

人間の知覚と運動の相互作用（続）

——知覚運動課題と生理学的・心理学的指標——

小堀 聡
Satoshi KOBORI

理工学部電子情報学科 教授
Professor, Department of Electronics and Informatics



1. はじめに

前号（龍谷理工ジャーナル 23 巻 1 号）では、人間の複雑な認知過程の例として、知覚と運動の相互作用について、主として理論的な側面について考察した。

ここでは、具体的な研究方法を紹介するため、実験に使用する知覚運動課題とその際に測定する生理学的・心理学的指標について解説する。

2. 知覚運動課題

2.1 ボタン押し課題

ボタン押しの動作は、たとえば、ランプが点灯したらできるだけ速くボタンを押すというような条件であれば、後述の反応時間の課題として位置づけられるが、ボタンを押す条件の設定によりさまざまな課題を作成することができる。こうした課題は古くからさまざまな研究に用いられており、現在も多くの研究^{1,2)}がなされている。

本稿で紹介するボタン押し課題（button-press task）は、ディスプレイ上を移動するターゲットが指定枠に入ったらボタンを押すというもの³⁾であり、知覚運動課題（perceptual motor task）の最も単純な例である。ここでは、ターゲットの出現位置・

移動の向き、移動速度、指定枠の表示位置はランダムに切り替わるように設定する。したがって、この課題において被験者が行わなければならないことは、

- 1) ターゲットの出現位置・移動の向き、指定枠の表示位置を把握し、
- 2) ターゲットの移動速度を把握し、
- 3) それらからターゲットが指定枠に収まるタイミングを推測し、
- 4) 自分自身の反応時間分の遅れとターゲットの移動速度からボタンを押すべき位置を推測し、
- 5) 実際にボタンを押す

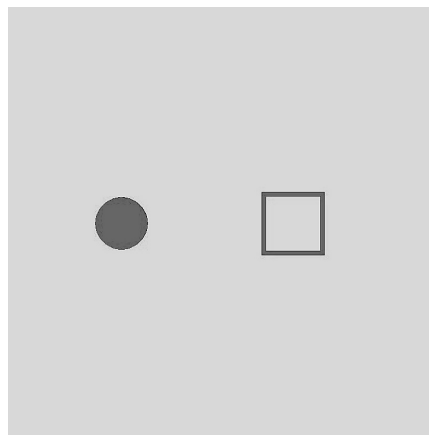


図1 ボタン押し課題の実行画面

ということである。

後述するトラッキング課題では、視覚系および自己受容感覚系からのフィードバックと運動系の出力の関係を連続的に測定することができる。それに対してボタン押し課題では、感覚・知覚系のフィードバックとしては主として視覚系が重要な役割を果たすことになる。また、ボタン押しの動作自体は瞬間的でフィードフォワードな制御によるものであり、予測的な動作を測るという意味で、トラッキング課題とは異なる機能を測定・解析することができる。しかし、このように物の動きを捉えて適切な反応を示すというのは基本的な動作であるのにも関わらず、解析・評価する方法は確立されていない。

2.2 トラッキング課題

運動の制御や学習の研究には、古くから知覚運動課題としてトラッキング課題 (tracking task) がよく用いられてきた^{4,5)}。一般的にトラッキング課題とは、マウスやジョイスティックなどの操作器を制御してディスプレイ上のカーソルを動かし、移動するターゲットに対して追従させるというものである。トラッキング課題には、ターゲットの動きが規則的なものと不規則なもの、連続なものと不連続なもの (ステップ信号など)、また、制御方法として、追従型 (ターゲットとカーソルがそのまま表示されるもの) と補償型 (ターゲットとカーソルの誤差が表示されるもの) などの区別がある。本稿で紹介する研究においては、2次元での規則的な連続信号による追従型のトラッキング課題を用い、ターゲットまたはカーソルが試行の途中で一時的に表示されなくなる消滅課題^{6,7)}を設定して実験を行うことを提案している。

トラッキング動作において、被験者は操作器を動かして、ディスプレイ上のカーソルをターゲットに合わせようとする。被験者は、ターゲットとカーソルが離れると、その距離が小さくなるように操作する。つまり、視覚フィードバックによる誤差修正に頼ることになる。

