

# Topology Design and Capacity Planning for Evolvable Information Networks using Mutual Information

Lu Chen

Advanced Network Architecture Laboratory  
Information Networking  
Information Science and Technology  
Osaka University

1

## 研究背景 - 情報ネットワークを取り巻く環境

- インターネットトラフィックの増加と変動
  - 全体の通信量は年率 約 1.5 倍で増加
  - 各サービスの通信量は一律に増加するのではなく、増加の内訳は社会流行に応じて大きく異なる [3]
    - モバイルトラフィックの増加：米国 120 %、中国 83 % の増加率
    - ビデオ利用アプリケーション/サービスの台頭
  - 新規サービスの登場や社会流行によるトラフィック変動を予測することは困難
    - Youtube 4K2k サービス開始 (2010)、4K2k ビデオ撮影スマートフォンの登場 (2015)
- ISP の事故の発生状況の複雑化
  - 他の ISP の事故に起因する事故発生件数が年々増加 [4]
  - 予測できない環境変化への脆弱性が顕在化

予測や予測できない環境変化への対応が ISP ネットワークに求められる

[3] Cisco, "Cisco visual networking index: Forecast and methodology," White Paper, May 2015.  
[4] Ministry of Internal Affairs and Communications, "Accident occurring in telecommunication carrier," Press Material, July 2015.

## 研究の背景と問題 - ISP ネットワーク構築の現状

- ISP ネットワークの管理者は設備をアドホックに追加
  - 回線容量の利用率が閾値を超えたときに回線容量を増強

・ 予期しないトラフィックの増加時にトラフィックを収容できない  
・ トラフィック減少時には増強した回線容量が使用されない

- 従来研究では、性能指標の最適化に基づく設計が検討
  - 通信状況に関する「情報」を収集し最適化問題等を解いて回線容量を設計
  - 最適性は、設計時に用いる「情報」から想定される環境変化の範囲でのみ確保
  - 環境変化が予測できないなかでは、最適性を目指した設計手法では最適性は担保されず、反って多くの設備が必要

環境が変化しやすくなりつつある中では、少ない設備量で様々な環境変動に適応できるネットワークの設計手法が必要

3

## 研究目的とアプローチ

- トラフィックの増加・変動やノード故障を含む環境変化に適応できるネットワークの設計手法の確立
- 生物システムにおけるシステム特性<sup>[12]</sup>
  - 多様性が高いシステムは様々な環境に適応しやすい
  - 多様性が持続的進化に寄与
- 多様性を有するネットワークの設計手法
  - 研究課題
    - 多様性をどのように定量化するか?
    - 多様性をどのように高めるか?

相互情報量に着目

- 相互情報量指標にもとづく多様性を高めるネットワーク設計手法を提案

[12] M. Prokopenko, F. Boschetti, and A. Ryan, "An information-theoretic primer on complexity, self-organization, and emergence," Complexity, vol. 15, pp. 11–26, Sept. 2009.

4

## 博士論文の構成

- 1 章 Introduction
  - 研究の背景と論文の概要
- 2 章 Quantifying Diversity in Network Using Mutual Information
  - 相互情報量を用いてネットワークの多様性を定量化できることを確認 トポロジー設計
- 3 章 Topology Design Approach Using Mutual Information for Evolvable Networks
  - 構造の多様性を高めるネットワーク設計手法の提案 回線容量設計
- 4 章 Capacity Planning Using Mutual Information for Evolvable Networks
  - 回線容量割り当ての多様性を高めた回線容量設計の効果の確認
- 5 章 Conclusion
  - まとめと今後の課題

## Chapter 2

### Quantifying Diversity in Network Using Mutual Information

1. Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Quantifying network heterogeneity by using mutual information of the remaining degree distribution," *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, vol. 6, no. 1 and 2, pp. 214–223, June 2013.
2. Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Analysis of network heterogeneity by using entropy of the remaining degree distribution," in *Proceedings of International Conference on Advanced Communications and Computation (INFOCOM 2012)*, pp. 94–99, October 2012.
3. Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Analysis of Network Heterogeneity by Using Entropy of the Remaining Degree Distribution," *Technical Report of IEICE (NS2012-13)*, vol. 112, no. 8, pp. 71–76, April 2012 (in Japanese).

