

科学

Science Journal *KAGAKU*

VOL.71 2001 別刷

岩波書店

ヒト知性の計算神経科学(第5回その2)

モザイクの拡張とコミュニケーション

前回、モザイクを強化学習と階層モザイクに拡張した。これに基づいて、シンボルの生成、他者の内部状態の推定、および他者の意図の推定によるみまね学習がなぜ実現するのか説明できる。それによって、感覚運動統合のモデルとして提案された多重順逆対モデルが、コミュニケーションの計算モデルのためのハードウェアレベルの機構を提供する道筋を示すことが可能になる。

川人光男 銅谷賢治 春野雅彦

かわと みつお どうや けんじ はるの まさひこ

ATR 先端情報科学研究部(国際電気通信基礎技術研究所), 科学技術振興事業団・創造科学推進事業・川人学習動態脳プロジェクト, ATR 先端情報科学研究部(国際電気通信基礎技術研究所), 科学技術振興事業団・戦略基礎研究・脳を創る, ATR 先端情報科学研究部(国際電気通信基礎技術研究所)

階層モザイクによる運動系列学習

春野ら⁽²⁾は、2層の階層モザイクを用いて、把持物体制御の時系列学習のシミュレーションをおこなった。これは連載第4回の図2で説明した把持物体制御のモザイク学習⁽¹⁾を基本にしている。

つまり、階層モザイクの下のレベルで、物体 p, q, r に対して三つのモジュール 1, 2, 3 を、学習で獲得する。下のレベルの責任信号が感覚入力として上のレベルの予測器に入ってくる。三つの物体を周期的に提示する二つの系列を同じ確率で、くり返し与えた。第1の系列(A): $p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow p$, 第2の系列(B): $p \rightarrow r \rightarrow q \rightarrow p \rightarrow r \rightarrow q \rightarrow p$, である。すると階層モザイクの上のレベルで、二つの系列(A), (B)に対応する二つの予測器モジュールが自律的に獲得された。つまり、下のレベルの運動プリミティブの特定の時間系列が、一つ上のレベルでは一つの予測器によって表現された。

丹治ら⁽⁹⁾は、サルに3種類の動作を特定の順番で遂行させるように訓練し、サルが記憶だけに頼ってその系列を生成できるようになった後で、補足運動野において特定の系列を生成するときだけに興奮するニューロンを発見した。上記シミュレーションはこの実験のモデル化となっている。上のレベル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、系列特異的なニューロンに対応している。

階層モザイクによるコミュニケーション信号の認知

ヒトのもつ柔軟で多彩な感覚運動変換の能力を説明するために発展させてきたモザイクを用いて、ヒトの知性の理解に迫る準備ができた。まず感覚運動変換の理論をコミュニケーションに拡張する。階層モザイクは、運動パターンを生成する機構であったが、実は、他者が生成した運動パターンを認知するのに使える。とくに、他者の脳内のどのモジュールがその運動パターンの生成に用いられたかを推定できる。ヒトとヒトのコミュニケーションは運動パターン(言語音声, 表情, 身振り手振りなど)を生成し、他者のそれを視覚, 聴覚などで認知することに依存している。次回に説明するようにコミュニケーションの計算論的な目的は、他者の脳内の状態の推定と制御することである。他者の脳内の状態推定を、コミュニケーション信号の認知の本質としてモザイクで理解しよう。

Aさんの脳内の階層モザイクが時系列信号を生成し、それをBさんの脳内の階層モザイクが認知して、Aさんの脳内の階層モザイクにおけるモジュールの切り替えを推定する(図5)。異なる階層のモジュールは、例えば音韻と単語のよう

“ヒト知性の計算神経科学”のこれまでの構成

ヒトの知性と心の問題に神経科学はどこまで迫ることができるのか。この課題に正面から取り組むには、実験動物で得られるマイクロなレベルのデータと、ヒトを対象にして脳の外側から得られる知識を統合しなければならない。その媒介をするのが計算神経科学である。このアプローチによってヒト固有(?)とされる高次認知機能がどのように解明されていくのかを全6回の連載で解説する。

