

Osaka University Advanced Network Architecture Research Group  
http://www.anarg.jp/

## 回線コストに基づく インターネットトポロジー生成モデルの提案と評価

大阪大学 大学院情報科学研究科  
且高 直人、荒川 伸一、村田 正幸

2007/6/22 情報ネットワーク研究会

Osaka University

### 発表の概要

- 研究の背景
  - インターネットがべき則に従う
  - ネットワーク制御手法が評価されている
  - 適切なインターネットトポロジーの生成モデルが必要である
- 研究の目的
  - ISPネットワークの形成要因を明らかにする
- 研究の方法
  - コスト最小化に基づくトポロジー生成モデルの提案、評価
- 提案モデルの概要
- 評価結果
- まとめ、今後の課題

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 2

Osaka University

### インターネットトポロジーの観測

- インターネットの出線数分布がべき則に従う
  - ASレベルトポロジー
    - ノード: Autonomous System
    - リンク: AS間の相互接続
  - Internet Service Provider トポロジー (ルータレベルトポロジー)
    - ノード: ルータ
    - リンク: ルータ間の接続

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 3

Osaka University

### べき則に従うネットワーク

- 出線数が  $k$  であるノードの出現確率:  $P(k) = k^{-\gamma}$

- インターネットだけでなく、現実の様々なネットワークで観測される
  - 人間関係ネットワーク
  - 食物連鎖ネットワーク
  - タンパク質の相互作用ネットワーク

べき則に従うトポロジー生成モデル

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 4

Osaka University

### ネットワーク制御の研究

- ネットワーク制御の性能を評価する
  - 経路制御、フロー制御、輻輳制御、...
- 評価対象のトポロジーが必要である
- 観測データより得たインターネットトポロジーを用いる
  - いま現在のインターネットにおける性能しか示せない
- 将来的な性能も示す必要がある

インターネットトポロジーの生成モデルが必要

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 5

Osaka University

### 同一出線数分布を有するトポロジー

- 複数のトポロジーが存在し、それぞれ構造が異なる
  - 収容可能なトラフィック量が大きく異なる
- ネットワーク制御を正しく評価できない

Figure 6 of [6]

出線数以外の構造特性に注目する必要がある

[6] L. U. D. Aderson, W. Willinger, J. Doyle, R. Tanaka, and S. Low, "A first-principles approach to understanding the Internet's multi-level topology," in Proceedings of the 2004 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM 04), vol. 34, pp. 3-14, NY, USA, Oct. 2004.

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 6

Osaka University

## ISPTポロジ-の大きな特徴

- クラスタ係数が高い
  - あるノ-ドを基点に三角形がどれだけあるか?

Figure 2 of [9] Figure 1 of [9]

ISPTポロジ- 生成モデル

ISPTポロジ-で多い  
生成ポロジ-で少ない

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 7

Osaka University

## 研究の目的

- ISPTポロジ-には、設計者の意図が影響する
  - 通信品質、コスト、信頼性
- ネットワーク設計に基づいた生成モデルを提案した [9]
  - ネットワークの設備増強をモデル化している
  - クラスタ係数がISPTポロジ-と近いポロジ-が生成できる
  - △ 設備増強の際に、コストを考慮していない
  - △ 一様なトラフィックを考えている

※ ISPTポロジ-の形成要因を明らかにする

- ネットワークコスト
- トラフィックの偏り

トポロジ-形成にどのように影響するのか?

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 8

Osaka University

## ネットワークコスト

- 回線コストに着目する
  - 回線距離や回線容量に応じて変化する
    - 回線距離が長い回線ほど、コストが高い
    - 回線容量が大きい回線ほど、コストが高い
  - コスト関数でモデル化する

$f_D(d_l) \times f_B(b_l)$

$f_D(d_l)$ : 回線距離  $d_l$  に関して単調増加  
 $f_B(b_l)$ : 回線容量  $b_l$  に関して単調増加

コスト関数を  $d_l \times b_l$  とすると、  
この回線の回線コストは、  
 $3k \times 600M$  で与える

3km / 600Mbps

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 9

Osaka University

## トポロジ-生成アルゴリズム

### A) ネットワークの成長

1. ノ-ドを追加する
2. 既存ノ-ドのうち、接続後のネットワークコストを最小にするノ-ドに追加ノ-ドを接続する

※ 回線容量の上限値(10 Gbps)を超える場合は接続しない

既存トポロジ-

追加ノ-ド

ネットワークコスト: 80,000 ネットワークコスト: 20,000 ネットワークコスト: 10,000

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 10

Osaka University

## トポロジ-生成アルゴリズム

### B) 迂回回線の追加

- 収容トラフィックが最も多い回線の周辺ノ-ドペアで、接続後のネットワークコストを最小にするノ-ド間に迂回回線を追加する
  - 一方のノ-ドと他方のノ-ドの隣接ノ-ド間
  - 右のトポロジ-では、  
 $s_1-t, s-t_1, s-t_2, s-t_3$

### C) 最大リンク負荷を抑える回線の追加

- 迂回回線と同様にして追加する

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 11

Osaka University

## 生成・比較対象

- 生成対象
  - Sprint社のトポロジ- [3]
    - 467ノ-ド、1280リンク
- 比較対象
  - Sprint社のトポロジ-
  - BAモデル ( $m = 2$ )
  - FKPモデル ( $m = 2, \alpha = 20$ )
  - コスト関数を変えた場合の提案モデル
  - トラフィックを一様にした場合の提案モデル

[3] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 12, pp. 2-16, Feb. 2004.

