

TR-H-271

小脳多重内部モデル仮説：感覚運動 統合からコミュニケーションへ

川人光男、銅谷賢治（科学技術振興事業団）、
春野雅彦

1999.6.3

ATR人間情報通信研究所

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2 TEL: 0774-95-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories
2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan

Telephone: +81-774-95-1011
Fax : +81-774-95-1008

小脳多重内部モデル仮説： 感覚運動統合からコミュニケーションへ

川人光男*、銅谷賢治†、春野雅彦*

* (株) エイ・ティ・アール人間情報通信研究所、

† 科学技術振興事業団、ERATO 学習動態脳プロジェクト、

〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2

1999年6月1日

Abstract

最近の計算論と神経生理学的な研究によって、運動器官の内部モデルが小脳内に、シナプス可塑性に基づき、運動学習によって獲得されることが示された。また一方で、小脳が運動制御に限らない、高次の認知活動全般に重要な役割を果たしていることも明らかになってきた。ここでは、小脳が、言語を含むコミュニケーションなどの高次認知活動でどのように働くのかに関する、包括的な計算理論を多重モデル対の枠組みで提案する。このモデルが、小脳を中心とする神経回路にどうマップされるかを示す。基本的なモデルを、階層化することによって、シンボル接地問題をダイナミクスに基づくモジュール化の観点から解決する。さらに、心の理論の考え方に基いて、コミュニケーションの計算理論を構築する。

1 はじめに

計算論的アプローチを含めて、現在の脳科学にとって、大変魅力的で、しかし大変困難な研究トピックスに、言語がある。言語はヒトに特有であるから、神経科学の強力な手法である、神経生理学や解剖学の侵襲的手法が使えない。チョムスキー流の言語学と非侵襲脳活動計測の組み合わせによるアプローチも試みられているが、神経回路、表現、アルゴリズムに基づいた計算論的な理解に繋がることは考えられない。なぜなら、前者は生物科学に根ざしておらず、後者は基本的に場所の情報しか与えないから、接点はあったとしても皮相なものにならざるを得ない。

これに対して、ヒト言語現象を、チョムスキーのドグマから離れて、より幅広い生物学的な基礎と、一般的な認知、学習、発達能力から理解しようという新しい動きがうまれてきた (Seidenberg, 1997; Elman et al., 1996)。神経科学の研究からも、マカクサルミラーニューロンの発見を突破口にして、言語を、神経科学で研究対象とされてきた、より一般的な脳機能の自然な延長として理解しようという提案もなされている (Rizzolatti and Arbib, 1998)。しかしながら、このような試みは始まったばかりであり、計算論的に統一のとれた大きな枠組みは与えられていない。提案は、概念的なものであったり、コネクショニズムやエルマンネットワークのようなはじめから限界のわかっている人工的なモデルに頼っていたりして、大変弱いものである。

我々は、サル電気生理データと、神経回路モデルを基礎に置いたアプローチを取る。サルには言語はないから、言語研究としては一見かなり遠い出発点に見えるであろう。しかし、感覚運動系列の認知、編集、計画、実行から言語を理解しようという基本的な方向は、遺伝と進化、霊長類の脳の神経科学研究など、生物科学の成果と王道に乗っ取っている。言語の進化に関しては Merlin Donald (1991) の、シナリオに基づく計算理論構築を目指す。つまり、言語の出現以前に、言語を支える脳の基本的な回路と計算原理は、ほとんど全て整っていたと考えるのが、様々の理由から妥当である。本稿では、神経科学にしっかりとした基礎を置く小脳内部モデル仮説を、言語を含むヒトの高次認知機能のモデルへと拡張・発展させるための、計算論的な枠組みを与える。

この拡張と発展において、計算論的に最も基本的なアイデアは、Kawato and Wolpert (1998), Wolpert and Kawato (1998) の多重順逆対モデルである。次に、多重対モデルを脳の神経回路と対応させる。さらに、多重対モデルに基づいて、コミュニケーションの計算理論を展開する。ここでは、基本的なモデルを階層化することが肝心となる。最後にこの枠組みで、シンボル接地問題を解決するシナリオを与え、コミュニケーションへの理論の1つの応用として、見まねによる学習の具体例を説明する。

2 小脳内部モデル仮説の高次認知機能への拡張

小脳研究の魅力はそのハードウェアとしての一様性と機能としての多様性のコントラストにある。小脳は、その入出力について、異なる部位は脳、脊髄の異なる部位と結びついている。このような機能的な区分として、前庭小脳、脊髄小脳、大脳小脳にわけられる (Ito, 1984)。一方解剖学的には、片葉、虫部、中間部、外側部にわけられる。さらに、幅数百 μ 、長さ数ミリメートルのマイクロゾーン (Oscarsson, 1980) と呼ばれる、解剖学的機能的モジュールがヒト小脳には5000から10000個あると考えられる。マイクロゾーンは、平行な縦方向の解剖学的単位で、下オリブ核からの特定の入力と、小脳核への特定の出力を共有する特定のプルキンエ細胞からなるゾーンの事である。神経生理学的な研究から、1つ1つのマイクロゾーンは異なる機能を果たしていることが知られている。このような、機能的モジュール性にもかかわらず、小脳皮質の神経回路は、小脳のどの部位でも一様である。これは、大脳皮質の異なる領野が、細胞の種類のみならず、層構造まで異なるのと著しい対比をなしている。

小脳皮質内の唯一の出力細胞プルキンエ細胞は、主要なシナプス入力を平行線維と登上線維から受けている。平行線維の起始細胞である顆粒細胞は、苔状線維から入力を受ける皮質内の唯一の興奮性細胞で、脳内の他のすべての種類のニューロンをあわせたより多数存在する。皮質内の抑制性介在ニューロンはバスケット細胞、ゴルジ細胞、星状細胞の3種類であり、あわせて5種類の細胞しか皮質内には存在しない。登上線維の発火によって制御される、平行線維-プルキンエ細胞シナプスに生ずる異シナプス可塑性 (LTD, LTP) も、小脳の部位によらず普遍的である。Marr-Albus-Itoの理論は、この異シナプス可塑性が、運動学習の基礎過程になっていると提唱した。最近の計算論的研究は、小脳内に運動制御対象の逆モデルまたは順モデルなどの内部モデルが学習で獲得されると考える (Kawato et al., 1987; Kawato and Gomi, 1993; Miall et al., 1993; Wolpert et al., 1998)。

特に、フィードバック誤差学習理論と逆モデル仮説は、サル小脳傍片葉が追従眼球運動中に果たす役割を詳細に調べることによって、神経生理学的研究と詳細な神経回路モデルを組み合わせ、かなりの程度まで証明されたと言って過言ではない (Shidara et al., 1993; Gomi et al., 1998; Kobayashi et al., 1998; Yamamoto et al., 1999)。小脳内の1つのモジュールは、運動制御の対象 (運動器官) の動特性の逆変換を、教師有り学習によって獲得するのである。登上線維入力は、運動指令の誤差信号を、フィードバック運動指令をコピーすることによって、提供している。小脳プルキンエ細胞の可塑性LTD, LTP, RPは、全体として、教師有り学習則を実現している。単純な眼球運動と、系統発生的に比較的古い小脳部位で、厳密に検証されたこのような理論が腕の運動や、系統発生的により新しい小脳部位でも成り立つことを示唆する実験データが得られはじめている。例えば腕運動でも内部モデルが必要であることを示す行動データ (Gomi and Kawato, 1996)、小脳虫部でも登上線維入力が運動の誤差を表わしていることを示す神経生理データ (Kitazawa et al., 1998)、新しく獲得された道具の内部モデルがヒト小脳外側部に存在することを示唆するイメージングのデータ (Imamizu et al., 1997) などがある。

小脳の機能は運動制御であるというのがこれまでの常識であった。ところが最近のヒト脳活動を非侵襲で計測する研究は、この考えを根底からくつがえし、小脳は運動の想像、言語、パズル、心的回転、三次元視覚認識、触覚による物体識別、注意、運動視知覚などヒトの一般的知的活動で興奮し、その働きは脳の高次認知機能に広くまたがることわかってきた (Middleton and Strick, 1998; Trends in Cognitive Sciences, Trends in Neurosciences, special issue, 1998)。しか

し小脳皮質の独特の神経回路と可塑性や他の脳部位との結合様式から考えて、その機能は大脳皮質、大脳基底核、海馬の機能とは異なる、小脳に特有の何かがあるはずである。

本節ではヒト小脳半球外側部に、認知活動のために、運動制御対象に限らない様々のダイナミカルシステムの順方向・逆方向の内部モデルが学習で獲得されるという内部モデル仮説をまず提案する。内部モデルにとってのモデリングの対象となる外界は他者の脳や身体、あるいは自身の脳の一部等を含む。これらの内部モデルは運動の想像、言語及び非言語的コミュニケーション、思考、自己意識のために必須なものである。内部モデル仮説は次のような論理とデータに基づいている。(1) 小脳皮質の神経回路構造は一樣であるから、計算原理に関しても系統発生的に新しい部分と古い部分で共通性があるはずである。(2) 認知機能に関わる新しい小脳部位でも、誤差に誘導される学習が生じていることが、非侵襲脳活動計測から示唆される (Imamizu et al., 1997)。(3) 小脳外側核の腹外側部とそこに対応する小脳半球外側部はヒト脳にほぼ固有の部位である (Dow, 1942)。ここで提案する計算理論は、概念的な Leiner et al. (1993) の理論を計算論的に発展させたものであるとも言える。

小脳皮質は登上線維入力によって区切られるマイクロゾーンを単位として、苔状線維入力を小脳核への出力に変換する非線形ダイナミカルシステムである。ただし、皮質内の神経回路には時定数の大きな要素はないから、基本的には非線形写像と考えてよい。小脳皮質には苔状線維入力以外に、登上線維入力、縫線核、青斑核からの入力があるが、これらの入力はシナプス可塑性のための誤差信号やモジュレータとして働いているのであって、秒以下の時間での小脳皮質からの出力には大きな影響を及ぼさない。Kobayashiら (1998) の詳細な解析によって、複雑スパイクは、発火頻度が圧倒的に低いために、またそれ自身の直接の効果と平行線維入力によって生じる単純スパイクを短期間抑制する効果が相殺して、実時間の出力には殆ど影響を及ぼさないことが分かった。一方小脳皮質からの出力はプルキンエ細胞から前庭核を含む小脳核へと送られるものだけである。したがって小脳は粗くいて一入力一出力の変換器であるといえる。ただし入力・出力の次元はとても大きい。大脳皮質橋線維が 2×10^7 、苔状線維が 2×10^7 、顆粒細胞が 10^{11} 、プルキンエ細胞は 2×10^7 、小脳核細胞は 2×10^6 ある。約 5,000 マイクロゾーンがあるとすると、1つのマイクロゾーンあたり、大脳皮質橋線維が 4,000 本、苔状線維が 4,000 本、顆粒細胞が 10^7 個程度、プルキンエ細胞が 4,000 個、小脳核細胞が 400 個程度あることになる。出力の次元が、入力の次元のほぼ 1/10 であるから、小脳では縮約された重要な情報の抽出が行われることがわかる。また顆粒細胞の数が圧倒的に多いことはかなり強い非線形変換を自由に実現できることを示している。

