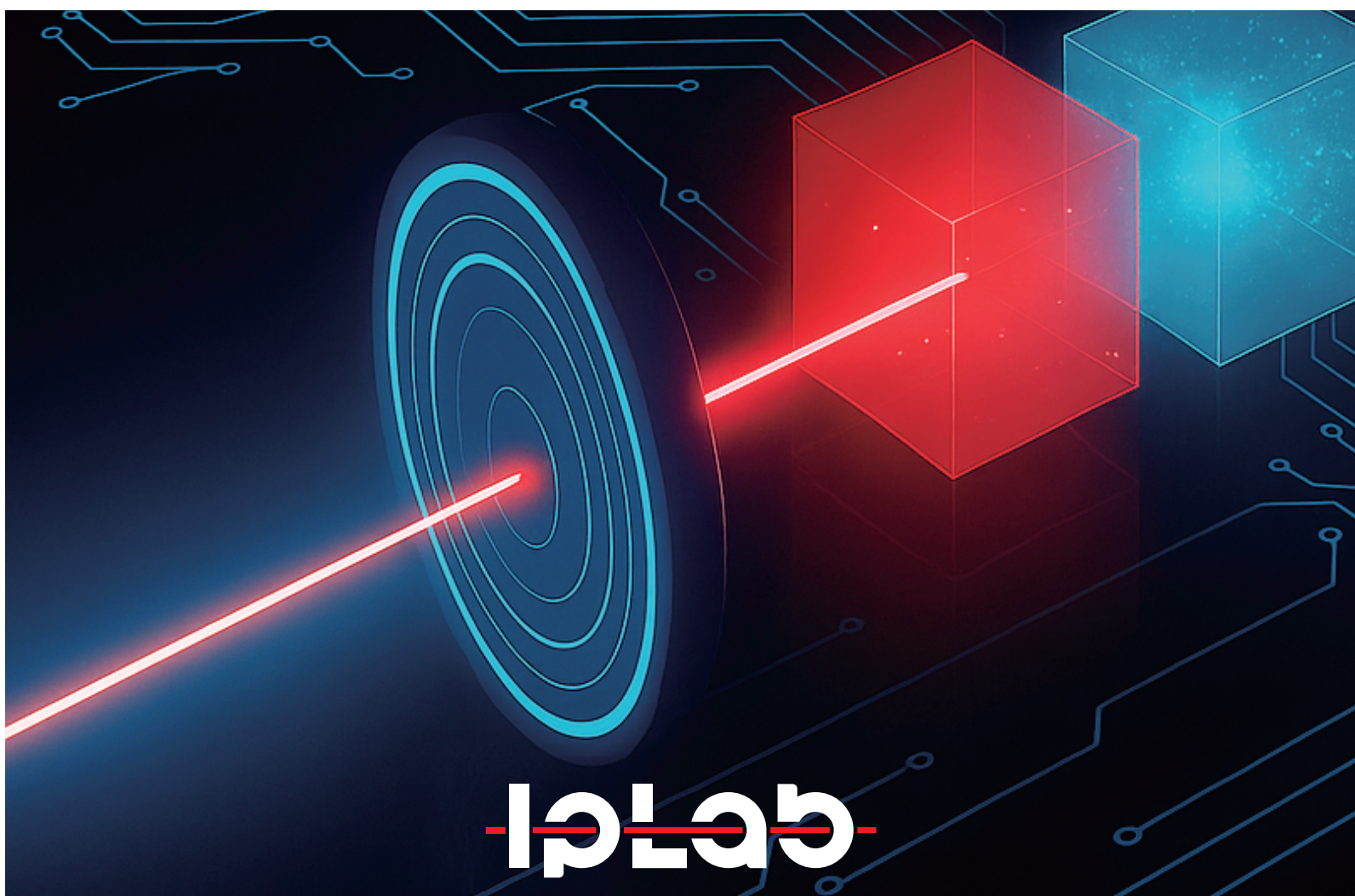




Annual report 2024-2025



巻 頭 言

情報フォトニクス講座は、谷田純先生のご退職にともない、2024 年 4 月より小倉と下村助教の二人で研究教育を行ってきましたが、2025 年 2 月に小倉が教授に昇任して、新しい研究室としてのスタートをきりました。光コンピュータ、光コンピューティング、情報フォトニクスとつながってきた研究分野の先を見つめながら、飛躍的な進展を見せる光学・フォトニクス、情報科学、数理科学、応用物理学などの連携により、新しい時代の光情報システムの開拓をめざします。

研究室発足元年となった 2024 年度は学部 3 名、修士 2 名の学生が無事卒業・修了しました。学部生は研究室の記念すべき卒業 1 期生です。修了生は M2 で研究室が今の体制になりましたので、0 期生といったところでしょうか。研究室運営は手探り状態でしたが、どの学生もたくましく成長してくれて、喜びもひとしおです。

さて、この年報は、1 年間の研究室活動をまとめたものです。谷田研から発行していた LIP レポートは、それまでにご縁のあった方々に冊子体をお送りするスタイルでしたが、本年報では、これまでにお世話になった方々はもちろんですが、より広い方々にも我々の活動を知っていただき、新たなご縁のきっかけとなればとウェブでの発行としました。研究者の方々には、発表済みの論文や予稿などの成果物を見わたしていただけます。また、本年度に卒業した学生には、研究室で過ごした感想や、高校生や大学生などこれから研究室に入る若者へのメッセージを書いてもらい、学生目線での研究や研究室を少しでもリアルに伝えることにしました。ぜひご覧ください。研究室はまだまだ駆け出しで、成長へのさまざまなエネルギーが欠かせません。皆様には、今後とも温かいご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

情報フォトニクス講座 教授
小倉 裕介

メンバー

スタッフ	
教授	小倉 裕介
助教	下村 優
事務補佐員	松下 昌樹子
大学院 博士前期課程	
M2	洲崎 泰輝
M2	山内 一輝
M2	山本 悠貴
M1	岩淵 健吾
M1	木原 崇晶
M1	柴田 涼平
学部生	
B4	笹木 天翔
B4	数藤 和也
B4	野内 稜

構造化偏光スポットアレイの生成と偏光イメージング応用 Generation of a Polarization-Structured Spot Array and Its Application to Polarization Imaging

洲崎 泰輝

Taiki Suzuki

Abstract Polarization imaging enables the visualization of polarization characteristics, which is valuable for material evaluation and biological research. This study develops a method for generating polarization-structured illumination for polarization imaging. Experimental results demonstrate its effectiveness in single-shot diattenuation imaging.

1 はじめに

偏光イメージングは、光の偏光特性を可視化する技術である [1]。従来の手法では、複数の偏光応答を取得するために照明偏光の切り替えが必要であった。本研究では、異なる偏光状態を持つ微小スポットを規則的かつ高密度に配置した構造化偏光照明を提案し、実験でその生成を確かめた。また、この照明光のシングルショット偏光イメージングへの有効性を実証した。具体的には、サンプルの複吸収性の分布を取得可能であることを確認した。

2 構造化偏光スポットアレイの生成

構造化偏光スポットアレイは、計算機合成ホログラム (CGH) を用いて位相変調した光波を、軸対称偏光変換素子でアジマス偏光に変換し、集光することで生成できる。また、隣接スポットの位置や、位相を調整することで、直線偏光の交互配列や左右円偏光の高密度配列が可能となる (図 1)。

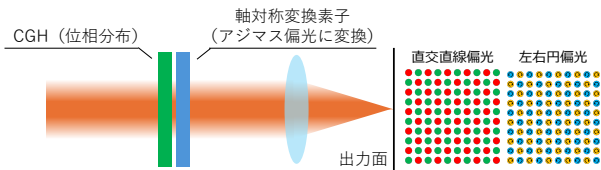


図 1: 構造化偏光スポットアレイの生成方法。

3 複吸収イメージングへの応用

デンプンを対象に、構造化した直線偏光のスポットアレイを用いた複吸収特性の分布計測を実施した。図 2(a) に、複吸収の主軸分布の計測を示す。矢印の大きさは複吸収の大きさ、矢印の向きはサンプルの主軸の向きを表す。また、図 2(b) に、デンプンの内部、縁、および空気中の領域における平均複吸収値と主軸の角度の標準偏差をまとめている。この結果から、デンプンの縁の領域では、デンプン内部や空気の領域と比べて特に強い複吸収値を示すこと、また、角度の変化は縁領域で最も小さく、縁方向に沿って主軸が変化していることが確認された。これらの傾向は、先行研究 [2] と一致しており、本手法のバイオ計測への応用可能性を示している。

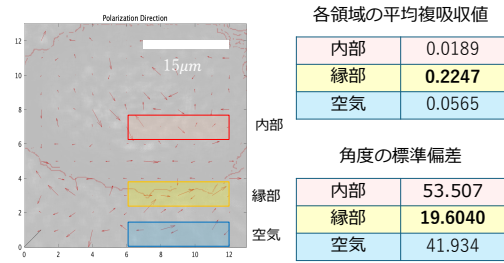


図 2: 複吸収特性の分布とその解析結果。

4 左右円偏光の同時生成

左右円偏光の同時生成の例として、16x16のスポットアレイ生成結果を図 3 に示す。図 3(a) はシミュレーション結果であり、円偏光の指標であるストークスパラメータの S3 成分を示している。+1 が右回りの円偏光、-1 が左回りの円偏光を示す。この結果から右回り、左回りの円偏光スポットが交互かつ高密度に生成されていることが分かる。また、図 3(b) は実験結果である。スポットアレイを 1/4 波長板越しに偏光カメラで撮像し、45° 偏光と 135° 偏光の画像を解析することで S3 を求めた。シミュレーションと整合する結果が得られており、本手法による円偏光スポットの交互アレイ生成を確認できた。

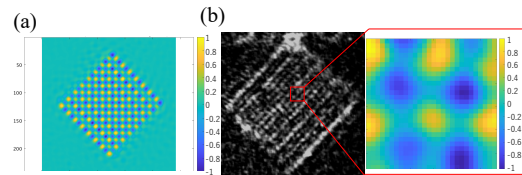


図 3: (a) シミュレーション結果、(b) 実験結果。

5 まとめ

本研究では、異なる偏光を内包する構造化偏光スポットアレイを提案し、実験で確かめた。また、この構造化偏光照明の偏光イメージングへの適用可能性を示した。

参考文献

- [1] J. L. Pezzaniti *et al.*, Opt. Eng. **34**(6), 1558–1568 (1995).
- [2] M. J. Lopera *et al.*, Appl. Opt. **61**(5), B77–B82 (2022).

3次元散乱イメージングに向けた Gaussian splattingに基づくデジタルツイン構築

Construction of a digital twin based on Gaussian splatting for three-dimensional imaging through scattering media

山内 一輝

Kazuki Yamanouchi

Abstract We aim to achieve accurate 3D imaging under scattering environment by using the digital twin. In this study, we attempt to construct a 3D digital twin based on Gaussian Splatting (3DGS). Gaussian Splatting is a method for representing 3D scenes using a collection of ellipsoids with opacities following a 3D Gaussian distribution. By introducing a scattering process into the native algorithm, an object behind a scattering media can be reconstructed. The proposed algorithm could remove the effect of scattering and construct a 3D model with high contrast.

1 はじめに

散乱体背後にある物体の3次元イメージングは、パノイイメージングにおいて重要な技術である。データ同化技術を基盤とするデジタルツイン (DT) は、実世界の対象やその振る舞いをサイバー空間上でエミュレートできる [1]。散乱による光波の乱れをサイバー空間上の DT でエミュレートできれば、実空間では観察が難しい対象・系においてもイメージングが可能となる。本研究では、DT を用いた高精度なイメージングに向けて、3D Gaussian Splatting (3DGS) に基づく DT の構築を目的とする。

2 散乱プロセスを組み込んだ 3DGS

3DGS はガウス分布に従う不透明度を持った楕円球 (3D Gaussian) の集合により物体を3次元的に表現する [2]。本手法では、散乱体背後の物体を DT として構築するために、散乱プロセスを組み込んだ 3DGS を実装した。図 1 に提案手法の概要を示す。まず散乱下にある物体を複数視点から撮影する。得られた劣化画像群を入力とし、Structure from Motion (SfM) [3] を用いて初期点群を生成する。初期点群は、共分散行列・不透明度・色情報を加えた 3D Gaussians に変換される。3D Gaussians は、SfM から推定した撮影時のカメラ位置や向きに基づき画像としてレンダリングされる。散乱過程を経た画像取得を実装するため、レンダリング画像に対して散乱媒質の点像分布関数を畳み込み、劣化画像を生成する [4]。撮影

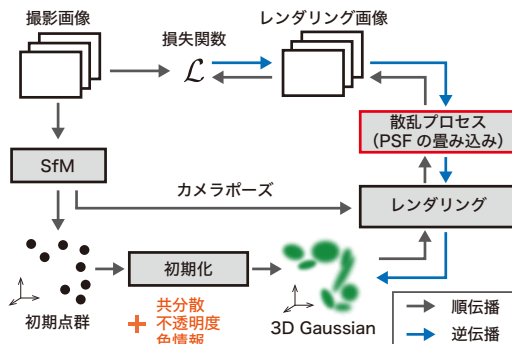


図 1: 提案手法の概略。PSF: 点像分布関数。

した劣化画像群と出力画像群との誤差を減らすように 3D Gaussians パラメータを反復的に更新し、散乱媒質背後にある物体の 3D モデルを構築できる。

3 散乱 GS による再構成結果

提案手法を実証するために、既存の GS と本手法による再構成結果を比較した。複数視点から撮影した画像 [図 2(a)] に対し、点像分布関数の畳み込みによる劣化画像を生成し、既存の 3DGS と本手法により処理した。各手法で再構成した画像を図 2(b), (c) に示す。物体像のボケを評価するために、図 2 中の青線に沿って、各視点での白線の幅を計測した。撮影画像と再構成画像における幅の RMSE は、既存の 3DGS では 2.91 であったが、本手法では 1.36 であった。本結果より、光散乱の影響が除外された 3次元対象の DT を構築できることを確認した。

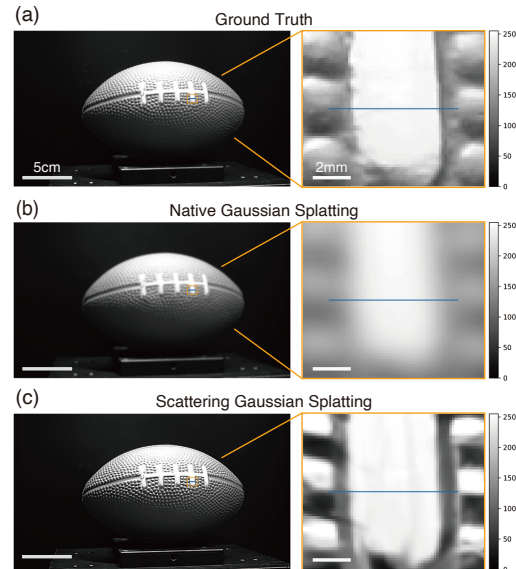


図 2: 対象物体の撮影・再構成画像とその拡大図。(a) 撮影画像、(b) 3DGS、(c) 散乱 GS (提案手法)。

参考文献

- [1] F. Tao *et al.*, J. Manuf. Syst. **64**, 372-389 (2022).
- [2] B. Kerbl *et al.*, ACM Trans. Graphics **42**(4) (2023).
- [3] J.L. Schönberger, J.M. Frahm, CVPR, 4104-4113 (2016).
- [4] J.W. Goodman, (McGraw-Hill, 1996)

強度輸送方程式を用いたベクトル光波面センシング

Vector wavefront sensing using transport-of-intensity equation

山本 悠貴
Yuki Yamamoto

Abstract Polarization and phase imaging is essential for analyzing material structures and molecular orientations. This introduces a vector wavefront imaging technique using the transport-of-intensity equation and a polarization camera. By analyzing intensity distributions, complex amplitudes and phase retardation to map the vector optical field. Experimental results confirm effectiveness.

1 はじめに

光と物質の相互作用は対象の特性を示す重要な情報を提供する．特に，光波の位相は対象の厚み，偏光状態は異方性などの構造特性を測る指標としてしばしば用いられる [1,2]．しかしながら，従来の位相・偏光測定技術では複雑な光学系や測定手順を要することが課題であった．本研究では，従来手法よりも簡便な光学系かつ省ステップの測定で実現可能な位相・偏光の同時イメージング技術を開発し，その有効性を検証した．

2 測定手法

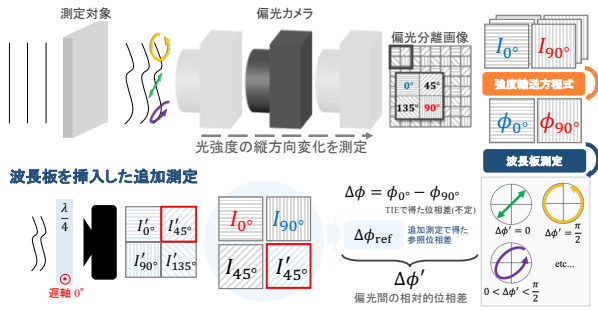


図 1: 手法概要.

本研究の測定原理を図 1 に示す．偏光カメラで取得した偏光毎の強度分布 $I_\theta(x, y, z)$ に対し強度輸送方程式 (TIE) を適用することで，各偏光成分の位相分布 $\phi_\theta(x, y, z)$ を求める．ここで， θ は偏光角を表し， $\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ である．TIE は光波場の位相 $\phi(x, y, z)$ と縦方向の強度変化 $\frac{\partial}{\partial z} I(x, y, z)$ との関係を示す偏微分方程式である．本研究では，偏光角 θ を考慮し式 (1) で表現する．

$$-k \frac{\partial}{\partial z} I_\theta(x, y, z) = \nabla_{x,y} \cdot [I_\theta(x, y, z) \nabla_{x,y} \phi_\theta(x, y, z)] \quad (1)$$

偏光状態は直交する 2 つの偏光成分の複素振幅から導出可能である．このとき，2 者間の相対的位相差 $\Delta\phi = \phi_{0^\circ} - \phi_{90^\circ}$ の情報は必要不可欠である．しかし，TIE の解として得られる位相分布 $\phi_{0^\circ}, \phi_{90^\circ}$ は任意定数項を含むため，偏光間の位相差 $\Delta\phi$ を一意に決定するには追加の測定が必要である． 0° 方向に遅軸を持つ $\lambda/4$ 波長板を挿入し測定した 45° 直線偏光強度 I'_{45° を新たに取得し，式 (2) により参照位相差 $\Delta\phi_{\text{ref}}$ を導出する．その後，式 (3) により $\Delta\phi$ と $\Delta\phi_{\text{ref}}$ の差を最小化するような定数 δ を減算し，

新たな偏光間位相差 $\Delta\phi'$ を決定する．

$$\Delta\phi_{\text{ref}} = \arctan \left(\frac{-2I'_{45^\circ} + (I_{0^\circ} + I_{90^\circ})}{2I_{45^\circ} - (I_{0^\circ} + I_{90^\circ})} \right) \quad (2)$$

$$\Delta\phi' = \Delta\phi - \arg \min_{\delta} \sum_{(x,y)} (\Delta\phi_{\text{ref}} - \Delta\phi + \delta)^2 \quad (3)$$

3 実験

図 2 の光学系を用いて実験を行った．サンプルはレンズと波長板を組み合わせて作成した．入射光は 45° 直線偏光の平面波であり，理想的な出射偏光状態はサンプル右から 45° 直線偏光，左円偏光， 135° 直線偏光となる．実験結果を図 3 に示す．左上段は強度分布，下段は位相分布である．レンズによる放射状の位相勾配，波長板の領域ごとの位相ステップを確認できる．図 3 右は偏光状態分布である．測定された偏光状態は，サンプルから予測される出射偏光状態との妥当な一致を示した．

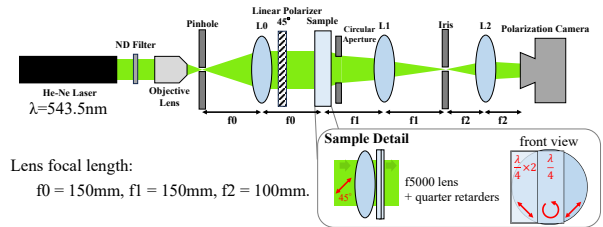


図 2: 実験光学系.

