（報道発表資料）

2026.11.13

NTT 株式会社

プログラマブルな光回路で通信向けデジタル信号処理を低消費電力化
～伝送途中の光信号処理で、1300 km 長距離光通信で信号歪みの要因を 60%低減～

発表のポイント：

- ◆ 光信号を伝送途中で柔軟に制御できる光回路（プログラマブル光回路）を世界で初めて実現しました。
- ◆ 本プログラマブル光回路を用いて、受信側で信号を復元するためのデジタル信号処理の負荷を低減する、新しい制御手法を構築しました。光回路を含む光ファイバ伝送路全体を、深層学習で用いられる「ニューラルネットワーク」に見立てることで、受信側の処理負荷が小さくなるように、光回路のパラメータを最適化できます。
- ◆ 提案した光回路と制御手法を、1300 km の空間・波長多重光ファイバ伝送に適用し、受信側の信号処理負荷を増大させる信号の時間的な広がりを約 60%低減できることを実験で確認しました。今後は、データセンター間や大陸間を結ぶ海底ケーブルなど、幅広い光ネットワークへの適用を視野に研究開発を進め、通信の大容量化と低消費電力化・低遅延化の両立をめざします。

NTT 株式会社（本社：東京都千代田区、代表取締役社長：島田 明、以下「NTT」）は、光通信ネットワークの信号を、光のまま柔軟に制御できる光回路（プログラマブル光回路）を開発しました。プログラマブル光回路はこれまで、光の量子操作や AI 処理への応用が研究されてきました。今回、低損失・広波長帯域・偏波無依存性・高い制御精度など、長距離光通信に必要な性能を兼ね備えた回路を世界で初めて実現しました。さらに、光ファイバおよび中継地点に接続した本回路から構成される長距離光伝送路全体を「ニューラルネットワーク」に見立て、受信側のデジタル信号処理負荷を低減する新しい最適化手法を提案しました。1300 km の空間・波長多重光伝送実験で有効性を実証し、信号処理負荷の 60%以上の削減に相当する効果を確認しました。今後は、データセンター間や海底ケーブルなどへの適用を視野に、通信の大容量化と低消費電力化・低遅延化の両立をめざします。本成果は、2026 年 9 月 25 日、英国科学誌 Nature Photonics に掲載されました。

