

Friston の predictive coding に基づいたロボット実験と力学的解析

Robotic experiment based on Friston's predictive coding and dynamical analyses

松田英子*¹ 池上高志*¹
Eiko Matsuda Takashi Ikegami

*¹東京大学総合文化研究科

Department of Arts and Sciences, the University of Tokyo

Friston's free energy principle says that neurons encode the prediction error and perception is about minimization of errors. Contrary to this argument and based on our two previous simulation studies, we propose that the fluctuation in sensorimotor coupling is perception. Thus, prediction error should not be corrected but rather be maintained through a sensorimotor coupling.

1. 序論

Friston による自由エネルギー仮説は、近年注目を集め、広く受け入れられている脳の理論である。この理論において、生物は自由エネルギーを最小化し、予測の精度を上げるように、行動を選択することが仮定されている [Friston, 2010]。Friston の理論において、ニューロンにコードされる情報は、実際に知覚されたデータではなく、予測の精度そのものであると考えられ (Predictive coding)、実際に、fMRI を用いた実験から、神経細胞には予測の精度がコードされていることがわかっている [Hesselmann et al., 2010]。しかし、予測の精度を上げることが、脳の機能だと言い切れない場合も多い。本論文では、コンピュータシミュレーションによる認知モデルを2つ取り上げ、むしろ予測から逸脱することによって、センサーとモーター間の連携が生じ、ロバストな振る舞いが獲得されることを議論する。

2. コンピュータシミュレーションによる認知モデル

2.1 風車を回す神経ネットワークモデル

ここでは [Iizuka and Ikegami, 2005] による風車のモデルを取り上げ、議論を行う。この実験では、コンピュータシミュレーション上に、風車と、その羽根に触れることの出来る腕が設置される。風車の羽根は5枚か7枚に入れ替わり、腕で羽根を触ることによって、羽根の枚数を当てるのが課題である。腕の動きは、ニューラルネットワークによって制御され、2つの「身体ニューロン」と呼ばれるニューロンが、腕と他の内部ニューロンとを介在している。これら2つの身体ニューロンのうち、活動度の大きい方が「モーターニューロン」となり、腕の動きを決定し、活動度の小さいほうが「センサーニューロン」となり、腕の状態を知覚する。このように、センサーとモーターの役割が自発的に決定され、センサーとモーターの役割を交代しながら腕が制御される。

障害物や外力がない状態では、モーターニューロンが目的の位置まで腕を動かす、その位置がセンサーニューロンに入力される。この場合、モーターニューロンの目的位置と、センサーニューロンが観測した位置が一致しており、これは予測が成功している状態である。しかし、例えば障害物がある場合には、

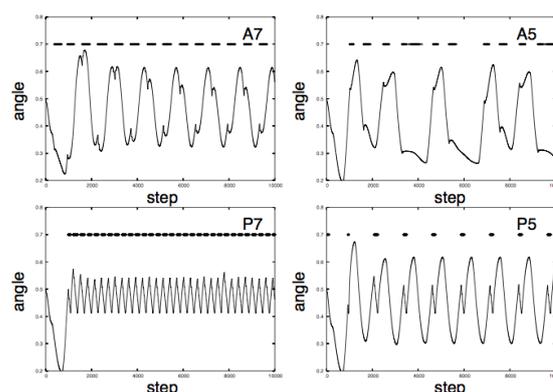


図1: 腕の位置変化。横軸はステップ数で、縦軸は腕の角度 θ_a 。図の上部の点は、腕が風車の羽に触れている時を表している。

モーターニューロンが目的とする位置まで腕を動かすことが出来ず、予測される腕の位置と、センサーニューロンによって観測される位置との間にずれが生じる。つまり、環境との相互作用によって、予測からのずれが生じる。

風車の回転の仕方には2通りあり、腕が触れることによって風車が回転する場合と (Active; A)、外力によって風車が強制的に回転している状態 (Passive; P) がある。それぞれに対し羽根が5枚と7枚の場合があるため、合計で4種類の条件下で実験を行った (A5, A7, P5, P7)。これら全ての条件下で羽根の枚数を正しく答えられるように、遺伝的アルゴリズムによってニューロン間の重みを最適化した。最適化後の腕の位置変化は、図1に示されている。この図において、腕の位置は角度 θ_a によって表され、ステップごとの角度変化が示されている。図の上部の点は、腕が風車の羽根に触れている時を示している。

A7, A5, P5 の場合は、腕の角度が不規則に変化している。この不規則性は、羽根にぶつかる際生じる予測と観測の間のずれが、その後の行為選択に影響しているためであると推察できる。また、センサーニューロンとモーターニューロンとの間に時間遅れを加え、2つのニューロン間の逐次的な連携を壊すと、パフォーマンスが著しく低下することが分かった。これは、センサーとモーターが常に相互作用し、逐次的に行動を選択していることを示している。

連絡先: {eiko, ikeg}@sacral.c.u-tokyo.ac.jp

一方、P7 の場合は、角度が規則的に変化している。この規則性は、羽根が腕に当たる周期に一致しており、腕が羽根に対して受動的に反応していると考えられる。この場合、予測からのずれは羽根に触れる一瞬であり、上記の A7, A5, P5 のように予測のずれがその後の行為に影響することはない。また、時間遅れを入れてもパフォーマンスの低下は見られず、センサーとモーターの相互作用が見られないことが分かる。

