九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

創立百周年記念論文集　下巻

九州大学文学部紀要・叢書・図書委員会

https://hdl.handle.net/2324/7358024

出版情報：2025-03-31. School of Letters, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

非接触式の触覚

――心理学実験とベイズ推定による理解――

光　藤　宏　行

はじめに

普段の生活の現実場面の中で、わたしたちはさまざまな情報に接して暮らしている。デスクワークをしている人であれば、目の前のパーソナルコンピュータは視覚であり、外を通る車の音は聴覚情報である。キーボードを打つ手指には、キーの跳ね返りの触覚情報が入ってきて、机に置いた腕は机から押し返される圧力を感じている。このような、いわゆる五感に基づく入力が感覚情報（sensory information）である。教室にいる小学生であれば、先生やクラスメートの話し声は聴覚情報、風に揺れるカーテンは視覚情報、机の柱に当たる足や膝からは触覚情報が与えられている。

感覚情報を脳・心がどのように処理しているかを調べる研究トピックは、知覚（perception）および認知（cognition）である。これらは一言で認識と言い換えることもできる。知覚・認知している対象は、わたしたちヒトにとって感じられる現実であって、物理的な現実そのものではない。例えば視覚においては、外の世界の物理的な事象である電磁波自体を捉えているわけではない。電磁波の特定の範囲（約380-780 nm）の波長のみがヒトにとっては光（可視光線）としての感覚体験をもたらす。物理的な電磁波という意味では、電子レンジや地上デジタル放送、赤外線、紫外線なども光の仲間である。これらは直接的には感じることはできない。電子レンジは水分子をもつ物体に電磁気力によって作用し、地上デジタル放送は専用のアンテナで受信し放送局からの信号を専用の装置で解読している。赤外線・紫外線はヒトには見えないが、ヘビ、ザリガニ、

昆虫、鳥の一部などは視覚に利用している（光藤、2018）。

このように感覚情報は、感じられる現実・現在を形作る入力である。わたしたちは現実の日常場面では、今現在のことだけでなく、未来のことも見据えて生活している。デスクワークであれば、これからすべき課題、小学校の教室であれば次の時限の科目について考えることも自然である。仕事中に電話が鳴れば適切に応対する必要があるし、教室で先生から指名されたときに適切に答えることができれば、褒められて嬉しいだろう。このように考えると、知覚・認知の目的は、今現在の現実の認識だけでなく、現在の情報に基づいて、まだ実現していない将来にうまく対応していくという側面もある。本論文では、ヒトが持つ視覚と触覚の予測・認識の仕組みに焦点を絞り、心理学実験と理論的な視点（ベイズ推定）に基づいて考察する。

視覚または触覚情報が一部欠損している場合の認識

初めに、視覚、つまり見ることについての認識のプロセスを考えてみよう。図１（A）・（C）の例では、図形が、正方形によって一部覆われているように知覚される。視覚の入力として、それぞれの２次元的な図がそのまま網膜に投影されると仮定する。正方形によって一部覆われている図形は、一部隠されていない全体として捉えたときは、どのような形だろうか？ありうる選択肢の例を図１（B）・（D）に示した。多くの人は規則的な形を想像すると思われる。プライミング課題（van Lier et al., 1995）や視覚探索課題（Rensink & Enns, 1998）という認知課題を使った心理学実験によって、直接は見えていない部分が脳内または心的に存在する図形として処理されることが示されている。このように考えると、視覚の重要な目的の一つは、見えている部分から見えていない部分を推測することであるといえる。

同様の例は、触覚においても存在するだろうか？言い換えると、触れている部分から、触れていない部分を推測する仕組みはあるだろうか？触覚の感覚入力には、認識したい対象を能動的に探索するために触れるという動的な側面と、

