

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700238

研究課題名(和文)意思決定から主観的価値を推定する計算論的手法の構築

研究課題名(英文)A computational method for estimating subjective values from decision-making

研究代表者

片平 健太郎(Katahira, Kentaro)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：60569218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトやその他の動物は、選択の結果得られた結果事象をもとに、その後の選択を決定することができる。そこには結果事象に対する主観的価値が関係すると考えられる。しかし主観的価値を測定することは一般には困難な課題である。そこで本研究では、強化学習とよばれる数理モデルを用いて選択行動からその主観的価値を推定する手法を構築し、その評価を行った。その結果、提案手法による主観的価値の推定の妥当性が確認できた。また、提案手法で推定された主観的価値と関連する生理的基盤や神経基盤の一部があきらかになった。

研究成果の概要(英文)：Humans and other animals can modify the choice behavior depending on the experienced decision outcome in the past. Subjective values are involved in the processes. However, in general, measuring the subjective values is a challenging task. The present study proposed novel framework for estimating subjective values from choice behavior using computational models called the reinforcement learning model. As a result, the validity of the proposed method was confirmed. In addition, a part of the physiological substrates and the neural substrates related to the subjective value were clarified.

研究分野：計算行動科学

キーワード：主観的価値推定 強化学習 計算論モデル 意思決定 選択モデル

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトやその他の動物の選択の背後は、以前の選択の結果得られた結果事象の影響がある。そしてそこには結果事象に対する主観的価値が関係する。主観的価値が高い結果事象が得られた行動はその後繰り返される確率が増加し、主観的価値が低い結果事象に対してはその後同じ行動が選択される確率は減少する。したがってヒトやその他の動物の行動を理解するには主観的価値を測定することが重要であるが、それは一般には困難な課題である。動物は主観的価値を言語的に報告することは不可能であるし、言語報告が可能であるヒトにおいても、自身の主観的価値を正しく認識し報告することは容易ではない場合が多い。

金銭や食物報酬等はその客観的な量が測定しやすく、主観的価値もそれと連動すると考えられる。しかしながら、ヒトは金銭や食物を伴わない結果事象についても、それに対する主観的価値に応じて日常的に意思決定をしている。例えば音楽を聴いたところで金銭は得られないし空腹も満たされないが、ヒトは音楽に価値を感じ、自ら聴取する音楽を選択する。そのように量的な測度を持たない対象物の価値は定量化することが一層難しい。質問紙を用いてヒトに主観的価値を報告させるのが従来のやり方であるが、そのような主観的評価は、被験者の気分や、文脈の影響を強く受け、一貫した評価値を得ることは一般に困難である。選択行動に実際に影響を与える主観的な価値の定量化は行動経済学、心理学、神経科学等の広い分野に関連する重要な課題として残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、意思決定、そしてその反映である行動選択から対象事物の主観的価値を推定する枠組みを構築することを第一の目的とした。さらに、提案手法についてコンピュータシミュレーションと実際の動物の行動データに対する適用を通して、提案手法により推定された主観的価値の妥当性を検討することを第二の目的とした。また、提案手法を用いて推定した主観的価値と関係する神経基盤や生理的活動を調べることで、提案手法がどのように研究に貢献するかの例示をすることも目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 提案手法

提案手法は選択行動についての新たな実験課題と、強化学習モデルを用いたそのデータからの統計的パラメータ推定手法から構成されていた。実験課題は、実験参加者もしくは被験体が毎試行、二つの選択肢のいずれかを選択する選択課題であった。選択に応じてあらかじめ決められた確率にしたがい、複数の結果事象のいずれかが呈示される。結果事象は、快・不快等の主観的価値に関わる属

性が、ある定められた確率の規則に従って操作される。実験参加者もしくは被験体はその実験課題を遂行して得られた行動データをもとに、その選択系列を記述し予測する数理モデルを構築する。数理モデルは主観的価値をパラメータとしてもつ強化学習モデルをベースとして構築した。強化学習モデルは、各行動の価値を以下の規則を用いて更新するモデルである。

