

## Reducing ISPs' cost by application-level path selection and in-network caching

**ISPのコスト削減のためのアプリケーション層経路制御およびネットワーク内キャッシュに関する研究**

松田 一仁  
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

## 研究の背景: ISPのコスト構造

- インターネットは、ISPのネットワークの集合体
  - 個々のISPは、多数のIPルータで自身のネットワークを構築
  - ISP間のリンクはISP間の関係によって決定される
    - ISP間リンクの種類により、課金の仕組みが異なる

**トランジットリンク**  
ISPの接続性の確保のためにはられるリンク  
利用に際し下位のISPが上位のISPに  
トラフィック量に応じた金額を支払う

**ピアリングリンク**  
トランジットリンクの利用を避け、コストを  
削減する目的ではられるリンク  
通常、施設の維持費以外に課金が発生しない

peering link      transit link

12/12/13 #2

## 研究の背景: ISPのコスト構造に影響を与えるトラフィックルーティング技術 (1)

- アプリケーション層経路制御
  - エンド間ネットワーク性能指標（遅延時間、利用可能帯域など）を用いてアプリケーション層で経路を制御する
  - エンド間のネットワーク性能の向上が得られることが知られている
    - しかし、利用される経路はISPのコスト構造にそったものとは限らない

Application Layer

IP Network      Source Host      Destination Host      Endhost

Relay path provided by application-level routing      Direct path provided by IP routing

12/12/13 #3

## 研究の背景: ISPのコスト構造に影響を与えるトラフィックルーティング技術 (2)

- Content-centric networking (CCN)
  - コンテンツの名前を用いてルーティングを行うアーキテクチャ
    - エンドユーザはコンテンツ名を用いてリクエストを出す
    - 各ルータはコンテンツ名でルーティングテーブルを検索して転送先を決定する
    - 各CCNルータは通過するコンテンツをキャッシュする

content source      CCN router      request      content data      look up requested name

request for "/a.com/music/b.mp3"

個々のルータがキャッシュを持つことで、リンク帯域の消費を抑える

12/12/13 #4

## 研究の目的

- インターネットはISPのネットワークによって構成されている
- 各ISPは自身のコスト構造を踏まえ、利益を最大化しようとする経路制御を行なっている
  - ISPのコスト構造を無視したトラフィックルーティングは、持続的に利用することはできない
- 本研究では、新しい種類のトラフィックルーティングに対しISPのコスト構造に与える影響を検証し、コスト構造への悪影響の回避やISPのコスト削減を実現する手法を提案する
  - 新しい種類のトラフィックルーティングとして、アプリケーション層経路制御とCCNに着目する
  - この研究により、これらのトラフィックルーティングの持続的利用を可能にする
  - ISPのコストを削減することでインターネットの更なる発展に寄与する

12/12/13 #5

## 博士論文の構成

- Chapter 1 Introduction      **アプリケーション層経路制御に着目**
- Chapter 2 Reducing inter-ISP transit cost caused by application-level routing based on end-to-end network measurement
  - エンドホストのためのトランジットコストの増加を抑制したアプリケーション層経路選択手法
- Chapter 3 An application-level routing method with transit cost reduction based on distributed heuristic algorithm
  - アプリケーション層経路制御において、分散型のアルゴリズムを用いてノード間で協調する経路選択手法
- Chapter 4 Cooperative cache sharing among ISPs for additional reduction in inter-ISP transit cost in content-centric networking
  - 複数ISP間でCCNルータのキャッシュを共有し、効果的にトランジットコストを削減する手法
- Chapter 5 Conclusion      **Content-centric networkingに着目**

