

Osaka University

Attractor-based Virtual Network Reconfiguration Under Dynamic Traffic: Towards Cognitive Optical Networking

大場 斗彦

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

1

Osaka University

研究背景

- 光通信網にはトラフィック変動に対する柔軟性が必要
 - ネットワーク内のトラフィック変動幅が増大
 - 提供する帯域幅と利用される帯域幅の間のギャップが発生
- ↓
- VN 再構成アプローチ
 - 需要に応じて波長資源を割り当てることで仮想ネットワーク (VN) を構成
 - 光スイッチの設定を変更することで VN を動的に再構成

2

Osaka University

既存の VN 最適化アプローチ

- 対地間トラフィックマトリクスの情報をもとに最適な VN を構成
 - 直接取得した対地間トラフィックマトリクスを利用
 - 全パケットを解析し各地点宛のトラフィック量をカウントするために膨大なオーバーヘッドを要するため、長期的にサンプリングし取得 (hour オーダー)
 - トラフィック変動に追隨した VN 再構成が困難
 - 推定した対地間トラフィックマトリクスを利用
 - 分オーダーで取得可能なリンク利用率や、蓄積した過去のトラフィック量から対地間トラフィックマトリクスを推定
 - 推定誤差の発生が避けられないため、VN の性能が保証されない

↓

対地間トラフィックマトリクスを利用するアプローチでは
トラフィック変動に追隨して適切な VN を構成するのが困難

3

Osaka University

アトラクター選択にもとづく VN 再構成アプローチ [32]

- 対地間トラフィックマトリクスを利用しない VN 再構成アプローチ
 - 分オーダーで取得可能なリンク利用率のみを観測
 - アトラクター選択にもとづきトラフィック変動に追隨して適切な VN を探索
 - VN の性能指標: 最大リンク利用率

4

Osaka University

アトラクター選択にもとづく VN 再構成アプローチの課題

- アトラクターの設計指針が未検討
 - トラフィック変動に対し VN がどう再構成されるかはアトラクターに依存
 - アトラクターの設計が不適切である場合、適切な VN を構成するまでの時間が増大する可能性
- エラスティック光通信網への適用不可
 - エラスティック光通信網は将来の光通信網として期待される [5]
 - 波長資源を細粒度で柔軟に利用できるが、光スペクトル資源割り当て問題への対処が不可欠
- いかに VN 再構成回数を削減するか
 - アトラクター選択にもとづく適切な VN の探索の過程で過度に VN を再構成する可能性

[1] M. Jinno, et al., "Spectrum efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 47, pp. 66-73, Nov. 2009.

5

Osaka University

研究の目的と博士論文の構成

- 研究の目的
 - 様々なトラフィック変動に迅速に適應する、光通信網におけるアトラクターベースの VN 再構成フレームワークの確立
- 博士論文の構成
 - Introduction
 - Scalable Design of Attractors for Virtual Network Reconfiguration Based on Attractor Selection
 - アトラクター (VN候補) 設計手法を提案
 - Virtual Network Reconfiguration Based on Attractor Selection for Elastic Optical Path Networks
 - エラスティック光通信網へ適用可能な VN 再構成手法を提案
 - Virtual Network Reconfiguration Based on Bayesian Attractor Model
 - ベイジアンアトラクターモデル (BAM) にもとづく VN 再構成手法を組み込んだ VN 再構成フレームワークを提案
 - Conclusion

様々なトラフィック変動に迅速に適應する、光通信網におけるアトラクター選択にもとづく VN 再構成手法の確立

ネットワークの状況を認知し過去の経験を活用する機構の導入による再構成回数の削減

6

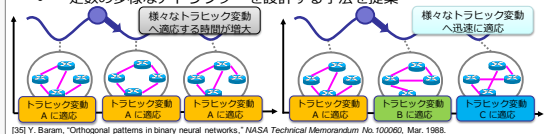
Chapter 2

Scalable Design of Attractors for Virtual Network Reconfiguration Based on Attractor Selection

1. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, and Masayuki Murata, "Scalable Design Method of Attractors in Noise-Induced Virtual Network Topology Control," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, pp. 851-863, September 2015.
2. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, and Masayuki Murata, "Hierarchical Design of an Attractor Structure for VNT Control Based on Attractor Selection," in *Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 330-336, January 2015.
3. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, and Masayuki Murata, "Design and Control of an Attractor Structure for Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection," *Technical Report of IEICE (TR2013-79)*, vol. 112, March 2013 (in Japanese).
4. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, and Masayuki Murata, "Evaluation of Diversity of Attractors for Virtual Network Topology Control Based on Attractor Selection," *Technical Report of IEICE (TR2013-15)*, vol. 113, pp. 41-46, August 2013 (in Japanese).
5. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, Yuki Koizumi, and Masayuki Murata, "Hierarchical Design of an Attractor Structure with Topological Diversity for VNT Control Based on Attractor Selection," *Technical Report of IEICE (TR2014-18)*, vol. 114, pp. 43-48, September 2014 (in Japanese).

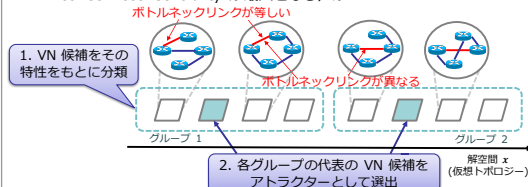
Chapter 2 の背景・目的

- **アトラクター (VN 候補) の設計指針が未検討**
 - トラフィック変動に対し VN をどう再構成するかはアトラクターに依存
 - アトラクターの設計が不適切である場合、適切な VN を構成するまでの時間が増大する可能性
 - 保持可能なアトラクター数には上限あり[35]
- **アトラクター選択により様々なトラフィック変動に適応することを目指す**
 - 一定数の多様なアトラクターを設計する手法を提案



アトラクター設計手法

- **互いに特性が異なる VN 候補をアトラクターとすることで一定数の多様なアトラクターを設計**
- 特性: どの光パスがポトルネックリンクになりやすい (Edge Betweenness Centrality が最大となる) か



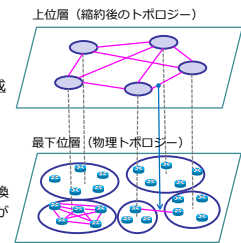
- 大規模ネットワークを対象とした場合、分類対象となる VN 候補数が爆発的に増加し計算量が増大するため、ネットワークを縮約して設計

ネットワークの縮約を利用したアトラクター設計手法

- **対象とするネットワークを縮約した上でアトラクターを設計**
 - 分類対象となる VN 候補数を削減しつつ多様なアトラクターを設計

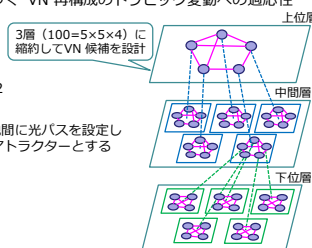
設計手順

1. 物理トポロジーのクラスター分割
 - c 個以下のクラスターに再帰的に分割
2. 最下位層クラスター内のトポロジー生成
 - スター型を重畳 or フルメッシュ型
3. 上位層のトポロジー生成
 - **前出のアトラクター設計手法を利用**
4. クラスター間リンクのマッピング
 - クラスター間リンクを実際の光パスに変換
 - トラフィック負荷を分散させるため、次数が小さいノード間を接続



性能評価

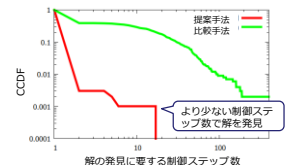
- **評価内容**
 - 提案手法により設計した VN 候補をアトラクターとしたときのアトラクター選択にもとづく VN 再構成のトラフィック変動への適応性
- **評価環境**
 - 物理ネットワーク
 - ノード数: 100
 - 各ノードのポート数: 32
 - 比較手法
 - ランダムに選択した対地間に光パスを設定して構成した VN 候補をアトラクターとする
 - 既存研究 [32] で利用



[32] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiomoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720-1731, June 2010.

