

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

Layered Traffic Engineering for Effective and Adaptive Wavelength-Routed Optical Networks

小泉 佑揮

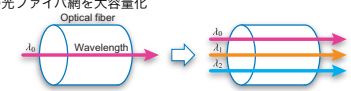
大阪大学 大学院情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻
先進ネットワークアーキテクチャー講座
村田研究室

2009年2月12日 木曜日 1

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：光ネットワークへの期待

- インターネットの発展
 - インターネット利用者の増加
 - アクセス網の高速化
 - 高帯域の通信を要求するアプリケーションの出現
 - P2Pネットワーク、ビデオ・オンデマンド、グリッド
- インターネットトラフィックの増加
- Wavelength Division Multiplexing (WDM)
 - 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
- 増加し続けるトラフィックを収容する手段として期待されている

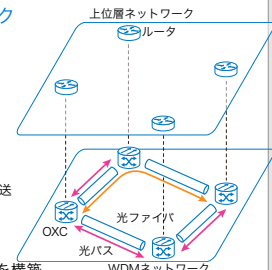


12/01/08 博士論文 公聴会 2
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：階層化トラフィックエンジニアリング

- 波長ルーティングネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 光バスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
 - 論理トポロジ
 - 電気ルータ光バスにより構成される論理的なトポロジ
 - 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送
- 階層化トラフィックエンジニアリング
 - 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用

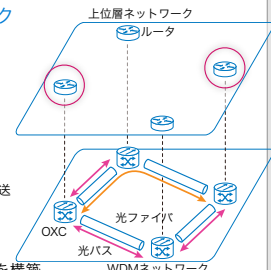


12/01/08 博士論文 公聴会 3
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：階層化トラフィックエンジニアリング

- 波長ルーティングネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 光バスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
 - 論理トポロジ
 - 電気ルータ光バスにより構成される論理的なトポロジ
 - 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送
- 階層化トラフィックエンジニアリング
 - 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用

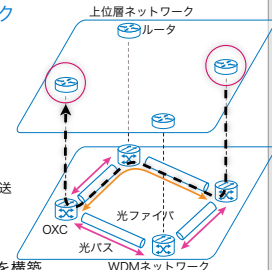


12/01/08 博士論文 公聴会 3
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：階層化トラフィックエンジニアリング

- 波長ルーティングネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 光バスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
 - 論理トポロジ
 - 電気ルータ光バスにより構成される論理的なトポロジ
 - 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送
- 階層化トラフィックエンジニアリング
 - 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用

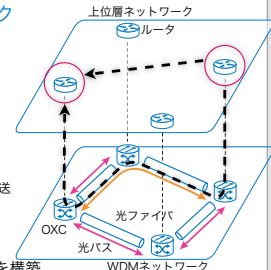


12/01/08 博士論文 公聴会 3
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：階層化トラフィックエンジニアリング

- 波長ルーティングネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 光バスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
 - 論理トポロジ
 - 電気ルータ光バスにより構成される論理的なトポロジ
 - 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送
- 階層化トラフィックエンジニアリング
 - 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用



12/01/08 博士論文 公聴会 3
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究の背景：階層化トラフィックエンジニアリング

- 波長ルーティングネットワーク
 - WDMネットワーク
 - 光パスを設定
 - 波長によって構成される通信チャンネル
 - 論理トポロジ
 - 電気ルータ光パスにより構成される論理的なトポロジ
 - 上位層ネットワーク
 - 論理トポロジを用いてトラフィックを転送
 - 階層化トラフィックエンジニアリング
 - 目的に応じて適切に論理トポロジを構築
 - トラフィックの効率的な収容
 - ネットワーク資源の効率的な利用

12/01/08 博士論文 公称会 3
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

研究目的と博士論文の構成

- 効率的なトラフィック転送
- 環境変化に対する適応性
- Chapter 2 IPトラフィックの効率的な転送を実現するトラフィックエンジニアリング
- Chapter 3 オーバーレイネットワークによるトラフィックの安定的な収容を実現するトラフィックエンジニアリング
- Chapter 4 環境変化に対する適応性を備えたトラフィックエンジニアリング
- 効率的かつ適応的な波長ルーティングネットワークの実現

12/01/08 博士論文 公称会 4
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

Chapter 2 Integrated Routing for Effective Transport of IP Traffic over Wavelength-Routed Optical Networks

