

## 特集

## 1. 人間の感覚系と運動系—その工学的表現と応用—

位置感覚と視覚の統合による  
感覚運動制御

前田 太郎

前田太郎：正員 東京大学先端科学技術研究センター

Sensory Integration for Visual and Haptic Space Perception and Sensory Motor Control Based on Scalar Learning Rule. By Taro MAEDA, Member (Research Center for Advanced Science and Technology The University of Tokyo, Tokyo, 153)

## ABSTRACT

一般に人間の空間知覚は物理空間に対して褶曲しており、これは異種感覚間の統合においても同様である。この現象を感覚量間の変換を学習する人間の信号処理の特徴としてとらえ、神経回路網における生理的制約を仮定したスカラ学習則と、それに基づく構造を持った神経回路網モデルとしてスカラ加算モデルを提案する。同モデルは両眼視覚と上肢先端の位置感覚に関して学習の結果、人間と同様の特性を示した。これらのモデルの構造について考察することにより人間の感覚統合の過程における信号処理の特徴についていくつかの新たな知見が得られた。

キーワード：感覚統合、両眼視、上肢位置感覚、神経回路、生体モデル

## 1. 人間の空間知覚

「物をまっすぐに見る」といえばものごとを偏見なく見ることの比喩的表現であるが、実のところ、人間の目というものは素直に見れば見るほど物がまっすぐに見えないものである。

もちろんこれは、比喩的意味ではなく、心理物理的な現象としてのことである。人の目に物がまっすぐに見えていないという事実にはわかには信じがたいことであるが、こうした現象は中でも奥行視を含んだ直線の知覚について明確に現れる。

その代表的なものがHelmholtzのホロプタとよばれる現象である。図1のように目の高さの水平面上にある視標を額に平行な物理的な直線上に並べると、一般に被験者はこれを曲線上にあると感じる。この際の見かけの直線の形状は奥行距離によって異なり、被験者ごとに特定の距離ではほぼ物理的直線に一致し、近傍で被験者に対して凹型に、遠方で凸型となる<sup>(1)</sup>。これと同様に正中面に対して見かけ上平行な点の軌跡としての平行アレイ<sup>(2)</sup>、等距離な点の軌跡とし

ての距離アレイ<sup>(3)</sup>が古くから知られており、それぞれに物理的直線とは異なった軌跡を示す。また、触空間についてもこれと同様の研究がなされており、視空間の場合と同様、見かけの直線は物理的直線とは異なり、観察者に対して凹型の曲線を描く<sup>(4)</sup>。

こうした各種感覚器からの感覚量に物理空間からのずれが発生している以上、これらの異なる感覚による感覚量を統合した場合、同一の物理量に対する対応をとろうとすると各感覚間で食い違いがでることが予測される。実際にこの食い違いが発生する現象は心理学の分野におい

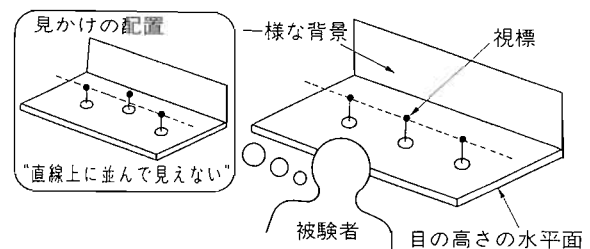


図1 Helmholtzのホロプタ この実験条件下では直線上に並んだ視標は被験者からは直線上にあるように見えない。見かけの直線は被験者に対して近傍で凹型、遠方で凸型に湾曲する。

てよく知られており、視覚的に与えられたターゲットに手を延ばす課題において、上肢の自己受容感覚によって知覚される手の到達位置が対応するターゲットに対して常にアンダーシュートすることが実験によって確かめられている<sup>15)</sup>。

これらの現象はいずれの場合も個人差はあっても一般的にそれぞれの現象において万人に共通なずれの傾向を示している。人間の位置知覚は何故このようなずれを持っているのであろうか。従来の心理学的研究においては、これらの現象の発生のメカニズムについての系統だった議論はなされてこなかった。こうした心理物理的な現象の機序を求める場合、これを各種の感覚を統合して知覚を形成する人間の信号処理のメカニズムの特性であると考え、生理学的知見から得られる関連部位の神経回路の信号処理の特性として現象をモデル化することで説明しようとする考え方がある。こうした観点から、脳のメカニズムを解明するための構成的研究としてニューラルネットワークモデルを用いたさまざまな研究が行われている。空間位置知覚に関するこれらの現象に関しても、神経回路による信号処理の観点からそれらを統一的に記述できるモデルを考えていくことができる。

