

光多重化を用いた空間フォトニックイジングマシンの機能拡張

Function enhancement of spatial photonic Ising machine by using optical multiplexing

阪大院情報, °下村 優,

Osaka Univ.

E-mail: s-shimomura@ist.osaka-u.ac.jp

多数の選択肢の中から最も良い解を見つけ出す組合せ最適化問題において、効率的な解探索システムの実現は、交通をはじめとした幅広い分野に寄与する。イジングマシンは組合せ最適化問題に特化した計算システムであり、問題の選択肢と制約をスピン変数と相互作用に符号化し、組合せの評価値を示すイジングハミルトニアンを最小化することで最適解を探索する。空間フォトニックイジングマシン (Spatial Photonic Ising Machine, SPIM) は、スピン変数を位相分布に符号化することで、10,000 個以上の選択肢を持つ組合せ最適化問題の解探索を可能とする[1]。しかし、相互作用の表現自由度はスピン数と同等であり、解探索できる組合せ最適化問題の種類は限定されていた。本研究では、光多重化技術を用いた SPIM の機能拡張により、様々な種類の組合せ最適化問題を取り扱う SPIM の開発をめざしている。本手法では時間・空間分割多重化により相互作用の自由度を拡張し、従来の SPIM では解けない組合せ最適化問題における解探索を行なった。

イジングハミルトニアン H はスピン変数 σ と相互作用 J を用いて $H = -\sum_{j,k} J_{j,k} \sigma_j \sigma_k$ と表しており、SPIM では振幅分布 ξ を用いて相互作用を表現する。本手法では複数の光パターンを用いて相互作用の自由度を拡張する[2]。Figure 1 に空間分割多重化を用いた SPIM の概略図を示す。振幅分布 ξ をもつ光の位相は空間光変調器 (SLM) を用いて変調される。各ピクセルの位相変調量 ϕ_j は 2 値であり、スピン変数 $\sigma_j = \exp\{i\pi\phi_j\} \in \{-1, 1\}$ を表現する。変調された光はレンズを用いて集光され、イメージセンサで取得される。集光の中心強度値 $I^{(total)}$ は SPIM のイジングハミルトニアン $H = \sum_{j,k} \xi_j \xi_k \sigma_j \sigma_k$ に対応しており、相互作用は $J = \xi \xi^T$ で表現される。本手法では空間多重化のため振幅分布 $\lambda_k \xi^{(k)}$ をもつ複数の光パターンを SLM に一括入力する。各振幅分布 $\lambda_m \xi^{(m)}$ と位相分布 ϕ と演算により、取得されるイジングハミルトニアンは $H = \sum_k \lambda_k \sum_{i,j} \xi_i^{(k)} \xi_j^{(k)} \sigma_i \sigma_j$ となり、相互作用は $J = \sum_k \lambda_k \xi^{(k)} \xi^{(k)T}$ で表される。その結果、多重化によってとなり相互作用の自由度が増え、処理可能な組合せ最適化問題を拡張できる[3]。

実証実験では、多重化数が 2 つ必要なナップザック問題における最適解探索能力を検証した。スピン数が 17 個必要な問題において、最適化されたスピン変数から組合せ解を求めたところ、最適解が得られることを確認した本結果より、光多重化により SPIM が処理する組合せ最適化問題の種類を拡張できることを実証した。

本研究は JSPS 科研費 23H04805, JST ALCA-Next JPMJAN23F2 の助成を受けたものである。

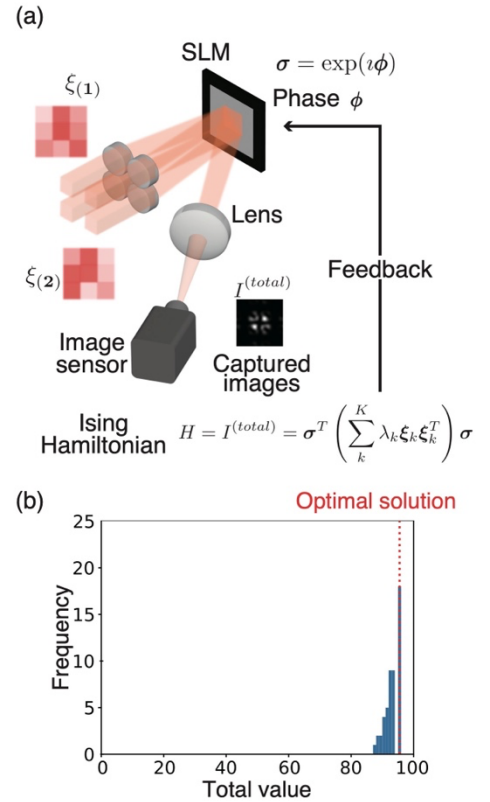


Fig. 1 (a) Schematic of SPIM using space-division multiplexing. (b) Histogram of solution in the knapsack problem.

- [1] D. Pierangeli, G. Marcucci, and C. Conti, “Large-scale photonic Ising machine by spatial light modulation,” *Physical Review Letters*, **122**, 213902 (2019).
- [2] H. Yamashita, K. Okubo, S. Shimomura, Y. Ogura, J. Tanida, and H. Suzuki, “Low-rank combinatorial optimization and statistical learning by spatial photonic Ising machine,” *Physical Review Letters*, **131**, 063801 (2023).
- [3] T. Sakabe, S. Shimomura, Y. Ogura, K. Okubo, H. Yamashita, H. Suzuki, and J. Tanida, “Spatial-photonic Ising machine by space-division multiplexing with physically tunable coefficients of a multi-component model,” *Optics Express*, **31**(26), 44127-44138 (2023).