

光多重化技術を用いた空間光イジングマシン



若 者

下 村 優*

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Key Words : Ising machine, Optical multiplexing, Combinational optimization problem

はじめに

社会には数多くの候補の中から良い解を選択する問題が多数存在している。しかし、その中から最適な組合せを導き出すことは容易ではない。多くの選択肢の中から最適な組合せを効率的かつ高速に見つけ出すことは、数理学において最も解くことが難しい問題であり、NP 困難として知られている。全探索に基づく最適解探索を実行する場合、選択肢の増加に伴い計算量が指数関数的に増大するため、有限時間では最適解を求めることはできない。最適解を求めるため、効率的な解探索を実行する計算機システムが提案されている。イジングマシンは、磁性体内部にある電子のスピン状態の振る舞いに着想を得た計算機システムである。問題の制約と組合せとイジングモデルで表現し、評価値としてイジングハミルトニアンを計算する。イジングハミルトニアンが最小となるようにシミュレーテッドアニーリングをはじめとしたヒューリスティックアルゴリズムを用いた解探索の実行により、最適解を導出できる。磁性体の挙動に基づいたイジングマシンの演算プロセスは、他の物理現象でも代替可能であり、CMOS 回路や量子ビットを用いたハードウェア実装が提案・実装されている¹⁾。光を用いたイジングマシンは、イジングハミルトニアンの高速度演算と擬似スピンの大規模表現が可能であり、光ファイバーを用いたコヒーレントイジングマシンでは、100,000 以上の

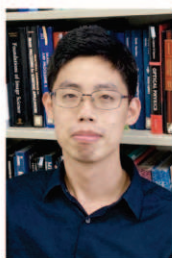
擬似スピンが必要な組合せ最適化問題の最適解探索を実現している²⁾。

空間光イジングマシンは、光の自由伝搬に基づく並列演算を活用した光学システムであり、2 値のスピン状態を光の位相情報へ変換する³⁾。光の 2 次元分布と自由伝搬による光演算によって大規模かつ高速なイジングハミルトニアン演算を可能とする。しかし、レンズを用いたフーリエ変換作用を用いた演算プロセスを利用するため、柔軟な演算プロセスを構築することが難しく、空間光イジングマシンで取り扱い可能な組合せ最適化問題は限定されている。

我々は光の多重化技術を用いたイジングハミルトニアンの並列演算により、様々な組合せ最適化問題の最適解探索を実現する空間光イジングマシンの開発を目指している。光学システムを用いて複数のイジングハミルトニアンを並列処理し、計算機処理によるイジングハミルトニアンの積和演算によって、対象となる組合せ最適化問題において必要となるイジングハミルトニアンを導出する。本研究では、時間・空間分割多重化により、従来手法では解探索できなかったナップザック問題における最適解導出能力を検証した。

時間・空間分割多重化によるイジングハミルトニアンの並列演算

組合せ最適化問題の解探索を実現する、光多重化技術を用いた空間光イジングマシンの概略を図 1 に示す。イジングハミルトニアンの演算は、空間光変調器 (SLM) を用いた位相 ϕ の変調とレンズを用いたフーリエ変換作用により実行される。振幅分布 ϕ をもつ光を SLM に入射し、位相を変調する。光位相分布 ϕ を 0 と π の 2 値となるように変調することで擬似スピン $\sigma = \exp \{i\phi\}$ を表現する。変調された光はレンズを通り、イメージセンサ面で集光される。焦点における光強度値がイジングハミルトニ



* Suguru SHIMOMURA

1993年4月生まれ
大阪大学大学院 情報科学研究科 情報
数理学専攻博士後期課程 (2021年)
現在、大阪大学大学院 情報科学研究科
情報数理学専攻 助教 博士 (情報科学)
専門/光コンピューティング
TEL : 06-6879-4398
E-mail : s-shimomura@ist.osaka-u.ac.jp

$$H \propto - \sum_{j,h} \xi_j \xi_h \sigma_j \sigma_h = - \sum_{j,h} J_{j,h} \sigma_j \sigma_h$$

アンとなる。光強度値の最大化がイジングハミルトニアン⁵⁾の最大化に対応しており、取得結果に基づいたシミュレーテッドアニーリングによる変調位相分布の更新により最適解を探索できる。 J はスピンの相互作用効果を表しており、対象とする問題における制約を表現する。空間光イジングマシンにおいて J の自由度は擬似スピンの数と同数であり、任意の制約条件を表現できない。本研究では、光多重化を用いてイジングハミルトニアンを並列処理する。時分割多重化を用いた光イジングマシンでは振幅分布 $\xi^{(k)}$ をもつ複数の光パターンを用意し、各パターンの照射における光強度を逐次取得する [図 1 (a)]。得られたデータの重み付けによりイジングハミルトニアン

$$H = - \sum_k \lambda^{(k)} \sum_{j,h} \xi_j^{(k)} \xi_h^{(k)} \sigma_j \sigma_h$$