## 2. 生体における感覚統合<sup>16)</sup>の意義

以上のように人間の空間知覚における主観的空間は多くの場合、実際の物理空間と厳密には一致せず、一定のずれが存在する。その一方、人間の信号処理の特性において特徴的ともいえるのは、こうした感覚間統合が知覚においては不可避であるという点である。この端的な例は姿勢の変化による線分の傾きの知覚にみられる。完全暗室中において体ごと横に傾けられた被験者に対して視覚的に正中面を提示する場合、その主観的正中面は客観的正中面に対して常に過剰に傾くことが知られている。このとき、客観的正中面を観察する被験者の網膜上には常に同じ視覚刺激が提示されているにもかかわらず、被験者はそれを同じ正中面として知覚する

ことができない。すなわち、傾きの認識においては、姿勢の情報を排した視覚のみによる認識を行うことはできないということになる。ここで知覚される傾きという感覚量は姿勢と不可分のものとして獲得されているのである。この理由として考えられることとしては、実際に人間が知覚を行うに際しては、線分の多くが静止系のなかにあり、それに対して人間が姿勢を変化させるという状況が支配的であることである。これらの静止している線分が普遍的な傾きを持つ、すなわち静止しているという認識を維持するためには姿勢の変化につれて動いてしまう視覚のみによる傾きの知覚はむしろ障害となる。眼球が前庭動眼反射<sup>17)</sup>によって頭部の運動の影響による網膜像の運動を抑制するように、自分の姿勢の変化によって空間知覚における世界像が揺らがないような抑制をかけることが知覚上必要である。この一環として傾きは姿勢と不可分な量として知覚されているものと考えられる。

更に、これらの統合関係は必ずしも固定的なものではないことは、反転眼鏡等の実験における順応を考えれば明らかである。反転眼鏡の装着時には視覚上のみかけの傾きは頭部の傾きにつれて通常とは逆方向に傾いていくことになる。順応によって世界像が揺らがなくなるということは傾きの知覚が通常とは全く逆の抑制によって成立するようになったということである。

感覚の統合においては一般にこれらの傾向、すなわち定常的に成立する感覚信号の関係を学習によって獲得し、信号間の整合性をとることによって外界の変化として知覚すべき要素のみを抽出し、世界像を安定に保つ傾向がみられる。そして、これらの関係とは独立な変化として認識されるものにもみ注意を向けることによって必要最小限の情報処理で世界像を更新することが可能となる。この情報処理の最適化機構の獲得こそが生体における感覚統合の効果であろう。反転眼鏡等によって、この統合を実現する感覚間の関係の整合性が崩れたとき、人間は違和感を知覚する。この違和感は、感覚間の関係

の変化を意味するものであり、順応によって新しい感覚間の関係を獲得するにつれて減少することになる。

### 3. 知覚の形成過程のモデル化

一般に生体における知覚の形成過程はおおむね図2のような信号の流れによるものと考えられる。すなわち、物理的な位置の情報が感覚器によってとらえられて生体内での感覚情報となる。しかし、その情報は、実際には左右眼球の向きであったり、上肢の各関節角であったりする。このために、「複数の注視点が同一直線上にあるか」、もしくは「正中面から等距離にあるか」といった知覚上の判断を下すためには、人間は複数の感覚器からの信号を統合してこうした評価を可能にする尺度に変換する信号処理の機構を生体内に持たなければならない。こうした判断に要求される直線や平行、等距離といった直交座標系の概念は後天的に獲得されるものであり、従って、この変換機構もまた後天的な学習によって形成されるものと考えられる。

また同様に、「注視点と上肢の先端は同一位置にあるか」といった異種感覚間の統合によって判断を下す場合も、生体が生得的な個体差や個体の成長に伴う生体の各種パラメータの変化