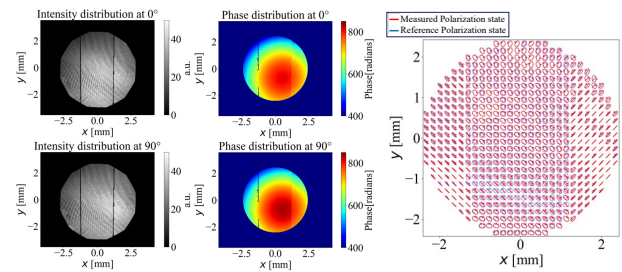


図 3: 実験結果.

(左) 各偏光の複素振幅分布，(右) 偏光状態分布．

参考文献

- [1] Li, Ying, et al., Optics Express, 586-593 (2018).
- [2] Song, Seungri, et al., ACS Photonics, 158-165 (2021).

不均一媒質と再帰性反射を用いた画像暗号化

Image encryption using uneven media and retro-reflection

岩渕 健吾

Kengo Iwabuchi

Abstract Humans acquire about 80% of external information through vision. Thus, image and video are widely used as the way of presenting information. In presenting information, it is effective not only to the many and unspecified people, but also to the specific people. As a method that allows only those who possess a specific object to observe secret image information, image encryption using retro-reflector and transparent spheres has been proposed. But, in this method, the transparent spheres become larger as the image area to be encrypted expands. In this study, we propose an alternative encryption method using a plate-like media with an uneven structure.

1 はじめに

人は、外界から得る情報の約8割を視覚から得ていると言われており、画像や映像による情報提示は様々な場面で行われている。これらは、一般的に不特定多数への情報発信を目的とする。一方で対象者を限定した情報伝送も有用である。特定の物理的な媒質を持つ者のみが、秘匿された画像情報を観察可能となる手法として、再帰性反射と透明球を用いた画像暗号化手法が提案されている[1]。しかし、この手法では暗号化する画像領域の拡大に伴って透明球が3次的に大型化してしまう。そこで、本研究では、透明球の代わりに不均一な形状を持つプレート状の媒質を用いた画像暗号手法を検討する。平面的な不均一媒質を用いることで3次的な大型化を避けながら、より大画面の暗号化が可能となる。

2 提案手法

提案手法の概念図を図1に示す。ディスプレイを発した光線は不均一媒質プレートにより様々な方向に屈折されることで暗号化される。ここで、暗号化に使用した不均一媒質プレート（暗号鍵）と全く同じ屈折率分布を持つ不均一媒質プレート（復号鍵）をビームスプリッターに関して面对称となるように配置する。暗号化された光波は再帰性反射板により入射方向に戻される。ビームスプリッターによって入射光と反射光を分離し、反射光のみ不均一媒質プレート（復号鍵）を透過させる。

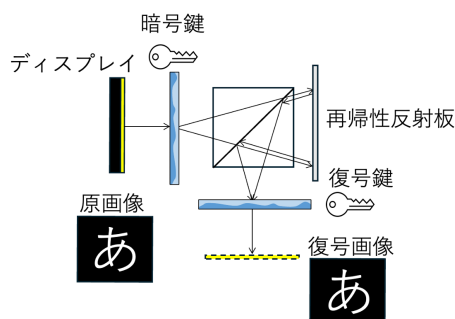


図1: 提案手法の概念図。

その結果、復号用の不均一媒質に入射した光線は、光線の逆進性により、暗号化用の不均一媒質内での光路を逆方向に辿るように光線が進む。すなわち、暗号化に用いられた屈折が相殺されるため、原画像が空中像として得られる。本手法では、暗号鍵と復号鍵に用いる不均一媒質プレートの等価性が復元性能に大きく影響する。

3 実験結果

提案手法の有効性を検証するため、1平方ミリメートルごとに周期的な凸パターンを持つアクリル板を不均一媒質プレートとして用いて実験を行った。原画像と暗号化画像、復元結果を図2に示す。原画像(図2(a))をディスプレイに表示しアクリル板を透過させたところ、暗号化された空中像が観察された(図2(b))。次に、再帰反射光に対して同一仕様のアクリル板を透過させたところ、復元された空中像が得られた(図2(c))。検証実験により、復元像には不均一媒質のパターンが現れるが、原画像における文字の構造は再現されることを確認した。

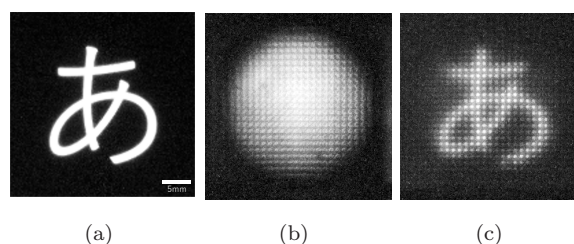


図2: 光学実験結果。(a) 原画像, (b) 暗号化像, (c) 復号像。

参考文献

- [1] Fujii, K., *et.al.*, Optical Review, 29(3), 250-260 (2022).

バイアス位相を用いた並列演算空間光イジングマシン

Spatial photonic Ising machine with parallel processing using bias-phase

木原 崇晶

Takaaki Kihara

Abstract A spatial photonic Ising machine (SPIM) is a computational system that utilizes spatial light modulation to solve combinatorial optimization problems. In this study, we aim to efficiently search for the optimal solution by employing a diffraction grating to simultaneously propagate light with a spatial amplitude and phase distribution. The validity of the proposed method is demonstrated by performing a solution search for a minimum cut problem as an optimization problem example.

1 はじめに

イジングマシンは、組合せ最適化問題の解探索に特化した計算システムである。その中で、空間光イジングマシンは、空間光変調器 (SLM) を用いてスピンを光の位相として符号化し、解を探索する [1]。解探索の過程では、スピン状態を変数とするイジングハミルトニアンを取得し、それをもとにスピン状態を表す位相分布を更新する必要がある。しかし、SLM への電子的フィードバックに遅延が生じるため、イジングハミルトニアンの反復計算には時間がかかる。この課題に対し、複数の組合せを並列に評価することができれば、空間光イジングマシンの性能を向上させることが可能となる。

2 提案手法

提案手法の概念図を図 1 に示す。空間光イジングマシンにおいて、問題設定は入射光の振幅分布 ξ によって表される。組合せ最適化のための選択肢は、バイナリー位相 $\phi_j \in \{0, \pi\}$ を用い、 $\sigma = e^{i\phi} \in \{-1, 1\}$ として表現される。振幅と位相を変調するための 2 つの SLM を用いて光を変調し、レンズを通して集光する。イメージセンサは、この集光点における光強度を取得し、その値が組合せの評価指標となるイジングハミルトニアン $H = -\sum_{jh} \xi_j \xi_h \sigma_j \sigma_h$

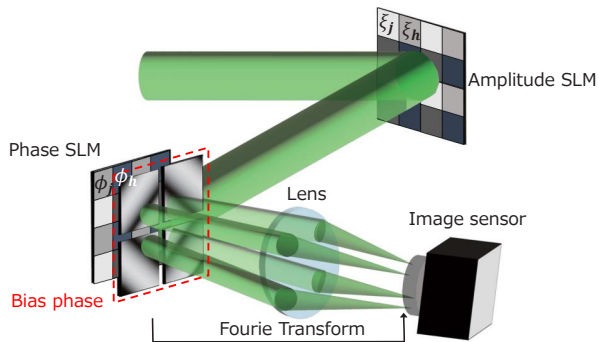


図 1: 提案手法の概念図

に対応する。最適解を求めるためには、光強度が最大となるよう位相変調パターンを反復的に更新する必要がある。本研究では、バイナリー位相パターン $\phi^{(k)}$ の複製と、グレーティング状のバイアス位相を活用し、空間多重化を実現する。具体的には、複数の位相パターンに対してバイアス位相を重畳し、グレーティングの方向に応じた回折を利用することで、集光位置をシフトさせる。この手法により、それぞれのスピン配置に対応するイジングハミルトニアン $H^{(k)}$ を同時に取得できるため、反復回数を削減し、解探索の高速化が可能となる。

3 実験結果

最小カット問題を対象とした反復回数 100 回での解精度のヒストグラムと解精度の平均値を図 2 に示す。図 2 から、多重化数が増加すると同一反復回数での解精度が上昇することがわかる。本結果から、バイアス位相を用いた組合せの並列評価により効率的な解探索が行えることを示した。

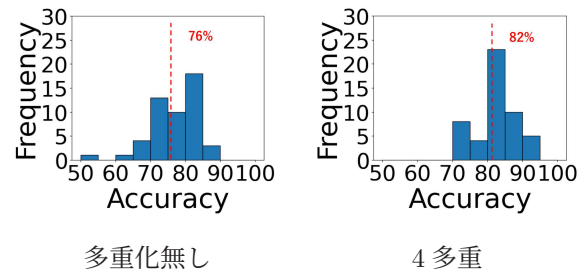


図 2: 多重化無しと 4 多重における解精度

参考文献

- [1] D. Pierangeli, *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 213902 (2019).

量子ドットネットワークを用いた Physically Unclonable Function に基づく 人工物認証技術の検討

Artifact-metrics Based on Physically Unclonable Function Using Quantum-dot Network

柴田 涼平

Ryohei Shibata

Abstract A physically unclonable function (PUF) is gaining attention due to its capability in high-level security for the Internet of Things (IoT) society. In this study, we investigated a PUF using quantum-dot networks to apply it to secure authentication of artificial objects. In the experiments, we evaluated the fundamental performance using fluorescence images of the quantum-dot networks and confirmed their potential capabilities relating to uniqueness.

1 はじめに

現在, IoT の利用拡大が進み, 様々なモノがインターネットに繋がっている. それに伴い信頼できる認証がより必要になってきている. そのような社会で安心・安全な物体認証として Physically Unclonable Function (PUF) 認証 [1] が注目されている. PUF 認証とは人工物を製造した際に生じる複製困難な物理的特徴を関数として用いて認証する技術である. 本研究では, 多数の量子ドット (QD) からなる QD ネットワーク (QDN) に着目した. QDN は, フェルスター共鳴エネルギー移動 (FRET) による多段階のエネルギー移動が行われる QD の構造体である. 励起光の照射条件によってエネルギー伝達経路が変化し, 非線形な蛍光応答により, 時間信号が時空間的な高次元信号に写像される [2]. この性質は, PUF による人工物認証に必要な多数の固有な出力の生成にも有用であると考えられる. 本研究では, QDN への時間信号入射に対する空間的な蛍光応答変化を利用した認証の特性を評価し, その効果を検討した.

2 人工物認証

本手法では, 基板上に適当な密度で分散させた QD を用いる. 認証は QDN の蛍光応答画像を 1 次元のバイナリビット列に変換したものを使用する. 認証対象の物体について, 事前に登録されたビット列と被認証者から送られるビット列のハミング距離 (HD) をもとに認証の可否を決める. また, 認証の性能を評価するために, 同じ PUF 同士の HD をビット数で正規化した inter-HD と, 異なる PUF 同士の HD をビット数で正規化した intra-HD を用いた. これらは再現性とユニーク性の指標となる.

3 実験

実験では, QD (NN-LABS, CS440) を凝集させたガラス基板にパルスレーザー光 (波長 403nm, パルス幅 500ps)

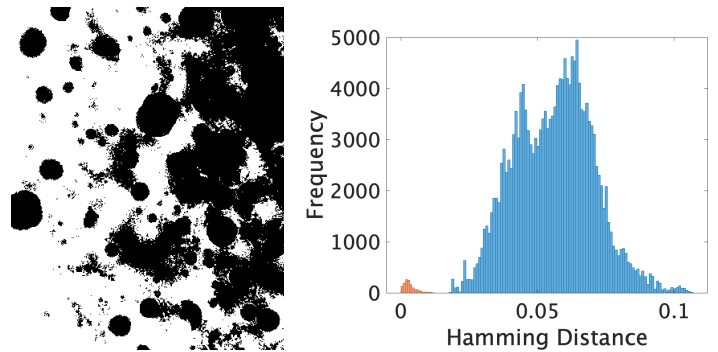


図 1: 量子ドット蛍光応答の二値化画像
図 2: ハミング距離のヒストグラム

を集光して QDN を励起し, 蛍光応答画像を撮影した. 時間的な非線形性の効果を調べるために, 30 個の試料に対してシングルパルスとダブルパルスそれぞれで励起した. また, inter-HD を算出するために 10 回ずつ画像を撮影した. 図 1 は QDN の蛍光応答の二値化画像の例である. 高い認証精度が得られる閾値を設定して二値化した. また, シングルパルスとダブルパルスで励起した二値化画像から算出した inter-HD と intra-HD のヒストグラムを図 2 に示す. 図 2 より本実験ではヒストグラムの山が分離しており, 認証を失敗しないことがわかる. また, 実験結果はシングルパルスの場合 interHD=0.0026 と intra-HD=0.0391, ダブルパルスを含めた場合 interHD=0.0028 と intra-HD=0.0509 となっており, 再現性は微減したものの QDN の時間的非線形性がユニーク性の向上に有効であることがわかった.

参考文献

- [1] G. Lio, *et.al.*, Advanced Photonics Reserch **40**, 2200225, (2022).
- [2] N. Tate, *et.al.*, Optics Express **30**, 14669-14676, (2022).

インコヒーレント光を用いたカラー物体認識

Color object recognition using incoherent light

数藤 和也
Kazuya Sudo

Abstract In this study, we propose an object recognition system that utilizes color information in optical responses to incoherent light. By extracting color-specific features of the target object based on the analysis of the optical responses under patterned illumination, recognition performance can be enhanced. Experimental results show that the proposed method achieved 66.7% accuracy in binary classification using two classes selected from the CIFAR-10 dataset.

1 はじめに

機械学習システムは、既知のデータを学習することで未知のデータの分類や予測を行う。一方、高度な認識を達成するには、大規模なモデルの構築や膨大な訓練データが求められ、計算コストの増大が課題となる。光を活用した機械学習システムは、空間並列処理による高速な行列演算を可能にし、低消費エネルギーで学習を行うことで、効率的な物体認識を実現する。単一画素イメージングに基づく光学的機械学習フレームワーク (MLSPI) は、インコヒーレント光を照射した際の物体の反射光強度に基づき認識を行う手法である [1]。MLSPI では、特定の照明パターンに対する光応答を計測し物体認識を行うが、単一画素の強度情報のみを用いるため、物体の固有の色情報を利用できない。この制約を克服し、より多くの物体情報を取得することで認識性能の向上を図ることが可能と考えられる。

本研究では、MLSPI に物体の色情報を統合した手法を提案する。インコヒーレント光による照明パターンの光応答を RGB の各成分ごとに解析し、それぞれの色情報を統合することで物体認識を実現する。

2 色情報を用いた物体認識

図1に色情報を用いたMLSPIの概念図を示す。MLSPIの拡張として、対照物体 \mathbf{X} は RGB の各チャンネルに対応する行列 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_R, \mathbf{X}_G, \mathbf{X}_B]^T$ で表される。照明パターン \mathbf{W} を照射した時、光応答における色情報を考慮した出力は式 (1) で表される。

$$\mathbf{y} = \alpha_R \mathbf{W} \mathbf{X}_R^T + \alpha_G \mathbf{W} \mathbf{X}_G^T + \alpha_B \mathbf{W} \mathbf{X}_B^T \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ はそれぞれのチャンネルにおける反射光強度の重みを表す。本手法では、クラス i の物体に対する出力 y_i が最大の値となるよう勾配降下法を用いて照明パターン \mathbf{W}_i と重み $\alpha_i = [\alpha_{iR}, \alpha_{iG}, \alpha_{iB}]^T$ を最適化する。物体認識時には、最適化した照明パターンを照射し、分光器を用いて反射光のスペクトルデータを取得する。これを RGB データに変換し、最適化された重みを適用することで物体を認識する。各クラスの出力が物

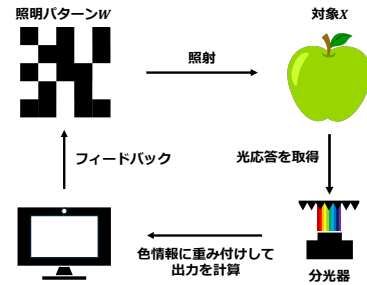


図 1: システムの概念図

体の形状と色情報に応じて変化するため、物体の形状認識と色特性に適した照明パターンの設計が可能となる。

3 2 クラス分類実験

本手法の有効性を検証するため、CIFAR-10 データセットのカラー画像から 2 クラス分類の評価を行った。使用したクラスはクラス 2 (鳥), クラス 3 (猫), クラス 4 (鹿), クラス 6 (カエル) である。実験では、紙に印刷した画像に最適化した照明パターンを照射し、散乱光のスペクトルを計測した。取得したスペクトルデータを RGB 情報へ変換し、最適化された重みを適用して出力を算出した。各照明パターンにおける出力結果のうち、高い値を示した照明パターンのクラスを予測結果とした。表 1 に使用したクラス、および MLSPI と本手法の認識精度を示す。鳥と猫、鳥とカエルの分類では MLSPI と同等の認識精度が得られた。一方、猫と鹿の分類では、MLSPI の 41.7% に対し、本手法では 66.7% の精度を達成した。本結果より、色情報を活用することで認識精度の向上が可能であることが示された。

表 1: 使用したクラスと各手法における認識精度

使用したクラス		MLSPI[%]	本手法 [%]
2 (鳥)	3 (猫)	66.7	66.7
2 (鳥)	6 (カエル)	83.3	83.3
3 (猫)	4 (鹿)	41.7	66.7

参考文献

- [1] S. Jiao *et al.*, Optics Letters, Vol. 44, Issue 21, pp. 5186-5189 (2019).

面積符号化による DMD 型空間光イジングマシンの高速化

Speeding up of DMD-based spatial photonic Ising machine with area encoding

野内 稜

Ryo Nouchi

Abstract Spatial photonic Ising machine (SPIM) is a physical computing system using spatial light modulation to solve combinatorial optimization problems. SPIM is promising to solve large-scale optimization problems, because the use of light provides the capability in high-speed parallel processing. However, liquid crystal type of spatial light modulators (SLMs) for light modulation limit in increasing the computing speed. In this study, we propose an SPIM using a digital micromirror device (DMD), the switching speed of which is more than tens of thousands Hz. Amplitude area encoding enable to modulate amplitude and phase by a single DMD. We successfully achieved approximately six times the speed of the conventional system using the proposed method.

