

Prediction Based Traffic Engineering Under Uncertainty

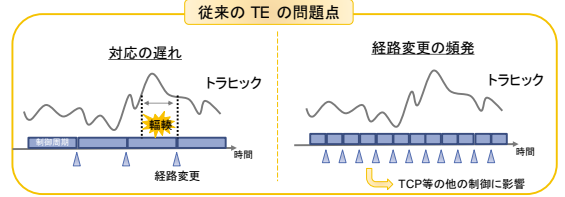
大阪大学 大学院情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻
村田研究室
大歳達也

2016/12/2

1

トラフィックエンジニアリング

- ネットワーク内のトラフィック変化量が増大
 - ・ストリーミング配信・クラウドサービス等の大容量通信
- トラフィックエンジニアリング (TE) が必要
 - ・トラフィックの定期的な観測・動的な経路最適化

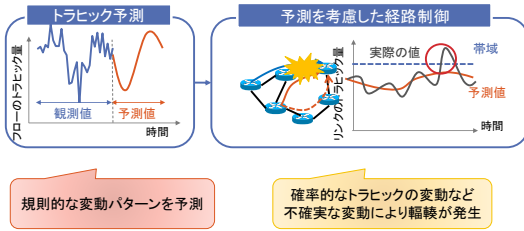


2016/12/2

2

トラフィック予測を用いた TE

- トラフィック変動に先立って経路変更し
- 将来の変動も考慮し急激な変更を避けた経路変更



2016/12/2

3

研究目的と博士論文の流れ

- 目的
 - ・予測型TEにおいて不確実なトラフィック変動を扱う手法を提案
 - ・不確実な状況下での予測型TEを実現
- 博士論文の構成

1. Introduction
2. Traffic Prediction Method for Traffic Engineering
 - ・不確実なトラフィック変動下でトラフィックを予測する手法を提案、TEにおける予測の効果を検査
3. Traffic Engineering Method Based on Model Predictive Control
 - ・先の将来の予測誤差の増大に対してロバストな経路制御手法の提案
4. Traffic Engineering Guaranteeing Risk Probability against Prediction Uncertainty
 - ・生じ得る予測誤差の情報を用いてトラフィックの収容を保障する制御手法の提案
5. Scalable Traffic Engineering by Hierarchical Model Predictive Control
 - ・階層型制御において生じるコントローラー間の干渉に伴う不確実性を扱う手法の提案
6. Conclusion

2016/12/2

4

Chapter 2 Traffic Prediction Method for Traffic Engineering

1. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, and Kohei Shiimoto, "Traffic Prediction for Dynamic Traffic Engineering," *Computer Networks*, vol. 85, pp. 36-50, July 2015.
2. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, and Kohei Shiimoto, "Traffic Prediction for Dynamic Traffic Engineering Considering Traffic Variation," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2013*, December 2013.
3. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, and Kohei Shiimoto, "Traffic Prediction for Dynamic Traffic Engineering Considering Traffic Variation," *Technical Reports of IEICE(IN2012-115)*, pp. 65-70, November, 2012 (in Japanese).

2016/12/2

5

Chapter 2 の目的

- 安全側の経路設定による不確実変動の影響回避
 - ・予期しないトラフィック増加により輻輳が発生
- 不確実な変動も含めてトラフィック変動を収容するような経路を設定



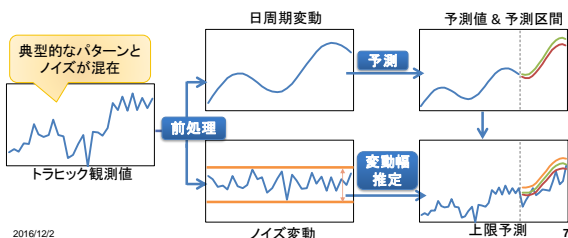
- 不確実変動も含めたトラフィック変動の予測手法を提案

2016/12/2

6

トラフィック予測手法

- 前処理により予測の対象を抽出
 - 予測の容易な日周期変動のみを予測の対象とすることで予測精度を向上
 - それ以外のノイズ変動は変動幅を推定
- 日周期の上側予測+ノイズ変動幅により変動の上限を予測