第1回(2000年5月号) チョムスキーの生成文法理論を批判的に検討し、計算神経科学による新しいアプローチが必要であることを述べた。

第2回(2000年7月号) 小脳は運動制御だけでなく高次認知機能にも関与していることと、そこに

働く計算原理: 内部モデル理論を呈示した。

第3回(2000年9月号) 高次機能は小脳、大脳基底核、大脳皮質をつなぐ脳のグローバルな回路によって実現されている。それは、教師なし学習、強化学習、教師あり学習という学習アルゴリズムによって理解されるものであることを解説した。

第4回(2000年11月号) ヒト知性の計算理論の中心となる多重順逆対モデルを提案した。それは多数の並列のモジュールからなり、その中には外界の順モデルと逆モデルの対が存在している。このモデルでヒトの感覚運動統合の能力が説明できる。

第5回その1(2001年2月号) 多重順逆対モデルとそれを拡張したモザイクによって、シンボルの生成、他者の内部構造の推定、みまね学習がなぜ実現できるのかが理解できることを示した。

異なる粗さのチャンキングに対応している。図の一番下に示した時間波形は、コミュニケーション信号の例としての小鳥の歌である⁽¹⁰⁾。

この例では、音声時間波形を受け取って情報処理し、階層モザイクの複数の階層の責任信号を推定することが運動パターン時系列の認知、つまりコミュニケーション信号の認識に相当する。これは、一般的にいえば解けない問題である。つまりある力学系が時間的に変動する波形を出力しているとす。出力波形の観測だけから力学系の内部構造と内部状態を推定する問題と同じである。

この問題のクラスの中でも非常に制限された比較的やさしい問題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、観測できる信号に比べて内部構造の自由度が高く(不良設定)、観測時間が限られていれば(十分励起されない)、一般的には解けない。ヒトとヒトのコミュニケーションの場合には、送り手と受け手の間で、身体と脳、とくに階層モザイクの構造を共有することで、解けるようになる。さらに複数のモジュールによる並列計算と予測器と制御器の両者を用いた双方向計算が本質的である。

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ようである⁽⁵⁾。まず受容した他者の運動パターン x_i^0 を、自身の運動パターン x_i^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_i^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}_i^i を並列に計算する。この運動指令をそれぞれ同じモジュールの中の対となっている予測モデル FM^i に入力し、つぎの時点の運動パターン \hat{x}_{i+1} を並列に予測する。すべての予測 \hat{x}_{i+1} と実際の運動パターン x_{i+1}^M を比較し、最も予測のよ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 $\text{argmin}_i \|x_{i+1}^M - \hat{x}_{i+1}\|$ 。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。

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

この推定された責任信号を用いて同様の手続きを回帰的におこなえば、上の階層での内部状態の推定が同時におこなえる。

このようにして、純粹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おこなえる。しかし、実はこれはつまらない。本当の意味で階層モザイクの能力をフルに使えるのは、ボトムアップとトップダウンを同時に使うときである。つまり、コミュニケーション信号を生成しているときとほとんど同じ計算をさせる。違いは、上で説明したように最下層の感覚フィードバック

