

A Study on Flexible, Reliable, and Scalable Wavelength-Routed Optical Networks

柔軟、高信頼かつ拡張性のある
波長ルーティングネットワークの構築手法に関する研究

石田 晋哉
大阪大学 大学院情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻

研究の背景: 光ネットワークの現状と問題点

- 光ネットワークの大容量化
 - インターネットトラフィックの増加
 - ユーザの増加
 - 音声・動画配信、P2P ファイル共有、グリッドコンピューティング、...
- 光ネットワークの大規模化
 - 光ネットワークアーキテクチャの標準化
 - 複数の光ネットワークを相互接続
- 光ネットワークの大規模化に伴い顕著化する問題点
 - トラフィックの変動に対する柔軟性
 - ネットワーク障害に対する信頼性
 - ネットワーク規模に対する拡張性

2007/2/20

博士論文 公聴会

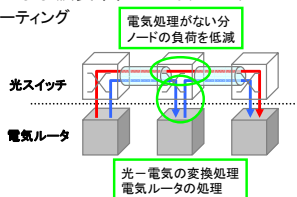
2

研究の背景: 光ネットワークの大容量化 (波長分割多重)

- 1本の光ファイバに複数の異なる波長の信号を多重して伝送
 - 現在の光ファイバ網を大容量化



- 信号を光のまま波長単位でスイッチング
 - 波長ルーティング



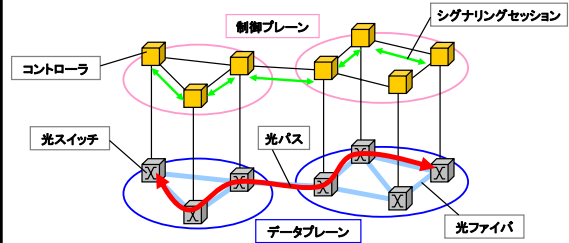
2007/2/20

博士論文 公聴会

3

研究の背景: 波長ルーティングネットワーク

- 光バス
 - 波長ルーティングによりエンド・エンド間に回線を設定
 - 制御プレーンのコントローラがデータプレーンの光スイッチを制御



2007/2/20

博士論文 公聴会

4

研究の目的と博士論文の構成

- 柔軟性、信頼性および拡張性を兼ね備えた大規模な波長ルーティングネットワークの設計
 - 柔軟性
 - トラフィック変動に対する光バス再設定時におけるトラフィック損失の抑制
 - 拡張性
 - 大規模なトポロジにおいて資源利用効率を高める波長ルーティング
 - 信頼性
 - 光バス設定のためのシグナリングプロトコル設計に関する考察
 - 大規模障害に対する局所的な障害回復
- 博士論文の構成
 - Chapter 1: Introduction
 - Chapter 2: Dynamic Reconfiguration of Logical Topologies
 - Chapter 3: Routing Scheme for Large-Scaled Wavelength-Routed Networks
 - Chapter 4: Performance Analysis of Signaling State Managements
 - Chapter 5: Local Recovery Scheme for Massive Failures
 - Chapter 6: Conclusion and Future Work

2007/2/20

博士論文 公聴会

5

Chapter 3: Routing Scheme for Large-Scaled Wavelength-Routed Networks

トポロジの大規模化によるパワー則の出現

- ネットワークの大規模化におけるアナロジ
 - 波長ルーティングネットワーク
 - 複数の光ネットワーク間の相互接続
 - インターネット
 - 複数の AS 間の相互接続
- インターネットの AS レベルトポロジはパワー則に従う
 - ノードの出線数分布に大きな偏りが現れる
 - 少数のノードは出線数が非常に多い (ハブノード)
 - 多数のノードは出線数が少ない
- 大規模化な波長ルーティングネットワークの物理トポロジはパワー則に従う
 - ハブノードが波長予約のボトルネックとなる
 - トラヒックの収容に必要な波長数の増加