2009年2月12日 木曜日 5

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

効率的なIPトラフィック収容のための統合経路制御手法

- IPルーティングと波長ルーティングは個別に設計されている
 - 波長ルーティングで設定した光パスがIPによって利用されないことがある
 - 波長資源を有効に利用できない
 - トラフィックを効率的に収容できない
- IPと波長ルーティングネットワークの統合経路制御手法
 - ネットワーク資源の有効利用
 - IPの経路制御機構を用いてトラフィック転送に必要な光パスを計算
 - トラフィックの効率的な収容
 - IPルータの負荷分散を目的とした経路計算メトリック
- シミュレーション評価結果
 - 既存の論理トポロジ構築手法よりも最大で50%収容可能なトラフィックが増加
- 課題
 - オーバーレイネットワークに代表される新たなアプリケーション技術の出現
 - 制御の競合によりネットワークが不安定になる

新たなアプリケーション技術に対しても安定したネットワーク制御を行う必要がある

12/01/08 博士論文 公称会 6
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

Chapter 3 Hysteresis Based Layered Traffic Engineering for Stable Accommodation of Overlay Routing Services

2009年2月12日 木曜日 7

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

オーバーレイネットワークと波長ルーティングネットワーク

- オーバーレイネットワーク
 - アンダーレイネットワーク上に論理的なネットワークを構築
 - 構築した論理ネットワーク上で経路制御
 - 既存アンダーレイネットワークを変更することなく機能・性能 (QoS、信頼性) を改善
 - オーバーレイルーティング
- アンダーレイネットワーク
 - 上位層ネットワーク
 - 波長ルーティングネットワークによって提供された論理トポロジをインフラとして利用
 - 波長ルーティングネットワーク
 - トラフィックエンジニアリングにより論理トポロジを構築

12/01/08 博士論文 公称会 8
2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

トラフィックエンジニアリングとオーバーレイネットワークの相互作用

- **オーバーレイネットワークの問題点**
 - 最適に設計された論理トポロジの効率の低下
 - オーバーレイネットワークによるトラフィックの変化
 - 制御の競合によるネットワークの振動
 - オーバーレイネットワークとトラフィックエンジニアリングは独立して動作
- **相互作用の解決策**
 - アンダーレイネットワーク (ISP) とオーバーレイネットワークの協調による解決
 - ISPがオーバーレイに情報を提供する必要がある
 - セキュリティの観点からISPは情報の公開を好まない
 - 全てのオーバーレイネットワークに協調を強要する必要がある
 - オーバーレイネットワークはそれぞれの目的を満たすために経路制御を行う

12/01/08 2009年2月12日木曜日 9

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

ヒステリシスを用いたトラフィックエンジニアリング

- 新たに計算した論理トポロジB上のリンク利用率 u_B を試算
- 現在の論理トポロジA上のリンク利用率 u_A と u_B を比較
 - u_B の改善が閾値 H よりも大きい場合 ($u_B/u_A < H$)
 - 新しい論理トポロジを適用
 - u_B の改善が閾値 H よりも小さい場合 ($u_B/u_A > H$)
 - 既存の論理トポロジを利用
- 性能改善効果の少ないトポロジの変更を削減
 - ネットワークの安定性を改善

12/01/08 2009年2月12日木曜日 10

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

ヒステリシスを用いたトラフィックエンジニアリング

- 新たに計算した論理トポロジB上のリンク利用率 u_B を試算
- 現在の論理トポロジA上のリンク利用率 u_A と u_B を比較
 - u_B の改善が閾値 H よりも大きい場合 ($u_B/u_A < H$)
 - 新しい論理トポロジを適用
 - u_B の改善が閾値 H よりも小さい場合 ($u_B/u_A > H$)
 - 既存の論理トポロジを利用
- 性能改善効果の少ないトポロジの変更を削減
 - ネットワークの安定性を改善
 - 利用率の改善が小さい場合でも新たな論理トポロジを構築する

12/01/08 2009年2月12日木曜日 10

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

ヒステリシスを用いたトラフィックエンジニアリング

- 新たに計算した論理トポロジB上のリンク利用率 u_B を試算
- 現在の論理トポロジA上のリンク利用率 u_A と u_B を比較
 - u_B の改善が閾値 H よりも大きい場合 ($u_B/u_A < H$)
 - 新しい論理トポロジを適用
 - u_B の改善が閾値 H よりも小さい場合 ($u_B/u_A > H$)
 - 既存の論理トポロジを利用
- 性能改善効果の少ないトポロジの変更を削減
 - ネットワークの安定性を改善
 - 利用率の改善が小さい場合でも新たな論理トポロジを構築する
 - 利用率の改善が小さい場合はトポロジを変更しない