苔状線維入力を m で表わす。 m は 4,000 程度の次元を持ち、また時間の関数である。小脳皮質が、平行線維及び抑制性介在ニューロンとプルキンエ細胞間のシナプスの伝達効率 w に基づいて苔状線維入力を $\Psi(w, m)$ に変換する。この出力は小脳核を経て様々な身体部位と脳部位に運ばれる。運動ニューロン、制御対象、外界、感覚器、感覚神経系を経るか、視床を経て大脳皮質へ送られ、また大脳皮質から送り返されるかなど、系統発生的に異なる小脳部位では、小脳から送られる出力がそれ自身の登上線維入力に影響を与える経路が大きく異なる。その違いを含めて誤差信号を計算する上で、小脳皮質の出力が因果的に影響を及ぼす部分を $F(\Psi(w, m))$ と表わす。誤差信号を構成するもう一方のいわば目標信号を $D(m)$ と表わす。登上線維入力の発火パターンは、 $C[F(\Psi(w, m)) - D(m)]$ と表現できる。小脳の学習は基本的に登上線維入力を 0 (自発電レベルというのがより正確) とする方向に働く。学習が完了すれば、 $F(\Psi(w, m)) - D(m) = 0$ もしくは、 $\Psi(w, m) = F^{-1}(D(m))$ となるようなシナプス荷重が得られる。フィードバック誤差学習の本質は $C \sim F^{-1}(D)$ であるという条件であった。片葉のような系統発生的に古い小脳では出力は直接運動制御の神経回路へ送られ、一方苔状線維入力は目標軌道そのものを与えているので $\Psi = F^{-1}$ で、小脳皮質は眼球の逆ダイナミクスモデルを与えることになる。

高次認知活動に関わるヒトの小脳半球外側部では当然ニューロン活動のデータはないから、信頼できる理論を構築するために十分なデータはない。むしろ非侵襲脳活動計測や損傷実験、解剖学の実験を説明するために、外側部に存在する多数のマイクロゾーンにどのような機能があると考えられるかを理論的に予測する。(a) 道具の逆モデル、 F が道具のダイナミクスで、 $\Psi = F^{-1}$ 。これは、今水ら (1997) の実験に対応する。(b) 名詞から動詞への連想を D として、 $\Psi = D$ 。これは

Raichleら(1994)の実験に対応する。(c)制御対象の順モデル。 m を運動指令、 D を制御対象の状態とすると $\Psi = D$ 。運動の想像の様々の実験(Ryding et al., 1993; Decety et al., 1994; Grafton et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996b)に対応する。つまり実際の四肢が制御されるかわりに、順モデルが仮想の制御対象として使われて、そこに運動指令が入力されて運動がシミュレートされるのである。ミメシス(Donald, 1991)で重要とされた運動のリハーサルが、実際に運動を実行することなく行えるようになる。(d) F を大脳皮質のあるモジュールとして、 $\Psi = F^{-1}$ 。(e) D を大脳皮質のあるモジュールであるとして、 $\Psi = D$ 。この2つの例は思考のための道具を提供していると考えられる(Ito, 1993)。(f) F を他人、 D をその望ましい状態とすると、 $\Psi = F^{-1}(D)$ で、この他人の逆モデルは、コミュニケーション信号を作り出して、他人を望ましい状態へと「運動制御」するために使われる。(g) m をコミュニケーション信号、 D を他者のそのコミュニケーション信号に対する反応とすれば、 $\Psi = D$ でこれは他者の順方向モデル、つまり“theory of mind”を与えていると考えられる。小脳の異常と遺伝的な自閉症との関連をこのように理由づけることもできる(Courchesne et al., 1995)。(h) m を三次元物体の一つの二次元投影像、 $D(m)$ を同じ物体の他の二次元投影像とすると、 Ψ は心的回転に対応する(Parsons & Fox, 1995)。(i) m を皮膚感覚と自己受容感覚及び運動指令、 $D(m)$ を物体のidentityとすると、 $\Psi = D$ は感覚識別能力を与えることになる(Gao et al., 1996)。(j) m を自分自身の脳への入力、 $D(m)$ を自身の脳のある時間経過した後の状態とすると、 $\Psi = D$ は自身の脳のモデルを与えているとも言えるし、また自己モニタリングを行っているともいえる。筆者は自己意識の神経機構の中にこのような小脳の自己脳のモデリング機能が含まれているはずだと提案した(Kawato, 1997)。

3 多重順逆モデルの小脳神経回路モデル

著者らは(Kawato and Wolpert, 1998; Wolpert and Kawato, 1998; Haruno, Wolpert and Kawato, 1999a; Wolpert, Miall and Kawato, 1998)、ヒトの柔軟な運動学習と環境への迅速な適応能力を説明するモデルとして、多重順逆対モデル(MPFIM)を提案した。また、このモデルの主要な部分が、小脳内に存在することも示唆した。本節では、モデルを簡単に紹介し、次に、このモデルをどのように、小脳とその周辺の神経回路に対応させるかを説明する。

図1は、MPFIMモデルの、最も基本的な構成を示す。このモデルの背景となる主要な論理は次の2つである。第1に、ヒトが感覚運動統合において取り扱わなくてはならない外部世界は非常に複雑で、しかしある種のモジュール構造をもっているため、対応する制御器(逆モデル)もモジュール構造を持っている。第2は、複数の制御器を異なる環境、時間、制御対象物にあわせてスイッチングし、学習することが、最も困難な計算論的課題になるが、これを解決する最良の方法は、多数の順モデルに並列に状態変化を予測させ、その予測の良さに応じて、逆モデルの最終的な制御出力への寄与と、順モデルと逆モデルのある学習データへの責任を決定すると言うものである。

MPFIMの、詳細な神経回路モデルを提案する準備として、小脳皮質と大脳皮質のモジュール構造を強調した、粗いが、モデル化にとって必須であると思われる大脳小脳連関の神経結合を図2に示す。この神経結合のシェーマは、Allen and Tsukahara(1974)に基づいているが、上に述べたように、マイクロゾーンを強調していることと、歯状核-小細胞性赤核-下オリーブ核(主オリーブ)が作る興奮性閉回路(小川の三角形)を強調してある。ここでは、入力と出力で大脳皮質と結合している、系統発生的に新しい小脳部位、つまり大脳小脳が、MPFIMを構成する要素であると考えられる。解剖学的には、小脳半球外側部である。小川の三角形は、De Zeeuw et al.(1998)が、オリーブ小脳中間脳ループと呼んだ3要素回路の、系統発生的に新しい部分に対応することになる。図には、歯状核から下オリーブ核へ投射するGABA作動性の抑制性回路も示してある。順モデルと逆モデルの1対が、図の小脳マイクロゾーンと大脳皮質モジュールのコミュニケーションループの中に実現されていると考える。

次に、責任信号予測器まで入れた、より完全な順逆モデル対(Kawato and Wolpert, 1998; Wolpert and Kawato, 1998)の各要素を、図2の神経回路に対応させる。図3が、MPFIMの要素

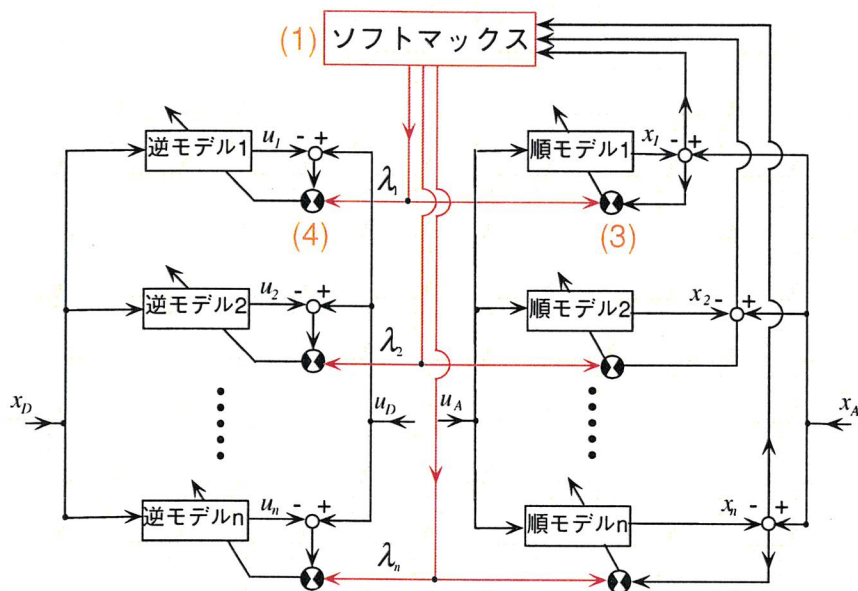


Figure 1: MPFIM の基本回路

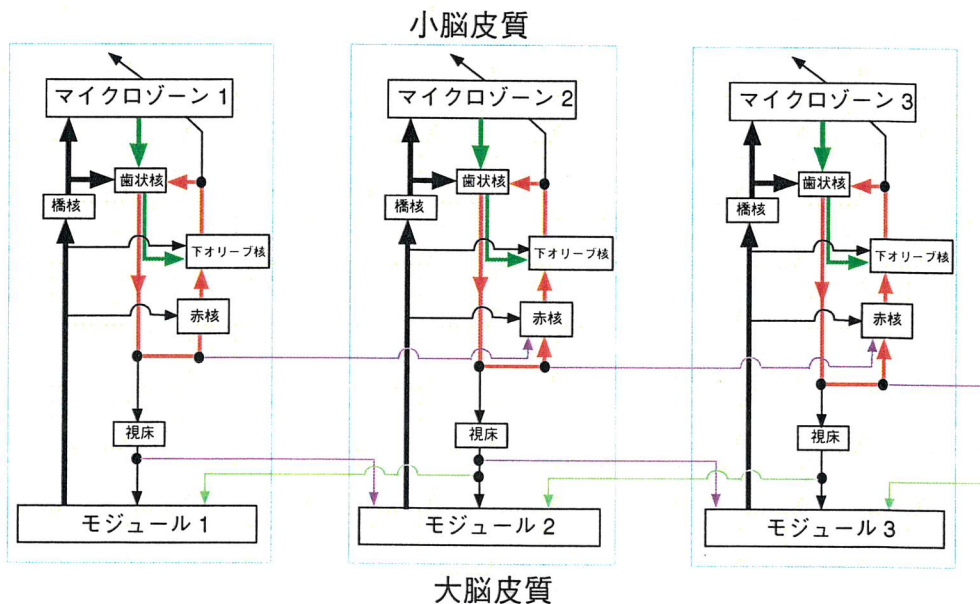


Figure 2: 小川の三角形と、大脳、小脳のモジュール性を強調した、大脳小脳連関神経回路のシェーマ。小脳皮質プルキンエ細胞から歯状核と、歯状核から下オリブ核への抑制性結合は緑で示している。歯状核-赤核-下オリブ核が作る興奮性閉回路：小川の三角形は赤で示してある。

の各部分に図2の神経回路の各部分をラベルして示したものである。各モジュール内の順モデル、逆モデル、責任信号予測器は、それぞれ別の小脳マイクロゾーンで実現される。それぞれへの誤差信号は全て登上線維によって伝えられるが、その中身は全て異なる。責任信号は、小川の三角形を介して、異なるモジュールが大域的に相互作用して計算される。図でピンクで示してあるのが、小川の三角形、ベージュ色がマイクロゾーン、赤点線が登上線維、黒破線が責任信号である。次に3つのマイクロゾーン（逆モデル、順モデル、責任信号予測器）への苔状線維と登上線維入力、そして歯状核への出力を順に説明する。

