

## トラフィック予測を考慮した トラフィックエンジニアリングの検討と評価

大歳達也† 大下裕一† 村田正幸† 高橋洋介††  
 上山憲昭†† 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

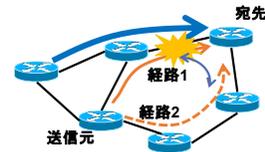
2013/10/17

IEICE IN研究会

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

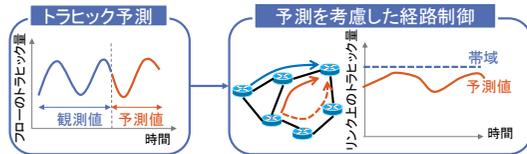
2013/10/17

IEICE IN研究会

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た安定な経路変更

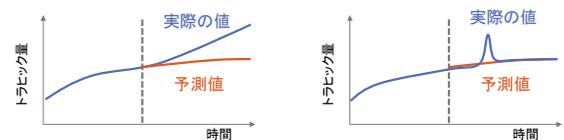
2013/10/17

IEICE IN研究会

3

## トラフィック予測の問題点

- 予測誤差の発生
  - 先の将来の予測ほど予測誤差が増大
  - 突発的な変動による予測誤差の発生



- 予測誤差の影響により誤った経路の設定
  - 正しくトラフィック変動に追従できず輻輳の発生

2013/10/17

IEICE IN研究会

4

## 研究目的とアプローチ

- 研究目的
  - 予測される変動に追従しつつも予測誤差にロバストな TE の検討
- アプローチ
  - モデル予測制御<sup>[12]</sup>(MPC)を TE へ適用
    - 将来の振る舞いを考慮した上での経路設定
    - 誤差が生じた場合もフィードバックにより即座に修正可能な制御
    - 突発的な予測誤差に対する過剰な反応を避けた安定な制御

[12] 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.

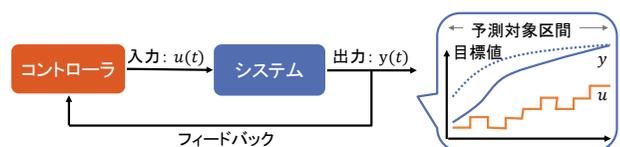
2013/10/17

IEICE IN研究会

5

## モデル予測制御

- システムの出力値を目標値に近づけよう入力値を設定
- 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
- 予測が外れても新たな状況に合わせて即座に修正



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、  
 予測誤差に対してロバストな入力設計を行うことが必要

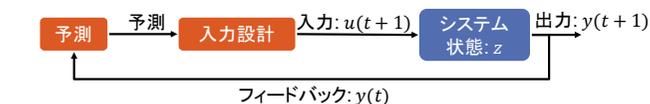
2013/10/17

IEICE IN研究会

6

## 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



### 入力設計

$$\text{minimize: } \sum_{k=t+1}^{t+h} (||y(k) - r_y(k)|| + w||u(k) - u(k-1)||)$$

$$\text{subject to: } z(k+1) = f(k, z(k), u(k)), y(k) = g(k, z(k), u(k))$$

$h$ : 予測対象区間の長さ  
 $r_y$ : 目標値  
 $w$ : 入力変更の重み  
 $f, g$ : システムの振舞い

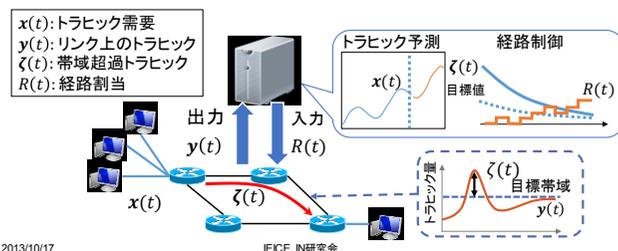
2013/10/17

IEICE IN研究会

7

## MPC の TE への適用

- 経路割当  $R$  が入力、その結果リンク上にかかるトラフィック  $y$  が出力
- 各リンクの目標帯域を超過した送出量  $\zeta$  を 0 に近づけることが目的
- 超過した送出量は次タイムスロットにおいても当該経路に残留



2013/10/17

IEICE IN研究会

8

## MPC を適用した TE

### 定式化

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

$$\text{subject to: } \hat{y}(k) = G \cdot (R(k) \cdot \hat{x}(k) + \zeta(k-1))$$

$$\forall p, \zeta_p(k) = \max_{l \in \wp} [\hat{y}_l(k) - c_l]^+ / n_l$$

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

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

$w$ : 経路変更の重み  
 $G$ : 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  
 $n_l$ : リンク  $l$  を共有する経路数  
 $\wp$ : 利用可能な経路の集合  
 $C$ : 帯域の最大値

### 動作

- トラフィック予測により将来のトラフィック需要  $\hat{x}$  を予測
- 上記最適化問題を解き、区間  $[t+1, t+h]$  における経路を計算
- 次タイムスロット  $t+1$  の経路設定のみ実際にネットワークへ投入
- 新たなトラフィック計測を元に予測を修正し経路を再計算