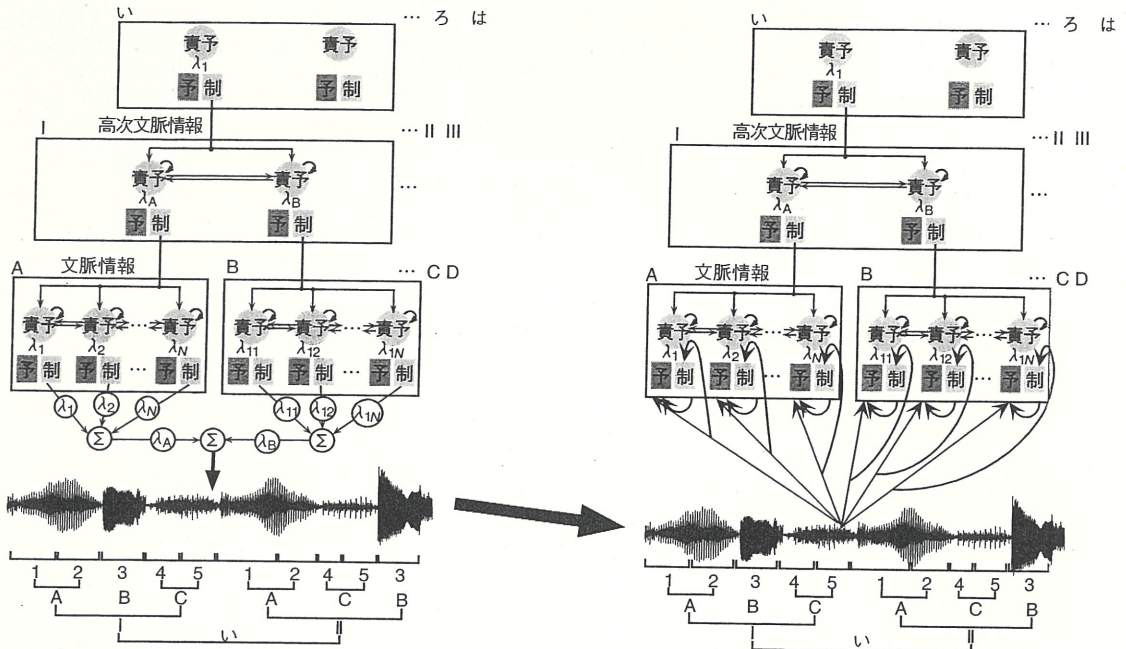


図5—階層モザイクを用いたコミュニケーション信号の認知(音声波形データは、千葉大学文学部岡ノ谷一夫研究室の提供による(星野・銅谷, 2000))。(A) Aさんの脳内の階層モザイクが時系列信号を生成する。(B)それをBさんの脳内の階層モザイクが認知して、Aさんの脳内の階層モザイクの中のモジュールの切り替えを推定する。階層モザイクの各レベルで、どのモジュールが活動するかによって、異なる波形とその組合せが生成される。対応がとれるように、モジュールと、波形の各要素に同じシンボルを割り振る。たとえば波形の左端で1,2というのは最下層のモジュール1と2がこの順番で賦活され(責任信号が1に近くなり)、それが第2のレベルではAという名前のモジュールに対応する。

を、実際の運動制御の結果得られた感覚フィードバックではなく観測した運動パターンとし、運動制御の代わりに運動のメンタルシミュレーションをするのである。

つまり、図5で、最下層の制御器、予測器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2に、予測器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3に、各予測器に入力する運動指令は、実際の運動指令ではなく、対となる制御器の出力とする。第4に、各制御器には、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5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5点の変更をおこなえば、階層的モザイクがそのまま内部状態の推定に用いられる。このモデルの特徴は、コミュニケーション信号の認知にボトムアップとトップダウンのプロセスがうまく相互作用して、他者の意図を推定できること

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自然な形で使われることなどである。

しかし、最大の魅力は、コミュニケーション信号の認知、つまり内部状態の推定、さらにいえば、階層的なシンボル列の決定を、配線さえつなぎ変えれば、階層モザイクという感覚運動制御のための神経回路だけでおこなえる点である。ここまで簡単のためにコミュニケーションをおこなう二人の人の階層モザイクつまり脳は等しいと暗に仮定してきたが、もちろんこれは間違っているし、必要でもない。ある程度似てさえいればよいし、モジュールのラベリングはまったく異なってもよい。生後発達や教育で、モジュールとシンボルの対応付けは変更可能となる。

シンボル生成とみまね

階層モザイクがもつシンボル生成とそれに基づくみまね学習の能力を、アクロバットの振り上げ

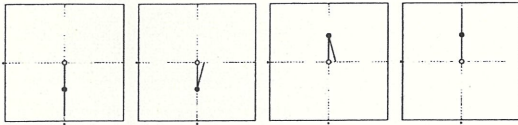


図6—アクロボットの四つの平衡状態。アクチュエーターがトルクを発生していない条件での、アクロボットのダイナミクスの四つの平衡点に対応する姿勢が示されている。白丸は手がかかっている鉄棒の位置、黒丸は腰の位置を示す。左端が垂れ下がった状態で、右端が倒立した状態。

という具体的課題で説明しよう。片桐⁽⁶⁾は図6に示した2重振り子アクロボットをMLQC型のモザイクで制御した。アクロボットとは、図6に示すように、手で鉄棒に掴まる人の身体を2リンクに単純化し、二つのリンクの間の腰に当たる部分だけにアクチュエーターを配置した体操ロボットである。MLQCにもとづいて、図6の四つの姿勢のまわりで四つの予測器と強化学習制御器の対を用意する。図7は、振り上げ倒立課題が達成されるようすをストロボショットのように示している。