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 12

Osaka University

### 評価指標

- クラスタ係数
- 平均パス長
- Betweenness centrality [16]
  - トポロジーにおいて、あるノードやリンクがどれだけ重要か？
    - ノードやリンクを経由する最短経路の数
    - ノード間トラフィック量が一律に1bpsで、最短経路制御を行った場合に、各ルータ、回線に流れるトラフィック量と考えられる
    - ネットワーク制御の評価で重要になる

↓

- これらの指標の分布が、ISPTポロジでの分布に近いほど良い

[16] L. C. Freeman, "Centrality in social networks: Conceptual clarification," Social Networks, vol. 1, no. 3, pp. 215-239, 1979.

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 13

Osaka University

### 生成パラメータ・条件

- 提案モデルにおけるトラフィックの分布
  - gravity モデル+人口分布
    - 人口分布: 2000年代の国勢調査 [14, 15] より取得
    - $\chi$ : ISPTポロジで収容トラフィック量が最大になるまでスケール
- 提案モデルおよびFKPモデルにおけるノード配置
  - ISPTポロジを基に、緯度・経度情報より  $[0, 1]^2$  に正規化
- 提案モデルにおけるコスト関数
 
$$f_D(d_l) \times f_B(b_l) = d_l^w \times \log b_l \quad (w = 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8)$$

$$d_l \times b_l \quad \rightarrow \quad d_l^4 \times \log b_l$$

[14] U.S. Census Bureau, "Census 2000 Gateway." Available at <http://www.census.gov/main/www/c2k0.html>.  
[15] United Nations Statistics Division, "Demographic and Social Statistics." Available at <http://unstats.un.org/unsd/demographic/>.

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 14

Osaka University

### 従来の生成モデルとの比較

- クラスタ係数
  - 従来: ISPに比べクラスタが
  - 提案モデルでは、
- 平均パス長
  - 従来: 平均パス長は長い
  - 提案: 平均パス長は短い
- Betweenness centrality
  - 従来: 最大値がISPよりも大きく偏りがある
  - 提案: 分布がISPに類似している

BAモデル、FKPモデルに比べ、

- クラスタ係数
- 平均パス長
- Betweenness centrality

がISPTポロジに近いトポロジーが生成できる

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 15

Osaka University

### コスト関数の影響

- クラスタ係数
  - 回線距離の重みを強くすると、クラスタが少なくなる
- Betweenness centrality
  - 回線距離の重みを強くすると、最大値が小さくなり偏りが小さくなる

コスト関数は生成トポロジーの

- クラスタ係数
- Betweenness centrality

に影響する

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 16

Osaka University

### トラフィックの偏りの影響

- クラスタ係数
  - トラフィックの偏りが一律な場合、クラスタが少なくなる
- Betweenness centrality
  - トラフィックの偏りは生成トポロジーの
  - クラスタ係数
  - Betweenness centrality

に影響する

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 17

Osaka University

### まとめ

- ネットワークコストの最小化に基づく生成モデルを提案した
  - 回線に対する指標・制約を用いることで、BAモデル、FKPモデルに比べ、
    - クラスタ係数
    - 平均パス長
    - Betweenness centrality
 がISPTポロジに近いトポロジーを生成可能である
- ISPTポロジの形成要因を調査した
  - コスト関数: クラスタ係数、Betweenness centrality に影響
  - トラフィックの偏り: クラスタ係数、Betweenness centrality に影響
  - ノード配置: クラスタ係数、平均パス長に影響

2007/6/22 情報ネットワーク研究会 18

## 今後の課題

● Sprint社を対象とした提案モデルの評価

☆ ISPによって異なる設計方針



※ Sprint社以外のISPを対象とした評価

## 参考文献

- [4] A. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [6] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, J. Doyle, R. Tanaka, and S. Low, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of the 2004 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM '04)*, vol. 34, pp. 3–14, NY, USA, Oct. 2004.
- [7] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, "Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet," in *Proceedings of the 23th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP' 2002)*, pp. 110–122, July 2002.
- [8] N. Berger, B. Bollobas, C. Borgs, J. Chayes, and O. Riordan, "Degree distribution of the FKP network model," in *Proceedings of International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP)*, pp. 725–738, July 2003.
- [9] 荒川伸一, 福元良太, 村田正幸, 滝根哲哉, "ルータレベルトポロジの構造特性とそのモデル化手法の提案," *電子情報通信学会技術研究報告(IN2005-95)*, pp. 43–48, Oct. 2005.
- [10] T. Bu and D. Towsley, "On distinguishing between Internet power law topology generators," in *Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, vol. 2, pp. 1587–1596, June 2002.
- [11] Ryota Fukumoto, Shin'ichi Arakawa, Tetsuya Takine, and Masayuki Murata, "Analyzing and modeling router-level Internet topology," in *Proceedings of the 21st edition of the International Conference on Information Networking (ICOIN 2007)*, Jan. 2007.
- [12] M. Roughan, A. Greenberg, C. Kalmanek, M. Rumszewicz, J. Yates, and Y. Zhang, "Experience in measuring backbone traffic variability: Models, metrics, measurements and meaning," in *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW '02)*, pp. 91–92, Nov. 2002.