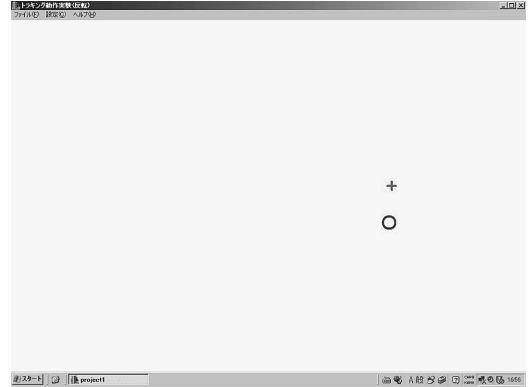


図2 トラッキング課題の実行画面

しかし、トラッキング動作は純粋にフィードバック制御だけではなく、予測が関わることが示されている。ターゲットの動きが予測可能な場合には制御成績が良くなるのは当然であるし、さらには、ターゲットやカーソルが表示されず、誤差が検出できないときでさえ、正確な制御ができることもある⁸⁾。

計算論的に考えるならば、正確なトラッキングには、現在のターゲットの位置とカーソル (手) の位置の表現が必要となる。トラッキング動作には2種類の順モデルが関わると考えることができる。1つはそれまでの運動の情報に基づいてターゲットの位置を推測するモデルであり、もう1つは運動指令や自己受容感覚フィードバックに基づいて手やカーソルの位置を推測するモデルである。ここでは仮に、前者を視標モデル、後者を運動モデルと呼ぶことにする。

学習はすべての内部モデル (internal model) にとって、重要な機能である。トラッキング動作における被験者の学習目標は、視標モデルの出力と運動モデルの出力とを一致させることにある。計算論によれば、視覚フィードバックによる誤差は内部モデルを修正するのに使われる重要な学習信号となる⁹⁾。

新規の感覚運動変換の学習について研究を行った例としては、トラッキング課題において、ポインティング・デバイスの操作方向とカーソルの移動方向

との関係が反転するもの¹⁰⁻¹²)や回転しているもの¹³)などがある。

また、トラッキング課題は古くから患者を対象とした検査にも応用されており、たとえば、小脳性運動失調症の患者を対象としたもの¹⁴)や健忘症の患者を対象としたもの¹⁵)がある。

2.3 迷路探索課題

迷路を解く課題自体は一般によく見られるものだが、ウェクスラー式知能検査 WISC 中の動作性検査の一つとして位置づけられ、他の下位検査と共通して、知覚的体制化、空間的能力、非言語的推理、視覚-運動の協応などの能力が必要とされており、また、迷路の課題に独自の能力として、視覚的パターンをたどる力と見通し能力が挙げられている^{16, 17})。また、迷路の課題は認知症高齢者の検査にも利用されている¹⁸)。

本稿で紹介する迷路探索課題 (maze-searching task) は、ディスプレイ上に表示させた迷路を操作器を制御して探索させるというもの¹⁹⁻²¹)である。実験においては、迷路はその経路の全体を表示するのではなく、ホールと呼ばれる穴を通して一部しか表示されないようにして、記憶ステージでは正解経路を探索しつつ経路を記憶させ、探索ステージではその記憶をもとに正解経路を探索させる。この際、ホールの大きさと記憶ステージの時間が実験条件のバ

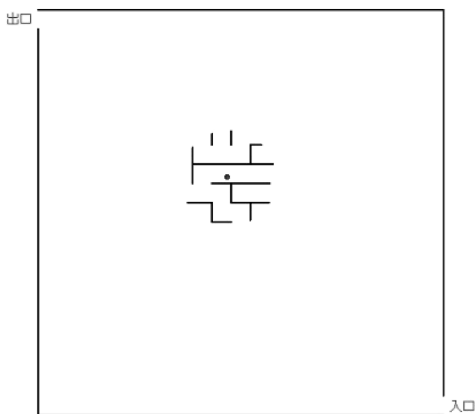


図3 迷路探索課題の実行画面

ラメータとなる。

このような迷路探索課題は、知覚運動協応を要するという点では知覚運動課題の一つであるが、画像的記憶²²)、空間認知^{23, 24})、視空間的作動記憶²⁵) (visuo-spatial working memory) の機能とも強く関連している。