12/01/08 2009年2月12日木曜日 10

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

ヒステリシスを用いたトラフィックエンジニアリング

- 新たに計算した論理トポロジB上のリンク利用率 u_B を試算
- 現在の論理トポロジA上のリンク利用率 u_A と u_B を比較
 - u_B の改善が閾値 H よりも大きい場合 ($u_B/u_A < H$)
 - 新しい論理トポロジを適用
 - u_B の改善が閾値 H よりも小さい場合 ($u_B/u_A > H$)
 - 既存の論理トポロジを利用
- 性能改善効果の少ないトポロジの変更を削減
 - ネットワークの安定性を改善
 - 利用率の改善が小さい場合でも新たな論理トポロジを構築する
 - 利用率が大きく改善する場合のみトポロジを変更する

12/01/08 2009年2月12日木曜日 10

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

ヒステリシスによるトラフィックエンジニアリングの安定化

12/01/08 2009年2月12日木曜日 11

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

オーバーレイネットワーク安定収容のためのトラフィックエンジニアリングのまとめ

- **トラフィックエンジニアリングとオーバーレイルーティングの相互作用**
 - ネットワークの安定性と性能の劣化
- **ネットワークの安定性・性能改善**
 - ヒステリシス → リンク利用率の安定性の改善
 - 2状態ヒステリシス → リンク利用率の安定性・性能の改善
 - フィルタリング → 相互作用による振動に対する適応性の向上
- **課題**
 - トラフィックエンジニアリングとオーバーレイネットワークの相互作用
 - ネットワーク環境の大きな変化
 - オーバーレイネットワーク以外の要因による環境変化
 - ヒステリシスによる安定化手法は既存のトラフィックエンジニアリングをベースとしたオーバーレイネットワーク安定収容のための手法
 - 環境変化に対する適応性は考慮されていない

環境変化に対する適応性を備えたトラフィックエンジニアリングが必要

12/01/08 博士論文 公称会 12

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

Chapter 4 Adaptive Layered Traffic Engineering against Changes in Environments

12/01/08 博士論文 公称会 13

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

環境変化に対する適応性を備えたネットワーク制御の必要性

- **ネットワーク上で生じる環境変化は大きくなっている**
 - オーバーレイネットワークとトラフィックエンジニアリングの競合
 - 予測困難かつ大きなネットワークの振動
 - 対地間トラフィックの振動
 - リンク利用率の振動
- **想定されてきた環境変化**
 - 緩やかで周期的なトラフィック変動
- **多様な環境変化**
 - トラフィック変動
 - リンク故障

環境の変化に対する適応性を備えたトラフィックエンジニアリングの実現
⇒ アトラクター選択

12/01/08 博士論文 公称会 14

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

アトラクター選択

- **未知の環境変化に対する生物の適応性**
 - 例：大腸菌、遺伝子・代謝ネットワーク
- **システムの状態を決定する3つの要素**
 - ゆらぎ
 - アトラクターを持つ制御構造
 - 活性度 (コンディション)
- **基本動作**
 - システムの状態が悪い = 活性度が低い
 - ゆらぎ η が支配的にシステムの挙動を制御
 - η よりシステムの状態が良くなるアトラクターを探索
 - システムの状態が良い = 活性度が高い
 - アトラクターを持つ制御構造 $f(x)$ が支配的にシステムの状態を制御
 - $f(x)$ により安定状態に収束

ゆらぎとアトラクターを持つ制御構造がシステムの挙動に与える影響を活性度に応じて制御することで、環境変化に対する適応性を実現

12/01/08 博士論文 公称会 15

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

遺伝子・代謝ネットワークにおけるアトラクター選択

$$dy_i/dt = \left(\sum_j \text{Con}(k, j, i) \cdot x_j \cdot y_i - \sum_j \text{Con}(i, j, k) \cdot x_i \cdot y_j \right) + \epsilon + D(V_i - y_i)$$

