

## 確率的モデル予測制御に基づく トラフィックエンジニアリング

大歳達也† 大下裕一† 村田正幸†  
高橋洋介†† 石橋圭介†† 塩本公平†† 橋本智昭†††

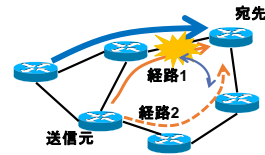
† 大阪大学 大学院情報科学研究科  
†† 日本電信電話株式会社  
NTT ネットワーク基盤技術研究所  
††† 大阪大学 大学院基礎工学研究科

2014/11/18

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



従来の TE の問題点  
 ・トラフィック変動時に対応の遅れが発生  
 ・場当たりの制御では頻繁な経路変更が発生  
 → ネットワークの不安定化

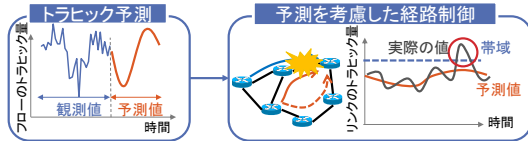
2014/11/18

2

## トラフィック予測を用いた TE

### 方法

- 過去の観測トラフィックから将来のトラフィックを予測
- 予測されたトラフィックを収容する経路を設定



### 利点

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

### 課題

- 予測誤差により誤った経路変更の発生

2014/11/18

3

## 研究目的とアプローチ

### 研究目的

- 予測される変動に追随しつつも予測誤差にロバストな TE の検討

### アプローチ

確率的モデル予測制御<sup>[1]</sup>(SMPC)

- システムの将来の振る舞いを予測
- フィードバックによる予測の修正
- 誤制御のリスクを一定以下に保障

TE への適用

- 将来のトラフィックを予測し経路変更
- 予測誤差にもロバストな経路変更

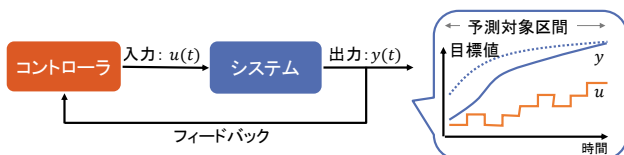
[1] T. Hashimoto, "Probabilistic constrained model predictive control for linear discrete-time systems with additive stochastic disturbances," in Proceedings of IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control, Dec. 2011, p. 6434–6439.

2014/11/18

4

## モデル予測制御 (MPC) [2]

- システムの出力値を目標値に近づくよう入力値を設定
- 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



将来のシステムの出力値の予測には予測誤差が含まれるため、フィードバックに基づいて予測を修正しながら制御を実行

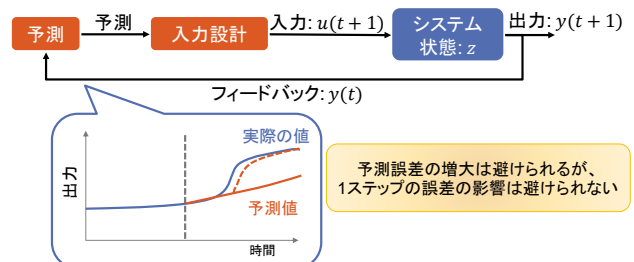
[2] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," Control Engineering Practice, vol. 11, no. 7, pp. 733–764, Jul. 2003.

