

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700309

研究課題名(和文) ベイズモデルに基づいた人間の知覚適応現象の統合的研究

研究課題名(英文) An integrative study on adaptation of human perception based on Bayesian models

研究代表者

佐藤 好幸 (SATO, Yoshiyuki)

電気通信大学・情報システム学研究科・助教

研究者番号：00548753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：人間の脳は外界や神経系に存在する様々な不確実性に直面している。直接観測することのできるものの情報(尤度関数)と事前に持っていた情報(事前分布)を使ってこれに対処することができることが知られているが、どのようにこれらの情報を学習できるのだろうか？本研究では、これらの二つの要素の学習の関係性についての研究や、特に、今まであまり注目されなかった尤度関数の学習についての理論的・実験的研究を行った。その結果、両者の学習で異なっている点を明らかにし、さらに尤度関数の学習が非常に効率的かつ柔軟に行われていることを示した。

研究成果の概要(英文)：The human brain faces many kinds of uncertainty in the outer world and the nervous systems. It has been known that we can deal with such uncertainty using information from directly observable quantities (called likelihood) and information that is known prior to the observation. How can we learn those information? In this study, we theoretically and experimentally investigate how the learning of those two factors relate to each other, and especially how the likelihood is learned, which is the problem that few studies has put focus on so far. We showed how the learning of the two factors differed, and showed that the likelihood is learned very effectively and flexibly.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：認知科学 適応現象 ベイズ推定 感覚統合 尤度関数

1. 研究開始当初の背景

人間は外界や神経系に存在する様々な不確実性に直面している。脳はこのような様々な不確実性をもつ情報から真の情報を精度よく推定しなければならない。近年、不確実性に対処するための数学的手法の一つであるベイズ推定による知覚・運動機能のモデル化が著しい成功を収めている。つまり、人間の知覚や運動はその意味で最適な計算をしていることが示唆されてきている。

人間の知覚・運動が持つ重要な性質として適応現象がある。外界が変化した時、また自らの身体や神経系が怪我や成長などにより変化した時には、知覚や運動をそれに追従して合わせていくことで外界との正確な相互作用を保つことができる。人間は提示された刺激の統計的性質を学習し、それに応じて知覚や運動を変化させていることが実験的にも明らかになってきている。特にここでは知覚の適応現象に焦点を当てる。

近年、刺激の平均値に対する適応には二種類が存在することが明らかになってきた。例えば、一定の時間差をもつ音と光を繰り返し提示すると、その時間差の刺激を同時と感じるようになることが知られている。このタイプの適応は従来、他の感覚などにおいても広く観察されていた現象である。ところが最近、触覚時間差知覚においてこれとは逆の、繰り返し提示した刺激がむしろ同時であると感じにくくなる適応現象が発見された。しかしなぜこのように二種類の適応が存在するのか、また何がタイプを決定しているのかはわかっていない。

一方、このような二種類の適応現象と知覚のベイズモデルは非常に興味深い関連性を持つことが研究代表者らの過去の研究も含めた知見によりわかってきた。ベイズ推定においては、観測値を得たうえで推定したい量の事後確率分布を求めるが、これは観測から直接的に得る情報である尤度関数と、前もって持っている情報である事前確率分布という二つの要素の積で決定される。研究代表者らは過去の研究によって、尤度関数と事前確率の平均値の適応的学習を導入したモデルを構築し、このモデルがパラメータに依存して両方の適応現象を再現することを示し、適応タイプの決定条件を導出した。このモデルから、実験における提示刺激の時系列の統計的性質を変化させることにより適応タイプをコントロールすることが可能である、という非常に重要な予測を得た。

過去の様々な分野での研究により、人間は事前確率分布を柔軟に学習できるということが広く知られている。しかし、上記のように尤度関数の学習も人間にとっては重要な要素となりえるにも関わらず、それについては実験的な研究があまり行われていない。

また、知覚のベイズモデルにおいては、尤度関数や事前確率分布の分散も推定値を決

定するための非常に重要なパラメータとなる。分散の大きさは個々の情報の信頼度を示す指標であり、情報を統合する際に大きな影響を持つ。人間は刺激の分散パラメータを適応的に学習できることが実験的にも知られているが、どのようにそれが行われているのかについて詳しいことは分かっていない。

このように、知覚の適応現象に関する複数の実験的事実を、ベイズ推定という共通の枠組みにより理解できることが研究代表者らのモデル研究により示唆されてきた。また、研究代表者らのモデルは適応現象に関して重要な性質を予測してきた。しかし、これらのモデルは未だ実験的に直接検証されていない状況である。また、モデルそのものにも改良の余地は残されている。