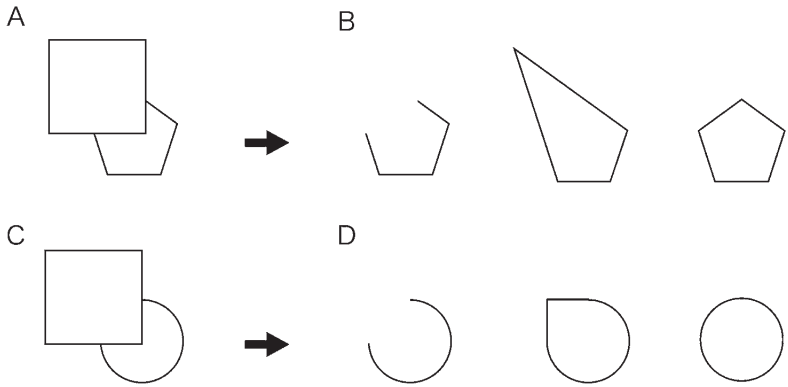

図1　視覚における部分的遮蔽。(A) で示される正方形によって一部遮蔽されている輪郭図形のありうる解釈は、(B) に示すように何種類もある。(B) の左端は輪郭が閉じていない解釈、中央は輪郭を局所的に延長し繋いだ解釈、右端は回転対称となる正五角形である。一般的には、全体的にまとまりのある正五角形の解釈が優勢である。(C) もまた正方形によって一部遮蔽された輪郭図形であり、(B) と同様に、全体的にまとまりのある (D) 右端の円の解釈が優勢である。

皮膚または筋肉に配置された機械受容器が圧力を受動的に受け取るという静的な側面の２つがある。Mitsudo (2015) は、主に後者の皮膚に与えられる機械的刺激に着目し、心理学実験によって検討を行った。

Mitsudo (2015) の実験では、机の上に置かれた立体物の上面パターン (図２) に成人の実験参加者が手のひらで触れて、触れていない部分の空洞がどのように感じられるかを調べた。原則として実験中、参加者には触れる物体について

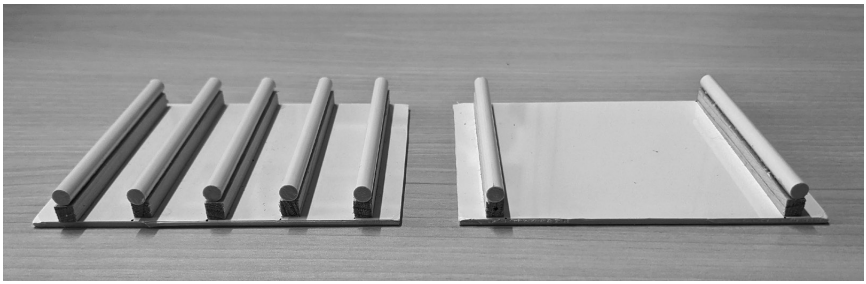

図2　Mitsudo (2015) の実験で用いられた触覚パターン刺激の例。丸棒の要素間の間隔が左は20 mm、右は80 mm である。実験参加者は手のひらを伸ばして丸棒の上部のみに触り、下の溝の空間がどのくらい深いかを尋ねられた。

視覚情報または知識は与えられない。実験１では、溝の深さの位置を参加者に推測してもらう課題を行い、推測した底面の位置と溝の間の距離には正の相関があることを明らかにした。実験２・３では、溝の間の距離が、垂直方向の位置についての触覚的ワーキングメモリー課題に影響を与えることを示した。実験４では、触覚パターンとほぼ同時に、対応する視覚像を模擬したコンピュータ・グラフィックス画像を参加者に提示し、視覚パターン形状について素早く判断する課題を行った。その結果、触覚パターンから連想された視覚パターンの判断は容易であることが明らかとなった。

これらの実験の結果を要約すると、触覚による認識においては、触れている部分の間の距離が大きいほど、直接触れていない部分の空洞を深く、大きく見積もっていることになる。能動的な触覚入力に着目した研究では、杖で物体を叩いたときに手に伝わる振動によって、直接触れていない物体の形が認識できるという研究がある（Barac-Cikoja & Turvey, 1993）。このような研究を総合すると、視覚と同様に触覚においても、与えられた感覚情報から、（まだ）触れていない部分について認識しているといえる。

ベイズ推定

与えられた感覚情報から、直接入力されていない事柄を推測するということの理論化において役立つと考えられている枠組みに、ベイズ推定がある（光藤、2016）。ベイズ推定は、18世紀の牧師であったトーマス・ベイズによる確率的定理のアイデアを元にしている。現代では、迷惑電子メールの判定、画像認識、統計データ処理のためのコンピュータ・アルゴリズムとして幅広く応用されている。ベイズ推定の骨子は、