2014/11/18

5

## フィードバックによる予測の修正

- 各制御周期では直近の入力値のみ投入
- 出力をフィードバックとして予測を修正し入力値を再計算
- 各時刻での入力値の変更量を抑え安定な設定変更



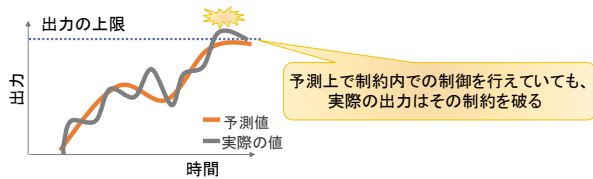
予測誤差の増大は避けられるが、1ステップの誤差の影響は避けられない

2014/11/18

6

## 予測誤差による誤制御

- システムは入出力が一定の制約に従って動作することが必要
  - 物理的制約・境界条件
- 予測誤差の発生時に制約を破る可能性が存在

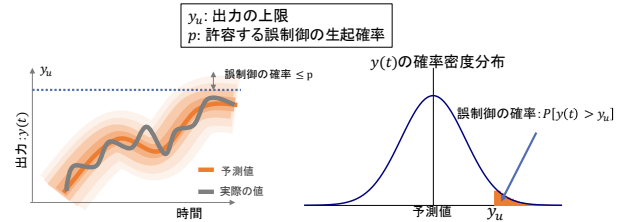


2014/11/18

7

## 確率的モデル予測制御 (SMPC)

- MPCにおいて確率的な予測誤差を扱う制御方式
- 予測誤差の確率分布に基づいて誤制御のリスクを一定以下に保証
  - 確率的制約:  $P[y(t) > y_u] \leq p$  の元で出力を設定

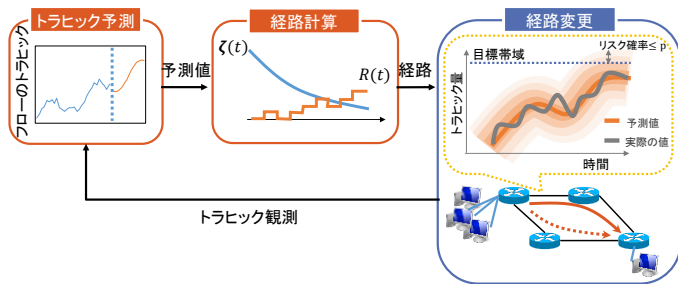


2014/11/18

8

## SMPC の TE への適用

- 経路割当  $R$  が入力、その結果リンク上に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てトラフィックを送出する確率を保障



2014/11/18

9

## SMP-TE (Stochastic Model Predictive TE)

各スロットの経路変更を抑える

定式化

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

subject to:

$$\hat{y}(k) = G \cdot R(k) \cdot \hat{x}(k)$$

$$\forall p, \forall f, R_{p,f}(k) \in [0,1]$$

$$\sum_{p \in \wp(f)} R_{p,f}(k) = 1$$

$$\forall l, P[y_l(k) > C_l] \leq p$$

動作図

トラフィック予測 → 予測値:  $\hat{x}$  → 経路計算 → 経路:  $R(t+1)$  → 経路変更 →  $y(t+1)$

トラフィック観測

$w$ : 経路変更の重み

$f$ : コスト関数

$G$ : ルーティング行列

$\hat{x}$ : トラフィック需要の予測値

$C_l$ : リンク  $l$  の目標帯域

$p$ : 許容される帯域超過確率

$\wp$ : 利用可能な経路の集合

$\hat{y}$ : リンク上のトラフィック予測値

$R$ : 経路割当

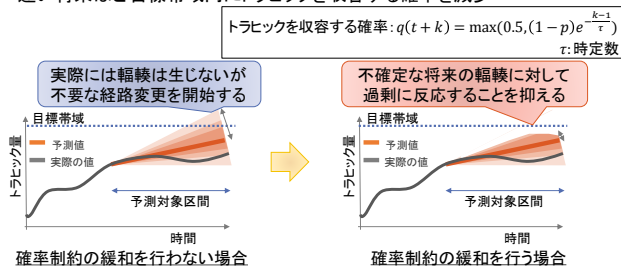
目標帯域を超過する確率を一定以下に保つ

2014/11/18

10

## 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
  - 実際には生じない輻輳に備えた経路変更が生じやすい
- 将来の確率制約を緩和し不要な経路変更を回避
  - 遠い将来ほど目標帯域内にトラフィックを収容する確率を減少