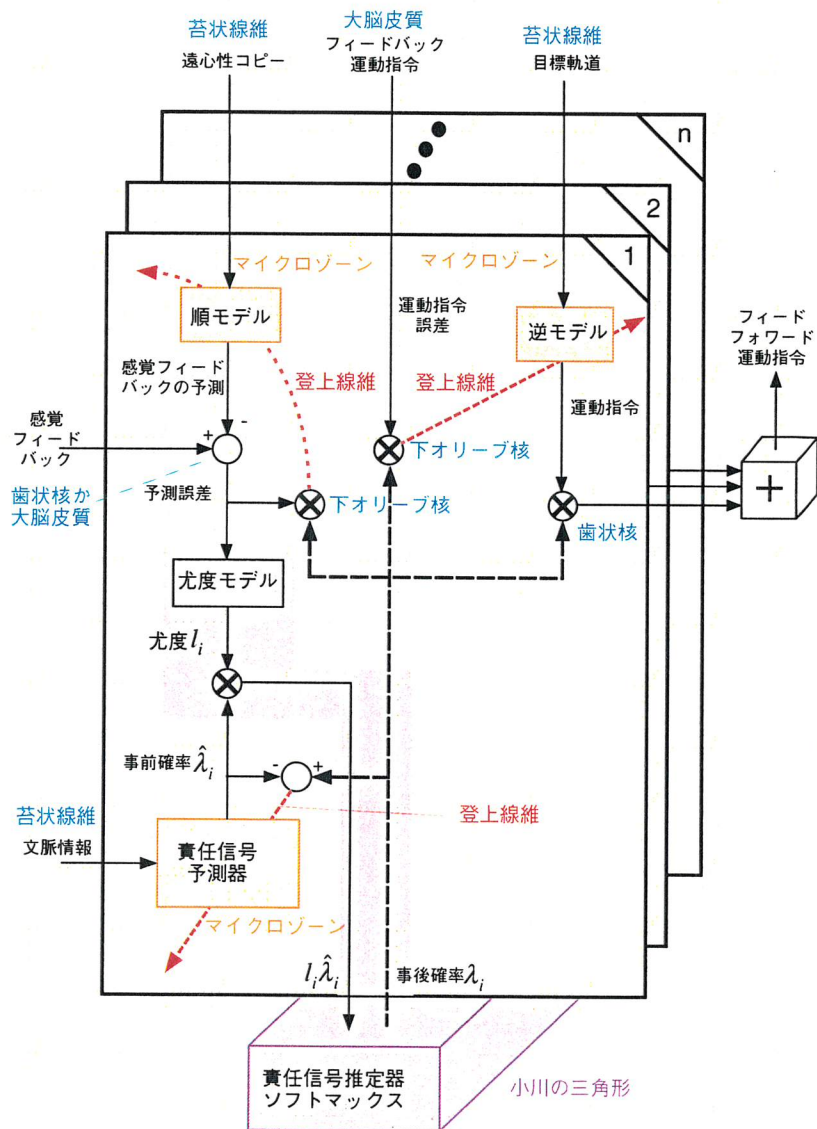


Figure 3: MPFIM と小脳との対応

逆モデルは苔状線維から目標軌道を受け取る。逆モデルへの登上線維入力の起始細胞を含む下オリーブ核では、大脳皮質から送られるフィードバック運動指令としての運動指令誤差の信号と、責任信号の積が計算される。逆モデルから歯状核へは、運動指令が出力される。各モジュールからの運動指令は、責任信号と掛け合わされたのち、すべてのモジュールで足し合わされ、最終的

なフィードフォワード運動指令となる。

順モデルは苔状線維から、運動指令の遠心性コピーと1時点前の感覚フィードバックを受け取る。順モデルから歯状核へは、感覚フィードバックの予測信号が出力される。順モデルへの登上線維入力の起始細胞を含む下オリブ核では、歯状核もしくは大脳皮質で計算された、実際の感覚フィードバックと順モデルの出力である感覚フィードバックの予測との間の予測誤差信号と、責任信号の積が計算される。

責任信号予測器は苔状線維から、文脈情報を受け取る。責任信号予測器から歯状核へは、責任信号の予測値である事前確率が出力される。事前確率は、順モデルの予測誤差から計算される尤度と掛け合わされた後で、小川の三角形内で、ソフトマックスの計算が行われ、責任信号つまり、事後確率が最終的に計算される。事後確率と事前確率の差が、責任信号予測器への登上線維入力の起始細胞を含む下オリブ核で計算される。これが責任信号予測値の誤差である。

図4は、MPFIMモデルの、大脳と小脳連関を含んだ神経回路モデルを示している。図は5つの部分からなっており、それぞれ逆モデルを含む大脳小脳連関、順モデルを含む大脳小脳連関、責任信号予測器を含む大脳小脳連関、責任信号を計算する小川の三角形、そしてその結合のトポグラフィを示している。この5つの部分図を順に説明する。

逆モデルを含む大脳小脳連関をまず説明する。逆モデルを構成する小脳皮質マイクロゾーンへの苔状線維入力は、対応する大脳皮質モジュールから、橋核を介して送られる。 i 番目の逆モデルから歯状核には、フィードフォワード運動指令 \hat{u}_i が送られ、小川の三角形で計算された責任信号 λ_i と掛け合わされ $\lambda_i \hat{u}_i$ となったのち、視床腹外側核を介して、大脳皮質に送られる。これを全てのモジュールで足しこんで最終的なフィードフォワード運動指令 $\sum \lambda_i \hat{u}_i$ が計算される。大脳皮質モジュールは、フィードバック運動指令 u_{fb} を受け取り、これを小細胞性赤核などを介して下オリブ核へ送る。下オリブ核で、小川の三角形から送られる責任信号 λ_i とこのフィードバック運動指令 u_{fb} が掛けあわされて、小脳皮質マイクロゾーンへの登上線維入力 $\lambda_i u_{fb}$ となる。

第2に、順モデルを含む大脳小脳連関を説明する。順モデルを構成する小脳皮質マイクロゾーンへの苔状線維入力は、対応する大脳皮質モジュールから、橋核を介して送られる。 i 番目の順モデルから歯状核には、感覚フィードバックの推定値 \hat{x}_i が送られ、視床腹外側核を介して、大脳皮質に送られる。大脳皮質モジュールは、実際の感覚フィードバック x を受け取り、これと推定値との誤差 $x - \hat{x}_i$ を計算する。この誤差 $x - \hat{x}_i = e_i^F$ を小細胞性赤核などを介して下オリブ核へ送る。下オリブ核で、小川の三角形から送られる責任信号 λ_i とこの推定誤差が掛けあわされて、小脳皮質マイクロゾーンへの登上線維入力 $\lambda_i e_i^F$ となる。推定誤差 $x - \hat{x}_i$ は、責任信号をソフトマックスによって大域的に計算するために、小川の三角形に送られる。

第3に、責任信号予測器を含む大脳小脳連関を説明する。責任信号予測器を構成する小脳皮質マイクロゾーンへの苔状線維入力は、対応する大脳皮質モジュールから、橋核を介して送られる。 i 番目の責任信号予測器から歯状核には、責任信号予測値 $\hat{\lambda}_i$ が送られる。この予測値 $\hat{\lambda}_i$ は、小細胞赤核を介してさらに下オリブ核へ送られると共に、責任信号をソフトマックスによって大域的に計算するために、小川の三角形に送られる。下オリブ核は、実際の責任信号 λ_i を受け取り、これと責任信号予測値との誤差 $\lambda_i - \hat{\lambda}_i$ を計算する。この推定誤差が小脳皮質マイクロゾーンへの登上線維入力となる。

第4に、責任信号を計算する小川の三角形を説明する。MPFIMを、脳の神経回路にマップする時に、最も微妙な点は、各モジュールの独立性と、責任信号をソフトマックスで計算するための大域的相互作用を、いかに両立させるかということである。我々の仮説は、小川の三角形の構成要素間の結合がある方向には大域的で、ある方向には局所的であるという解剖学的事実に基づき、これが上の要求を満たす特別な神経構造とみなすと言うものである。図の円筒が、3つの神経核を表わし、縦切りにされた各円盤が、各モジュールに含まれる部分を表わす。 i 番目の円盤が、責任信号 λ_i を計算し、右隣の $i+1$ 番目の円盤が、責任信号 λ_{i+1} を計算する。この三角形には、順モデルから尤度 $\exp\{-\|x - \hat{x}_i\|^2\}$ の元になる感覚フィードバックの推定誤差 $x - \hat{x}_i$ が、責任信号

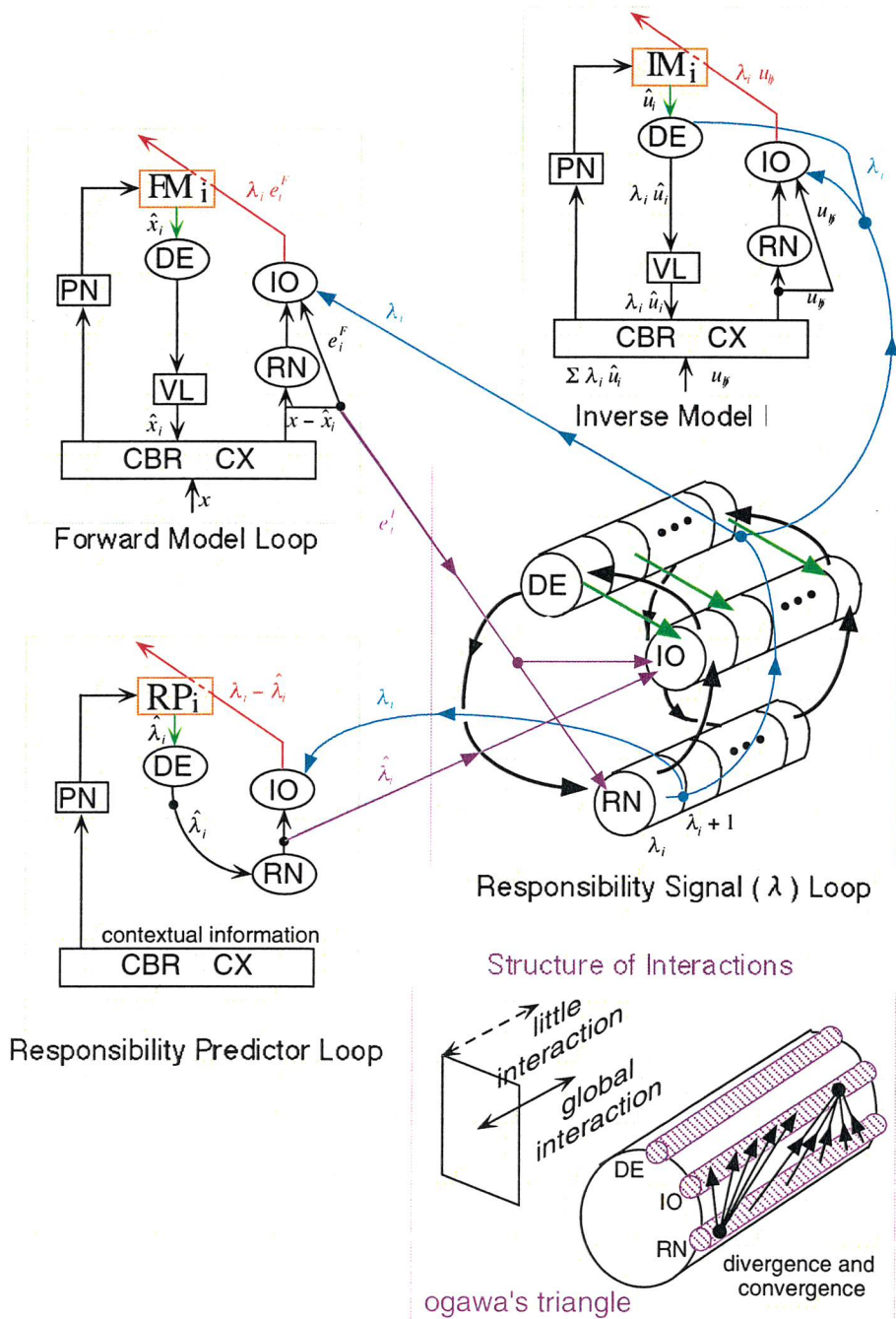


Figure 4: 小脳神経回路モデル

予測器からは、責任信号予測値 $\hat{\lambda}_i$ が入力されて、式1に基づいて、各責任信号 λ_i が計算される。

$$\lambda_i = \frac{\hat{\lambda}_i \exp\{-\|x - \hat{x}_i\|^2\}}{\sum_{j=1}^n \hat{\lambda}_j \exp\{-\|x - \hat{x}_j\|^2\}} \quad (1)$$