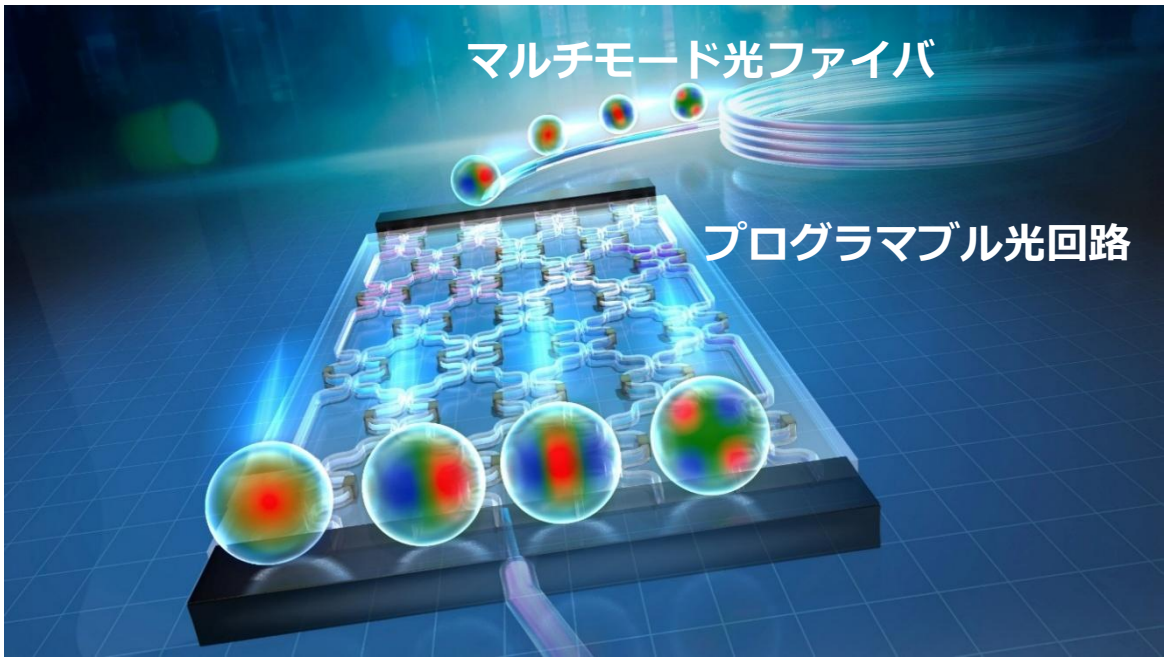


図 1：マルチモード光ファイバとプログラマブル光回路を用いた本技術のイメージ図

1. 背景

世界のデータ通信量は、高精細動画配信、クラウドサービス、生成 AI などの普及により急速に拡大しています。これを支える基幹光ネットワークでは、コヒーレント光送受信（※1）とデジタル信号処理（DSP、※2）を組み合わせた長距離光通信が発展してきました。光ファイバを伝わる信号には、信号同士の混ざり合いや伝搬速度の違いによる時間的な広がりが生じるため、受信側の DSP でこれらを補償し、元の信号を復元しています。

DSP の演算負荷は、通信の大容量化に向けた信号ボーレートの高速化や空間多重化に伴って増大します。代表的な例が、1 本の光ファイバ内の複数の空間モードを使って信号を並列に伝送する空間分割多重（SDM）伝送（※3）です。マルチモードファイバ(※4)では、空間モード間（※5）で信号が混ざり合うとともに、モードごとの伝搬速度の違いによる遅延差（モード分散、※6）が生じます（図 2(a)）。これらを補償するには、複数の受信信号をまとめて処理し、元の各信号を分離・復元する多入力多出力のデジタル信号処理（MIMO-DSP、※7）が必要です。その演算量は、モード数の 2 乗と補償すべき遅延差の大きさの積に比例します。既に実用化されている偏波多重伝送でも、光の偏波によって伝搬速度が異なるため、信号の到達時刻にずれが生じます。伝送条件によって異なりますが、補償すべき遅延差は、偏波多重伝送では例えば 1 ナノ秒以下であるのに対し、次世代の長距離 SDM 伝送では数十～数百ナノ秒に達する場合があります。遅延差が大きいほど、受信側ではより長い時間範囲の信号をまとめて処理する必要があります。さらに、SDM では同時に処理する信号数も増えるため、受信側の演算負荷が大幅に増大し、消費電力や処理遅延が課題となります。

従来、光伝送路は「与えられた特性を前提に、受信側で補償する対象」として扱われ、伝送途中で上述のような信号の歪みを抑える手段は限られていました。そこで本研究では、図 2(b)に示すような光の伝搬・干渉現象と、深層ニューラルネットワーク（DNN）における重み付き結合との数学的な対応関係（※8）に着目しました。さらに、量子操作や光による AI 計算への応用が研究されてきたプログラマブル光回路（※9）を伝送路内に導入し、光干渉計の位相設定を DNN の重みパラメータの

ように調整する手法を提案しました。これにより、光回路を含む伝送路全体を学習・制御の対象とし、受信側の DSP 負荷を低減するように最適化する枠組みを構築し、1300 km 級の長距離伝送実験でその有効性を実証しました。