が得られる。この時、相互作用 J の自由度は多重化数 k とスピン数の積となり、表現能力が拡張される。時分割多重化では、多重化数を容易に増加させることができるため、任意の制約条件が符号化された相互作用 J を表現できる⁴⁾。空間分割多重化を用いた空間光イジングマシンでは、互いにインコヒーレントな振幅分布 $\xi^{(k)}$ を持ち、光を空間展開する [図 1 (b)]。それぞれの光波は重ね合わされたのち、SLMによってそれぞれの位相が変調される。集光点で計

測される光強度値は、それぞれの振幅分布 $\xi^{(k)}$ で演算されるイジングハミルトニアン⁵⁾の足し合わせとなるため、空間分割多重化の利用により計算機での重み付けなくイジングハミルトニアン⁵⁾が得られる⁵⁾。

ナップザック問題の解探索性能評価

各システムの性能を評価するため、規定された重量の中で価値を最大化するナップザック問題における最適解探索を実行した。ナップザック問題は多重化数が2以上でなければ相互作用 J を表現できない問題であり、従来手法では解探索できない。実験では、2種類の振幅パターン $\xi^{(1)}$ 、 $\xi^{(2)}$ をもつ光パターンを生成し、各多重化手法を適用した。時分割多重化を用いてスピン数が17個必要なナップザック問題の解探索を実行したところ、反復回数に応じてイジングハミルトニアンが減少した [図 2 (a)]。規定の反復回数後に得られる位相分布から、探索結果を算出したところ、試行回数50回のうち、最適解が24回得られた [図 2 (b)]。本結果より、時分割多重化を用いた空間光イジングマシンが、最適解探索可能であることを実証した。また、空間分割多重化では、重み $\lambda^{(k)}$ を示す光強度値を光学的に変調でき、解探索方式を動的に変調できる。空間分割多重化により展開された2つの光パターンの強度比 $\lambda^{(1)}/\lambda^{(2)}$ を動的に変調する動的係数探索法を提案し、シミュレーテッドアニーリング法よりも効率的な最適解探索が可能であることを数値シミュレーションにより明らかにした [図 2 (c)]。