このような計算が一般的に可能なことは当然であるが、Fukai and Tanaka (1997) の “winners share all” 研究も関連がある。

最後に、小川の三角形の中の、神経結合のトポグラフィについて説明する。小脳核から赤核への投射線維の終末は、矢状断面方向のシートになっていることが知られている (Shinoda et al., 1988)。一方下オリブ核から小脳核への投射は、横方向にはほとんど広がらないが、前後軸方向には非常に広がっている。これは、図に示したように小川の三角形の相互作用で、ある方向にはモジュール間の大域的相互作用を可能にする、神経投射の発散と収束が起きているのに対して、ある方向ではほとんど相互作用がなく、モジュール固有の信号が保たれることを示している。

4 コミュニケーションと小脳

本節では、MPFIMに基づくコミュニケーションの計算モデルを次節で展開する準備として、概念的な仮説およびそれを支持する実験結果、およびコミュニケーションの基礎と考えられる2つの計算過程をまとめておく。我々が提案する仮説は次のようなものである。ブローカ野、ウェルニッケ野、小脳外側部が、運動パターンの認知・編集・計画・実行に用いる神経計算原理が、言語非言語をとわずコミュニケーションにとって最も本質的な基礎になっている。この過程で重要なのは、運動系列を分節化し、各単位を認知し、自由に入れ替え、特定の行動目標のために運動単位の順序を計画し、かつそれを実行する能力である。このためには、運動系列の分節化に対応して、単位となる運動要素ごとに神経系にモジュールが学習で獲得されなければならない。このモジュールは、MPFIMの、順モデル、逆モデル、責任信号予測器の3つが作るモジュールに対応する。複雑な運動系列をくり返し実行するあいだに、学習によってモジュールが自己組織的に形成されていく。これは、運動系列を教師なしで、チャンキングしていることになる。また同時に、シンボル接地問題を解き、コミュニケーションのためのモジュール構造を作っていることにもなる。コミュニケーションの過程そのものは、他者が示した運動パターンから他者の内部状態を推定する、コミュニケーション信号の認知の問題と、運動制御によってある運動パターンをつくり出し、それを他者に提示することによって、他者の内部状態を制御する、コミュニケーション信号による制御の問題の2つに分かれると考える。両者において、順モデルと逆モデルが双対的に使われる所に、計算の本質があると考えられる。

MPFIMに基づく、コミュニケーションの計算理論は、次の5つの点で、コミュニケーションを感覚運動制御から統一的に理解する魅力的な枠組みを与える。(1) コミュニケーションの神経計算原理と、感覚運動制御の神経計算原理の間に不連続な飛躍を仮定しない。(2) コミュニケーションを他者の隠れた内部状態の推定とその制御と言う、計算問題としてはっきりと定式化する。(3) 言語コミュニケーションで中心課題となるシンボルがどう形成されるかという問題を、天下一にニューロンもしくは神経系の状態とシンボルを1対1にあらかじめ対応させるのではなく、感覚運動制御を通して、シンボルが近似的に神経系のハードウェアに対応してくるという立場を取る。(4) MPFIMの階層化を通して、コミュニケーションの階層性、さらには文法などの問題を計算論的に統一的に扱える。(5) コミュニケーションの最も基本的な機能であると考えられる見まねの能力を、モデルの中で自然に取り扱える。

より概念的に言えば、我々の立場は、言語的コミュニケーションの基礎に、非言語的コミュニケーションが存在し、両者の神経計算原理は基本的には同じである点にある。特に、Donald(1991)のミメシス、Kawatoらの双方向性理論(1997)にその基礎を置く。言語、非言語をとわずコミュニケーションに関わる脳部位は、大脳、小脳、大脳基底核であると考えられる。Doya(1999)に基づき、大脳皮質は統計モデルに基づく効率の良い内部表現を、小脳は因果関係の力学的内部

モデルを、大脳基底核は強化学習に基づいて、報酬の内部モデルを獲得すると考える。この3部位の協調作業により、MPFIMが、有効に働くと考える。上で指摘した第2点の、他者の脳と言う隠れた階層の高い内部状態の推定、および他者と言う未知の制御対象の制御は、拘束条件なしには基本的に解けない問題である。MPFIMの基本的な構造が、異なる人の間でも似通っていることが、コミュニケーションの前提条件であると考えられる。これは遺伝と社会的な相互作用で保証されている。つまり、人と言う共通な遺伝情報により、MPFIMの内部構造は、基本的に類似している。さらに内部モデル構造の詳細も、教育などの社会的相互作用によって、共通の形に収束してくると考えられる。

以上の概念的なモデルを支持する実験データを要約しておく。上で述べたモデルの予測は、次のように特徴付けることができる。(i) コミュニケーション信号の生成に使われる脳部位がコミュニケーション信号の認知にも使われる (ii) コミュニケーション信号生成のために使われる運動パターンの縮約された表現が認知にも使われる。(iii)(i)の脳部位は、コミュニケーションにおいて使用される自己の身体及び他者の身体の逆方向と順方向の内部モデルを格納し、使用している。

Decetyら(1994)は、PETを用いて、仮想現実感の環境で円筒を把持する運動の観察と想像における脳活動を調べた。運動の観察において大脳皮質の活動は主に視覚運動情報を処理すると考えられる視覚領野にあったが、それ以外に大脳基底核と両側性の小脳に活動が見られた。運動の想像においては脳の活動パターンは異なっていた。まずブローカ野に対応すると思われる領域で両側に強い活動があった。それ以外に前頭葉、40、24、32野などで活動が見られた。また大脳基底核と左小脳で活動が見られた。di Pellegrinoら(1992)、Rizzolattiら(1996a)は、運動前野の下吻側部F5野(弓状溝後壁)で、運動の実行と観測の両方で興奮する“Mirror neurons”を発見した。マカクサル(F5野)はヒト脳のブローカ野のうち44野に相同であると考えられているので、特に興味深い。これらのニューロンはサル自身が食物を机に置いたり、取ったり、他人の手から食物を把持したり、紙を引き裂いたりなどの意味のある手の運動を行った時だけでなく、実験者あるいは他のサルが同じ運動を行ってそれを視覚的に観察した時にも興奮する。この生理学的データは明らかに同じハードウェアが運動の実行と観測で使われていること、そしておそらくは同じ表現が使われていることを示唆している。Strickら(Strick et al., 1993; Middleton and Strick, 1994)は、マカクサル小脳外側核の中間部がこの腹側運動前野に出力を送っていることを解剖学的に示している。Tamada et al. (1999)は、fMRIを用いた、機能的結合を調べる実験で、小脳外側部とブローカ野を含む大脳皮質前頭葉が結合されていることを示している。

Rizzolattiら(1996b)、Graftonら(1996)は上記のサルの生理実験に対応するヒトPET計測実験を行った。これは上述のDecetyら(1994)の実験の精密化とも見れる。まず把持運動の観察と実行を比較して、サルの生理実験から示唆される上側頭溝及びF5に相当する脳部位が活動するかが検証された。その結果ブロードマン21野とブロードマン45野が把持運動の観察で活動し、運動の想像でブロードマン44野が活動した。これらはサルの上記の脳部位と機能的に、また細胞構築学的に相同であるという証拠が得られている(Petrides and Pandya, 1994)。次に把持運動の実行、観察、想像の3つの異なる条件で活動する脳部位が調べられた。特に小脳では、実際の運動が小脳前葉を賦活するのに対して、想像と観察では小脳後葉のしかも異なる場所が賦活することが明らかとなった。

これらの実験結果は次の3つの点を示唆している。(i) 運動前野や小脳など、これまで運動制御のみに関わるとされていた脳部位が運動の視覚的観測と想像によって活動する。(ii) 小脳外側半球とブローカ野は大脳小脳連関によって双方向に結合されていることが解剖学的に知られていたが、このループが運動の観測や想像といった、ミメシスの基礎となる機能において活動している。(iii) F5野とブローカ野の相同性から考えて、ブローカ野と小脳半球腹外側部が作るヒトの外側言語処理系は、顔の表情や手のジェスチャーを認識するための、サルにも存在するより古いシステムから進化してきた。小脳半球腹外側部と小脳外側核腹外側部の劇的な進化に伴って、このシステムがミメシスを可能とし、さらには声道形状の現代化にともなって言語が発生したと考えられる。ブローカ野がより複雑な構文を理解するとき、より激しく活動すること(Stromswold et al., 1996; Just et al., 1996)、またサインランゲージの理解でも活動すること(Neville et al., 1994)

も上記のような外側言語システムの連続的な進化のモデルを支持している。

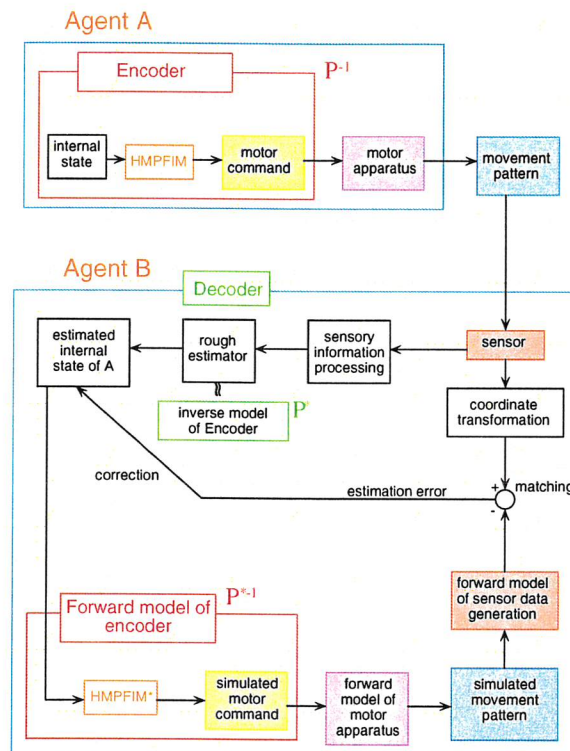


Figure 5: 復号化：他者の隠れた内部状態の推定

本節の最初で述べたように、コミュニケーションは少なくとも2つの逆方向の情報処理過程を含んでいる。つまり、他者の隠れた内部状態の推定とその制御である。どちらの計算過程も困難である。第1の過程は、隠れた変数の推定と言う意味で難しい。第2の過程は、ある未知のプロセスの制御と言う意味で難しい。しかしながら、我々はすでに感覚運動制御の研究でこのような困難を経験し、それを解決するためには何が必要かを知っている。前者は、視覚の計算論で画像情報から3次元世界の様子を推定する時に生じた困難に似ている。後者は、運動制御において、未知の制御対象をフィードフォワード制御する時に生じた困難に似ている。視覚では、画像が作られる過程（光学）のモデルと、3次元世界に関する事前知識を組み合わせることによって、不良設定問題が解かれた (Kawato et al., 1993)。運動制御においては、制御対象の内部モデルが運動学習によって獲得され、制御に使われた (Kawato, 1997)。同様に、コミュニケーションの推定と、制御の両方で、他者の内部構造のモデルが必要となる。これをもう少し具体的に、ブロック図を使って説明する。

図5は、エージェントBが、エージェントAの作り出したコミュニケーション信号（運動パターン）を認知する過程を、復号化として捉えたブロック図である。つまり、認知の過程は、エージェントBが、エージェントAが発した運動パターンからエージェントAの内部状態を推定（復号化）するプロセスであるとみなす。エージェントAは、その内部状態から、運動指令をつくり出す符合器を持っていると考える。その特性を P^{-1} で表わす。エージェントBは、この符合器の順モデルを持っていると考える。その特性は、完全に同一ではないから、 P^{*-1} で表わす。エージェントBの脳内には、エージェントAの内部状態の表現があり、これを符合器の順モデルに入力して、予想される運動パターンをつくり出す。この予測と、実際に観測した運動パターンを比較して、内部状態の推定をより精密にする。この過程がMPFIMの枠組みで、非常に効率的に行なえ