- **2レイヤー構成**
 - 代謝反応ネットワーク
 - 代謝反応による細胞成長に必要な基質の生成
 - 必須基質の濃度 (活性度: a) を遺伝子ネットワークにフィードバック
 - 遺伝子ネットワーク
 - 遺伝子間の相互作用によるタンパク質の発現レベル (x_i) の決定
 - 発現レベルによって代謝反応を制御
- **アトラクター選択の基本要素**
 - アトラクターを持つ制御構造
 - 遺伝子ネットワーク内の遺伝子間の活性・抑制
 - ゆらぎ
 - 活性度
 - 代謝ネットワークの状態

発現レベル アトラクターを持つ制御構造
$$dx_i/dt = \left(\left(\text{sig} \left(\sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta \right) \cdot a$$

活性度 ゆらぎ
 $\text{sig}(c) = 1/(1 + \exp(-c))$

12/01/08 博士論文 公称会 16

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

アトラクター選択のトラフィックエンジニアリングへの適用

- 代謝ネットワークの状態が悪い
 - ゆらぎにより代謝ネットワークの状態が良くなる遺伝子ネットワークの状態を探索
- 代謝ネットワークの状態が良い
 - アトラクターを持つ制御構造により安定状態に収束
- 上位ネットワークの状態が悪い
 - ゆらぎにより上位ネットワークの状態が良くなる論理トポロジを構築
- 上位ネットワークの状態が良い
 - アトラクターを持つ制御構造により安定状態に収束

12/01/08 博士論文 公称会 17

2009年2月12日 木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

アトラクター選択を用いたトラフィックエンジニアリングの概要

- 有用なトラフィックエンジニアリング実現のための課題
 - 生物と波長ルーティングネットワークの違い
 - アトラクター選択をトラフィックエンジニアリングに適切に読み替える必要がある
 - アトラクターを持つ制御構造に波長ルーティングネットワークの特性を適切に埋め込む必要がある
- 提案手法の特徴
 - ゆらぎによる環境変化に対する適応性
 - 特定の変化を想定しない
 - 様々な環境変化に対する適応性
 - 少ない情報による動作
 - 生物は十分な情報伝達的手段を持たない
 - 活性度のフィードバックにより動作
 - 直接取得可能なリンク利用率のみを利用
 - 変化に素早く反応する

12/01/08 博士論文 公発表 18
2009年2月12日木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

アトラクター選択を用いたトラフィックエンジニアリングの動作

- トラフィックエンジニアリングのダイナミクス
 - 遺伝子を全ノードペア (p_{ij}) に設置
 - 遺伝子の発現レベル $(x_{p_{ij}})$ によってノードペアに設定する光パスを決定
 - $x_{p_{ij}}$ が大きい → 光パスを多く設定
 - $x_{p_{ij}}$ が小さい → 光パスを少なく設定
 - 発現レベル $(x_{p_{ij}})$ のダイナミクス
 - 発現レベル (光パス数の決定) アトラクターを持つ制御構造
 - 活性度 遺伝子間の相互作用 (活性・抑制) ゆらぎ
- 提案手法の動作
 - 定期的なリンク利用率の計測
 - アトラクター選択によるシステム状態の決定
 - 論理トポロジの再構築

12/01/08 博士論文 公発表 19
2009年2月12日木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

波長ルーティングネットワークの特性のアトラクター選択への反映

- 発現レベル (光パス数の決定) アトラクターを持つ制御構造
 - $dx_{p_{ij}}/dt = \alpha \cdot \text{sig} \left(\sum_{p_{id}} W(p_{ij}, p_{id}) \cdot x_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}} \right) + \eta$
 - 活性度 遺伝子間の相互作用 (活性・抑制) ゆらぎ
- 遺伝子間の抑制・活性の相互作用により決定
 - 制御行列 $W(p_{ij}, p_{id})$ によって定義
 - p_{ij} が p_{id} を活性化 → $x_{p_{id}}$ を増加 → p_{id} 上の光パスを増加
 - p_{ij} が p_{id} を抑制化 → $x_{p_{id}}$ を減少 → p_{id} 上の光パスを減少
- 光パス設定・削除のモチベーション
 - 効率的なトラフィック転送のための光パスの追加
 - トラフィック迂回のための光パスの設定
 - 資源の共有による光パスの減少

12/01/08 博士論文 公発表 20
2009年2月12日木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

