

触知覚における感覚統合と能動的認識

阪口 豊

阪口 豊：正員 東京大学工学部計数工学科

Sensory Integration and Active Perception in Haptics. By Yutaka SAKAGUCHI, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo, 113).

ABSTRACT

人間は、さまざまな感覚受容器からの情報を統合すると共に、それらのなかから必要な情報を能動的に選択することによって、限られた資源の下で効率的な感覚情報処理を実現している。

本稿では、このような人間に特徴的な感覚情報処理の意味について工学的な視点から考察し、その過程が情報量基準に基づく逐次実験計画としてモデル化できることを述べる。また、具体的題材として触知覚過程を取り上げ、数種のセンサ情報を統合して対象の材質を識別する能動的認識システムを構成した例を紹介する。

キーワード：触知覚，感覚統合，能動的認識，逐次実験計画，Bayes 推定，注意

1. はじめに

人間の脳は、多数の神経細胞による並列情報処理、豊かな学習能力、柔軟な思考能力など、情報処理機械として魅力的な特徴を有しており、生理学者、心理学者のみならず、多くの工学者の関心を引きつけてきた。本稿では、このような知能のメカニズムについて、感覚統合と能動的認識という切り口から論じてみたい。

感覚統合とは、一言でいえば、さまざまな感覚受容器からの情報を統合して、対象を理解することである。一方、能動的認識とは、情報を受動的に受け取るだけでなく、必要な情報を積極的に獲得することによって、対象を効率的に認識することをいう。

これらは、生物が、限られた資源を用いて自分の置かれた状況をすばやく把握するため、進化の過程を経て獲得してきたメカニズムであると考えられる。また、近年、このような生体情報処理の特徴を工学的に応用しようとする研究も始められている⁽²⁾。

以下では、まず、感覚統合や能動的認識が感

覚情報処理においてどのような役割を担っているかについて考え、その原理が逐次実験計画としてモデル化できることを述べる。続いて、構成したモデルを触知覚過程に適用し、数種のセンサ情報を統合して対象材質を識別する能動的認識システムを試作した例を紹介する。

2. 感覚統合と能動的認識

人間は、眼や耳をはじめ、口、鼻、皮膚、筋肉、関節、前庭器官など、からだ中に分布した感覚受容器からの情報を統合することによって自分自身、そして自分の周囲の状況を把握している。更に、眼を動かしたり、からだを動かしたりするなど、一つの感覚器をさまざまな形で利用することによって、生物的制約の下で自身のもつ感覚資源を最大限に活用している。

これら多種多様な感覚情報が、頭の中で一つの像（以下内部像とよぶ）として結像するためには、脳の中にこれらの情報間の関係を記述し、また、それらを統合するメカニズムが存在しなければならない。これが感覚統合の本質である。

しかし、実際にこれらの情報を統合して内部像を構成する際に問題となるのは、それらをすべて処理するわけにはいかないことである。

脳は、受容器を介して絶えず外界から情報を受け取っているとはいえ、それらをすべて同時に処理するだけの能力はおそらくもっていないであろう（また、それらをすべて処理する必要もないであろう）。実際、「眼には入っているのに見えていない」といった現象が起るのは、脳が感覚器でとらえた情報を必ずしも処理していないことの傍証になっている。

また、一つの感覚器をさまざまな形で利用できる場合においては、それをどのようにして使うかが問題になる。無為に感覚器を動かしたり、いくつもある「使い方」をすべて試したりしていたのでは、欲しい情報を手に入れるまでに無用な手間がかかってしまう。

脳は、このように到底調べつくすことのできない無数の「情報源」を前にして、対象の内部像を構成しなければならない。そのためには、何らかの基準に従って感覚情報を選択する必要がある。この選択の基準は、「意図」⁽²⁾とその時点での内部像によって定まるものと考えられる。なぜならば、情報が有用であるかどうかは、そのとき何を知りたいか、そして対象に関してどれだけわかっているかに依存して定まるからである。

能動的認識とは、このように意図や内部像に応じて有用な情報源を選択しつつ、認識動作を進めることであるといえる。脳は、この戦略の下で、取り込む情報を処理できる範囲に抑え、また、有用な情報をもたらすと思われる観測だけを選択的に行うことによって、対象の内部像を組み立てていくのである。

以上の考察から、能動的認識は感覚統合の上に成り立つメカニズムであり、逆に、感覚統合は能動的認識の下で有効に機能するメカニズムであることがわかる。つまり、これら二つが一体となってはじめて、種々の感覚情報を生かしつつ効率よく対象を認識するという知能的な感覚情報処理が実現されるのである。

