

Title	外界の知覚・認知情報処理と身体行動の相互作用
Sub Title	Interaction between action and perception
Author	羽倉, 信宏(Hagura, Nobuhiro)
Publisher	三田哲學會
Publication year	2020
Jtitle	哲學 (Philosophy). No.144 (2020. 3) ,p.95- 107
JaLC DOI	
Abstract	Our daily behavior consists of perception/cognition of the environment and the action towards the environment. Classically, these two processes are assumed to be independent, and action has been regarded as a mere neutral output channel only reflecting the decisions based on the perception of the environment. However, recently emerging view is that these two processes interact with each other, and the perception/cognition of the sensory input can be partly explained by how one act on the environment. In this article, I will review the logic behind the studies of action-perception coupling.
Notes	特集：伊東裕司教授 退職記念号 寄稿論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00150430-00000144-0095

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

外界の知覚・認知情報処理と 身体行動の相互作用

— 羽 倉 信 宏* —

Interaction between Action and Perception

Nobuhiro Hagura

Our daily behavior consists of perception/cognition of the environment and the action towards the environment. Classically, these two processes are assumed to be independent, and action has been regarded as a mere neutral output channel only reflecting the decisions based on the perception of the environment. However, recently emerging view is that these two processes interact with each other, and the perception/cognition of the sensory input can be partly explained by how one act on the environment. In this article, I will review the logic behind the studies of action-perception coupling.

知覚・認知のシステムと運動システムの連関

たとえば、スーパーマーケットの棚から商品を選び、かごに入れる。また、本棚から目当ての本を見つけ、それを取り出す。商品や本を動かすと、次に棚を見たときには棚の状態は変化していることとなり、今度はその情報内容を元に次の行為が決定される。このように、私たちの日常は、環境を知覚・認知することと、運動行為を通した環境への働きかけ（環境

* 国立研究開発法人 情報通信研究機構（NICT）、脳情報通信融合研究センター（CiNet）

を変化させる) というループが繰り返されることによって成り立っている。このようなヒトの日常を考えたとき、外界の知覚・認知システムと行為を作り出すための運動システムが連関していることは自明である。しかし、この連関が、1) 両システム間での直列的な情報の伝播プロセスであるのか (e.g. 知覚・認知システムが処理した情報がそのまま運動システムに送られる、一方通行性の情報処理機構)、それとも、2) 両システムの情報処理様式が相互に修飾し合っているのか (e.g. 知覚・認知システムは、運動システムの状態によって処理を変化させる)、の2つの可能性のいずれであるのかについては自明ではない。

知覚・認知システムと運動システムを独立とみなす研究の歴史

これまでの心理学・神経科学の研究では、知覚や認知は外界から「入力」される情報の処理、そして、運動行為は目的に応じた最適な筋活動を生成するための「出力」情報生成の処理であるとし、別々の分野の研究対象として、主に異なる研究者グループによって研究がなされてきた。結果、「運動システムは外界からの入力情報の処理に応じた意思決定を反映するだけのシステム」という、上記の1) に対応するような考え方が潜在的に仮定されている。

果樹園のなかで、もっとも熟れている (赤い) リンゴを選び出し、腕を伸ばしてもぎとる、というプロセスが、これまでの研究では、どのようにとらえられてきたかを考えてみたい。まず、もっとも熟れている (赤い) リンゴを選び出すということは、特定の視覚的特徴量 (e.g. この場合は「赤」) に注目し、その特徴量を最大に有するリンゴを選び出すことである。このような知覚的特徴に依存した意思決定プロセスは「知覚意思決定」と呼ばれ、心理学、および神経科学において長らく研究の対象となってきた。例えば、Shadlen らは、ランダムドットモーションという点の集合が様々な方向に動くような視覚刺激を使って点の動き情報の強度を操作

