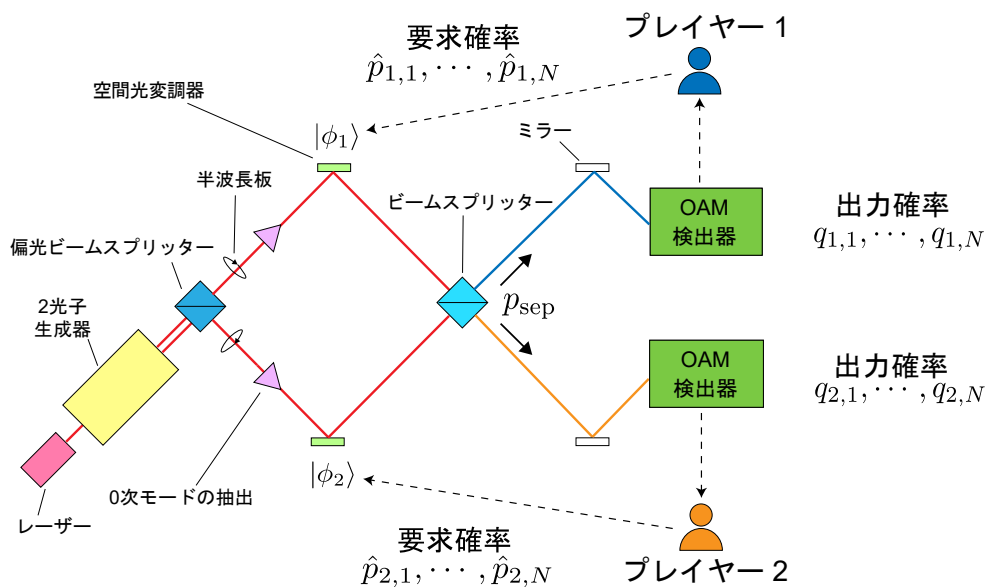


光の干渉で「被らない」選択 ——相談なしでも資源を上手に分ける新しい光情報処理——

発表のポイント

- ◆光の量子干渉を使い、2人が相談しなくても同じ選択肢に集中しない新しい意思決定方式を提案し、数値シミュレーションで有効性を示しました。
- ◆従来手法では難しかった「選択肢が多い場合」でもシステムの効率が良く、性能が安定して高いことを示しました。
- ◆無線通信の周波数割り当てやデータセンター内の光通信制御など、素早い資源配分が必要な技術への応用が期待されます。



提案方式の概念図

概要

東京大学大学院情報理工学系研究科の小中 康平 大学院生(博士課程)、レーム アンドレ 特任准教授、巳鼻 孝朋 助教、堀崎 遼一 教授らによる研究グループは、早稲田大学 川西 哲也 教授が代表である学術変革領域研究(A)「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」プロジェクトにおいて、量子光学(注1)を利用して、2人の利用者が限られた資源を取り合う状況で、互いに相談しなくても衝突を避けられる新しい手法を提案しました。さらに、この手法が有効に働くことを数値シミュレーションで確認しました。

本研究が対象とするのは、強化学習(注2)の一種である競合的多本腕バンディット問題(注3、選択肢から最適なものを試行錯誤しながら学ぶ問題)です。従来の光学的な手法では、減衰器(注4)という光学装置に各利用者の選好性を埋め込んでいましたが、選択肢が増えるとシ

システムの効率が下がりやすく、性能も低下するという課題がありました。そこで研究グループは、減衰器を用いずに、光が“渦を巻くような性質”を持つときに現れる軌道角運動量（注5）に各利用者がどの選択肢をどのくらい選びたいかという情報を埋め込み、さらに量子干渉（注6）によって同じ選択肢を選ぶ確率を0にする方式を考案しました。今後、分散的で高速な資源配分が求められる通信技術などへの展開が期待されます。

発表内容

無線通信や情報通信の現場では、複数の利用者が通信機器により通信環境の最も良い周波数帯や通信路を同時に選ぶと通信の混雑が起こり、全体として通信品質が下がります。つまり、利用者ごとに環境の良い複数の周波数帯や通信路に分かれて選ぶことで、全体としての通信品質が維持できます。こうした問題は、試行錯誤しながらより良い選択を学ぶ強化学習の一種である競合的多本腕バンディット問題として表すことができます。バンディット問題は、利用者をプレイヤー、通信路などの選択肢をスロットマシンに置き換え、プレイヤーがスロットマシンから得られる報酬の最大化を目指す問題と定義できます。本研究のような競合的な場合には、複数人のプレイヤーが全プレイヤーの総報酬最大化を目指す問題として定義でき、プレイヤーが同じスロットを選んだ場合（選択衝突）はそのスロットマシンから得られた報酬をプレイヤーが山分けして得ることで再現できます。しかしながら、プレイヤー同士が互いの選択内容を毎回教え合わずに、報酬最大化を目指しながら選択衝突も避けることは簡単ではありません。本問題を解決する従来の光学的な方式では、問題の解決のために減衰器を利用した手法を提案していました。しかし、選択肢数が増えるとシステムの稼働効率が急速に落ち、加えて選択肢の並び順により性能が変化してしまうという課題がありました。