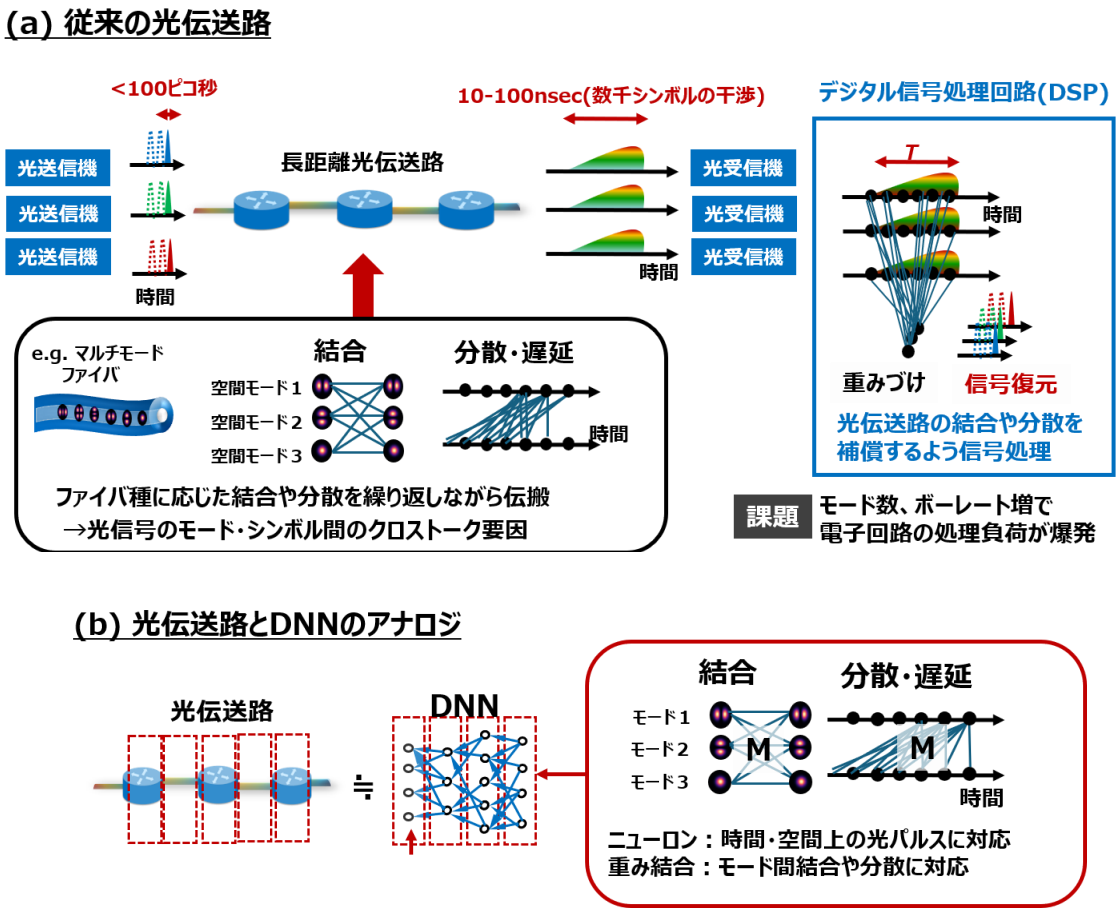
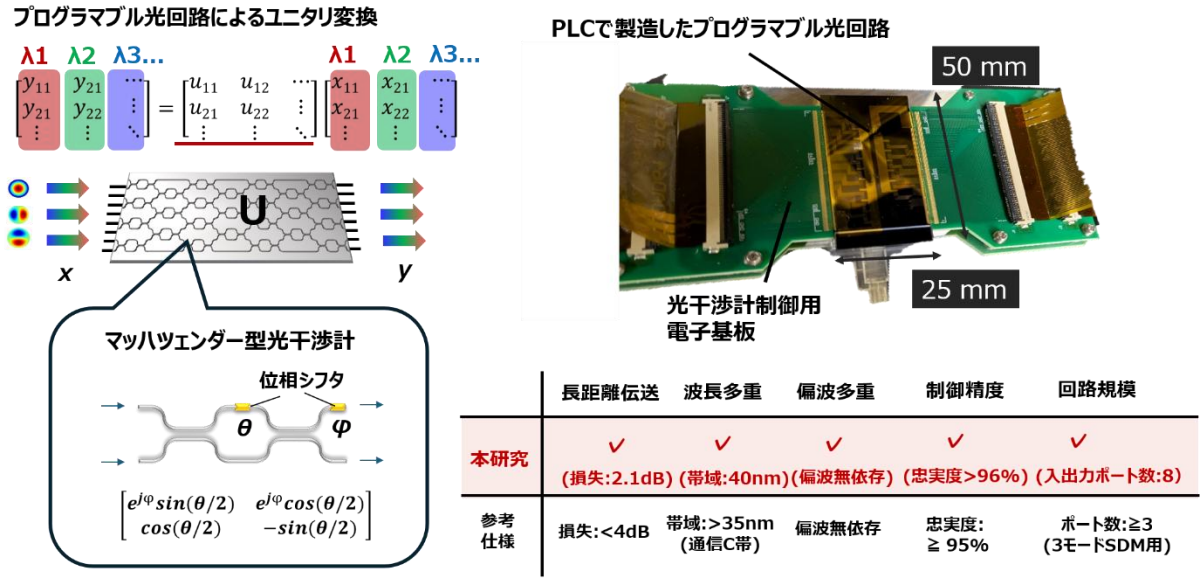


