



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	データセンタエクスチェンジを実現する光パス自動設計・制御技術 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	西沢, 秀樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16514号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95188
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hideki_Nishizawa_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 西沢 秀樹

審査担当者 主 査 客員教授 吉田 智暁

副 査 教 授 大鐘 武雄

副 査 教 授 齊藤 晋聖

副 査 教 授 土橋 宜典

学位論文題名

データセンタエクステンジを実現する光パス自動設計・制御技術

(Automatic optical wavelength path provisioning and control technology for data center exchange services)

デジタルコヒーレント技術により性能向上・普及が急激に進んだ光伝送技術、ハードウェア・ソフトウェア分離によりデータセンタ (DC) インフラを著しく効率化・高信頼化した仮想化技術の二つのイノベーションにより、ビデオ会議や SNS などのクラウドサービスはグローバルに普及し、拡大を続けている。近年では、現実世界の物体や環境から収集したデータを使い、仮想空間上に全く同じ環境を再現する「デジタルツイン」と呼ばれる技術の普及も進み、ユーザーに近いエッジ DC(同じ都市内など) を効率よく活用した大容量低遅延なネットワークに対する要望は今後拡大していくと予想されている。また、クラウドサービスやデジタルツインのための大量のデータを処理するデータセンタは、地域の電力供給限界・立地不足やセキュリティ等の課題に直面し、分散配置・広域化が進んでおり、DC 間を接続するネットワークの需要が急増している。今後 AI 技術の普及によって莫大なコンピューティングリソースの消費が予測されている中、スケーラブルでサステイナブルな将来のインフラ構築は喫緊の課題である。

本研究では上記の将来インフラの課題を受け、キャリア・DC・クラウド事業者等の様々な業種が、オープンイノベーションを加速して柔軟・高効率なインフラ上で新しいサービスやオペレーションを開発・発展できるよう、光伝送技術と仮想化技術を組み合わせた新しいインフラアーキテクチャを実現することを目的とする。具体的には、メトロエリアに分散した多数のデータセンタを拡張性・信頼性・低遅延性を確保しつつ、ユーザーアクセス回線と多種多様な端末の接続を可能とすることで、仮想的な大規模データセンタを実現するデータセンタエクステンジ (DCX) のアーキテクチャ・手法を提案し、フィールドトライアルを通じてその有効性を実証した。DCX は面的に展開した多対多のデータセンタ拠点間において、光波長パスを用いて多種多様なユーザーのトランシーバー (TRx) 間を需要に応じてオンデマンドに接続する。

本論文では、はじめに DCX のユースケースを示し、DCX を構成する光送受信装置・コントローラー・伝送路システムごとに目標実現に向けた課題を分析し、実用性の観点からそれぞれの到達目標を設定した。

光送受信装置については、ユーザー DC に設置された多種多様な光送受信装置・TRx を Cloud-native に制御可能とすることが求められる。これに対し、(1) 一つのアーキテクチャで多種のフォームファクタを効率よく収容し、(2) ハードウェアとソフトウェアが分離され、様々な NOS や新しい

アプリケーションに柔軟に対応でき、(3)DCX オペレーターによるハードウェアコンポーネントのモニタ・制御が容易で、自動制御やデジタルツイン等の新しい技術を適用しやすいアーキテクチャを提案して実装した。また同アーキテクチャを活用して、(4)DCX オペレーターによる遠隔からのユーザー機器の監視・制御が可能で、ユーザー機器に DCX オペレーターのエージェントを送信して起動し、監視・制御のシーケンスを到達目標 10 分に対して 2 分以内に完了できることをフィールドで実証した。

コントローラーについては、多種多様かつユーザーアクセス経由で任意拠点に設置された TRx を遠隔から制御・監視・最適化することが求められる。これに対し、(1) ユーザーと DCX オペレーターが協調して光 WDM パス設計を実現できる仕組みを備え、(2) 多対多の拠点間において短時間で効率よく End-to-end (EtE) 光パスを設計可能とし、(3) 様々なユーザー間での接続を可能にするために複数ベンダ・複数伝送モードでの相互接続を可能とし、(4) ファイバー伝搬や光アンプ・光送受信装置のノイズによる光信号品質の劣化を遠隔から短時間で算出し、装置に設定する技術を提案して実証した。先に示した光送受信装置を活用して米国 COSMOS テストベッドに配備されたフィールドファイバーで検証したところ、到達目標 10 分に対して 6 分以内でプロビジョニングを完了することができた。必要とされるマージンは全体で 0.7dB であり、WDM プロビジョニングに起因する変動値がシステムの変動値と同じ桁に収まることを確認し、到達目標を達成した。

伝送路システムについては、実用的・効率的に遠隔から自動運用するためのアーキテクチャ・モデル・モニタ技術が求められる。これに対し、(1) ブラックボックス的なアプローチでなく、物理モデルに基づく必要な全てのリンクパラメータの推定ができ、機器タイプやベンダの変更に対しても汎用性があること、(2) どのタイムゾーンからもローカルサイトで作業するのと差異なく同じ解析手法を適用して遠隔操作ができること、(3) 自動化・最適化に必要なハードウェアの適用を最小限(伝送路当たり 1 式程度)に抑えること、(4) 工事担当者の現地派遣なしにユーザーが許容するメンテナンスウィンドウ以内に最適化を完了できること、(5) マージン設計や故障個所の特定などの判断を伴う作業は、人間が判断できるようにシステムの状況を可視化でき、必要に応じて工事の切り戻しが可能な Semi-Automatic な運用を可能とする技術を提案して実証した。提案技術を米国 Duke 大のテストベッドに配備されたフィールドファイバーに適用して伝送路システム最適化を実施し、パラメータの取得・システム状況の可視化・機器設定の最適化・システム設定/プロビジョニングなどの作業を 1 時間以内に完了し、到達目標を達成した。またこの最適化作業は、異なるタイムゾーンからシステムにリモートアクセスできるエンジニアの監督の下で実施し、遠隔から制御可能であること、設計アルゴリズムや機器制御にオープンソースソフトウェアを活用することで、世界中どこからでも実施可能であることを確認した。抽出されたリンクパラメータから計算された Q ファクター推定値と、400Gbit/s トランシーバーの測定結果を比較したところ、Quality of Transport (QoT) 予測誤差 (± 0.3 dB) が既存の設計誤差 (± 0.6 dB) よりも減少することを確認し、到達目標を達成した。

以上を要するに、本論文では、光送受信装置については Cloud-native な光送受信装置アーキテクチャ技術を、コントローラーについては伝送路の QoT に応じた自動光波長パス設計技術を、伝送路システムについては光ファイバモニタ・物理レイヤモデルを用いた伝送路システム最適化技術を提案してその効果をフィールド実証し、これらの技術を用いて、当初目的に示した光伝送技術と仮想化技術を組み合わせた新しいインフラアーキテクチャを実現可能であることを明らかにしている。

よって、本論文の著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格を有するものと認める。