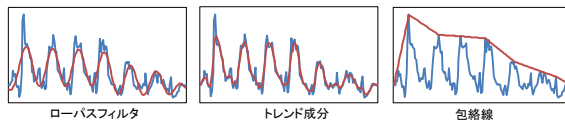


2016/12/2

7

予測前処理手法

- ローパスフィルタ
 - フーリエ周波数解析により低周波(24時間周期)成分を抽出
- トレンド成分
 - トレンド成分モデル^[1]に従ってトラフィックの増減傾向を抽出
- 包絡線
 - トラフィックのピーク値の動きを直線で補間

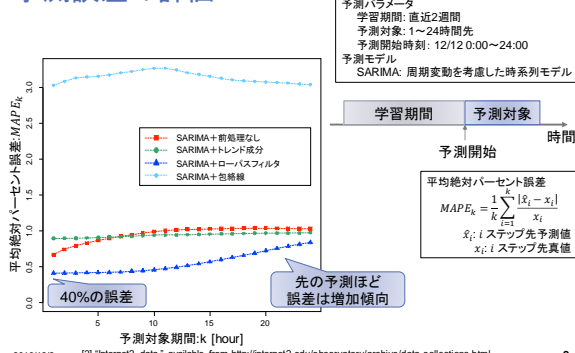


[1] G. Kitagawa and W. Gersch, "A smoothness priors-state space modeling of time series with trend and seasonality," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 79, no.386, pp.378-389, Jun. 1984

2016/12/2

8

予測誤差の評価

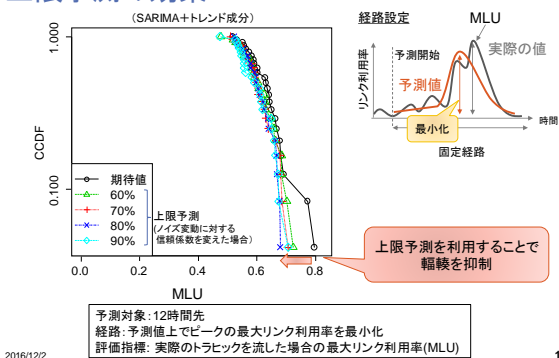


2016/12/2

[2] "internet2_data", available from <http://internet2.edu/observatory/archive/data-collections.html>

9

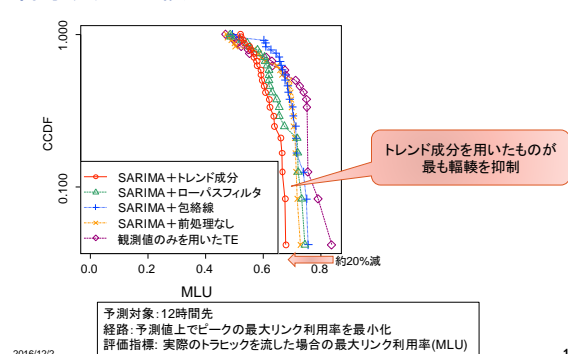
上限予測の効果



2016/12/2

10

各手法の比較



2016/12/2

11

Chapter 2 のまとめ

- トラフィックの上端を予測する手法を提案
 - 前処理により予測の容易な変動と予測困難な変動を分割
 - 上側予測と変動幅の推定によりトラフィックの上端を予測
- 評価により予測をTEに用いることの有効性を確認
 - 上端予測を活用することで誤差の影響を抑制
 - 観測値のみを用いるTEに比べて小さな帯域でトラフィックが収容可能

