

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

A proposal of Evolvable Network Designing Approach with Topological Diversity

○Lu Chen†, Shin'ichi Arakawa†, Hideyuki Koto††,
Nagao Ogino††, Hidetoshi Yokota††, Masayuki Murata†

† Osaka University
†† KDDI R&D Laboratories, Inc.

1

Osaka University 2

研究背景

- インターネットを取り巻く環境が変動しやすくなりつつある
 - 新規サービスの普及やコンテンツの大容量化によるトラフィック増大・変動
 - どのような変動が生じるかは事前に予測困難
- 現在のネットワーク運用はその場の要求に応じて設備増強
 - 例：回線容量が閾値を超えた時に増強
- 年月が経つにつれ、必要となる設備量が増大

環境が変動し得る将来にわたっても少ない設備量で規模成長できるネットワークの設計が求められる

- 設備量配置の最適化問題を解くことは不適

Osaka University 3

研究の目的

- 生物システム
 - 環境変動に適応しやすい
 - 例：遺伝子がタンパク質の発現に貢献する系^[11]
 - 環境変動への適応しやすさにシステムの多様性が関与している^[2]
 - 多様であるほど適応しやすい
 - 構造的な多様性、変化の多様性など



トポロジー構造の多様性に着目して、環境変動が生じても少ない設備量で成長できる持続的成長可能なネットワークの設計

[11] J. Whitacre, P. Rohlfshagen, A. Bender, and X. Yao, "Evolutionary mechanics: new engineering principles for the emergence of flexibility in a dynamic and uncertain world," *Natural computing*, vol. 11, pp. 431-448, Sept. 2012.
[2] M. Prokopenko, F. Boschetti, and A. Ryan, "An information-theoretic primer on complexity, self-organization, and emergence," *Complexity*, vol. 15, pp. 11-28, Sept. 2009.

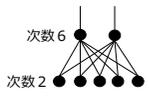
3

Osaka University 4

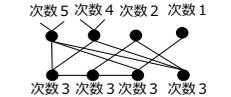
トポロジー構造の多様性を測る指標

- 残存次数の相互情報量 I ^[3]
 - リンクの一端に接続されているノードの次数を見た時に得られる、他端に接続されているノードの次数の情報量

多様性が低い例
相互情報量が大きい



多様性が高い例
相互情報量が小さい



- ルーターレベルトポロジーは相互情報量が大きい

相互情報量	ルーターレベルトポロジー			生物ネットワーク ^[9]		トポロジーモデル	
	Telstra	Sprint	AT&T	Metabolic map	Proteome map	BA	Random
	1.13	0.9	0.88	0.37	0.24	0.26	0.07

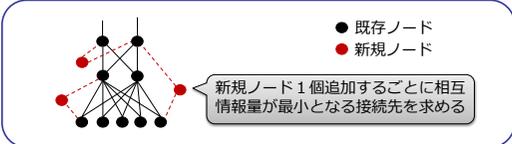
[3] R. Solé and S. Valverde, "Information theory of complex networks: On evolution and architectural constraints," *Complex networks*, vol. 650, pp. 189-207, Aug. 2004.

4

Osaka University 5

構造の多様性を高めるトポロジー設計手法を提案

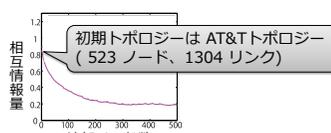
- 提案手法
 - 新規ノードは、相互情報量を最小化する箇所と接続する



● 既存ノード
● 新規ノード

新規ノード1個追加するごとに相互情報量が最小となる接続先を求める

- 適用例



初期トポロジーは AT&Tトポロジー (523 ノード、1304 リンク)

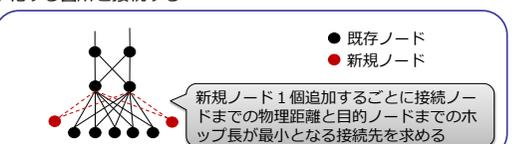
手法の有効性を示す評価を行った
→比較手法の説明

5

Osaka University 6

比較対象

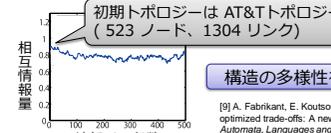
- 情報ネットワークトポロジーのモデル化手法 (FKP)^[9]に基づく成長モデル
 - 新規ノードは、接続ノードまでの物理距離と目的ノードまでのホップ長を最小化する箇所と接続する



● 既存ノード
● 新規ノード

新規ノード1個追加するごとに接続ノードまでの物理距離と目的ノードまでのホップ長が最小となる接続先を求める

- 適用例



初期トポロジーは AT&Tトポロジー (523 ノード、1304 リンク)

構造の多様性を低く保ったまま成長

[9] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. Papadimitriou, "Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet," *Automata, Languages and Programming*, vol. 2380, pp. 110-122, July 2002.

