を発揮する背景には、大脳新皮質の一部に将棋課題に固有な特徴量が鍛錬により獲得されていると考えられる。

一方でコンピュータ将棋が直観的な次手選択を不得意とする理由は盤面評価を行うための有用な特徴量を生成できないか点にある。こうした特徴量生成の困難さを克服するには、特徴量において考慮すべき変数を選択するフレーム生成の問題を解決する必要がある。

4. フレモンからの暗黙フレームの生成

4.1 ラベルを持たない暗黙フレーム

フレームはよく知られた知識表現の一種で、フレーム名と変数集合およびそれに対するラベルからなる。ソフトウェア・プログラミングでは設計者が変数やオブジェクトを設計するように、一般にフレームの設計はヒトに委ねられ、その際に理解と設計のためにラベルが役立つ。しかし計算機による暗黙フレームの自動生成には、フレームや変数に付与されたラベルは無効である。

フレームを生成して保存する機能は、シンボル処理能力をもたない動物とも共通の大脳新皮質の汎用的な予測機能の基盤と考えられる(二章参照)。よって少なくとも、その生成段階は無意識下で行われ、ラベルが付与されているわけではない。(ヒトでも大脳新皮質の活動の大部分は意識化されない。)

よって直観力の熟達化に着目すると、鍛錬を通じて暗黙的にフレーム(以降これを暗黙フレームと呼ぶことにする)が蓄積されることでタスク領域固有の予測能力が高まると思われる。(プロ棋士が長年の鍛錬から獲得している盤面認識のための情報の纏まりであるチャンクはこうした暗黙フレームに関連するだろう。)

以上から、暗黙フレームの生成過程は記号処理によるものではなく、変数やその値自体に関わる情報を利用した何らかのパターン処理によって支えられていると考えられる。

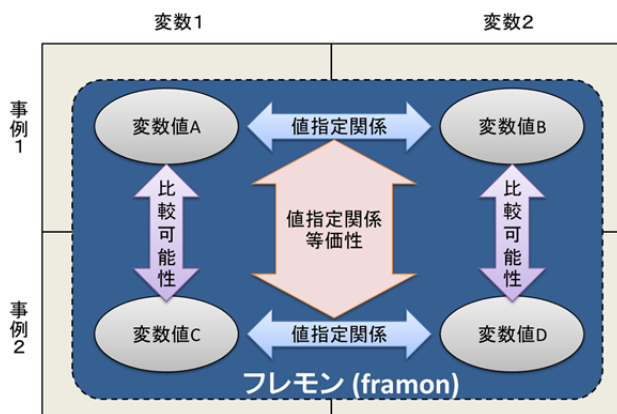


図 1: 暗黙フレームの最小単位としてのフレモン

4.2 フレモン最小単位としての「フレモン」

暗黙フレームの生成を何らかのパターン処理と想定するならば、その構成要素を蓄積した上でそれら要素を結合する仕組みが必要となる。そこで次に暗黙フレームの構成要素を考察する。

暗黙フレームの構成要素を、四項の変数値からなる最も単純なフレームの例(図 1 参照)を用いて検討する。その結果、ある一つの変数値を残りの三項から推定するために必須となる関係性は、以下の三種類の変数値間関係であると考えた。

[比較可能性]: 二つの変数値間で、同値・大小・類似・順序などの比較を定義できる関係である。図 1 中では変数値 A-C 間および変数値 B-D 間で成立する必要がある。

[値指定関係]: 二つの変数値を相互に指定しうる何らかの手續を定義できる関係である。図 1 中では変数値 A-B 間および変数値 C-D 間で成立する必要がある。

[値指定関係等価性]: 二つの値指定関係が同様の手續きで表現できるという二次の関係である。図 1 中では変数値 A-B 間の変数値間関係と変数値 C-D 間の変数値間関係を同様の手續きで表現できるという関係である。

一例として、入力変数として二次元静止画像を考える。ここでのフィルタ処理(ラプラスフィルタ等)で利用するウィンドウ(隣接する数個の画素集合)はある種のフレームで、ウィンドウが移動する毎に事例が得られるとみなせる。何れの画素もその値を比べられるので比較可能性がある。またウィンドウ内の数個の画素間には所与の空間的配置関係により値指定関係がある。さらにウィンドウの平行移動により事例を変化させても、同じ手續きで値を指定できるので値指定関係等価性が成立している。