作動記憶²⁶) (working memory) とは、わたしたちが言語の理解や暗算による計算などを行うときに用いられる、情報の保持機能と処理機能の両方を兼ね備えた記憶システムである。しかし、作動記憶については音韻的情報に着目した研究が多く、視覚的情報が推論、問題解決、思考などの認知過程においてどのような役割を果たすかについては、まだ十分に明らかにされているとはいえない。

3. 生理学的・心理学的指標

3.1 反応時間

19世紀中頃、ヘルムホルツ (Helmholtz G.) が神経の伝導速度の測定に成功したことに触発されて、オランダの生理学者ドンダース (Donders F. C.) が心の速度の測定を試みたのが反応時間測定²⁷)の始まりとされる。反応時間 (reaction time; RT) は、心理学の測定指標としてはもっとも長い歴史を有しており、現在でも頻繁に採用されている²⁸)。

反応時間とは、通常、刺激の提示から反応が生じるまでの時間を指す。単に刺激を検出して反応する場合は単純反応時間、刺激に対して何らかの判断を下し、その判断に対応した反応を選択する場合は選択反応時間と呼ばれる²⁸⁻³⁰)。

3.2 眼球運動

(1) 眼球運動の役割

人間の左右眼における共通視野は約 60° の広がりを持っているが、視力は網膜中心部の狭い範囲のみ大きく、周辺部では急激に低下する。すなわち、人間は網膜中心部でしか物を詳しく見ることができない。そのため、眼球を絶えず上下左右に動かし、見ようとする外界の対象物の像を網膜の中心に持つ

てくる必要がある。これが**眼球運動**である³¹⁾。

人間の**高次認知過程**は 100 ms 以下の細かい時間単位で行われるとされるが、視線測定は人間が見ているものを 100 ms 以下の時間分解能で特定可能であるため、高次認知過程の観察に適している³²⁾。眼球運動の特性を観察することで、人間の頭脳の高次中枢で行われている情報処理過程解明への一つの手がかりになることが期待される。

(2) 眼球運動の種類

眼球運動には、次のような種類のものが知られている³³⁾。

(a) 跳躍性運動 (saccadic movement)

静止している対象を見ているときに視線の移動が生じる場合があるが、このような視線の移動を引き起こす眼球運動のことを**跳躍性運動** (サッケード) と呼んでいる。この眼球運動は非常に高速の跳躍の運動で、その一般的特性は次のとおりである。

- ・ 立ち上がり時間：1/20～1/100 s
- ・ 最高速度：300°/s 以上
- ・ 発生周期：0.15～0.3 s
- ・ 両眼で同時に同方向に生じる。

この跳躍性運動は視覚パターンの情報処理において、学習や記憶とも関連して重要な役割を果たしていると考えられる。

なお、跳躍性運動は、断続性運動、衝動性運動、飛越運動、サッカードなどと呼ばれる場合もある。

(b) 随従性運動 (smooth pursuit movement)

これは運動している対象を視線が追うときのスムーズで低速の眼球運動であり、次のような特徴がある。

・ 一般に静止している対象を見ているときには、意識的にこの運動を行おうとしてもできない。しかし、対象を注目しようとする意識が薄い場合にはできる。

- ・ 最高速度：30°/s 程度
- ・ 高速で移動している対象を追う場合には、跳躍性運動とこの**随従性運動**とが混在する。すなわち、

まず高速の跳躍性運動によって対象を中心窩上に捕らえ、その後でこの随従性運動によって対象を中心窩上に維持しようとする。

なお、随従性運動は、追従運動、追従運動、滑動性運動、連続性運動などと呼ばれる場合もある。

(c) 輻輳開散運動 (vergence movement)

遠くを見たり近くを見たりするとき、見る対象の遠近によって両眼の視線の方向が変わる。このような場合の眼球運動は両眼の視線の交叉角を変えるためのもので、**輻輳開散運動**と呼ばれている。この運動は遅く、立ち上がり時間も 0.5 s 以上である。