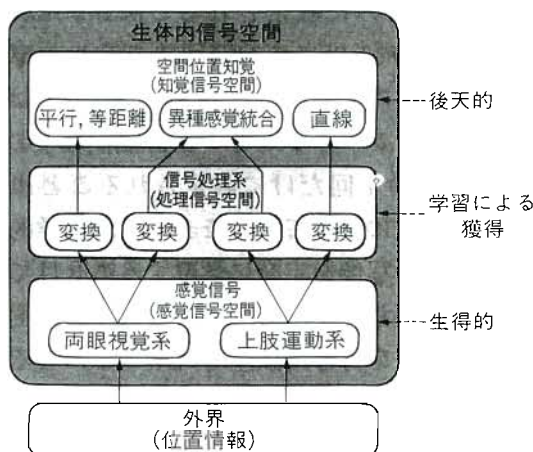


図2 生体内における位置感覚情報の流れ 両眼注視状態での眼球運動による視覚的位置情報と上肢運動による自己受容感覚的位置情報の流れについて示したもの。3次元情報である各感覚信号は信号処理系で統合処理されそれぞれ特定のスカラ量として知覚される。

に適応するために何らかの学習の機構を持つ必要がある。こうした学習機能に関しては、反転眼鏡等による適応実験に代表される残効現象などについて多くの研究がなされており、その存在と可塑性については実証されている。従って、この異種感覚間の統合のための変換機構もまた後天的な学習によって形成されるものと考えられる。

従って、生理的手掛かりとなる感覚信号から何らかの変換によって知覚されるこれらの感覚量の生成機構には学習機能があり、各空間位置知覚現象にみられる物理空間と知覚空間のずれは、その学習機能における制約の現れであると考えられる。更にその傾向が万人に共通であることから、脳内における感覚の信号処理過程において万人に共通な何らかの先天的な構造が、この制約となって現れるのだと考えられる。そこで、これらの現象を統一的に記述できる神経回路モデルを考える場合、自然な構造を先天的に持ち、その構造によって学習機能が制約されるようなモデルが望ましいことになる。

### 4. スカラ加算モデル

感覚情報の処理という視点からみれば、一般に（強弱や大小といった）単一の尺度を持つ感覚量を生成する過程においては、その感覚量の尺度に対応する単一のスカラ量を等価的に生成する必要がある。よって、位置の感覚量を生成する機構のモデルを考える場合、モデルの学習機構はこのスカラ量が特定の外界の物理量に対して一貫性を持って対応するように学習を行うことになる。

以上の前提のもとに先述の学習過程上の制約として我々が想定した制約は「単一の出力から得られた単一の誤差情報はその信号を出力した神経細胞の入力荷重のみを変化させほかに伝搬することはない」というものである（図3）。すなわち、これは神経回路の学習機構として出力誤差として得られたスカラ量を教師信号とし、それによって結合荷重を変化させる結合層を1層だけ持つ構造を想定したことになる。こ

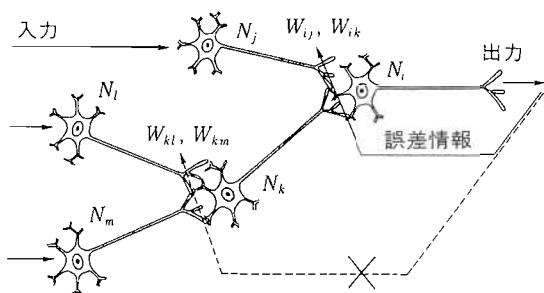


図3 学習過程における生理的制約の仮定 この仮定は「単一の出力から得られた単一の誤差情報はその信号を出力した神経細胞の人力荷重のみを変化させほかに伝搬することはない」というものである。生理学的に存在が確実視されている Hebb 学習や共分散学習などはこの制約の範疇に入る。神経回路モデルにこの制約を設けた学習を行せることをスカラ学習則と名付ける。

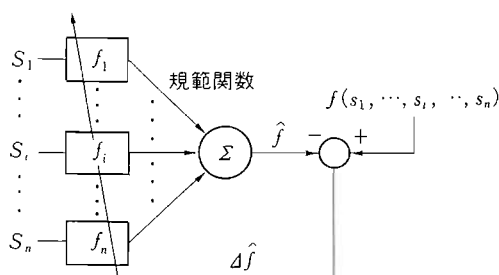


図4 スカラ加算モデル スカラ学習則に基づく多入力1出力型の神経回路網モデル。独立スカラ学習要素加算モデルの略称である。各スカラ学習要素が任意の非線形連続スカラ関数を学習できる点を除けば、学習の構造はほぼ単純パーセプトロンに近い。生理学的に既知の神経活動によって構成可能な構造を持つ。

のような構造は脳内において生理学的にも発見されており、信号処理上の制約としては最も基本的で自然な制約であると考えられる。学習に際してこの制約を与えた学習規則をスカラ学習則と名付ける。次にこの学習則に基づいて学習を行うモデルとしてスカラ加算モデルを提案する。その構造を図4に示す。

