

## 3-5 身体運動の状態に依存した知覚情報処理

### 3-5 *Perceptual Processing Based on the Motoric State of the Body*

羽倉 信宏

HAGURA Nobuhiro

効率的な情報通信の開発には、情報通信様式そのものの開発のみならず、発信者・受信者が扱いやすい形で情報を提供するための情報環境の構築が重要である。そのためには、一般原理原則としての人間の脳における入出力情報の処理様式を知ることは必須である。古典的な考え方では、環境から得られる感覚情報の処理と、それを利用した運動の出力は直列的につながっており、それぞれ独立なプロセスであると考えられてきた。しかし近年、私たちの研究を含む多くの研究が、感覚情報処理が運動出力処理の状況に依存して変化することを示してきている。本稿では、(運動)出力状態に依存する感覚情報処理について、私たちの研究の一部を紹介する。

For the development of efficient information and communication technologies, it is important not only to focus on the information and communication technologies themselves, but also to create an information environment that provides information in a form that is easy for the sender and receiver to handle. To this end, it is essential to understand the general principle regarding how the human brain processes the sensory input and generates the output motor command. In the classical view, sensory information processing and the generation process of output action are serially connected, thus, have been considered to be independent processes. In recent years, however, a number of studies, including ours, have shown that sensory information processing depends on the context of motor output processing. In this paper, we present some of our research on (motor) output state-dependent sensory information processing.

#### 1 まえがき

近年、様々な計算機器・計測機器の発達により、世界中で、脳の研究が飛躍的に発展してきている。生物学、医学分野でのみならず、情報通信研究の分野においても脳の研究は注目されている。

情報科学・情報通信研究分野で開発されてきた機械学習的な手法が脳活動の解析に活発に利用されはじめてきているが、単にそれらの手法の適応対象として脳研究が情報通信研究にとって重要なわけではない。脳における情報処理様式を理解することが、情報通信分野へ大きく貢献すると考えられるからである。その理由として、下記の2点が挙げられる。

1点目は、脳の情報処理の効率性である。脳はノイズまみれの、限られた、かつ冗長なリソースから適応的で、極めてエネルギー効率の高い情報処理を実現している。つまり、その仕組みを明らかにすることは、いまだ提案されていない新規で効率的な情報通信様式を考案するためのアイデアの源泉となる。実際、多層

のニューラルネットワークであるディープラーニングは、脳の視覚情報処理の階層性から着想を得ている [1]。

2点目は、人間が扱いやすい情報操作法の開発につながるためである。情報通信の始点・終点の両端には必ず「人間」がいる。その人間が直感的に情報を知覚し、操作できなければ、全体としての通信効率性は落ちる。つまり「効率的な情報通信」を追求するとき、人間にとって情報の利用しやすさというものが「効率性」の中に包含される。ゆえに、情報通信様式そのものの開発のみならず、発信者・受信者が扱いやすい形で情報を提供するための(「脳に優しい」)情報環境の構築が重要となる。その環境デザイン指針として、一般原理原則としての人間の脳における入出力情報の処理様式を知ることが重要になるのである。

本稿では、後者の視点にたつて、これまで私たちが明らかにしてきた脳が感覚情報を処理する際の特性の一部を紹介する。具体的には、脳は感覚入力を常に同じように処理しているわけではなく、その情報に対する働きかけ方(運動出力の状態)に依存して、処理様式

を柔軟に変えている、というものである。

## 2 脳研究における行動学実験の重要性

今回、紹介する研究は行動学実験の内容である。「行動学実験は心理学でしょ？脳と関係ないよ」とよく勘違いされるので、ここで補足しておく。私たちの基本スタンスでは脳を情報処理の機械と仮定する。そして、実験では入力情報（環境から得られる感覚刺激）を操作することで、出力情報（知覚報告、運動反応）がどのように変化するかを計測し、そこから、脳内で行われている情報処理を類推し、モデルを考える。つまり、脳の情報処理機構を明らかにするという点では、行動実験も脳研究の重要な要素であるといえる。むしろ、行動実験から精緻な情報処理の仮説を作った上で、それがどのように実装されているのかを調査するのが脳活動計測実験である。現在、「脳研究における行動実験の重要性をもう一度見直そう」という潮流が勃興している [2]。

本稿で紹介する研究は、行動学実験を通して、感覚情報の情報処理が運動実行のプロセスに依存することを示すものである。

## 3 運動準備のプロセスは準備中の視覚情報処理を促進する

野球の神様と称えられた川上哲治の逸話に、「球が止まってみえる」という発言がある。川上哲治だけでなく、テニスのジョン・マッケンローなども同様の発言をしている。しかしこのような知覚は本当に生じるのだろうか？ 私たちは、一般人でも狙いを定めて素早く手を動かそうと準備している最中には、時間がゆっくりと経過しているように感じられること（運動準備時