さて、内部像の構成過程においては「知識」もまた重要な役割を果たす。すなわち、脳は、過去の経験から得た知識に基づいて予測を行うことによって、感覚情報にすべて頼らずとも内部像の形成を進めることができる（この過程は、感覚情報だけでは内部像が一意に定まらないときに、知識を制約条件として内部像を絞り込むという意味でも重要である）。

このように、知識は、内部像を形成する上で、感覚情報とは独立した一種の情報源として働く。更に、知識は内部像の形成を通じて情報源の選択にも影響を及ぼす。実際、経験を積むにつれて見る場所が変化していくことは日ごろよく経験することである。「専門家は眼のつけどころが違う」といったことは、まさに能動的認識の所産であるといえるだろう。

以上で述べてきた過程を模式的に表したものが図1である（この図には、一つのセンサを多目的に使う場合が表現されていないが、図中の各感覚器をそれぞれ一つの「観測方法」とみなすことによってそのような場合も包含すると考えて頂きたい）。次節では、この過程を具体的なモデルとして定式化する。

3. 感覚統合と能動的認識の数理モデル

さて、このような高次の感覚情報処理をモデル化するには、人工知能も神経回路モデルも「帯に短し、たすきに長し」の感が否めない。ここでは、情報理論、制御理論といった工学理論をベースにして、その原理モデルを構成することにする⁽³⁾（このようなアプローチは、生体モデルから遠のいたようにも思えるが、サイバネティックスの原点に戻ったともいえるだろう）。

まず、内部状態空間として、考えられる対象からなる集合を考え、各要素 m に対してそれぞれ確率 $\pi(m)$ を与える。この確率分布は、対象が何であるらしいか表すものであり、上述の「内部像」に相当する。また、各対象について、観測 s によって信号 y_s が得られる条件付き確率 $p_s(y_s|m)$ を考える。条件付き確率の値は、あらかじめ与えられているとする。

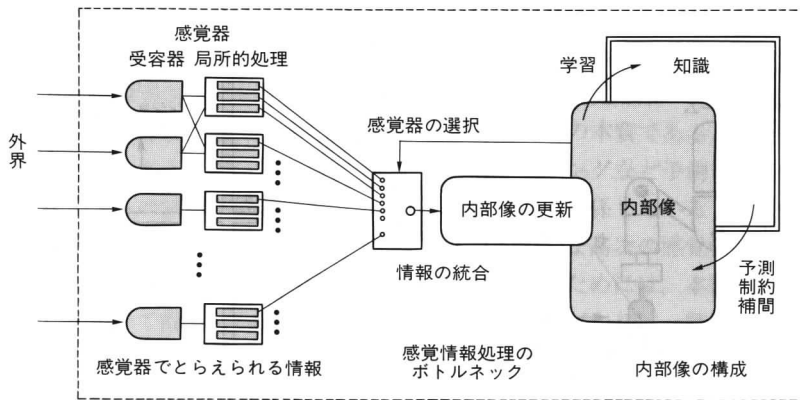


図1 感覚統合と能動的認識の枠組み 人間は、感覚器に入ってくる種々の情報の中から必要な情報を取捨選択しつつ統合することによって、対象の内部像を形成する。また、過去の経験を通じて獲得した知識も内部像の形成に影響を及ぼす。

いま、観測 s により信号 y_s を観測したとすると、Bayes の定理によって観測後の確率分布を計算することができる。

$$\pi_{t+1}(m) = \frac{p_s(y_s|m)}{\sum_k p_s(y_s|k)} \pi_t(m)$$

ここで、 $\pi_t(m)$ は t 回観測後の対象 m に対する確率を表す。

この式に従って、観測ごとに内部状態空間の確率分布を更新することによって、各観測で得られた情報を逐次的に統合することができる。このように、感覚統合の過程は Bayes 推定として定式化することができる。

次に、認識の進み方を表す量として、内部状態空間のエントロピーを考える。エントロピーは、対象が何であるかに関するあいまいさを表すので、エントロピーが小さいほど、認識が進んでいると考えることができる。

対象が何であるかの判断を早く下すためには、観測後の状態空間のエントロピーがなるべく小さくなるような観測を選択するのが得策である。観測 s によるエントロピー減少量の期待値は、内部状態空間と観測 s の信号空間との相互情報量

$$I_t(s) = \sum_m \pi_t(m) \sum_{y_s} p_s(y_s|m) \log \frac{p_s(y_s|m)}{\sum_k p_s(y_s|k)} \pi_t(k)$$

