

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K17893

研究課題名（和文）行動実験と数理モデリングによる感覚予測誤差が行動選択に与える影響の解明

研究課題名（英文）Effect of sensory prediction error on reward-based action selection

研究代表者

林 拓志（Hayashi, Takuji）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・特別研究員

研究者番号：80815358

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、様々な場面で行動を決定し運動を実行する。もし期待した結果が得られなかった場合、脳は報酬予測誤差と感覚予測誤差を計算する。従来の研究では、報酬予測誤差は行動選択に、感覚予測誤差は運動実行に活用されるが、両者がどのように相互作用しているのかは明らかではなかった。本実験では、ターゲット探索課題中に視覚運動外乱を与えた。両者は独立に与えているため、感覚予測誤差によって探索行動を変化させる必然性はない。しかし、ターゲットにバイアスがある場合にのみ、運動が大きく変動し、感覚予測誤差が大きい方向に運動していることが明らかとなった。これらの研究から、両者がインタラクションしている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、感覚予測誤差が生じるということは、運動を失敗させる要因になる排除すべきもの、と暗に捉えられてきた。しかし、本実験結果、脳は感覚予測誤差を報酬情報と捉えている可能性が見出されている。この結果は、これまでの定説を転回させる大きなインパクトを与えると期待できる。また、従来の研究では、脳の報酬系と運動系は異なる領域で独立に存在すると考えられてきたが、感覚予測誤差によって行動選択が変調されることが明らかになれば、両者は深く影響を及ぼしあっていることが示唆される。これは、両者を繋ぐ脳内ネットワークに機能的意義を与えることを意味し、神経生理学研究などの関連分野への影響も大きい。

研究成果の概要（英文）：In various situations, we decide on an action from several alternatives and execute a movement. If we don't get the expected result, the brain calculates two prediction errors, the sensory prediction error and the reward prediction error. Previous research has shown that reward prediction error is for appropriate action selection and sensory prediction error is for appropriate movement execution, but it is not fully known how these two errors interact. We performed behavioral experiments in which participants were exposed to unconscious visuomotor perturbation during target (reward) foraging tasks. We provided the sensory and reward information independently so that we desiccate that the effects of them on their exploratory movements. Surprisingly, we found that the movements were so volatile and directed into the large sensory prediction error when targets were applied with strong bias. This result imply that these two information were interested each other.

研究分野：身体教育学

キーワード：感覚予測誤差 報酬予測誤差 運動学習 行動選択

1. 研究開始当初の背景

我々は様々な場面で、複数ある選択肢から行動を決定し、運動を実行する。もし、期待した結果が得られなかった場合、脳は2つの予測誤差を計算する。1つ目は予測した報酬との報酬予測誤差であり、2つ目は予測した感覚情報との感覚予測誤差である。従来の研究では、報酬予測誤差は適切な行動選択のために、感覚予測誤差は適切な運動実行のために用いられると考えられてきた。しかし、近年の研究動向では、報酬予測誤差が適切な運動実行のためにも用いられるという新たな見方が主流となっている。一方で、感覚予測誤差が行動選択に与える影響は未だ明らかではない。本研究では、行動実験と数理モデリングを組み合わせることで、脳が感覚予測誤差をどのように捉えているか(報酬情報か罰情報か)明らかにし、その背景メカニズムを同定することを目的とする。本研究は、脳の報酬系と運動系の関係性について新たな枠組みを提案できる可能性を有する。

2. 研究の目的

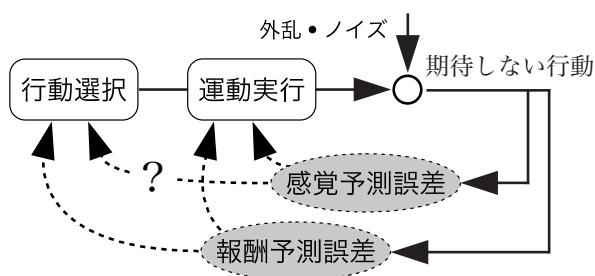


図1. 感覚予測誤差が行動選択に与える影響

我々はどのような規範の元に行動を決定しているのでしょうか。例えば、ゴルフのピンに向かってアプローチする際、ピンまでの距離やグラウンドの状況を鑑みて、クラブの番号を決定する。このような複数の選択肢から唯一つ選択するという問題は、我々の日常生活

