

Osaka University

## バイズ型アトラクター選択モデルと線形回帰を用いた 仮想ネットワーク再構成手法の提案と評価

大場 斗土彦 荒川 伸一 村田 正幸  
大阪大学 大学院情報科学研究科

2017/11/16

Osaka University

## ネットワーク仮想化技術

- インターネット上のトラフィックを収容する柔軟な基盤を実現
  - 様々なユーザーの要求に対し動的に資源を割り当てることで仮想ネットワーク(VN)を提供
- VNの再構成が必須
  - トラフィック量が増大・変動する傾向は今後も継続
  - トラフィック変動に伴う輻輳を解消することで通信品質を改善

Osaka University

## 既存の VN 構成アプローチ

- 最適化アプローチ: 対地間トラフィックマトリクス情報をもとに最適な仮想トポロジを設計・資源(帯域幅)を割り当て
  - 直接取得した対地間トラフィックマトリクスを利用
    - 対地間トラフィックの取得には長期的な観測と膨大な処理能力が必要
    - トラフィック変動に追従して VN を再構成するのが困難
  - 推定した対地間トラフィックマトリクスを利用
    - 容易に取得可能なリンク利用率や過去のトラフィック量のデータをもとに推定
    - 推定誤差の発生が不可避

最適化アプローチではトラフィック変動に追従して適した VN を提供するのが困難

From \ To	1	2	...	10
1	-	23	-	4
2	15	-	-	1
...	...	...	...	...
10	6	7	-	-

対地間トラフィックマトリクス

早く正確に対地間トラフィックマトリクスの情報を取得するのは困難

対地間トラフィックマトリクス VN 設計アルゴリズムの入力として利用 最適な VN

Osaka University

## バイズ推定にもとづく VN 再構成手法 [9]

- 人間の認知・意思決定の振る舞いをモデル化したベイジアンアトラクターモデル (BAM) [8] を応用した VN 再構成手法
  - 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
  - バイズ推定により現在のトラフィック状況を同定し、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

エッジルーターにおけるトラフィック流入パターン:  $x_t$

ベイジアンアトラクターモデル (BAM)

事後確率  $p(x_t | X_{1:t})$

現在のトラフィック状況が  $\mu_t$  に合致する確信度が大きい

内部状態  $z$

状態  $\phi_t$  (トラフィック状況  $\mu_t$ )

光通信ネットワーク

トラフィック状況  $\mu_t$  に適した VN  $g_t$  を構成

[8] T. Ohba, S. Arakawa, and M. Murata, "A Bayesian-based approach for virtual network reconfiguration in elastic optical path networks," in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, pp. Th1-7, Mar. 2017.

[9] S. Blitzer, et al., "A Bayesian attractor model for perceptual decision making," PLOS Computational Biology, vol. 11, no. e1004442, Aug. 2015.

Osaka University

## バイズ推定によるトラフィック状況の同定

- BAM を応用してトラフィック状況を同定
  - 特定のトラフィック状況が与えられた上で、トラフィックを観測する度に現在のトラフィック状況がそれらの状況に合致する確率(確信度)を更新
  - 確信度が閾値に達したとき、トラフィック状況を同定

観測値  $x_t$  (エッジルーターにおけるトラフィック流入量)

ベイジアンアトラクターモデル (BAM)

状態空間モデルとしてモデル化

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

$$x_t = M \cdot \sigma(z) + v = [\mu_1, \dots, \mu_D] \cdot \sigma(z) + v$$

特定のトラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_D$  を保持

確信度

Yes: トラフィック状況を同定

No: 確信度が高まらない

Osaka University

## バイズ推定にもとづく VN 再構成手法における課題

- トラフィック状況の同定に失敗する場合に対処することが困難
  - 突発的なトラフィック変動が発生し、現在のトラフィック状況があらかじめ保持するいずれのトラフィック状況にも合致しない場合、同定に失敗
  - 文献 [10] の手法を用いることで良好な VN を構成できるが、課題あり
    - 文献 [10] の手法: 通信品質のみを観測しノイズを用いて良好な VN を探索
    - 過度な再構成により VN 上に収容されるサービスが中断されやすい課題あり