で与えられることから⁽⁴⁾、各時点で相互情報量 $I_t(s)$ の大きな情報源 s を選択することにより、少ない観測回数で対象を識別できることが予想される。相互情報量は、内部状態空間の確率分布に依存して定まるので、選択される観測は「内部像」に依存して定まることになる。また、初期確率分布 $\pi_0(m)$ に知識や文脈を反映させることで、それらに依存した観測を実現することもできる。

このように、能動的認識の過程は、情報量基準に基づく逐次実験計画として定式化することができる。

なお、このモデルは、カルマンフィルタの考え方と組み合わせることによって、時間的に変化する対象（例えば運動する物体）を認識する場合などに拡張することもできる。

4. 触知覚識別システムへの応用

さて、人間の触知覚^{触覚}は、皮膚の機械受容器や筋紡錘、温・冷線維など種々の受容器からの情報が統合されて得られる感覚である⁽⁵⁾。また、人間は、対象の性質を触覚によって知ろうとするとき、押す、こするといったさまざまな触運動を巧みに使い分けている⁽⁶⁾。このような点で、触知覚過程は、まさに感覚統合と能動的認識の場であるといえる。

このような触知覚過程を模擬するため、筆者

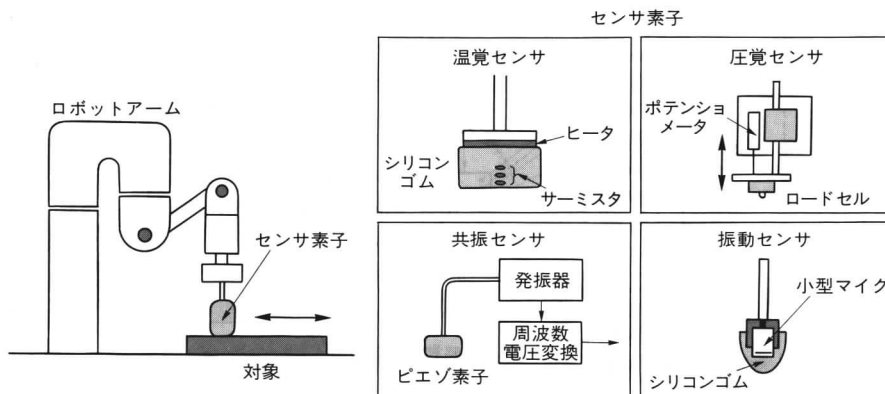


図2 触知覚認識システムの構成 4種類のセンサを用いて対象をさわりながら、対象の材質を識別するシステムを試作した。各センサは、触れる、押す、こするといった触運動にそれぞれ対応しており、これらのセンサの中から逐次適切なセンサを選択し、それらの情報を統合することによって判断を下す。

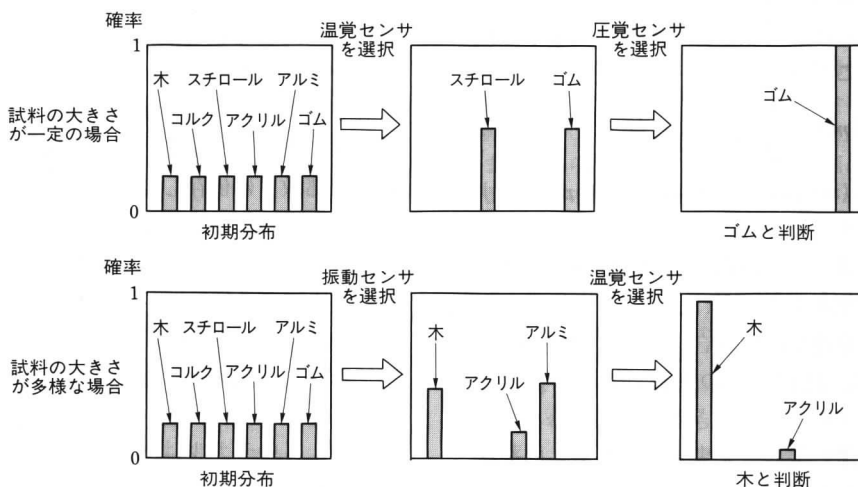


図3 触知覚認識過程の例 図2のシステムを用いて、6種類の材質を識別する実験を行った結果の一例である。棒グラフは各対象に対する確率を表している。本文中のアルゴリズムを用いた結果、逐次適切なセンサが選択され、正しい識別結果が得られた。このように、識別タスクの内容と各時点での内部状態に応じて観測行為が変化する点に能動的認識の特徴が表れている。