12/12/13 #6

### Chapter 2 Reducing inter-ISP transit cost caused by application-level routing based on end-to-end measurement

1. K. Matsuda, G. Hasegawa, S. Kamei, and M. Murata, "A method to reduce inter-ISP transit cost caused by overlay routing based on end-to-end network measurement," to appear in IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E96-D, no. 2, Feb. 2013.
2. K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "Decreasing ISP transit cost in overlay routing based on multiple regression analysis," in Proceedings of ICOIN 2010, Jan. 2010.
3. K. Matsuda, G. Hasegawa, S. Kamei, and M. Murata, "Performance evaluation of a method to reduce inter-ISP transit cost caused by overlay routing," in NETWORKS 2010, pp. 250-255, Sept. 2010.
4. K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "Decreasing ISP transit cost in overlay routing based on multiple regression analysis," Technical Report of IEICE (ICM2009-25), vol. 109, no. 120, pp. 67-72, July 2009. (in Japanese)
5. K. Matsuda, G. Hasegawa, S. Kamei, and M. Murata, "Reducing inter-ISP transit cost caused by overlay routing," Technical Report of IEICE (NS2010-17), vol. 110, no. 39, pp. 7-12, May 2010. (in Japanese)

### アプリケーション層経路制御が ISP のコストに与える影響

- アプリケーション層経路制御は、ISP のコスト構造を把握していないため、コスト構造を無視した経路を選択することがある
  - その結果、利用するトランジットリンクが増加し、ネットワーク全体のトランジットコストが増加する状況が発生する

IP によるルーティングでは通過トランジットリンクは 2 本

アプリケーション層経路制御によるルーティングでは通過トランジットリンクは 4 本

### 提案手法:トランジットコストの推定と経路選択

- エンドホストが容易に計算できるトランジットコストの推定式を導出する
  1. エンド間のネットワーク性能指標（ルータホップ数、遅延時間、利用可能帯域など）と真のトランジットリンク数との相関係数を求め、相関の強い性能指標を選出
  2. 選出した性能指標を用いて、経路上のトランジットリンク数を推定する重回帰式を導出

$$m_{ij}^e = b_0 + b_1 x_{ij}^1 + b_2 x_{ij}^2 + \dots + b_n x_{ij}^n$$

ノード i, j 間のトランジット数の推定値    n 番目の性能指標の係数

- 選択する経路の候補を次式によって決定する

トランジットコストを一定以下に抑えつつユーザ性能を最大化

$$T_{ikj} \leq T_{ij} + \alpha$$

オーバーレイ経路のトランジットコスト推定値    IP 経路のトランジットコスト推定値

### 評価結果:

提案手法を用いた経路選択によるユーザ性能向上とトランジットコスト削減

- PlanetLab ノード間の実測データを使って性能評価
  - ノード間の推定通過トランジットリンク数を一定以下に抑え、利用可能帯域を最大化する経路を選択

トランジットコストを制限することによるアプリケーション層経路の性能変化

- 適切な制限の設定により、制限なしの場合と同等の性能向上

トランジットコストを制限時の経路上のトランジットリンク数

- 制限なしの場合と比べ、平均 1 本以上のトランジットリンク数削減

性能向上率 = オーバーレイ経路の性能 / IP 経路の性能

### Chapter 3 An application-level routing method with transit cost reduction based on a distributed heuristic algorithm

1. K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "An application-level routing method with transit cost reduction based on a distributed heuristic algorithm," submitted to IEICE Transactions on Communications (conditionally accepted), July 2012.
2. K. Matsuda, G. Hasegawa, S. Kamei, and M. Murata, "Centralized and distributed heuristic algorithms for application-level traffic routing," in Proceedings ICOIN 2012, Feb. 2012.
3. K. Matsuda, G. Hasegawa, S. Kamei, and M. Murata, "An application-level routing method for improving end-to-end network performance based on heuristic algorithm," Technical Report of IEICE (NS2011-65), vol. 111, no. 196, pp. 23-28, Sept. 2011. (in Japanese)
4. K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "A dynamic application-level routing method reacting traffic changes based on distributed heuristic algorithm," Technical Report of IEICE (IN2012-36), vol. 112, no. 134, pp. 19-24, July 2012. (in Japanese)