次例は、複数の幾何学図形が表示される二次元静止画像から、まず画像の分節化により図形部分を抽出しさらにその属性を計算する処理を考える。個々の図形を事例とすれば、図形に付随する、サイズ、色、形等の属性(変数)は図形間で比較可能性をもつ。属性間の関係、例えばサイズ-色、形-色などが値指定関係となる。さらに着目する図形(事例)を変化させても、同一手續きで値を指定できるので値指定関係等価性が成立する。

暗黙フレームの最小単位を「フレモン(framon)」と呼ぶこととし、四つの変数値 A,B,C,D の間に以下の三条件が成立したならば、フレモンであると仮定する。

1. 変数値 A-C 間と変数値 B-D 間に比較可能性が成立する
2. 変数値 A-B 間と変数値 C-D 間に値指定関係が成立する
3. 変数値 A-B 間の変数値間関係と変数値 C-D 間の変数値間関係の間に値指定関係等価性が成立する

4.3 暗黙フレームの動的な生成に向けて

知的システムが、経験を通じて予めフレモンを蓄積していれば、ある未知変数の値を推定しようとした場合に、その変数値に直接/関節に関わるフレモンを結合して暗黙フレームを動的に生成する手段を構築できるだろう。ある予測値についての信頼度を高めるには、それをサポートするできるだけ多くの変数値(変数数、事例数の両面から)暗黙フレームを構築したい。そのためには、できるだけ多数のフレモンの結合が目標となる。

関連研究としては、関係性に基づく推論という観点から類推研究に近い。ただし本稿においては変数値間の関係に着目しているが、類推研究では主にオブジェクト間の関係を扱う。構造写像理論[Gentner 83]ではベース領域からターゲット領域の間でできるだけ高次で複雑なオブジェクト間の関係ネットワークを対応付けようとするシステム性原理が知られている。また、

[Doumas 2008] らは神経回路風のネットワークから関係性を発見する計算モデルの研究を行っている。また[溝口 1999]は四項類推の神経回路モデルを提案している。なお類推における領域を超えたオブジェクトの対応付けでは比較可能性は必須ではなく、フレモンによる対応付けより緩くなる。

他の関連技術として、状況分解技術[山川 1998]においても、できるだけ多くの事例に多くの変数を含む状況概念を抽出するので、この技術の状況評価基準も参考になるだろう。

4.4 標準的フレームデータと潜在的なフレモン数

既存のデータ分析技術にも、神経回路モデルでの結合荷重の変更や、ルール抽出技術における変数選択や事例選択等の情報選択技術が存在する。しかしそこで考慮するフレモンは、潜在的に可能な範囲に比べて著しく狭く、そのため情報選択の柔軟性が限定されていることを、フレモン数の試算から議論する。

標準的なフレームデータにおいて、変数の数を M とし事例の数を N とする。フレーム内で予め仮定されているフレモンを正則フレモンと呼ぶことにする。この数は変数と事例から二つの要素を取り出す組合せの $M \times N C_2$ 個である。次に本稿での議論で考慮するフレモンを潜在フレモンと呼ぶことにする。この数はフレーム内の任意の 4 つの変数値を取り出し、それらの 6 通りの入れ替えを考慮した組み合わせ数の $(M \times M) C_4 \times 6$ 個となる。

変数数 ($M=4$) とした場合の事例数 (N) の変化に応じた潜在および正則のフレモン数を図 2 に示す。たとえば $N=4$ の場合に 16 個の変数値の間に元々存在する正則フレモン数は 36 個であるのに対して潜在フレモン数は 10,920 個と膨大である。

全ての正則フレモンは相互に一貫性を保つが、潜在フレモン同志の一貫性は保証されず全てが共存するとは限らない。しかしその数の圧倒的な多さが、柔軟性を生み出さうだろう。

5. おわりに

ヒトの脳は異種情報の統合による予測機能を柔軟に獲得できる。こうした獲得能力を計算機で実現するには、柔軟な情報選択を伴うフレーム生成の能力を工学的に実現する必要がある。フレームは予測を支える情報変換や推論などの要素処理において考慮すべき変数の集合としている。

ヒトの脳では熟練を通じて無意識的にタスク領域固有のフレームを、タスクに依存した大脳新皮質の一部領域に蓄積すると考えられるので、これを暗黙フレームと呼ぶことにする。

暗黙フレームを自動生成するには、その構成要素を理解する必要がある。本稿ではフレームの最小単位としてフレモンを仮定し、その構成要件としては 4 つの変数値の間に比較可能性、値指定関係、値指定関係等価性という 3 種類の変数値関係が適切に成立することを条件とした。ある変数値を推定しようとする際に、予め十分なフレモンが蓄積されていれば、推定したい値に直接/間接に関わるフレモンを結合して暗黙フレームを生成し、推定の信頼性を高められるだろう。

