

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 要約

(1) 和文要約

<光電ハイブリッドスイッチ制御技術>

光電ハイブリッドスイッチシステムでは電気経路と光経路の2つを用いて IP パケットの伝送をおこなう。高速で伝送経路の切り替えを実現するには、光スイッチを用いた伝送経路切り替えによって発生する光信号断時においても Ethernet Switch のリンクアップを常に維持することが重要である。また、高速経路切り替えを行うには、光コアスイッチ、光波長送受信器およびバースト多値プロセッサに加えて、サーバ等のネットワーク機器を含めた多くの装置を連携させて制御する必要がある。本研究開発項目では、OpenFlow 機能と EtherCAT を用いた連携制御実現方法とその制御シーケンスに関する技術を開発し、さらに経路切り替え時にパケットロスを生じさせない IP パケットの TOS (Type of Service) 値の変更タイミングを明確化した。

<光電ハイブリッドスイッチ制御アルゴリズム>

光電ハイブリッドスイッチシステムプロジェクトにおいて、本研究開発項目ではディスアグリゲーション型次世代データセンタ向けアーキテクチャに有効なトラフィック振り分けを実現するためにトラフィック振り分けアルゴリズム及びネットワークコントローラの高速度制御技術の開発を進めてきた。

主な成果は以下の通りである。(1) ネットワークコントローラに組み込む振り分けアルゴリズムとして、サービス駆動方式とデータ駆動方式の2つのアプローチから検討を行い、光電ハイブリッドスイッチシステムと親和性があり、分散深層学習に効果がある振り分けアルゴリズムを提案した。(2) 1000 ラック規模まで拡張可能、かつ 100 マイクロ秒 (μs) で光スイッチ制御が可能な高速コントロールプレーン技術を提案した。(3) 多様な光部品の機能・状態・構成をコントローラから統一的に操作可能な表記法を開発した。これらの機能を、ネットワークコントローラプラットフォームのオープンソースモジュールとしてその機能を実装し、光電ハイブリッドスイッチシステムとしての動作を実証した。

<光スイッチネットワークアーキテクチャの最適化の研究開発>

次世代コンピューティングでは各種の AI 関連サービス、クラウド関連サービスを含む広範囲のアプリケーションが想定される。本研究開発項目ではディスアグリゲーション型次世代データセンタへの光スイッチの導入にあたり、様々なアプリケーション、並びに様々な規模のコンピューティング環境に最適化可能な効率的な光スイッチネットワークアーキテクチャを開発した。光スイッチを導入することにより期待される低消費電力・高性能・経済性の最大化、開発光スイッチの導入の促進、並びに広範囲な導入を達成するためには、各種のアプリケーションに応じたアーキテクチャの最適化が必要となる。また大規模スイッチの経済的な導入を図るためには、拡張性 (pay-as-you-grow) が重要となる。これを達成するために、変調形式・ポート数・空間スイッチ/波長スイッチ機能分担等の最適化が可能なアーキテクチャを実現した。将来的に 1000 ポート以上に対応するためのアーキテクチャに関しては、試作したデバイスを用いた光スイッチ伝送実験により、7000 ポート以上に拡張可能であることを実証した。また大容量化の観点では、空間分割多重技術、超広帯域伝送技術、超高密度波長分割多重技術を効果的に光スイッチネットワークに導入する方式を考案し、1 ペタビット毎秒 (Pbps) を超えるスイッチ容量が実現できることを示した。さらに、コントロールネットワークに関して、現