2014/11/18

11

## 評価環境

ネットワーク環境

- トポロジ: Internet2
- トラフィック: トレースデータ<sup>[3]</sup> (2012/2/6 ~ 2012/2/12)

予測誤差

- 正規分布  $N(0, \sigma_f^2 t)$  に従う誤差
- $\sigma_f^2 = 0.3 V[x_f^2]$

評価指標

$V[x_f^2]$ : フロー  $f$  の分散

- ボトルネックリンクのキューイング遅延
- 経路変更量:  $|R_p(t) - R_p(t-1)|$

比較対象

- 直近の予測値のみを用いる TE
- 予測誤差の分布を考慮しない MPC を用いた TE (MP-TE)

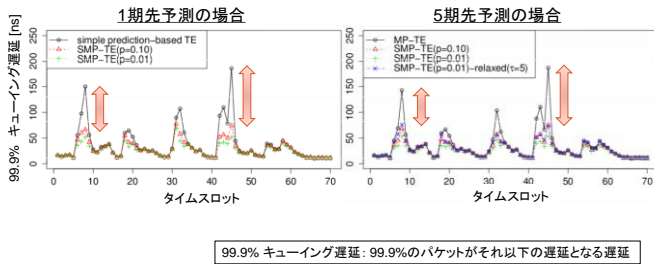
[3] "Internet2 data," available from <http://internet2.edu/observatory/archive/data-collections.html>

2014/11/18

12

## ボトルネックリンクにおけるキューイング遅延

- 比較手法では予測誤差の影響により輻輳が発生
- SMP-TEでは誤差分布を考慮することで誤差による輻輳を回避

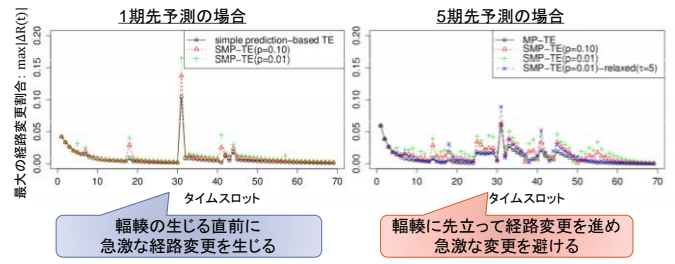


2014/11/18

13

## 各ステップに生じる経路変更

- 段階的な経路変更により急激な変更を回避
- 将来の予測誤差の増大のために経路変更の頻度が増加



2014/11/18

14

## 確率制約の緩和の効果

- 確率制約を緩和することで不要な経路変更を軽減
- 先の将来への反応が遅れることで瞬間的な経路変更は増加
- 緩和の早さ $\tau$ により変更頻度と対応の遅れのバランスを調節可能

各手法で生じた経路変更量( $p=0.01, h=5$ )

|                               | 平均     | 最大    | 頻度    |
|-------------------------------|--------|-------|-------|
| MP-TE                         | 0.074% | 6.28% | 33.3% |
| SMP-TE-relaxed( $\tau = 5$ )  | 0.10%  | 11.6% | 52.2% |
| SMP-TE-relaxed( $\tau = 20$ ) | 0.11%  | 8.91% | 62.3% |
| SMP-TE                        | 0.12%  | 5.97% | 78.2% |

平均: 全時刻・経路の $|\Delta R_p(t)|$ の平均  
 最大: 全時刻・経路の $|\Delta R_p(t)|$ の最大値  
 頻度: 1%以上の経路変更が生じたタイムスロットの割合

2014/11/18

15

## まとめと今後の課題

- まとめ
  - SMP-TEの提案
    - SMPCのアイデアをTEに導入
    - 確率制約の緩和方法の提案
  - SMP-TEの性能評価
    - 確率制約による輻輳の回避
    - トラフィック変動に先立って段階的な経路変更
- 今後の課題
  - 他のネットワーク制御(TCP等)への影響も考慮した $\tau$ の決定方法
  - 分散型制御によるスケーラビリティの確保
  - 実機を用いた実証実験

2014/11/18

16