ることは、後の節で説明する。この計算モデルの最も本質的な仮定は、コミュニケーションの認知の過程に、コミュニケーション信号の生成の過程を使っていることである。その意味で、認知科学的に言えば、シミュレーション説に基づいていると言える (Gallese and Goldman, 1998)。また、ミラーニューロンの発見に支持されていると、神経生理学的には言える。発話認知 (Liberman et al., 1967) の運動指令説とも関連がある。

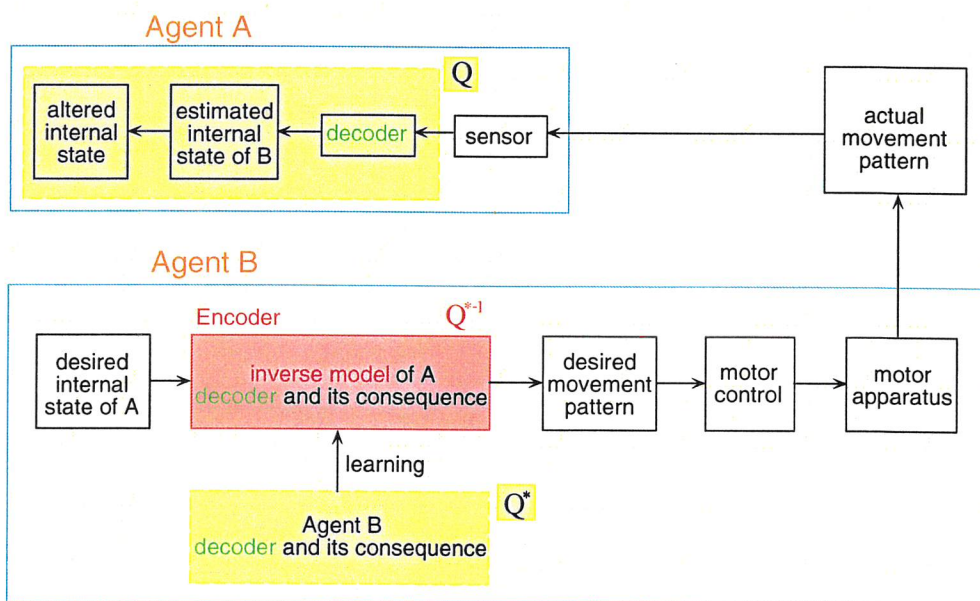


Figure 6: 符号化：他者の内部状態の制御

図6は、エージェントBが、エージェントAの内部状態を、コミュニケーション信号（運動パターン）を生成して見せることによって、変更（制御）する過程を、符号化として捉えたブロック図である。つまり、コミュニケーションの信号伝達の過程は、エージェントBが、自ら発した運動パターンによってエージェントAの内部状態を制御するプロセスであるとみなす。エージェントAは、上の図5で、説明した復号器によって、エージェントBの発した運動パターンから、Bの内部状態を推定し、それによって自身の内部状態を変更する。この復号器から、内部状態変更までの過程の特性を Q であらわす。エージェントBの運動指令をつくり出す符合器の特性は、上記の過程の近似的な逆であれば、効率的の制御が行なえるので、それを Q^{*-1} で表わす。エージェントBの脳内には、エージェントAの望ましい内部状態の表現があり、これを符合器に入力して、運動パターンをつくり出す。この一連の過程は、制御対象が単なる筋骨格系や道具ではなく、知性をもった他の人であるという違いはあるが、運動指令を発することによって、世界の状態を変更するという意味では、相変わらず、運動制御である。他者の復号器の良い逆モデルを学習で獲得するためには、他者の復号器が自身の復号器とある程度似ているという前提条件が必要となる。

5 多重モデル対の階層化

本節では、多重順逆モデルの階層化を定式化する。基本的なアイデアは、一番低い階層では、制御対象と外界のダイナミクスが、予測と制御の対象だったのを、ある階層では、それより1つ下のレベルの階層の、責任信号のダイナミクスを、予測と制御の対象とすることである。これによって、下の階層での運動プリミティブの1つの系列を、高い階層の行動プリミティブの1つの単位とみなせる。この枠組みでは、感覚運動変換のモジュール構造に基づく学習を通して、様々なレ

ベルで、運動と行動を階層的にモジュール化、チャンク化できることになる。コミュニケーションの基本的な機能であるミメシスを、神経回路で有効に実現するための、ハードウェアと表現の基礎ができる。モジュールと、シンボルの近似的な対応をとれば、言語コミュニケーション理解への手がかりもできる。

図7は、最下層の2つを例にとって、階層化を一般的に定式化したものである。上の階層を上付き添字Hで、下の階層をLで表わす。下の階層には3つのモジュールを、上の階層には2つのモジュールを示したが、もちろんこの数は任意である。下の階層は最下層であるから、その入出力で、筋肉骨格系、外界などと直接相互作用している。しかし、それ以外の点では、ここで示す定式化は、任意の深い階層構造の中の隣り合う上下の2階層に適用できる。下の階層の構造は、基本的にすでに提案したMPFIMと同じであるので、違いだけ説明する。各モジュールの責任信号予測器は、もともとのモデルに含まれていた文脈情報 CI_d^L 以外に2種類の文脈情報を受け取る。第1は、同じ階層の他の責任信号予測器、および自分自身が出力する信号である。第2は、上の階層の、制御モデルが計算する高い階層にとっての運動指令 mc^H で、上の階層から下の階層に降りてきて、渡される文脈情報 CI_d^H である。上の階層が下の階層を完全に制御する極端な場合には、 CI_d^H は下の階層の責任信号予測値 λ^L を直接規定してしまう。しかし一般的には、責任信号予測器は、3種類の文脈情報を受け取って、責任信号の予測値、言い換えれば、責任信号の事前確率を計算する。責任信号予測器の相互作用系は、たとえ外界と切り離されていても、相互結合によってあるダイナミクスを持つ。これは、筋肉骨格系、外界、順モデル、逆モデルのダイナミクスと結びついて、新たな力学系のダイナミクスが生まれる。その結果、たとえ外界の状態が定常であっても、責任信号予測器のダイナミクスによって、時間的に変化する文脈情報がつくり出され、結果として、状態も運動指令も変化する可能性がある。つまり最下層のMPFIMと外界が結合したシステムは、又力学系となっている。これは、一つ上の階層のMPFIMにとって、予測と制御の対象とみなせる。従って、感覚フィードバックと、運動指令さえ規定すれば、上の階層に関する説明も全く同じことになる。上の階層にとっての運動指令 mc^H は、下の階層に渡される文脈情報 CI_d^H であることはすでに説明した。上の階層にとっての感覚フィードバック sf^H は、下の階層の責任信号 λ^L である。

以上の定式化は、上の階層と下の階層の相互作用、トップダウンの信号の流れとボトムアップの信号の流れのせめぎ合いを、どちらか一方がすべてを支配するのではなく、両者の微妙なバランスの上に、系全体のダイナミクスが依存している事を保証している。上の階層は下の階層で生じていることを全てモニターするのではなく、どのモジュールが活性化されているかと言う責任信号を受け取ることにより、下の階層と外界がどのようなモードにあるかを知る。また、外界に送られる運動指令を直接規定するのではなく、下の階層のどのモジュールがより責任を取らなければいけないかと言う文脈信号を制御することによって、間接的に最終的な運動指令に影響を与える。

責任信号予測器間の相互作用系は、それだけで力学系を規定するので、結合によっては、外界との相互作用なしに、モジュールの切り替えを自律的に行うことができる。つまり、予測器の相互作用系は、パターンジェネレータを構成しているともみれる。発声発話を例に取れば、このような力学系がコアティキュレーションのある部分に対応している可能性がある。この例で言えば、高い階層は、調音器官への運動指令を直接規定するのではなく、例えば音韻に対応する運動制御のモジュールを選択することによって高い階層で運動制御を行う。より高い階層は、例えば、単語などを指定できる訳である。

上の階層が下の階層の責任信号の時間変化を予測するというアイデアは、谷等(1998, 1999)が最初に提案した。我々の定式化は、順モデルと逆モデルを分離することによって初めて可能となったものである。制御のための逆モデルによって、ボトムアップの予測の流れだけではなく、トップダウンの制御の流れも導入した。また、責任信号予測器そのもの、またその相互結合によるダイナミクス、さらには事前確率としての予測値なども、トップダウンとボトムアップのせめぎ合いを通しての、感覚運動統合の中での階層化には不可欠の物であると考えられる。

上の定式化をわかりやすくするために、Haruno et al. (1999a)の把持物体制御のシミュレーションをベースに、簡単な例題をを考えよう。簡単ではあるが、丹治(Tanji and Shima, 1994)、

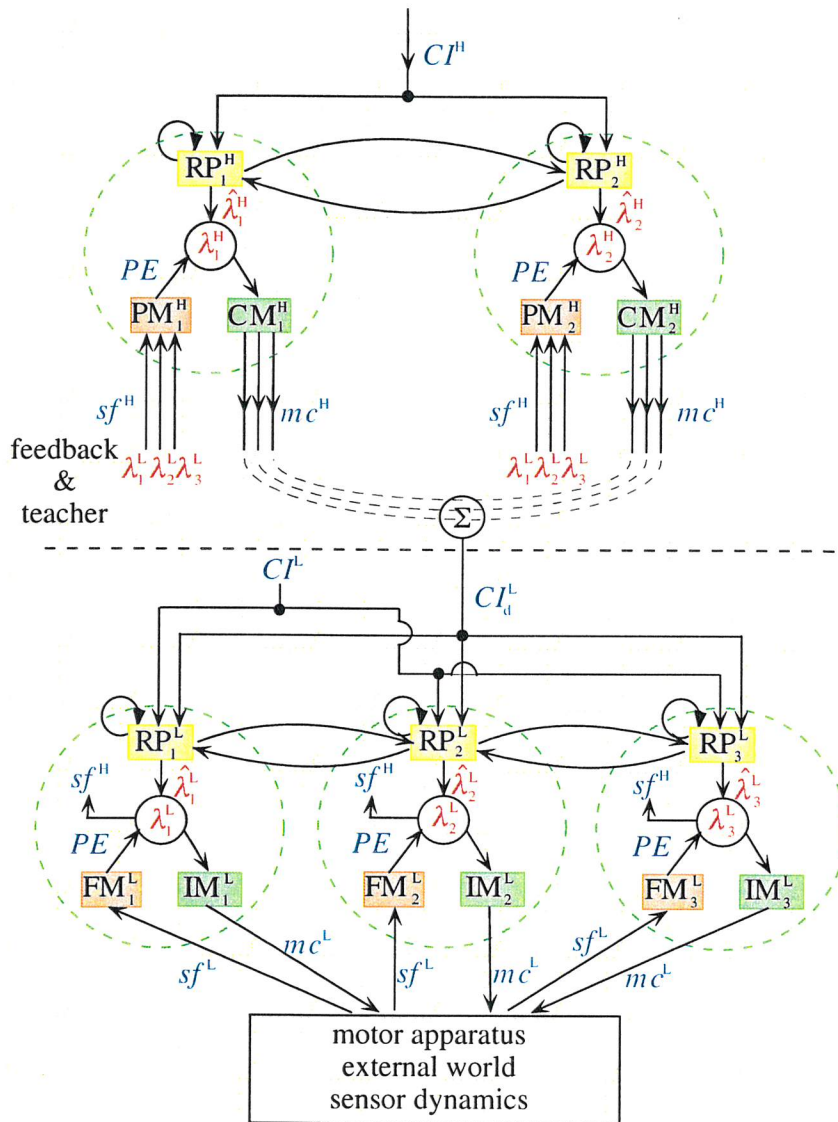


Figure 7: 一般的な定式化。CI: contextual information, RP: responsibility predictor, H: higher level, L: lower level, PE: prediction error, PM: predictive model, CM: control model, sf: sensory feedback signal, mc: motor commands, CI_d^L : contextual information for the lower level which descends from the higher level control model.