### 利己的なアプリケーション層経路選択が抱える問題点

- 他ノードの経路選択状況を考慮せずに経路を決定すると、複数の経路でアプリケーション層のリンクを共有する可能性がある
  - 遅延時間の増加や利用可能帯域の低下など、アプリケーション層経路制御のメリットの劣化が起こる
- 通過するトランジットリンクが増加し、ネットワーク全体のトランジットコストが増加する

ノード A, B 間の経路、ノード C, D 間の経路で、ノード E, F 間のリンクを重複して利用している

IP 経路に比べて利用するトランジットリンクの数が増加

### 提案手法: 分散焼きなまし法を用いた経路制御手法

- 焼きなまし法とは、現在の解に近い解をランダムに生成して目的関数を評価し、その結果に従い確率的に遷移を行うことで良い解にたどり着く手法
- 分散焼きなまし法では、それぞれのノードが解の一部を担当して、焼きなまし法と同様の方法で部分解を決定し、これを他ノードと共有する
  - この手順を繰り返すことで、全体として良い解にたどり着く
- 提案手法では、ユーザ性能を目的関数とする最適化問題を定義し、分散焼きなまし法で制限条件を満たす解を求める
  - それぞれのノードが選択した経路の集合を解とし、その解によって得られるであろう推定ネットワーク性能の平均値を目的関数とする
  - ノード間で選択した経路を交換し、自身を送信元とする経路を変数として焼きなまし法を実行する
  - 定期的に経路情報交換と焼きなまし法を繰り返し、トラフィック要求量の変動に対応する

● 博士学位論文 公研会 12/12/13 ● 13

### 評価結果: 提案手法を用いた経路制御による経路重複の回避

- PlanetLab ノードが提案手法を用いてアプリケーション層経路制御を行う状況を想定
  - 全ノード間経路の推定遅延時間の平均値を目的関数とし、提案手法を実行

帯域利用率が1になると推定される経路数

比較手法はそれぞれのノードが独立して最も良い性能をもつ経路を選択した場合

提案手法を用いて協調した場合、協調しない場合に比べて過負荷な経路の数を大きく削減

経路の重複を避けて、大きな性能向上が得られる

IP 経路以下という制限を加えることにより制限なしの場合に比べてトランジットコストを約 20% 削減できる

Table 1: Average value of transit cost of the AL routes

proposed method (with IP constraint)	proposed method (without IP constraint)	non-cooperation method
5,186	4,260	

● 博士学位論文 公研会 12/12/13 ● 14

### 2章および3章のまとめ

- ISP 間のトランジットコストの増加を抑制しつつ、ユーザ性能の向上が得られるアプリケーション層経路選択手法を提案
  - アプリケーション層経路制御は、ユーザ性能の向上が得られる一方で、ISP のコストを増加させるため
- 2章では、
  - エンドユーザが容易に取得できるネットワーク性能指標からトランジットコストを推定し、これを用いて経路選択する手法を提案
  - エンドユーザは、簡単な計算だけで ISP のコストを指標とした経路選択が可能
- 3章では、
  - ノード間で経路選択状況を交換し、互いの経路選択の影響によるユーザ性能の悪化を避ける経路選択手法を提案
  - ノード間での情報交換と焼きなまし法の実行というオーバーヘッドはあるものの、高いユーザ性能を実現

● 博士学位論文 公研会 12/12/13 ● 15

### Chapter 4 Cooperative cache sharing among ISPs for additional reduction in inter-ISP transit cost in content-centric networking

1. K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "Cooperative cache sharing among ISPs for additional reduction in inter-ISP transit cost in content-centric networking," submitted to IFIP Networking 2013, May 2013.