間延長錯覚）を明らかにした [3]。

実験の参加者は、画面上の白い円の呈示時間判断を行った。白い円の呈示時間は試行ごとに0.7秒から1.6秒のあいだで変化した。参加者は、各試行後に、白い円の呈示時間が全体として短いほうに分類されるか、長いほうに分類されるかを答えた（図1）。

各試行は、参加者のボタン押しによってスタートし、以下の二条件ともに、白い円の呈示中も参加者はボタンを押し続けた。

運動準備条件では、白い円が消えたら、参加者はボタン押しをしていた手を放し、白い円を囲んでいた円枠のなかに向けて素早く到達運動を行った。ここでは、参加者にしっかりと運動準備をさせるため、白い円が消えてから0.5秒以内に到達運動を開始するように制限した。そして到達運動完了後、上述の白い円の呈示時間判断を行った。一方、統制条件では、白い円が消えても、参加者はボタンを押したまま到達運動は行わず、白い円の呈示時間判断を行った（図1）。

上記の二条件間では、白い円の呈示されている間の視覚入力も運動出力も同一であったが、到達運動の準備の有無が異なった。実験の結果、運動準備条件では、統制条件に比べて白い円が長く呈示されていたように感じられることが分かった。

更なる実験により、1) 到達運動の標的の位置を運動開始まで分からないようにして運動準備を十分にできないようにすると、知覚時間の延長作用は減弱すること、2) 運動準備中に点滅する円を見せると、点滅のスピードがゆっくりと感じられることが明らかになった。それでは、どのような情報処理によって、時間の知覚が変化しているのだろうか？

運動を準備することによって、単位時間当たりの感覚情報の取得量が増えるため、その量が時間を長く感じさせ、同時に、変化（点滅）のスピードを遅くさせる

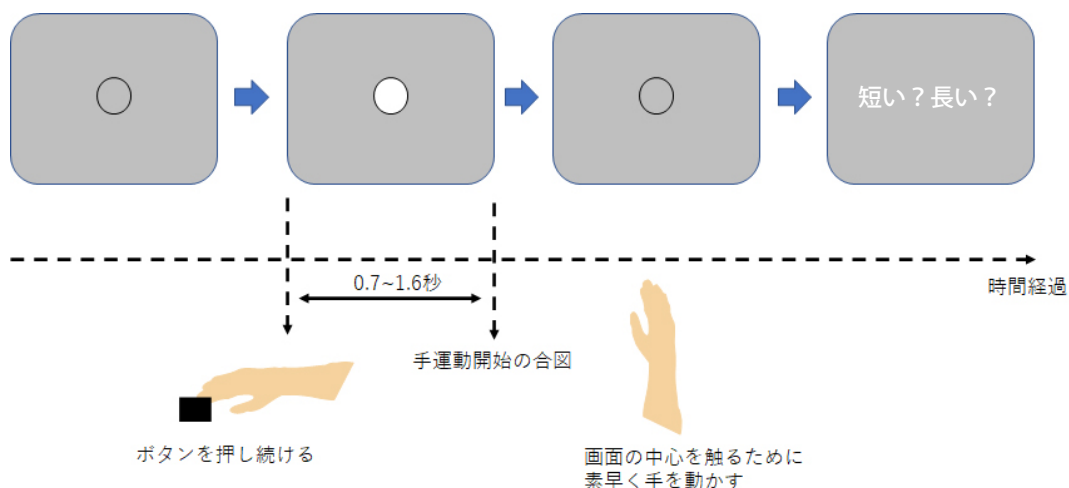


図1 運動準備と時間知覚の実験概要

のではないかという仮説を立てた。この仮説に基づき、運動準備中に素早く文字を提示してそれを認識する課題を行うと、運動準備中は、運動を準備していないときと比較して文字の認識率が上昇していることが突き止められた。

以上の実験の結果から、素早い運動を開始しようとしているとき、その運動準備が十分にできているときには、時間が長くゆっくりと感ぜられること、そして、時間が長くゆっくりと感ぜられるのは、運動準備中に視覚情報処理の能力が上昇していることによって生じていることが示された。