し、それを覚醒サル神経活動計測と組み合わせることで、「視覚的動き」という知覚的特徴に依存した意思決定プロセスの神経機構の研究を行ってきた (Gold & Shadlen, 2007)。サルが行う課題は、簡単に言うと、ランダムドットモーションの方向が全体として、右に向かっているのか、それとも左に向かっているのかを判断するものであり、サルはその判断に対応した方向へ目を動かすことが求められる。一連の研究から、1) 知覚的特徴を処理する領域のニューロン活動 (e.g. 動きの場合は側頭部にある MT 野) は提示される視覚的特徴の情報の強度を反映すること、そして、2) MT 野の投射先の一つである頭頂領域 (e.g. 眼球運動の場合は LIP 野) のニューロンは、連続的に脳に入ってくる視覚的特徴を「証拠」として判断の決定に必要なレベルまで蓄積していくような活動パターンを示すこと、がわかってきた。これは、「意思決定とは、ある判断に必要な証拠を蓄積する情報処理プロセスである」という Drift Diffusion Model (Ratcliff & McKoon, 2008) が仮定する情報処理の枠組みと一致するものである。

それでは、「リングに手をのばす」というプロセスはどうだろう？ 知覚・認知と運動行為を独立の処理ととらえる研究では、このプロセスは、運動する対象を決定するプロセスとは独立の、運動制御の問題としてみなしてきた。つまり、運動の実行処理は、「熟れているリングを選択した」という運動対象の属性は関係ないと仮定し、その事後プロセスだけを対象とする。そして、ヒトはなぜ、多自由度の筋を巧みに制御して真つすぐな運動軌道を生成できるのか、いったい何を評価関数として運動を最適化することで円滑な運動が実現できるのかなどが研究されてきた。これまで、被験者にロボットアーム (マニピュランダム) を動かしてもらい、力学的外乱や視覚的外乱を加えた状況で、被験者がどのように、外乱を学習して目標に対し筋を制御しているのかを調査したり、サルが運動を行っている最中の運動関連領域 (一次運動野、運動前野、小脳) のニューロン活動を

測定し、それを筋の出力や誤差の情報と関連付ける研究が精力的に行われてきている (Shadmehr & Wise, 2004)。

まとめると、知覚・認知を対象とする研究は入力情報処理の研究として、運動行為を対象とする研究は出力情報処理の研究として行われており、両者を統合するような研究は中心テーマとなっていなかったといえる。

知覚・認知システムと運動システムが独立でないとはどういう状況か？

知覚・認知のシステムが入力情報の処理だけに関与し、運動システムが出力情報の処理に関与する形でも、ヒトのシステム全体としては何の不都合もなさそうである。では、果たして私たちの脳では、知覚・認知システムと運動システムは別々に動いているのだろうか？両者の間には何の相互作用もないのだろうか？それを言うためには、運動システムの挙動に依存して、知覚・認知システムの情報処理が変化するような状況が存在することを示す必要がある。

私は近年、身体運動と知覚・認知の相互作用について研究を行ってきた。そこから、運動の準備・実行・観察・予測などが、その運動と時間的に近接して提示される感覚情報の知覚を変容することを示してきた。そこから、運動システムがこれまで考えられてきたような、単に知覚・認知システムによって決定された内容を環境に働きかけるだけのニュートラルな出力チャンネルでないことを主張してきた (Hirose et al., 2010, Hagura et al., 2012a/b, 2017, Verrel et al., 2013, Honda et al., 2013, Orgs et al., 2016, Binnetti et al., 2015, Desantis et al., 2018)。以下に、その代表例として、1) 運動準備が視覚情報処理を促進する (Hagura et al., 2012)、2) 運動にかかる負荷が知覚意思決定を変容する (Hagura et al., 2017)、という2つの研究を紹介する。

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、「球が止まって見える」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？ Hagura ら（2012b）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。

実験の参加者は、画面上の白い円の呈示時間判断を行なった。白い円の呈示時間は試行毎に 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、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なった。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なった。一方、統制条件で

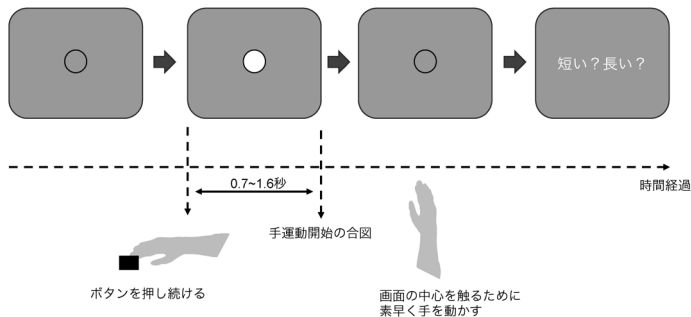


図 1

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あいだ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。

さらなる実験により、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、それがゆっくりと感じられること、3) 運動準備中は次々に素早く呈示される文字を読む能力が上昇すること、などが明らかになった。

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じられること、そして、時間が長くゆっくりと感じられるのは、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「バリスティック弾道（弾道）運動」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。

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でしょうか? 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」ように見えて、そのように判断した可能性はないだろうか?