事後分布 ∝ 事前分布×尤度　　（１）

である。経験データ（感覚刺激またはその結果）を得る前段階の推定を事前分布

（prior distribution）、経験データが得られる可能性を尤度（likelihood）、経験データを得たあとの推定を事後分布（posterior distribution）と呼ぶ。部分的な感覚入力に基づいて、直接的には感覚入力されていない事柄を推測することは、事後分布を評価することに対応する。事後分布は事前分布と尤度の関数であるため、これらについて具体的な値を想定し、計算機シミュレーションを行う。ベイズ推定の枠組みは、脳・心がどのように働いているかを調べる研究の枠組みとしても広く用いられてきた（Knill & Richards, 1996; Parr et al., 2022; Weiss et al., 2002）。

式（1）のベイズ推定の枠組みは一般的・形式的なもので、そのままでは具体的な結果の予測や解釈を行うことはできない。ベイズ推定の枠組みを、迷惑電子メール判定などの実用的な目的で使う場合、経験データ（尤度）に基づいて、事前分布を更新していくことが役に立つ。それに対し認識の問題における事前分布は、外界の物理構造の制約など、容易には変化しないものを仮定することが多い。例えば、視覚においては光源は上方にあることを仮定して陰影から３次元構造を復元したり、剛体の運動を仮定して視覚的画像変化を解釈する。このような事前分布は静的で、ある程度の訓練で変化することはあるが大きく変化しないものとして仮定される（Mitsudo et al., 2009, 2013）。

Mitsudo（2015）で検討した実験場面、すなわち触れた部分からまだ触れていない部分を推測する状況を考えてみよう。事前分布として、３次元環境についての構造の一般情報、つまり物理環境を記述する制約条件を想定する。具体的には、触れていない溝の深さは触覚要素間の距離に比例すると仮定する。尤度として、触覚パターン刺激を想定する。単純化のため、事後分布は尤度の一次関数（すなわち $y=f(x)$ という形式）とする。式（1）について、溝の深さが要素間の間隔に比例するという事前分布は、一次関数における傾きの定数として捉えることができる。ここではさらに単純化して傾き（事前分布）＝ 1 とする。尤度として要素間の間隔を想定した場合、特定の幅ではそれに応じた深さが事後分布として得られる。言い換えると、要素間の間隔がそのまま感じられた溝の深さに対応することになる。このような考察で得られた結果は、Mitsudo

(2015) の実験、特に実験１の結果をうまく再現する。

ここでの議論のキーポイントは、尤度と事後分布をつなぐ事前分布である。前述の通り、物理世界の制約として、触れている要素の間の間隔と触れていない溝の深さの間に正の相関を仮定している。この仮定が妥当であるかを検討するために、Mitsudo (2015) では日常目にする凹部をもつ人工物体87個について、要素間間隔と溝の深さを測定した。その結果、正の相関 (r = .59) が得られた。よって前述の仮定は妥当であると考えられる。著者は、この相関は、一定強度を維持するための物理的な構造の制約条件に根ざしていると考えている。例えば、凹部の溝を深くするためには、触れている要素は一定強度を保つために要素またはその根元を太くする必要があり、その制約を満たす物体として溝の間の間隔も広げる必要があると思われる。

事前分布としての相関関係は、前述の視覚における部分的遮蔽の事例でも当てはまるように思われる。今回紹介したベイズ推定のアイデアを視覚に置き換えてみよう。この場合の事前分布としての相関関係とは、見えている部分と見えていない部分が同じ、または類似していると言い換えられる。例えば、部分的に隠されている円があるとする (図１C)。この場合、見えている部分の曲率が、見えていない部分の曲率と同じ、または類似しているということになる。これは、わたしたちの見えをうまく説明しているように思われる。

触れていない物体に触れたらどうなるか

今までの議論では、(まだ) 触れていない対象について推測を行う、という認識プロセスに焦点を当てていた。それでは、触れていなかった対象に実際に触れた場合、どのように認識されるだろうか。つまり予測のもとでの現実をいかに認識するか、という問題である。Mitsudo (2015) の実験では推測のプロセスに焦点を絞っていたため、触れた場合にどう認識されるかという問題は実験的には検討されていない。