図 2 (a)従来の長距離光伝送の課題と提案手法の概要:ファイバ中で蓄積するモード間結合・分散を受信側の DSP のみで補償しており、モード数・ボーレートの増加に伴い処理負荷が爆発的に増大する。(b) 光伝送路と DNN のアナロジー

2. 技術のポイント

① 長距離通信向けプログラマブル光回路

図3左に、プログラマブル光回路と信号処理の概要を示します。本回路は、2 つの光波を干渉させるマッハツェンダー型光干渉計をアレー状に配置した構成です。空間・波長多重された光信号を入力すると、各波長の信号に対して、空間ポート間の混ざり方を制御する「ユニタリ変換」(※10)と呼ばれる行列演算を実行できます。変換を決めるパラメータは、各干渉計に設けたヒータ電極で光の位相を調整することで設定します。各部の位相設定を組み合わせることで、任意のユニタリ変換を実現できます。このプログラマブル光回路によるユニタリ変換は、複数の波長や偏波に多重化された信号に対して並列的に単一の光回路で実行できるため、電子回路では実現困難な高速・並列的な光領域での信号処理を実現することができます。



	長距離伝送	波長多重	偏波多重	制御精度	回路規模
本研究	✓ (損失:2.1dB)	✓ (帯域:40nm)	✓ (偏波無依存)	✓ (忠実度>96%)	✓ (入出力ポート数:8)
参考仕様	損失:<4dB	帯域:>35nm (通信C帯)	偏波無依存	忠実度: ≧ 95%	ポート数:≧3 (3モードSDM用)

図3　試作したプログラマブル光回路（左）と従来研究との性能比較（右）：長距離光通信用の要求仕様（損失、帯域、偏波無依存性、忠実度、回路規模）をすべて満たすプログラマブル光回路を初めて実現

この光回路を長距離光伝送路に組み込むには、光通信に必要な複数の性能を同時に満たす必要があります。具体的には、空間多重信号を扱うための十分な入出力ポート数、波長多重信号を扱うための広帯域性、偏波多重信号に対応する偏波無依存性に加え、信号を弱めず正確に制御するための低損失性と高い制御精度（忠実度）が求められます。従来の光プロセッサ研究では、これらを兼ね備えた回路は実現されていませんでした。

本研究では、長年の光通信デバイス開発で培った石英導波路（PLC、※11）技術を用いて、これらの要求を満たすプログラマブル光回路を試作しました。チップサイズは 25 mm × 50 mm で、光干渉計を制御する電子基板と一体化しています。試作した回路は、ファイバ間の挿入損失 2.1 dB、通信 C 帯全域（帯域 40 nm）での動作、偏波無依存性、忠実度 96%超、入出力ポート数 8 を同時に達成しました（図3右）。