らは、数種のセンサ情報を統合し能動的認識アルゴリズムを用いて対象の材質を識別するシステムを試作した^{(7),(8)}。

図2にシステムの構成と各センサ素子の構造を示す。温覚センサは対象に触れた瞬間の熱の移動を、圧覚センサは対象の弾性を、共振センサは対象の共振特性を、振動センサは対象表面の凹凸をとらえるようになっており、それぞれ、触れる、押す、こするといった人間の触運

動に対応している。また、計測に際して、接触圧やこする速度が選択できるように作られている。

識別を行う際には、前節で述べたアルゴリズムに基づき、逐次センサを選択し内部状態空間の確率分布を更新する。そして、内部状態空間のエントロピーが一定値以下になったときに最大確率を示したものを識別結果とする。

図3に認識過程の一例を示す。これは、与え

られた試料の材質が、アルミニウム、アクリル樹脂、木材、発泡スチロール、コルク、合成ゴムのいずれであるかを識別させたときの実験結果であり、棒グラフは各対象に対する確率を表している。上段は試料の大きさが一定の場合、下段はいろいろな大きさの試料が混じっている場合の結果である。

試料の大きさが一定の場合、まず温覚センサが選択され、これを用いて計測した結果、候補はゴムとアクリルに絞られた。続いて圧覚センサを用いた結果、ゴムであるという結論が得られた。これに対し、試料の大きさが多様である場合には、初期状態で振動センサが、続いて温覚センサが選択され、木であるという結論が得られた。このように、識別タスクや内部状態に応じて選択されるセンサが異なる点に能動的認識の特徴が現れている。また、上述のアルゴリズムを用いると、観測回数、識別率のいずれについても、センサをランダムに選択する場合に比べて性能が向上することが実際に示された。

最近筆者らは、このシステムを精密化することにより、触知覚感を定量的に表現することを試みている⁹⁾。触覚センサは既に十分実用化されていると思われるが、「質感」や「てざわり」といった感覚の定量化については、まだ問題が残されている¹⁰⁾。人間の触知覚過程を模倣した計測システムを用いることで、触知覚感の客観的表現法についても有用な示唆が得られるものと期待される。

5. おわりに

能動的認識とは、重要だと思われる部分に「あたり」をつけることで、要領よく対象をとらえるための仕組みであるといえるだろう。しかし、「あたり」がはずれた場合には、かえって判断を誤ることもある。人間はこの種の誤りを始終犯しているが、いったん判断を誤っても、新たな情報をもとにその誤りに気づき、判断を修正することができる。これも広い意味で一種の感覚統合と考えられるが、このあたりにも人間の知能の奥の深さが現れているといえよう。

能動的認識は、触知覚に限らずすべての感覚に共通するメカニズムであり、カクテルパーティ効果、視覚探索⁽¹¹⁾など「注意¹²⁾」と関係する知覚現象の本質であるといえる。また、運動プログラミングなど予測を伴った制御メカニズムとも深く関係していると考えられる⁽¹²⁾。

このような高次の感覚情報処理のメカニズムを解明するためには、本稿で述べたような原理モデルを足がかりに、種々の生理学、心理学的知見を満足するよう、より精密なモデルを構成することも必要であろう。しかし、そのメカニズムが神経回路レベルで明らかになるまでには、まだ長い時間を要するに違いない。人間と同様の現象を示すシステムの工学的実現を通じて、脳のメカニズムを理解しようとする構成的研究は、今後も重要な役割を果たしていくものと思われる。

