

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500321

研究課題名(和文)心理物理学的逆相関法による高次認知判断プロセスの推定法

研究課題名(英文) Estimation method for higher-order judgment process with psychophysical reverse correlation

研究代表者

渡部 修 (Watanabe, Osamu)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50343017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：逆相関法は、脳内計算を探る強力な手法として知られており、生理実験で広く利用されてきた。心理実験でも、被験者の認知判断を調べるため用いられてきたが、その多くは初期の認知過程の実験であった。これは、逆相関法はホワイトノイズ解析の一種であり、実験刺激を強く制約するためである。本研究課題では、逆相関法を拡張し、任意の刺激を用いて非線形な認知判断を推定できる手法を構築した。この手法は、刺激分布の制約なしに、不偏な推定を実現する。また、計算機シミュレーションおよび心理実験により、提案手法の妥当性を検証した。この成果は、自然画像のような構造を持った刺激を用いるのが望ましい、高次認知判断の実験に寄与する。

研究成果の概要(英文)：Reverse correlation (RC) is known as a powerful method for probing internal computations in the brain, and it has been used in physiological researches. Psychophysical studies have also employed the RC analysis for understanding the computations underlying observers' judgments, but its application has been limited to the experiments with simple tasks and stimuli. This is because RC is a variation of white noise analysis, and it strongly restricts experimental stimuli. The present study proposes a method that enables us to explore nonlinear computations underlying psychophysical decision processes with arbitrary stimuli. This method provides unbiased estimates of internal computations without any restrictions on stimulus distributions. Numerical and psychophysical experiments confirmed the validity of the proposed method. This method could contribute to unveil the nature of higher-order cognitive functions which is desirable to present structured stimuli rather than simple noise input.

研究分野：認知科学

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：感覚・知覚・注意 心理物理学 逆相関法 Classification image法 カーネル モーメント

1. 研究開始当初の背景

心理物理学の分野では、様々な実験を通して、人の心の働きの解明を目指している。しかし、いかなる実験であっても、被験者の認知・判断過程を直接観測できるわけではない。このため、刺激と、これに対する被験者応答から、その脳内メカニズムを推定している。この推定には、様々な手法が考えられてきた。近年、注目を集めている実験手法に、逆相関法、あるいは CI (classification image) 法と呼ばれる方法がある。これは、実験で用いた刺激と被験者応答の統計量から、被験者の判断基準を刺激空間上で推定する手法であり、脳の認知メカニズムの解明に新たな知見を与えると期待されている。しかし、この手法は、実験で用いる刺激に強い制約を課す。このため、逆相関法の利用は、複雑な刺激を必要としない、比較的初期の認知機能の実験にとどまってきた。こうした背景から、本研究課題では、従来の逆相関法を拡張し、高次認知課題にも適用できる新たな方法を確立するとともに、実際に視覚心理実験に適用してその有効性を検証することを目指して立案した。

2. 研究の目的

(1) バイアスフリー逆相関法の理論的検討

心理実験で用いる様々な刺激 (画像や音声) は、図 1 のように、各点の輝度や色度などを要素とした高次元刺激空間内の一つのベクトルとしてとらえることができる。逆相関法は、実験で用いる刺激が、この高次元空間内でどのように分布していなければならないかを制約する。逆相関法は、実験刺激が原点を中心とした円形対称な分布に従うとき、刺激空間上の被験者の判断境界 (カーネル) を推定する手法を与える。しかし、このような分布に従う刺激は、いわゆるノイズ刺激になる。幾何図形や自然画像といった、特定の構造を持つ刺激セットは、刺激空間上で複雑な分布を形成する。何らかの認知判断を行う実験を、純粋なノイズ刺激のみで実施するのは難しい。従って、多くの実験では、意味を持つ何らかの信号 (シグナル) 刺激に、ノイズ刺激を重畳して被験者に呈示し、分析時に原点中心の分布に変換することで逆相関法を適用していた。しかし、この方法では、非線形な判断境界を持つときに推定バイアスが生じる。このため、逆相関法は、線形な判断基準を持つと仮定できる、比較的初期の認知機能の実験にしか用いられてこなかった。従って、本研究では、まず純粋なノイズ刺激以外を用いたときでも推定バイアスが生じない、不偏な推定法を導出することを目的とした。これにより、自然画像のように、特定の分布構造を持った刺激を用いる実験が可能になる。

