

# 単一光子による階層型意思決定

## Hierarchical Single-Photon Decision Maker

○成瀬 誠<sup>1,2</sup>, Martin Berthel<sup>2,3</sup>, Aurélien Drezet<sup>2,3</sup>, Serge Huant<sup>2,3</sup>, 堀 裕和<sup>4</sup>, 金 成主<sup>5</sup>

1. 情通機構, 2. Univ. Grenoble Alpes, 3 CNRS Inst. NEEL, 4. 山梨大, 5. 物材機構

○M. Naruse<sup>1,2</sup>, M. Berthel<sup>2,3</sup>, A. Drezet<sup>2,3</sup>, S. Huant<sup>2,3</sup>, H. Hori<sup>4</sup>, S. -J. Kim<sup>5</sup>

1. NICT, 2. Univ. Grenoble Alpes, 3. CNRS Inst. NEEL, 4. Univ. Yamanashi, 5. NIMS

E-mail: naruse@nict.go.jp

人工知能の重要課題である強化学習（意思決定）とは、動的に変化する環境での速やかで的確な判断であり、ネットワークの瞬時最適化等の多くの重要な応用に直結している。意思決定の根幹に、当たり確率の未知なスロットマシンからの獲得報酬を最大化する問題（多本腕バンディット問題(Multi-Armed Bandit problem (MAB)))がある。報酬の最大化には有利なマシンを知るための探索が必要だが、過度な探索は損失であり、一方、性急な判断はよい選択を阻む。すなわち探索（exploration）と決断（exploitation）に難しいトレードオフが存在する。我々は、これらの問題を物理系に固有の性質を用いて物理的に解決する「自然知能」を提案し、これまでに、近接場光<sup>1,2</sup>、単一光子<sup>3</sup>、レーザーカオス<sup>4</sup>を用いた MAB 解決を実験的に実証した。これらの研究では、「綱引き原理」と呼ばれる意思決定原理<sup>5</sup>と、光の微細化、量子性、広帯域性の極限を利用して、しかし、従来の実証研究では腕数（スロットマシン数）が2の最小基本構造を対象としており、現実の意思決定で生じる複数腕への対応（スケーラビリティ）は未解明であった。本研究では、単一光子を用いた意思決定において、光システムを木構造に基づいた多段構造とすることによる階層化を実験的に実証した。具体的には、2段の木構造による4本腕バンディット問題の解決（4台のスロットマシンから報酬確率（P1~P4）の最も高いマシンを選択）に成功した<sup>6</sup>。

単一光子源としてダイヤモンド中の窒素欠陥を用い、単一光子は偏光子、半波長板(HWP1~3)、複数の偏光ビームスプリッター(PBS1~3)を経て4個の検出器の何れかで検出され、これをマシン選択と対応づける（図1a）。選択したマシンからの報酬に基づいてHWPの設定を当たり台へ寄せていく。単一光子の確率性が探索に活かされ、粒子性により各回のマシン選択が決定づけられる。

本システムでは「意思決定の階層性」を議論でき、具体的には、HWP1は「グループレベルの意思決定」（「マシン1,2」か「マシン3,4」か）に関わり、HWP2及び3は「個々の意思決定」に関わる。このようなシステムでは、時として、「グループレベルの意思決定」と「個々の意思決定」が矛盾することが有り得る。例えば報酬確率{P1,...,P4}={0.7, 0.5, 0.9, 0.1}のとき、マシン3が最適意思決定（P3=0.9が最大）だが、グループレベルではマシン1又は2を選ぶことがベターである（P1+P2>P3+P4）。このような階層間の意思決定の矛盾を解き、常に全体最適を得るには「トーナメント方式」、すなわち詳細スケールから順に偏光設定を決定づける方法があり、現に実験的にも実証されている<sup>6</sup>。しかし、単一光子の確率性をより積極的に活用すればトーナメント方式を取らずとも全体最適を導くことができる（図1b）<sup>6</sup>。今後、複数ユーザーを孕んだ競合的バンディット問題や報酬に遅延を伴うマルコフ決定過程等のより高度な意思決定課題の物理知能化を検討する。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会「研究拠点形成事業（A.先端拠点形成型）」の助成による。

参考文献 1) S. -J. Kim, *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 2370 (2013). 2) M. Naruse, *et al.*, *JAP* **116**, 154303 (2014). 3) M. Naruse, *et al.*, *Sci. Rep.* **5** 13253 (2015). 4)成瀬 誠, 内田淳史他, 2016 秋応物理学会 03-260 4) S. -J. Kim, *et al.*, *NJP* **17**, 083023 (2015). 5) M. Naruse, *et al.*, *ACS Photonics* **3**, 2505 (2016).

図1 階層型単一光子意思決定の実験的実証<sup>5</sup>

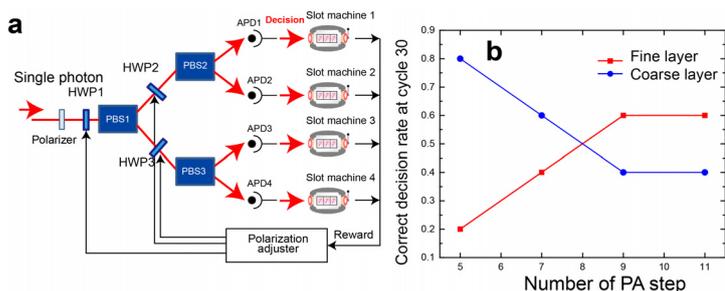


図1 階層型単一光子意思決定の実験的実証<sup>5</sup>

今後、複数ユーザーを孕んだ競合的バンディット問題や報酬に遅延を伴うマルコフ決定過程等のより高度な意思決定課題の物理知能化を検討する。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会「研究拠点形成事業（A.先端拠点形成型）」の助成による。

参考文献 1) S. -J. Kim, *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 2370 (2013). 2) M. Naruse, *et al.*, *JAP* **116**, 154303 (2014). 3) M. Naruse, *et al.*, *Sci. Rep.* **5** 13253 (2015). 4)成瀬 誠, 内田淳史他, 2016 秋応物理学会 03-260 4) S. -J. Kim, *et al.*, *NJP* **17**, 083023 (2015). 5) M. Naruse, *et al.*, *ACS Photonics* **3**, 2505 (2016).