では、この運動準備に伴う、視覚刺激の知覚時間の延長、すなわち視覚情報処理能力の上昇は、脳にとってどのような意義があるのだろうか？素早い運動は「バリストック運動(弾道)」とも呼ばれ、一度開始するとなかなか途中では止めることができない。しかし、外界は目まぐるしく変動しており、せっかく準備した運動計画を変更しなくてはならない事態がしばしば起こる。運動準備に伴う視覚情報処理の促進には、このような事態を運動開始前に速やかに検知し、外界の変化に応じた運動準備の変更を可能にするという役割があるのかもしれない。これは、今後の研究で明らかにしなければならない点である。

以上の結果は、「運動準備」という、視覚情報を処理するためには一見、何の関係もない運動システムの処理が、知覚・認知システムの処理を促進するという、両システムの相互作用を示す一例であるといえる。

#### 4 運動にかかる負荷は知覚意思決定を変容する

イソップのキツネと葡萄<sup>ぶどう</sup>の寓話では、キツネは跳びあがってもなかなか届かないところにある葡萄を「熟れていないんだ！」と判断する(図2)。寓話では、この



図2 イソップの葡萄とキツネの例

キツネの判断は負け惜しみとして描かれている。しかし、果たしてキツネは本当に負け惜しみを言っているのだろうか？それとも跳びあがるという運動行為にかかる労力によって、実際に葡萄が「熟れていない」ように見え、そのように判断した可能性はないだろうか？私たちの研究で、運動の労力が判断対象の見た目すらも変えてしまうことが明らかになった[4]。

目の前のコップを取るのと、棚の中のコップを取るのとでは、目的は同じでも運動行為をする際にかかる労力が異なる。この実験では、画面上の点の動きを判断する課題のパフォーマンスが、その判断を表出する行為にかかる労力(運動行為の負荷)によってどのように変容するのかを調査した。被験者は画面の中心に表示される多数の点の動きが、全体として右に動いているのか、左に動いているのかを判断する課題を行った(図3左)。これは一般的に「知覚意思決定課題」と呼ばれる。入力される感覚情報の特徴を知覚して判断を下す課題だからだ。通常、この判断には単純なボタン押し等が使われることが多いが、この実験では、両手にはそれぞれハンドルを握り、右に点が動いていると判断した場合には右手のハンドルを、左に点が動いていると判断した場合には左手のハンドルを動かしてもらった。最初は右のハンドルと左のハンドルを動かすために必要な力(負荷)は同一に設定されているが、途中から片方のハンドルを動かすための負荷が徐々に増大する。負荷は時間をかけて少しずつ増大し、最終的には両手間で2倍弱ハンドルを動かすのにかかる負荷が異なる状況であったが、被験者は両手間の負荷の差に気が付かなかった。そして、両手間で負荷に差がない場合と、ある場合で、点の動きの判断のパフォーマンスを比較した。すると、被験者は運動負荷の存在に気が付いていないにも関わらず、運動負荷の大きな方向の視覚判断を避けるようになった(図3右)。

これは、「知覚意思決定」という感覚入力にのみ依存していると考えられてきたものが、感覚入力とは全く関係のない、反応の際の運動行為にかかる負荷による影響を受けてしまうことを意味している。

では、この知覚判断に影響を与えた運動負荷は、「葡萄の熟れ具合」といった見たものの知覚判断そのものを変化させたのだろうか、それとも、見たものの知覚判断は保ったまま、「つらい運動はやめる」というように運動行為の選択のみを変化させたのだろうか？この問いに答えるために、被験者は上の実験と同様に負荷に差のあるハンドルを使って、点の動きの判断を行った。そして、運動負荷の高い判断を避けるようになった時に、今度は手を使わずに口答で判断を行ってもった(図4)。もし、点の動きそのものに対する判断が手の運動負荷によって変化したのであれば、口答で判断