2007/2/20 博士論文 公聴会 7

波長の利用効率に対するパワー則の影響

- パワー則の特性により波長の利用効率が悪化する
 - 原因はハブノードにつながるリンクへの負荷の集中
 - 大規模な波長ルーティングネットワーク構築の妨げ

リンクを最短経路に含むノードペア数の分布

光パス設定の棄却率

2007/2/20 博士論文 公聴会 8

Chapter 3 における研究の目的

- ネットワークの大規模化に伴い要求される波長数に関する拡張性の確保
 - パワー則に従う物理トポロジにおける波長利用効率の改善
- ハブノードへの負荷を分散する
 - 仮想光ネットワーク
 - 波長ルーティング用のトポロジを仮想的に設定する
 - 最短ホップ経路で波長ルーティング
 - 経路決定に必要な情報量に関する拡張性の確保

2007/2/20 博士論文 公聴会 9

提案手法: 仮想光ネットワークの構築

- 仮想ファイバ
 - 複数ホップにわたり全波長を用いて光パスを設定
 - 両端ノード 1 ホップの仮想的なファイバで接続する
 - 中継ノードの出線数を仮想的に減らす
- あらかじめ設定した仮想光ネットワーク上で波長ルーティング

物理トポロジ

2007/2/20 博士論文 公聴会 10

提案手法: 仮想光ネットワークの構築

- 仮想ファイバ
 - 複数ホップにわたり全波長を用いて光パスを設定
 - 両端ノード 1 ホップの仮想的なファイバで接続する
 - 中継ノードの出線数を仮想的に減らす
- あらかじめ設定した仮想光ネットワーク上で波長ルーティング

仮想ファイバ

仮想光ネットワーク

物理トポロジ

2007/2/20 博士論文 公聴会 11

提案手法: 仮想光ネットワークの構築

- 仮想ファイバ
 - 複数ホップにわたり全波長を用いて光パスを設定
 - 両端ノード 1 ホップの仮想的なファイバで接続する
 - 中継ノードの出線数を仮想的に減らす
- あらかじめ設定した仮想光ネットワーク上で波長ルーティング

仮想ファイバ

仮想光ネットワーク

物理トポロジ

2007/2/20 博士論文 公聴会 12

提案手法: 仮想ファイバの設定方法

- 最大の出線数が閾値以下になるまで繰り返す
 - ハブノードを経由するように仮想ファイバを設定
 - 少数の高負荷リンクにかかる負荷の低減
 - 多数の低負荷リンクへ負荷を分散

出線数最大の隣接ノード2つを選択
負荷大 → 出線数大

2007/2/20 博士論文 公聴会 13

提案手法: 仮想ファイバの設定方法

- 最大の出線数が閾値以下になるまで繰り返す
 - ハブノードを経由するように仮想ファイバを設定
 - 少数の高負荷リンクにかかる負荷の低減
 - 多数の低負荷リンクへ負荷を分散

出線数最大の隣接ノード2つを選択
負荷大 → 出線数大

2007/2/20 博士論文 公聴会 14

提案手法: 仮想ファイバの設定方法

- 最大の出線数が閾値以下になるまで繰り返す
 - ハブノードを経由するように仮想ファイバを設定
 - 少数の高負荷リンクにかかる負荷の低減
 - 多数の低負荷リンクへ負荷を分散

出線数最大の隣接ノード2つを選択
負荷大 → 出線数大

仮想ファイバの波長を占有

負荷のばらつきが抑えられる

負荷の大きいノードを競合から切り離す

2007/2/20 博士論文 公聴会 15

提案手法の評価結果

- 仮想ファイバの設定により棄却率を約2桁改善
 - 最大負荷の減少が大きく、平均負荷の増加を抑えられる閾値が最適
 - 閾値が低いほど最大負荷は減少し、平均負荷は増加
 - 閾値が低すぎると平均ホップ数が増加して逆効果

トポロジ	平均負荷	最大負荷
Power-law	998.89	25120
th=64	1046.0	12905
th=16	1406.9	9993
th=8	1787.1	8745