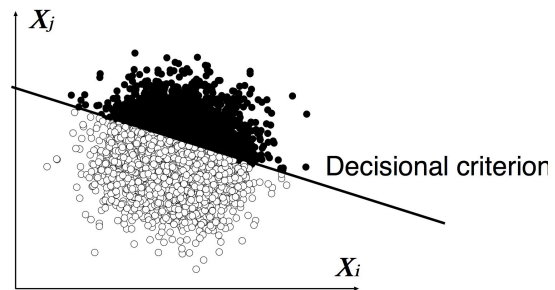


図 1 刺激分布の例。

(2) 視覚心理実験への適用

次に、バイアスフリーな逆相関法を理論的に導出するだけでなく、実データに対して有効であることを定量的に示すことを目的とした。このため、提案手法を実際の視覚心理実験に適用し、その妥当性を評価した。

(3) 適応的手法の導入

提案手法は、刺激分布の統計量 (モーメント) を用いてカーネルを推定する。このモーメントを正確に求めるためには、数千~数万試行のデータが必要になる。一方、刺激分布の制約を無くせるということは、カーネル推定に寄与するデータだけを選択的に用いることで、より少数の試行で実験を行える可能性がある。このような適応的方法についても検討を行う。

3. 研究の方法

(1) まず、任意の刺激分布を用いてもバイアスが生じない、バイアスフリーな推定方法を検討した。理論的には、実験データのモーメントには、刺激分布や被験者応答に関する全ての情報が含まれているはずである。本研究では、データのモーメントからカーネル情報を抽出するというアプローチを用い、これを実現するための計算方法を検討した。

(2) 次に、提案手法を用いた視覚心理実験を実際に行った。具体的な実験に適用可能であることを示すとともに、実験手続きのノウハウを蓄積した。視覚心理実験としては、運動視実験を採用した。具体的には、RDK (random-dot kinematogram) 刺激を用いたオーソドックスな運動検出実験と、様々な時空間周波数を持つグレーティングを重畳した刺激を用いた運動方向判断実験の、二つの実験を実施した。

(3) さらに、カーネル推定に必要な試行数を低減するための適応的手法を検討した。本研究では、カーネル推定への寄与が大きなデータを適応的に探索する方法の理論的検討を行った。また、適応法を使用したカーネル推定を実際に行い、前の実験と比較することで、同じカーネルがより少ない試行数で得られるかどうかを確認した。

4. 研究成果

(1) バイアスフリーな逆相関法の導出においては、実験データの統計量（呈示刺激と被験者応答のモーメント）と被験者の認知判断特性（カーネル）の不変的關係を解析し、カーネル推定のためのアルゴリズムを導出した。具体的には、実験データのモーメント行列を係数行列とした大規模な連立方程式を解くことで、カーネルを導出できることを示した。この提案手法の特徴は、刺激の選び方による推定バイアスが生じない点にある。例えばパターン弁別などの比較的高次元な認知課題では、刺激として複雑な幾何図形や自然画像などを用いることが想定される。しかし、従来の逆相関法では、使用する刺激に強い制約があり、任意の刺激を用いた場合は正しい分析が行えなかった。このことが、これまで逆相関法が高次元認知機能の実験へ適用されてこなかった大きな理由の一つである。提案手法では、実験データのモーメント行列を利用した分析を行うことで、不偏な推定を実現した。これにより、自然画像など任意の刺激セットを用いた高次元認知課題への適用も可能になった。また、理論解析と同時に、計算機を用いた数値シミュレーションも行い、提案手法の妥当性を確認した。図2に、シミュレーション結果の一つを示す。これは、図2Aのような自然画像を刺激として用いて、図2Bに示すエネルギーモデルのカーネルを推定した例である。エネルギーモデルは、図2Cのような2次カーネルを持つが、刺激として自然画像を用いた場合は図2Dのような誤った推定結果になる。しかし、提案手法では、図2Eのように正しく推定できた。