図8は、制御信号に対するペナルティーの係数 R が三つの異なる値をとるときの振り上げのようすを示す。ほとんどの時点では一つのモジュールの責任信号が1に近くなっているから、図の上側に示したように一つの連続的な軌道に、賦活されたモジュールのラベルの時間系列を対応させることができる。この系列をみると、 R が0.0009から0.001にわずかに変化したときは系列も最後が少し違うだけだが、0.002になるとモジュールの切り替えの順序が質的に変化していることがわかる。力学系の理論では、連続的な状態空間を分割してそれにシンボルを割り当てることで、シンボリックダイナミクスを生成できる。

われわれの例では予測モジュールの予測のよさに基づくより高度な領域分割を用いて、平衡点から平衡点への過渡的な軌道について、シンボリックダイナミクスを拡張したことになる。われわれは連続状態空間を分割してそれに離散的なラベル

を割り当てるだけではシンボルという言葉に値しないと考えている。シンボルは脳内で表象として存在し、それが制御や予測(つまり心的操作)の対象にならなくてはいけない。階層モザイクが生成するシンボルは、責任信号とそれが表現するモジュールという意味で、上のレベルの制御と予測の対象になるから、この条件を満たしているのである。

片桐⁽⁶⁾は、アクロボットをもちいて、図5で示した方法に基づくコミュニケーション信号の認知(内部状態の推定)と、推定から得られた責任信号に基づくみまね学習をおこなった。生徒の運動はみまねの結果、図9に示すように、みまねなしでおこなった運動パターンとはまったく異なり、シンボル系列に関しても、軌道そのものについても先生の手本に圧倒的に近くなった。

つまり先生の頭の中の状態を推定することで、みまね学習をうまくおこなえた。みまね学習において、先生と生徒の身体、環境、運動制御能力がまったく同一ということはおこりえない。すると、運動パターンをただまねるだけという戦略はうまくいかないの、ある意味での先生の運動意図を推測し、それを自分にあったように修飾して運動しなければならない。簡単な例題ではあるが、階層モザイクによるコミュニケーション信号の認知に基づいて、これがおこなえたのである。

認知科学と神経科学

階層モザイクを用いたコミュニケーション信号の認知は、心理学や神経科学の仮説やデータとも深いかかわりをもっている。いわゆる音声認知の運動指令説では、ヒトが言語音声をうまく認知できるのは、運動制御の神経回路を用いて、音声入力を言語生成のために用いられる表現に変換しているからだと考える⁽¹¹⁾。階層モザイクによるコ

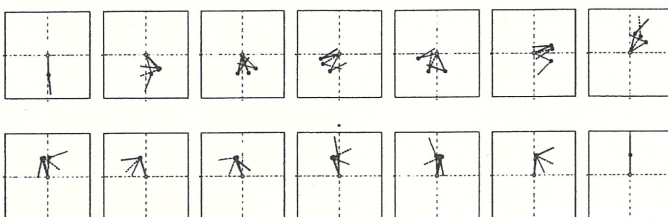


図7—アクロボット振り上げのストロボショット。モザイクのモジュールが、複雑な時間系列で切り替えられることによって、振り上げ倒立課題が達成される。枠の中では、細い実線、点線、太い実線の順に時間が進む。左上の枠から右下の枠に時間が進む。