1 はじめに

組合せ最適化問題を高速に解くための手法として、物理システムを用いて解探索を行うイジングマシン (SPIM) が研究されている。その中でも、空間光イジングマシンは、選択枝を表現するバイナリ位相と問題条件を表現する振幅を空間光変調で表現して解探索を行う [1]。これによって、問題が大規模になっても演算時間が一定であり、多数の制約条件を持つ問題の解探索が可能である。しかし、光変調に用いられる液晶型空間光変調器 (SLM) の動作速度がシステムの律速となっていた。本研究では、SLM として高速制御可能なデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いた空間光イジングマシンを実装する。ミラー反射光の光路長差を用いてバイナリ位相を制御し [2]、面積符号化を用いて振幅を表現することで光変調を行う高速化手法を検討し、原理実証実験を行なった。

2 提案手法

図 1 に DMD を用いた SPIM の概略を示す。SPIM では、問題条件に対応する振幅分布と組合せを表現する 2 値 $(0, \pi)$ のバイナリ位相になるように光変調を行い、レンズを用いたフーリエ変換作用で得られる光強度を用いて組合せを評価する。DMD を用いた SPIM では、振幅分布と位相分布を一つの DMD で表現する。

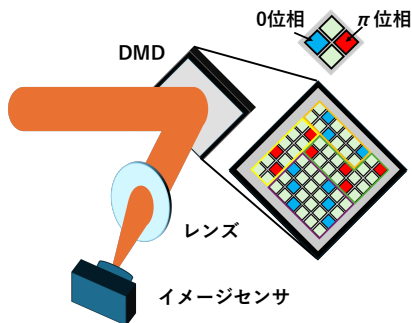


図 1: DMD を用いた SPIM の概略。

バイナリ位相制御は、DMD への光の入射角を調整し、隣接するミラー間の光路長差を半波長にすることで表現

する。隣接する 2 つのミラーを一組とし、表現する位相に対応するミラーを ON にすることでバイナリ位相を表現する。振幅表現は、振幅分布を整数値に変換し、それに対応する数のミラーを用いて光を反射する面積符号化を用いる。DMD を反射した光は最終的に集光されるため、反射光の面積に比例した振幅を表現できる。

3 実験結果

提案手法を検証するため、14 個の要素を持つ数集合の数分割問題解探索を実行した。反復回数は 500 回とし、解探索アルゴリズムとしてシミュレーテッドアニーリングを用いた。100 回までの解探索における一方の集合の和の推移と解探索で最終的に得られた一方の集合の和を図 2 に示す。最終的に得られた解は、20 回中 10 回が最適解に到達した。また、2 つの液晶型 SLM を用いたシステムに比べて約 6 倍の高速化に成功した。本結果より提案手法の高速性を示した。

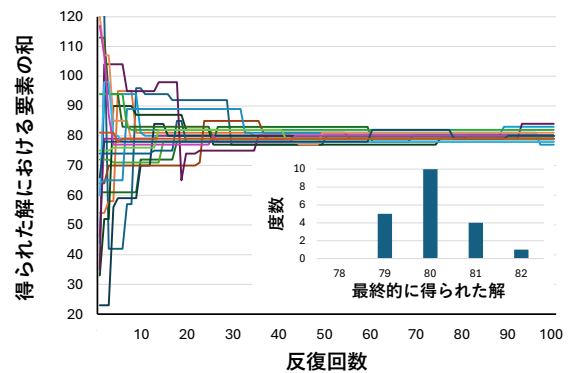


図 2: 提案手法の概念図。

参考文献

- [1] D. Pierangeli, *et.al.*, “Large-scale photonic Ising machine by spatial light modulation,” *Physical Review Letters* 122, 213902 (2019).
- [2] Y. Ogura, *et.al.*, “Spatial photonic Ising machine using a digital micromirror device,” *OIE25proceedings*, 42-43 (2025).

Design of quantum dot networks for improving prediction performance in reservoir computing

KAZUKI YAMANOUCHI,^{1,*} SUGURU SHIMOMURA,¹ AND JUN TANIDA¹

¹*Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan*

**k-yamanouchi@ist.osaka-u.ac.jp*

Abstract:

A quantum dot (QD) network generates various fluorescence signals based on nonlinear energy dynamics, which depend on its structure and composition, and is utilized as a component in physical reservoir computing. However, existing designs rely on random QD networks, which are not optimal for enhancing the prediction performance. In this paper, we propose a method for designing effective quantum dot networks to improve the performance of reservoir computing. The fluorescence signals from numerous virtual QD networks can be reproduced through numerical simulation based on a deterministic mathematical model, and the QD networks generating the most significant signals contributing to the prediction performance are identified. We demonstrated that QD reservoir computing using designed QD networks predicts time-series data more accurately than using random QD networks in the numerical simulations.

1. Introduction

Quantum dots (QDs), which are nanoscale phosphors, are utilized across various fields including sensing and imaging [1, 2]. The diameter-dependent band gap of QDs allows for easy tuning of the peak fluorescence wavelength [3]. By synthesizing QDs that emit light in the near-infrared region to mitigate biological scattering effects, 3D imaging of tumor blood vessels up to a depth of 1.2 mm is achieved [4]. Moreover, the absorption spectra of QDs are broader than those of other organic phosphors, enabling dual-emission and single-excitation labeling experiments in mouse fibroblasts [5, 6].

Förster resonance energy transfer (FRET), which occurs between phosphors such as QDs, is a crucial functionality of QDs [7, 8]. FRET efficiency is contingent upon the donor-acceptor combination and their proximity. When phosphors are closely packed, the excited energy is sequentially transferred through FRET [9], facilitating energy dynamics crucial for multi-step FRET applications in nanoscale information processing. For instance, fluorescent molecules arranged on DNA through multi-step FRET have facilitated nanoscale logic operations [10]. Complex arithmetic circuits, such as half adders and subtractors, were implemented using temporally varying FRET pathways between different phosphors [11]. Viewing multi-step FRET as a natural continuous-time Markov chain allows the construction of units that generate samples conforming to various probability distributions in probabilistic computing [12]. The strategic arrangement of QDs to generate FRET-modulated fluorescence signals enables nanoscale computing.

A QD network comprises multi-step FRET in a structure where randomly distributed QDs generate fluorescence signals contingent on their configuration. When pulsed lights are sequentially irradiated, the excited energy in QDs is retained through multistep FRET, accumulating past input pulses within the network. The resultant fluorescence signals exhibit nonlinear responses based on the intensity and timing of the pulse sequences [13, 14].

Additionally, the fluorescence signals can be modulated by changing the spatial distribution of the QDs. For instance, during electrophoretic deposition, the deposition time has been found to influence the distribution of deposited QDs [15]; further, physically flexing the substrate with QDs change the distances between QDs [16], thereby modulating the fluorescence signals.

By using lithographic techniques to fabricate a structure containing excitation paths formed by randomly distributed QDs, useful fluorescence responses for nanophotonic devices have been achieved [17].

The nonlinear signals of QD networks, modulated by temporal pulse sequences, are essential for physical reservoir computing, which processes time-series data. Previously, we constructed QD reservoir computing (QDRC) using QD networks as a reservoir layer and demonstrated its capability to predict time-series signals of 1 bit delay XOR tasks with low mean squared errors [15].

Photonic reservoir computing has been explored previously using various approaches, including passive silicon photonics [18] and time-delayed lasers [19]. Compared to these methods, the advantage of QDRC lies in the size of the system. A physical reservoir that uses QD networks is based on light irradiation and energy transfer. Because of the connections without wiring and the nanoscale size of the QD, it is possible to significantly reduce the size of the physical reservoir. Furthermore, parallel processing of multiple time-series data can be achieved through spatial multiplexing of the pulse sequences.

The prediction performance depends on the distribution and composition ratio of multiple QDs. To utilize QD networks as reservoirs, they need to generate characteristic signals suitable for prediction. QD networks can generate a variety of fluorescence signals depending on the energy dynamic of the QDs through FRET. However, randomly dispersing QDs result in a variety of structures that are not unique, which causes signals with similar characteristics to be generated. Previous studies have shown that external mechanical manipulation can change the overall spatial distribution of QDs and modulate the fluorescence signal. Nevertheless, the potential differences in energy dynamics between locally existing QD networks have not been fully explored. Reservoir computing performance can be enhanced by optimizing the topology of the reservoir layer [20]. By identifying QD networks that generate characteristic signals, we can unlock the potential of QD networks in reservoir computing, which has been obscured by randomness, and broaden the range of prediction tasks that QDRC can handle.

We propose a method for designing QD networks that generate signals to enhance the prediction performance of QDRC. To achieve this, a deterministic mathematical model of the QD network using the rate equation is constructed. Although several methods can reproduce the energy dynamics of fluorophores in simulations [21,22], they are not suitable for simulating signals from numerous QD networks due to the extensive computational time required by iterative sampling based on Monte Carlo simulation. A deterministic algorithm allows for the reproduction of energy dynamics in the QD network without randomness, generating fluorescence signals from a large number of QD networks. Utilizing this model, we designed QD networks that produce significant signals contributing to prediction performance. Finally, we evaluated the prediction performance of time-series signals using the QDRC designed by the proposed method.

2. Quantum dot reservoir computing

In QDRC, the reservoir layer is constructed using an ensemble of QD networks. Multistep FRETs induce the energy dynamics of QDs, and the QD networks generate nonlinear fluorescence signals depending on the irradiation conditions. Figure 1 shows a schematic of the proposed QDRC. In the input layer, time-series data is converted into a sequence of optical pulses, with data values encoded in the peak intensity of these pulses. These encoded pulses are duplicated and irradiated onto randomly distributed QDs. The light energy is absorbed by the QDs and retained within the QD ensemble through multistep FRETs. Each QD is interconnected via energy transfers, forming the QD networks that constitute the reservoir layer. Within this network, the level occupancy effect, induced by energy absorption and saturation, generates nonlinear responses with short-term memory due to energy dynamics, facilitating information

processing [15]. In the output layer, signals generated by each QD network are captured, and the output is obtained by weighting individual signals. These weights are optimized by linear regression methods such as ridge regression. The prediction performance relies on the output signals from individual QD networks; thus, the design of QD networks enhances the capability of information processing.

However, the design process requires validations of QD networks and iterative acquisition of fluorescence signals. In this study, we implemented numerical simulation using a mathematical model of the QDs and evaluated fluorescence signals generated from a large number of virtually constructed QD networks.

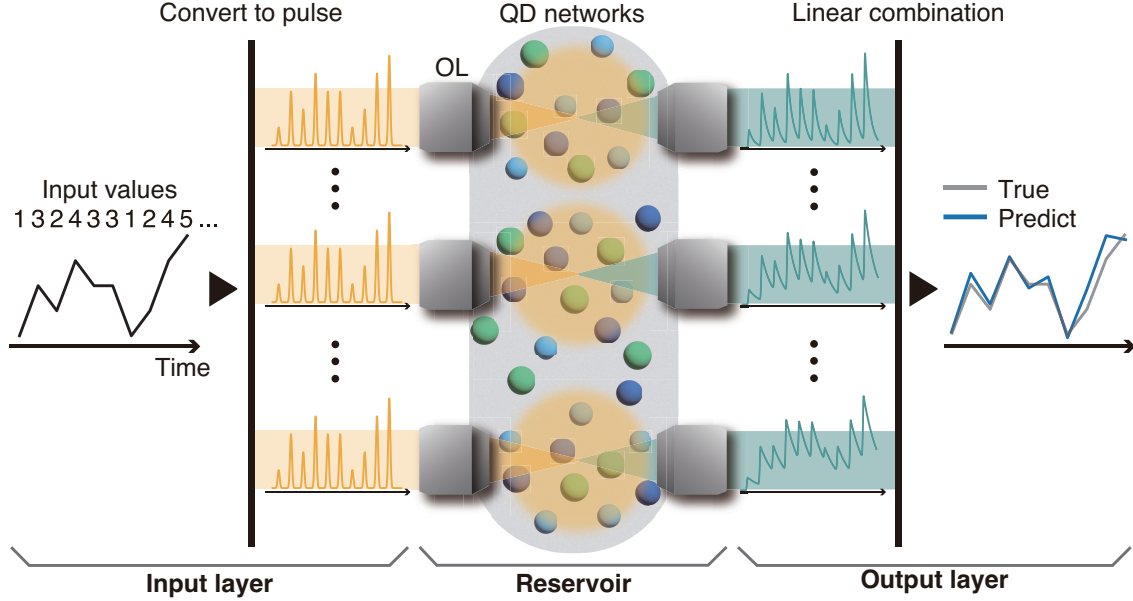


Fig. 1. Schematics of quantum dot reservoir computing. OL: Objective lens.

3. Mathematical model of quantum dot networks

3.1. Rate equation of QDs

To reproduce the fluorescence signals generated by a large number of QD networks, we construct a mathematical model of electron transitions within individual QDs using a deterministic approach. Previous models have assumed that electrons in a QD transition between multiple energy levels [23–25]. We develop a two-level system for electrons in QDs, incorporating FRET and level occupancy effects. Figure 2 shows a Jablonski diagram representative of the QD networks. The number of electrons in the ground and excitation levels are denoted as S_g and S_e , respectively. The total number of electrons within the QD remains constant $S (= S_e + S_g)$. The rate equations for the excited electrons in the i -th QD, considering FRET and level occupancy effects, are expressed as follows:

$$\frac{dS_{e,i}}{dt} = \frac{\sigma_i^{\text{abs}} I_{ex}(t)}{h\nu_i} S_{g,i} - k_{nr,i} S_{e,i} - k_{r,i} S_{e,i} - \sum_{i \neq j} k_{i \rightarrow j} S_{e,i} + \frac{S_{g,i}}{S_i} \sum_{i \neq j} k_{j \rightarrow i} S_{e,j}. \quad (1)$$

Here, $I_{ex}(t)$, h , σ_i^{abs} , and ν_i represent the irradiated photon density at time t , Planck's constant, the absorption cross-section, and the fluorescence frequency of the i -th QD, respectively. $k_{r,i}$ and $k_{nr,i}$ are the rate constants for the radiative and non-radiative relaxation processes, given by $k_{r,i} = Q_i/\tau_i$, $k_{nr,i} = (1 - Q_i)/\tau_i$. Q_i is the quantum yield and τ_i is the fluorescence lifetime. The first term in the rate equation (Eq. (1)) accounts for optical excitation, with the number

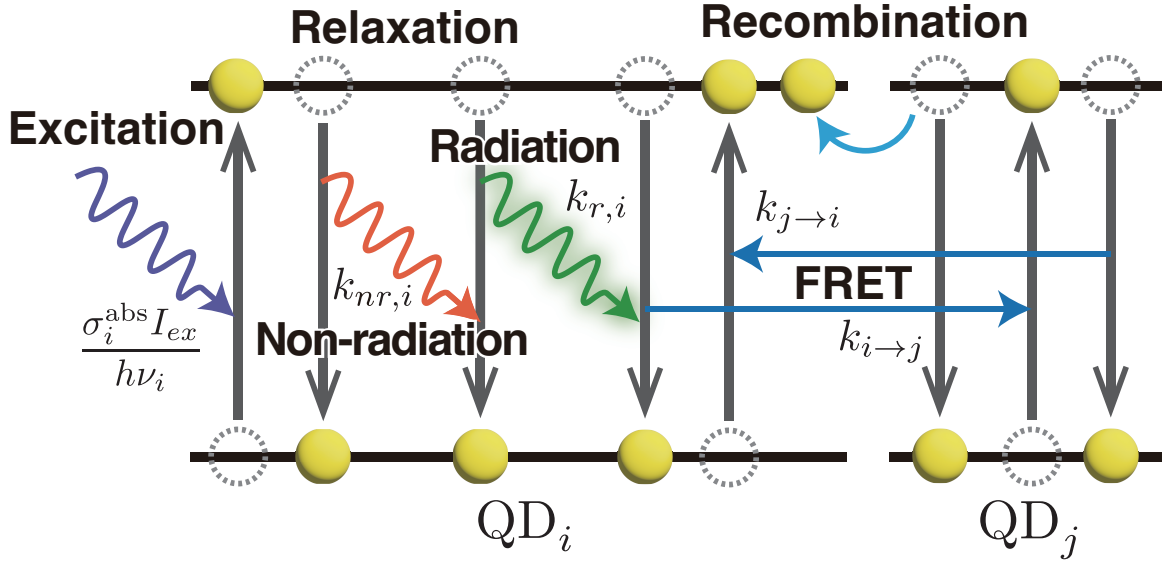


Fig. 2. A Jablonski diagram of the QDs in the QD network.

of electrons transitioning to the excitation level dependent on those in the ground level, $S_{g,i}$. The second and third terms describe the energy emission through radiative and non-radiative relaxation processes, respectively, with the transition probability dependent on the number of excited electrons, $S_{e,i}$. The fourth and fifth terms detail the FRET interactions between the i -th and j -th QDs. FRET is explained by Förster's theory [7], and its mathematical model is detailed in Ref. [26]. Based on these theories and mathematical models, the rate constant of FRET is expressed as

$$k_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\tau_i} \left(\frac{R_0(i, j, \kappa, n)}{R(i, j)} \right)^6, \quad (2)$$

where $R(i, j)$ is the distance between the i -th and j -th QDs. $R_0(i, j, \kappa, n)$ the Förster distance, is a constant that depends on the QD type (i, j), orientation factor κ , and refractive index n [7]. The fifth term in Eq. (1) indicates the level occupancy effect, such as Auger recombination, induced by FRET. When more electrons are in the excited state, Auger recombination is triggered, causing electrons in the acceptor QD to transition to a higher energy level and subsequently return to their original energy state through a non-radiative relaxation process [23, 27]. This return to the original level typically occurs within a few picoseconds [28]. In two-level systems, electronic transitions through Auger recombination are rapid, and the excited electrons in the acceptor remain in the excited state. The excitation energy received from other QDs by FRET is lost through non-radiative recombination, which depends on the number of electrons in the excited state. Consequently, the transition probability due to FRET varies based on the number of electrons in the ground state, leading to nonlinear energy dynamics within the QDs.

The fluorescence signal from the QD network is the sum of the radiation energies from each QD. The signal intensity $f(t)$ can be expressed as

$$f(t) = \sum_i (k_{r,i} S_{e,i}(t) \times h\nu_i). \quad (3)$$

Eq. (3) implies that the time-series fluorescence signal depends the number of electrons of the QD at time t . The fluorescence signal generated by the QD network can be reproduced when a sequence of pulses is irradiated using Eq. (1) – (3). Moreover, a deterministic algorithm based

Table 2. QD parameters in the simulation. Absorption cross section values σ^{abs} are shown for the irradiation wavelength of 400 nm.

Parameter	QD type		
	QD490	QD540	QD580
Q	0.40	0.40	0.40
τ [ns]	9.4	8.6	7.9
ν [Hz]	6.1×10^{14}	5.6×10^{14}	5.2×10^{14}
σ^{abs} [cm^2]	2.1×10^{-16}	1.3×10^{-17}	1.6×10^{-17}
$k_r = Q/\tau$ [1/s]	4.3×10^7	4.7×10^7	5.1×10^7
$k_{nr} = (1 - Q)/\tau$ [1/s]	6.4×10^7	7.0×10^7	7.6×10^7
$N = 1/\tau$	1.1×10^8	1.2×10^8	1.3×10^8

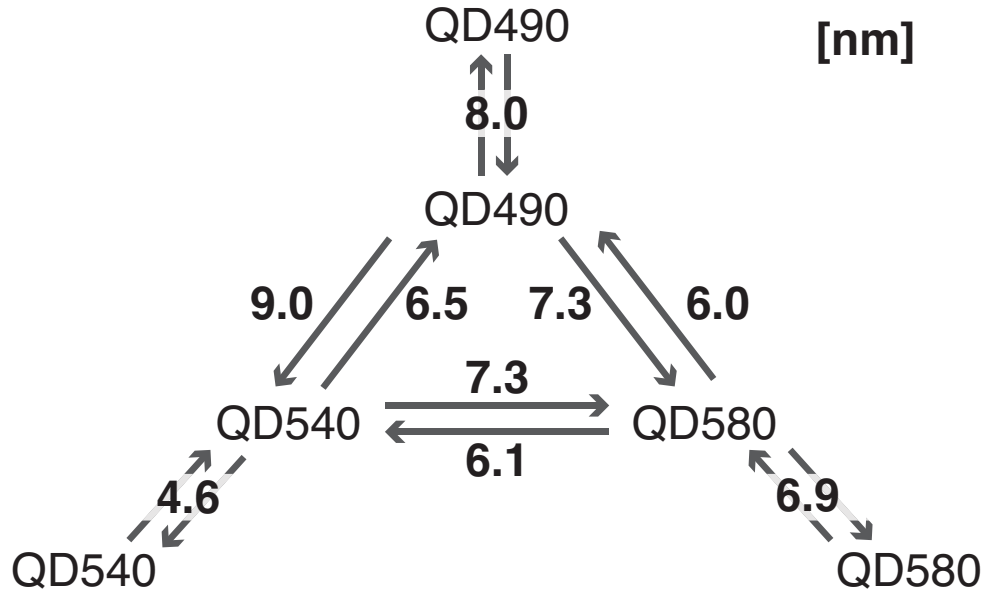


Fig. 3. Förster distances between the three types of QDs. The units of each value are in nanometers.