#### 行動価値の更新量

$$= \text{学習率} \times (\text{結果事象の主観的価値} - \text{現在の行動価値})$$

この更新式で更新された行動価値が高くなるほどその行動を選択する確率が高くなるような変換式(ソフトマックス関数)により、各行動に選択確率を割り当てる。学習率や主観的価値等のパラメータは、実際に選択された選択肢に割り当てる選択確率が高くなるように推定した(最尤推定)。赤池情報量基準や尤度比検定等の統計的モデル選択の枠組みで、複数あるモデルの中から適切な構造を持ったモデルを選択した。

(2) シミュレーションによる提案手法の評価  
コンピュータ上で生成した複数の仮想データを用いて主観的価値推定のシミュレーションを行った。それにより、提案手法の妥当性やその限界を検証した。

#### (3) ラットの選択課題データへの適用

実際のデータに対する提案手法の妥当性や頑健性を検討しその性質をあきらかにするため、ラットの選択行動に対して提案手法を適用した。具体的に行った実験課題は次の通りである。ラットには毎試行二つのレバーのうちいずれか一つを押すことを学習させ、ラットの選択に応じて報酬(シュガーペレット)の有無が決定された。報酬有の場合の報酬量(シュガーペレットの数)や報酬遅延(レバーを押してからシュガーペレットが出るまでの遅延)は選択とは無関係にランダムに決定された。

#### (4) ヒトの選択課題データへの適用

提案手法のヒトのデータへの適用事例として、推定した主観的価値と関係する神経基盤や生理的基盤を探索する研究を行った。具体的には成人健常者に選択課題を行わせ、その際の行動データ、生理活動データ、また機能的脳画像データ解析に提案手法を適用し、推定された主観的価値と対応する神経基盤や生理学的特性を探索した。意思決定課題として、次のような課題を用いた。各試行がはじまると画面上に二つの無意味な幾何学的模様が表れ、実験参加者は二つのボタンでいずれかの模様を選択することが求められた。選択に応じて、快画像、中立画像、不快画像のいずれかがその後呈示された。いずれの画

像カテゴリが出現するかは確率的に決められており、その確率は参加者には未知であった。この確率は予告なく変更された。快・不快・中立画像はそれぞれ 20 枚の写真のセットから構成されていた。写真は情動研究における標準的なデータベースである International affective picture system (IAPS) から、快画像と不快画像での主観評定の強度が対称になるように選択して用いた。

#### 4. 研究成果

(1) シミュレーションによる提案手法の評価  
 計算機上で強化学習モデルに提案する実験課題を経験させ、仮想データを生成した。その仮想データに対し、提案手法により主観的価値の推定を行った。その結果、設定された主観的価値が選択行動データから推定可能であること(図1)、また、実際に主観的価値に差がなかった場合に誤って差があると判断される第一種過誤が起こる割合が、設定された統計的仮説検定の有意水準(5%)に収まることが確認できた。

また、仮想データ生成に用いた真のモデルの学習率が極端に小さい値をとると推定値が不安定になり推定精度が悪くなるという制約があることがあきらかになった。一方、真のモデルと推定に用いたモデルが異なる場合は主観的価値には真の値からのバイアス(偏り)が生じるが、結果事象間の主観的価値の相対的な関係は正しく推定されるという、望ましい性質があることがあきらかとなった(Katahira, Yuki & Okanoya, 投稿準備中; 提案手法に関する理論的基盤については、雑誌論文で解説)。

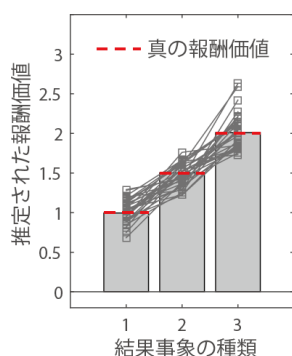


図1. シミュレーションにおいて推定された主観的価値。仮想データ 30 人分の結果を被験者ごとに線で結んで表示している。棒グラフは推定値の平均値を表す。

#### (2) ラットの選択課題データへの適用

ラットの行動への適用事例の推定の結果、ラットの行動は報酬の有無のみではなく、ランダムに設定された報酬量や報酬遅延の影響を受けることが分かった。報酬量に関しては、推定された主観的価値は報酬量の増加ともない、増加するか、あるいは変わらない(減少はしない)という妥当な結果が得られた(図2)。報酬遅延時間については、報酬の