活性度

- 発現レベル (光パス数の決定) アトラクターを持つ制御構造
 - $dx_{p_{ij}}/dt = \alpha \cdot \text{sig} \left(\sum_{p_{id}} W(p_{ij}, p_{id}) \cdot x_{p_{ij}} - \theta_{p_{ij}} \right) + \eta$
 - 活性度 遺伝子間の相互作用 (活性・抑制) ゆらぎ
- 活性度 = システムのコンディション
 - 上位ネットワークの最大リンク利用率
 - 他の指標でも動作可能
- 定義
 - 最大リンク利用率が ζ 以上 → 上位ネットワークの状態が悪い
 - 活性度を急激に低下させる
 - ゆらぎによる新たな論理トポロジ構築を促進
 - 最大リンク利用率が ζ 以下 → 上位ネットワークの状態が良い
 - 活性度を緩やかに増加させる
 - 上位ネットワークの状態がよりよくなる論理トポロジに収束させる

12/01/08 博士論文 公発表 21
2009年2月12日木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

論理トポロジの構築

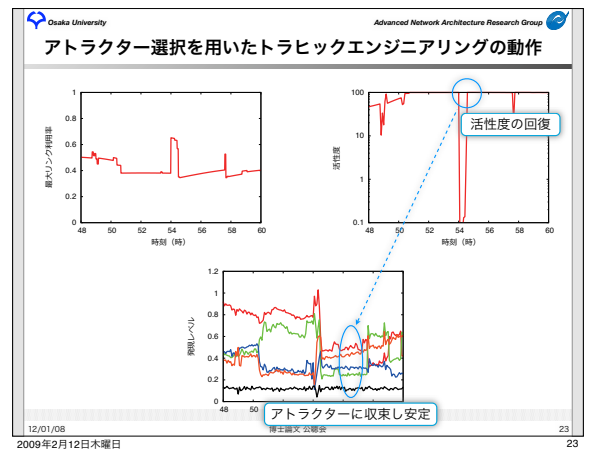
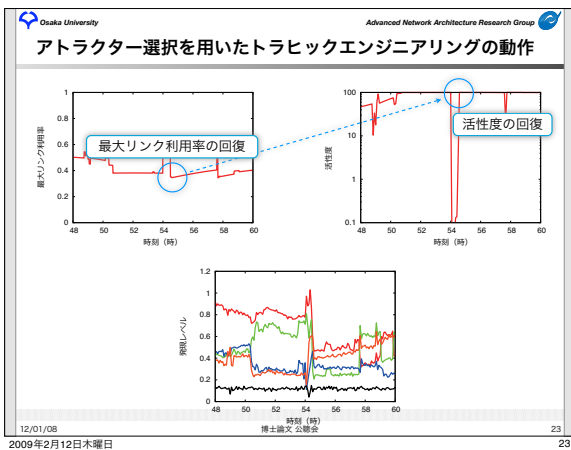
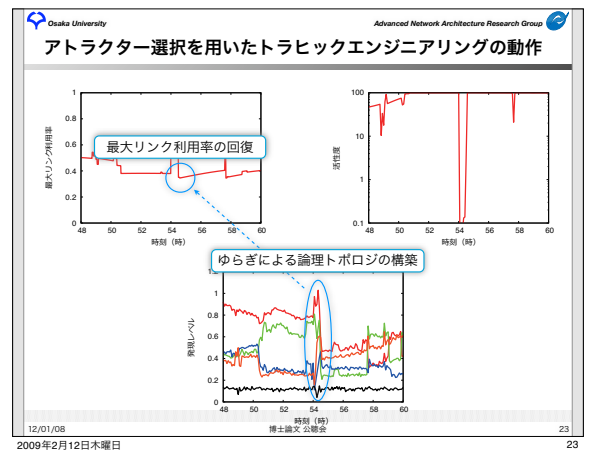
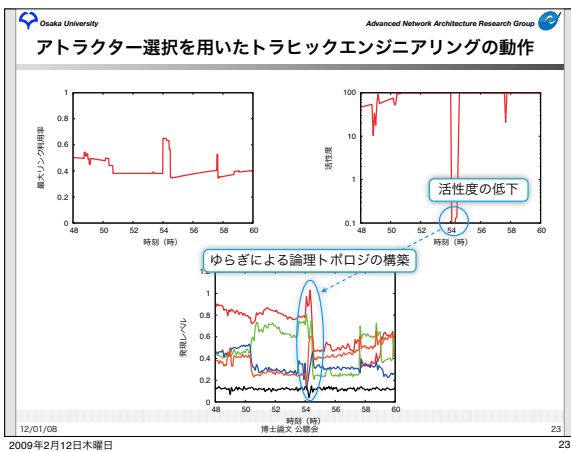
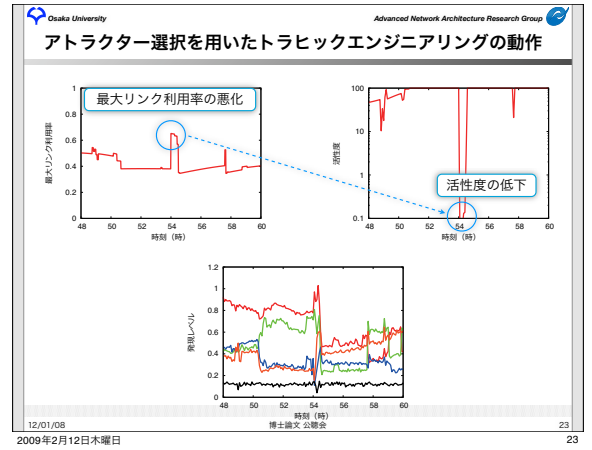
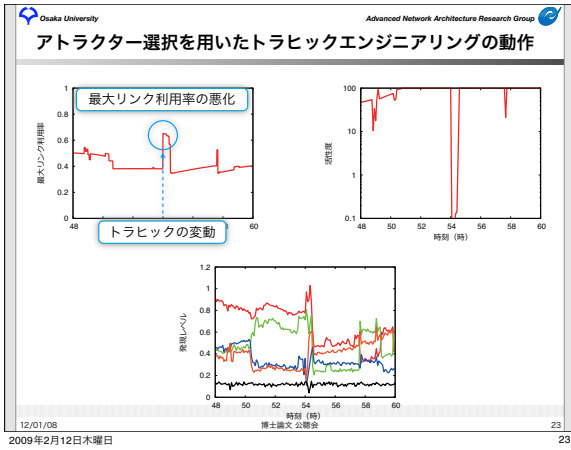
- ノードペアの光パス数の決定
 - 遺伝子の発現レベル $(x_{p_{ij}})$ に応じて決定
 - WDMネットワークの資源を x に応じて分配
 - トランスミッタ数 (P_T) 、レシーバ数 (P_R)
 - ノードペア p_{ij} の光パス数 $G_{p_{ij}}$
 - ノード j のレシーバを使うノードペアの x の和に対する比率
 - floorによる整数化
 - $G_{p_{ij}} = \min \left(\left\lfloor P_R \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_s x_{p_{sj}}} \right\rfloor, \left\lfloor P_T \cdot \frac{x_{p_{ij}}}{\sum_d x_{p_{id}}} \right\rfloor \right)$
 - トランスミッタとレシーバの制約に対して小さい方を選択
 - 同じ資源を共有するノードペアの $x_{p_{ij}}$ に対する比を追加することで、その他の制約も考慮することが可能