観測値  $x_t$

ベイジアンアトラクターモデル (BAM)

現在のトラフィック状況が  $\mu_1, \dots, \mu_D$  に合致する確信度を算出

突発的なトラフィック変動により  $x_t$  の傾向が  $\mu_1, \dots, \mu_D$  のいずれにも合致しない

Yes: トラフィック状況を同定

No: 確信度が高まらない

[10] T. Ohba, S. Arakawa, and M. 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, Sept. 2016.

Osaka University 7

### 研究の目的・アプローチ

- 研究の目的**
  - トラフィック状況の同定に失敗する場合に対処する VN 再構成手法の提案とその有効性の評価
- アプローチ**
  - BAM で保持する情報と線形回帰を用いて VN を算出・構成
    - BAM の観測方程式では、観測値は特定のトラフィック状況の線形和で表現
    - 観測方程式を応用し、線形回帰により現在のトラフィック状況をフィッティング

**BAM の観測方程式**

$$x = M \cdot \sigma(x) + v$$

$$= [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_D] \cdot (\sigma(z_1), \sigma(z_2), \dots, \sigma(z_D))^T + v$$

$$= \sigma(z_1)\mu_1 + \sigma(z_2)\mu_2 + \dots + \sigma(z_D)\mu_D + v$$

$$= w_1\mu_1 + w_2\mu_2 + \dots + w_D\mu_D + v$$

$$= \sum_{i=1}^D w_i\mu_i + v$$

観測値  $x$  は特定のトラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_D$  の線形和で表現

$x = (x_1, \dots, x_{2N})^T$ : 観測値 ( $N$ : ノード数)

$z = (z_1, \dots, z_D)^T$ : 内部状態

$\mu_i = (\mu_{i1}, \dots, \mu_{i2N})^T$ : トラフィック状況

$v = (v_1, \dots, v_{2N})^T$ : 誤差項

$\sigma(\cdot)$ : シグモイド関数

Osaka University 8

### BAM と線形回帰を用いた VN 再構成手法

- トラフィック状況の同定に失敗したとき、新たな VN を算出・構成**
  - Step 1: 線形回帰によるトラフィック状況のフィッティング
    - 現在のトラフィック状況を特定のトラフィック状況の線形和にフィッティング
  - Step 2: VN の算出・構成
    - 得られた回帰係数を利用して対地間トラフィック量を入力とし VN を算出

短周期で取得可能なトラフィック情報と文献 [9] の手法で保持する情報のみを用いて、突発的なトラフィック変動に対処可能となることを期待

ベイズ推定に基づく VN 再構成手法 [9] で保持する情報

From \ To	1	2	...	N
Node 1	-	23	...	4
Node 2	15	-	...	1
...	...	...	...	...
Node N	6	7	...	-

対地間トラフィック量

エッジルーターにおけるトラフィック出入量

トラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_D$

対地間トラフィック量  $T_1, \dots, T_N$

エッジルーターにおけるトラフィック出入量  $G_1, \dots, G_D$

ヒューリスティックアルゴリズム (MSF + First-last Fit)

Osaka University 9

### Step 1: トラフィック状況のフィッティング

- 線形回帰を用いて現在のトラフィック状況をフィッティング**
  - 現在のトラフィック状況  $\mu_{new}$  を特定のトラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_D$  の線形和にフィッティング

$$\mu_{new} = w_1\mu_1 + w_2\mu_2 + \dots + w_D\mu_D + v = \sum_{i=1}^D w_i\mu_i + v$$

$\mu_{new} = (\mu_{new1}, \dots, \mu_{new2N})^T$ : 現在のトラフィック状況 ( $N$ : ノード数)