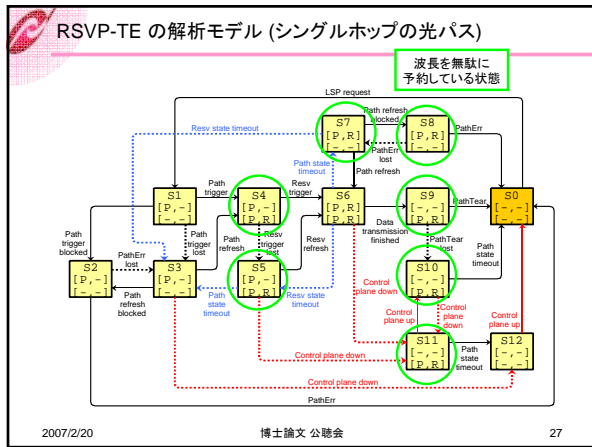
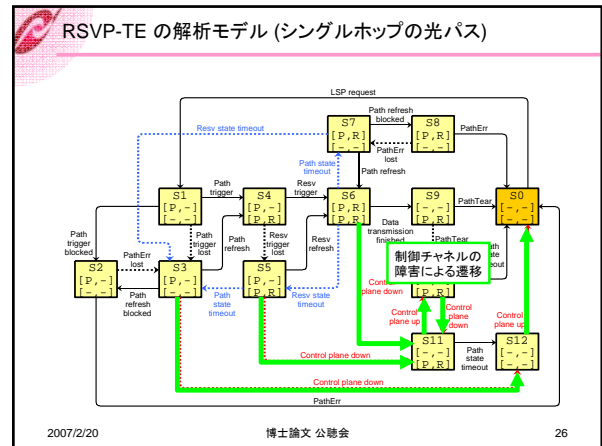
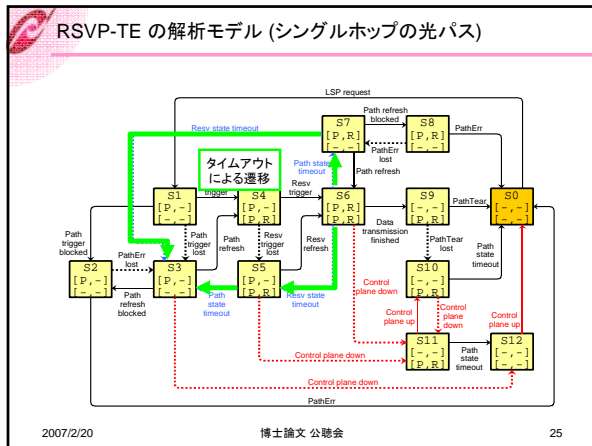
2007/2/20 博士論文 公聴会 16

Chapter 4: Performance Analysis of Signaling State Managements

データプレーンの性能に対する制御プレーンの影響

- 制御プレーン
 - 光スイッチの制御
 - 波長の予約・解放を行う(シグナリング)
- データプレーンの性能には制御プレーンが関与
 - 制御メッセージの損失や制御チャネルの切断
 - 波長の予約、解放ができない
- 高信頼な波長ルーティングネットワークには障害に耐性のある制御プレーンが必要
 - 障害に耐性のあるシグナリングプロトコル

2007/2/20 博士論文 公聴会 18



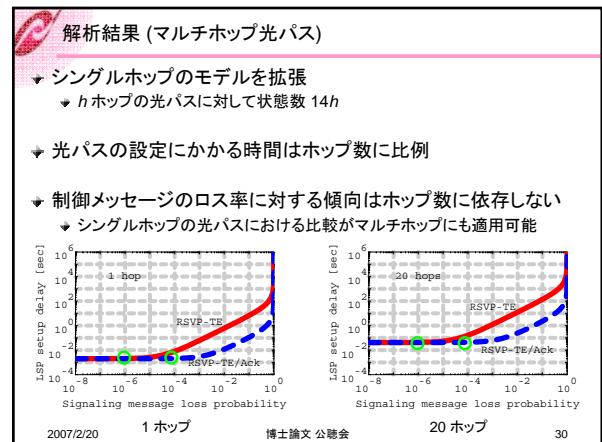
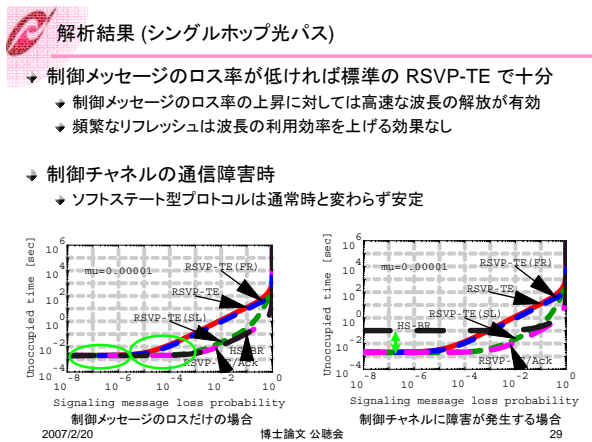
シングルホップ光パスに対する RSVP-TE の性能解析