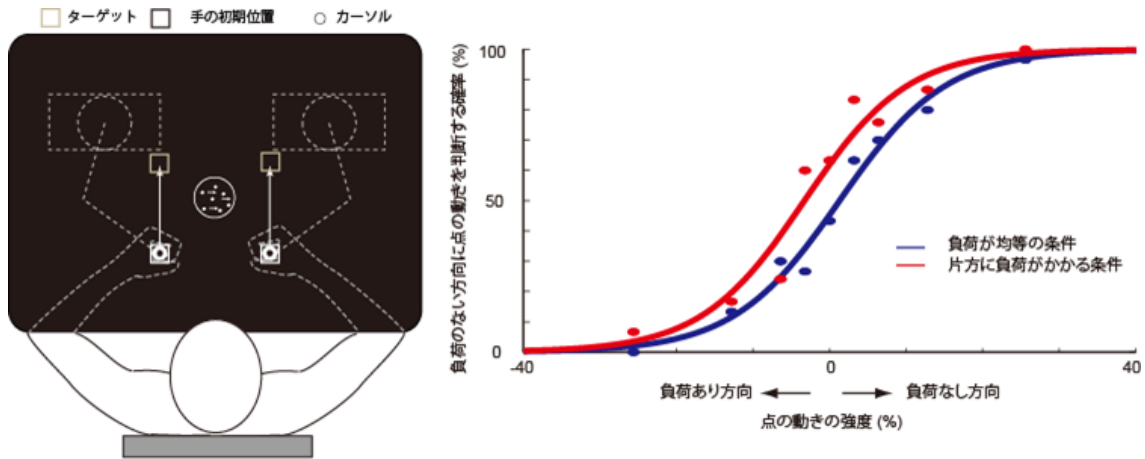


図3 運動負荷と知覚判断の実験状況と結果

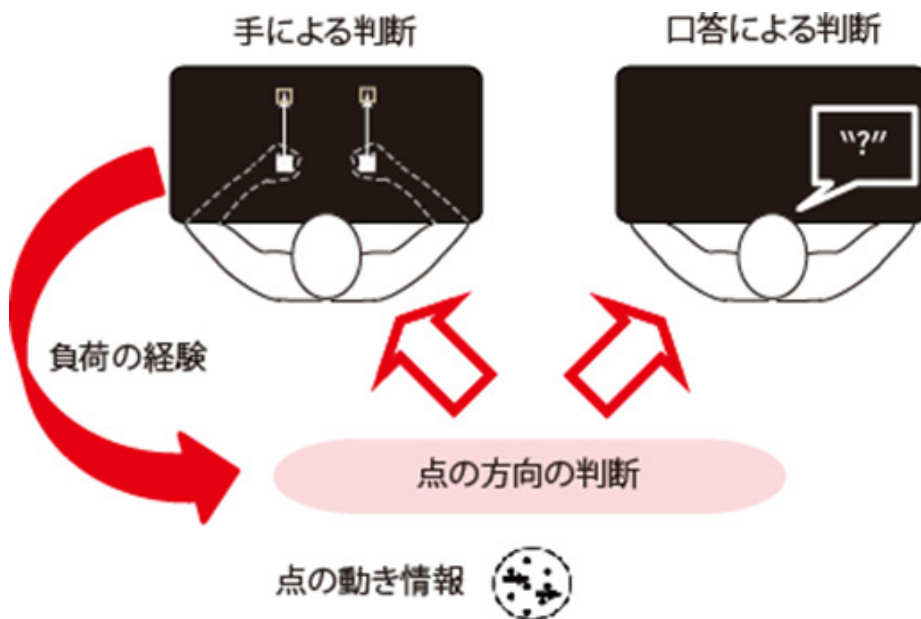


図4 運動負荷と知覚判断の実験

する際も、手を用いた判断の際に運動負荷の高かった方の判断を避けるはずである。しかし、もし「手」で行うつらい運動を避けているだけなら、口答での判断は変化しないはずである。結果は口答判断にも事前に経験した手の負荷の情報が反映されることが分かった。つまり、片方の手に負荷のかかった判断を繰り返すことで、点の動きそのものに対する判断が変容したと考えられる。よって、イソップのキツネはうそをついていたわけではなく、採るのに労力のかかる葡萄が本当に「熟れていない」と判断していた可能性が高いのである。

このような、感覚情報を利用した知覚判断は「知覚意思決定」と呼ばれ、Drift Diffusion Model というモデルによって記述されることが多い[5]。これは知覚意思決定を証拠蓄積のプロセスととらえ、蓄積される証拠

量がある閾値に達した時に、意思決定が行われると考えるものであり、判断の方向や反応時間のパターンを予測することができる(図5)。このモデルに基づいてこの研究の結果を考えたとき、運動の負荷は、負荷のかかった判断方向に対し、証拠が蓄積するスピードを鈍化させるのだろうか、それとも判断に至るための閾値を高くするのだろうか？ 今回の結果に、Drift Diffusion Model を当てはめ、どのように負荷が影響を与えたのかを調査すると、負荷にかかった方向に対する判断の閾値が上昇するため、結果として、この方向に対する判断が避けられるようになることが分かった。

以上の結果は、運動行為を生成するために利用される「負荷」が、感覚情報の区別にはまったく関係ないのにも関わらず、それに対する知覚を変容させてしまうことを示す典型例である。