状のデータセンタの遅延特性を大幅に改善する方式を提案しその有効性を実験により検証した。

<光 ToR スイッチの研究開発及び光波長送受信器の研究開発>

光波長送受信器の主要課題である、デジタルコヒーレント光伝送方式での光バースト信号の受信実現に向け、研究開発を進めた。まず、局発光として使用する波長可変光源の高速波長切替に向け制御方式を検討した。その結果、波長可変光源ヒーターの PID (Proportional-Integral-Differential) 制御を高速・並列処理することにより、波長切替時間 100 μ s 達成の見込みを得た。次に、集積型受信器での光バースト信号の受信方法を検討した。集積型受信器の出力電気信号振幅を調整する方法として、波長切替と同時に外部からゲイン設定を集積型受信器へ供給することで光バースト受信を可能とした。上記機能とバースト多値プロセッサを組み込んで光波長送受信器を試作した。さらに、光 ToR スイッチの外部制御インタフェースとして EtherCAT を採用し、光波長送受信器と電気スイッチインタフェース (リンク維持送受信器) と組み合わせ、光 ToR スイッチを試作して評価した。結果、波長切替時間 100 μ s 以下、誤り訂正符号の使用によりエラーフリーとなる特性を確認した。また、光 ToR スイッチを光電ハイブリッドスイッチシステムに組み込んで、EtherCAT の外部制御による動作を実証し、最終目標を達成した。

<バースト多値プロセッサの研究開発>

バースト多値プロセッサは光波長送受信器の構成要素の 1 つであり、送信側において多値コヒーレント光信号を生成するための多値信号を生成し、バースト状の受信光信号を受信側で復調するためのデジタル信号処理回路である。バースト多値プロセッサの研究開発では、伝送容量を拡大する光多値変復調と不均一なタイミングの短い信号継続時間をもつ光バースト信号に対応可能な高速応答を同時に実現するため、段階的にバースト多値プロセッサ試作を実施した。最終的な試作チップを用いた評価で伝送速度 200 ギガビット毎秒 (Gbps) /400Gbps の両モードにおいて目標である 100 μ s 以下の高速バースト応答時間を達成した。さらに、最終的な試作チップを光波長送受信器に組み込み、システム検証により光電ハイブリッドスイッチシステムで動作可能であることを実証することにより、バースト多値プロセッサ技術を確立した。

<光コアスイッチの研究開発>

本研究開発項目では 1000 ポート以上の入出力を備え、100 μ s 級の過渡応答時間で動作する光コアスイッチの設計および原理検証に必要な実装を行い、他機能部との連携動作を実現した。設計段階においては、①光信号伝送の観点の設計、②装置の外形など実装観点の設計、③他の機能部との連携観点の設計の 3 点を重視して実施した。①の光信号伝送観点の設計においては、光 ToR スイッチ内の光波長送受信器の許容範囲と整合させることをマイルストーンとして設定した。②の実装観点の設計においては、フル実装時の装置サイズを実用上適切なサイズとなるよう設計することをマイルストーンとして設定した。③の他機能部との連携設計において、コントローラとの間で制御情報等を送受するインタフェースや通信プロトコルを規定すること、特にシステム全体を適切に動作させる観点から、特に遅延時間の低減に配慮した設計であることをマイルストーンとして設定した。これら設定したマイルストーンを全て達成した上で、発展的な課題として光波長送受信器内に搭載される高速波長可変光源と連携して、光物理層の高速スイッチング動作の検証も実施した。

<国際標準化>

2つの項目について研究開発を行った。①システム制御アルゴリズムについては、利用を促進させるためオープンソース化戦略をとることとし、国際会議で情報発信を実施するとともにソースコードはダウンロードできるようにした。②部品技術については、開発技術の優位性を維持するため、関連する標準化/技術動向等の外部状況を把握しつつ、当初予定していた特許戦略ではなく秘匿戦略に転換した。また、光スイッチの国際標準化動向を調査し、本プロジェクトの優位性について再確認した。

<光電ハイブリッドスイッチシステム実証>

各研究項目で開発を行った光コアスイッチ、光波長送受信器、バースト多値プロセッサを集約して実証用システムを構築し、ライン側伝送速度 200Gbps にて機能実証を行った。各装置の連携制御に EtherCAT を用いることで伝送経路切り替え時間として 250 μ s 以下を達成した。また、実証システムにおいて制御シーケンスの妥当性を実証し、経路切り替え時も IP パケット損失をゼロにできることを示した。さらに 8K および 4K 非圧縮映像信号を用いてバースト受信機能と TOS 変更による経路切り替え機能を実証した。さらに、ライン側伝送速度 400Gbps の DP-16QAM 信号を用いてバースト多値プロセッサが 400Gbps においてバースト受信が可能であることを示した。