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)。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



図2

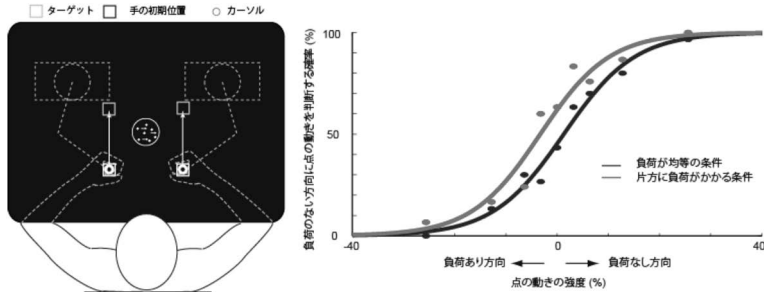


図 3

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、運動行為にかかる負荷が、「点の動き方向」という視覚入力 of 知覚判断に影響を与えたことを意味する。

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す。しかし、もし「手」で行うつらい運動を避けているだけな

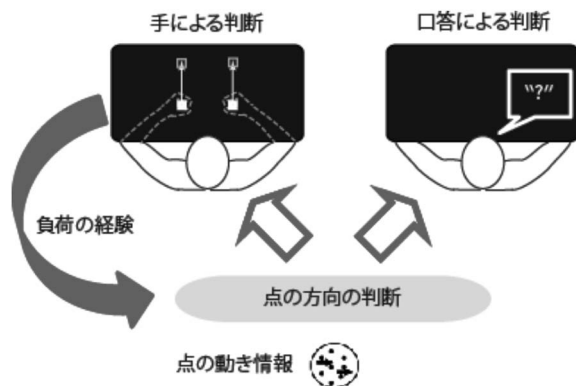


図 4

ら、口答での判断は変化しないはずですが、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。

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、「点の動き」という視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、一例である。

運動が知覚・認知を変容するメカニズムの分類

前項では、私自身の研究から、運動システムが知覚・認知のシステムに影響を及ぼす研究について紹介した。最後に、これまでの先行研究を俯瞰し、運動システムが知覚・認知システムを変化させるような場合、どのようなタイプの相互作用が生じているのかについて、そのパターンを分類してみたい。

一番目は、「表象の共有」である。感覚情報と運動を生成する情報について、脳内でその表現が共有されている場合、片一方の情報入力、もう一方の入力の情報処理を変化させる。たとえば、脳内の運動領域である運動前野では、自分自身が手運動を生成するときも、また、誰かが同じ手運動を行うときにも活動するニューロンが報告されている（ミラーニューロン：Rizzolatti et al., 1996）。Ikegami ら（2014）は、ダーツのエキスパートが素人のダーツパフォーマンスを見ると、ダーツの成績が落ちることを報告した。これは、ミラーニューロンのような知覚・認知と運動が「表象を共有」しているシステムを介し、他者の感覚情報の入力が、自分の運動情報の生成を阻害するためと考えられる。

二番目は、私たちの感覚情報の知覚・認知が、すでに身体運動のパターンに最適化している、というものである。ヒトが曲線を紙に描くとき、その各速度は曲率の $2/3$ 乗で表現することができる（運動速度の $2/3$ 乗則）。Viviani と Stucchi（1992）の研究では、実験者が様々な速さでカーソルを曲線上で動かし、被験者はそれを観察した。このとき、カーソルの速度が $2/3$ 乗則で動くときにのみ、被験者は「カーソルが一定の速度で動いていた」と感じるようになった。これは、感覚情報がどのように知覚されるかは、ヒトが身体を動かすパターンによって規定・最適化されている可能性を意味している。実際、別のグループは、 $2/3$ 乗則で動くカーソルは、脳の視覚野をよりよく活動させることを明らかにしている（Dayan et al., 2007）。

三番目は、「運動時の感覚情報処理の変化」である。これは、運動準備や実行処理が行われることによって、静止時と比較して感覚情報処理を変化する場合である。Ayaz たち（2013）はバーチャルリアリティー空間で、ネズミをトラックボールの上を歩行させ、同時に様々な大きさの視覚刺激（ガボールパッチ）を見せながら、第一次視覚野のニューロン活動を測定した。安静時のニューロン活動は、視覚刺激がある一定以上の大きさにな