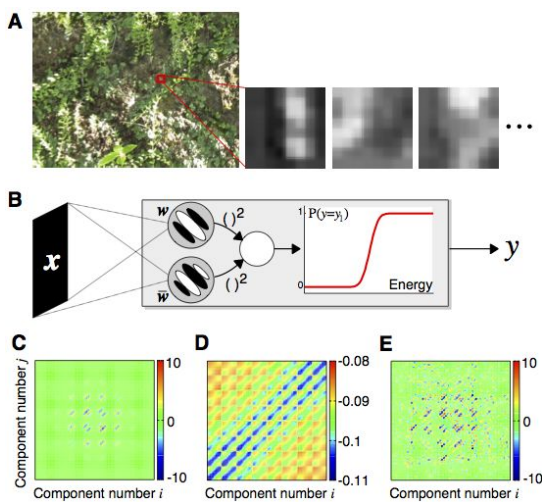


図2 提案手法のシミュレーション結果。

(2) バイアスフリーな逆相関法の有用性を確認するため、運動視に関する心理実験を実施し、提案手法を用いて実データからカーネル推定を行った。図3は、被験者がRDK刺激の運動方向を判断したときの、判断基準を表すカーネルである。さらに、実データから推

定したカーネルの妥当性を検証した。具体的には、人の運動知覚に関する計算理論、および実験的知見と比較し、推定カーネルがこれらの知見（具体的には induced motion 等）と整合性があることを確認した。また、推定カーネルから、各被験者の運動知覚特性を予測することができる。この予測を検証する追加実験を行い、推定カーネルの妥当性の証左とした。

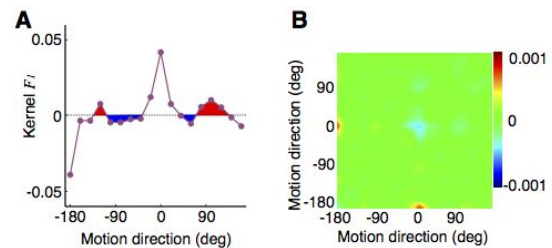


図3 ヒトの運動検出カーネル。(A) 1次カーネル。(B) 2次カーネル。

(3) 少数の試行でカーネル分析を可能にする適応的手法の理論的検討を行った。具体的には、被験者の判断境界付近の刺激がカーネル推定に寄与するとみなし、QUESTの様に実験を進めながら適応的に最適刺激を探索するアルゴリズムを構築した。計算機シミュレーションによってこのアルゴリズムの妥当性を評価した。また、適応的手法を用いた実験データ収集も行い、同じカーネルがより少ない試行数で得られることを確認した。図4は推定カーネルの精度変化を表すシミュレーション結果である。横軸が試行数、縦軸が真のカーネルとのコサイン類似度を表し、1に近いほど推定精度が高い。適応法（実線）の推定精度は、適応法を用いない場合（点線）と比べて常に高い。点線では800試行でようやく達成できる精度を、適応法では300試行程度で実現できている。

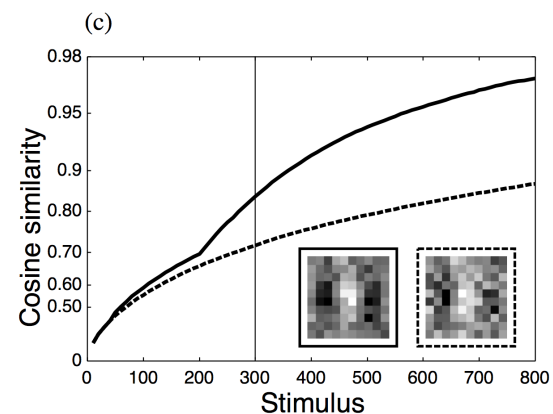


図4 適応法のシミュレーション結果。

(4) 本研究課題で提案した分析手法は、心理物理学分野における新たな知見の創出に貢献し、ヒトの脳機能の理解に寄与するものと期待できる。この成果の一部は、すでに学術

論文等で公表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

敦賀一貴, 渡部修, 透明視状況の方向弁別能力に基づく二重運動の脳内符号化様式の検討. 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J97-D, 2014, pp.876-886.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-d_4_876

西城良亮, 渡部修, DFD(Depth-Fused 3D)表示が持つ奥行き情報の分析. 映像情報メディア学会誌, 査読有, Vol.68, 2014, pp.J165-J168.