ただし、フレモンの構成要素である 3 種類の変数値間関係の算出手段や、それを前提としたフレモンの動的な結合による暗黙フレームの生成手段については今後の検討課題である。

ここで哺乳類の大脳新皮質を中心とした脳神経回路は、生得的かつ汎用的に情報統合による予測機能をもつと思われる。よって柔軟なフレーム生成能力の発揮を支える脳部位である可能性も高い。そこでこうした神経回路に関わる最新の研究知見を参考にしながらフレーム生成の理論構築を進めることは、有望な研究アプローチであると考えられる。そしてこの研究が人工知能の基本問題の一つであるフレーム問題の解決へ向けた一歩になると期待している。

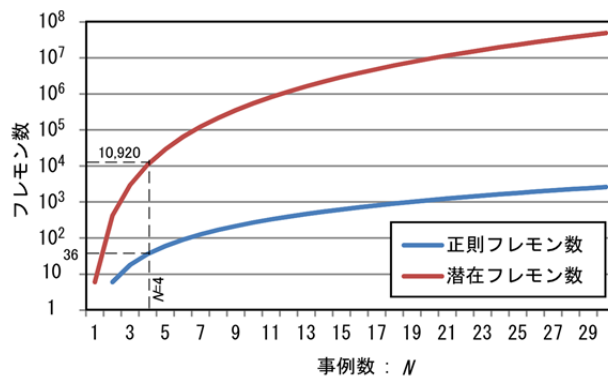


図 2: 標準的フレームにおけるフレモン数 ($M=4$)

潜在フレモン数と正則フレモン数の比較

参考文献

- [Doumas 2008] Doumas, L. A. A., Hummel, J. E., & Sandhofer, C. M.: A theory of the discovery and predication of relational concepts. *Psychological Review*, 115, 1 - 43, 2008.
- [Eriksen 2006] McGowan E, Eriksen J, Hutton M.: A decade of modeling Alzheimer's disease in transgenic mice, *Trends Genet.*, 22(5):281-9. 2006.
- [Gentner 83] Gentner, D.: Structure-mapping: Theoretical framework for analogy, *Cognitive Science*, Vol. 7, No. 2, pp.155-170, 1983.
- [Gobet 2004] Ferdinand Gobet, Alex de Voogt, Jean Retschitzki: *Moves in Mind: The Psychology of Board Games*, Psychology Press Ltd, 2004.
- [UAR] Understanding Animal Research, <http://www.understandinganimalresearch.org.uk/>
- [Wan 2011] Wan X, Nakatani H, Ueno K, Asamizuya T, Cheng K, Tanaka K.: The neural basis of intuitive best next-move generation in board game experts, *Science.*, 331(6015):341-346, 2011.
- [古川 2009] 古川康一, 井上克巳, 小林郁夫, 諏訪正樹: 発想推論に基づく着眼点の発見, 人工知能学会全国大会(第 23 回)(JSAI-2009)論文集, 1K1-OS8-5, 2009.
- [将棋プロジェクト] 将棋棋士の直観の脳科学的研究, <http://www.brain.riken.jp/shogi-project/>, 2007-.
- [杉山 2010] 杉山卓弥, 小幡拓弥, 齊藤博昭, 保木邦仁, 伊藤毅志: 将棋における合議アルゴリズム-局面評価値に基づいた指し手の選択-, *情報処理学会論文誌*, Vol.51, No.11, pp.2048-2054, 2010.
- [中谷 2010] 中谷裕教 "将棋棋士の直観を脳活動から探る", *将棋と脳科学(脳を知る・創る・守る・育む 12)*, クバプロ, 第二章, pp. 31-64, 2010.
- [松尾 2006] 松尾豊, 山川 宏, "ネットワーク-予測性-属性生成", 人工知能学会全国大会(第 20 回)論文集, 3G1-1, 2006.
- [溝口 1999] 溝口 健二, 萩原 将文: "領域表現を用いた四項類推を行うニューラルネットワーク", *電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング研究会*, pp.47-54, 1999.
- [山川 1998] 山川 宏: "状況分解技術のための Matchability 基準の提案 - 規則性の高い複数の部分状況を抽出する手法 -, " *Proc. ICONIP'98*. 北九州, vol.3, pp.514-517, 1998.