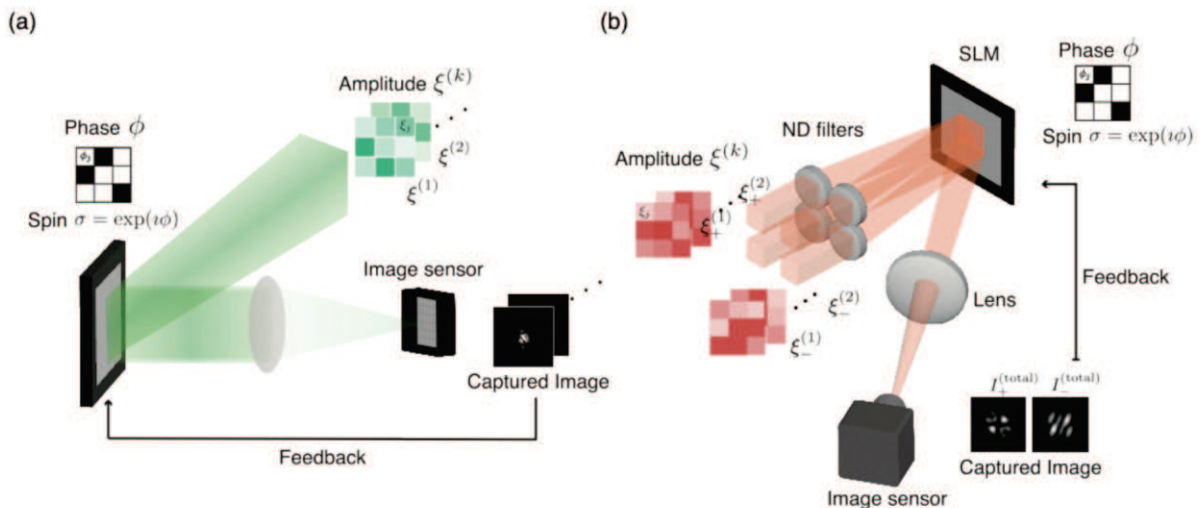


図 1 (a) 時分割 (b) 空間分割多重化を用いた空間光イジングマシン。

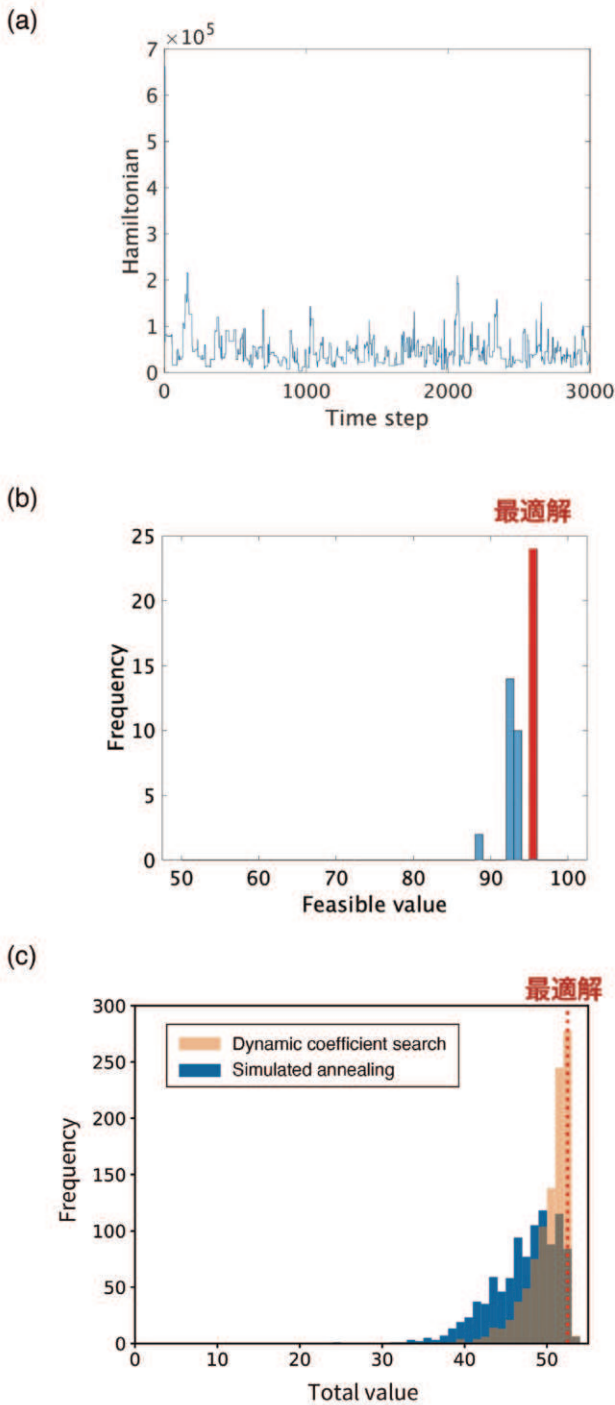


図2 (a) 時間分割多重化を用いた空間光イジングマシンにおけるイジングハミルトニアン の推移。
 (b) 解として得られたナップザック問題の解分布。
 (c) 動的係数探索法とシミュレーテッドアニーリング法を用いたナップザック問題における解分布。

おわりに

本研究では、空間光イジングマシンが取り扱いできる組合せ最適化問題の拡張を目指し、光多重化を

用いた要素イジングハミルトニアン の並列演算を実現した。また、光学的変調を活用した探索アルゴリズムである動的係数探索法により効率的な最適解探索が可能であることを明らかにした。空間光イジングマシンは、擬似スピンを2次元位相情報へ符号化できることから、選択肢が10万以上ある問題をセットアップの変更なく実装できる。そのため、様々な規模、種類の問題の解探索が可能システムとして成長するだろう。一方、空間光イジングマシンはSLMへの電子的フィードバックを不可欠とするため、探索のための反復回数の増大は、膨大な計算時間を要してしまう。光の並列演算処理を拡張することで、目的関数となるイジングハミルトニアンを光の並列演算処理能力を応用できれば、時間遅延を生じさせる電子フィードバックを少ない回数で最適解を探索でき、空間光イジングマシンの高速化が可能となる。

組み合わせ最適化問題の最適解導出は、最短経路探索や貨物積み込み最適化をはじめとした交通・運送分野に寄与する。光多重化を用いた空間光イジングマシンの発展は、幅広い問題に対応可能な情報基盤技術として機能する。

参考文献

- 1) M. Yamaoka, *et al.*, "A 20k-spin Ising chip to solve combinatorial optimization problems with CMOS annealing," *IEEE J. Solid-State Circuits* 51, 303 (2016).
- 2) T. Inagaki, *et al.*, "A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems," *Science* 354, 603 (2016).
- 3) D. Pierangeli, *et al.*, "Large-Scale Photonic Ising Machine by Spatial Light Modulation," *Phys. Rev. Lett.* 122, 213902 (2019).
- 4) H. Yamashita, *et al.*, "Low-rank combinatorial optimization and statistical learning by spatial photonic Ising machine," *Phys. Rev. Lett.* 131, 063801 (2023).
- 5) T. Sakabe, *et al.*, "Spatial-photonic Ising machine by space-division multiplexing with physically tunable coefficients of a multi-component model," *Opt. Express*, 31, 26 44127-44138 (2023).