以上より、非周期的な運動をする場合、つまり予測と観測の間のずれがその後の行為選択に影響する場合には、センサー・モーターが緊密に相互作用していることが分かった。つまり予測と観測のずれを打ち消すのではなく、ずれの履歴を長く引きずり、行為選択に反映させることによって、センサー・モーター間の協調が獲得されることが分かる。

2.2 VTE のモデル

[Tolman, 1939, Muenzinger, 1938] において、ラットが選択肢を選ぶ際、頭を左右に振って迷っているように見える現象が観察された。この振る舞いは「仮の試行錯誤 (vicarious trial-and-error; VTE)」と呼ばれる。VTE の回数は学習の度合いによって変化し、学習初期は多くの VTE が見られ、その後減ることがわかっている。海馬内の場所細胞の活動を記録した実験から、VTE が観察される時、ラットの位置から数歩先の場所細胞が活動することがわかっている [Johnson and Redish, 2007]。これより、VTE を示している時にラットは頭のなかで行為選択の結果を予測し、選択肢を吟味していると考えられている。

VTE と類似した現象が、ロボット実験から見られることが、筆者らの研究によってわかっている [Matsuda, Hubart and Ikegami, 2011]。この実験では、コンピュータシミュレーションにおいて、T 字型の迷路をロボットに解かせた。このモデルは [Bovet and Pfeifer, 2005] によって開発されたロボット実験に基づいたものであり、ロボットには 4 種類のセンサーとモーターが備えられ、センサー・モーター間の関係を学習することにより、T 字型の迷路を解く。迷路のどちらかの端には報酬が置かれ、初めの曲がり角に置かれたキューによって、どちらの端に報酬が置かれているかが示される。

実験の結果、うまく課題を解けるロボットの中にも、パラメータやセンサーの結合の違いによって、VTE のように頭の向きを変えながらゴールに到達するロボットと、ゴールまで直進するものが観察された。VTE を示すロボットは、報酬の位置が切り替わる時に最も多くの VTE を示す。これは、「前回の試行と同じ場所に、今回の試行でも報酬が見つかるだろう」という予測と「キューが前回とは異なる方向を指している」という観測との間にずれがあることに起因する。学習が進むと VTE の回数は減少する。これは学習初期の VTE が多く見られる段階では、予測と観測にずれがあるが、学習が進むと VTE の回数が減り、予測と観測が一致するためと考えられる。一方、ゴールまで直進するロボットは、これらのずれが生じていないと推察できる。また、VTE を示すロボットの方が運動の作り方がロボバトである。すなわち、最初どこから動き出すかにあまりよらずに、ゴールに到達することが出来る。

3. 議論

最初のモデルでは、予測と観測の間にずれがあることが、センサー・モーター協調を可能とし、2 番目のモデルでは、VTE という探索的な振る舞いが生じ、ゴールを目指すロボバトな運動が獲得できることが示唆された。つまり、知覚というのは、ズレのことである。あるいは探索行為が知覚のことである。し

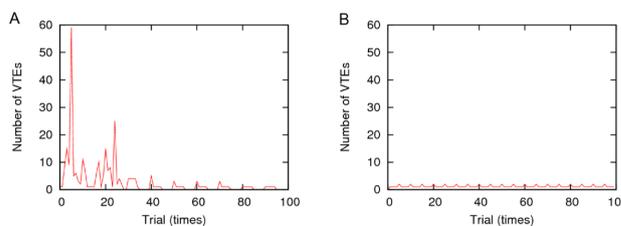


図 2: VTE の回数の変化。横軸は試行の回数で、縦軸は VTE の回数。ロボットの回転速度の符号が変わった時に 1 回の VTE と数えた。A: VTE を示す場合。B: VTE を示さない場合。

たがって Friston とは異なり、予測の精度というのをゼロにしないことが、脳にとって知覚行為をオーガナイズするのに必要であろう。そういうことを本公演では議論したい。

参考文献

- [Tolman, 1939] Tolman, E. C.: Prediction of vicarious trial and error by means of the schematic sowbug, *Psychol. Rev.*, 46:318 - 336 (1939).
- [Muenzinger, 1938] Muenzinger K.F.: Vicarious trial and error at a point of choice: a general survey of its relation to learning efficiency, *J. Genet. Psychol.*, 53:75 - 86 (1938).
- [Johnson and Redish, 2007] Johnson, A. and Redish, A. D.: Neural ensembles in ca3 transiently encode paths forward of the animal at a decision point, *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 27:12176 - 89 (2007).
- [Bovet and Pfeifer, 2005] Bovet, S. and Pfeifer, R.: Emergence of delayed reward learning from sensorimotor coordination. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, 841 - 846 (2005).
- [Iizuka and Ikegami, 2005] Iizuka, H. and Ikegami, T.: Emergence of Body Image and Dichotomy of Sensory and Motor Activity. the proceedings of the Symposium on Next Generation Approaches to Machine Consciousness, Hatfield, UK, 104-109 (2005).
- [Hesselmann et al., 2010] Hesselmann, G., Sadaghiani, Sepideh., Friston, K. J. and Kleinschmidt, A.: Predictive Coding or Evidence Accumulation? False Inference and Neuronal Fluctuations. *PLoS ONE*, 5(3), e9926 (2010).
- [Friston, 2010] Friston K.: The free-energy principle: a unified brain theory? *Nat Rev Neurosci.* 11(2):127-38 (2010).
- [Matsuda, Hubart and Ikegami, 2011] Matsuda, E., Hubert, J., Ikegami, T.: A robotic approach to understand roles of vicarious trial-and-error, *Proceedings of the Eleventh European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 514-521, MIT press, 2011.