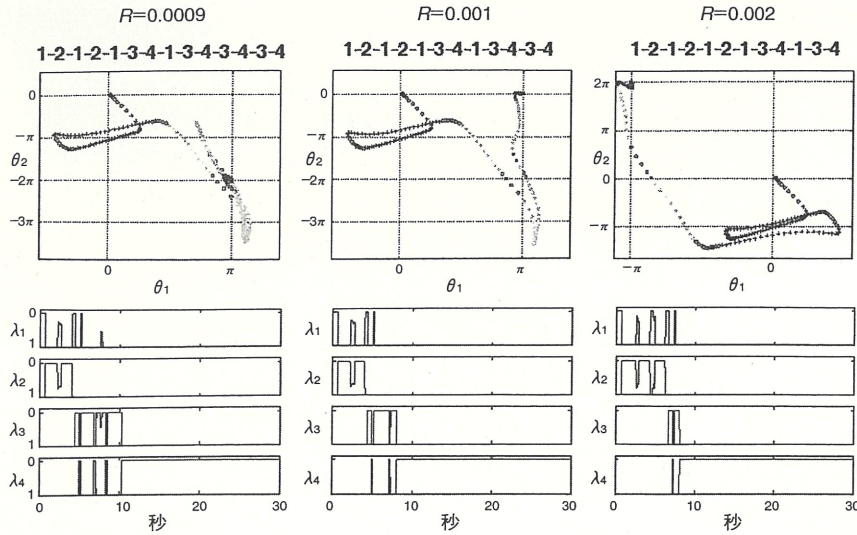


図8—モザイクを用いた運動系列のシンボル化。Rが三つの異なる値をとるときに、振り上げの軌道を第1関節と第2関節の角度(それぞれ θ_1, θ_2)で表わしたものの(上図)と四つのモジュールの責任信号の時間変化(下図)を示したものである。上図で各点の一つの点の形はどのモジュールが使われているかに対応している。

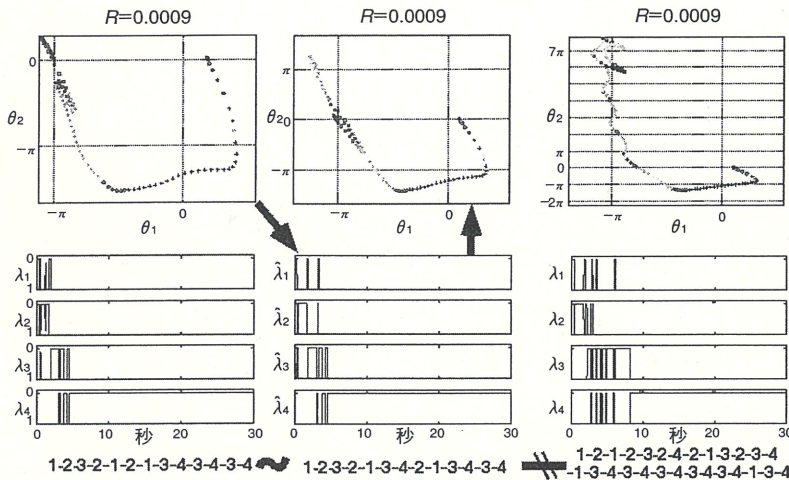


図9—モザイクを用いたシンボルの推定によるみまね。左端の例に示した先生と右端の列に示した生徒では、振り上げの軌道が違っただけでなく一番下に示したシンボル系列がまったく異なっている。教師の運動パターンを生徒のモザイクで認知し、責任信号を推定した結果が、中列下に示してある。この推定した責任信号が、責任信号予測器から出力される責任信号推定値だと考えて、つまりベイズ推定の事前確率だととして、生徒が振り上げをおこなった結果が、中列上に示してある。

コミュニケーション信号の認知は、この概念的な仮説に強力な計算論的機構を与えるだけでなく、コミュニケーション全体を理解するものへと仮説を一般化させている。

Rizzolattiらは、ヒトのブローカ野と相同なマカクサル腹側運動前野にミラーニューロンを発見した⁽¹²⁾。サルが特定の運動をおこなったときだけでなく、人や他のサルが同じ運動をするのを視覚的に認知するときにも興奮するニューロンのことである。コミュニケーション信号の認知につかわれる階層モザイクは、ミラーニューロンのモデルも与えていることになる。

第5回では、モザイクの強化学習と階層化へ

の拡張を説明し、それがコミュニケーションのもっとも基本問題である他者の脳の内部構造の推定に使えることを示した。次回連載最終第6回では、いよいよヒトの知性全体の問題について、これまでの計算論の成果を用いて理解するアプローチを紹介する。

文献((1)~(8)は前回と同じ)

- (9) J. Tanji & K. Shima: Nature, 371, 413(1994)
- (10) 星野力・銅谷賢治: 電子情報通信学会技術研究報告, NC99-108, 117(2000)
- (11) A. M. Liberman and I. G. Mattingly: Cognition, 21, 1(1985)
- (12) 小嶋祥三: 科学, 69, 404(1999)