(d) 固視微動 (small involuntary movement)

ある一点を注視しても視線の動きを完全に止めてしまうことはできない。眼球は意識することはできないが、常に見ランダムな微小運動を行っている。このように、静止対象を注視しているときに観測される眼球の不随意の微小運動を**固視微動**と呼ぶ。固視微動には、フリック、ドリフト、トレマと呼ばれる運動成分があることが知られている。

(3) 停留点

視線は 1 回サッケードが発生すると、次のサッケードが発生するまでの間、1 箇所停留する。視線データの分析にはサッケードおよび視線の停留位置 (**停留点**と呼ぶ) に関する情報が用いられることが多い³²⁾。

停留点には以下の 2 種類の情報が含まれる。

- ・ 停留点座標
- ・ 停留時間

停留点の定義法にはさまざまなものがあるが、角速度が用いられることが多い。n 番目および n+1 番目の視線データについてその間の角速度を求め、一定値以下であれば停留状態、そうでなければサッケードであると定める。同一の視線データでも定義法が異なると、停留点が異なる場合がある。また、閾値に大きく依存することにも注意する必要がある。

停留時間は一般には 100 ms から 300 ms 程度であ

るが、1000 ms 以上になることもある。

3.3 瞳孔反応

(1) 瞳孔の構造

目を正面から見たとき、黒い目、青い目などといわれる中心部分を一般に瞳というが、正確には虹彩といわれる色素に富んだ部分が瞳であり、虹彩に囲まれた孔の部分、すなわち虹彩によって形成される眼光学系の開口部が**瞳孔** (pupil) である。瞳孔は水晶体と前房部の中間に位置し、虹彩にある瞳孔括約筋によって小さくなり、瞳孔散大筋によって大きくなる。瞳孔収縮期は主に動眼神経の中の副交感神経が、瞳孔散大期は主に交感神経が支配していると考えられている。瞳孔が小さくなることを**縮瞳**、大きくなることを**散瞳**という。人間の場合、正常状態では瞳孔はほぼ円形であり、成人の場合、瞳孔直径は目に入射する光量によって、最大 8 mm から最小 1.5 mm くらいの範囲で変化する³⁴⁾。

(2) 虹彩による瞳孔反応の役割

瞳孔は外界の光を網膜へ導く際、光を眼球の中心に導くとともに、眼球内に入射する光の量を調節することが主要な働きである。瞳孔にはその大きさを小さくすることによって焦点深度を増大させてピント調節を容易にする。また、色収差や球面収差を減少させる働きも生じる³⁵⁾。

(3) 精神活動に伴う反射

瞳孔は対光反射や近見反射などを生じるが、その時々心理的・生理的状态によっても、また、精神活動に伴う反射、性的な関心や感情・好みなどの受動的な精神活動、さらに暗算やイメージ想起などの能動的な精神活動などによっても変動することが知られている。したがって、瞳孔の変化に注目すると、さまざまな精神活動が他覚的に評価できると推定される^{34, 36-38)}。

(4) 認知的負荷の指標

人間の瞳孔径は、言語処理、算術計算、自発的運動、知覚的処理を含んだ、広範な認知課題において課題の困難さに伴って増加することは広く知られた知見である。視環境などの要因の影響を受けやすいという問題点があるにしても、精神的な作業負荷の生理学的指標として有望であるとされている³⁹⁻⁴²⁾。

(5) 瞳孔の自発動揺

視対象の明るさや視距離が一定であっても瞳孔は常に縮小、散大を繰り返している。これを自発動揺という。自発動揺はおよそ 3 Hz 以下であるが、振幅は大きい場合 2~3 mm にもなるといわれており、事象に関連した瞳孔運動が小振幅の場合、瞳孔の事象関連運動は自発動揺に埋もれてしまう可能性がある。瞳孔変化を手掛かりとした各種実験においてはこの点が問題になることもある³⁴⁾。

