

# 博士學位論文要旨等の公表

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条に基づき、当該博士の学位の授与に係る論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

氏名 平井 理宇

学位の種類 博士（理工学）

報告番号 甲第30号

学位授与の要件 学位規程第4条第2項該当

学位授与年月日 令和7年3月22日

## 学位論文題目

光ファイバ通信における

ニューラルネットワークを用いた非線形補償の研究

論文審査委員 主査 教授 吉本 直人

委員 教授 佐々木 慎也

委員 教授 山林 由明

## 学 位 論 文 要 旨

理工学研究科 理工学専攻

学籍番号：D2210050

氏 名：平井 理宇

### 光ファイバ通信における ニューラルネットワークを用いた非線形補償の研究

本研究は、強度変調直接検波 (IM/DD) システムにおける非線形波形歪みを補償する技術を提案し、その実用性と次世代データセンタインターコネクタ (DCI) への適用可能性を示すことを目的としている。IM/DD 方式は、省電力かつ簡素な構造を持つため 80 km 以下の短中距離の光通信インフラにおいて有望視されているが、自己位相変調 (SPM) や相互位相変調 (XPM) といった非線形光学効果が伝送性能を制約している。本研究では人工ニューラルネットワーク (ANN) を活用し、これらの非線形光学効果を効率的に補償する手法を提案した。

本論文は以下の構成で進められる。第1章では、研究の背景として光通信インフラにおける課題を整理し、IM/DD 方式の非線形補償技術の必要性を示した。第2章では、人工ニューラルネットワークの基礎理論と光通信への応用可能性を概説し、既存の非線形補償技術との比較を行った。第3章では、多層パーセプトロン (MLP) 型非線形補償器を導入し、その構成、学習方法、補償性能を検討した。特に、SPM および XPM が支配的な環境での効果をそれぞれ分析し、非線形補償器への ANN 適用の有効性を示した。第4章では、リカレントニューラルネットワーク (RNN) である Bi-LSTM を用いた線形特性前置分離型非線形補償方式を提案し、伝送性能の向上を実験的に示した。第5章では、第3章と第4章で提案した MLP と Bi-LSTM を含む各補償方式の性能比較を行い、さらに半導体プロセスの進化に基づいた実用可能性について議論した。第6章では、研究成果を総括するとともに、次世代光トランシーバの実現に向けた課題と展望を述べた。

第3章では、MLP 型非線形補償器がシンプルな構造と高い補償性能を持つことを示した。35.84 Gbaud PAM8 信号の 80 km 伝送実験では、SPM が支配的な環境において、

MLP 型非線形補償器が目標 Q 値を超える補償効果を示し、線形補償器 (FFE) を組み合わせることで、計算負荷を大幅に削減可能であることを明らかにした。22.4 Gbaud PAM8 信号の同一偏波波長多重伝送実験を実施し XPM の影響を含む環境においても、MLP 型補償器は従来のボルテラフィルタ方式に比べ、87%少ない演算量で同等の補償ゲイン(1.4 dB)を達成可能であることを示した。

第 4 章では、過去と未来の双方の情報を同時に処理する Bi-LSTM を活用した補償技術を提案し、22.4 Gbaud PAM4 信号の単一波長 80 km 伝送実験で、その双方向の時間依存性を学習する能力により高い補償性能を示した。また、1 ステップ前の隠れ状態を保持・流用することで中央時刻のみの演算で双方向処理を近似的に行う Co-LSTM を初めて IM/DD 方式に導入し、その簡略化モードでは Bi-LSTM と比較して約 93.3%の演算量削減を達成しつつ、補償性能を維持することを実証した。また正規化手法を導入した Bi-LSTM は、-1 dBm ~ +8 dBm の広い入力光ダイナミックレンジにおいて安定した補償性能を示した。この結果、低消費電力と高効率求められる IM/DD システムにおいて、RNN ベースの非線形補償技術が有効であることが示された。

第 5 章では、第 4 章と同じ 22.4 Gbaud PAM4 信号の単一波長 80 km 伝送の実験構成で MLP, LSTM, Bi-LSTM, Co-LSTM の非線形補償効果と演算規模を比較検討した。その結果、Bi-LSTM が最も高い補償効果を示す一方で、計算負荷が高いことが課題であることが示された。一方、Co-LSTM (簡略化モード) は補償性能と計算効率のバランスに優れており、次世代光通信システムにおける実用化の可能性が高いことが示唆された。プロセスノードの進化に基づく提案技術の消費電力の推定を行い、現世代の 5 nm プロセス技術では、整数演算の場合、約 0.8~1.3 W に抑えられることが分かった、さらに次世代の 2 nm や 1.4 nm ノードでは約 0.2~0.6 W まで低減が期待される。これにより、Co-LSTM は高い補償性能を維持しながら、電力要求の厳しい短中距離向け光トランシーバへの適用が可能であることを確認した。

これらの成果を通じて、本研究は ANN ベースの非線形補償技術が IM/DD 方式の短中距離光通信インフラにおいて省電力かつ高効率な技術であることを示した。また、次世代の光通信システムにおける設計指針を提供し、さらなる高性能化と効率化に向けた基盤を確立した。本研究の成果は、短中距離向け光通信分野における人工ニューラルネットワーク技術の実用化に向けた重要な一歩となるものである。