評価結果: トラフィック変動への適応性

解の発見に要する制御ステップ数の分布



対地間トラフィック量: 対数正規乱数 1000 パターン (時間 = 0 で与える)
解: 最大リンク利用率を 0.5 以下に抑える VN

提案手法により設計した VN 候補をアトラクターとすることでアトラクター選択にもとづく VN 再構成により様々なトラフィック変動に応じて適切な VN を構成

Osaka University 13

Chapter 2 のまとめ

- **アトラクター (VN 候補) 設計手法を提案**
 - 互いに異なる特性を持たせることでアトラクターを多様に設計
 - 特徴: どの光パスがボトルネックリンクとなりやすいか
 - 提案手法により良好な性能を示す VN 候補を設計できることを確認
- **ネットワークの縮約を利用したアトラクター設計手法を提案**
 - 大規模ネットワークを縮約した上で多様なアトラクターを設計
 - 提案手法により良好な性能を示す VN 候補を設計できることを確認
- **提案手法で設計した VN 候補をアトラクターとしたときのアトラクター選択にもとづく VN 再構成の適応性を評価**
 - 様々なトラフィック変動に応じて少ない制御ステップ数で適切な VN を構成できることを確認
 - 物理トポロジーを考慮してネットワークを縮約しアトラクターを設計した場合でも、トラフィック変動への適応性が向上することを確認

本発表では割愛 ←

Osaka University 14

Chapter 3

Virtual Network Reconfiguration Based on Attractor Selection for Elastic Optical Path Networks

1. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Virtual Network Reconfiguration in Elastic Optical Path Networks for Future Bandwidth Allocation," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, pp. 633-644, September 2016.
2. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Noise-induced Virtual Network Topology Control for Elastic Optical Networks," *Technical Report of IEICE (TR2015-5-33)*, vol. 115, pp. 55-60, November 2015 (in Japanese).

Osaka University 15

Chapter 3 の背景・目的

- **従来のアトラクター選択にもとづく VN 再構成アプローチはエラスティック光通信網に適用不可**
 - エラスティック光通信網は波長資源を細粒度で柔軟に利用できるが、光スペクトル資源割り当て問題への対処が不可欠
- **光スペクトル資源割り当て問題に対処しつつトラフィック変動に適応することを目指す**
 - エラスティック光通信網に適用可能な VN 再構成手法を提案

光スペクトル資源割り当て問題

トラフィックを収容するための波長資源 (周波数スロット) の割り当てを決定

資源割り当て制約

- 光スペクトル連続性制約
- 経路する光ファイバーで同一周波数スロットを割り当て
- 光スペクトル幅連続性制約
- 1本の光パスには連続した周波数スロットを割り当て

[5] M. Jinno, et al., "Spectrum efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 66-73, Nov. 2009.

Osaka University 16

光スペクトル資源割り当て問題への対処

- **活性度 (VNの良さ) を資源割り当て制約を考慮するように定義**
 - 潜在帯域幅 $B_{potential}$ と最大リンク利用率 u_{max} を利用して定義
 - 潜在帯域幅 $B_{potential}$: 資源割り当て制約の下で追加可能な帯域幅
- 資源割り当て制約を考慮しつつトラフィック変動に適応することを期待

潜在帯域幅を反映

最大リンク利用率を反映

$$\text{活性度 } \alpha = \frac{B_{potential}}{B_{max}} \cdot \frac{u_{max}}{1 + \exp(\theta_{ps} \cdot (u_{max} - u_{maxst}))}$$

θ_{ps} : 潜在帯域幅の目標値
 u_{maxst} : 最大リンク利用率の目標値

潜在帯域幅の定義

$B_{potential} = \sum_{s,d \in V} B_{potential}^{s,d}$: 資源割り当て制約の下で各対地間で追加可能な帯域幅の合計

- ノードペア (s, d) 間に光パスが設定されている場合
- $B_{potential}^{s,d} = \min$ (ポートの未使用帯域幅, 資源割り当て制約の下で追加可能な周波数スロットの帯域幅)
- ノードペア (s, d) 間に光パスが設定されていない場合
- $B_{potential}^{s,d} = \min$ (未使用ポートの帯域幅, 資源割り当て制約の下で割り当て可能な周波数スロットの帯域幅)

- **周波数スロットの割り当て**
 - 簡単のため、既存のヒューリスティックアルゴリズム [57, 58] を利用

[57] K. Christodoulopoulos, et al., "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 66-73, Nov. 2009.