- 定常状態確率から予約波長の遊休時間を導出して評価
 - 遊休時間が長いほど波長の利用効率が悪い
- 比較するシグナリングプロトコル
 - RSVP-TE: 標準仕様のパラメータ値
 - RSVP-TE (SL): 短いタイムアウト時間ですばやく波長を解放する
 - RSVP-TE (FR): 頻繁なリフレッシュでタイムアウトを防ぐ
 - RSVP-TE/Ack: RSVP-TE に制御メッセージの再送機能を追加したもの
 - HS BR: RSVP-TE をハードステート型に置き換えたもの

プロトコル	リフレッシュ間隔	リフレッシュ回数	再送間隔	再送回数
RSVP-TE	30s	3	-	-
RSVP-TE (SL)	0.5s	3	-	-
RSVP-TE (FR)	0.5s	180	-	-
RSVP-TE/Ack	30s	3	0.5s	3
HS BR	-	-	0.5s	∞

タイムアウト時間 = リフレッシュ間隔 × リフレッシュ回数

2007/2/20 博士論文 公聴会 28



大規模なネットワークにおけるメッセージ再送機能の有効性

- 制御メッセージを再送する方が再送しない時よりも制御メッセージのロス率が高くなる
 - 制御メッセージを再送する分だけ制御メッセージ量が増加する
- 大規模なネットワークでもメッセージの再送機能は効果を発揮するか？
 - 数百～数千セッションが同時に存在する
 - 波長多重数は数百～1000程度
 - 制御メッセージ量はセッション数に比例して増加
- 再送による制御メッセージのロス率の増分を考慮して RSVP-TE と RSVP-TE/Ack の性能を改めて比較
 - 受信パッファにおけるパッファオーバーフローによる損失のみと仮定

2007/2/20 博士論文 公聴会 31

制御メッセージの再送機能が有効なパラメータ領域

- 大規模なネットワークでは標準の RSVP-TE でよい
 - 再送するとかえって性能が低下する
 - メッセージ量が増えてメッセージの棄却が発生する
 - 制御メッセージ量を抑える方が重要

1000 セッションの光パスがある場合

2007/2/20 博士論文 公聴会

評価モデル

受信パッファにおけるパッファあふれでのみ制御メッセージを損失すると仮定

(SW) ソフトウェアで制御メッセージを処理
0.1 msec/msg [1]

(HW) ハードウェアで制御メッセージを処理
2.4 usec/msg [2]

[1] Z. Zhou et al., "An efficient adaptation of RSVP-TE in GMPLS," in Proc. of SPECTS 2004, July 2004.

[2] H. Wang et al., "A hardware-accelerated implementation of the RSVP-TE signaling protocol," in Proc. of IEEE ICC 2004, June 2004.

制御メッセージの再送機能が有効なパラメータ領域

- 大規模なネットワークでは標準の RSVP-TE でよい
 - 再送するとかえって性能が低下する
 - メッセージ量が増えてメッセージの棄却が発生する
 - 制御メッセージ量を抑える方が重要

1000 セッションの光パスがある場合

2007/2/20 博士論文 公聴会

まとめと今後の課題

- 波長ルーティングネットワークに対して、大規模化に伴い必要となる柔軟性、信頼性および拡張性を付与
 - 柔軟性 (Chapter 2)
 - トラヒック損失を抑えた論理トポロジの再構成
 - 拡張性 (Chapter 3)
 - 大規模なトポロジにおいて資源利用効率を高める波長ルーティング
 - 信頼性 (Chapter 4, 5)
 - 光パス設定のためのシグナリングプロトコル設計に関する考察
 - 大規模障害に対する局所的な障害回復
- 今後の課題
 - 制御プレーンにおける障害を考慮した波長予約情報の管理
 - 標準化技術に基づいた複数ドメインからなる光ネットワークにおける光パスの障害回復

2007/2/20 博士論文 公聴会 34