# 論文審査の結果の要旨

## 【学位論文について】

本論文の取り扱う分野は、光ファイバ通信の中でも特に近年需要が増大しているデータセンタ間など短中距離光通信ネットワークを対象としたものである。データセンタに関する通信トラフィック量を年率30%の伸びを示しており、「大容量化」は喫緊の課題である。また、近年の地球温暖化防止の観点から、データセンタ内の通信機器の「省電力化」の要求も厳しい。さらに、データセンタ業界の激しい競争の中で通信機器に対する「低コスト化」も求められている。本論文が対象としたIM/DD方式は簡素な送受信構成により経済性と省電力を両立する一方、伝送速度の高速化に伴い非線形光学効果の影響を受けやすく、伝送性能に制限を与えるという課題があった。そこで、本論文では、IM/DD方式の非線形波形歪みの補償技術の研究を目的として、従来の手法では補償が困難であった非線形歪みを、人工ニューラルネットワーク（ANN）を活用して新たに解決する方法を提案した。本論文の成果は以下のとおりである。

第一に、従来の非線形補償技術（ボルテラ型等化器やデジタルバックプロパゲーション（DBP））と比較し、ANN型非線形補償の有効性を示した。第二に、多層パーセプトロン（MLP）型非線形補償器を導入し自己位相変調（SPM）が主たる伝送制約となる直交偏波環境において、MLP型非線形補償器は高い補償性能を示し、特にフィードフォワード型線形補償器（FFE）を前段に配置することで、MLPの計算負荷を大幅に軽減できることを明らかにした。これにより、MLP型非線形補償が短中距離光通信インフラにおける省電力・高効率な補償技術として有望であることを確認した。第三に、線形特性前置分離型Bi-LSTM非線形補償方式を提案し、Q値改善と演算効率の両面で優れた性能を示した。特に、光強度分布に基づく正規化手法の導入により、広い入力光ダイナミックレンジで安定した補償性能が得られることを確認し、同手法の高い汎用性を示した。第四に、未来方向の時系列データと過去方向の時系列データを独立に処理するCo-LSTMをIM/DD方式に初めて導入し、補償性能は0.15 dB劣るが、Bi-LSTMと比較して約93.3%の演算量削減を達成できる非線形補償効果を示し、IM/DD方式向けの非線形補償技術としてCo-LSTMの有用性を明らかにした。また、Co-LSTMが補償性能と計算効率のバランスに優れていることを示し、400G、800G級の次世代トランシーバへ適用可能であることを示した。以上の成果により、Co-LSTMは、次世代データセンタ間ネットワークにおいて、省電力で高効率な非線形補償技術として有力であることを示したことはいずれも学術的、実用的に価値あるものである。

## 【プレゼンテーションおよび質疑応答について】

上記学位論文の内容をもとに、40分間のプレゼンテーションを行った後、質疑応答を行った。プレゼンテーションは、上記3つのアイデアを中心に簡潔に要点がまとめられていた。質疑応答では以下のような内容の議論を行った。

- ・ 非線形補償に関する要求条件と目標
- ・ 本提案領域における機械学習の有効性

- ・各提案方式のそれぞれの有用な領域の棲み分けについて
- ・次世代トランシーバに本提案方式を適用するときの課題について
- ・マルチコアファイバ（空間多重）方式などと比較した本提案方式の有用性について

いずれの項目に対しても、しっかりとした技術的見識から一般的な回答に加え、自らの意見を述べていた。

以上、申請者は、技術的な見識や関連技術に対する視野の広さ、また社会課題に対する技術の位置付けの理解などいずれにおいても高いレベルに達しており、理工学の学位取得に相応しい人物であると考えます。

論文の査読とその内容についてのプレゼンテーションならびにその技術的内容に関する質疑応答を行った後、「理工学」学位に資する幅広い見識を見るため、主査・副査の委員にて口頭試問を行った。「その結果、合格」の結論を得た。以下に、その理由について示す。

口頭試問において、質疑応答にあった内容を以下に示す。

- ・本提案方式が、将来光通信方式に与える学術的なインパクトについて
- ・本提案方式が、今後の光通信機器や光トランシーバに実装されていく時の課題
- ・本提案方式の今後の適用領域の拡大に関する見解について
- ・LSTM方式のリアルタイム処理化を実現する上でのGPUの有用性について
- ・本提案方式を実現する上で、次世代半導体開発への要求について
- ・この研究が、申請者の今後の仕事に繋がったことについて

いずれの項目に対しても、しっかりとした技術的見識と社会人での就業経験による検知から、いずれも的確に回答するとともに、関連技術と業界についての今後の動向について自らの考えを述べていた。

以上、申請者は自らの技術的成果のみならず、その技術の社会から要求されている条件、その技術の適用範囲・技術的限界、オルタナティブな技術への洞察・理解、技術の導入が社会に与える効果などを論理的かつ平易に説明できる能力を有しており、その人間性も併せて理工学の学位取得に相応しい人物であると考えます。