$\mu_i = (\mu_{i1}, \dots, \mu_{i2N})^T$ : あらかじめ保持する特定のトラフィック状況

$w_i \in \mathbb{R}$  (スカラー): 回帰係数

$v = (v_1, \dots, v_{2N})^T$ : 誤差項

最小二乗法により残差平方和を最小にする回帰係数  $w_1, \dots, w_D$  を算出

$$RSS(w) = \epsilon^T \epsilon = (\mu_{new} - \hat{\mu}_{new})^T (\mu_{new} - \hat{\mu}_{new})$$

$$= \left( \mu_{new} - \sum_{i=1}^D w_i \mu_i \right)^T \left( \mu_{new} - \sum_{i=1}^D w_i \mu_i \right)$$

Osaka University 10

### Step 2: VN の算出・構成

- Step 1 で得られた回帰係数を利用して VN を算出・構成**
  - 回帰係数  $w_1, \dots, w_D$  を利用して現在の対地間トラフィック量  $T_{new}$  を表現
  - 特定のトラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_D$  に対応する対地間トラフィック量を利用

$$T_{new} = w_1T_1 + w_2T_2 + \dots + w_DT_D$$

$T_i$ : トラフィック状況  $\mu_i$  に対応する対地間トラフィック量  
文献 [9] の手法で保持しているため利用可能

- 対地間トラフィック量  $T_{new}$  を入力として VN  $G_{new}$  を算出・構成
  - ヒューリスティックアルゴリズム [11, 12] を利用
    - MSF (Most Subcarriers First) アルゴリズム [11]: 仮想トポロジーの決定
    - First-last Fit アルゴリズム [12]: 周波数スロットの割り当て
- VN  $G_{new}$  がトラフィックを収容できない場合、文献 [10] の手法を適用
  - 文献 [10] の手法を単独で用いた場合より VN の過度な再構成は抑制

[11] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Vartergis, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354-1369, Mar. 2011.

[12] R. Wang and B. Mukherjee, "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907-2911, Dec. 2012.

Osaka University 11

### 性能評価

- 評価内容**
  - ベイズ推定によるトラフィック状況の同定に失敗したときの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
- 評価環境**
  - 物理ネットワーク (USNET トポロジー)
    - ノード数: 24, ポート数: 10
    - 全ノードがエッジルーター
  - 制御目標
    - 最大リンク利用率を 0.5 以下に抑える
  - 文献 [9] の手法で保持する情報
    - 対地間トラフィック量  $T_1, \dots, T_5$ : 対数正規分布にしたがう乱数
    - トラフィック状況  $\mu_1, \dots, \mu_5$ :  $T_1, \dots, T_5$  に対応するエッジトラフィック量
    - 適した VN  $G_1, \dots, G_5$ : ヒューリスティックアルゴリズム [11, 12] により算出

▲ USNET トポロジー

Osaka University 12

### 予備検証結果: 提案手法で算出される VN の性能

- 提案手法が良好な VN を算出・構成できるかを評価**
  - 予備検証として、突発的なトラフィック変動に対してあらかじめ保持する VN  $G_1, \dots, G_5$  を構成した場合と比較

$G_1, \dots, G_5$  が示した最大リンク利用率

$G_{new}$  が示した最大リンク利用率

$G_1, \dots, G_5$  が示した最大の最大リンク利用率

$G_1, \dots, G_5$  より  $G_{new}$  が示した最大リンク利用率の方が小さい (1000/パターン中908/パターン)

評価に用いる対地間トラフィック量  $T$

- 突発的なトラフィック変動を想定した1000パターンの対地間トラフィック量
- 対数正規分布にしたがったあらかじめ保持する  $T_1, \dots, T_5$  とは異なる

突発的なトラフィック変動に対し、提案手法は良好な VN を算出・構成できる見込みが高い

Osaka University 13

### 評価結果：同定の成否・制御目標達成の成否の内訳

- トラヒック状況の同定に失敗したとき、提案手法により制御目標を達成する VN を構成可能かを評価
  - 突発的なトラヒック変動後にトラヒック状況の同定に成功したか否か、構成した VN が制御目標を達成したか否かを評価