2. 研究の目的

人間が示す適応現象の計算論的意義を、ベイズモデルを基礎とした心理実験及び理論的研究により明らかにすることが本研究の目的の大枠である。

より具体的には、以下のような問いに対し解答を得ることを目的とする。

- (1) 知覚の適応現象にはなぜ二種類存在するのか？それを決定する条件は何なのか？
- (2) ベイズモデルにおける尤度関数と事前分布の適応学習を人間は行っているのか？それらはどのように異なるのか、もしくは同じものなのか？
- (3) 確率分布の学習において平均値と分散の学習はどのように行われているのか？
- (4) これらの適応学習は人間の脳機能においてどれだけ一般的なものなのか？

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が過去に構築してきたモデルを発展させ、分布の平均値や分散の学習について個々に実験的に検証する。さらに平均値と分散の学習を統合的に説明できるモデルを構築し、実験的検証を行う。これらの研究により、知覚の適応現象の包括的理解を目指す。

まず、研究代表者らが過去に提案した、刺激の平均値への適応に対する統一モデルについての検証を行う。これらの実験は、心理物理実験において必ず必要になる刺激の統計的性質や休憩時間といった要素が、人間の適応現象にどのような影響を及ぼすかについて重要な知見をもたらすことで、広く認知科学全体に影響を及ぼす可能性のある研究である。

次に、分散適応に対するモデルについて、モデルの改良を行い、より妥当性の高いモデ

ルを構築する．そのうえでモデルの予測を実験的に検証し、実験結果をモデルにフィードバックさせることで、モデルをより妥当なものへと改良する．

また、尤度関数と事前分布の学習とそれらの関係性について実験的に明らかにする．過去に事前分布の学習についての研究は数多くあるが、尤度関数についてはほとんどわかっていない状況である．よって、特に尤度関数の学習に関する性質を実験的に明らかにしていく．

ベイズモデルは抽象的なモデルであり、理論的には様々な感覚・運動モダリティに適用することが可能である．しかし、人間の持つ全ての脳機能が同じ原理によっているとは限らないので、どの程度一般的にベイズモデルとその学習により説明がつくのかも明らかにする必要がある．

最後に、平均値と分散の適応のモデルを統合した包括的ベイズモデルを構築・解析し、このモデルについても実験検証を行う．これらの研究により、適応現象の計算論的意義についての包括的理解を目指す．

4．研究成果

まず最初に、当初計画通りに、研究代表者がこれまで構築してきた適応現象についてのベイズモデルを基礎としてその改良および実験的検証を行った．このモデルによれば、時間差のある刺激の繰り返し提示したときに、その時間差の時系列的变化の統計的性質の違いによって二種類の適応現象をコントロールできる可能性が予測された．本研究においては刺激の時間差が重要であることより、まず、時間的に精度よく刺激生成が可能な実験系を構築した．視覚刺激および聴覚刺激がこの実験系により時間的に精度よく生成されていることを確認し、これを用いて人間を対象に実験を行った．刺激としては二種類の時系列を用いた．片方は刺激の時間差の期待値がランダムウォーク的に変化し、そこに小さい乱数が足されるような刺激で、もう片方は期待値がほぼ固定されていて、その周りに大きい乱数が足されるような刺激である．モデルの改良に関しては、刺激の提示時系列に緩和効果を加えたときの挙動を解析した．実験データを解析した結果、今回の実験パラダイムにおいては、従来研究における報告に比べて、被験者の適応結果が非常に不安定になってしまうことがわかった．

次に、その不安定さの原因を解明するべく研究を行った．上記実験は視聴覚統合を実験系として研究を行ったが、視覚知覚がベイズモデルに従うという研究は過去において数多く存在するが、聴覚知覚においては比較的少ない．そこで、聴覚における本研究で用いるような時間差知覚についての過去の実験

結果がベイズモデルで再現可能であるかどうかをコンピューターシミュレーションを用いて解析した．聴覚の時間差知覚においては、時間縮小錯覚がよく知られている．これは3つ時間差を置いて提示された音の時間的間隔の知覚において、前の2つの時間差と後ろの2つの時間差の関係性によってそれらの時間差が長く感じたり短く感じたりするという錯覚である．この現象をベイズモデルを基礎として、音の同一源性を考慮に入れたモデル化を行い、モデルの挙動が実際の人間の知覚をよく再現可能であることを示した(図1)．この成果は雑誌論文で論文発表