すなわち、このモデルに与えられた信号処理上の制約とは、 $n$  個の独立なスカラ信号  $s_1, s_2, \dots, s_n$  を統合処理して特定の別なスカラ信号  $\hat{f}$  を得る必要があるとき、これを学習によって獲得する際に用いることのできる信号処理の構造は、各単一のスカラ信号によって決定される関数の線形和の形に限定されるというものである。

$$\hat{f}(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n) = \sum_{i=1}^n \hat{f}_i(s_i) + C \quad (1)$$

ここで、 $\hat{f}(s_i)$  は学習によって獲得される  $s_i$  の非線形連続スカラ関数であり、入力の各スカラ信号ごとに独立である。このとき  $\hat{f}_i(s_i)$  を学習するための教師信号  $\Delta \hat{f}_i$  は、式(1)と信号の相関関係から、次式の形で得られることになる。

$$\Delta \hat{f}_i = \Delta \hat{f} \equiv f - \hat{f} \quad (2)$$

この学習構造はまた、神経回路モデルとしても前述の神経系の構造上の制約内で、生理学的に一般的な反応選択性を持った感覚細胞をもとに構成することができる<sup>(6)(7)</sup>。このとき神経回路モデルにおける学習の結果として得られる各  $\hat{f}_i(s_i)$  は信号  $s_i$  のみを入力とする独立なスカラ関数である。よって学習回数  $t$  が大きくなるにつれて  $\hat{f}_i(s_i)$  は他の入力信号の変化による教師信号  $\Delta \hat{f}_i$  の変動についてはその平均値を出力するようになり、この結果、 $\hat{f}_i(x)$  の値は  $s_i = x$  であるときの学習領域における規範関数  $f$  の期待値に収束する。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{f}_i(x) = E_{s_i=x}(f(s_1, s_2, \dots, s_i)) \quad (3)$$

このモデルが生体の信号処理に対して与える制約の本質は入力信号間のインタラクションの制限である。入力信号間のインタラクションが線形加算的なものに限定されるのは McCulloch & Pitts のモデル以来の神経回路モデルの原則であるが、このスカラ加算モデルにおいては、その加算的インタラクションが評価関数  $f$  の信号空間上での1回だけに限定されることになる。この制限によってこのモデルは、数学的にみれば任意の写像を完全に学習することはできなくなっており、学習後も入出力信号間の関係に特有の傾向を持った誤差を残すことになる。純粋に計算論的な観点からみれば、むしろバックプロパゲーション法のように生理学的な不自然さを無視してこの制約をはずせば、こうしたインタラクションを複数回行うことによって任意の写像を学習することが可能である。しかし、そうしたモデルはその生理学的な不自然さばかり

りではなく、その計算論的な万能さゆえに生体の持つ普遍的なずれの傾向を説明する神経回路のモデルとしては適さない。

このスカラ加算モデルに、入力として感覚情報を、規範関数 $f$ として獲得すべき感覚量を与えて学習させたところ、ホロプタ、平行アレイ、距離アレイについて、人間と同様の傾向を示し<sup>(7)</sup>、視覚性到達運動においても、人間と同様にアンダシュートを示した<sup>(8)</sup>。

## 5. 生体の信号処理の並列性と直接性 ——中間表現の不在——

スカラ加算モデルの場合、学習は単層パーセプトロンと同様の直交学習によって達成でき、バックプロパゲーション等において最も不自然な中間層細胞における信号形態の算出についての議論は不要である。このモデルは計算論的にみれば、任意の非線形対応関係を学習するには不十分で特定の誤差を残すものであるが、そこに現れる誤差の傾向は、人間の空間知覚において定常的に現れる各種感覚における空間位置知覚のずれの傾向を説明するものとなっており、人間の空間知覚形成における感覚統合過程における一般的な信号処理形態のモデルとして適したものであると考えることができる。

このモデルの構造が反映している生体の信号処理の特徴として、信号処理の並列性と直接性（中間表現の不在）という点が挙げられるであろう。すなわち視空間の構成を例にとるならば、等距離の概念を平行の概念の上に構築する、もしくはその逆といった処理法がとられず、平行は平行、等距離は等距離として独立に処理系が学習され、それぞれの目的の信号変換を獲得しているという点である。人間がもし前者の直列的な信号処理の方法をとっていれば、一方を他方の中間表現とすることによって、物理空間とのずれはあっても平行と等距離の概念の間に明確な差が存在することはないわけである。