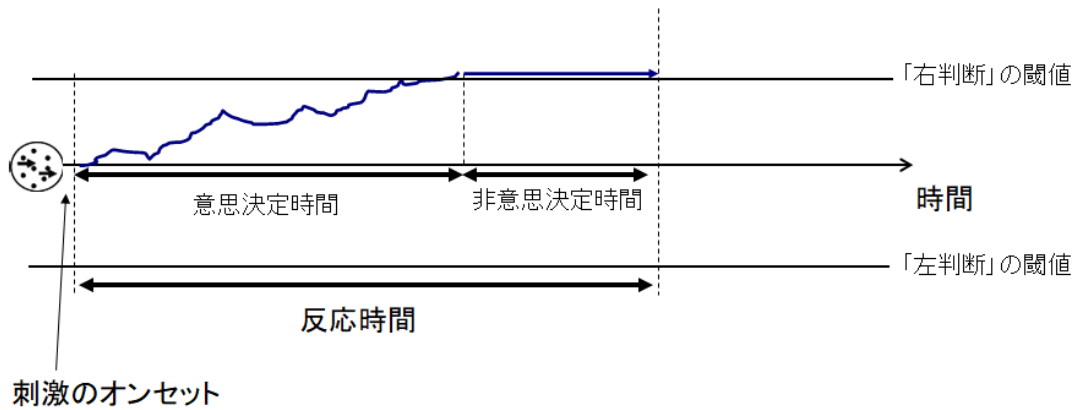


図5 Drift Diffusion Model

## 5 結語

本稿では、人間の脳は、感覚情報を入力されるままに処理するのではなく、身体の運動状態に依存して処理方法を変化させているという特性について、私たちの研究の一部を紹介した。この研究に限らず、私たちはこれまで、感覚情報処理が運動によって影響を受けるという証拠を多く提出してきた [6]-[10]。つまり、脳は「身体運動」を基本として、入力情報を処理している可能性が高い。

このような脳の特性を念頭に置くと、情報デバイスに対するユーザの働きかけ方を考慮に入れて情報提示内容や方法を変化させることが効率的な情報環境の構築につながる可能性があるといえる。また、これらの課題中の脳活動を計測し、脳内でどのように柔軟に情報処理スピードや、運動負荷に応じた感覚情報処理容量の調節を行っているのかを調べることで、エネルギー効率の高い情報通信様式の開発をインスパイアできる可能性もあると考えられる。

以上のように、脳の効率的な情報処理様式の謎を解くことが、情報通信研究へ波及するということを確認して、私たちは日々研究を行っている。

### 【参考文献】

- 1 Fukushima, "Neocognitron. A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position," *Biological Cybernetics* vol.36, pp.193-202, 1980.
- 2 Krakauer JW, Ghazanfar AA, Gomez-Marin A, Maclver MA, and Poeppel D, "Neuroscience Needs Behavior: Correcting a Reductionist Bias," *Neuron*. vol.93, pp.480-490, 2017.
- 3 Hagura N., Kanai R., Orgs G., and Haggard P., "Ready steady slow: action preparation slows the subjective passage of time," *Proc Biol Sci*. vol.279, pp.4399-4406, 2012.
- 4 Hagura N., Haggard P., and Diedrichsen J., "Perceptual decisions are biased by the cost to act," *eLife Science*, vol.6, 18422, 2017.
- 5 Ratcliff, R, "A theory of memory retrieval," *Psychological Review*, vol.85, no.2, pp.59-108, 1978.
- 6 Binetti N., Hagura N., Fadipe C., Tomassini A., Walsh V., and Bestmann S., "Binding space and time through action," *Proc Biol Sci*. vol.282, 20150381, 2015.

- 7 Orgs G., Dovern A., Hagura N., Haggard P., Fink GR., and Weiss PH., "Constructing Visual Perception of Body Movement with the Motor Cortex," *Cereb Cortex*. vol.26, pp.440-449, 2016.
- 8 Desantis A., Haggard P., Ikegaya Y., and Hagura N., "Specificity of action selection modulates the perceived temporal order of action and sensory events," *Exp Brain Res*. vol.236, pp.2157-2164, 2018.
- 9 Verrel J., Hagura N., Lindenberger U., and Haggard P., "Effect of haptic feedback from self-touch on limb movement coordination," *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. vol.39, pp.1775-1785, 2013.
- 10 Honda T., Hagura N., Yoshioka T., and Imamizu H., "Imposed visual feedback delay of an action changes mass perception based on the sensory prediction error," *Front Psychol*. vol.4, 760, 2013.



羽倉 信宏 (はぐらのぶひろ)

未来 ICT 研究所  
脳情報通信融合研究センター  
脳情報通信融合研究室  
主任研究員  
博士(人間・環境学)  
認知神経科学