文 献

- (1) 佐々木正人, 佐伯 胖 (編): “アクティブ・マインド”, 東京大学出版会 (1990).
- (2) 山崎弘郎, 石川正俊 (編): “センサフュージョン”, コロナ社 (1992).
- (3) 阪口 豊, 中野 馨: “能動的認識の数理モデル”, 第6回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 373-376 (1991-12).
- (4) 有本 卓: “確率・情報・エントロピー”, 森北出版 (1980).
- (5) 岩村吉見: “触覚受容器の構造と特性”, 日本ロボット学会誌, 2, 5, pp. 54-60 (1984-10).
- (6) Gibson, J.J.: “The senses considered as perceptual systems”, Houghton Mifflin, Boston (1966).
- (7) 黒川朋也, 阪口 豊, 中野 馨: “意図的触覚センシングシステム”, 計測自動制御学会第31回学術講演会予稿集, pp. 671-672 (1992-7).
- (8) Sakaguchi, Y. and Nakano, K.: “Active perception with intentional observation”, Proc. ISMCR-92, pp. 241-248 (1992-11).
- (9) 住友謙一, 阪口 豊, 中野 馨: “触知覚感の定量化に関する研究”, 計測自動制御学会第32回学術講演会予稿集, pp. 33-34 (1993-08).
- (10) 川端季雄: “風合い評価の標準化と解析”, 日本線維機械学会 (1980).
- (11) 横澤一彦ほか: “視覚探索研究”, 数理学 (連載), No. 344-356 (1992-02-1993-02).
- (12) 阪口 豊, 中野 馨: “内部モデルの信頼度を考慮した学習運動系のモデル”, 信学技報, NC92-121 (1993-03).



さかくち ゆたか
阪口 豊 (正員)

昭61東大・工・計数卒、昭63同大学院修士課程了。同年同・工・計数・助手、現在に至る。生体情報処理、特に、感覚情報処理のモデル化と工学的実現、認識、学習、情報表現などの研究に従事。

著書「ニューロコンピュータの基礎」(共著)など。

用語解説

触知覚 (haptics) 人間の身体に関する感覚は、皮膚の機械受容器からだけでなく、関節や筋肉の固有受容器や温・冷線維などからの情報を統合した結果得られるものであり、これを、単純な皮膚感覚を表す狭義の触覚と区別して触知覚という。

感覚統合 (sensory integration) 生体において、複数の感覚情報が統合されることをいう。複数の受容器の信号を組み合わせるといった単純なものから、視覚と聴覚の統合といった複数感覚にまたがるもの (multi-modal sensory integration) まで、脳の中ではさまざまなレベルの感覚統合が行われている。感覚と運動の協調 (sensori-motor coordination) と一緒に論じられることも多い。

能動的認識 (active perception) 人間は、情報を受動的に受け取るだけでなく、自ら積極的に情報を獲得したり、逆に不必要な情報を捨てたりすることによって、効果的な感覚情報処理を実現している。このように、情報を意図的に収集しながら対象を認識する過程を能動的認識という。レーダのように、対象に作用を及ぼしその反応を計測することによって対象を知る「能動センシング (active sensing)」とは、意味が異なる。

センサ融合、センサ統合 (sensor fusion, multi-sensor integration) 多数のセンサからの情報を融合、あるいは統合することによって、優れたセンシングシステムを構成しようとする方法論。「感覚統合」を工学的視点からとらえたものといえる。多種類の情報をいかにして統合するか、センサ情報間の関係をいかにして表現するかなどが主な問題となる。

意図的センシング (intentional sensing) センシングの過程を、センシング単独でとらえるのではなく、識別や制御などタスクの内容との関連も含め

て統一的に議論するための枠組み、システムの「意図」を反映したセンシングということから作られた用語である。

実験計画 (design of experiments) 対象の性質を知りたいとき、幾種もの実験を行うのが理想であるが、現実には、種々の制約によりそれができないことが多い。実験計画とは、そのような制約の下で、何らかの基準で最適な実験法を構成するための方法である。データ採取法は一般にデータ解析と密接な関係があるので、計画と解析の二つを合わせて実験計画とよぶことが多い。実験計画のうち、特に、それまでに得られた実験の結果を次の計画に反映させるようなものを逐次実験計画という。

相互情報量 (mutual information) 二つの情報源 A, B に対し、それぞれのエントロピー、 B を知った下での A の条件付きエントロピーおよびその逆を、それぞれ $H(A), H(B), H(A|B), H(B|A)$ と表したとき、 A と B の相互情報量 $I(A, B)$ は、

$$I(A, B) = H(A) - H(A|B) = H(B) - H(B|A)$$

で与えられる。

つまり、相互情報量とは、情報源 A のあいまいさが、情報源 B を知ることによってどの程度減少するかを示す量であり、二つの情報源の関係の強さを表した量であるといえる。

注意 (attention) 人間は、知覚や認識の対象がいくつか同時に存在しても、そのうちの一つに意識を集中しそれをはっきりとらえることができる。この過程で働いているものが注意である。図形群の中から特定の図形を探し出す過程 (視覚探索) や、雑踏の中で意識を向けた特定の人の声がよく聞こえる現象 (カクテルパーティ効果) などにおいて本質的な役割を果たしていると考えられているが、そのメカニズムについてはほとんど何もわかっていない。