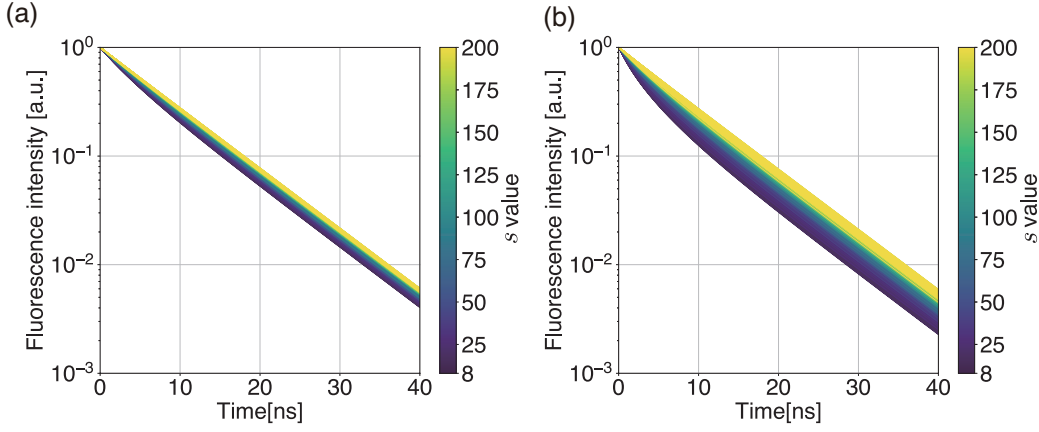


Fig. 4. Fluorescence signals generated by 1,000 types of QD networks. The position of the QDs follows three-dimensional normal distribution, and s represents the standard deviation of its distribution. (a) Irradiation intensity: $1.0 \times 10^5 [\text{W}/\text{cm}^2]$ (Weak excitation). (b) Irradiation intensity: $2.0 \times 10^6 [\text{W}/\text{cm}^2]$ (Strong excitation).

4. Design of effective quantum dot networks

4.1. Rank evaluation of fluorescence signal and selection of QD network

To enhance prediction performance, it is necessary to generate the signals that contribute significantly to the prediction. In RC, the orthogonality of outputs from the reservoir layer is crucial for prediction performance and is employed as a performance metric [29–31]. To design QD networks that enhance the performance of QDRC, we evaluated the rank of a matrix composed of fluorescence signals. The temporal output from the QDRC is denoted as $y_{\text{out}}(t)$ ($t = 1, \dots, T$). The output is expressed by

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{out}} = \mathbf{F}\mathbf{w}, \quad (4)$$

where $\hat{\mathbf{y}}_{\text{out}} = (y_{\text{out}}(1), \dots, y_{\text{out}}(T))^T$ and the matrix $\mathbf{F} = (\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_N)$ consists of the time-series signals generated by the n -th QD network, written by $\mathbf{f}_n = (f_n(1), \dots, f_n(T))^T$ ($n = 1, \dots, N$). $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_N)^T \in \mathbb{R}^N$ is an N -dimensional weight vector, and the dimension of a vector space \mathcal{Y} containing the output $\hat{\mathbf{y}}_{\text{out}}$ is determined by the rank of the matrix \mathbf{F} ($\dim \mathcal{Y} = \dim(\text{Im } \mathbf{F}) = \text{rank } \mathbf{F}$, $\text{Im } \mathbf{F} = \{\hat{\mathbf{y}}_{\text{out}} \in \mathbb{R}^T \mid \exists \mathbf{w} \in \mathbb{R}^N, \hat{\mathbf{y}}_{\text{out}} = \mathbf{F}\mathbf{w}\}$). When the dimension of \mathcal{Y} is higher, the prediction accuracy of reservoir computing improves. We define signals with a high rank of matrix \mathbf{F} as ‘effective’ signals, leading to enhanced prediction performance of the QDRC. Networks generating such signals are termed effective QD networks. Initially, we generated N virtual QD networks, each containing L types of QDs with a total count of M QDs. We posited that these networks cluster within the QD sample, and the spatial distribution $\mathbf{r}_{n,m}$ of the m -th QD in the n -th network was set to follow the three-dimensional normal distribution: $\mathbf{r}_{n,m} \sim \mathcal{N}_3(\mathbf{0}, s_n \mathbf{E})$, where s_n denotes the standard deviation of the normal distribution, and \mathbf{E} is the identity matrix. Subsequently, we simulated fluorescence signals from these networks upon irradiation with pulsed light. Among the signals generated by the virtual QD networks $\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_N$, we obtained a pair $\{\mathbf{f}_p, \mathbf{f}_q\}$ with the maximum Euclidean distance $d_{\text{max}} = \|\mathbf{f}_p - \mathbf{f}_q\|_2^2$. In linear regression, optimization through extensive weighting is costly. To design QD networks that enable prediction, we choose K number of signals, such that the value of Euclidean distance from \mathbf{f}_p or \mathbf{f}_q is closest to $\{0, d_{\text{max}}/2K', 2d_{\text{max}}/2K', \dots, (K'-1)d_{\text{max}}/2K'\}$ where $K' = \lfloor \frac{K}{2} \rfloor$. The selected signals exhibited diverse fluorescence decay, characterizing nonlinear responses with varying short-term memory due to energy dynamics. From these, we derived the structures for the designed virtual QD network. The number of QDs in each network was set at $M = 20$, with three types of QDs (QD490, QD540, and QD580) in equal

proportions ($L = 3$). The properties of QD490, QD540, and QD580 used in the numerical simulations are listed in Table 2, and the Förster distances between the QDs are shown in Fig. 3. The QDs were distributed in three-dimensional space with standard deviations ranging from 8 to 200 $\left(s_n = 8 + \frac{200 - 8}{3000}(n - 1)\right)$. A total of 3000 QD network types, each with a unique s_n , were simulated, and fluorescence signals at an irradiation intensity of $I = 1.0 \times 10^5$ were generated. With K set to 28, the rank of the signal matrix was evaluated. Figure 5 (a) displays the 3,000 types of signals generated in the simulation and the 28 signals selected. To evaluate the proposed algorithm, we used the Python library Numpy to analyze the ranks of matrices. Figure 5 (b) presents a histogram of the ranks for the matrix $\mathbf{F}_{\text{random}}$ consisting of 28 randomly selected signals. The numerical error tolerance was set at the maximum singular value of the matrix \mathbf{F} multiplied by its higher dimension size of \mathbf{F} and the machine epsilon. The average rank in 1,000,000 trials was 21.6, with the ranks of $\mathbf{F}_{\text{random}}$ ranging from 20 to 23 with a probability of 98.8 %. Outliers were identified using the two-sigma rule, assuming a rank distribution obtained over 1,000,000 trials. A red dashed line marks the rank of the matrix $\mathbf{F}_{\text{design}}$, composed of the selected signals, which was 26, matching that of the matrix \mathbf{F}_{all} , comprising all generated signals. These results demonstrate that the proposed method effectively selects signals for the matrix $\mathbf{F}_{\text{design}}$ with a high rank.

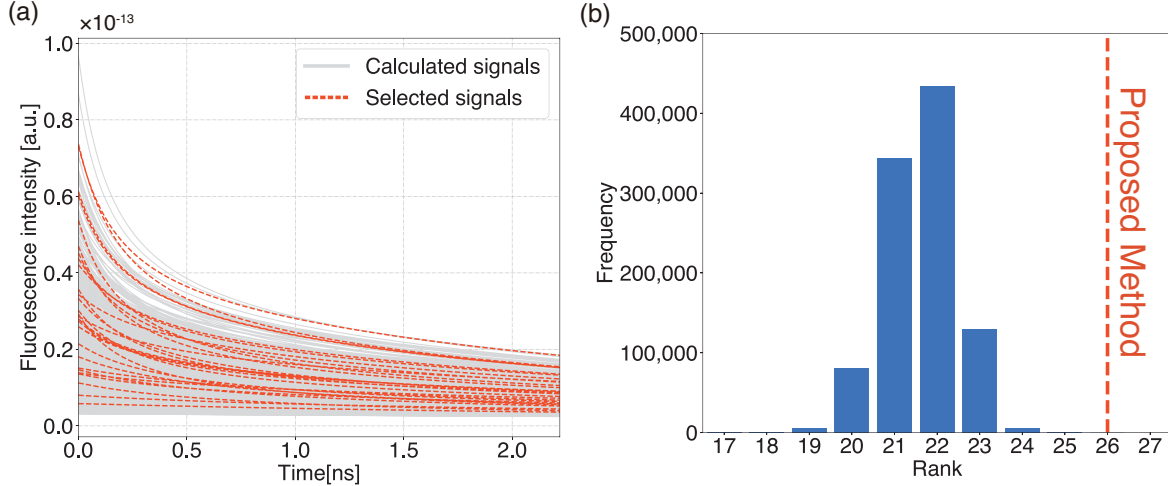


Fig. 5. (a) Calculated signals generated from 3,000 types of QD networks and 28 types of QD networks. (b) Frequency distribution of the ranks of matrix $\mathbf{F}_{\text{random}}$. The red dash line indicates the rank of matrix $\mathbf{F}_{\text{design}}$.

4.2. Performance evaluation

Next, we verified that the designed QD networks enhanced prediction accuracy. For benchmark tasks of signal prediction, we employed the Mackey-Glass equation, Santa Fe time-series data, and Nonlinear AutoRegressive Moving Average (NARMA) data [32–34]. The Mackey-Glass equation is expressed as follows,

$$\frac{dx(t)}{dt} = -ax(t) + \frac{bx(t - \tau)}{c + x(t - \tau)^n}, \quad (5)$$

where a , b , c , and n are constants, and τ is the delay time. The Mackey-Glass equation exhibits chaotic behavior depending on specific parameters. In our simulations, we set individual parameters to $a = 0.1$, $b = 0.2$, $c = 1$, $n = 10$, and $\tau = 17$ to generate a chaotic signal. The Santa Fe time series data, which consist of intensity data recorded from a far-infrared laser in a

chaotic state, are used in this study normalized by the maximum value. The m -order NARMA model is written as

$$x(t+1) = a_1x(t) + a_2x(t) \sum_{i=0}^{m-1} x(t-i) + a_3u(t-m)u(t) + a_4. \quad (6)$$

Here, a_1 , a_2 , a_3 , and a_4 are constants, and $u(t)$ represents the temporal input. The parameters were set to $m = 2$ and $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.05$, $a_3 = 1.5$, and $a_4 = 0.1$. The $u(t)$ values were independently and identically drawn from a uniform distribution within the interval $[0, 0.5]$. These time-series data were encoded into pulse sequences and input into each designed QD network. The frequency of the input signal was set to 1.0 GHz. Based on Eq. (4), the output was obtained by the linear summation of the generated signals. The weights \mathbf{w} were optimized using ridge regression. For the prediction of the Mackey-Glass equation and Santa Fe time-series data, a one-step-ahead prediction approach was employed, where the input one step ahead is predicted from the reservoir state at each time step. In the case of the NARMA data, the output $x(t+1)$ represented the target signals and was predicted from the fluorescence signals when the input was $u(t)$. A dataset comprising 1200 steps of time-series data was utilized for optimization, and 600 steps of untrained data was used. To evaluate the performance, the normalized mean square error (NMSE) was employed as follows:

$$\text{NMSE} = \frac{\sum_t (y(t) - y_{\text{out}}(t))^2}{\sum_t (y(t) - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

where $y(t)$, \bar{y} represents the target signal value and its average value, and $y_{\text{out}}(t)$ is the output value by QDRC. Figures 6 (a-c) illustrate the relationship between the rank of the matrix \mathbf{F} , constructed using the QD networks and the NMSE. The simulation trial using non-designed QD networks was conducted 50 times, with each trial featuring different network structures. The rank of the matrix $\mathbf{F}_{\text{design}}$ in the case of the designed QD networks was 26, $\mathbf{F}_{\text{random}}$ whereas for the non-designed QD networks, the rank of the matrix ranged from 20 to 23. The average NMSE decreased with increasing rank when using non-designed QDRCs; nonetheless, the NMSE of the QDRC employing designed QD networks was the lowest. These results indicate that the design of the QD network enhances the prediction performance of the QDRC. However, certain prediction results using non-designed QD networks were better than those using designed ones, particularly in the Santa Fe time-series data and NARMA data. We investigated the performance of the QDRC using individual combinations of the QD networks. Figure 6 (d) displays the relationship of the NMSE between the Santa Fe and NARMA tasks using the QDRC with a matrix $\mathbf{F}_{\text{random}}$ rank of 23. The orange and green lines represent the NMSE in QDRC using the designed QD network (designed QDRC). While the QDRC using the non-designed QD network predicted one time-series data with a higher NMSE, its performance in the prediction of the other data was inferior compared with that using designed QD networks. The correlation coefficient between the NMSE values for the two tasks was 0.031, indicating no significant correlation between the prediction performances for the two tasks. This result suggests that the prediction performances of the QDRC using non-designed QD networks vary depending on the tasks. The NMSE of the designed QDRC in both tasks was better, demonstrating that the design of the QD networks contributes to the prediction performance across a broad range of tasks.

We discuss short-term memory, an important property of reservoir computing. In QDRC, the information of input signals is retained in the network through FRET and is eventually lost via relaxation processes. Therefore, memory capacity, which is a measure of the short-term memory, is related to the fluorescence decay of the QD network. Based on the definition in Ref. [35], we estimated the memory capacity of the designed QDRC. We used a 500-step random sequence as input, with each input value being a random number following a uniform distribution

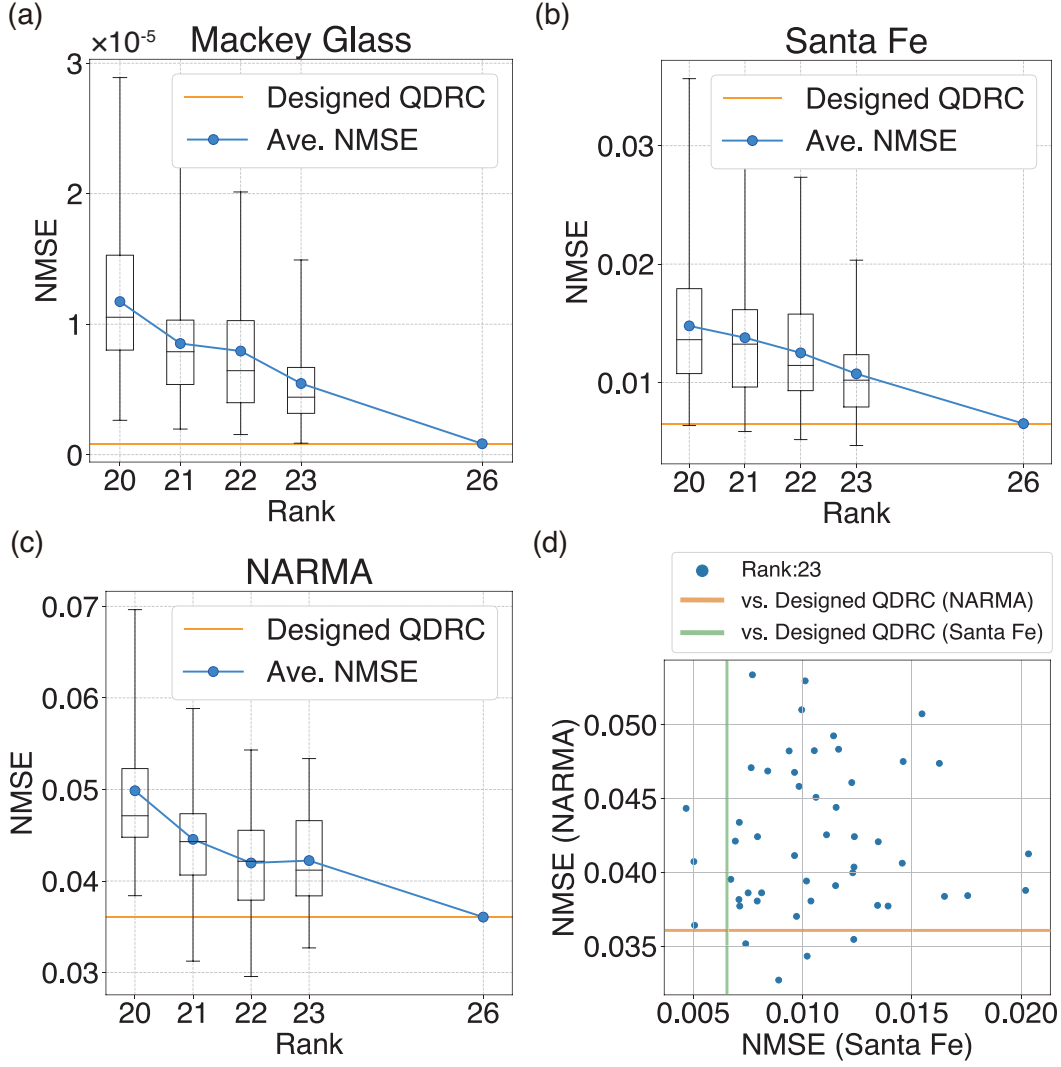


Fig. 6. Dependence of NMSE of the designed QDRC and the others on the rank of the matrix F . (a) Mackey-Glass equation task. (b) Santa Fe task. (c) NARMA2 task. (d) Relationship between NMSE for Santa Fe and NARMA2 tasks with random QDRC and the designed QDRC. The green vertical and orange horizontal lines represent the NMSE values of the designed QDRC for the Santa Fe and NARMA tasks, respectively.

over the interval $[0,1]$. The input signal frequency was set to 1 GHz, and the peak intensity was 1.0×10^5 . The target signal was a time-series signal delayed by d steps from the input signal. Using this input signal and the target output, we calculated the coefficient of determination between the input signal and output signal with the designed QDRC. Summing the coefficients of determination for delay tasks from $d = 1$ to $d = 20$, we estimated the memory capacity to be 7.2, which is consistent with time $t_{1/e}$ in case of weak intensity. This result indicates that the memory capacity of the QDRC can be estimated by measuring the fluorescence lifetime.

Precisely arranging QDs on the nanometer scale to form the designed QD network is challenging. However, in the experiment, one of the key advantages of our proposed method was utilized for selecting signals suitable for computing from among numerous signals. It was demonstrated that over 2,000 types of fluorescence signals can be acquired simultaneously by using a streak camera [15]. The signals measured by the streak camera correspond to the various fluorescence signals generated by QD networks, similar to the signals in Fig. 5 (a), and the design method described in the previous section can be applied directly to the experiment. Therefore, our proposed

method enables the selection of optimal signals for time-series prediction experimentally.

To evaluate prediction performance by using the rank of the reservoir state, a method using kernel quality was proposed [30]. However, the rankings depend on the task because the reservoir responses vary with the input data [29]. Furthermore, evaluating the rank of the matrix F constructed from the fluorescence signals generated when a single pulse is irradiated onto the QD networks leads to an estimation of the prediction performance for any task. This implies that the performance of the QDRC can be assessed using a single pulse and not an encoded pulse sequence. The designed QDRC can be utilized across a broad range of data prediction tasks, although non-designed QDRCs demonstrate more accuracy for specific tasks. The proposed method proves useful when the properties of the task to be solved are unknown in advance. If the target data is predetermined, the rigorous arrangement of QDs following the design optimizes performance in the QDRC [36].

5. Conclusion

In this paper, we proposed a method for designing QD networks that enhance the prediction performance of QDRC. We constructed a mathematical model of the energy state of the QD, accounting for FRET and level occupancy effects, to reproduce the fluorescence signals generated by numerous QD networks. We confirmed that the fluorescence signals in the numerical simulation are modulated depending on the irradiation conditions and the density of QDs, exhibiting characteristics similar to experimental results. We designed QD networks to generate signals that significantly contribute to the prediction of time-series data. By evaluating the rank of the matrix representing the signals generated in the numerical simulation, the QD networks to be designed were identified. The QDRC with the designed QD networks predicts time-series data with higher accuracy than those with randomly-selected QD networks. The performance of the designed QDRC is independent of the properties of the time-series data and can be utilized in diverse fields. Our method expands the capability of QD networks and contributes to the experimental development of QDRC. It is expected that the designed QDRC will enable the prediction of a wide range of time-series data, including chaotic behavior in nature.

Funding. This work was supported by JST KAKENHI Grant Number JP20H02657 and JP20H05890, JST CREST Grant Number JPMJCR18K2, and Konica Minolta Imaging Science Encouragement Award.

Acknowledgments. The authors would thank Masaki Nakagara, Fukuoka Institute of Technology and Naoya Tate, Kyushu University for informative discussions on the mathematical model.

Disclosures. The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability. Data underlying the results presented in this paper are not publicly available at this time but may be obtained from the authors upon reasonable request.