2016/12/2

12

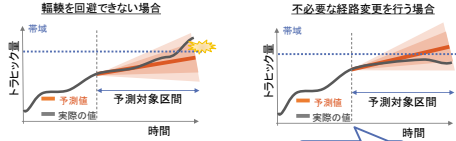
Chapter 3

Traffic Engineering Method Based on Model Predictive Control

1. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Traffic Engineering Based on Model Predictive Control," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E98-B, no. 6, pp. 996-1007 June 2015.
2. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Noriaki Kamiyama, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Evaluation of Traffic Engineering Considering Traffic Prediction," *Technical Reports of IEICE(IN2013-78)*, pp. 7-12, October, 2013 (in Japanese).
3. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Noriaki Kamiyama, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Evaluation of Traffic Engineering Based on Model Predictive Control Using Traffic Trace in Actual Network," *Technical Reports of IEICE(IN2013-194)*, pp. 299-304, March 2014 (in Japanese).

Chapter 3 の目的

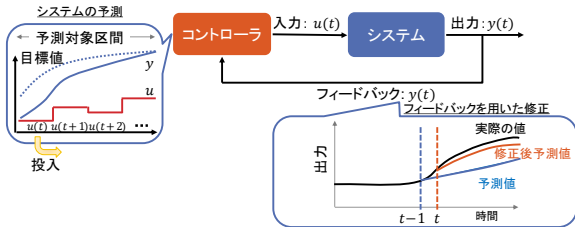
- 安定した経路制御には先の将来の予測が不可欠
- 先の将来の予測ほど予測誤差が拡大
- 誤差の影響で誤った経路変更が発生



将来の予測誤差に対してロバストな経路制御手法を提案

モデル予測制御 (MPC)^[3]

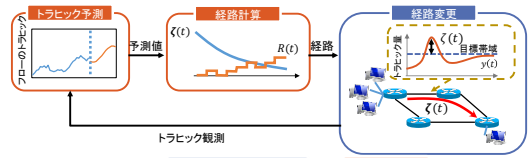
- システムの出力値を目標値に近づよう入力値を設定
- システムの将来の振る舞いを考慮した段階的な入力設計
- フィードバックを用いて予測・入力の修正



[3] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 7, pp. 733-764, Jul. 2003.

MPCに基づくTE (MP-TE)

- MPC の TE への応用
- 経路割当 R が入力、その結果リンク上流れるトラフィック y が出力
- 各リンクの目標帯域を超過した送流量 ζ を 0 に近づけることが目的



- 経路計算
- 目標帯域からの超過
- 経路変更量

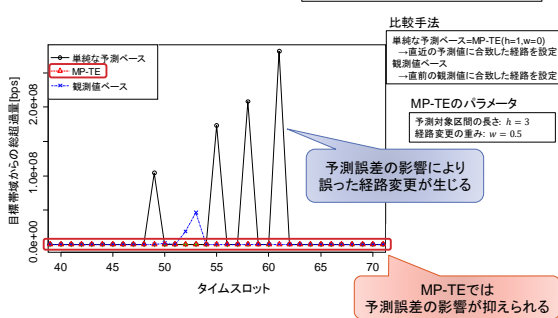
$$\text{minimize } \sum_{k=t+1}^{t+h} ((1-w)\|\zeta(k)\|^2 + w\|R(k) - R(k-1)\|^2)$$

$$\zeta_p(k) = \frac{1}{n_l} \max_{l \in p} [y_l(k) - c_l]^+$$

w : 経路変更の重み
 ζ : リンク上のトラフィック予測値
 c_l : リンク l の目標帯域
 n_l : リンク l に共有する経路数

目標帯域からの超過量

評価環境
 トポロジ: Internet2
 トラフィック: トレースデータ^[2] (2011/1/11, 12:00~12:05)
 予測方法: トラフィック増減率に基づいた予測



[2] "Internet2 data," available from <http://internet2.edu/observatory/archives/data-collections.html>