DOI: 10.3169/itej.68.J165

類家翼, 澤田幸広, 渡部修, 両眼視差が運動透明視の知覚コストに与える影響. 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J95-D, 2012, pp.131-138.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j95-d_1_131

〔学会発表〕(計 22 件)

神田雄介, 渡部修, 遮蔽環境下における視覚野の適応的な運動検出メカニズム. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2014年1月20日, 九州工業大学(北九州市若松区).

氣仙省吾, 渡部修, 高次視覚認知における確率共鳴現象の検証. 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月19日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市).

西城良亮, 渡部修, 両眼輝度差が奥行き知覚に与える影響についての考察. 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月19日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市).

藤岡真央, 渡部修, 判断境界付近の刺激を用いた適応的逆相関法の構築. 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月19日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市).

原田惇史, 渡部修, 逆相関法による運動透明視状況の知覚判断特性の推定. 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月19日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市).

Watanabe, O., Matsuda, M., and Tamura, R. Fast switching of cue integration weight. ECV2013, 2013年8月27日, Bremen Exhibition and Conference Centre (Bremen, Germany).

神田雄介, 渡部修, 運動知覚における脳内の適応的な計算メカニズムに関する研究. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2013年3月13日, 玉川大学(東京都町田市).

横山裕樹, 渡部修, カーネル関数を用いた

教師なし学習によるスパース表現の獲得. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2013年3月13日, 玉川大学(東京都町田市).

吉川諒, 渡部修, 局所的な反射成分の変化が光沢感に与える影響. 日本視覚学会 2013年冬季大会, 2013年1月24日, 工学院大学(東京都新宿区).

金子寛希, 渡部修, 細胞外電位を用いた刺激強度の線形予測. 平成 24 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012年10月21日, 北海道大学(札幌市北区).

氣仙省吾, 渡部修, 確率共鳴現象による視覚系の機能向上の検証. 平成 24 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012年10月21日, 北海道大学(札幌市北区).

西城良亮, 渡部修, DFD (Depth-Fused 3-D)表示における奥行き知覚特性. 平成 24 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012年10月21日, 北海道大学(札幌市北区).

Yokoyama, H. and Watanabe, O. Nonnegative predictive coding with kernels. JNNS2012, 2012年9月12日, 名古屋工業大学(名古屋市昭和区).

Watanabe, O., Kanahama, K., and Suzuki, Y. Alternation rate dependency of perceptual asynchrony in color-motion binding. ECV2012, 2012年9月3日, Carlos V Hotel (Alghero, Italy).

Watanabe, O. and Tsuruga, K. Examining neural representation of bidirectional motions with directional performance in transparency perception. APCV2012, 2012年7月15日, Songdo Convensia (Incheon, Korea).

渡部修, 高田拓也, 空間・形状情報の統合と視覚統計学習. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2012年3月14日, 玉川大学(東京都町田市).

横山裕樹, 渡部修, 階層ベイズモデルによる複雑型細胞の偶対称な応答特性の獲得. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2012年3月14日, 玉川大学(東京都町田市).

吉川諒, 渡部修, 逆相関法を用いた周辺色の影響による知覚色変化の分析. 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 2012年3月6日, 東京農工大学(東京都府中市).

類家翼, 渡部修, 運動透明視の運動方向差が知覚潜時に与える影響. 日本視覚学会 2012年冬季大会, 2012年1月21日, 工学院大学(東京都新宿区).

Yokoyama, H. and Watanabe, O. A hierarchical Bayesian model of the early visual cortex. JNNS2011, 2011年12月16日, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県恩納村).

- 21 金子寛希, 渡部修, 細胞外電位を用いた
入力の時系列変化の推定. 平成 23 年度電
気・情報関係学会北海道支部連合大会,
2011 年 10 月 23 日, はこだて未来大学(北
海道函館市).
- 22 Watanabe, O. and Takada, T. Visual
statistical learning works after
binding the temporal sequences of
shapes and spatial positions. APCV2011,
2011 年 7 月 16 日, The University of Hong
Kong (Hong Kong).

〔その他〕

ホームページ等

<http://cortex.csse.muroran-it.ac.jp>
室工大発 こちら最先端 脳の認識過程を
解析. 北海道新聞 (取材記事), 2013 年 3
月 29 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 修 (WATANABE, Osamu)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50343017