[58] R. Wang, et al., "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907-2911, Dec. 2012.

Osaka University 17

エラスティック光通信網に適用可能な VN 再構成手法

(Phase 1)
アトラクター選択にもとづく VN 再構成

- 資源割り当て制約を考慮しつつトラフィック変動に適応

$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot f(x) + \eta$

仮想トポロジー決定

設定: 周波数スロット割当 Longest Path First [57] First-last fit [58]

(Phase 2)
光パスの帯域幅の調整

- 波長資源を柔軟に利用

リンク利用率

帯域幅増加

帯域幅減少

時間

リンク利用率の観測

[57] K. Christodoulopoulos, et al., "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354-1366, Mar. 2011.

[58] R. Wang, et al., "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907-2911, Dec. 2012.

Osaka University 18

性能評価

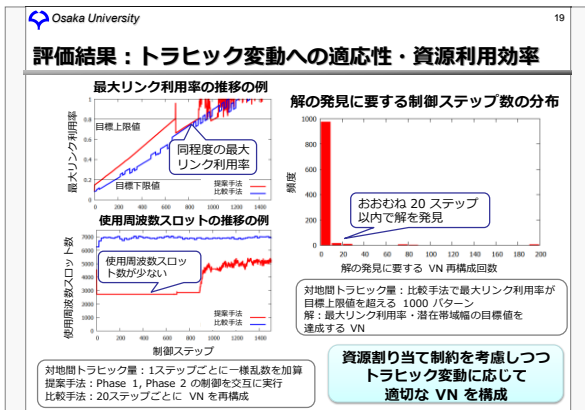
- **評価内容**
 - 提案手法のトラフィック変動への適応性と資源利用効率を評価
- **評価環境**
 - 物理ネットワーク (SLICE ネットワーク [5] を想定)
 - ノード (帯域可変光スイッチ + IP ルーター)
 - ノード数: 24, ポート数: 10
 - 各ポートの帯域幅: 100Gbps
 - リンク (光ファイバー)
 - 周波数スロット数: 380
 - 1スロットあたりの帯域幅: 10Gbps
- **比較手法**
 - MSF (Most Subcarriers First) [57] + First-last fit [58]
 - 現在のトラフィックを収容することのみを目的として VN を再構成
 - 対地間トラフィック量を長期的に観測し、トラフィック量が多い対地間から光パスを設定

▲物理トポロジー

[5] M. Jinno, et al., "Spectrum efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 66-73, Nov. 2009.

[57] K. Christodoulopoulos, et al., "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354-1366, Mar. 2011.

[58] R. Wang, et al., "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907-2911, Dec. 2012.



Osaka University 20

Chapter 3 のまとめ

- エラスティック光通信網に適用可能なアトラクター選択にもとづく VN 再構成手法を提案
 - エラスティック光通信網における資源割り当て制約の下で追加可能な帯域幅を反映した指標：潜在帯域幅と最大リンク利用率を利用して活性度を定義
 - 潜在帯域幅と最大リンク利用率の両方が改善するようにアトラクター選択により VN を再構成
- 提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価
 - 資源割り当て制約を考慮しつつトラフィック変動に応じて少ない制御ステップ数で適切な VN を構成できることを確認
 - 物理トポロジーが提案手法の性能に与える影響を評価し、波長資源割り当てのポトルネットワークが少ない方が望ましいことを確認
 - 波長資源の粒度が提案手法の性能に与える影響を評価し、波長資源の粒度が小さい方が資源利用効率を向上することを確認