69.1%の試行でトラヒック状況の同定に失敗するが、65.7%の試行で制御目標を達成する VN を構成  
 ↓  
 文献 [10] の手法による良好な VN の探索が必要となる状況を削減

評価に用いる対地間トラヒック量  $T_{actual}$   
 Time = 1~50:  $T_{actual} \sim N(T, \Sigma)$   
 Time = 51~100:  $T_{actual} \sim N(T, \Sigma)$

提案手法により、トラヒック状況の同定に失敗する場合におおむね対処可能

Osaka University 14

### 評価結果：残差平方和と最大リンク利用率の関係

- 線形回帰のあてはまりの良さと提案手法の性能の関係を評価
  - 前項のシミュレーション評価において、トラヒック状況の残差平方和と提案手法で算出した VN が示した最大リンク利用率の散布図をプロット

残差平方和が小さいほど最大リンク利用率が小さくなる傾向がある

トラヒック状況の残差平方和  
 $RSS(w) = \epsilon^T \epsilon = (\mu_{new} - \hat{\mu}_{new})^T (\mu_{new} - \hat{\mu}_{new})$   
 $= (\mu_{new} - \sum_{i=1}^D w_i \mu_i)^T (\mu_{new} - \sum_{i=1}^D w_i \mu_i)$

Osaka University 15

### 保持するトラヒック状況の選択・更新方法

- トラヒック状況を適切に選択・更新することが重要
  - 表現能力が高く残差が小さいほど提案手法で算出する VN の性能が向上
- トラヒック状況の選択方法の指針
  - トラヒック状況の線形和の表現能力が向上するよう  $D$  個選択
  - トラヒック状況 (ベクトル) の集合  $\{\mu_1, \dots, \mu_D\}$  に一次独立性を持たせる
    - 一次独立性を持つとき、それらのベクトルで張る空間の次元が最大
    - トラヒック状況の集合の一次独立性は、それらを各列とする行列  $M = [\mu_1, \dots, \mu_D]$  の階数が  $D$  に一致するかを調べることで容易に判定可能

$$\mu_{new} = w_1 \mu_1 + w_2 \mu_2 + \dots + w_D \mu_D + v = \sum_{i=1}^D w_i \mu_i + v$$

Osaka University 16

### 評価結果：表現能力と提案手法の性能の関係

- 保持するトラヒック状況が提案手法の性能に与える影響を評価
  - 以下のトラヒック状況を選択・保持したときの提案手法の性能を評価
    - Set 1: 一次独立性をもつトラヒック状況  $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5\}$  (階数: 5)
    - Set 2: 一次従属性をもつトラヒック状況  $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}\}$  (階数: 4)
    - Set 3: 一次従属性をもつトラヒック状況  $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}, \frac{\mu_2 + \mu_3}{2}\}$  (階数: 3)

提案手法で対処できない試行の割合が小さい

保持するトラヒック状況の集合が一次独立性を持つように選択することが有効

Osaka University 17

### まとめと今後の課題

- まとめ
  - ベイジアンアトラクターモデルと線形回帰を用いた仮想ネットワーク (VN) 再構成手法を提案
    - ベイズ推定によるトラヒック状況の同定に失敗する場合に対処
    - 線形回帰により現在のトラヒック状況をフィッティングし、得られた回帰係数を利用して表現した対地間トラヒック量を用いて VN を算出
    - 計算機シミュレーションによる評価により、トラヒック状況の同定失敗時におおむね現在のトラヒックを収容可能な VN を構成できることを示した
  - 保持するトラヒック状況の選択・更新方法を検討
    - 保持するトラヒック状況 (ベクトル) の集合が一次独立性を持つように選択することが有効であることを示した
- 今後の課題
  - 提案手法で設計される VN の性能を最適化するトラヒック状況の選択方法の検討