触れていない物体に触れるという場面設定において、有名な知覚現象がある。

いわゆる、大きさ・重さの錯覚（size-weight illusion）である。大きい段ボール箱と小さい段ボール箱を準備し、両方に 1 kg の重りをいれて比較したとき、どちらが重く感じるだろうか？実際に試してみると、小さい段ボール箱の方が重く感じられる。この錯覚の体験には、見て触った後に判断するという図式がある。大きい段ボール箱は、重いものを連想させる。言い換えると、視覚によって「重そう」という期待が生じる。その後、触覚・筋運動感覚によって重さを判断すると、予測に反する形で、大きい箱が軽いという判断がなされる。

この結果は直感的に理解しやすく、多くの心理学実験で再現されている一方（Saccone et al., 2019）、説明は予想外に困難である。前節で紹介したベイズ推定のアイデアを単純にあてはめてみよう。事前分布として、物体の重さは視覚的な大きさ（体積）に比例すると仮定する。触覚情報が同じであれば尤度も同じであるため、上のベイズ推定を単純に適用すると、視覚的に大きい段ボール箱の方が、重く感じることが予想されてしまう。これは実験の結果に反しているため、ベイズ推定の枠組みについて新たなアイデアを導入する必要がある。

本論文では、尤度および事前分布の不確かさ（uncertainty）に着目する。体積が大きい物体は、その密度について不確かさがある場合、とりうる重さの幅は、体積が小さい物体と比較して大きい。したがって、大きい物体は重さについての尤度関数がなだらかになると仮定する。さらに、物理環境としての事前分布として、わたしたちは重い物体より軽い物体に遭遇する可能性の方が高いと仮定する。この尤度関数と事前分布のもとでは、大きい物体が軽く感じられるという実験結果は説明できる。予備的に行った数値シミュレーションの結果を図３に示す。

この説明では、視覚情報と触覚（・筋運動感覚）情報の組み合わせとして２次元的な尤度関数を想定している。同様に事前分布についても、視覚と触覚情報の組み合わせによる２次元的な分布を想定している。これらの前提は、視覚情報のみを事前分布とし、触覚情報を尤度と見なす従来のベイズ的説明の枠組み（Brayanov & Smith, 2010）とは異なっている。近年の心理学実験研究では、視覚と触覚情報入力のタイミングはほぼ同時であっても大きさ・重さ錯覚が生起

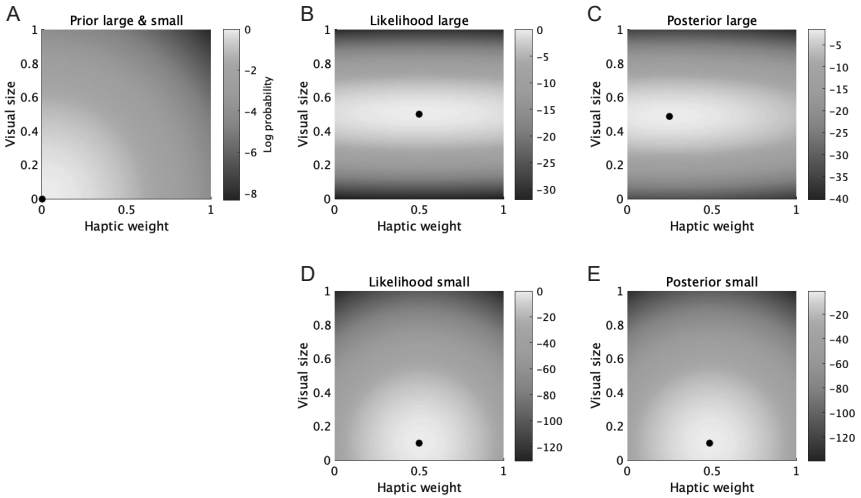

図３　大きさ・重さ錯覚現象におけるベイズ推論の一例。各図は、横軸が触覚による重さ（質量）、縦軸が視覚的な大きさ（体積）であり、グレースケールの濃淡は相対的な確率を対数表記したものを表す。各図の黒点はそれぞれの分布が最大値となる座標である。（A）：世の中にありうる物体全体を考えた事前分布であり、大きな物体および小さな物体いずれの推定の場合にも適用される。（B）：大きな物体に関する尤度。（C）：大きな物体について事前分布と尤度を掛けて計算した事後分布。（D）：小さな物体に関する尤度で、重さは大きな物体と同じである。（E）：小さな物体について事前分布と尤度を掛けて計算した事後分布。（C）と（E）を比較すると、重さの推定値は大きな物体が左に寄っており、実際の質量が同じ場合には大きい物体ほど軽く感じられるという結果が再現されている。