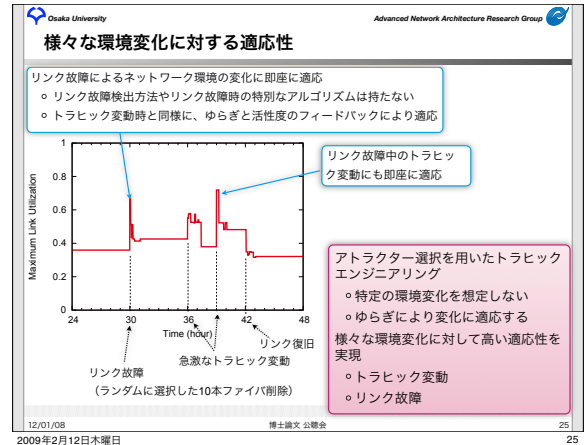
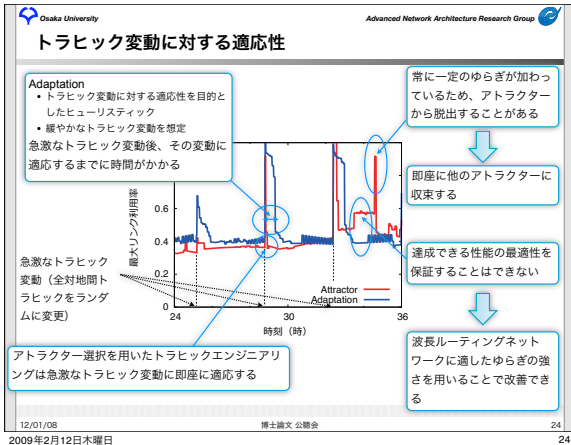
12/01/08 博士論文 公発表 22
2009年2月12日木曜日