References

1. M. M. Barroso, "Quantum dots in cell biology," *J. Histochem. & Cytochem.* **59**, 237–251 (2011).
2. J. Sobhanan, J. V. Rival, A. Anas, *et al.*, "Luminescent quantum dots: Synthesis, optical properties, bioimaging and toxicity," *Adv. Drug Deliv. Rev.* **197**, 114830 (2023).
3. B. Bajorowicz, M. P. Kobylański, A. Gołębiewska, *et al.*, "Quantum dot-decorated semiconductor micro- and nanoparticles: A review of their synthesis, characterization and application in photocatalysis," *Adv. Colloid Interface Sci.* **256**, 352–372 (2018).
4. M. Zhang, J. Yue, R. Cui, *et al.*, "Bright quantum dots emitting at 1,600 nm in the nir-iib window for deep tissue fluorescence imaging," *Proc. National Acad. Sci.* **115**, 6590–6595 (2018).
5. U. Resch-Genger, M. Grabolle, S. Cavaliere-Jaricot, *et al.*, "Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels," *Nat. Methods* **5**, 763–775 (2008).
6. M. Bruchez, M. Moronne, P. Gin, *et al.*, "Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels," *Science* **281**, 2013–2016 (1998).
7. I. L. Medintz and N. Hildebrandt, *FRET-Förster Resonance Energy Transfer: From Theory to Applications* (John Wiley & Sons, 2013).

8. K. F. Chou and A. M. Dennis, "Förster resonance energy transfer between quantum dot donors and quantum dot acceptors," *Sensors* **15**, 13288–13325 (2015).
9. N. Kholmicheva, P. Moroz, H. Eckard, *et al.*, "Energy transfer in quantum dot solids," *ACS Energy Lett.* **2**, 154–160 (2017).
10. T. Nishimura, Y. Ogura, and J. Tanida, "Fluorescence resonance energy transfer-based molecular logic circuit using a DNA scaffold," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 233703 (2012).
11. J. C. Claussen, N. Hildebrandt, K. Susumu, *et al.*, "Complex logic functions implemented with quantum dot bionanophotonic circuits," *ACS Appl. Mater. & Interfaces* **6**, 3771–3778 (2014).
12. S. Wang, A. R. Lebeck, and C. Dwyer, "Nanoscale resonance energy transfer-based devices for probabilistic computing," *IEEE Micro* **35**, 72–84 (2015).
13. S. Shimomura, T. Nishimura, Y. Miyata, *et al.*, "Spectral and temporal optical signal generation using randomly distributed quantum dots," *Opt. Rev.* **27**, 264–269 (2020).
14. N. Tate, Y. Miyata, S. ichi Sakai, *et al.*, "Quantitative analysis of nonlinear optical input/output of a quantum-dot network based on the echo state property," *Opt. Express* **30**, 14669–14676 (2022).
15. N. Tate, S. Yamaguchi, S. Sakai, *et al.*, "Demonstration of quantum dot reservoir computing based on spatio-temporal optical processing," *Appl. Opt.* **63**, G30–G36 (2024).
16. N. Tate, M. Naruse, W. Nomura, *et al.*, "Demonstration of modulatable optical near-field interactions between dispersed resonant quantum dots," *Opt. Express* **19**, 18260–18271 (2011).
17. W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, *et al.*, "Direct observation of optical excitation transfer based on resonant optical near-field interaction," *Appl. Phys. B* **107**, 257–262 (2012).
18. K. Vandoorne, P. Mechet, T. Van Vaerenbergh, *et al.*, "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip," *Nat. Commun.* **5**, 3541 (2014).
19. D. Brunner, M. C. Soriano, C. R. Mirasso, and I. Fischer, "Parallel photonic information processing at gigabyte per second data rates using transient states," *Nat. Commun.* **4**, 1364 (2013).
20. M. Lukoševičius and H. Jaeger, "Reservoir computing approaches to recurrent neural network training," *Comput. science review* **3**, 127–149 (2009).
21. M. Nakagawa, Y. Miyata, N. Tate, *et al.*, "Spatiotemporal model for fret networks with multiple donors and acceptors: multicomponent exponential decay derived from the master equation," *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, 294–299 (2021).
22. S. Wang, R. Vyas, and C. Dwyer, "Fluorescent taggants with temporally coded signatures," *Opt. express* **24**, 15528–15545 (2016).
23. V. Klimov, A. Mikhailovsky, S. Xu, *et al.*, "Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots," *science* **290**, 314–317 (2000).
24. A. Zrenner, E. Beham, S. Stufler, *et al.*, "Coherent properties of a two-level system based on a quantum-dot photodiode," *Nature* **418**, 612–614 (2002).
25. F. de Sales, J. Cruz, S. da Silva, *et al.*, "Coupled rate equation modeling of self-assembled quantum dot photoluminescence," *Microelectron. J.* **34**, 705–707 (2003). The Fourth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices.
26. H. M. Watrob, C.-P. Pan, and M. D. Barkley, "Two-step fret as a structural tool," *J. Am. Chem. Soc.* **125**, 7336–7343 (2003).
27. Y.-S. Park, W. K. Bae, T. Baker, *et al.*, "Effect of auger recombination on lasing in heterostructured quantum dots with engineered core/shell interfaces," *Nano Lett.* **15**, 7319–7328 (2015).
28. V. I. Klimov, A. A. Mikhailovsky, D. W. McBranch, *et al.*, "Quantization of multiparticle auger rates in semiconductor quantum dots," *Science* **287**, 1011–1013 (2000).
29. J. Chrol-Cannon and Y. Jin, "On the correlation between reservoir metrics and performance for time series classification under the influence of synaptic plasticity," *PLOS ONE* **9**, 1–8 (2014).
30. R. Legenstein and W. Maass, "Edge of chaos and prediction of computational performance for neural circuit models," *Neural Networks* **20**, 323–334 (2007). Echo State Networks and Liquid State Machines.
31. L. Büsing, B. Schrauwen, and R. Legenstein, "Connectivity, Dynamics, and Memory in Reservoir Computing with Binary and Analog Neurons," *Neural Comput.* **22**, 1272–1311 (2010).
32. L. Junges and J. A. Gallas, "Intricate routes to chaos in the Mackey–Glass delayed feedback system," *Phys. Lett. A* **376**, 2109–2116 (2012).
33. A. Weigend and N. Gershenfeld, "Results of the time series prediction competition at the Santa Fe Institute," in *IEEE International Conference on Neural Networks*, (1993), pp. 1786–1793 vol.3.
34. A. Atiya and A. Parlos, "New results on recurrent network training: unifying the algorithms and accelerating convergence," *IEEE Trans. on Neural Networks* **11**, 697–709 (2000).
35. H. Jaeger, *Short term memory in echo state networks*, GMD Report; 152 (GMD Forschungszentrum Informationstechnik, 2001).
36. O. Lee, T. Wei, K. D. Stenning, *et al.*, "Task-adaptive physical reservoir computing," *Nat. Mater.* **23**, 79–87 (2024).

Design of quantum dot networks for improving the performance of reservoir computing

Kazuki Yamanouchi, Suguru Shimomura, and Jun Tanida

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita 565-0871, Japan

Author e-mail address: k-yamanouchi@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract: Quantum dot networks (QDNs), which generate a variety type of the fluorescence signal depending on their structure, are useful for physical reservoir computing. However, random signals generated by QDNs have been used in quantum dot reservoir computing (QDRC). In this study, we proposed a method for designing QDNs' structures which generate effective fluorescence signals to improve the performance of the QDRC. We evaluated the signal diversity of the designed QDNs and the prediction performance for Santa Fe time-series data.

1. Introduction

A quantum dot (QD), which is a nano meter-sized fluorophore, transfers its own energy to neighbor ones by Förster resonance energy transfer (FRET) within several distances. The fluorescence signal generated from QDs can be modulated depending on FRET efficiency. Quantum dot networks (QDNs), which are constructed by multiple-step FRETs in randomly-distributed QDs, have the ability to generate a variety of fluorescence signal depending on the network structure. Generation of diverse signals in time domain is useful for implementation of physical reservoir computing (RC) which predicts time-series data [1]. We aim to the construction of a quantum dot reservoir computing (QDRC) system and demonstrated that QDN has an echo-state property which is a necessary function in RC [2]. However, the relationship between the signals generated by the QDNs and the prediction performance in the QDRC remains unknown. To maximize the performance of QDRC, it is necessary to construct QDNs generating effective fluorescence signals for the prediction. In this study, we propose a method for design of QDNs' structure to generate a variety of temporal signals for RC. By evaluating the independence of the signals generated by the numerous QDNs' structures, an effective set of signals for the prediction is chosen. To verify the effectiveness of designed QD structures, we generate the temporal signals by numerical simulation and evaluates the performance in prediction of chaotic signals.

2. The mathematical model of the QDN and the method of designing QDNs

First, the mathematical model of the QDN is described. Considering the electrons in a QD as a two-level system, the rate equation for the excited electrons in the i -th QD is written as follows:

$$\frac{dN_{e,i}}{dt} = \frac{\sigma_i I_{ex}(t)}{h\nu_i} N_{g,i} - k_{nr,i} N_{e,i} - k_{r,i} N_{e,i} - \sum_{i \neq j} k_{i \rightarrow j} N_{e,i} + \frac{N_{g,i}}{N_{e,i} + N_{g,i}} \sum_{i \neq j} k_{j \rightarrow i} N_{e,j}. \quad (1)$$

Here, $N_{e,i}, N_{g,i}$ are the number of electrons at the excited and ground states in the QDs. $I_{ex}(t), h$ are the irradiation photon density at time t , the Planck constant, respectively. The absorption coefficient and the frequency of fluorescence of i -th QD is represented as σ_i, ν_i . k_r and k_{nr} are rate constants of radiative and nonradiative relaxation processes, and $k_{i \rightarrow j}$ is rate constants of FRET from i -th to j -th QD. The fluorescence signal at time t generated from the QDN is

$$f(t) = \sum_i (k_{r,i} N_{e,i}(t) \times h\nu_i) \quad (t = 1, \dots, T). \quad (2)$$

Equations (1) and (2) can be used to calculate the time-series signal $\mathbf{f} = (f(1), \dots, f(T))^T$ generated by the QDN. Therefore, the fluorescence signals in the QDNs can be simulated by them.

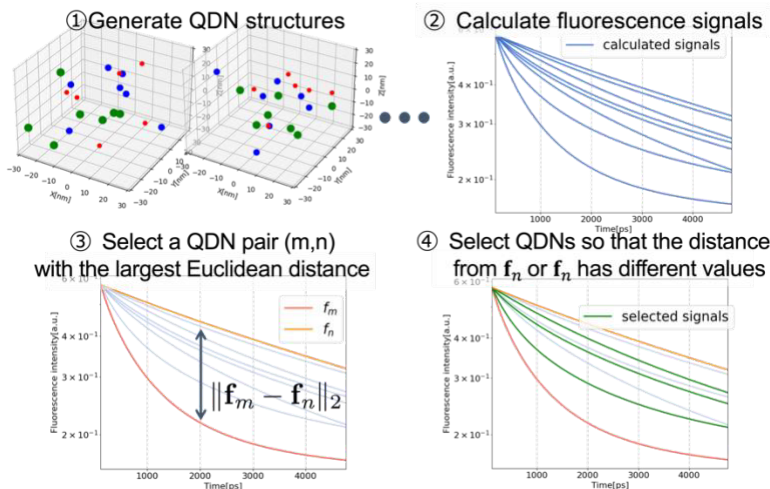


Fig. 1 The procedure for the design of QDNs to generate effective signals.

Figure 1 shows the procedure for the design of QDNs that provide effective signals. Initially, we randomly generated N types of QDN structures. Individual fluorescence signals f_i ($i = 1, \dots, N$) of the i -th QDN are calculated by Eqs. (1) and (2). The fluorescence signals are integrated as a matrix $F = (f_1, \dots, f_N)$. The rank value of the matrix F corresponds to the dimension of the output value. In RC, the predicted signal is regressed by the linear combination of the output value. Therefore, the effective output values for RC are determined by the combination of QDNs with a high rank of the matrix F . To select such a combination, we chose the pair of fluorescence signals f_m and f_n that maximizes the Euclidean distance $\|f_i - f_j\|_2$ between the two signals f_i and f_j . In addition, we selected the remaining QDNs so that the distance from f_m or f_n took different values. The various type of signals can be chosen by the proposed method.

3. Evaluation by the rank of the fluorescence matrix

To investigate the effectiveness of the proposed method, we evaluated them by the rank of fluorescence matrix. In this study, we generated 3000 types of QDN structures, and selected 18 types of QDNs. Figure 2(a) shows the temporal signals generated from all types of QDNs and the selected 18 types of QDNs. A variety of fluorescence signals can be selected. The rank of the matrix F_m , consisting of the selected signals, was 14. Figure 2(b) shows the frequency distribution of the ranks of the matrix F_{random} , when 18 types of the fluorescence signals were selected randomly. The average rank for a random selection was 5.14, and the maximum value of the rank was 10 in 1000000 trials. This result shows that the QDNs with effective fluorescence signal for the construction of the RC could be designed.

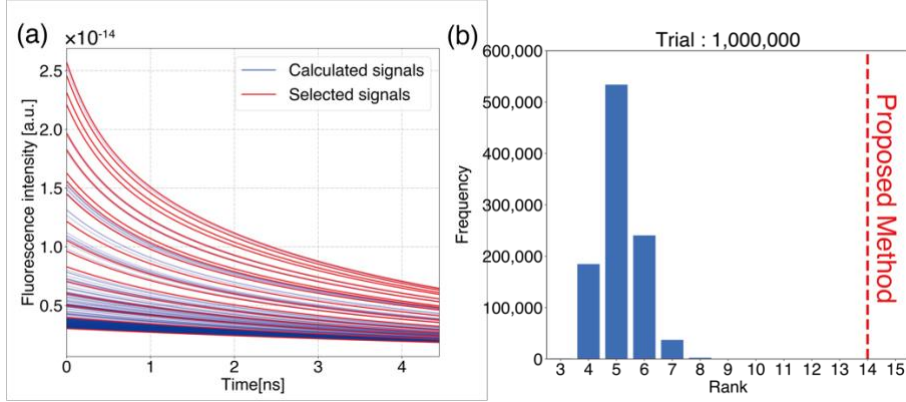


Fig. 2. (a) The temporal signals from the selected 18 types of QDNs (red) and all types of QDNs (blue). (b) The frequency distribution of the ranks of the matrix F_{random} .

4. Evaluation by the performance of quantum dot reservoir computing

Next, we investigated the well-designed effective QDNs improves the prediction performance of the QDRC. A one-step-ahead prediction was performed on Santa Fe time-series data by using designed QDNs. The number of training and test data was 800, and the Santa Fe signal was normalized by the maximum value. The prediction performance was evaluated using the normalized mean square error (NMSE).

Figures 3(a) and (b) show the prediction results of the Santa Fe signal with QDRC composed of a randomly selected QDNs (R-QDRC) and the designed QDNs (D-QDRC), respectively. The prediction result of R-QDRC is shown in Fig. 3(a). The NMSE calculated from prediction results of R-QDRC is 2.53×10^{-1} . In contrast, the NMSE of D-QDRC shown in Fig. 3(b) was 1.91×10^{-2} , which is smaller than R-QDRC. This result shows that use of the designed QDN improve the performance of RC.

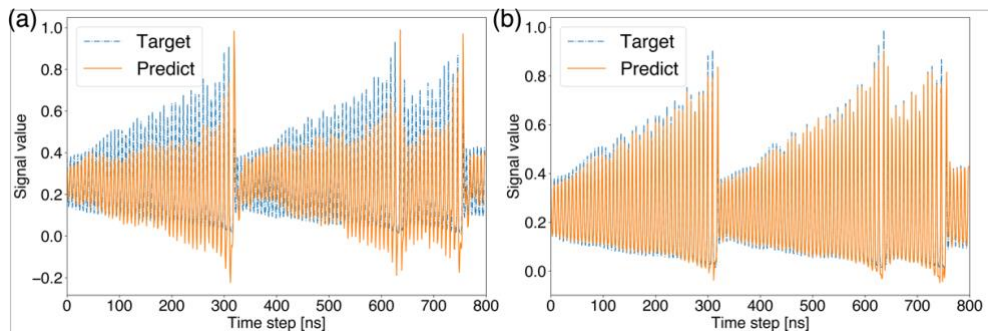


Fig. 3. Prediction results of Santa Fe signal. (a) R-QDRC. (b) D-QDRC.

Acknowledgements

This work was supported by JST KAKENHI Grant Number JP20H02657 and JP20H05890, and JST CREST Grant Number JPMJCR18K2.

References

- [1] S. Shimomura, *et al.*, "Spectral and temporal optical signal generation using randomly distributed quantum dots," *Optical Review*, **27**(2), 264-269 (2020).
- [2] N. Tate, *et al.*, "Quantitative analysis of nonlinear optical input/output of a quantum-dot network based on the echo state property," *Optics Express*, **30**(9), 14669-14676 (2022).

Diattenuation imaging of artificial and biological samples using polarization-structured spot array

Taiki Suzaki, Yusuke Ogura, Jun Tanida

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University,
1-5 Yamanaka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Polarization imaging is a technology which allows us to see invisible information of various samples to understand their properties. Because polarization information relates to the changes of polarization states induced by a sample, illumination is as important as detection. In this study, we aim to develop a polarization imaging method, using a polarization-structured spot array as illumination. To assess the capability, we measured the diattenuation distribution of artificial and biological objects as samples. Experimental results demonstrated that our method is effective to measure diattenuation in a single shot.

Keywords: Polarization Imaging, Computer-generated Hologram, Diattenuation, Single shot

1. Introduction

Polarization imaging provides a unique opportunity for analyzing object's properties such as birefringence and diattenuation. Such information is useful when quantifying different properties of objects including biological samples. Polarization measurement observes the changes of the polarization states before and after light interacts with an object. A major polarization imaging technique requires switching incident polarization lights and precise mechanical drive [1]. This measurement tends to take a high cost of acquisition time and the system implementation. In this paper, we aim to develop a polarization imaging method using a polarization-structured spot array as an incident light. Diattenuation information of objects, including artificial and biological samples, was measured to demonstrate the effectiveness of our method in capturing polarization information in just a single shot.

2. Method of diattenuation imaging

The proposed method for obtaining the distribution (absorption rate and axis angle) of diattenuation using a polarization-structured spot array as an illumination light is explained. In the polarization-structured spot array used, horizontal and vertical linear polarization spots are regularly and densely arranged. In our method, two spots with different polarization directions are simultaneously used for image construction based on spatial division multiplexing. The light transmitted through a sample is imaged with a polarization imaging sensor to obtain information on different polarization components. This approach allows us for single-shot polarization imaging.

We assume two linear diattenuation axes of a sample, referred to as α -axis and β -axis (absorption rate, μ_1 , along the α -axis is the maximum, and that along β -axis, μ_2 , is the minimum, ($0 \leq \mu_1 \leq \mu_2 \leq 1$)). $I_{d-ang}(\theta, \varphi)$ is defined as light intensity detected when the angle of α -axis is θ and the angle of incidence light polarization is φ . To obtain θ , the intensity distributions for a set of four pairs of input polarization (0° or 90°) and detected polarization (45° or 135°) are required. Using the intensity distribution set, we get diattenuation parameters θ , μ_1 , μ_2 as follows:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{C} \right), \quad (1)$$

$$\mu_1 = 1 - \frac{A \sin(2\theta) + B}{2I \sin \theta}, \quad (2)$$

$$\mu_2 = 1 - \frac{A \sin(2\theta) - B}{2I \sin \theta}, \quad (3)$$

where

$$A = I_{45}(\theta, 0) + I_{45}(\theta, 90) + I_{135}(\theta, 0) + I_{135}(\theta, 90), \quad (4)$$

$$B = I_{45}(\theta, 0) + I_{45}(\theta, 90) - I_{135}(\theta, 0) - I_{135}(\theta, 90), \quad (5)$$

$$C = I_{45}(\theta, 0) + I_{45}(\theta, 90) - I_{135}(\theta, 0) + I_{135}(\theta, 90). \quad (6)$$

3. Experiment

In the experiment, a polarization-structured spot array was generated by using a computer-generated hologram (CGH) with a polarization converter, which converts linear polarization to azimuthal polarization. We illuminated a sample with the polarization-structured spot array and captured the image with a polarization image sensor (TRI050S1-PC).