生体の観点からはこのような並列型の処理法を用いた感覚統合の利点はいくつか考えられる。一つには高速性である。心理学における多

くの実験や考察においては考慮すべきパラメータを限定するためにさまざまな工夫がなされているが、実際に人間が活動する条件下において統合される必要があるパラメータは極めて多い。前述の視覚的垂直線の知覚においてさえも、影響する感覚情報としては、網膜像、眼球運動、前庭器官、首・体幹および脚部の運動感覚、全身の血流および重量感に関する体性感覚までもが含まれる。感覚の統合は安定した知覚成立のための前提条件でもあり、生体の活動においてはリアルタイムに処理されることが大前提となる。直列型の処理を行えば、考慮すべきパラメータの数が増えるにつれて処理に要する時間も増加することになる。今一つには関与するパラメータの同定が不完全な場合における学習の容易さである。並列型であることによって、パラメータが完全に同定しきれない条件下においてもその段階で最も相関の高い信号から近似した出力を得ておき、学習の進行につれて他のパラメータにより逐次的に近似度を高めていくことができる。これらは論理的な整合性によって導かれる工学的な信号処理の観点とは異なり、生存競争にかかわる生物特有の必要性に基づいた構造であると考えられる。今後こうした観点は生体の機能的解明という研究分野を学問的に確立するにあたって共通に必要とされることになるだろう。

## 文 献

- (1) Helmholtz H.V. "Treatise on Psychological Optics", Optical Society of America, 3, pp.482- (1925).
- (2) Hillebrand F. : "Denkschr. Akad. Wiss. Wien" math.-nat. Kl. 72, pp.255-(1902).
- (3) Blumenfeld W. : "Zeits. f.", Pysiol. d.Sinner-sorgane, 65, pp.241- (1913).
- (4) Siemsen G. "Experimentelle Untersuchungen uber die taktil-motorische Gerade", Psychologische Foreschung, 19 pp.61-101 (1934).
- (5) Plablanc C., Echalliar J.F., Konilhs E. and Jeannerod M. : "Optimal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target", Biol. Cybern., 35, pp.113-124 (1979).
- (6) Kuperstein M. : "Adaptive Visual-Motor Coordination in Multijoint Robots Using Parallel Architecture", Proceedings 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, CH2413-

- 3/87/0000. pp.1595-1620 (1987).
- (7) 前田太郎, 舘 暲: "ホロボタを生じる空間知覚モデル", 計測自動制御学会論文集, 25, 10, pp.1111-1118 (1989).
- (8) 前田太郎, 舘 暲: "視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合", 計測自動制御学会論文集, 29, 2, pp.201-210 (1993).



まえだ たろう  
前田 太郎 (正員)

昭62東大・工・計数卒。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て、平4-09より東大先端科学技術研究センター助手。人間の知覚特性とモデル化、神経回路網モデル、マン・マシンインタフェース、トレイグジスタンスなどの研究に従事。平2計測自動制御学会論文賞、平3日本ロボット学会技術賞受賞。

### 用語解説

感覚統合 (sensory integration) 異種の感覚器からの信号に対して信号間の整合をとる過程 (備考: センサフュージョン)。

通常、生体においては複数の異なる感覚器が同時に機能しており、異なる感覚によるさまざまな情報がとらえられている。これらの感覚信号において常に一定の関係を持つものについては信号間の整合性が定義できるが、この感覚間の整合をとる過程を感覚統合という。この統合の過程において整合が破られた状態が生じた場合、これは違和感として知覚される。こうした統合の過程には可塑性があり、反転眼鏡などの装着によって生じた違和感が、その状態を続けることによって減少していき、むしろ正常な感覚状態に違和感を生じるといった、残効現象も生じる。

前庭動眼反射 (vestibulo-ocular reflex) 前庭器官における半器官に由来する角加速度刺激によって頭部運動に際して視野を固定するような方向に眼球を運動させる反射 (備考: 前庭器官, 反射)。

前庭器官における半器官に由来する角加速度刺激によって生じる反射で、頭部運動に際して視野を固定するような方向に眼球を運動させる。非常に基本的で起源の古い反射とされており、その神経機構については詳細な研究がなされている。また、反転眼鏡等の心理物理実験における残効によってその反射系のゲインが変化することが知られており、その適応系についてはさまざまなモデルが提案されている。