遅延が増加するにつれ主観的価値が減少するという妥当な結果となった。以上の結果は、提案した枠組みによりげっ歯類の行動からでも主観的価値の推定が可能であるということを示している(Katahira, Yuki & Okanoya, 投稿準備中)。

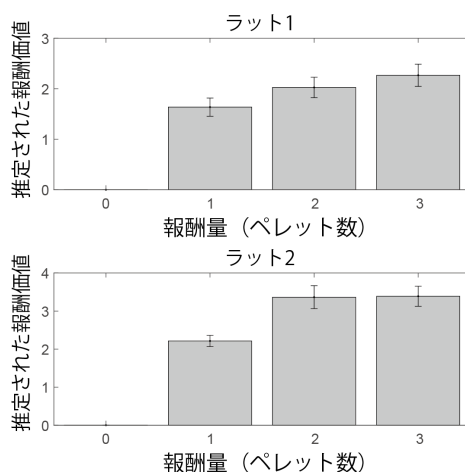


図2. ラットの行動データから推定された主観的価値。エラーバーは標準誤差を示す。

#### (3) ヒトの選択課題データへの適用

##### 行動データの結果

情動画像を結果事象としたヒトを対象とした実験の結果、多くの参加者は、情動的に中立な画像よりは快画像が高い確率で出る選択肢を選ぶようになり、不快画像が高い確率で出る選択肢は避けるようになった。その参加者の選択行動は強化学習モデルによりよく説明された。さらに、質問紙調査による主観的な評定値は快・不快画像で対称であったにも関わらず、画像がその後の意思決定に与える効果を表す報酬価値パラメータは、不快画像の方が強いという非対称性があった。この結果は、参加者は基本的には快画像を求め不快画像を避けるように意思決定するが、後者の方がその影響が強いということの意味する。この結果は研究代表者が予備的に行った行動実験でも確認されていたものだが(Katahira et al., 2011), 本研究でも再現された。

##### 脳機能画像データへの適用

提案手法の神経科学的研究への一つの適用事例として、ここで明らかになった結果事象の主観的価値の違いがどのような神経基盤に対応しているのか、特に、快・不快の効果の非対称性はどのような神経活動が要因となって生み出されているのかを検討した。

そのために、実験課題遂行時の脳活動を、機能的脳画像法(functional magnetic imaging; fMRI)により計測した(雑誌論文)。上記の強化学習モデルを用いて行動データからパラメータ推定をし、強化学習における学習の信号と考えられている報酬予測誤差

(結果事象の主観的価値 - 現在の行動価値)と相関して活動する部位を探索した。快画像に関する予測誤差と不快画像に関する予測誤差は分離して解析した。不快画像と快画像両方の予測誤差に相関して共通して活動していた脳部位は背側線条体や楔前部であった。一方、感情との関係が指摘されている前部島皮質や行動の動機との関係が指摘されている腹側線条体は主に不快画像に関する予測誤差と対応した活動を示していた。これらの脳部位における不快画像と快画像に対する活動の違いが、不快画像を避ける動機が快画像に接近する動機より強くなる要因の一つとなっていたと考えられる。また、前部島皮質は身体の情動反応をモニタリングしている部位として知られており、不快画像の方がより情動反応を強く喚起したことにより島皮質が活動した可能性がある。

#### 生理活動データへの適用

情動反応は自律神経系を介した身体の生理反応を伴う。また、上記の研究で推定した主観的価値には一定の個人差が認められる。そこで、その個人差が生理反応の個人差と対応付けられるという可能性を検討した。また、安静時の心拍変動は、前頭前野から皮質下領域に対する定常的な抑制性の制御の個人差と関係している可能性が示唆されている (Thayer, & Lane, 2009)。この安静時の心拍変動の個人差と主観的価値の個人差の関係についても検討した(雑誌論文)。