In the first experiment, we used an artificial object consisting of two polarization filters with the axis of 90° within the upper part and 135° within the lower part as a target sample. Figure 1 shows the result. In Fig. 1 (b), line segments express the angle of θ . Although, there are some errors, the direction of diattenuation axis is obtained. In Figs. 1 (c)(d), the map of μ_1 takes values close to zero and is clearly distinguished the area of polarization filters and the gap space. The map of μ_2 takes fairly greater values than that of μ_1 . This shows that our method enables us to get diattenuation information in just a single shot.

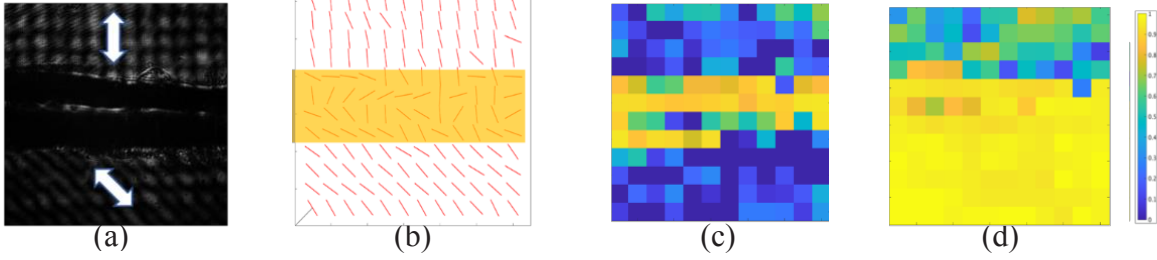


Figure 1. Experimental result on diattenuation imaging of an artificial object. (a) Acquired image, (b) direction of diattenuation axis, (c) the map of absorption rate μ_1 , (d) the map of absorption rate μ_2

Next, we applied our method to polarization imaging of potato starch granule to investigate the effectiveness of the method not only for artificial objects but also for biological samples. Figure 2 shows the result of the experiment. The length of the arrows indicates the difference of absorptance rate ($\mu_2 - \mu_1$). We can confirm that the absorption difference inside the starch granule is much smaller than that around the edge of the starch granule. This means that the absorption difference is little inside the starch granule. This tendency matches with previous studies [3, 4].

In contrast, we can find some arrows pointing in specific directions along the edge of starch granule, which means the edge tends to have stronger diattenuation. This is also consistent with previous studies [3, 4]. The results suggest potential capability of our method.

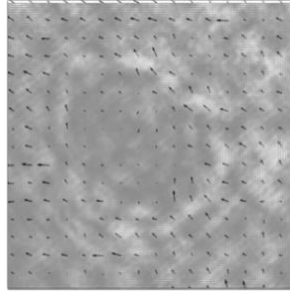


Figure 2. Direction of diattenuation axis (scaled) overlapped to the acquired image obtained in the experiment.

4. Conclusion

We have experimentally demonstrated the utility of our method in capturing polarization information from artificial and biological samples. The results also show the potential for single-shot polarization imaging. The use of a polarization-structured spot array as illumination will contribute to an extension of computational polarization imaging.

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP20H05886 and JP21H01844.

Reference

- [1] D. Goldstein, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A **7**, 693-700 (1990).
- [2] Y. Ogura, *et al.*, Optics Express **22**, 25196-25207 (2014).
- [3] Maria J. Lopera, *et al.*, Appl. Opt. **61**, B77-B82 (2022).
- [4] Chien-Yuan Han, *et al.*, Opt. Express **26**, 15851-15866 (2018).

バイアス位相を用いた並列演算空間フォトニックイジングマシンの 検証実験

Experimental demonstration of spatial photonic Ising machine with parallel processing using bias-phase

阪大院情 ○木原 崇晶, 下村 優, 小倉 裕介, 谷田 純

Osaka Univ., °Takaaki Kihara, Suguru Shimomura, Yusuke Ogura, Jun Tanida

E-mail: t-kihara@ist.osaka-u.ac.jp

空間フォトニックイジングマシン (SPIM) は, 組合せ最適化問題を解く計算システムであり, 大規模な組合せを取り扱うことができる¹⁾. 本システムでは, 最適解を導出するために, 候補解に対する評価を基にして反復的に解の探索を行う. しかし, 1 反復につき 1 つの組合せしか評価できないため, 問題規模に応じて膨大な反復回数が必要となる. 本研究ではグレーティング状のバイアス位相を用いた空間多重化により, 異なる組合せを並列に評価可能な空間フォトニックイジングマシンを構築する. 並列評価による効率的な探索により, 良い解を導出するために必要な反復回数を削減できる. 実験光学系を構築し, 最小カット問題の最適解探索を行った. 各多重化数における解精度の比較により, 提案手法の有効性を検証した.

Figure 1 にバイアス位相を用いた SPIM の概略図を示す. SPIM では, 問題設定は入射光の振幅分布 ξ で表現される. 位相変調量 $\phi_j \in \{0, \pi\}$ のバイナリー位相パターン ϕ により, 組合せはスピン配置 $\sigma = e^{i\phi} \in \{-1, 1\}$ として表現される. 2 つの SLM によって振幅・位相が変調された光はレンズによって集光される. イメージセンサで集光中心の光強度を取得する. 取得される光強度は, 組合せの評価値であるイジングハミルトニアン $H = -\sigma^T \xi \xi^T \sigma = -\sum_{jh} \xi_j \xi_h \sigma_j \sigma_h$ に対応している. 光強度値が最大となるよう, 位相変調パターンの反復更新により最適解を探索する. 本研究では, 位相パターン $\phi^{(k)}$ の展開とグレーティング状のバイアス位相を用いて空間多重化を行う. 具体的には, 複数の位相パターン $\phi^{(k)}$ に対してバイアス位相を重ねることで, グレーティングの向きに応じた回折によって集光位置をシフトさせる. それぞれのスピン配置に対応したイジングハミルトニアン $H^{(k)}$ の取得により反復回数を削減でき, 解探索の高速化が可能となる.

実験では, 振幅分布 $\xi \in \{0, 1\}$ で表現されたスピン数が 100 の最小カット問題の最適解探索に適用した. 各多重化数 (N) において導出された解精度のヒストグラムを Fig. 2 に示す. 反復回数 50 回における解精度の平均を算出したところ, N=1 では 66.5%, N=4 では 76.1% となり, 多重化数に応じて解精度が向上した. 本結果より, 多重化を用いた複数の組合せの並列評価によって探索性能が向上することを実証した.

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

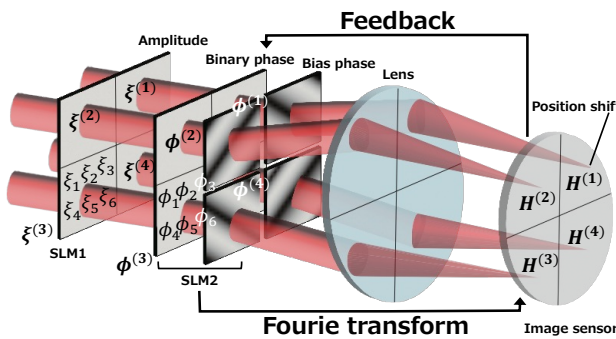


Fig. 1 Spatial photonic Ising machine with parallel processing using bias-phase.

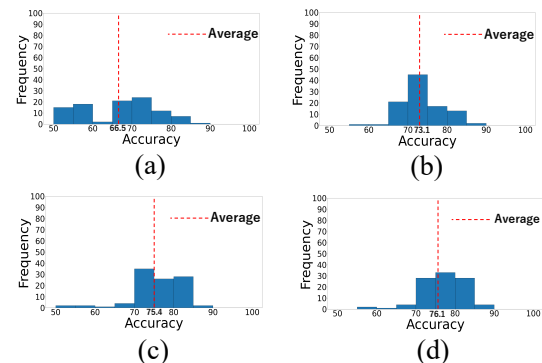


Fig. 2 Histograms of optimization accuracy for Min-cut problem with (a) N=1, (b) N=2, (c) N=3, and (d) N=4.

参考文献

- 1) D. Pierangeli, *et al.*, Large-Scale Photonic Ising Machine by Spatial Light Modulation, *Physical Review Letters* **122**, 213902 (2019).

量子ドットネットワークを用いた Physically Unclonable Function に基づく人工物認証技術の検討 Artifact-metrics Based on Physically Unclonable Function Using Quantum-dot Network

°柴田涼平^{1*}, 下村優¹, 豎直也², 谷田純¹, 小倉裕介¹

°Ryohei Shibata¹, Suguru Shimomura¹, Naoya Tate², Jun Tanida¹, Yusuke Ogura¹

1. 大阪大学大学院情報科学研究科, 2. 九州大学大学院システム情報科学研究所

1. Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

2. Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

*r-shibata@ist.osaka-u.ac.jp

A physically unclonable function (PUF) is gaining attention due to its capability in high-level security for the Internet of Things (IoT) society. In this study, we investigated a PUF using quantum-dot networks to apply it to secure authentication of artificial objects. In the experiments, we evaluated the fundamental performance using fluorescence images of the quantum-dot networks and confirmed their potential capabilities relating to uniqueness.

現在, IoT の利用拡大に伴い, 安心で安全な物体認証として Physically Unclonable Function (PUF) 認証¹⁾ が注目されている. PUF 認証とは物体を製造した際に生じる複製困難な物理的特徴を関数として用いて認証する技術である. 我々は, 多数の量子ドット (QD) からなる QD ネットワーク (QDN) を用いた PUF の検討を進めている. QDN は, フェルスター共鳴エネルギー移動 (FRET) による多段階のエネルギー移動が行われる QD の構造体である. 励起光の照射条件によってエネルギー伝達経路が変化し, 非線形な蛍光応答により, 時間信号が時空間的な高次元信号に写像される²⁾. この性質は, PUF による人工物認証に必要な多数の固有な出力の生成にも有用であると考えられる. 本研究では, QDN への時間信号入射に対する空間的な蛍光応答変化を利用した認証の特性を評価し, その効果を検討した.

本手法では, 基板上に適当な密度で分散させた QD を用いる. 認証は QDN の蛍光応答画像を 1 次元のバイナリビット列に変換したものを使用する. 認証対象の物体について, 事前に登録されたビット列と被認証者から送られるビット列のハミング距離 (HD) をもとに認証の可否を決める. なお, 認証の性能を調べるために, 同じ PUF 同士の HD をビット数で正規化した inter-HD と, 異なる PUF 同士の HD をビット数で正規化した intra-HD を用いた. これらは再現性とユニーク性の指標となる.

実験では, QD (NN-LABS, CS440) を凝集させたガラス基板にパルスレーザー光 (波長 403nm、パルス幅 500ps) を集光して QDN を励起し, 蛍光応答画像を撮影した. 時間的な非線形性の効果を調べるために, 30 個の試料に対してシングルパルスとダブルパルスそれぞれで励起し, 同じ条件で 10 回ずつ画像を撮影した. 図 1 は QDN の蛍光応答の二値化画像の例であり, 空間分布に違いが現れている. また, 二値化画像の全ての組み合わせから算出した inter-HD と intra-HD のヒストグラムを図 2 に示す. これらの山が分離しており, 適切な閾値の設定により正しく認証できることがわかる. また, ダブルパルスを含めた場合, シングルパルスと比べて inter-HD はほぼ変わらず intra-HD は上昇した. これは, 再現性を維持しつつユニーク性が向上できることを示しており, QDN の時間的非線形性の有用性が確認できた.

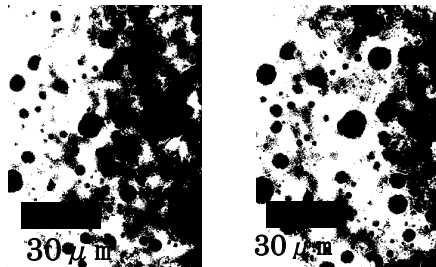


Fig. 1 Examples of the fluorescence response images of the QD network.

Left: Single pulse, Right: Double pulse.

参考文献

1) R. Pappu, B. Recht, J. Taylor and N. Gershenfeld: Science 297 (2002) 2026-2030.

2) N. Tate, Y. Miyata, S. Sakai, A. Nakamura, S. Shimomura, T. Nishimura, J. Kozuka, Y. Ogura and J. Tanida: Opt. Express 30 (2022) 14669-14676.

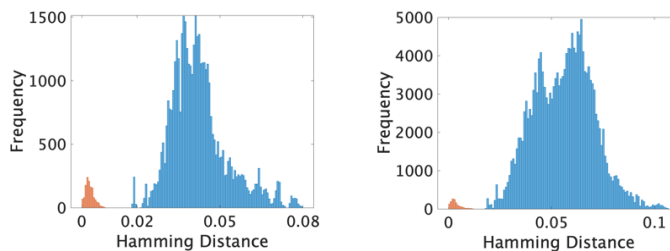


Fig. 2 The histogram of inter-HD (orange) and intra-HD (blue). Left: Single pulse, Right: Single pulse and Double pulse.

Polarization Imaging via Polarization-Structured Illumination Microscope

Taiki Suzuki, Yusuke Ogura

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita 565-0871, Japan

Tel.: 81-6-6879-4398, E-mail: t-suzaki@ist.osaka-u.ac.jp

OCIS codes: (090.1760) Computer holography; (110.2945) Illumination design; (110.5405) Polarimetric imaging.

Polarized light imaging is an effective technique for visualizing invisible information of objects. For example, the diattenuation and birefringence of an object can be quantitatively evaluated [1]. Such polarization information is useful for understanding the function and structure of a material [2]. We are studying about a polarization imaging method using polarization-structured illumination that contains an array of small light spots with different polarization states [3]. In the previous system, the numerical aperture of the focusing lens used was low, so that the resolution was not enough to observe a microscopic object. Enhancing resolution broadens the scope of applications including bio-imaging, and therefore, we conducted fundamental experiments using a microscope to explore its potential.

Our method uses a polarization-structured spot array for illumination to obtain the information of diattenuation properties (absorption rate and axis angle) of a sample. In this array, horizontal and vertical linearly polarized light spots are arranged in a dense and regular pattern by computer generated holography, allowing simultaneous image construction of polarization images based on spatial division multiplexing. The light transmitted through a sample is captured by a polarization camera, providing intensities on different polarization components at a time. Next, the sample is assumed to have two diattenuation axes, with the maximum-absorption rate μ_1 and the minimum-absorption rate μ_2 . To determine the orientation angle θ of the maximum absorption axis, intensity distributions from four pairs of polarization inputs (0° or 90°) and detection angles (45° or 135°) are analyzed. This intensity dataset allows for the calculation of the diattenuation parameters θ , μ_1 , and μ_2 .

Figure 1(a) shows the optical system we used. In a microscopy system, the light wave is focused by a 20x objective lens to generate a structured polarization spot array on a sample. The transmitted light from the sample is observed using a 40x objective lens. In the experiment, we used polarization filters with the axis of 45° and 135° as target samples. Figure 1(b) shows the result. The line segments express the orientation angle of θ . Although, there are some errors, the direction of diattenuation axis is obtained. We confirm that the method enables us to get diattenuation information of objects using a microscope.

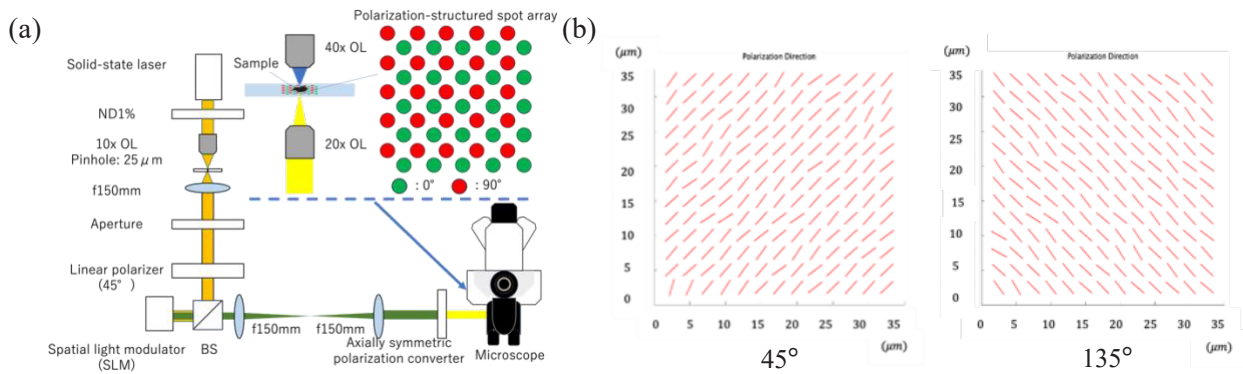


Fig. 1 (a) Experimental setup. (b) Direction of the diattenuation axis of polarization filters with the axis of 45° (upper) and 135° (lower).

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP20H05886 and JP21H01844.

References

- [1] D. Goldstein, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A **7**, 693-700 (1990).
- [2] Maria J. Lopera, *et al.*, Appl. Opt. **61**, B77-B82 (2022).
- [3] T. Suzuki, *et al.*, The 10th Biomedical Imaging and Sensing Conference, BISC5-01 (2024).

Three-dimensional imaging through scattering media by constructing a digital twin based on Gaussian Splatting

Kazuki Yamanouchi, Suguru Shimomura and Jun Tanida
 Graduate school of Information Science and Technology, Osaka University, Japan
 Corresponding author: k-yamanouchi@ist.osaka-u.ac.jp

Keywords: Image processing, Scattering, Three-dimensional image processing

Introduction

Imaging through scattering media is an important technique in various fields including bioimaging. In recent years, optical and computational approaches have developed the field of scattering imaging. However, while many of these methods focus on the two-dimensional shape of the object, achieving three-dimensional (3D) imaging continues to be a challenging task. A digital twin, which is a digital model constructed by data assimilation, emulates a complicated shape and a behavior of a physical object in virtual space. The construction of the digital twin and its interaction with a physical process enable the imaging of complex objects which would be difficult to observe in real space. We aim to achieve accurate 3D imaging through scattering media by using the digital twin. In this study, we attempt to construct a 3D digital twin based on Gaussian Splatting [1]. Gaussian Splatting is a method for representing 3D scenes using ellipsoids with opacities following a 3D Gaussian distribution. By introducing a scattering or de-scattering process into the native algorithm, which is proposed in Ref. [1], an object behind a scattering media can be reconstructed. We investigated a 3D model for a blurred object constructed by the proposed method.

Method

Figure 1 shows a procedure of the proposed Gaussian Splatting with scattering process. A set of images captured from multiple viewpoints is input to Structure-from-Motion (SfM) [2], which produces a point cloud and estimates a set of camera poses, which are positions and orientations of cameras. The initial point cloud is converted to a set of 3D Gaussians with opacities following a Gaussian distribution by adding three parameters: (a) 3D covariance matrix Σ , (b) opacity α , and (c) spherical harmonic coefficient c which represents the color. For rendering, the 3D covariance matrix is transformed to a 2D covariance matrix Σ^{2D} in the coordinates determined by the camera poses estimated by SfM. Each pixel value in rendered images is formulated as the alpha-blending of N ordered points that overlap the pixel: $C_{\text{pix}} = \sum_i^N c_i \alpha_i^{2D} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \alpha_j^{2D})$, where α_i^{2D} represents the i -th Gaussian's opacity weighted by the 2D Gaussian covariance Σ^{2D} . In this study, the scattering process produces scattering images (I_{scat}) from the rendered images (I_{GS}) with the pixel value C_{pix} as follows:

$$I_{\text{scat}} = \text{PSF} * I_{\text{GS}}, \quad (1)$$

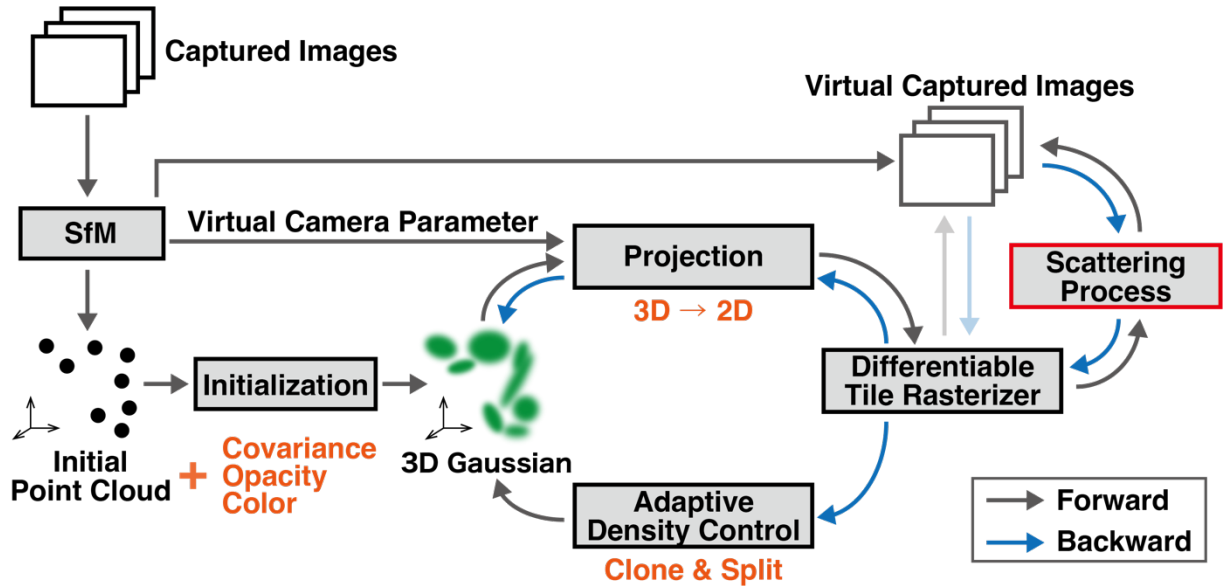


Fig. 1 A procedure of the proposed algorithm with scattering process.

where $*$ denotes the convolution and PSF is a point spread function. Image degradation such as blurring and scattering is modeled by the convolution with a PSF [3]. By introducing this process, the effects of scattering can be removed. The 3D Gaussian parameters (position, covariance, opacity, color) are optimized by stochastic gradient descent techniques using a loss function based on the L1 norm and the D-SSIM term with the captured images and scattering images. In addition, the number of Gaussians and their density over unit volume is controlled adaptively by cloning and splitting it in two. A de-scattered 3D models can be constructed by iterating this procedure.