6

7

### 研究の背景と目的

- 多様性を有するISPネットワーク構築の必要性
- ネットワークが有する多様性を測る指標の導入と有用性の評価

- トポロジーの構造の多様性に着目
  - 構造の多様性
    - トポロジーの一部のノード集合を取り出した際に、その集合の接続形態が多様であること

多様性が低いトポロジーの例

多様性が高いトポロジーの例

8

### 構造の多様性を測る指標としての相互情報量

- 情報理論における相互情報量
  - 確率変数Yを知ることにより得られる確率変数Xの情報量
    - $I = H(X) - H_c(X|Y)$ 
      - $H(X)$ : Xのエントロピー
        - Xの不確かさの程度
      - $H_c(X|Y)$ : YのもとでのXの条件付きエントロピー
        - Yの値を知った時のXの値についての不確かさの程度
      - I: 相互情報量、不確かさの減少量
- 相互情報量を用いてトポロジー構造の多様性を測定
  - 確率変数Y → トポロジー構造に関する情報
  - 確率変数X → 残りのトポロジー構造に関する情報
  - 相互情報量 → トポロジー構造の一部を知った時、残りのトポロジー構造が不確かさ。相互情報量が小さい場合、構造は多様。

9

### 残存次数の相互情報量 [11]

- 残存次数の相互情報量を用いて実ネットワークの特徴を分析[11]
  - 残存次数  $k$ : リンクを一本取り除いたときに、その片方に接続されていたノードの残り次数
  - 残存次数分布  $q(k)$ 
    - 残存次数が  $k$  である確率  $q(k)$
  - 残存次数の相互情報量  $I$ 
    - $I = H - H_c$
    - $H = -\sum_{k=1}^K q(k) \log(q(k))$
    - $H_c = -\sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K q(k') \pi(k|k') \log(\pi(k|k'))$ 
      - $\pi(k|k')$ : 残存次数  $k'$  を持つノードと接続されているノードの残存次数が  $k$  である条件付き確率

リンクの両端にあるノードの次数の関係から得られる情報量

残存次数の相互情報量を用いてトポロジー構造の多様性を分析

[11] R. Soles and S. Vaquerde, "Information theory of complex networks: On evolution and architectural constraints," *Complex networks*, vol. 650, pp. 189-207, Aug. 2004.

10

### ISPネットワークの相互情報量

- ISPネットワークの残存次数の相互情報量を分析
  - 以下のネットワークの相互情報量と比較
    - ランダムグラフ (Random)
    - 次数分布がべき則に従うトポロジー (BA)
    - 生物ネットワーク ([11]に記載)
  - ISPネットワークの多くは相互情報量が大きい
    - 相互情報量がトポロジーの構造の多様性に与える影響を調査

	ISP ネットワーク[31]				モデルベースのトポロジー				生物ネットワーク		
	Telstra	Sprint	Level3	Verio	AT&T	BA	Random	Metabolic	Proteome		
ノード数	329	467	623	839	523	523	523	821	1458		
リンク数	615	1280	5298	1885	1304	1304	1304	1954	1946		
H	4.24	4.74	6.04	4.65	4.46	4.24	3.22	3.46	3.85		
Hc	3.11	3.84	5.42	4.32	3.58	3.98	3.15	3.09	3.61		
I	1.13	0.9	0.61	0.33	0.88	0.26	0.07	0.37	0.24		

[31] 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.