上記の実験課題中に、実験開始前と実験中の心拍および皮膚電導度を計測した。行動データから個人ごとに推定した主観的価値の推定値と対応する生理指標を探索した。

その結果、安静時の心拍変動の大きさと、不快画像に対する主観的価値に負の相関関係があることがわかった。心拍変動が小さい個人ほど不快画像を避ける傾向が強い、つまり推定された不快画像の負の主観的価値が大きいということを表している。また、課題中の心拍変化には写真の情動価に応じた反応の変化は見られたものの、推定された主観的価値とは相関がなかった。課題中の皮膚電導度に関しても同様であった。不快画像を避ける傾向は、不快画像そのものに対する生理的反応よりは、安静時の心拍変動に影響を及ぼすような定常的な抑制性の制御、すなわち個人の生理学的な特性と関係しているということが示された。

#### (4) 全体を通して

以上の一連研究成果により、本研究の目標であった、選択行動から主観的価値を推定する枠組みの構築に成功したといえる。また、その適用方法の例示もすることができた。本研究で提案した枠組みを用いて主観的価値を形成する心理的要因、および神経的基盤をあきらかにしていくことは興味深い今後の課題である。

主観的価値の変化は抑うつ等の精神疾患とも関連して議論されている (Huys et al., 2013)。抑うつの患者はポジティブな事象に対する主観的価値が減少するという現象が報告されている。本研究では、ヒトとげっ歯類において、同様の実験パラダイムと計算論的枠組みにより複数の結果事象についての主観的価値を推定できることを示した。これにはげっ歯類の精神疾患モデルの行動をヒトの疾患群と直接的に比較することを可能にするという重要な意義があると考えられる。本手法を用いてヒトと疾患モデル動物を統一的に扱う方法論を探りながら、精神医学等の処分野の研究へ寄与していくことは、今後の大きな課題である。

#### <引用文献>

Katahira K, Fujimura T, Okanoya K, Okada M., Decision-Making Based on Emotional Images. *Front. Psychol.* Vol. 2, 311, 2011.

Thayer JF, Lane RD. Claude Bernard and the heart-brain connection: further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 33: 81–8, 2009.

Huys QJ, Pizzagalli D, Bogdan R, Dayan P. Mapping anhedonia onto reinforcement learning: a behavioural meta-analysis. *Biol. Mood Anxiety Disord.* Vol. 3, 2013.

#### 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 4 件)

Kentaro Katahira, The relation between reinforcement learning parameters and the influence of reinforcement history on choice behavior, *Journal of Mathematical Psychology*, 査読有, Vol. 66, pp. 59–69, 2015. DOI: 10.1016/j.jmp.2015.03.006

Kentaro Katahira, Yoshi-Taka Matsuda, Tomomi Fujimura, Kenichi Ueno, Takeshi Asamizuya, Chisato Suzuki, Kang Cheng, Kazuo Okanoya and Masato Okada Neural basis of decision-making guided by emotional outcomes. *Journal of Neurophysiology*, 査読有, Vol. 113, pp. 3056-3068. 2015. DOI: 10.1152/jn.00564.2014

Kentaro Katahira, Tomomi Fujimura, Yoshi-Taka Matsuda, Kazuo Okanoya and Masato Okada, Individual differences in

heart rate variability are associated with the avoidance of negative emotional events. *Biological Psychology*, 査読有, Vol. 103, pp. 322–331. 2014.  
DOI: 10.1016/j.biopsycho.2014.10.007.

片平健太郎, 藤村友美, 松田佳尚, 岡ノ谷一夫, 岡田真人, 意思決定における学習過程に情動反応が及ぼす効果 計算論的アプローチによる検討, 感情心理学研究, 査読有, Vol. 20, pp. 71-76, 2013.

〔学会発表〕(計 2 件)

片平健太郎, 強化学習モデルで探る感情・学習・意思決定の心的過程, (公募シンポジウム SS-002 感情・学習・意思決定), 日本心理学会第78回大会, 2014年9月10日, 同志社大学(京都府京都市)

片平健太郎, 藤村友美, 松田佳尚, 岡ノ谷一夫, 岡田真人, 意思決定における学習過程に情動反応が及ぼす効果 計算論的アプローチによる検討, 日本感情心理学会第20回大会, 2012年5月27日, 神戸大学(兵庫県神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片平 健太郎 (KATAHIRA, Kentaro)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号: 60569218