彦坂 (Nakamura et al., 1998)、木村等 (1992) の実験のモデル化、ニューロンの解釈とも考えられるようになる。異なる運動要素の特定の系列が1つ上のレベルでは、1つの順モデルと対応がとれることをめざす。これで、丹治の、特定の順序で興奮するニューロン、彦坂のハイパーセットを表現するモジュールの獲得が期待される。この研究は、シンボルとニューロン1個、ネットワークのアトラクター1個とをアプリアリに対応させると言う、いわゆる“シンボル処理ニューラルネットワーク”に対するアンチテーゼである。人工的神経回路のニューロン1個にシンボルを固く結び付けてしまうと、もともとチューリングマシンより能力がおとり、不自由である。Symbol Grounding Problemは、感覚運動変換に基づいて、シンボルに対応する神経表現、もしくはハードウェアがどのように自己組織されるかを明らかにして、初めて解ける。例えば、部分を共有する複数のシンボル系列を1個の巡回結合神経回路モデルに学習させる時に、困難を指摘されている軌道の分岐の問題は、系列のある要素と厳密に1体1に対応する神経表現があると仮定するから生じる。シンボリック神経系の状態変数と言うお手軽な対応をまず捨て去らなければならない。階層的MPFIMの枠組みでは、高い階層のモジュールは、近似的には、あるシンボルと対応しているが、状態の遷移は、物理世界や脳の他の部位の状態に依存して変化するので、軌道の分岐などと言う机上の空論の困難は生じない。

Haruno et al (1999a) で、すでに示されたように、物体 p, q, r に対して、3つのモジュール 1, 2, 3 が、すでに学習で獲得されたとする。3つの物体を無限に周期的に提示する2つの系列を同じ確率で、くり返し与えよう。第1の系列 (A): $p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow \dots$, 第2の系列 (B) $p \rightarrow r \rightarrow q \rightarrow p \rightarrow r \rightarrow q \rightarrow \dots$ である。一つ上のレベルで、2つの系列 (A), (B) に対応する2つの順モデルモジュールが自律的に獲得されることが、すでにシミュレーションで示されている (Haruno et al., 1999b)。

順モデルモジュールとしては、やがては生成モデルで系列を自律的に生成する必要があるから、ダイナミクスを持つリカレントニューラルネットワークを用意する。下のレベルの責任信号 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ に、対応して少なくとも3つニューロンは必要だろう。下のレベルの責任信号は入力としてこのネットワークに入ってくる。多重順逆モデル対の予測の良さによるソフトマックスはそのまま使う。下のレベルの責任信号の時間的変化の軌道が教師信号だから、任意の教師有り学習則が使える。一番強力そうな backpropagation through time and teacher forcing の組み合わせを使うことができる。今までどおりの順モデルの枠組みだと、ベクトル場の推定に基づく、学習でも同様に行なえる。さて、こうしてできた2つの順モデルは2つの系列に対応しているが、厳密な1体1対応でないと言う所が、従来のシンボル処理神経回路モデルと全く異なる点である。どういうふうに汎化するかは予測できないが、新しい系列が下のレベルで生じたり、時間経過の変更や、ノイズの挿入に対しても、予測の誤差に基づいて、何かしようとするところが本質的に違う。2種類の系列の違いを直接、あるいは間接に示唆する、言語指示、視聴覚情報などがあったとする。これは、上の階層の責任信号予測器への文脈情報 CI^H として入れれば良い。すると系列運動の実行以前に、系列を予測し、主体的に行動を制御する(系列の選択)ことができる。上の階層の責任信号予測器の出力部、もしくは責任信号そのものを表わすニューロンが、丹治の系列特異的なニューロンに対応することになる。

上の階層で、順モデルと逆モデルと言うのはひどく制限のきつい用語である。より一般的には、予測モデル (predictive model) と制御モデル (control model) と言う用語を使いたい。リカレントニューラルネットワークモデルを予測モデルとして、対応する制御モデルは全く同じリカレントニューラルネットワークモデルである。ただし、学習は、予測モデルのコピーで良い。予測モデルには下の階層からの責任信号が入力として入ってくる。この枠組みでトップダウンの流れが勝っている時は、上の階層で、2つの制御モデルのどちらかが、中枢からの指令、もしくは文脈情報によって、系列を自律的に作り出し、最下層のレベルでのフィードバックとは無関係に(独りよがり)で、一連の運動系列を生成する。もちろん上の階層の予測モデルは、下の階層からの責任信号のフィードバックを手がかりに、実世界の实情にあった系列生成をしようとするから、ここで興味深いトップダウンとボトムアップの相互作用が生じる。純粋なトップダウンモードでは、把持物体がないのに、それに対応するモジュールを働かせても仕方がないのだが、より一般

的な問題では、トップダウンの系列生成と言う意味で、とても重要である。繰り返しを恐れずに言えば、最初は物体が切り替わることでいわば受動的に、内部状態のスイッチングが生じていたのに、一つ上の階層で、予測モデル、制御モデル、責任信号予測器が学習で獲得されると、自分の意志で、運動系列を自律的に生成できるようになる。

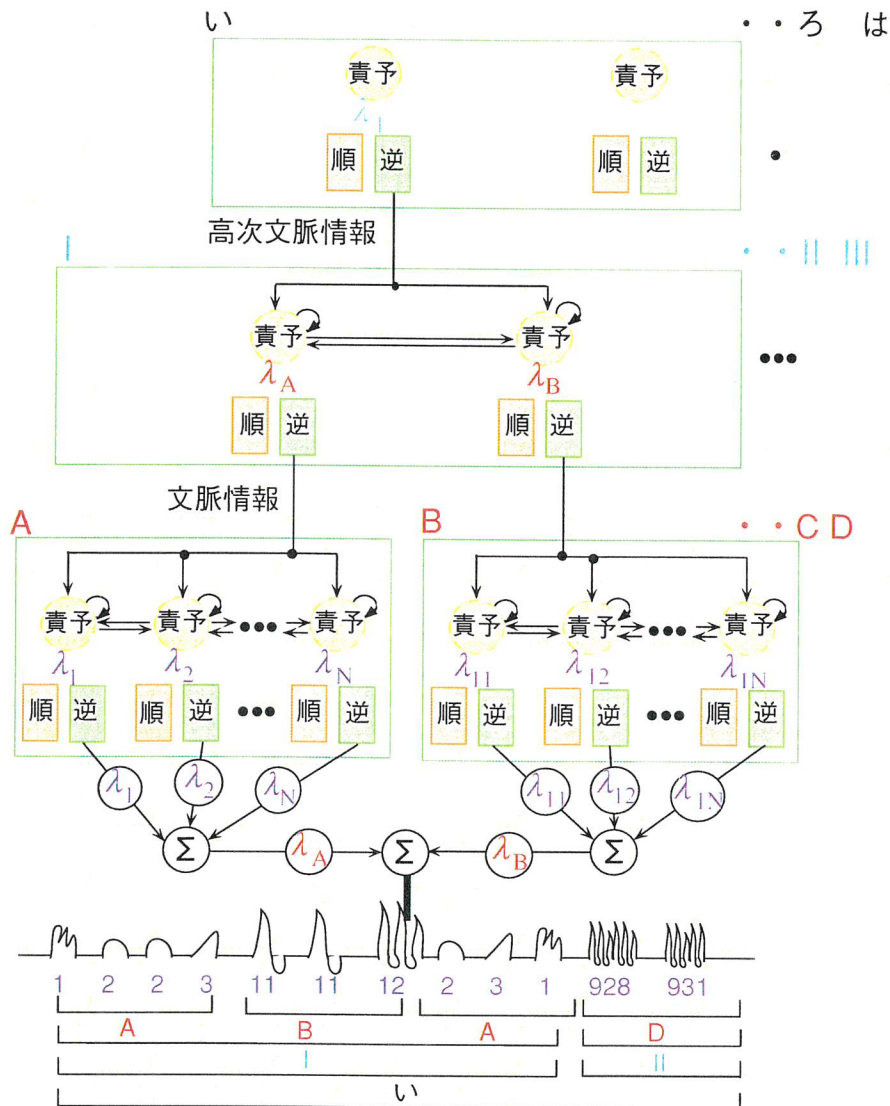


Figure 8: 時系列の分節化

コミュニケーションにおける復号化の計算論的な枠組みを図5で説明した。ここでは、図8を用いて、時系列信号が階層的に生成される仕組みと、それに基づいて、どのように内部状態を推定できるかを議論して、次節でのシミュレーション実験の準備をしておく。図の一番下に示した波形は、音声、身ぶり手ぶり、顔の表情などの、時間波形としてのコミュニケーション信号である。これは全て運動パターンであることにまず注意したい。階層性のあるモジュール構造 HMPFIM の中で、どのモジュールが活動するかによって、異なる波形が生成されることが分かる。対応がとれるように、モジュールと、波形の各要素に同じシンボルを割り振ってある。異なる階層のシンボ

ルは、例えば音韻と単語のように異なる粗さのチャンキングに対応している。さて、前節で運動パターンから、内部状態を推定することが、復号化（認知）であると定式化した。より具体的なこの例では、時間波形から、HMPFIMの複数の階層の責任信号を推定することがタスクである。これは、神経回路や統計的信号処理の分野で研究されているが、時間波形だけを観測して、波形をセグメントし、隠れ変数を推定する問題であるから、よほど拘束条件がきつくなければ実際には解けないと言うのが常識である。我々は、送り手と受け手の間で、図に示した階層構造を共有することで、このタスクが現実にとけるようになることを次節で示す。この時、複数のモジュールで並列に計算すること、順モデルと逆モデルの両者を用いた双方向計算が本質的である。

まとめると、本節ではMPFIMを階層化する事によって、コミュニケーションを感覚運動制御の立場で理解する次のような方針を提案したことになる。(1) シンボル接地問題、さらにはコミュニケーション信号のチャンキングの問題を、力学系の多重モジュールによる予測と制御の観点から根元的に解決することを目指す。(2) ある階層での責任信号予測器の相互結合系が形成するネットワークは、それ以下の階層と物理的外部世界が結合して1つの力学系を形成する。(3) それより1つ上の階層の予測モデルは、この力学系の状態変化を予測し、制御モデルは文脈情報と目標軌道を下の階層に与えることによって、この力学系を制御する。(4) 時間波形のチャンキング（神経回路のモジュール化）と階層化は全て双方向の情報の流れの元で自己組織される。(5) モジュールがシンボルに近似的に対応し、責任信号予測器相互作用系のダイナミクスがシンタックスに相当する。