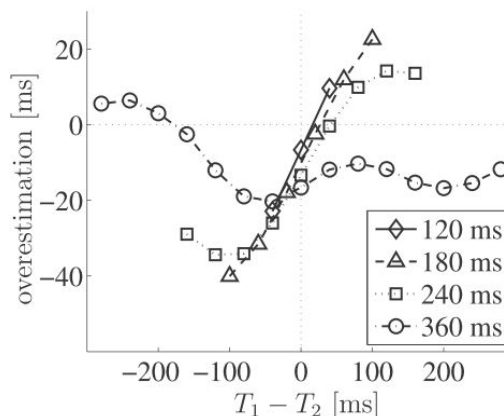


図1：時間縮小錯覚のベイズモデルの予測結果．

を行った．

また、人間はベイズモデルにおける事前確率分布を学習することができるという研究は過去に多く存在するが、尤度関数に関しては実験的検証が少ない．特に、研究代表者らの過去の研究などにより、いくつかの知覚現象が尤度関数の平均値の学習により説明可能であることが示されていたが、尤度関数の分散に関しては理論的・実験的にほとんど研究がない．そこで、本当に尤度関数を人間が学習可能であるかどうかを実験的に検証した．事前分布と尤度関数を実験者がコントロール可能な実験系を構築した．タスクとしてはコインの場所当てタスクを用いた．これはコインに起因する水しぶきの位置だけを見て、コインが落ちた場所を当てるタスクである．その際、コインの位置の確率分布が事前分布となり、水しぶきの広がり尤度関数を構成する．実験の途中においてこの尤度関数を変化させ、人間がそれを学習し追従できるかを検証した．その結果、人間は確かに尤度関数の分散を学習可能であることを示した(図2)．この結果を、過去の研究において類似の実験パラダイムを用いた実験により得られていた事前分布の学習と比較した結果、尤度関数の学習の方がはるかに学習速度が速いことが明らかとなった．これは事前分布と尤度関数の学習の違いを示す重要な研究成果である．

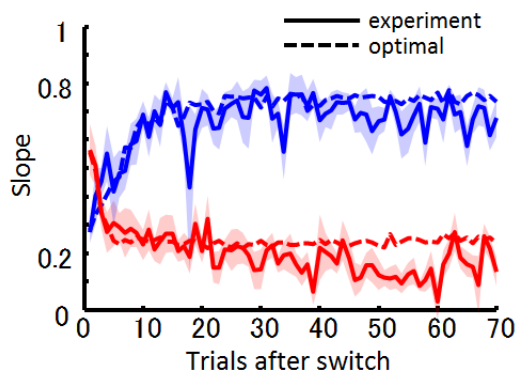


図2：尤度関数の学習に関する実験結果（実線）と最適学習モデルの予測（点線）の比較。

次に、尤度関数の学習の性質をより明確にすべく研究を行った。まず、尤度関数の学習を最適に行った場合にどのような結果が得られるか理論的に導出し、それを人間の振る舞いを比較した（図2）。その結果、両者が非常によく一致することが確かめた。つまり、人間は非常に効率的に尤度関数を学習することができるということである。事前分布の学習については従来より同様のことが言われてきたが、それが尤度関数の学習についてもわかったこととなる。

モデルの上では事前分布の学習も尤度関数の学習もほぼ同様に記述することができる。にもかかわらず、本研究により得られた尤度関数の学習速度は事前分布よりもはるかに速い。これは理論的には、学習すべきパラメータに対して学習前に持っている仮定の差により説明することができるが、なぜこのような差が生じるのかが重要な問題として残る。このように本研究では事前分布と尤度関数の学習で共通している面と異なる面を明らかとし、さらなる研究へ向けた重要な成果を得た。

さらに、人間は視覚刺激の色を条件として尤度関数を複数学習し、尤度関数を素早く切り替えることができることを実験的に示した。従来、人間の感覚や運動の種々の学習においてこのような条件に応じた複数の学習が平行に行われるかどうかは重要な争点となってきた。この成果は尤度関数の学習の柔軟性を示す重要な成果である。これらの尤度関数の学習に関する研究成果は学会発表や で発表を行った。

以上のように、当初の目的である二種類の適応については実験系の難しさの問題もあり思った成果は得られなかったものの、途中より今まで実験的な研究がほとんど行われていなかった尤度関数の性質を深く掘り下げること注力し、その学習が事前分布の学習と異なる点や、学習の柔軟性に関する重要な研究成果を得た。また、聴覚系においても確かにベイモデルは有効であることを示し、将来的な知覚の適応の一般性の検証につながる基礎となる研究成果を得た。これらは

当初の目的通り、事前分布の学習の研究に偏りがちな当該分野において新たな視点を提供する、大きなインパクトを持つ研究成果となっている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Sawai K, Sato Y and Aihara K, "Auditory time-interval perception as causal inference on sound sources", *Front. Psychology* 3:524 2012, doi: 10.3389/fpsyg.2012.00524, 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

Yoshiyuki Sato and Konrad Kording, "Efficient and context-dependent learning of likelihoods", 脳と心のメカニズム 第14回 冬のワークショップ, No. 24, 2014年1月8~10日(1月9日), 北海道蛇田郡留寿都村

Yoshiyuki Sato and Konrad Kording, "Learning of likelihoods for Bayesian computations", *Vision Science Society 13th Annual Meeting*, May 10-15 (May 12) 2013, Naples, Florida, USA

佐藤好幸, "視聴覚における時空間情報統合の最適性", 身体性情報学研究会 平成23年度第2回研究会, 2011年11月19日, 京都府京都市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 好幸 (SATO, Yoshiyuki)

電気通信大学・大学院情報システム学研究
科・助教

研究者番号：00548753

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：