るまで発火率を増大させるが、その大きさ以降は側抑制が働くため、発火率は落ちる。しかし、歩行中はこの側抑制の成分が減弱し、大きな視覚刺激でも発火率が高くなっていることが分かった。これは、運動中、受容野の大きさが増大していることを意味している。二番目のパターンとの違いは、「運動実行」という文脈において、感覚情報処理に変化が生じている点である。

私が前項で紹介した研究は、上記の分類では三番目の分類に当たると考えられる。今後は、これらの分類に応じて、個別にメカニズムを調べるような実験が求められてくるだろう。

結語

本稿では、知覚・認知の研究と、運動制御の研究が独立に行われ、相互に独立の処理であるとみなされてきたことを記した。その後、筆者たちの行った運動システムが知覚・認知システムに影響を与えている実験の内容を概説し、最後に、運動が知覚を変化させる際、どのような情報処理が考えられるかを整理した。筆者は、ヒトの脳は、環境における最適な行動（身体運動）をするために最適化しており、感覚情報から作り出される知覚・認知も、それを支えるために最適化されていると信じて研究を行っている。ゆえに、今後は両システムの相互作用の研究が大きく進展すると期待している。

References

- 1) Ayaz A, Saleem AB, Schölvinc ML, Carandini M. Locomotion controls spatial integration in mouse visual cortex. *Current Biology*. 23:890–894. 2013
- 2) Binetti N, Hagura N, Fadipe C, Tomassini A, Walsh V, Bestmann S. Binding space and time through action. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 282: 1805. 2015
- 3) Desantis A, Haggard P, Ikegaya Y, Hagura N. Specificity of action selection

- modulates the perceived temporal order of action and sensory events. *Experimental Brain Research*. 236: 2157–2164. 2018
- 4) Dayan E, Casile A, Levit-Binnun N, Giese MA, Hendler T, Flash T. Neural representations of kinematic laws of motion: evidence for action-perception coupling. *Proceedings of National Academy of Science U S A*. 104:20582–20587. 2007
 - 5) Gold JI, Shadlen MN. The neural basis of decision making. *Annual Review Neuroscience*. 30:535–574. 2007
 - 6) Hagura N, Kanai R, Orgs G, Haggard P. Ready steady slow: action preparation slows the subjective passage of time. *Proceedings of the Royal Society B; Biological Sciences*. 279: 4399–4406. 2012
 - 7) Hagura N, Hirose S, Matsumura M, Naito E. Am I seeing my hand? Visual appearance and knowledge of controllability both contribute to the visual capture of a person's own body. *Proceedings of the Royal Society B; Biological Sciences*. 279: 3476–3481. 2012
 - 8) Hagura N, Haggard P, Diedrichsen J. Perceptual decisions are biased by the cost to act. *eLife*, pii: e18422. 2017
 - 9) Hirose S, Hagura N, Matsumura M, Naito E. Human rostral dorsal premotor cortex mediates graspability judgment of external objects by evaluating hand motor capability. *Brain Research*. 1313: 134–42. 2010
 - 10) Honda T, Hagura N, Yoshioka T, Imamizu H. Imposed visual feedback delay of an action changes mass perception based on the sensory prediction error. *Frontiers in Psychology*. 4: 760. 2013
 - 11) Ikegami T, Ganesh G. Watching novice action degrades expert motor performance: causation between action production and outcome prediction of observed actions by humans. *Scientific Reports*. 4: 6989. 2014
 - 12) Orgs G, Doern A, Hagura N, Haggard P, Fink GR, Weiss PH. Constructing visual perception of body movement with the motor cortex. *Cerebral Cortex*, 26: 440–449. 2015
 - 13) Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research Cognitive Brain Research*. 3: 131–141. 1996
 - 14) Shadmehr R & Wise SP. *The Computational Neurobiology of Reaching and Pointing: A Foundation for Motor Learning*. A Bradford Book. 2004
 - 15) Verrel J, Hagura N, Lindenberg U, Haggard P. Effect of haptic feedback

- from self-touch on limb movement coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39: 1775-1785. 2013
- 16) Viviani P, Stucchi N. Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*. 18:603-623. 1992