においても、しばしば見られる重要な問題である。これまでの行動選択・意思決定の研究から、脳の報酬系は各行動を選んだ際に得られる行動価値 (e.g., 各クラブを用いた時に期待されるボールとピンの距離) を予測・比較し、最も行動価値の高い選択肢を実行すると考えられている (Cisek & Kalaska, Annu Rev Neurosci, 2010; Glimcher, PNAS, 2011)。しかし、毎回の試行で、期待される結果が得られるとは限らない (図1)。もし期待した結果が得られなかった時、脳の報酬系は、予測した価値と実際に得られた価値との誤差である「報酬予測誤差」を計算し、行動価値を更新する。これにより、適切な行動選択を実現する。同時に、脳の運動系は、運動を実行することにより予測した感覚情報と実際に得られた感覚情報との誤差である「感覚予測誤差」を計算し、誤差を減少させるよう運動を変化させることで、正しい運動技能を獲得する (e.g., クラブスイングの改善; Shadmehr et al., Annu Rev Neurosci, 2010)。

近年の運動制御・学習研究から、この報酬予測誤差と感覚予測誤差が相互に影響を及ぼしあい、運動技能が獲得されることが示唆されている (Izawa & Shadmehr, PLoS Comput Biol, 2011; Galea et al., Nat Neurosci, 2015)。すなわち、脳の運動系は、期待した運動が行えたかどうかという感覚予測誤差だけでなく、期待した価値が得られたかどうかという報酬予測誤差も考慮に入れて、運動を学習していることが明らかになってきている。

しかし、脳の報酬系が行動価値を計算・更新する過程で、感覚予測誤差がどのような影響を及ぼすのかは未だ明らかではない。もし、脳の報酬系が、感覚予測誤差を「実行した運動が失敗した時に得られるもの」と捉えていれば、「避けるべき対象」として符号化される可能性がある。一方、感覚予測誤差を「運動技能をより良い方向へ変化させるもの」と捉えていれば、「求めるべき対象」として符号化される可能性がある。本研究では、感覚予測誤差が与えられている状況下での行動選択を検証し、感覚予測誤差をどのように捉えているか（罰情報か報酬情報か）明らかにする。さらに、数理モデリングを用いて得られたデータを解釈することで、その背景にある脳内メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

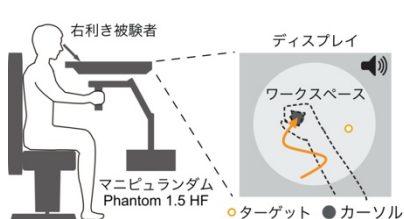


図2 実験設定

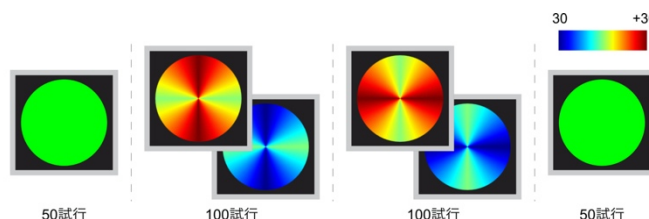


図3 領域依存の視覚運動回転変換と実験の流れ

本実験では、被験者はマニピュランダムを動かすことで、画面上のカーソルを操作し、ワークスペース内に隠されたターゲットを探し出す腕運動課題を行う（図2）。この課題において、どこにターゲットがあるかという予測から行動価値を計算し、より良い探索行動を連続的に決定する必要がある。感覚予測誤差を生じさせるために、カーソルとマニピュランダムの間ズレ（視覚運動回転変換）を与えた（図3左）。この回転変換によって、被験者はカーソルを期待通りの方向に動かすことはできないため、感覚予測誤差が生じる。実験では、領域によって回転変換の大きさを変えることで（図3右）、領域ごとに異なる大きさの感覚予測誤差を生じさせる。特筆すべき点として、この回転変換はターゲットを探し出すという課題目的に直接関連していないことが挙げられる。なぜならば、手の運動量とカーソルの移動量は常に等しく、探索量は回転変換の大きさによらず一定に保存されているからである。このズレの大きさを100試行ごとに変化させることで、感覚予測誤差の大きさに伴い、どのように探索空間が変化していくか明らかにした（図3）。

感覚予測誤差と報酬予測誤差の関連を明らかにするため、図3のように感覚予測誤差を変化させるだけでなく、報酬予測誤差の与え方も操作した。図4左のように、被験者を2つのグループに分け、ターゲットが与えられる分布を変化させた。ターゲットの分布は報酬の分布に対応するため、偏りがある場合（図4左）とない場合（図4右）では、探索空間を変化させる必要があるが、感覚予測誤差との相関はないように設定している。行動選択の指標として、回転変換の大きい領域と小さい領域にどれだけ長く探索したかを示す滞在確率を計算した（図5）。さらに、探索がどれだけ変化しているか調べるため、その平均と変動（標準偏差）を調べた。