Experiment

To verify the de-scattering capability of the proposed method, a set of blurred images was input to the native and proposed algorithm. As the blurred images, we used a set of images created by convolving a PSF on the images of the target object captured from multiple viewpoints. The PSF was represented by a Gaussian distribution with standard deviation of 5 pixels, and the same PSF was used in equation (1). Figures 2(a)-(c) show the image of the object from a viewpoint, and the reconstructed images by native and proposed algorithm. While native Gaussian Splatting remained a blurred image, the proposed method reconstructed the object without blur. To evaluate the contrast, the width of the white line on the object was measured along the blue horizontal line in the enlarged images. Figure 2(d) shows the widths in each image from all viewpoints. The concordance ratio between the widths of the captured and reconstructed images is 26.3% for the proposed method, compared to 3.95% for the native method. We demonstrated that the proposed method could construct a 3D model with high contrast.

Conclusion

This study shows that 3D object can be reconstructed from the blurred images by introducing the convolution and deconvolution of the PSF. Future work includes the construction of 3D models for objects behind the actual scattering media.

Acknowledge

This work was supported by JST KAKENHI Grant Number JP20H05890.

References

1. B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, and G. Drettakis, *ACM Transactions on Graphics* 42(4) (2023).
2. J.L. Schönberger, J.M. Frahm, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 4104-4113 (2016)
3. J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" (McGraw-Hill, 1996)

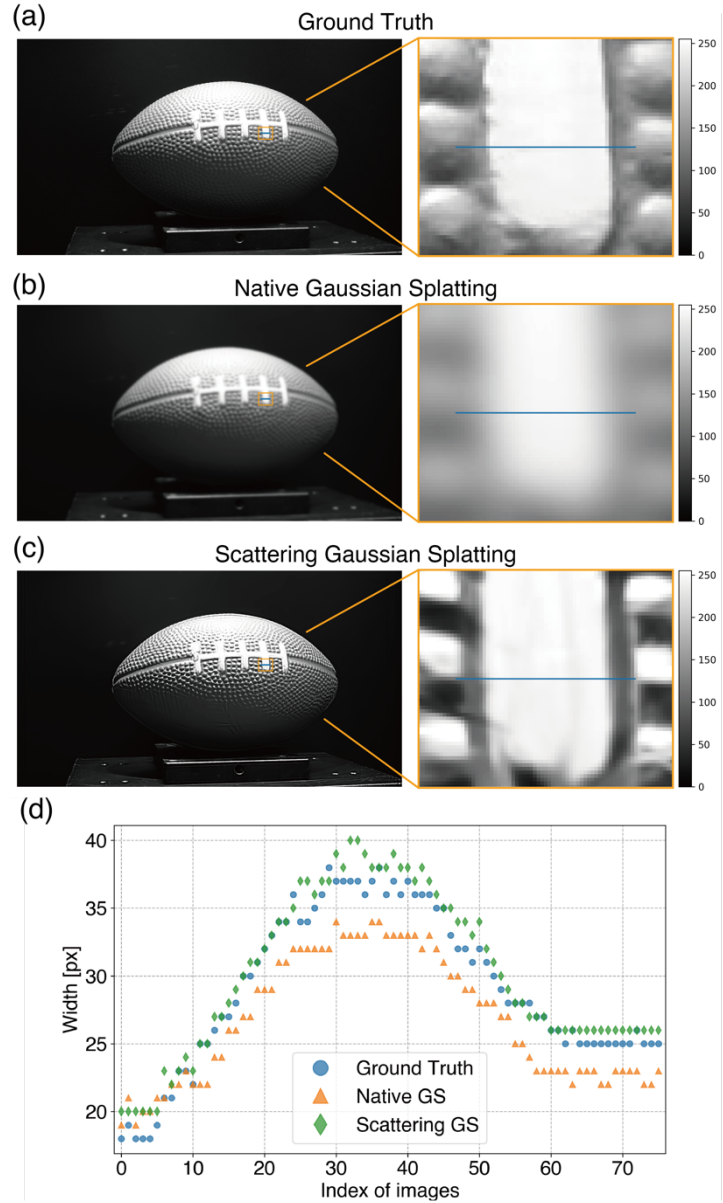


Fig. 2 Reconstruction results. A captured image from a viewpoint (a) and reconstructed images by native (b) and scattering Gaussian Splatting (c), and partial enlarged images of them. (d) The distribution of widths of the white line on the object in the images from all viewpoints.

Frozen wave を用いたアダマール型符号化照明の生成 Generation of Hadamard-type coded illumination using Frozen wave

○笹木天翔^{1*}, 下村優², 小倉裕介²

○Tensho Sasaki¹, Suguru Shimomura², Yusuke Ogura²

1. 大阪大学工学部, 2. 大阪大学大学院情報科学研究科

1. Faculty of Engineering, Osaka University

2. Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University*

[*t-sasaki@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:t-sasaki@ist.osaka-u.ac.jp)

A frozen wave (FW) is a light wave whose intensity distribution can be controlled in three dimensions. In this study, the FW is used to generate Hadamard-code illumination with a width in the z-axis direction towards 3D single pixel imaging (SPI). In simulation we demonstrated generation of Hadamard-code illumination in two separated spaces. It was also confirmed that the coded illumination could be restored on the back side even if it was partially hidden. These results show the potential of the FW-based coded illumination for 3D SPI.

シングルピクセルイメージング(SPI)は物体に符号化照明を照射しながら強度を測定してイメージングする手法である。三次元イメージングにおいては、サンプル自体の光軸方向の揺らぎやサンプルによる符号化照明の乱れなどに対処する符号化照明が求められる。Frozen wave (FW) は非回折性や自己修復特性を持つ光波であり、三次元の光パターン制御が可能である⁽¹⁾。本研究では、SPI への適用可能性を調査するため、アダマールパターンの FW 符号化照明について検討し、基本的特性の確認を行った。

異なる奥行位置でのイメージングを想定し、アダマールパターンを2つに分割し、Fig.1 のように左半分を手前に、右半分を奥に、奥行方向に幅を持たせて配置した。SPI は集光した光の強度測定に基づくため、符号化照明を分割した場合でもイメージングが可能である。FW は異なる波数のベッセルビームを足し合わせて生成され、それらを空間的に配置した FW 符号化照明の複素振幅分布は以下の式で表される。

$$\psi(x, y, z) = \sum_{q=1}^P \sum_{m_q=-N}^N A_{mq} J_0(k_p^{(mq)} \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}) \exp(ik_z^{(mq)} z)$$

J_0 はベッセル関数、 k_p は横方向波数、 k_z は縦方向波数、 A_{mq} はベッセルビームの重み、 (x_o, y_o) はビームの中心座標を表す。アダマール行列の値が1の要素に対応する位置に FW 強度を持たせることにより符号化照明を生成した。照明生成には空間光変調器 (SLM) を用いるが、一般には振幅か位相どちらかしか変調できないので、フーリエ級数展開とヤコビアン展開を用いて位相のみの分布から複素振幅を再現する手法を採用した。設計パターンのシミュレーション結果を Fig.2 に示す。また、Fig.2 の丸の部分の z 軸方向の強度分布を Fig. 3 に示す。FW 符号化照明により、2つの空間領域において、z 軸方向に幅を持たせたアダマールパターンを生成することができた。また、物体自身により照明が乱れる場合の自己修復特性を確認し、三次元 SPI への適用可能性を示した。

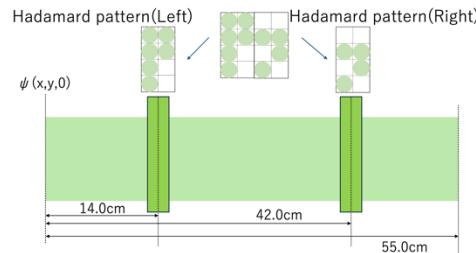


Fig.1 Setup of Hadamard-code illumination

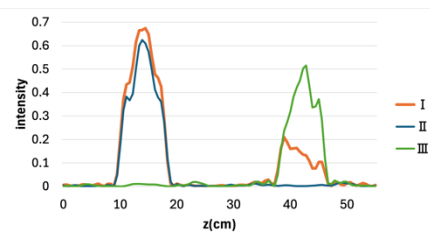


Fig.3 Intensity profile in z direction.

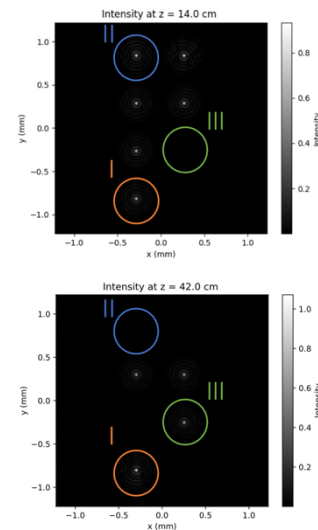


Fig.2 Spatial pattern of coded illumination

参考文献

- (1) A. H. Dorrah *et al.*, "Light sheets for continuous-depth holography and three-dimensional volumetric displays." *Nature Photonics* **17**, 427 (2023).

インコヒーレント照明パターンと色情報抽出による物体認識 Object Recognition by Using Incoherent Illumination Pattern and Extracting Color Information

○数藤 和也^{1*}, 下村 優², 小倉 裕介²

○Kazuya Sudo^{1*}, Suguru Shimomura², and Yusuke Ogura²

1. 大阪大学工学部, 2. 大阪大学大学院情報科学研究科

1. Faculty of Engineering, Osaka University

2. Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*k-sudou@ist.osaka-u.ac.jp

In this study, we propose an object recognition system based on responses to incoherent light with color information. By obtaining optical responses to incoherent light-pattern illumination and by extracting the color information of a target object in the optical responses, the recognition performance can be improved. We demonstrated that the proposed system achieved 66.7% accuracy in binary classification using two classes from the CIFAR-10 dataset.

単一画素イメージングに基づく光学的機械学習フレームワーク (MLSPI) は, インコヒーレント光照射による物体からの反射光強度をもとに物体を認識する¹⁾. MLSPI では対象物体の形状に応じた照射パターンに対する光強度を計測する. 一方, 単一画素による強度情報に応じた認識のため, 物体固有の色情報は利用できない. 色情報を活用できれば, より多くの物体情報を抽出でき, 認識性能の向上に寄与すると考えられる. そこで本研究では, 対象物体からの色情報を考慮した MLSPI の構築をめざす. 光照明パターンに対する光応答から色情報を抽出し, それぞれに対する重み付けにより物体認識を行う.

図1に色情報を用いた MLSPI の概念図を示す. 計測対象となる物体 X は RGB の各チャンネルにおける情報に基づく行列 $X = [X_R, X_G, X_B]^T$ として表される. 光パターン W を照射した時, 物体からの光応答は $y = \alpha_R W X_R^T + \alpha_G W X_G^T + \alpha_B W X_B^T$ で表される. ここで, $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ はそれぞれ各チャンネルの反射光強度に対する重みを表す. 提案手法では, クラス i に対する出力 y_i が最大の値となるよう勾配降下法により照明パターン W_i と重み $\alpha_i = [\alpha_{iR}, \alpha_{iG}, \alpha_{iB}]$ を最適化する. 物体認識時には, 最適化した照明パターンを対象物体に照射し, 分光器を用いて物体からの光応答を取得する. 得られたスペクトルデータを RGB データに変換し, 重みづけることで物体を識別する. 各クラスの出力値は色情報の重みによって出力結果が変化するため, 物体の色情報に対応した照明パターンを設計できる.

本手法の有効性を検証するため, カラー画像のデータセット CIFAR-10 のうち, 2つのクラスにおける分類性能を評価した. 分類には, クラス2 (鳥)・クラス3 (猫)・クラス4 (鹿)・クラス6 (カエル) を使用した. 実験では, 紙に印刷したカラー画像に最適化した照明パターンを照射し, 光応答のスペクトルを取得した. 変換された RGB データに最適化された色重みを適用し出力結果を得た. 各照明パターンにおける出力結果のうち, 高い値を示した照明パターンのクラスを予測結果とした. 2クラス分類における MLSPI と本手法の分類精度を表1に示す. クラス2と3, クラス2と6における2クラス分類では MLSPI と分類性能は等しくなった. 一方, クラス3と4を用いた2クラス分類では, MLSPI は41.7%の予測精度に対し, 提案手法では66.7%であった. 本結果より, 色情報を活用することで分類精度が向上することを実証した.

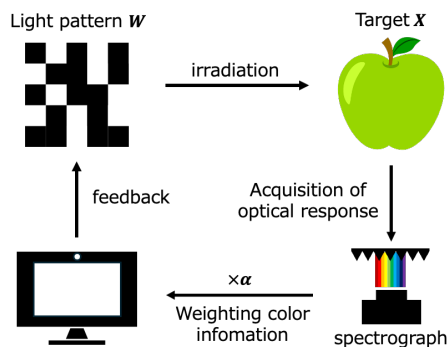


Fig.1 MLSPI using color information

参考文献

- 1) Jiao Shuming *et al.*, "Optical machine learning with incoherent light and a single-pixel detector," Optics Letters, Vol. 44, Issue 21, pp. 5186-5189 (2019).

class	class	accuracy [%] (MLSPI)	accuracy [%] (Proposed Method)
2	3	66.7	66.7
2	6	83.3	83.3
3	4	41.7	66.7

面積符号化による DMD 型空間光イジングマシン的高速化 Speeding up of DMD-based spatial photonic Ising machine with area encoding

野内 稜^{1*}, 谷田 純², 下村 優², 小倉 裕介²

[○]Ryo Nouchi^{1*}, Jun Tanida, Suguru Shimomura², and Yusuke Ogura²

1. 大阪大学工学部, 2. 大阪大学大学院情報科学研究科

1. Faculty of Engineering, Osaka University

2. Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

[*r-nouchi@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:r-nouchi@ist.osaka-u.ac.jp)

A spatial-photonic Ising machine (SPIM) solves combinatorial optimization problems based on optical modulation. Although the SPIM has high scalability for the variable number, a liquid-crystal spatial light modulator used for optical modulation limits the computing speed. In this study, we propose a new scheme of the SPIM by using a micro mirror device (DMD) which is a high speed SLM. Binary phase control and area encoding enable computation of the SPIM using DMD and achieve high computing speed. We demonstrated that proposed method could enhance computation speed by a factor of six.

組合せ最適化問題は、物流の輸送経路の最適化など、我々の日常生活に広く関係する。一方、問題が大規模になると組合せ爆発が起こり、計算時間が膨大になる。空間光イジングマシン (Spatially Photonic Ising Machine; SPIM) は組合せ最適化問題を解くことに特化した計算機である[1]。空間光変調を用いることで、多数の制約条件・選択肢が存在する問題の解探索が可能であり、また、問題規模によらない演算が実行できる。しかし、光変調に用いられる液晶型空間光変調器 (SLM) の動作速度がシステムの律速となっていた。本研究では、SLM として高速制御可能なデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いた空間光イジングマシンを実装する。ミラー反射光の光路長差によりバイナリー位相を制御する手法[2]と、振幅を表現するための面積符号化法を組み合わせた手法による高速化を検討し、原理実証実験を行った。

Fig. 1 に DMD を用いた SPIM の概略を示す。SPIM では、問題条件を振幅分布に、決定変数 (スピン状態) を 2 値(0, π) のバイナリー位相に対応づけて光変調し、レンズを用いたフーリエ変換作用ののちに得られる光強度からイジングハミルトニアンを取得する。DMD を用いた SPIM では、振幅分布と位相分布を 1 つの DMD で表現する。位相制御は、DMD への光の入射角の調整により、隣接するミラー間の光路長差が半波長になることを利用して実現する。隣接する 2 つのミラーを一組として、どちらか一方のミラーのみを ON にすることでバイナリー位相表現を行う。振幅表現は、振幅分布を整数値に変換し、それに対応する数のミラーの集合を各スピンに割り当てる面積符号化を用いる。DMD を反射した光は最終的に集光されるため、ミラーの数、すなわち反射する面積に比例した振幅を各スピンに対応づけられる。

提案手法を検証するため、14 個の要素を持つ数集合の数分割問題解探索を実行した。反復回数は 500 回とし、解探索アルゴリズムとしてシミュレーテッドアニーリングを用いた。100 回までの解探索における一方の集合の要素和の推移を Fig. 2 に示す。20 回の試行全てにおいて、最終的に得られた解における要素の和と、最適値 80 との差は 2 以内に収まっており、20 回中 10 回最適解に到達した。また、2 つの液晶型 SLM を使ったシステムと比べて約 6 倍の高速化がなされた。本結果より提案手法の高速性を実証した。本研究は、JST ALCA-Next (JPMJAN23F2), JSPS 科研費 (23H04805) の助成を受けたものです。

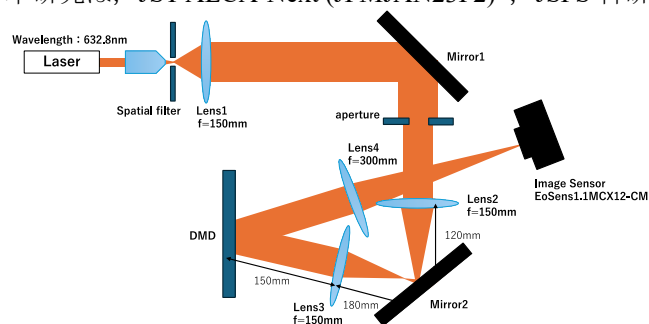


Fig. 1 Spatial photonic Ising machine with DMD

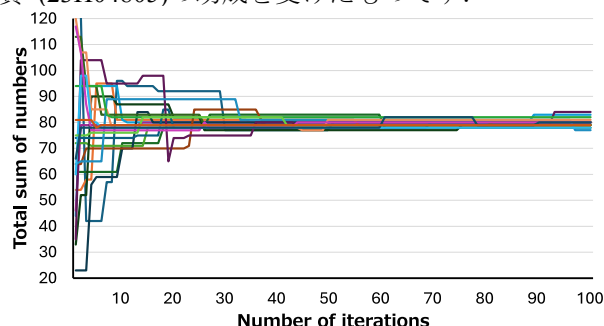


Fig.2 Change in total of selected numbers

参考文献

- 1) D. Pierangeli, et al, "Large-Scale Photonic Ising Machine by Spatial Light Modulation," Physical review letters, 122.21, 213902 (2019).
- 2) Y. Ogura, et al, "Spatial photonic Ising machine using a digital micromirror device," OIE25_proceedings, 42-43 (2025).