11

### 相互情報量がトポロジー構造の多様性に与える影響

- 残存次数の相互情報量  $I$  に着目
  - $I$  が異なるトポロジーを生成し、構造の多様性を比較
  - 以下の手順により、エントロピー  $H$  を固定し、相互情報量が目標値に最も近いトポロジー  $G$  を生成
- 焼きなまし法を用いてポテンシャル関数  $U^i(G)$  を最小化
  - $U^i(G) = |I - I(G)|$  ( $I(G)$ : 生成過程のトポロジー  $G$  の相互情報量)
- 初期トポロジー
  - BA モデルで生成 (523 ノード, 1304 リンク)
  - リンクの張り替え
    - 次数分布を維持した張り替え[15]

[15] P. Mahadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, "Systematic topology analysis and generation using degree correlations," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, pp. 135-146, Oct. 2006.

12

### 相互情報量を最小化したトポロジー

- 相互情報量を最小化したトポロジーのトポロジー構造

$I = 0$  を与えて、生成したトポロジー

接続先ノードの残存次数のばらつきが大きい

多様なトポロジー構造が出現

$I(G) = 0.12$   
 $(H = 4.24, H_c = 4.13)$

残存次数が最大のノードの接続先ノードの残存次数分布

残存次数が最小のノードの接続先ノードの残存次数分布

13

### 相互情報量を最大化したトポロジー

- 相互情報量を最大化したトポロジーの構造的特徴
  - 接続先ノードの残存次数のばらつきが小さい

$I = 3$  を与えて、生成したトポロジー

トポロジー構造に規則性が出現 → 多様性が失われる

残存次数最大のノードの接続先ノードの残存次数分布

残存次数が最小のノードの接続先ノードの残存次数分布

$I(G) = 2.70$   
( $H = 4.24, H_c = 1.54$ )

14

### ISPネットワークの大きな相互情報量

- ISPネットワークの多くは相互情報量が大い
  - 技術的・物理的な制約を考慮した設計に起因
    - 末端、集約、中継の階層構造
    - 冗長系（待機系）による信頼性向上

中継  
集約  
末端

	ISP ネットワーク[31]			モデルベースのトポロジー		生物ネットワーク			
	Telstra	Sprint	Level3	Verio	AT&T	BA	Random	Metabolic	Proteome
ノード数	329	467	623	839	523	523	523	821	1458
リンク数	615	1280	5298	1885	1304	1304	1304	1954	1946
H	4.24	4.74	6.04	4.65	4.46	4.24	3.22	3.46	3.85
Hc	3.11	3.84	5.42	4.32	3.58	3.98	3.15	3.09	3.61
I	1.13	0.9	0.61	0.33	0.84	0.26	0.07	0.37	0.24

\*Verio 社の相互情報量は小さい  
→ 小規模な地域ISPの買収を繰り返して規模を拡大[32] したことに起因

[32] M. Perz, "Verio grows big with small clients," Business Journals, Feb. 1999.

15

### 本章のまとめ

- ネットワークの多様性を測る指標としての相互情報量の有用性評価
  - ルーターレベルトポロジーの残存次数の相互情報量を評価
    - ISPネットワークの相互情報量は、生物ネットワークやモデルベースのトポロジーと比べて高い
  - 相互情報量がトポロジーの構造の多様性に与える影響の調査
    - エントロピーが同じである時、
      - 残存次数の相互情報量が小さいと構造が多様
      - 残存次数の相互情報量が大いだと構造に規則性が出現
  - ISPネットワークの構造の多様性は
    - 技術的・物理的な制約を考慮した設計に起因

トポロジーが有する構造の多様性を測る指標として相互情報量は有用

Chapter 3  
Topology Design Approach Using Mutual Information for Evolvable Networks

- Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, Hideyuki Koto, Nagao Ogino, Hidetoshi Yokota, and Masayuki Murata, "An Evolvable Network Design Approach with Topological Diversity," *Computer Communications*, available online, November 2015.
- Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, Masayuki Murata, Hideyuki Koto, Nagao Ogino and Hidetoshi Yokota, "Designing an Evolvable Network with Topological Diversity," in *Proceedings of IEEE International Workshop on Network Science for Communication Networks (in conjunction with IEEE Infocom 2014)*, pp. 789-794, April 2014.
- Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Sustainability Analysis of Topologies with Different Network Heterogeneity Described by Mutual Information of Remaining Degree," *Technical Report of IEICE (NS2012-157)*, vol. 112, no. 392, pp. 93-98, January 2013 (in Japanese).
- Lu Chen, Shir'ichi Arakawa, Hideyuki Koto, Nagao Ogino, Hidetoshi Yokota, and Masayuki Murata, "A proposal of Evolvable Network Designing Approach with Topological Diversity," *Technical Report of IEICE (PN2014-26)*, vol. 114, no. 334, pp. 31-36, November 2014.

16

17

### 研究背景・目的

- 多様性を有するISPネットワーク構築の必要性
- 2章では、ネットワークが有する多様性を測る指標として、相互情報量を導入し、有用性を確認

本章では、

- 相互情報量の最小化にもとづくネットワーク設計手法を提案
  - 残存次数の相互情報量を最小化し、多様性が高いネットワークを構築
- 様々な環境変動下において、多様性を高めることによる効果を評価
  - 環境が変動する下で規模成長する時の設備量
  - 規模成長したネットワークに対して、設計時に想定していなかった環境変動を与えた時に必要となる増設量

18

### 提案するネットワーク設計手法と比較対象

- 提案する設計手法
  - 相互情報量の最小化に基づく、トポロジー構造の多様性を高める設計手法
  - 新規ノードは、相互情報量を最小化する箇所と接続する
- FKP成長モデル（比較対象）
  - 情報ネットワークトポロジーのモデル化手法[19]に基づく成長モデル
  - 新規ノードは、物理距離とホップ長を最小化する箇所と接続する

[19] J. I. Alvarez-Hernandez and N. Schabane, "An Internet graph model based on trade-off optimization," *The European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 231-237, Mar. 2004.

初期トポロジーは AT&Tトポロジー (523 ノード, 1304 リンク): 構造の多様性は低い

FKP成長モデルにより成長したネットワーク: 構造の多様性が低いまま

提案する設計手法により成長したネットワーク: 構造の多様性が高まっている

19

### 規模成長時の総回線設備量の評価

- 各設計手法にもとづき規模成長するネットワークで必要とされる総回線設備量を評価
- 評価諸元
  - 初期トポロジー： AT&Tトポロジー
  - ノードを繰り返し追加
    - 1ノード追加時に各設計手法にもとづき接続先ノードを決定
    - ノード間のトラフィック需要を1とし、トラフィック収容に要する回線容量を配備
  - 50ノード追加ごとに回線容量を追加配備：単一ノード故障発生時に生じる迂回トラフィックを収容

20

### 回線設備量の内訳

- 以下の3つの設備量を算出
  - $C_{平常時}$  ノード障害が未発生時のトラフィック収容に用いられる設備量
  - $C_{故障時}$  ノード障害発生時に、故障時のトラフィック収容に用いられる設備量 ( $C_{平常時}$  を除く)
  - $C_{未使用}$  使用されない設備量

21

### 設計時に想定されていない環境変動への適応性

- 設計時に想定されていない環境変動発生時のトラフィック収容割合を評価
- 50ノード追加毎に単一ノード故障に対して設計されるネットワークを利用
- 設計時に想定されていない環境変動：2ノード故障
- 評価指標：再利用可能割合  $r_k$

$$r_k = \frac{F_{reused}_k}{F_{new}_k}$$

想定外の環境下の需要を収容するために必要となる設備量

既に設計された設備で利用できる量

22

### 想定外の環境変動に対する設備量の再利用可能割合

- 523x522 パターンの2ノード故障それぞれに対して再利用可能割合を算出
- 初期トポロジー
  - 再利用可能割合が0.85となる障害パターンが存在
  - 20程度の障害パターンでは、再利用可能割合が0.95となる