6 多重モデル対による運動系列のシンボル化と見まね

本節では、アクロボットの振り上げという具体的課題を例題として用いながら、一般的に、MPFIMを用いた内部状態の推定と、それに基づく見まね学習を提案する。運動パターンを認知して他者の内部状態を推定する基本的な情報処理の流れは以下のである。まず受容した他者の運動パターン x_t^O を、自身の運動パターン x_t^M に変換する。これは関節角度を同一視するなどの、幾何学的変換である。この観測し変換された運動パターン x_t^M をあたかも、目標運動パターンであるとみなして、最下層のすべての制御モデル IM^i に同時に入力して、仮想的な運動指令 \hat{u}_t^i を並列に計算させる。この運動指令をそれぞれ同じモジュールの予測モデル FM^i に入力し、次の時点の運動パターン \hat{x}_{t+1}^i を並列に予測させる。すべての予測 \hat{x}_{t+1}^i と実際の運動パターン x_{t+1}^M を比較し、最も予測の良かったモジュールが、この運動パターンを生成した責任モジュールであると推定する $\arg \min_i \|x_{t+1}^M - \hat{x}_{t+1}^i\|$ 。より正確には、予測誤差から尤度を計算し、ソフトマックスで、責任信号を推定する。

$$\lambda_i = \frac{\hat{\lambda}_i \exp\{-\|x_{t+1}^M - \hat{x}_{t+1}^i\|^2\}}{\sum_{j=1}^n \hat{\lambda}_j \exp\{-\|x_{t+1}^M - \hat{x}_{t+1}^j\|^2\}} \quad (2)$$

この推定された責任信号を用いれば、1つ上の階層での内部状態の推定が同時に同様に行えることは明らかであろう。このようにして、純粋にボトムアップの処理で、運動パターンの観測から、任意の高い階層の隠れたダイナミクス、つまりシンボルの推定が行なえる。しかし、実はこれはつまらないのであって、本当の意味でHMPFIMの能力をフルに使おうとすると、ボトムアップとトップダウンを同時に使う。つまり、コミュニケーション信号を生成している時とほとんど同じ計算をさせるのである。唯一の違いは、最下層の感覚フィードバックを実際の運動制御の結果得られた感覚フィードバックにする代わりに、観測した運動パターンから得られたものにするのである。つまり、図で、最下層の逆モデル、順モデルが自分自身の筋肉骨格系と入出力で結びついているのをまず切り離す。第1に、順モデルへの感覚フィードバックは、観測し変換された運動パターンで置き換える。第2に、各順モデルに入力する運動指令は、最終的に実際に送りだされた運動指令ではなく、ペアとなる逆モデルの出力を入れる。第3に、各逆モデルには、観測し変換された運動パターンを、目標軌道として入力する。また第4に、責任信号の計算で使われる感覚フィードバックには、観測し変換された運動パターンを用いる。以上の4点の変更を行えば、

階層的 MPFIM がそのまま内部状態の推定に用いられるのである。このモデルの魅力は、コミュニケーション信号の認知にボトムアップのプロセスとトップダウンのプロセスが絶妙に相互作用して、他者の意図をあらかじめ想定することが可能になることや、コミュニケーション信号の認知に、コミュニケーション信号の生成の神経機構が、最も自然な形で使われることなどがあげられる。しかし、最大の魅力は、階層的なモジュール構造によって、コミュニケーション信号の認知つまり内部状態の推定、さらに言えば、階層的なシンボル列の決定を感覚運動制御のための神経回路以外に特別な装置を何も付け加えずに行なえる点である。

ここで提案した計算理論は、これまで認知科学などで議論されてきた、コミュニケーションに関する様々の理論、例えば音声知覚の運動指令説 (Lieberman et al., 1967)、コミュニケーションのシミュレーション説 (Gallese and Goldman, 1998)、心の理論 (Leslie AM, 1992) などに、計算論的な裏づけを与えるものである。また我々が、経験的に感じる、コミュニケーション時の共鳴や共感と言った感情にも、計算論的な説明を与える可能性がある。

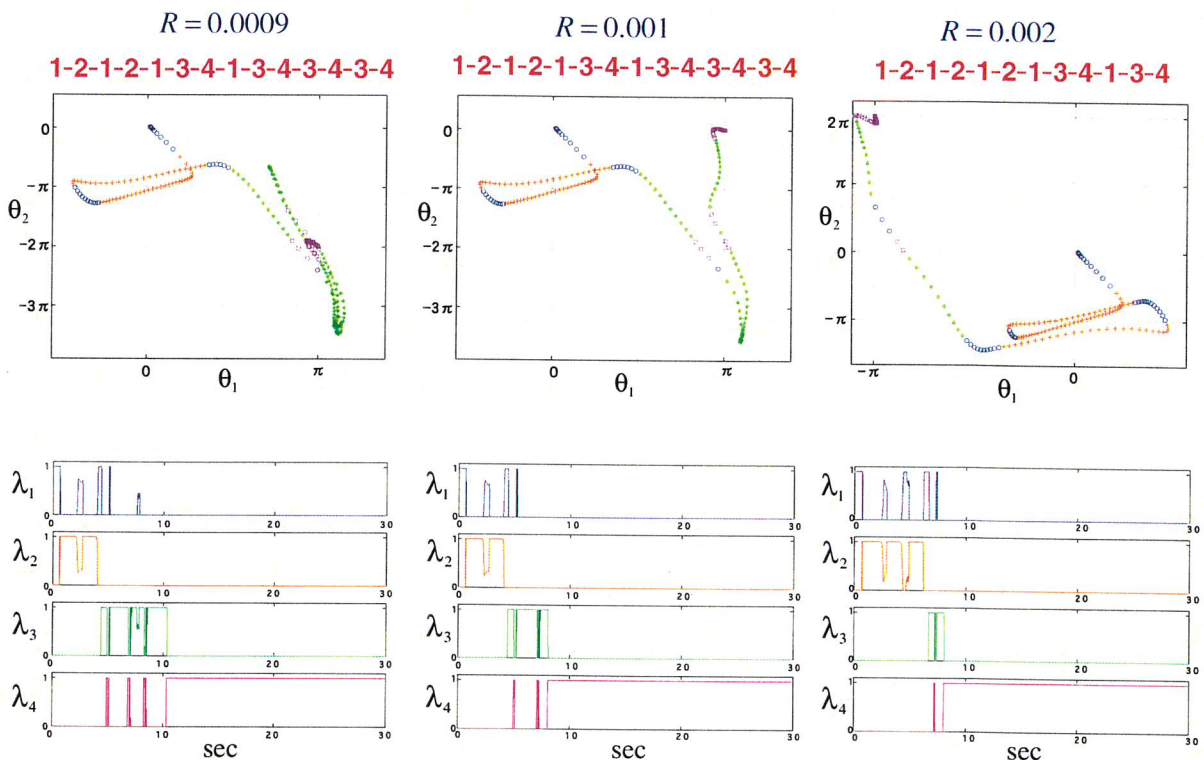


Figure 9: 異なる運動系列のシンボル化

銅谷等 (1999) は、MPFIM の基本的な枠組みを強化学習に拡張して多重モデル強化学習を提案している。図9には、アクチュエーターが2つのリンクの間に1つあるだけの、2重振り子アクロボットをこの枠組みで制御した結果を示す。4つの順モデルと強化学習コントローラーの対がなすモジュールが、複雑な時間系列で切り替えられることによって、振り上げ倒立課題が達成されている。下図に示した責任信号の時間波形を、図の上にシンボル化して示している。このシンボル系列を見ると、制御信号に対するペナルティの係数 R がわずかに変化するだけでもモジュールの切り替えの順序が質的に変化している事が分かる。ここでは平衡点から平衡点への過渡的な軌道を取り扱ってはいるが、力学系の理論で用いられるシンボリックダイナミクスを、より高度な領域分割と、アトラクター以外の軌道へと一般化した例とみなせる。

片桐等 (1999) は、このアクロボットの例題で、コミュニケーション信号の認知 (内部状態の

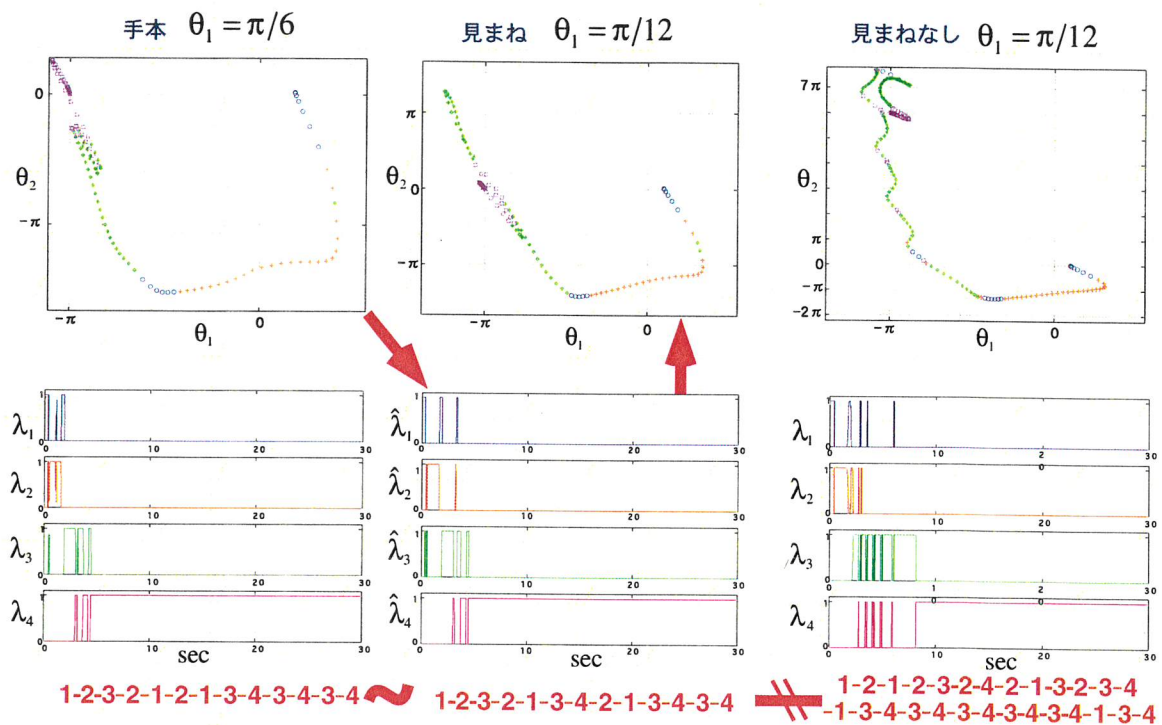


Figure 10: シンボルによる見まね

推定) と、推定から得られた責任信号に基づく見まね学習に成功した。先生と、生徒はそのダイナミクスや、制御信号に対するペナルティの係数、の内部構造では全く同じ場合の例を図に示す。この場合は、初期条件だけが違うが、それ以外の場合に一般化もできる。左端の例に示した先生と右端の列に示した生徒では、振り上げの軌道が違うだけでなくシンボル系列が全く異なっている。本節で説明した方法で、教師の運動パターンを生徒の多重モデルで認知し、責任信号を推定した結果が、中列下に示してある。この推定した責任信号が、責任信号予測器から出力される、責任信号予測値だと考えて、生徒が振り上げを行った結果が、中列上に示してある。見まねなしで行った運動パターンとは全く異なり、シンボル系列に関しては先生の手本の方に圧倒的に近いことが分かる。

7 おわりに

小川の三角形は図4に示したように、MPFIMを実現するための本質的な神経回路であると考えた。しかし、それだけでなく、この回路はヒトの知性にとっても重要な役割をはたしている可能性がある。大脳皮質だけを用いていたのでは、基本的に1つの流れの処理しかできないのに対して、小脳内の多数のマイクロゾーンを並列に働かせることで殆ど無意識のマルチタスキングが可能になっていると思われる。最も本質的な小脳の知性への寄与は、埋め込み構造、階層性、回帰的な処理であると考えられる。文の理解と生成、複雑なタスクを解くための計画、ハノイの塔のようなパズルを解くときに、大きくて複雑な問題をいくつかの部分に分解し、1つ1つの部分をまた新たな問題と考えると解くことが必須になる。このような階層的な処理においてチンパンジーとヒトの能力の差が最も明確になるという観察もある(Matsuzawa, 1996)。図2に小川の三角形と大脳小脳連関によって、小脳と大脳の複数のモジュールが階層的に配置され、あるマイクロゾーンの学習に関わる誤差信号が他のマイクロゾーンによって計算されうることを示した。図で左側の