● 12/12/13 ● 16

### CCN が ISP のコストに与える影響

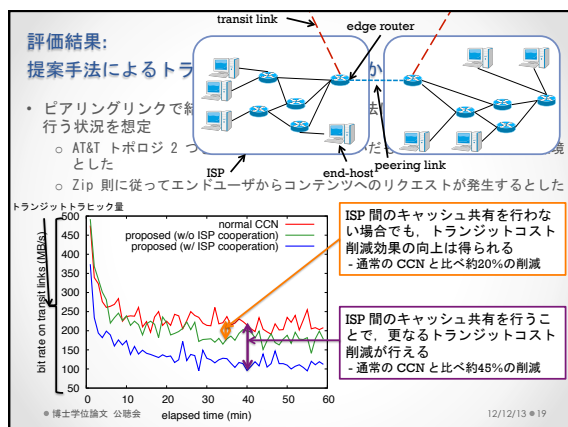
- CCN ルータは通過するコンテンツをキャッシュし、同様のコンテンツへのリクエストがあればキャッシュしたものを返信する
  - キャッシュが ISP 内にあればトランジットコストを削減できる
  - CCN ルータのキャッシュメモリは限られており、これは多種多様なコンテンツに対して十分とはいえない
  - 経路上のキャッシュしか利用することができない
- ピアリングリンクで結ばれた ISP 間で互いのキャッシュを互いに利用できればトランジット削減効果を高められる可能性がある

● 博士学位論文 公研会 12/12/13 ● 18

### 提案手法: 複数 ISP 間における CCN ルータキャッシュ共有手法

- 提案手法における CCN ルータの挙動
  - CCN ルータ間でキャッシュを共有し、互いに利用する
    - 各ルータが自身のキャッシュしているコンテンツ名を通知することで、経路外のキャッシュを利用できるようにする
  - 共有するキャッシュに含まれるコンテンツの重複をなくす
    - 限られたキャッシュメモリを有効に活用するため
  - ピアリングリンクで結ばれた ISP 間でもキャッシュを共有する
    - ピアリングリンクの利用に関してはトランジットコストが発生しないため、どちらの ISP にとってもトランジットコスト削減というメリットが発生する
    - ただし、ISP 間で負担を公平にするため、互いのキャッシュへのアクセス頻度のバランスを維持する

● 博士学位論文 公研会 12/12/13 ● 18



### 4章のまとめ

- 複数 ISP 間において CCN ルータのキャッシュを共有することにより、大きくトラフィックコストを削減する手法を提案
  - 通常の CCN では経路上のキャッシュしか使わないが、提案手法は経路外のキャッシュも含めて共有する
  - キャッシュを共有する CCN ルータ間で重複を排除してキャッシュヒット率を高め、トラフィックコスト削減効果を高める
  - ピアリングリンクで結ばれた ISP 間でもキャッシュを共有する
    - コンテンツへのアクセス頻度を同程度にすることで、互いの ISP へのトラフィック量のバランスを保つ
  - シミュレーション評価では、最大 45% のトラフィックリンクを通過するトラフィックを削減できた

● 博士学位論文 公聴会 12/12/13 ● 20

### 本研究のまとめ

- インターネットは多数の ISP によって構成されている
  - ISP のコスト構造を無視したトラフィックルーティングは持続しない
  - 新しいトラフィックルーティングであるアプリケーション層経路制御、CCN は ISP のコスト構造を踏まえたものである必要がある
- アプリケーション層経路制御に関して
  - トラフィックコストの増加を回避しつつ、同時にユーザ性能の向上を得る経路選択手法を提案
  - 分散焼きなまし法を用いて、他ノードと協調した経路選択を行う手法を提案
- CCN に関して
  - 複数の ISP 間で CCN ルータのキャッシュを共有し、大きなトラフィックコスト削減効果を得られる手法を提案