23

### 想定外の環境変動に対する設備量の再利用可能割合

- 523x522 パターンの2ノード故障それぞれに対して再利用可能割合を算出
- 提案手法では、規模成長とともに再利用可能割合が向上
- 比較対象では、初期トポロジーの再利用可能割合と同じ傾向であり、ほとんど変化がない

24

### 本章のまとめ

- トポロジー構造の多様性を高めるネットワーク設計手法の提案
- 残存度数分布の相互情報量の最小化
- 提案手法で規模成長するネットワークの回線設備量を評価
- 比較としてFKP成長モデルを導入
- 評価環境
  - ノード追加にともなうトラフィック量増大
  - トラフィック収容に要する必要最小限の回線設備量を付与
- 提案手法
  - より少ない回線設備量で規模成長可能
  - 設計時に想定されていない環境変動時にも、回線容量の再利用可能割合が高いことを示した
- 物理距離制約下でのトポロジー構造の多様性を高めるネットワーク設計手法

## Chapter 4

### Capacity Planning Using Mutual Information for Evolvable Networks

1. Lu Chen, Shin'ichi Arakawa, Masayuki Murata, Hideyuki Koto, Nagao Ogino, Hidetoshi Yokota, and Takeshi Kitahara, "A method for capacity planning using mutual information for evolvable networks," submitted to International Journal of Information and Communication Technology.

25

## 研究の背景・目的

26

- 多様性を有するISPネットワーク構築の必要性
- 3章ではトポロジー構造の多様性を高めるネットワーク設計手法を提案し、環境変動に対する適応性が高いことを示した
  - トラヒック収容に要する必要最小限の回線容量を配備するとしていた

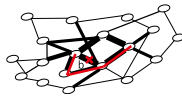


- 回線容量の多様性を高め、トポロジー構造の多様性と組み合わせることで、環境変動に対する適応性の更なる向上を図る
- 回線容量の多様性を測る指標の導入
- 回線容量の多様性により得られる効用の定量的評価

## 回線容量の相互情報量

27

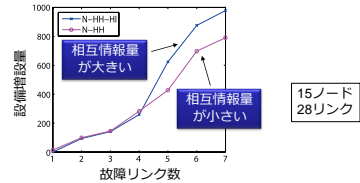
- 多様性を高める方法としてランダムに回線容量を割り当て
  - 対地間通信が考慮されない
- 対地間通信を考慮した回線容量の割り当て
- 「対地間が平常時に使用しているリンクの流量」と「リンクが故障したときに対地間で利用できる帯域」の相関に着目



## 相互情報量が異なるネットワークでの比較

28

- 相互情報量が異なるネットワークを用意
- 複数リンク故障時に生じるトラヒックを収容するために必要となる設備増設量を比較
- 故障リンク数が多い時、相互情報量が小さいネットワークの設備増設量が少ない



## 本章のまとめ

29

- 回線容量の多様性を測る相互情報量指標を考案
  - リンクが故障した時に対地間で利用できる帯域に着目
- エントロピーが異なるネットワークでの設備増設量の評価
  - 回線容量を付け替えたネットワークとの比較
  - エントロピーが大きいネットワークが少ない設備増設量で対処できる
- 相互情報量が異なるネットワークでの設備増設量の評価
  - エントロピーが大きく、相互情報量が異なるネットワークを生成して比較
  - 相互情報量が小さいネットワークが少ない設備増設量で対処できる

## 博士論文のまとめと今後の課題

30

- トラヒックの増加・変動やノード故障を含む環境変化に対応できるネットワークの設計手法の検討
- 相互情報量を用いてネットワークの多様性を定量化できることを確認
- 相互情報量の最小化に基づく設計手法の提案
  - トポロジー構造の多様性を高めるネットワーク設計手法の効果を確認
- 相互情報量を使った多様性を有する回線容量設計の効果の確認
- 今後の課題
  - 提案手法の計算量の削減
  - 提案手法の理論的解析
  - 他の設計対象の多様性を高めることを検討