② 光伝送路を深層ニューラルネットワークとみなす最適化手法

光ファイバ内で光信号が混ざり合い、時間的に広がりながら伝わる様子は、深層ニューラルネットワーク（DNN）でニューロン同士が重み付きの結合を介して信号を受け渡す仕組みと数学的に対応づけられます。本研究では、この対応関係を利用し、複数の中継地点を経由する長距離光伝送路全体を、多層の DNN として扱う新しい最適化手法を構築しました。

具体的には、各中継地点にプログラマブル光回路を配置し、その位相設定を DNN の学習で調整する重みパラメータに見立てます（図 4）。光ファイバ自体の特性は変えられませんが、各地点の光回路を協調して調整することで、伝送路全体の特性を最適化できます。

光回路の設定は、計算機上に構築した伝送路の数式モデルを用いて求めます。受信時の信号の時間的な広がりが小さいほど、補償に必要なデジタル信号処理（DSP）の負荷を抑えられるため、この広がりを最適化の指標としました。DNN の学習に用いられる誤差逆伝搬法（※12）によって各光回路の位相設定を求め、実際の回路に反映することで、受信側の処理負荷低減につなげます。

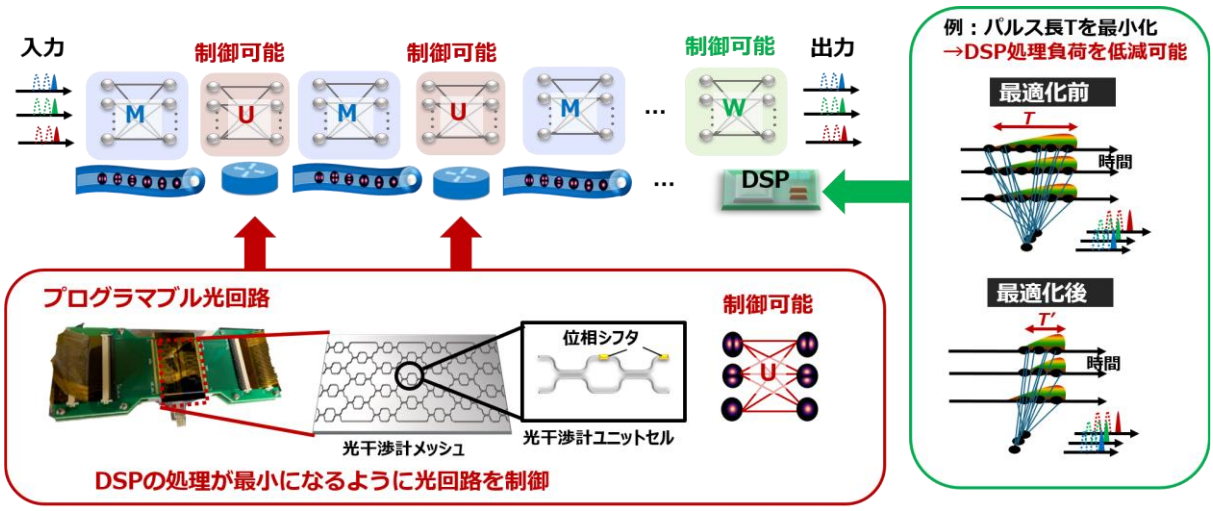


図4　中継ノードにプログラマブル光回路導入した提案光伝送の構成

3. 実証概要

本手法の有効性を示すため、DSP 負荷が特に課題となる空間多重伝送を対象に、試作した光回路と最適化アルゴリズムを用いた長距離伝送実験を行いました。3 つの空間モードを伝搬する長さ 51.2 km の光ファイバに信号を繰り返し通す周回伝送試験系を構築し、伝送距離を 51.2 km（1 周）から最大 1331.2 km（26 周）まで変化させました。信号には 12 GBd（※13）の偏波多重 QPSK 信号（※14）を用いました（図 5）。