Chapter 3 のまとめ

- 予測誤差にロバストな経路制御MP-TEを提案
- 先の予測を考慮しつつも徐々に経路変更を進める
- フィードバックを用いて予測の定期的な修正を行う
- シミュレーション評価により提案手法の有効性を確認
- 先を予測しながら経路変更を抑えることで、予測誤差の影響を回避
- パラメータ設定に関する指針
- 経路変更の重みは $0 < w < 1$ の中間的な値が適切
- 予測対象となる期間は3スロットで十分
- 予測周期は細粒度である必要がある
- 1秒毎のトラフィック変動に対して1秒毎の予測が必要
- 制御周期は多少長くしてもトラフィック変動に対応可能である
- 1秒毎のトラフィック変動に対して10秒毎の制御で適切な経路設定が可能

本発表では割愛

Chapter 4

Traffic Engineering Method Guaranteeing Risk Probability against Prediction Uncertainty

1. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shimoto, and Tomoaki Hashimoto, "Traffic Engineering Based on Stochastic Model Predictive Control for Uncertain Traffic Change," in *Proceedings of IFIP/IEEE ManFI*, May 2015.
2. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shimoto, and Tomoaki Hashimoto, "Evaluation of Traffic Engineering Based on Model Predictive Control Using Traffic Trace in Actual Network," *Technical Reports of IEICE(IN2014-81)*, pp. 1-6, November 2014 (in Japanese).

2016/12/2

19

Chapter 4 の目的

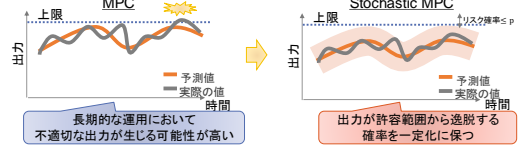
目的

- 予測値のみを用いると大きな誤差が生じた際に輻輳が発生

生じ得る予測誤差も考慮して輻輳を回避する経路制御手法を提案

アプローチ

- MPCにおいて予測誤差の分布を扱うStochastic MPC^[4]を経路制御に応用



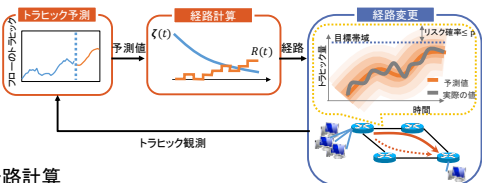
[4] T. Hashimoto, "Probabilistic constrained model predictive control for linear discrete-time systems with additive stochastic disturbances," in *Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 2013, pp. 6434-6439. 2016/12/2

20

Stochastic MP-TE

概要

- 各リンクの目標帯域を超過してトラフィックを送出する確率が p 以下に保持



経路計算

- minimize : $\sum_{k=t}^{t+h} ((1-w)||f(R(k))||^2 + w||R(k) - R(k-1)||^2)$
- subject to : $\forall l, P[y_l(k) > C_l] \leq p$

目標帯域を超過する確率を一定以下に保つ

w : 経路変更の重み
 f : コスト関数 (遅延など)
 C_l : リンク l の目標帯域
 p : リンク上のトラフィック予測値

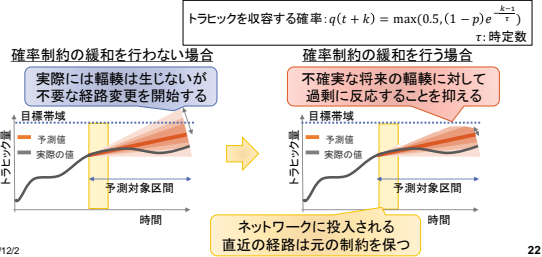
2016/12/2

21

確率制約の緩和

- 将来の予測誤差の増大により不要な経路変更が増加

- 遠い先の将来の確率制約を緩和し不要な経路変更を回避

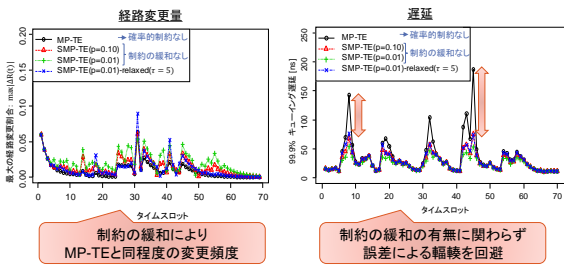


2016/12/2

22

Stochastic MP-TEの評価

評価環境
 トポロジ: Internet2
 トラフィック: トレースデータ^[2] (2012/2/6 - 2/12)
 予測対象区間: 5期先
 予測誤差: 正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う誤差
 $\sigma^2 = 0.3 V[x_i^2]$, $V[x_i^2]$: フロー i の分散