2013/10/17

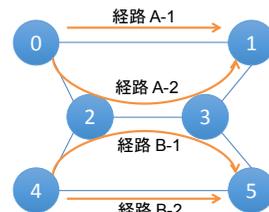
IEICE IN研究会

9

## シミュレーション評価

### 評価環境

- トポロジー: 右図
- フロー: 0→1, 4→5 間の 2 本
- 経路: 各フローについて 2 本
- トラフィック: フロー毎に増減



### 評価指標

- 目標帯域を超えて送出された総トラフィック量

2013/10/17

IEICE IN研究会

10

## 比較対象

### 観測ベースの TE

- トラフィックの予測値ではなく、観測値のみを元に経路を計算
- 現時刻の観測値  $x(t)$  のみを用いて次の経路  $R(t+1)$  を計算

### ZBPF (Zero-Buffer-Path-Flow)[14] モデルを適用した TE

- トラフィック予測を用いずに、MPC を適用した TE
- 将来到着するトラフィックをゼロ ( $\hat{x}(k) = 0$ ) と仮定
- 未送信のトラフィック量  $z(k)$  を一定時間内に解消するように経路を設定

$$z(k) = x(t) - \sum_{i=t}^{k-1} u(i) \quad u(i): \text{トラフィック転送レート}$$

[14] G. Retvari and G. Nemeth, "On optimal multipath rate-adaptive routing," in Proceedings of ISCC, Jun. 2010, pp.605-610.

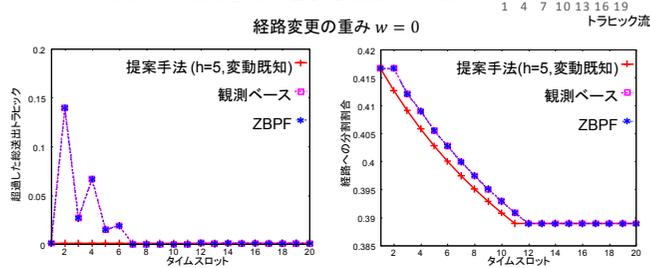
2013/10/17

IEICE IN研究会

11

## 将来の変動を予測する効果

### 将来のトラフィック変動を既知とした場合の評価



将来のトラフィック変動を予測して経路変更を進めることで、トラフィック変動時の輻輳を回避

2013/10/17

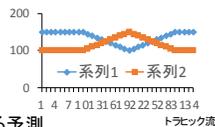
IEICE IN研究会

12

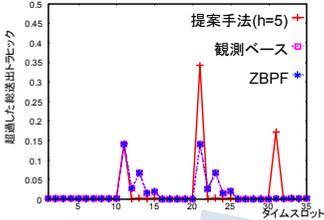
## 予測誤差の影響

- 予測を逐次修正した場合の評価

- 直近の過去 2 時点に対する直線の当てはめによる予測

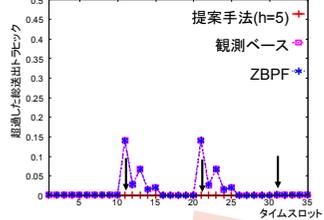


予測値をそのまま用いた場合 ( $w = 0$ )



予測誤差の影響を受けて  
目標帯域の超過が発生

経路変更を制限した場合 ( $w = 0.5$ )



経路変更を抑えることで  
予測誤差の影響を緩和

2013/10/17

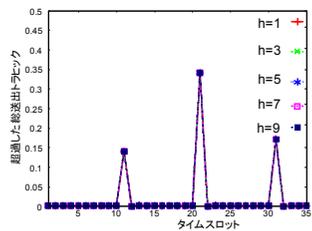
IEICE IN研究会

13

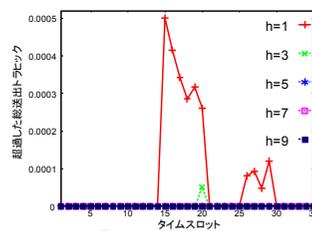
## 予測対象区間の長さ

- 提案手法のパラメータ  $h$  の影響を調べる

予測値をそのまま用いた場合 ( $w = 0$ )



経路変更を制限した場合 ( $w = 0.5$ )



1 ステップのトラヒックの増減は小さいため、  
 $h = 1$  では経路変更を過剰に避け、変動への対応が遅れる

2013/10/17

IEICE IN研究会

14

## まとめと今後の課題

- まとめ

- 予測されるトラヒック変動を考慮することで変動時の輻輳を回避可能
- 経路変更量を抑えることで予測誤差の影響を緩和
- 予測対象区間の長さ  $h$  をある程度大きくすることで変動への追従が向上

- 今後の課題

- より現実的なネットワーク環境でのシミュレーション
- 分散型制御へ拡張しスケーラビリティの確保

2013/10/17

IEICE IN研究会

15