したり（Plaisier et al., 2019）、明確な期待がなくとも錯覚は生起する（Peters et al., 2016）という報告がある。したがって、研究の説明可能性という点で、２次元的な尤度関数を考える方が応用可能性は高いと考えられる。著者は、このような無時間的ベイズ推定の枠組みは、触れていない部分の認識の問題（Mitsudo, 2015）にも適用できると考えている。

まとめ

本論文では、直接は見たり触れていない対象について認識するという問題に対して、ベイズ推定を使って定式化するアイデアを提示した。今回提案した枠

組みが妥当であるかを検討するためには、計算機による詳細な数値シミュレーションを行ったり、触れていない部分を推測したのちにその部分に触れて判断を求めるなどの心理学実験が有用であるだろう。

引用文献

Barac-Cikoja, D., & Turvey, M. T.（1993）. Haptically perceiving size at a distance. *Journal of Experimental Psychology: General, 122*（3）, 347-370. doi:10.1037//0096-3445.122.3.347

Brayanov, J. B., & Smith, M. A.（2010）. Bayesian and “anti-Bayesian” biases in sensory integration for action and perception in the size-weight illusion. *Journal of Neurophysiology, 103*（3）, 1518-1531. doi:10.1152/jn.00814.2009

Knill, D. & Richards, W.（1996）. *Perception as Bayesian Inference*. Cambridge University Press.

Mitsudo, H.（2015）. Inferring the depth of 3-D objects from tactile spatial information. *Attention, Perception, & Psychophysics, 77*（4）, 1411-1422. doi:10.3758/s13414-015-0878-5

光藤宏行（2016）. 牧師さんは確率がお好き？越智啓太（編）心理学ビジュアル百科（pp. 116-117）創元社

光藤宏行（2018）. 色の見分け方は男女で違う 越智啓太（編）意識的な行動の無意識的な理由（pp. 12-15）創元社

Mitsudo, H., Kaneko, H., & Nishida, S.（2009）. Perceived depth of curved lines in the presence of cyclovergence. *Vision Research, 49*（3）, 348-361. doi:10.1016/j.visres.2008.11.004

Mitsudo, H., Sakai, A., & Kaneko, H.（2013）. Vertical size disparity and the correction of stereo correspondence. *Perception, 42*（4）, 385-400. doi:10.1068/p7387

Parr, P., Pezzulo, G., & Friston, K. J.（2022）. *Active Inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*. The MIT Press.

Peters, M. A., Ma, W. J., & Shams, L.（2016）. The Size-Weight Illusion is not anti-Bayesian after all: a unifying Bayesian account. *PeerJ, 4*, e2124. doi:10.7717/peerj.2124

Plaisier, M. A., Kuling, I. A., Brenner, E., & Smeets, J. B. J.（2019）. When does one decide how heavy an object feels while picking it up? *Psychological Science, 30*（6）, 822-829. doi:10.1177/0956797619837981

Rensink, R. A., & Enns, J. T.（1998）. Early completion of occluded objects. *Vision Research, 38*（15-16）, 2489-2505. doi:10.1016/s0042-6989（98）00051-0

Saccone, E. J., Landry, O., & Chouinard, P. A.（2019）. A meta-analysis of the size-weight and material-weight illusions. *Psychonomic Bulletin & Review, 26*（4）, 1195-1212. doi:10.3758/s13423-019-01604-x

van Lier, R. J., Leeuwenberg, E. L., & van der Helm, P. A.（1995）. Multiple completions primed by occlusion patterns. *Perception, 24*（7）, 727-740. doi:10.1068/p240727

Weiss, Y., Simoncelli, E. P., & Adelson, E. H. (2002). Motion illusions as optimal percepts. *Nature Neuroscience, 5*(6), 598-604. doi:10.1038/nn858