制約の緩和によりMP-TEと同程度の変更頻度

制約の緩和の有無に関わらず誤差による輻輳を回避

99.9% キューイング遅延: 99.9%のバケットがそれ以下の遅延となる遅延

2016/12/2

[2] "Internet2 data," available from <http://internet2.edu/observatory/archivi/data-collections.html>

23

Chapter 4 のまとめ

- 予測誤差による輻輳発生確率を一定以下に保つ手法を提案

- Stochastic MPCを応用することで誤差の影響を回避

- 遠い将来の誤差の影響を抑えるため確率制約の緩和方法の提案

提案手法の評価

- 確率制約により誤差発生時の輻輳を回避
- 制約の緩和を用いることで少ない追加の経路変更で動作

2016/12/2

24

Chapter 5 Scalable Traffic Engineering by Hierarchical Model Predictive Control

1. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Hierarchical Model Predictive Traffic Engineering," submitted to *IEEE/ACM Transactions on Networking*, September 2015.
2. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Hierarchical Traffic Engineering Based on Model Predictive Control," in *Proceedings of International Conference on Computing, Networking and Communications*, February 2016.
3. Tatsuya Otoshi, Yuichi Ohsita, Masayuki Murata, Yousuke Takahashi, Keisuke Ishibashi, Kohei Shiomoto, and Tomoaki Hashimoto, "Hierarchical Traffic Engineering Based on Model predictive Control," *Technical Reports of IEICE(IN2014-136)*, March 2015 (in Japanese).

2016/12/2

25

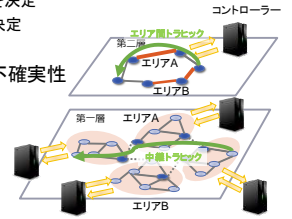
Chapter 5 の目的

- ・ネットワークの大規模化に伴う集中型制御の限界

- ・階層型制御とすることでスケーラビリティを確保
 - ・上位層はエリア間の大きな経路を決定
 - ・下位層はエリア内の詳細な経路を決定

- ・他の階層の動作による新たな不確実性

階層型で生じる別階層の制御による不確実な状況の変化を扱う制御を提案



2016/12/2

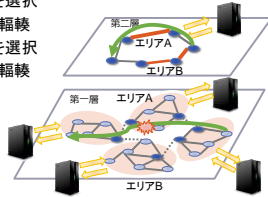
2016/12/2

26

階層間の制御干渉による振動

- ・制御の振動
 - ・他階層の制御変更によりネットワークの状態が変化
 - ・状態の変化に対応した制御変更が連続して生じ制御の振動を起こす

- ・例
 1. 上位層がエリアAを通る経路を選択
 2. Aは予想外のトラフィック流入で輻輳
 3. 上位層はエリアBを通る経路を選択
 4. Bは予想外のトラフィック流入で輻輳
 5. 1-4の繰り返し



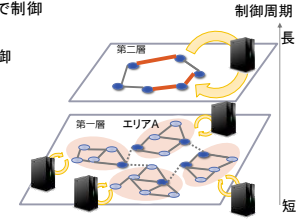
2016/12/2

27

従来手法における干渉回避

- ・従来の干渉回避^[5,6]
 - ・上位層は長周期、下位層は短周期で制御
 - ・下位層は上位層が不変の下で制御
 - ・上位層は下位層が収束した後に制御

問題点
上位層の制御が必要となった時に、上位層の制御が遅れる



[5] B.-J. Cheng and R.-H. Hwang, "Distributed cost-based update policies for QoS routing on hierarchical networks," *Information Sciences*, vol. 150, no. 1-2, pp. 87-108, Jan. 2004.