● 博士学位論文 公聴会 12/12/13 ● 21

### 提案手法: トラフィックコストの推定と経路選択

- エンドホストが容易に計算できるトラフィックコストの推定式を導出する
  - エンド間のネットワーク性能指標（ルータホップ数、遅延時間、利用可能帯域など）と真のトラフィックリンク数との相関係数を求め、相関の強い性能指標を選出
  - 選出した性能指標を用いて、経路上のトラフィックリンク数を推定する重回帰式を導出
$$m_{ij}^e = b_0 + b_1 x_{ij}^1 + b_2 x_{ij}^2 + \dots + b_n x_{ij}^n$$

ノード i, j 間のトラフィックリンク数の推定値      n 番目の性能指標の係数
- 選択する経路の候補を次式によって決定する
  - トラフィックコストを一定以下に抑えつつユーザ性能を最大化
  - ユーザ性能劣化を一定以内に抑えつつトラフィックコストを最小化
$$T_{ikj} \leq T_{ij} + \alpha$$

$$P_{ikj} \leq P_{ij} \times (1 + \beta)$$

$$P_{ikj} \geq P_{ij} \times (1 - \beta)$$

遅延時間      利用可能帯域

● 博士学位論文 公聴会 12/12/13 ● 22

### 提案手法: 分散焼きなまし法を用いた経路制御手法

- ユーザ性能を目的関数とする最適化問題を定義し、分散焼きなまし法で制限条件を満たす解を求める
  - 他ノードと経路選択状況を交換する
    - 提案手法実行開始時の選択経路は IP 経路と同じ経路
  - 他ノード間のもを含むすべての経路のユーザ性能平均値を目的関数とし、自身を送信元とする経路を変化させる分散焼きなまし法を実行
    - 経路の性能は、事前に計測した IP 経路のネットワーク性能を他ノードと共有した上で、ノード間のトラフィック要求量から推定する
    - 経路の選択に 2 章で提案したトラフィックリンク数の制限を加える
  - 定期的に手順 1, 2 を繰り返し、ノード間のトラフィック要求量の時間変動によるネットワーク性能の変化に追従した経路選択を行う

● 博士学位論文 公聴会 12/12/13 ● 23

### 参考: 今後の課題

- アプリケーション層経路制御のユーザに対し、どのように提案手法を利用してもらうかの検討
  - ISP が提案手法を用いた経路制御を行い、選択した経路をユーザに伝えるといった利用方法が考えられる
    - この場合、ISP は自ネットワークの情報を全て他 ISP と交換することを避ける可能性があり、限られた情報で高い性能を得るための拡張が必要になる
- 提案した CCN におけるキャッシュ共有手法の拡張性を確保するための研究
  - 現手法は、共有するコンテンツ名の通知にフラッディングを用いるため、ノード数に対して拡張性が低い
  - エッジルータを頂点とし、階層構造を構築する手法が考えられる

● 博士学位論文 公聴会 12/12/13 ● 24

**参考: 提案手法:****複数 ISP 間における CCN ルータキャッシュ共有手法**

- 提案手法における CCN ルータの挙動
  - CCN ルータ間でキャッシュを共有し、互いに利用する
  - 共有するキャッシュに含まれるコンテンツの重複をなくす
  - ピアリングリンクで結ばれた ISP 間でもキャッシュを共有する
    - ・ ただし、互いのキャッシュへのアクセス頻度のバランスを維持する

**ISP 内におけるキャッシュ共有**

1. 各 CCN ルータが自身のキャッシュからアクセス頻度の高いコンテンツを一定数、他 CCN ルータに通知
  - ・ 通知したコンテンツは、次回の通知まで廃棄しない
2. 他ルータから通知を受けたコンテンツをキャッシュせず、保持していた場合は破棄

**ISP 間におけるキャッシュ共有**

1. エッジルータ間で、ISP 間で共有するコンテンツを互いに通知
  - ・ 互いのアクセス頻度が等しくなるよう共有コンテンツを追加していく
2. 共有しているコンテンツへのアクセス頻度に大きな差がある場合は、相手からのアクセス過多の ISP がキャッシュするコンテンツを減らす

● 博士学位論文 公開会

12/12/13 ● 25