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group

アトラクター選択を用いたトラフィックエンジニアリングの動作

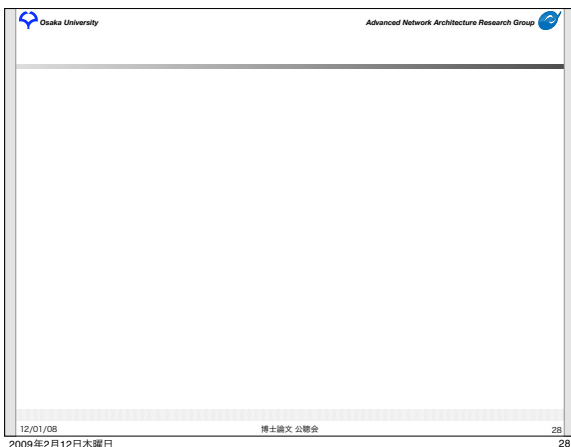
12/01/08 博士論文 公発表 23
2009年2月12日木曜日





- Osaka University Advanced Network Architecture Research Group
- ### 環境変化に対する適応性を備えたトラフィックエンジニアリングのまとめ
- アトラクター選択
 - 未知の環境変化に対する生物の適応性をモデル化
 - アトラクター選択に基づくトラフィックエンジニアリング
 - 遺伝子・代謝ネットワークの環境変化に対する適応性に着想を得たトラフィックエンジニアリング手法
 - 環境変化に対して高い適応性を持つ
 - トラフィック変動
 - リンク故障
 - トラフィック変動+リンク故障
 - 今後の課題
 - トラフィックエンジニアリングに対して適切なゆらぎ量の決定
- 12/01/08 博士論文 公発表 26
2009年2月12日木曜日

- Osaka University Advanced Network Architecture Research Group
- ### まとめと今後の課題
- 効率的かつ適応的な波長ルーティングネットワークの実現
 - Chapter 2: IPトラフィックの効率的な収容
 - 波長ルーティングにより設定した光パスをIPネットワークが確実に利用する統合経路制御により収容可能なトラフィックを増加
 - Chapter 3: オーバーレイルーティング安定収容
 - ヒステリシスによりトラフィックエンジニアリングとオーバーレイルーティングの相互作用を抑制し安定性を向上
 - Chapter 4: 環境変化に対する適応性
 - アトラクター選択を適切にトラフィックエンジニアリングに適用し、様々な環境変化に対する適応性を実現
 - 今後の課題
 - 複数のオーバーレイネットワーク
 - オーバーレイネットワーク間の相互作用の発生
 - 波長ルーティング機能を用いた相互作用の解消
 - 複数のオーバーレイネットワークの安定収容
- 12/01/08 博士論文 公発表 27
2009年2月12日木曜日

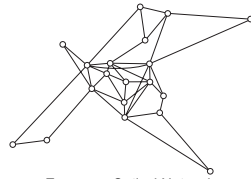


- Osaka University Advanced Network Architecture Research Group
- ### Appendix 1: シミュレーションモデル (Chapter 3)
- 評価トポロジ
 - European Optical Network
 - 19ノード、39 x 2 ファイバ
 - ネットワークモデル
 - トラフィックエンジニアリング: 最大リンク利用率の最小化
 - 上位ネットワークのルーティング: 最小ホップ経路を選択
 - オーバーレイルーティング: 空き帯域最大の経路を選択
 - 初期トラフィック行列
 - ランダムに生成
 - 全トラフィックの20%をオーバーレイのトラフィックに配分
 - トラフィック行列は固定
 - トラフィックの変動はオーバーレイルーティングによるもののみを考える
-
- 12/01/08 博士論文 公発表 29
2009年2月12日木曜日

Appendix 2: シミュレーションモデル (Chapter 4)

○ 評価トポロジ

- European Optical Network
 - 19ノード、39 × 2ファイバ



European Optical Network

○ 環境変化

- トラフィック変動
 - 緩やかで周期的な変化
 - 周期：24時間
 - 急激な変化
 - 全ノードペアのトラフィック量をランダムに変化
- リンク故障
 - ランダムに選択した10本のファイバを削除