本発表では 割愛

Osaka University

Chapter 4 Virtual Network Reconfiguration Based on Bayesian Attractor Model

1. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Bayesian-based Virtual Network Reconfiguration for Dynamic Optical Networks," submitted to IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, August 2017.
2. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "A Bayesian-based Approach for Virtual Network Reconfiguration in Elastic Optical Path Networks," in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, pp. Th1J-7, March 2017.
3. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "A Bayesian-based Virtual Network Reconfiguration in Elastic Optical Path Networks," Technical Report of IEICE (PN2016-33), vol. 116, pp. 45-50, November 2016 (in Japanese).
4. Toshihiko Ohba, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Virtual Network Reconfiguration Based on Bayesian Attractor Model with Linear Regression," Technical Report of IEICE (PN2017-37), vol. 117, pp. 57-63, November 2017 (in Japanese).

21

Osaka University 22

Chapter 4 の背景・目的

- アトラクター選択による探索の過程で VN を過度に再構成する可能性があるため、再構成回数をいかに削減するかが課題
- 再構成回数を削減しトラフィック変動に適応することを目指す
 - 経験済みのトラフィック変動に対しては当時のVNを構成することが有効
 - 認知・意思決定の機構を導入し、経験済みのトラフィック変動に適応
 - ベイジアンアトラクターモデル (BAM) [46] にもとづく VN 再構成手法を提案し、これを組み込んだ VN 再構成フレームワークを提案

[46] S. Bitzer, et al., "A bayesian attractor model for perceptual decision making," PLoS Computational Biology, vol. 11, p. e1004442, Aug. 2015.

Osaka University 23

ベイジアンアトラクターモデル (BAM) [46]

- 認知・意思決定の機構をベイズ推定の枠組みでモデル化
 - 観測値を得るたびに確信度を更新し、閾値に達したとき意思決定

観測値 x_t
 事後分布 $p(z | X_{1:t})$
 閾値 λ
 内部状態 z
 確信度 $p(z_t = \phi_i | X_{1:t}) \geq \lambda$?

状態方程式：
 複数の選択肢から一つを選択するダイナミクス
 $z_t - z_{t-\Delta t} = \Delta t \cdot f(z_{t-\Delta t}) + \sqrt{\Delta t} \cdot w_t$

観測方程式：
 内部状態から観測値を予測
 $x = M \cdot \sigma(z) + v = [\mu_1, \dots, \mu_D] \cdot \sigma(z) + v$

選択肢 μ_i ：観測値の平均的なパターン状態 ϕ_i ；選択肢 μ_i に対応する内部状態

24

Osaka University 24

BAM にもとづく VN 再構成手法

- BAM を応用して経験済みのトラフィック変動への適応を目指す
 - 特定のトラフィック状況とそれに対して良好な性能を示す VN を複数保持
 - BAM により現在のトラフィック状況を同定し、それに適した VN を構成
 - トラフィック状況：エッジルーターにおけるトラフィック流入パターン

分オーダーで取得可能
 エッジルーターのトラフィック流入パターン
 観測
 現在のトラフィック状況を保持する状況に含致する確信度
 現在のトラフィック状況を μ_2 に同定
 トラフィック状況 μ_1 , μ_2 , μ_3
 トラフィック状況 μ_2 に適する VN ϕ_2 を選択・再構成
 光通信網

- 構成した VN が現在のトラフィック状況に適していない場合、別途対処が必要

Osaka University 25

VN 再構成フレームワーク

- BAMにもとづく手法とアトラクター選択にもとづく手法を適用
 - エッジトラフィック量とリンク利用率を観測し、状況に応じ制御内容を変更 (不安定, 低)