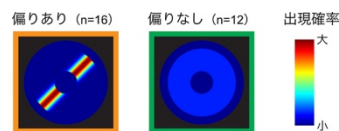


図4 ターゲットの出現確率

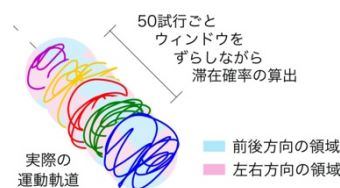


図5 解析～滞在確率の計算～

4. 研究成果

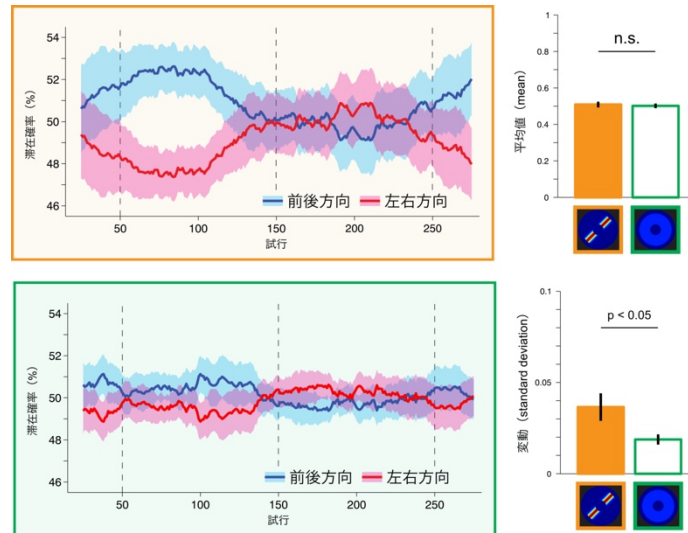


図6 滞在確率の変化

実験の結果、被験者は回転変換の有無に気づかなかつたにもかかわらず、(1) 感覚予測誤差を与えることで感覚予測誤差が強い方向へ滞在確率は変化すること、(2) その変化量は報酬の分布に強く影響を受けることが明らかとなった(図6)。これらの結果は、感覚予測誤差は行動選択に影響を与えること、さらに、感覚予測誤差が「避けるべき」対象ではなく、「求めるべき」対象として行動選択に影響を及ぼす可能性を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Hayashi, K. Kato, D. Nozaki	4. 巻 40(7)
2. 論文標題 Divisively Normalized Integration of Multisensory Error Information Develops Motor Memories Specific to Vision and Proprioception	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1560-1570
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/JNEUROSCI.1745-19.2019.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ishii, T. Hayashi, K. Takiyama	4. 巻 8
2. 論文標題 Influence of switching rule on motor learning.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13559
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1038/s41598-018-31825-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Hayashi, K. Kato, D. Nozaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Divisively normalized integration of multisensory error information develops motor memories specific to vision and proprioception	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1101/561332	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hayashi T, Sasai S, Kasuga S, Kadota H
2. 発表標題 Rapid brain microstructural changes during visuomotor adaptation.
3. 学会等名 Organization for Human Brain Mapping（国際学会）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Troy H, Hayashi T, Lim C, Marcantonio E, Smith MA, Press DZ
2 . 発表標題 Creating a Cognitive Vital Sign for Detecting and Monitoring Delirium.
3 . 学会等名 Annual Meeting of American Delirium Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Makino Y, Hayashi T, Nozaki D
2 . 発表標題 Divisively normalized processing of redundant visual error information by visuomotor adaptation system
3 . 学会等名 Annual meeting of Society for Neuroscience (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hayashi T, Brennan AE, Smith MA.
2 . 発表標題 Movement variability is determined by the timing of the preceding movement
3 . 学会等名 Annual Meeting of Advances in Motor Control and Motor Learning. (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hayashi, K. Kato, D. Nozaki
2 . 発表標題 Multisensory and Unisensory Integration with Divisive Normalization for Human Motor Adaptation
3 . 学会等名 CiNet Monthly Seminar (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hayashi, K. Takiyama
2. 発表標題 Not movement duration but movement velocity is altered by implicit adaptation to movement-amplitude perturbation in self-paced reaching task
3. 学会等名 Annual Meeting of Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hayashi, K. Kato, D. Nozaki
2. 発表標題 Divisively normalized integration of visual and proprioceptive motor memories for motor adaptation
3. 学会等名 Annual Meeting of Neural Control of Movement (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大築立志 鈴木三央 柳原大	4. 発行年 2020年
2. 出版社 市村出版	5. 総ページ数 216
3. 書名 運動学習の脳・神経科学 -その基礎から臨床まで-	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----