4. おわりに

本稿では、知覚と運動の相互作用について研究するための実験方法として、知覚運動課題について述べ、実験において測定する生理学的・心理学的指標について解説した。しかしながら、ここで紹介した実験課題や指標は、主として筆者がこれまでの研究において使用したものであることは了解していただきたい。

参考文献

- 1) Zago M., Iosa M., Maffei V., Lacquaniti F.: Extrapolation of vertical target motion through a brief visual occlusion, *Experimental Brain Research*, Vol.201, No.3, (2010)
- 2) Bares M., Lungu O. V., Husarova I., Gescheidt T.: Predictive motor timing performance dissociates between early diseases of the cerebellum and Parkinson's disease, *The Cerebellum*, Vol.9, No.1 (2010)
- 3) 中園正吾, 小堀 聡: ボタン押し課題における視線移動特性と学習過程. *バイオメカニズム学会誌*, Vol.32, No.4, pp.230-239 (2008)
- 4) Craik K. J. W.: Theory of the human operator in control systems: I. The operator as an engineering system. *British*

- Journal of Psychology, Vol.38, pp.56-61 (1947)
- 5) Poulton E. C. : Tracking skill and manual control. Academic Press (1974)
 - 6) Kobori S., Abe Y., Nakazono S. : Motor learning in suppressed tracking tasks. Abstracts of the 29th International Congress of Psychology 2008, p.319 (2008)
 - 7) Nakazono S., Abe Y., Kobori S. : Pupillary responses during learning of suppressed tracking tasks. Proceedings of the 6th International Conference of Cognitive Science, pp.46-49 (2008)
 - 8) Beppu H., Nagaoka M., Tanaka R. : Analysis of cerebellar motor disorders by visually guided elbow tracking movement ; 2. Contribution of the visual cues on slow ramp pursuit. Brain, Vol.110, pp.1-18 (1987)
 - 9) Kobori S., Haggard P. : Internal models and transfer of learning in pursuit tracking task. Proceedings of European Cognitive Science Conference 2007, pp.498-503 (2007)
 - 10) 小堀 聡 : 反転を伴うトラッキング課題における学習とその転移. 情報科学技術レターズ, Vol.6, pp.295-298 (2007)
 - 11) 吉澤 誠, 二坂広美, 竹田 宏, 大友 仁, 鴻巣武, 佐藤 元, 大坂和久 : 人間オペレータの制御特性の異方性と脳の両側性. 医用電子と生体工学, Vol.26, No.4, pp.9-17 (1989)
 - 12) 小堀 聡 : 反転要素を制御対象とした上肢トラッキング動作の学習過程. 人間工学, Vol.28, No.5, pp.243-249 (1992)
 - 13) Imamizu H., Miyauchi S., Tamada T., Sakaki Y., Takino R., Puetz B., Yoshioka T., Kawato M. : Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. Nature, Vol.403, pp.192-195 (2000)
 - 14) Kobori S., Tsuda H., Tokimasa A., Abe K. : Evaluation of upper limb motor function by means of tracking motion on reversal element. The Transaction of the IEICE, Vol.E 74, No.5, pp.1047-1050 (1991)
 - 15) 赤松智子, 元村直靖, 小堀 聡 : 新しい手続き記憶課題の開発とその学習過程の分析-認知リハビリテーションへの可能性-. 神経心理学, Vol.17, No.2, pp.139-146 (2001)
 - 16) Kaufman A. S. (著), 中塚善次郎, 茂木茂八, 田川元康 (訳) : WISC-R による知能診断. 日本文化科学社, pp.143-144 (1983)
 - 17) 大六一志 : WISC-III 検査結果を解釈する手順. 藤田和弘, 上野一彦, 前川久男, 石隈利紀, 大六一志 (編), WISC-III アセスメント事例集-理論と実際-, 日本文化科学社, pp.12-43 (2005)
 - 18) 篠崎和弘, 井上 健 : 老化による痴呆と迷路課題および単純図形の記銘再認課題との関連. 空間認知の発達研究会 (編), 空間に生きる-空間認知の発達の研究-, pp.217-218 (1995)
 - 19) 小堀 聡 : 迷路探索での人間の問題解決能力の解析. 情報処理学会第 42 回全国大会講演論文集 (分冊 2), pp.269-270 (1991)
 - 20) 小堀 聡, 小路口心二 : 迷路探索において利用される情報と知識の検討. 情報処理学会第 44 回全国大会講演論文集 (分冊 2), pp.193-194 (1992)
 - 21) 中園正吾, 小堀 聡 : 迷路探索課題における発達障害児の空間認知機能. 第 24 回ハ工学カンファレンス講演論文集, pp.95-96 (2009)
 - 22) 井上 毅 : イメージと空間の情報処理. 森 敏昭, 井上 毅, 松井孝雄, グラフィック認知心理学, サイエンス社, pp.101-107 (1995)
 - 23) Blades M. : 子どもの経路を研究するための研究パラダイムと方法論. Foreman N., Gillet R. (著), 竹内謙彰, 且 直子 (訳), 空間認知研究ハンドブック, 二瓶社, pp.117-142 (2001)
 - 24) Marzolf D. P., Deloache J. S. : 認知発達を測る方法としての探索課題. Foreman N., Gillet R. (著), 竹内 謙彰, 且 直子 (訳), 空間認知研究ハンドブック, 二瓶社, pp.143-164 (2001)
 - 25) Logie R. H. : Visuo-Spatial Working Memory. Lawrence Erlbaum Associates, pp.63-93 (1995)
 - 26) 三宅 晶 : 短期記憶と作動記憶. 高野陽太郎 (編), 認知心理学 2 記憶, 東京大学出版会, pp. 71-99 (1995)
 - 27) Chocholle R. : 反応時間. 萬代敬三郎 (訳), 現代心理学Ⅱ 感覚と運動, 白水社, pp.102-141 (1971)
 - 28) 桐田隆博 : 反応時間測定法. 海保博之, 加藤 隆 (編), 認知研究の技法, 福村出版, pp.73-78 (2002)
 - 29) 麻生 勤, 古賀俊策 : 反応時間. 佐藤方彦 (監), 人間工学基準数値数式便覧, 技報堂出版, pp.163-165 (1994)
 - 30) 赤松幹之 : 反応時間. 産業総合研究所人間福祉医学研究部門 (編), 人間計測ハンドブック, 朝倉書店, pp.341-343 (2003)
 - 31) 安田 稔 : 眼球運動. 樋渡涓二 (編), 視聴覚情報概論, 昭晃堂, pp.41-46 (1987)
 - 32) 大野健彦 : 視線から何がわかるか-視線測定に基づく高次認知処理の解明. 認知科学, Vol.9, No.4, pp.565-579 (2002)
 - 33) 淀川英司, 東倉洋一, 中根一成 : 視聴覚の認知科学. 電子情報通信学会, pp.41-57 (1998)