Chapter 3 までの VN 再構成手法

ラベル (A, B) は遷移条件: A = 確信度, B = VN の性能 確信度が安定: 確信度が ϵ 連続して閾値以上

Osaka University 26

VN 再構成フレームワーク

- BAMにもとづく手法とアトラクター選択にもとづく手法を適用
 - エッジトラフィック量とリンク利用率を観測し、状況に応じ制御内容を変更

トラフィック状況を認知し過去の経験を活用する機構の導入

過度な再構成を抑制することを期待

Chapter 3 までの VN 再構成手法

Osaka University 27

性能評価

- 評価内容
 - 提案フレームワークのトラフィック変動への適応性と VN 再構成回数
- 評価環境
 - 物理ネットワーク
 - Chapter 3 の評価と同様
 - BAM にもとづく手法を利用するためにあらかじめ用意する情報
 - トラフィック状況 μ_1, \dots, μ_5
 - 対地間トラフィック量が T_1, \dots, T_5 (対数正規乱数) のときのエッジトラフィック量
 - VN g_1, \dots, g_5
 - T_1, \dots, T_5 を入力としてヒューリスティックアルゴリズム [57, 58] により算出

VN	トラフィック状況	エッジレターへの 対地間トラフィック量	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
g_1	μ_1	From \ To	1	...	24		
...	...	Node 1	*		
...
g_5	μ_5	Node 24	*

[57] K. Christodoulopoulos, et al., "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354-1366, Mar. 2011.

[58] R. Wang, et al., "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907-2911, Dec. 2012.

Osaka University 28

評価結果：トラフィック変動への適応性・VN再構成回数

トラフィック状況の同定後構成した VN の最大リンク利用率の分布

アトラクター選択にもとづく VN 再構成回数の分布

VN 再構成回数が減少

VN 再構成回数を削減しつつ適切な VN を構成

対地間トラフィック量 T_{actual} :
 * 制御ステップ ≈ 100 : $T_{actual} \sim N(T_1, \Sigma)$, $\Sigma = CV^2 \text{diag}(T_1)$
 * 制御ステップ ≈ 200 : $T_{actual} \sim N(T_2, \Sigma)$, $\Sigma = CV^2 \text{diag}(T_2)$
 乱数のシードを変更して 100 回実行

制御目標: 最大リンク利用率を 0.5 以下に抑える VN を構成
 比較手法: アトラクター選択にもとづく VN 再構成手法を単体で利用 (Chapter 3 の手法)

Osaka University 29

Chapter 4 のまとめ

- ネットワークの状況を認知し過去の経験を活用する機構を導入
 - 認知の機構をモデル化したベイジアンアトラクターモデル (BAM) にもとづく VN 再構成手法を組み込んだ VN 再構成フレームワークを提案
 - エッジレターへのトラフィック流出量を観測し、トラフィック状況を同定
 - 同定したトラフィック状況に適した VN を構成
 - 構成した VN が適さない場合、アトラクター選択により VN を再構成
 - エッジトラフィック量の観測により、トラフィック状況を同定できることを確認
 - VN 再構成回数を削減しつつ適切な VN を構成することを確認
 - 線形回帰にもとづくトラフィック状況の同定を導入し、VN 再構成フレームワークを拡張
 - トラフィック状況の同定に失敗したとき、現在のトラフィック状況を線形回帰でフィッティング
 - 得られた回帰係数を用いて VN を算出・構成
 - 構成した VN が適さない場合、アトラクター選択により VN を再構成
 - アトラクター選択による探索が必要になる場合が削減されることを確認
 - 保持するトラフィック状況の選択・更新方法を検討し、保持するトラフィック状況の集合が一次独立性を持つことが有効であることを確認

Osaka University 30

博士論文のまとめ

- 光通信網におけるアトラクターベースのVN再構成フレームワークを確立
 - アトラクター設計手法を提案
 - エラスティック光通信網に適用可能なアトラクター選択にもとづく VN 再構成手法を提案
- ベイジアンアトラクターモデル (BAM) にもとづく VN 再構成手法を組み込んだ VN 再構成フレームワークを提案
- 今後の課題
 - ネットワーク故障の認知・適応
 - 複数 VN の多重と協調制御

様々なトラフィック変動に迅速に適應する、光通信網におけるアトラクター選択にもとづく VN 再構成手法の確立

ネットワークの状況を認知し過去の経験を活用する機構の導入による再構成回数の削減