小脳のマイクロゾーン 1 と大脳のモジュール 1 がより階層が高く、全体問題を解いているとしよう。この全体問題を分割して、ある部分問題を小脳のマイクロゾーン 2 と大脳のモジュール 2 に解かせているとしよう。より低位のマイクロゾーン 2 はその出力を上位のマイクロゾーン 1 に大脳皮質を介して戻して全体の問題の解決に役立っている。しかしこの低位のマイクロゾーン 2 は、全体の問題がうまく解けたか否かの情報が与えられなければ、それ自身だけでは自身の誤差信号が計算できない。上位のマイクロゾーン 1 は部分問題の誤差信号を計算し、それを小川の三角形を介してより低位のマイクロゾーンへ送ると考えるのである。

References

参考文献

- [1] Allen GI, Tsukahara N: Cerebrocerebellar communication systems. *Physiological Review*, **54**, 957-1006 (1974).
- [2] Courchesne E, Akshoomoff NA, Townsend J, Saitoh O: A model system for the study of attention and the cerebellum: infantile autism. *Electroenceph. Clin. Neurophys. (Suppl.)*, **44**, 315-325 (1995).
- [3] Decety J, Perani D, Jeannerod M, Bettinardi V, Tadary B, Woods R, Mazziotta JC, Fazio F: Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, **371**, 600-602 (1994).
- [4] di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti: Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, **91**, 176-180 (1992).
- [5] De Zeeuw CI, Simpson JI, Hoogenraad CC, Galijart N, Koekkoek SKE, Ruigrok TJH: Microcircuitry and function of the inferior olive. *Trends in Neurosciences*, **21**, 391-400 (1998).
- [6] Donald M: *Origins of the Modern Mind.*, Harvard University Press, Cambridge. (1991).
- [7] Dow RS: The evolution and anatomy of the cerebellum. *Biological Reviews*, **17**, 179-220 (1942).
- [8] Doya K: What are the computations of cerebellum, basal ganglia, and cerebral cortex? *Neural Networks*, in press (1999).
- [9] Doya K, Katagiri K, Kawato M: Multiple model-based reinforcement learning. *Machine Learning*, submitted (1999).
- [10] Elman JL, Bates EA, Johnson MH, Karmiloff-Smith A, Parisi D, Plunkett K: *Rethinking innateness: a connectionist perspectives on development.* MIT Press, Cambridge (1996).
- [11] Fukai T, Tanaka S: A simple neural network exhibiting selective activation of neuronal ensembles: from winner-take-all to winners-share-all. *Neural Computation*, **9**, 77-97 (1997).
- [12] Gallese V, Goldman A: Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences*, **2**, 493-501 (1998).
- [13] Gao JH, Parsons LM, Bower JM, Xiong J, Li J, Fox PT: Cerebellum implicated in sensory acquisition and discrimination rather than motor control. *Science*, **272**, 545-547 (1996).
- [14] Gomi H, Kawato M: Equilibrium-point control hypothesis examined by measured arm-stiffness during multi-joint movement. *Science*, **272**, 117-120 (1996).
- [15] Gomi H, Shidara M, Takemura A, Inoue Y, Kawano K, Kawato M: Temporal firing patterns of Purkinje cells in the cerebellar ventral paraflocculus during ocular following responses in monkeys. I. simple spikes. *Journal of Neurophysiology*, **80**, 818-831 (1998).

- [16] Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L, Rizzolatti G: Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Experimental Brain Research*, **112**, 103-111 (1996).
- [17] Haruno M, Wolpert D, Kawato M: Multiple paired forward-inverse models for human motor learning and control. *Advances in Neural Information Processing Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. in press (1999a).
- [18] Haruno M, Doya K, Wolpert DM, Kawato M: Emergence of sequence-specific neural activities with hierarchical multiple paired forward and inverse models. *Society for Neuroscience Abstract*, in press (1999b).
- [19] Imamizu H, Miyauchi S, Sasaki Y, Takino R, Pütz B, Kawato M: Separated modules for visuomotor control and learning in the cerebellum: a functional MRI study. *NeuroImage*, **5**, S598 (1997).
- [20] Ito M: *The Cerebellum and Neural Control*. Raven Press, New York. (1984).
- [21] Ito M: Movement and thought: Identical control mechanism by the cerebellum. *Trends in Neurosciences*, **16**, 448-450 (1993).
- [22] Just MA, Carpenter PA, Keller TA, Eddy WF, Thulborn KR: Brain activation modulated by sentence comprehension *Science*, **274**, 114-116 (1996).
- [23] Katagiri K, Doya K, Kawato M: Multiple model-based reinforcement learning: symbolization and imitation learning of motion sequence using competitive modules. *IEICE* submitted, (1999).
- [24] Kawato M: Bidirectional theory approach to consciousness. Ito M, Miyashita Y, Rolls ET (Eds.) *Cognition, Computation and Consciousness*, Oxford University Press, Oxford, 223-248 (1997).
- [25] Kawato M, Furukawa K, Suzuki R: A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics* **57**, 169-185 (1987)
- [26] Kawato M, Gomi H: Computational models of cerebellar motor learning. *Trends in Neurosciences* **16**, 177-178 (1993).
- [27] Kawato M, Hayakawa H, Inui T: A forward-inverse optics model of reciprocal connections between visual areas. *Network: Computation in Neural systems*, **4**, 415-422 (1993).
- [28] Kawato M, Wolpert D: Internal models for motor control. Glickstein M (Ed.) *Sensory Guidance of Movement*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Sussex. pp.291-307, 1998.
- [29] Kimura M, Aosaki T, Hu Y, Ishida A, Watanabe K: Activity of primate putamen neurons is selective to a mode of voluntary movement: sensory-triggered, self-initiated or memory-guided mode. *Experimental Brain Research*, **89**, 473-477 (1992).
- [30] Kitazawa S, Kimura T, Yin P: Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements. *Nature* **392**, 494-497 (1998).
- [31] Kobayashi Y, Kawano K, Takemura A, Inoue Y, Kitama T, Gomi H, Kawato M: Temporal firing patterns of Purkinje cells in the cerebellar ventral paraflocculus during ocular following responses in monkeys. II. complex spikes. *Journal of Neurophysiology*, **80**, 832-848 (1998).

- [32] Leiner HC, Leiner AL, Dow RS: Cognitive and language functions of the human cerebellum. *Trends in Neurosciences*, **16**, 444-447 (1993).
- [33] Leslie AM: Pretense, autism, and the “Theory of Mind” module. *Current Directions in Psychological Science*, **1**, 18-21 (1992).
- [34] Liberman AM, Cooper FS, Shankweiler DP, Studdert-Kennedy M: Perception of the speech code. *Psychological Review*. **74**, 431-461 (1967).
- [35] Matsuzawa T: Chimpanzee intelligence in nature and in captivity: isomorphism of symbol use and tool use. McGrew WC, Marchant LF, Nishida T (Eds.) *Great Ape Societies*, 196-209 (1996).
- [36] Miall RC, Weir DJ, Wolpert DM, Stein JF: Is the cerebellum a Smith predictor? *J Motor Behavior*, **25**, 203-216 (1993).
- [37] Middleton FA, Strick PL: Anatomical evidence for cerebellar and basal ganglia involvement in higher cognitive function. *Science*, **266**, 458-461 (1994).
- [38] Middleton FA, Strick PL: The cerebellum: an overview. *Trends in Cognitive Sciences*, **2**, 305-306 (1998). and also in *Trends in Neurosciences*, **21**, 367-368 (1998)
- [39] Nakamura K, Sakai K, Hikosaka O: Neuronal activity in medial frontal cortex during learning of sequential procedures. *J Neurophysiol*, **80**, 2671-87 (1998).
- [40] Neville H, Corina D, Bavelier D, Clark VP, Jezzard P, Prinster A, Karni A, Lalwani A, Rauschecker L, Turner R: Biological constraints and effects of experience on cortical organization for language: an fMRI study of sentence processing in English and American sign language (ASL) by deaf and hearing subjects. *Society for Neuroscience Abstracts*, **20**, 352 (1994).
- [41] Oscarsson O: Functional organization of olivary projection to the cerebellar anterior lobe. In Courville J, Montigny CD, Lamarre Y (eds) *The inferior olivary nucleus. Anatomy and physiology* Raven Press, New York, pp 279–289 (1980).
- [42] Parsons LM, Fox PT, Downs JH, Glass T, Hirsch TB, Martin CC, Jerabek PA, Lancaster L: Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*, **375**, 54-58 (1995).
- [43] Petrides M, Pandya DN: Comparative architectonic analysis of the human and the macaque frontal cortex. Boller F, Grafman J (Eds.) *Handbook of Neuropsychology* **9**, Elsevier Science B.V., 17-58 (1994).
- [44] Rizzolatti G, Arbib MA: Language within our grasp. *Trends in Neurosci.*, **21**, 188-194 (1998).
- [45] Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L: Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, **3**, 131-141 (1996a).
- [46] Rizzolatti G, Fadiga L, Matelli M, Bettinardi V, Paulesu E, Perani D, Fazio F: Localization of grasp representations in humans by PET: 1 observation versus execution. *Experimental Brain Research*, **111**, 246-252 (1996b).

- [47] Ryding E, Decety J, Sjöholm H, Stenberg G, Ingvar DH: Motor imagery activates the cerebellum regionally. A SPECT rCBF study with ^{99m}Tc -HMPAO. *Cognitive Brain Research*, **1**, 94-99 (1993).
- [48] Seidenberg MS: Language acquisition and use: learning and applying probabilistic constraints. *Science*, **275**, 1599-1603 (1997).
- [49] Shidara M, Kawano K, Gomi H, Kawato M: Inverse-dynamics model eye movement control by Purkinje cells in the cerebellum. *Nature*, **365**, 50-52 (1993).
- [50] Shinoda Y, Futami T, Mitoma H, Yokota J: Morphology of single neurones in the cerebello-rubrospinal system. *Behavioral Brain Research*, **28**, 59-64 (1988).
- [51] Strick PL, Hoover JE, Mushiake H: Evidence for “output channels” in the basal ganglia and cerebellum. Mano N, Hamada I, DeLong MR (Eds.) *Role of the Cerebellum and Basal Ganglia in Voluntary Movement*, Excerpta Medica, Tokyo. 171-180 (1993).
- [52] Stromswold K, Caplan D, Alpert N, Rauch S: Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain and Language*, **52**, 452-473 (1996).
- [53] Tamada T, Miyauchi S, Imamizu H, Yoshioka T, Kawato M: Cerebro-cerebellar functional connectivity revealed by the laterality index in tool-use learning. *NeuroReport*, **10**, 325-331 (1999).
- [54] Tani J, Nolfi S: Learning to perceive the world as articulated: an approach for hierarchical learning in sensory-motor systems, In *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, R. Pfeifer, B. Blumberg, J.A. Meyer and S.W. Wilson (Eds.), MA: MIT Press, 270-279 (1998).
- [55] Tani J, Nolfi S: Learning to perceive the world as articulated: an approach for hierarchical learning in sensory-motor systems. *Neural Networks*, in press (1999).
- [56] Tanji J, Shima K: Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead. *Nature*, **371**, 413-416 (1994).
- [57] Wolpert D, Miall C, Kawato M: Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, **2**, 338-347 (1998).
- [58] Wolpert D, Kawato M: Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, **11**, 1317-1329 (1998).
- [59] Yamamoto K, Kobayashi Y, Takemura A, Kawano K, Kawato M: Simulation studies of acquisition and adaptation of ocular following responses based on synaptic plasticity in the cerebellar cortex. in preparation (1999).