- 34) 福田忠彦：生体情報論. 朝倉書店, pp.137-144 (1997)
- 35) 福田忠彦：生体情報システム論. 産業図書, pp.207-210 (1995)
- 36) 松永勝也：瞳孔運動の心理学. ナカニシヤ出版, pp.78-95 (1990)
- 37) Matthews G., Davies D. R., Westerman S. J., Stammers, R. B.: Divided attention and workload. Human performance: Cognition, stress and individual differences, Psychology Press, pp.87-106 (2000)
- 38) Sirevaag E. J., Stern J. A.: Ocular measures of fatigue and cognitive factors. Backs R. W., Boucsein W. (Eds.), Engineering psychophysiology, Lawrence Erlbaum Associates, pp.269-287 (2000)
- 39) Beatty J.: Task-evoked pupillary response, processing load, and the structure of processing responses. Psychological Bulletin, Vol.91, pp.276-292 (1982)
- 40) Kobori S., Haggard P.: Cognitive load during learning of tracking task. Proceedings of the European Cognitive Science Conference 2003, pp.119-204 (2003)
- 41) 小堀 聡：感覚運動変換の学習における散瞳現象. バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.4, pp.206-213 (2007)
- 42) 小堀 聡, 阿部陽祐：反転を伴うトラッキング課題の学習過程と瞳孔反応. 生体医工学, Vol.45, No.1, pp.106-113 (2007)