計算機上の伝送路モデルによる予測と実験結果は定量的によく一致し、モデルの妥当性を確認しました。さらに、モデル上で誤差逆伝搬法により求めた設定を実際の光回路に反映したところ、約 1300 km 伝送後の信号の時間的な広がりを、光回路を制御しない場合の約 27 ナノ秒から約 10 ナノ秒に抑えることに成功しました（図 6）。この結果は、受信側で補償すべき時間範囲を約 60%短縮し、信号処理の負荷低減につながることを示しています。

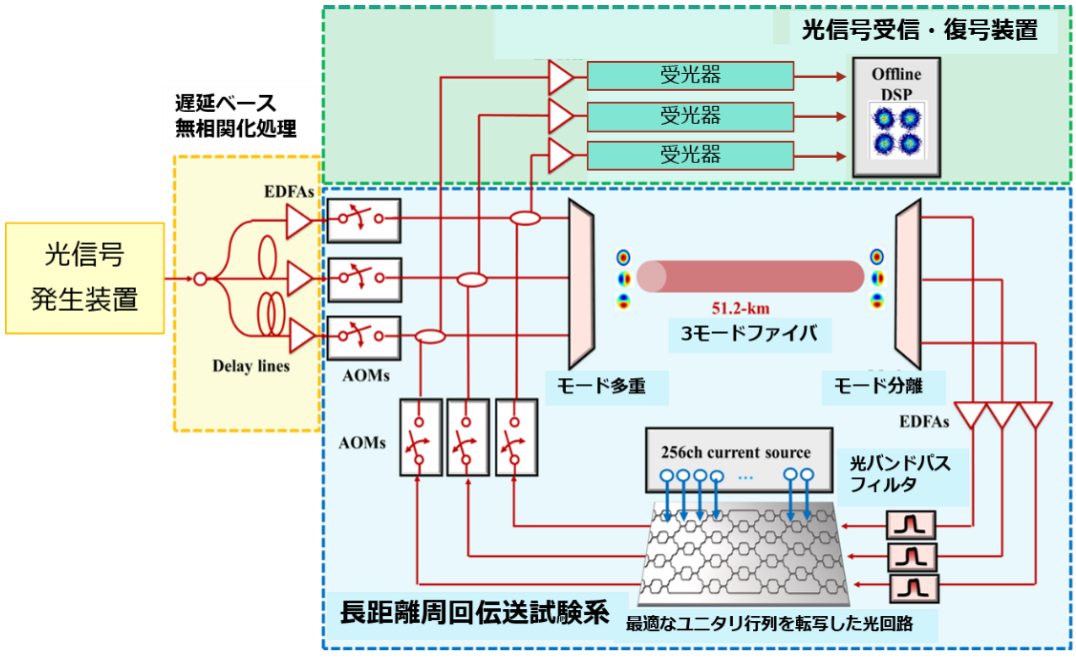


図 5　長距離 3 モード空間多重伝送系の概要

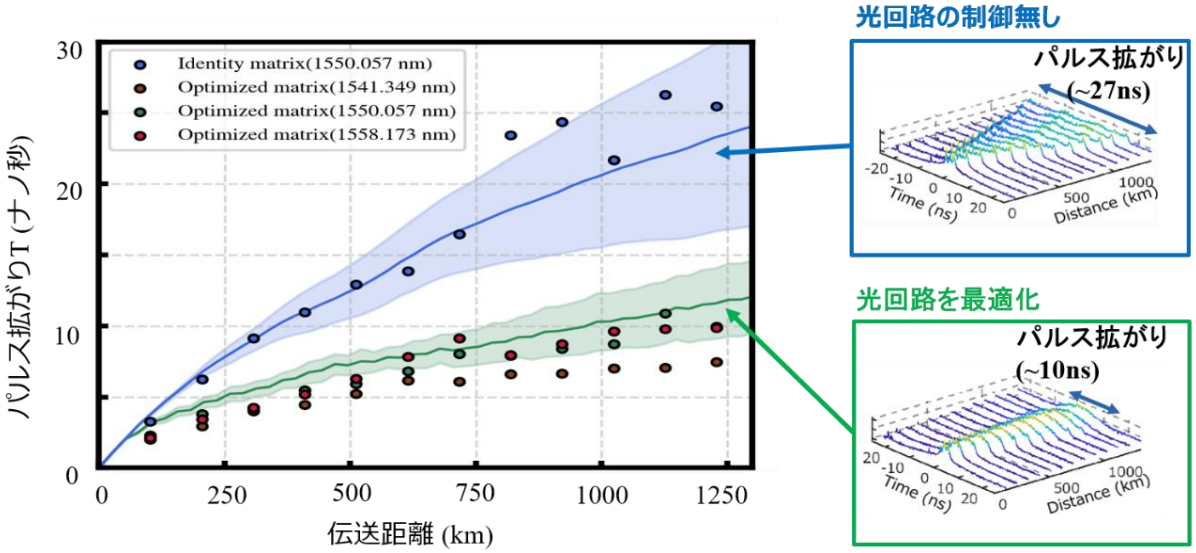


図 6　50–1300 km 伝送実験における光回路最適化の効果（光回路無制御時：約 27 ナノ秒、最適化後：約 10 ナノ秒）。電子処理の演算数やメモリ数も光パルス幅と同様のスケールで削減することが可能であるため、デジタル信号処理負荷も約 60%の低減が見込まれる。

パルスの時間的な広がりは受信側の DSP 処理量に直結するため、この結果は信号処理負荷の60%以上の低減に相当します。また、複数の波長で同様の低減効果が得られており、試作した光回路の広帯域・高忠実度動作を裏付ける結果となっています。

4. 今後の展開

本研究の実証は 3 空間モードの光ファイバ伝送を対象としたものですが、提案した最適化手法と光回路の設計は、より多くのモード数を持つファイバにも適用可能であることをシミュレーションで確認しています。また、今回実証した空間多重伝送への適用は、本枠組みの応用の一例であり、光伝送路を学習・制御可能なシステムとして扱うという考え方は、モード分散の補償にとどまらず、光ファイバ通信において、さまざまな伝送特性の最適化や、光ノードのスイッチング機能との統合、伝送路の状態変化に追従するリアルタイム制御などへ広く展開できる可能性があります。

今後は、データセンター間（DCI）から、通信局舎間、大陸横断の海底ケーブルに至る幅広い光ネットワークを視野に研究開発を進め、通信の大容量化と低消費電力化・低遅延化を両立する将来の光ネットワーク基盤の実現をめざします。

5. 掲載誌情報

掲載誌：Nature Photonics

論文タイトル：Programmable Photonic Unitary Processor Enables Parametrized Differentiable Long-Haul Spatial Division Multiplexed Transmission

著者：Mitsumasa Nakajima, Kohki Shibahara, Kohei Ikeda, Akira Kawai, Masaya Notomi, Yutaka Miyamoto, Toshikazu Hashimoto

DOI：https://doi.org/10.1038/s41566-026-01997-x

URL：https://www.nature.com/articles/s41566-026-01997-x

研究助成：
本研究の一部は、JST CREST（JPMJCR24R4）及び NICT（エヌアイシーティー）委託研究（JP012368C01001）の支援を受けて行われました。

【用語解説】

（※1）コヒーレント光送受信：光の振幅や位相に情報を載せ、受信側で基準となる光と干渉させることで情報を読み取る技術。偏波多重と組み合わせることで、大容量のデータを送受信できる。