研究グループは、各利用者がどの選択肢をどれだけ選びたいかという情報を、光の渦の状態である軌道角運動量に符号化する方式を考案しました。そして、2つの光を重ねたときに起こる量子干渉を利用して、2人が同じ選択肢を選ぼうとすると“互いに打ち消し合う”ためにその結果が理論的に起きないように設計しました。数値シミュレーションでは、図1に示すように5個および10個の選択肢を持つ条件で、従来法より性能が良く、選択肢の並べ替えにも性能が影響されにくいことを確認しました。

本研究は、光のもつ自然な物理現象をそのまま“意思決定の調整”に利用する新しい情報処理の考え方を示すものです。今後、より多人数への拡張や実機での検証が進めば、無線通信の周波数割り当て、データセンター内の光通信路の制御、内部情報を細かく共有しなくてもよい分散型意思決定などへの発展が期待されます。

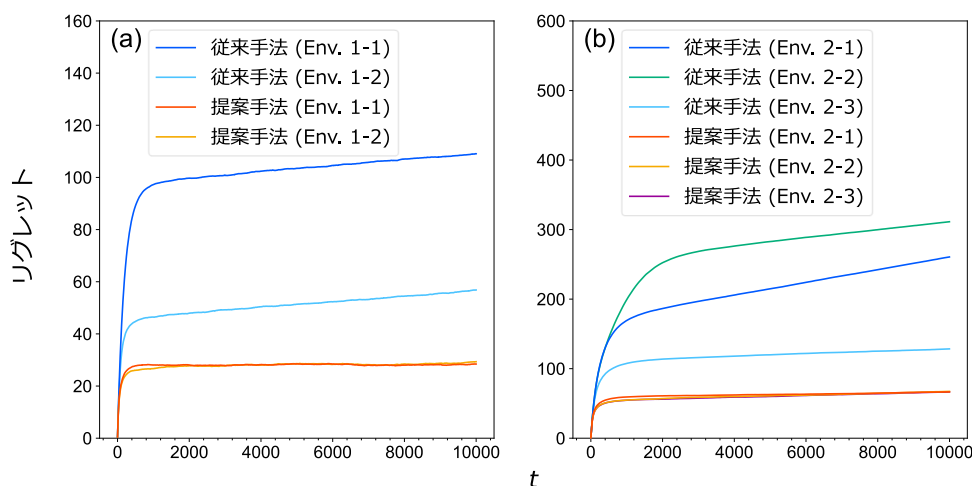


図 1 : 従来手法と提案手法における性能の比較

横軸は競合的バンディット問題における時間ステップを表し、縦軸はリグレットと呼ばれる評価指標で値が小さいほど性能が良いことを表します。

(図左) 選択枝数が 5 の場合の結果であり、Env. 1-1 と Env. 1-2 はスロットマシンが同じ設定の組み合わせで、スロットの並び順が異なります。提案手法(オレンジ、黄色)は従来手法(青色、水色)と比べて性能が良く、2つの環境で性能が変わらないことからスロットの並び順に殆ど影響されていないことがわかります。

(図右) 選択枝数が 10 の場合の結果であり、Env. 2-1、Env. 2-2、Env. 2-3 はスロットマシンの設定が同じ組み合わせで、スロットの並び順が異なります。選択枝数が 5 の場合と同様の結果が得られていることがわかります。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻

堀崎 遼一 教授

レーム アンドレ 特任准教授

巳鼻 孝朋 助教

小中 康平 博士課程

論文情報

雑誌名 : npj Quantum Information

題名 : Scalable conflict-free bandit algorithm using a quantum optical setup

著者名 : Kohei Konaka, André Röhm, Takatomo Mihana, Ryoichi Horisaki

DOI : 10.1038/s41534-026-01201-6

研究助成

本研究は、日本学術振興会の学術変革領域研究(A)「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成(課題番号:22H05197)」、JST SPRING GX(課題番号:JPMJSP2108)の支援により実施されました。

用語解説

(注1) 量子光学

光を電磁波としてではなく、1個ずつの粒(量子)として扱う光学の分野。単一光子、量子もつれ、量子干渉など、古典光学で説明できない現象を取り扱う。

(注2) 強化学習

コンピューターに学習を行わせる機械学習のうちの1分野。エージェントと環境の組からなり、エージェントは環境の状態から選択枝のうち1つを選択し、環境はエージェントからの選択から次の環境状態と報酬をエージェントに渡すことを繰り返し、エージェントが総報酬最大化を目指す問題。

(注3) 競合的多本腕バンディット問題

環境の状態が変化しないものを多本腕バンディット問題と呼び、その中でエージェントが複数人いる場合を競合的多本腕バンディット問題と呼ぶ。エージェントが複数いるため、エージェ

ント同士で選択が同じになる選択競合が発生する。選択競合が発生した場合には、選択により得られた報酬はエージェント同士で山分けとなる。したがって、選択競合を起こさずに総報酬最大化を目指す必要がある。

(注4) 減衰器

光の強度を所望の量だけ弱めるための光学素子。量子状態をもつ光子が入ると、所望の量だけ検出される確率を低下させる。

(注5) 軌道角運動量

光の波面がらせん状の位相構造を持つときに現れる角運動量である。この性質を利用すると、多数の異なる光の状態を作ることができ、通信や量子情報処理への応用が期待されている。

(注6) 量子干渉

量子状態の重ね合わせによって生じる干渉現象であり、光子などの粒子でも波のような干渉が起こる量子力学特有の現象である。