不均一媒質と再帰結像を用いた画像暗号化の検討

Study on image encryption using uneven refractive medium and retro-imaging

阪大院情 ○岩渕 健吾, 下村 優, 小倉 裕介, 谷田 純

Osaka Univ. °Kengo Iwabuchi, Suguru Shimomura, Yusuke Ogura, Jun Tanida

E-mail: k-iwabuchi@ist.osaka-u.ac.jp

ヒトに対する情報提示技術として画像や映像はさまざまな場面で利用されている。これらは、一般的には不特定多数の受信者への情報発信を目的とするが、対象者を限定した情報伝送も有用である。例えば、氾濫する画像情報を整理したり、一見背景だが特定者だけが内容を知り得たりするものである。本研究では、再帰結像に基づいた簡便かつ応用性の高い画像暗号化技術を検討した。再帰結像による画像暗号化では、再帰性反射板と透明球を用いた手法が提案されている¹⁾。今回我々は、より大面積の画像暗号化を実現する新たな手法を報告する。

提案手法の原理を Fig.1 に示す。先行研究で用いられる透明球に替えて、大面積化が容易な不均一な屈折率をもつ不均一媒質プレートを利用する。ディスプレイを発した光波は不均一媒質プレートにより複雑に屈折され暗号化される。暗号化された光波は再帰性反射板により入射方向に戻される。ビームスプリッターにより入射光と反射光を分離し、反射光のみ暗号化に使用した不均一媒質プレート（暗号鍵）と同一仕様の不均一媒質プレート（復号鍵）を透過させる。その結果、暗号化に用いられた屈折が相殺され、原画像が空中像として得られる。

1mm² セルごとに周期的な凹凸パターンを持つアクリル板を不均一媒質プレートとした検証実験を行った。原画像と暗号化画像、復元結果を Fig. 2 に示す。原画像 [Fig. 2 (a)] をディスプレイに表示しアクリル板を透過させたところ、暗号化された空中像が観察された [Fig. 2 (b)]。次に、再帰反射光に対して同一仕様のアクリル板を透過させたところ、復元画像の空中像が得られた [Fig. 2 (c)]。本手法では、暗号鍵と復号鍵に用いる不均一媒質プレートの等価性が復元性能に大きく影響する。検証実験では、復元画像は必ずしも原画像と同一ではないが、文字情報は正しく復元されている。例えば、デジタルサイネージや空中字幕への応用が考えられる。

本研究は JSPS 科研費 (JP20H05890, JP24K03598) の助成を受けた。

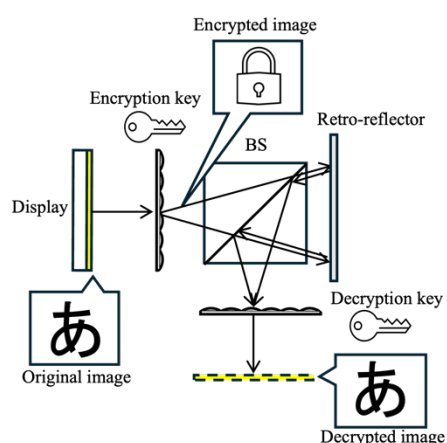


Fig. 1 Image encryption system

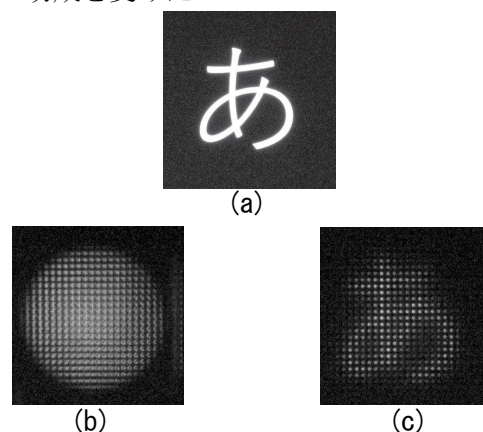


Fig. 2 (a) Original image (b) Encrypted aerial image (c) Decrypted aerial image

参考文献

- 1) Fujii, K., *et al.*, Optical Review, 29(3), 250-260 (2022).

左右円偏光スポットの高密度交互アレイ生成

Generation of a High-Density Left/Right-handed Circularly Polarized Spot Array

阪大院情 ○洲崎 泰輝, 小倉 裕介

Osaka Univ. ○Taiki Suzuki, Yusuke Ogura

E-mail: t-suzaki@ist.osaka-u.ac.jp

偏光情報は、材料特性の評価や、生物学的研究において有用である¹⁾。我々は、構造化偏光照明生成法として、軸対称偏光変換素子と空間光変調器で実装した計算機合成ホログラム(CGH)を組み合わせた手法の検討を進めている。これまでに、直交する直線偏光を持つ微小スポットの高密度交互配置や、それを照明光とする偏光イメージングを示している²⁾。本研究では、この構造化偏光スポットアレイ生成法を拡張し、右回り、左回りの円偏光スポットが高密度化かつ交互に配列した照明の生成を試み、確認実験を行った。軸対称偏光変換素子は直線偏光をアジマス偏光に変換するために用いる。アジマス偏光の光波をレンズで集光したドーナツ型スポットは、回転方向に従って局所的に偏光方向が変化する。また、CGHは、位相が制御されたドーナツ型スポットを所望の位置に生成する機能を有している。Fig.1に示すように、隣接するドーナツ型のスポット同士で位相を $\pi/2$ ずつシフトさせ、片側のスポットの水平偏光領域ともう一方のスポットの垂直偏光領域が重なるように配置すると、その位相関係に依存して、微小な右回りまたは左回り円偏光スポットを高密度に生成することができる。ここで高密度とは、回折限界よりも隣接するスポットが近い状態を表す。

Fig.2(a)は、16x16個のスポットアレイを作成したときのシミュレーション結果である。円偏光の指標であるストークスパラメータのS3を示している。この結果から右回り、左回りの円偏光が交互かつ高密度に生成されていることが分かる。また、実験により得られた結果をFig.2(b)に示す。実験では、スポットアレイを1/4波長板越しに偏光カメラで撮像し、45°偏光と135°偏光の画像を解析することでS3を求めた。シミュレーションと整合する結果が得られており、本手法による円偏光スポットの交互アレイ生成を確認できた。

本研究はJSPS 科研費JP20H05886の助成を受けたものである。

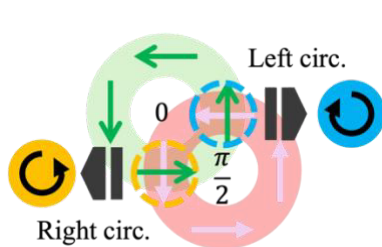


Fig. 1 Generation principle

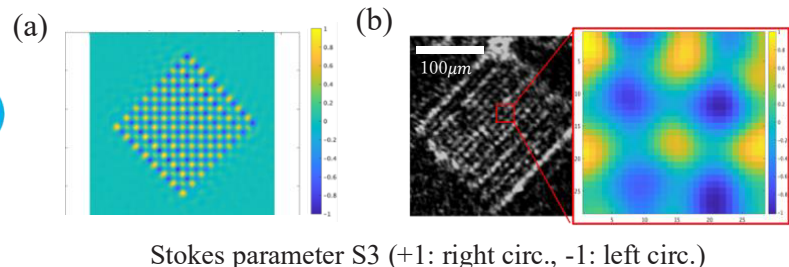


Fig. 2 Left: Numerical calculation; Right: Experimental result

参考文献

- 1) Pezzaniti, J. L., et al., *Opt. Eng.* **34** (6), 1558-1568(1995).
- 2) T. Suzuki, et al., The 10th Biomedical Imaging and Sensing Conference, BISC5-01 (2024).

3次元散乱イメージングに向けた Gaussian Splatting に基づくデジタルツインの構築 Construction of a digital twin based on Gaussian Splatting for three-dimensional imaging through scattering media

阪大院情, °山内 一輝, 下村 優, 小倉 裕介, 谷田 純

Osaka Univ. °Kazuki Yamanouchi, Suguru Shimomura, Yusuke Ogura, Jun Tanida

E-mail: k-yamanouchi@ist.osaka-u.ac.jp

散乱媒質背後にある物体の3次元イメージングは、生体深部を観察するバイオイメージングにおいて重要な技術である。データ同化技術を基盤とするデジタルツインは、実世界の対象やその振る舞いをサイバー空間上でエミュレートできる。散乱による光波の乱れをサイバー空間上のデジタルツインでエミュレートできれば、実空間では観察が難しい対象・系においてもイメージングが可能となる。本研究は、Gaussian Splatting (GS) に基づくデジタルツインの構築により、散乱媒質中にある物体を高精度に観察することを目的とする。本手法により、高解像な3次元散乱イメージングの実現をめざす。

GSはガウス分布に従う不透明度を持った楕円球(3D Gaussian)の集合により物体を3次的に表現する¹⁾。点群モデルはボクセルモデルに比べ連続的かつ柔軟な対象表現が可能である。本手法では、散乱媒質背後にある物体をデジタルツインとして構築するために、散乱プロセスを組み込んだGSを実装した。Figure 1に提案手法の概要を示す。まず散乱下にある物体を複数視点から撮影する。得られた劣化画像群を入力として、Structure from Motion (SfM)²⁾を用いて初期点群を生成する。初期点群は、中心座標に 3×3 の共分散行列・不透明度・色情報を加えた点群モデル(3D Gaussians)に変換され、これが物体の3次元モデルになる。得られた3D Gaussiansより、SfMから推定した撮影時のカメラ位置や向きに基づいて画像をレンダリングする。散乱過程を経た画像取得を実装するため、レンダリング画像に対して散乱媒質の点像分布関数を畳み込み、劣化画像を生成する³⁾。撮影した劣化画像群と出力画像群との誤差を減らすように3D Gaussiansパラメータを反復的に更新し、散乱媒質背後にある物体の3Dモデルの精度を高める。

提案手法を実証するため、既存のGSと本手法による再構成結果を比較した。複数視点から撮影した画像[Fig. 2(a)]に対し、点像分布関数の畳み込みによる劣化画像を生成し、既存のGSと本手法により処理した。各手法で再構成した画像をFig. 2(b), (c)に示す。物体像のボケを評価するために、Fig. 2中の青線に沿って、各視点での白線の幅を計測した。撮影画像と再構成画像における視点ごとの幅のRMSEは、既存GSでは2.91であったが、本手法では1.36であった。本結果より、光散乱の影響が除外された3次元対象のデジタルツインを構築できることを確認した。

本研究はJSPS科研費(JP20H05890)の助成を受けた。

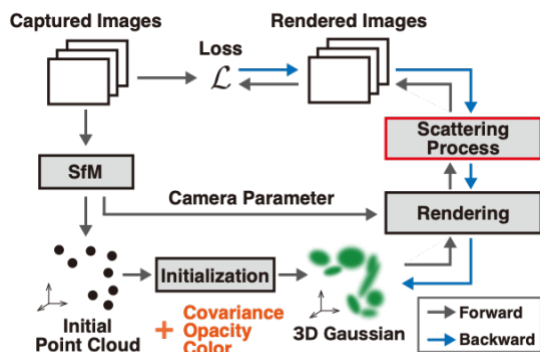


Fig. 1 A procedure of the proposed method

参考文献

- 1) B. Kerbl, et al., ACM Transactions on Graphics 4(42) (2023).
- 2) J.L. Schönberger, J.M. Frahm, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 4104-4113 (2016).
- 3) J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics" (McGraw-Hill, 1996).

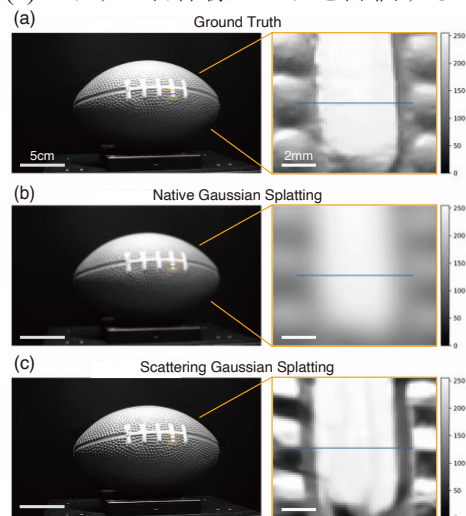


Fig. 2 Reconstruction results. (a) The captured image, and the reconstructed images by (b) GS and (c) our method.

DHIP/ Outstanding Poster Award 受賞

洲崎 泰輝

The 14th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics 2024 (DHIP2024)でのポスター発表で Outstanding Poster Award をいただくことができました。今回の学会は韓国で開催され、私にとって初めての海外でした。期待と不安を抱えながらの渡航でしたが、現地では多くの学生と交流し、異国の文化や食事を楽しむことができました。とても刺激的で、忘れられない経験になりました。ポスター発表に向けては、かなり力を入れて準備しました。直前まで要点を整理し、英語で分かりやすく伝えられるよう、何度も原稿を修正。さらに、聞き手が理解しやすいように繰り返し発表練習をしました。しかし、いざ発表が始まると緊張で頭が真っ白になり、準備していた内容の多くが飛んでしまいました。しかも、会場は狭く、周囲の発表者の声が飛び交っていて、とても騒がしい環境でした。さらに、韓国の教授から予想外の質問が飛んできて、焦る場面もありまし

た。それでも、ポスターの構成をしっかりと考え、要点を明確に伝えれば、多少説明が拙くても意外と聞き手には伝わるのが分かりました。特に、話すのが苦手な人ほど、ストーリーを組み立てて、図を多用するのが効果的だと感じました。最後になりましたが、ご指導いただいた先生方に心から感謝いたします。



修士論文発表会 プレゼンテーション賞受賞

山内一輝

令和6年度の修士論文発表会にてプレゼンテーション賞をいただくことができました。卒業研究を含めたこの2年半で、デジタルツインに基づいた計測をテーマに、量子ドットネットワークの構造推定と設計論、3次元散乱イメージングという異なった3つのアプローチで研究を進めてきました。これらのアプローチ手法とその結果をわずか15分のスライドにまとめるのは本当に骨の折れる作業で、当日ギリギリまで修正を繰り返していました。発表練習で先生方から頂いたコメントを基に、真に重要なこと・伝えたいことに内容を絞り、他の要素を削ることで、なんとか本番ではまとまった発表(?)となったので良かったです(30秒程度オーバーはしていましたが)。結果の詰まった発表で賞をいただくことができ、この2年半が報われたような気がしてとても嬉しかったです。また、学会発表や全体ミーティングを通じて、先生方から日々発表のフィードバックをいただいたことが、今回の

受賞につながったと感じています。心より感謝申し上げます。最後に、2年間に渡り様々な研究に携わる機会をくださった先生方に感謝申し上げます。



卒業生からのメッセージ

おいでよ 情報フォトニクス講座

洲崎 泰輝

本研究室では、光情報技術に関する基礎から応用まで幅広い知識を学ぶことができます。また、研究の進め方や学会発表を通じて、研究者としての姿勢やコミュニケーション能力も大きく成長できます。最初は慣れないことやわからないことが多く、不安もありましたが、先生方や先輩方が真摯にサポートしてくださり、安心して研究に取り組むことができました。実際に、研究の途中でつまづいたときも先輩方が丁寧にアドバイスをくださり、乗り越えることができた経験は印象に残っています。また、研究室旅行などのイベントが充実しており、研究以外の場でも研究室メンバーと交流できる機会が多くあります。こうしたイベントを通じて、研究室の一体感を感じることができました。新たな環境に飛び込むことは不安もありますが、挑戦することで多くのことを学び、自分自身を大きく成長させることができるはずです。ぜひ、興味のある方は一度研究室を訪れてみてください。



図 1: 研究室旅行の様子 (2024 年, 福井).

情報フォトニクス講座の思い出

山内一輝

B3 の終わり、学部の授業程度のプログラミング知識しか持っていなかった自分ですが、光と情報両方でできてお得じゃん！と思って情報フォトニクス講座に決めました。その感覚は正しく、光と情報を融合した光コンピューティングやコンピューテーショナルイメージングの研究はどれも興味深く、この研究室だからこそ、そうした分野の最先端に触れることができたと感じています。日々の研究でもこれらの分野の研究に携わることができたので、この研究室を選んで良かったと思います。

また、この 2 年間で学会や研究会に参加させていただくことができ、学外の学生との交流や各地でのプチ観光など良い思い出となりました。今年の初めには、なかなか訪れることのないフィンランドでの学会に参加させて頂き、英語での発表にはとても苦労しましたが、貴重な体験をさせて頂きました。本講座では、学生のうちから様々な学会発表に連れて行ってくださいます。学会の準備や発表は大変なことも多いですが、研究を進める上での良いモチベーションになると思います。



図 1: フィンランドの山頂からの景色 (時刻 12:52). 緯度が高く太陽が低い。

B4の1年間を振り返って

笹木 天翔

情報系の研究室を志望していた私は配属が上手くいかず、自分の中では希望順位が低かった本講座に配属になりました。最初は実験とプログラミングの知識を同時につける必要があり非常に大変でした。しかし振り返ってみると、応用物理学コースとして学んできた物理の知識を基礎としてプログラムを設計するという非常に貴重な体験をさせていただきました。

どの研究室にするか迷っている方。本講座は実験とプログラム、両方を用いて研究を進めます。習得すべきスキルが多く険しい道ではありますが、先輩方の研究テーマも多岐にわたるため各分野のスペシャリストがいます。頼りになる先輩方がたくさんいらっしゃるの、少しでも興味があれば不安な気持ちを乗り越えて、ぜひ一度見学に来ていただければと思います。



図 1: 研究室旅行で訪れた東尋坊

研究室一年目を振り返って

数藤 和也

情報フォトニクス講座に配属されてから、早くも一年が過ぎました。正直に言うと、この一年は決して楽なものではありませんでした。慣れない研究やミーティング、学会の準備、そして卒論の執筆など、常に何かに追われる日々が続いていました。ですが、その過程で得られた経験や知識は間違いなく自分を大きく成長させてくれました。

また、本講座の先輩方や先生方の手厚いサポートのおかげで、光や情報に関する知識が乏しかった自分でも、安心して研究に取り組むことができました。研究で行き詰まったときには「こうすればいいんじゃない？」とさりげなく助言をもらい、「もっと早く聞けばよかった...」と思うこともしばしばでした。研究を通じて培った思考力や問題解決能力は、今後のキャリアにおいても大きな武器になると確信しています。この一年で得た貴重な経験や成長は、本講座の恵まれた環境と丁寧な指導のおかげ

です。

挑戦を恐れず、自分の可能性を広げたいと考えている方にとって、最高の環境がここにはあります。ぜひ一度、訪れてみてください。

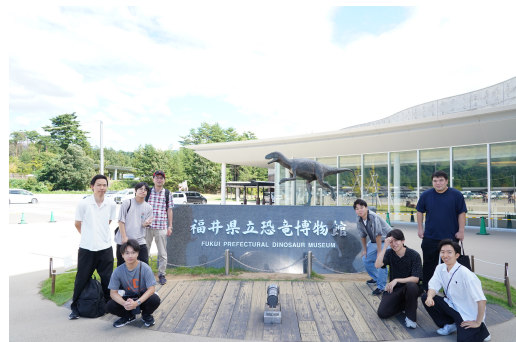


図 1: 研究室旅行での集合写真

情報フォトニクス講座での一年

野内 稜

僕がこの研究室を選んだ理由は、光と情報の両方について学ぶことができるからでした。ただ、研究室に入るまで講義についていくのもギリギリで、情報・フォトニクスについての知識が身につけている自身もなく、こんな自分が研究室に入っても大丈夫なのかな?? ととても不安にでした。しかし、先生方や先輩方の手厚いサポートや歓迎会などのイベントのおかげで、多くのことを学びながら楽しく学生生活を送ることができました。一年たった今では、研究者としてはまだまだかもしれませんが、大きく成長できた一年だったなと感じています。この研究室では幅広い研究が行えることもあり、「こんな研究もできるんだ」と配属後に知ったこともありました。なので、少しでも興味のある方はぜひ一度足を運んで、実際にどんな研究が行われているか見学しに来てください



図 1: 研究室歓迎会の写真