（※2）デジタル信号処理（DSP）：信号を数値データとして扱い、演算によって加工・補正する技術。DSP は Digital Signal Processing の略。本研究では、光信号を受信して電気信号に変換した後、信号の歪みや混ざり合い、到達時刻のずれを補償し、元の信号を復元する処理を指す。

（※3）空間分割多重（SDM）伝送：1 本の光ファイバ内に複数の空間的な伝送経路（コアやモード）を設け、それぞれに信号を載せて並列に伝送することで、伝送容量を拡大する技術。SDM は Space Division Multiplexing の略。

（※4）マルチモードファイバ：複数の空間モードを伝搬できる光ファイバ。本研究では、3 つの空間モードを伝搬する 3 モードファイバを使用した。このように少数のモードを伝搬するものは、少数モードファイバとも呼ばれる。

（※5）空間モード：光ファイバなどを伝わる光が、その断面内に形成する電磁界の分布パターン。異なる空間モードにそれぞれ情報を載せることで、同じ光ファイバ内で複数の信号を並列に伝送できる。

（※6）モード群遅延分散（DMD）：光ファイバ内の空間モードごとに光信号の伝わる速さが異なることで生じる、信号の到達時刻のずれ。信号が時間的に広がり、重なり合う原因となる。DMD は Differential Mode Delay の略。

（※7）MIMO-DSP：MIMO は Multiple-Input Multiple-Output（多入力多出力）の略。複数の受信信号をまとめて処理し、伝送中に混ざり合った信号を分離するとともに、到達時刻のずれを補償して、元の各信号を復元するデジタル信号処理。

（※8）深層ニューラルネットワーク（DNN）との対応：DNN は Deep Neural Network の略で、ニューロンに相当する計算要素を多層に接続したモデル。本研究では、時間・空間上の光信号をニューロンに、光ファイバ中のモード間結合や分散をニューロン間の重み付き結合に対応づける。さらに、光回路の設定を学習可能なパラメータとして加え、伝送路全体を最適化する。

（※9）プログラマブル光回路：外部から設定を変更することで、光信号に対する処理を切り替えられる光回路。本研究では、複数の光干渉計を並べたアレー構造を用い、各部の位相を調整することで、入出力ポート間の光信号の混ざり方を制御する。

（※10）ユニタリ変換：任意の 2 つのベクトルに同じ変換を施したとき、それらの内積が変換前後で変わらない変換。理想的な光回路では、光の総パワーを保存しながら、複数の光信号の混ざり方や位相関係を変えられる。実際の光回路では、これとは別に挿入損失が生じる。

（※11）石英導波路（PLC）：石英系ガラスで光の通り道となる導波路を基板上に形成する技術。PLC は Planar Lightwave Circuit（平面光波回路）の略で、本研究では石英系の PLC を用いている。低損失・高安定性に優れ、通信用デバイスとして広く実用化されている。

（※12）誤差逆伝搬法（バックプロパゲーション）：ニューラルネットワークの学習に用いられる、各パラメータの変更が出力側の評価指標に与える影響を、出力側から入力側へさかのぼって効率的に計算する手法。この計算結果に基づいてパラメータを更新する。本研究では、伝送路の数式モデルに適用し、信号の時間的な広がりを抑える光回路の設定を求める。

（※13）GBd（ギガ・ボー）：1 秒間に送るシンボルの数を表す単位。シンボルとは、情報を載せる信号の基本単位で、変調方式によって 1 シンボルで複数のビットを表せる。1 GBd は毎秒 10 億シンボルに相当する。

（※14）偏波多重 QPSK 信号：互いに直交する 2 つの偏波に、それぞれ独立した QPSK 信号を載せた光信号。QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）は、光の 4 つの位相に異なる情報を割り当て、1 シンボルで 2 ビットを伝送する方式。偏波多重により、両偏波を合わせて 1 シンボル時間あたり 4 ビットを伝送できる。

■本件に関する報道機関からのお問い合わせ先
NTT 株式会社
先端技術総合研究所
広報担当
問い合わせフォームへ