[6] M. Chamania, et al., "An adaptive inter-domain PCE framework to improve resource utilization and reduce inter-domain signaling," *Optical Switching and Networking*, vol. 6, no. 4, pp. 259-267, Dec. 2009.

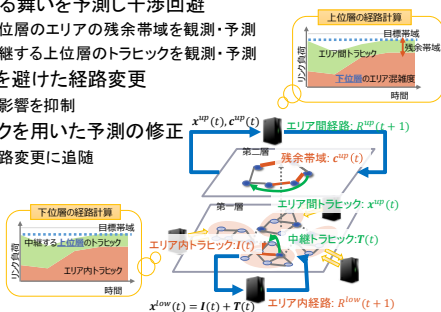
2016/12/2

2016/12/2

28

提案手法(階層型MP-TE)

- ・他階層の振る舞いを予測し干渉回避
 - ・上位層は下位層のエリアの残余帯域を観測・予測
 - ・下位層は中継する上位層のトラフィックを観測・予測
- ・大きな変更を避けた経路変更
 - ・予測誤差の影響を抑制
- ・フィードバックを用いた予測の修正
 - ・他階層の経路変更にも追従

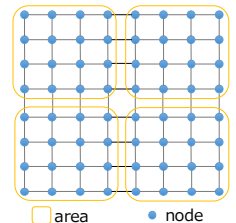


2016/12/2

29

評価環境

- ・ネットワーク環境
 - ・トポロジ: 格子状トポロジー(右図)
 - ・トラフィック: 右下図
 - ・ネットワークの分割: 4分割
- ・トラフィック予測
 - ・直近の増減率を用いた予測
- ・評価指標
 - ・目標帯域からの超過トラフィック量
- ・比較対象
 - ・観測値を用いた階層型TE



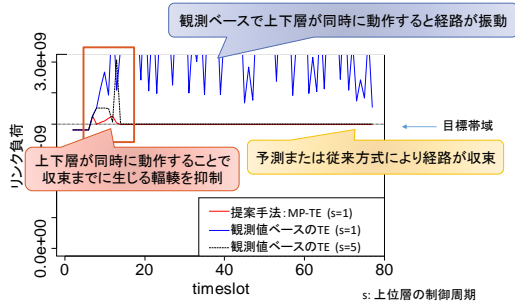
評価に用いたトラフィック変動パターン

2016/12/2

2016/12/2

30

評価結果



2016/12/2

31

Chapter 6 のまとめ

- MPCを適用した階層型TE手法を提案
 - 上下層が同時に動く状況下で、互いの振る舞いを予測し協調
 - 予測誤差が生じてその影響を抑えた制御
- シミュレーションにより提案手法を評価
 - 提案手法によって上位層におけるトラヒック変動への追随性が向上
 - 現実的な予測誤差の範囲内では、誤差がほぼ影響しないことを確認
 - 1ステップの予測誤差が70%以上の環境下でも適切に経路の設定が可能
 - 階層毎の適切なパラメータ設定方法を調査
 - 上位層ほど急激な経路変更を抑えた制御が必要
 - 上下層ともに、ある程度(5ステップ)先の予測が必要

本発表では割愛

2016/12/2

32

本論文のまとめ

- 不確実な状況下における予測型トラヒックエンジニアリングを提案
 - 予測誤差の上端予測手法を提案
 - 予測誤差にロバストな経路制御手法を提案
 - コントローラ間の干渉を予測に基いて回避する階層型経路制御手法を提案
- 今後の課題
 - 不確実な観測情報に基づいた予測・制御
 - トラヒック以外の観測情報を用いることによる予測精度の向上

2016/12/2

33