6

Osaka University 7

成長に伴う総回線設備量増加の評価

- トポロジーの規模成長に伴って必要となる総回線設備量
 - 各手法で得られたトポロジーに対して回線設備量を設計
 - 1 ノード追加するごとに、トラフィック需要を収容できるように回線設備量を設計
 - 需要は全対地間で 1 ユニットとしている
 - 50 ノード追加するごとに、全パターンの単一ノード故障に備えて回線設備量を設計
- 回線設備量
 - その時点までの全てのトラフィックパターンを収容するために必要な設備量
 - 一度設計された設備は取り除かれないものとする

Osaka University 8

成長に伴う総回線設備量の結果

- 提案手法の総回線設備量が抑えられている

50 ノード追加ごとに、任意のパターンの単一ノード故障が生じたとしてもトラフィック需要が収容できるよう回線設備を設計

Osaka University 9

回線設備量の内訳

- 以下の3つの設備量を算出した

$C_{\text{平常時}}$	平常時のトラフィックを収容するために使用されている設備量
$C_{\text{故障時}}$	$C_{\text{平常時}}$ 以外で、故障時のトラフィックを収容するために使用されている設備量
$C_{\text{未使用}}$	使用されていない設備量

Osaka University 10

総回線設備量が抑えられている原因

- $C_{\text{故障時}}$ が抑えられている原因
 - 配置されている設備が複数パターンのノード故障で使用されるから
 - 一パターンのノード故障で必要となる $C_{\text{平常時}}$ 以外の設備量は提案手法の方が多
- $C_{\text{未使用}}$ が多いこと
 - 確かに提案手法の $C_{\text{未使用}}$ が多いが、これは将来または想定外の環境変動で使用される

	提案手法	比較手法
設備量	6.0535×10^3	5.8868×10^3

Osaka University 11

想定外の環境変動に対する評価

- 成長時の評価で設計した回線設備量に対して評価を行う
 - 設計時に想定した環境：単一ノード故障
- 想定外の環境：二ノード故障
- 評価指標：再利用可能割合 r_k

$$r_k = \frac{F_k^{\text{reused}}}{F_k^{\text{new}}}$$

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使用できる量

1 既に設計された設備によって収容できる

0 既に設計された設備によって収容できない

Osaka University 12

想定外の環境変動に対する設備量の再利用可能割合の結果

- 各パターンの二ノード故障に対して評価を行った
- 提案手法では、規模成長するにつれ、再利用可能割合の最悪値が改善されている

Osaka University 13

再利用可能割合が 1 未満となる数

- 再利用可能割合が 1 未満となる故障パターンは提案手法の方が多く、それらはわずかに 1 を下回っているだけなので、少しのオーバプロビジョニングで解決できると考えている

250 ノード追加後のトポロジーの $r < 1$ となる故障パターンは 32,291

提案手法

250 ノード追加後のトポロジーの $r < 1$ となる故障パターンは 7,557

比較対象

Legend: k=250 (red circle), k=200 (blue square), k=150 (green triangle), k=100 (orange diamond), k=50 (purple asterisk), initial topology (k=0) (black cross). X-axis: ランク (Rank), Y-axis: 再利用可能割合 r_k .

Osaka University 14

多様性と物理距離のトレードオフの評価

- 新規ノードは下記の式を最小化するノードと接続する

$$\xi \cdot I(q) + \sum_{l \in M} f(l)$$

重み: ξ

提案手法の最適化式: 相互情報量

比較手法の最適化式: 物理距離を含む

499 ノード追加後のトポロジー

相互情報量

$\xi = 1000$ のとき

比較手法に近い

提案手法に近い

ξ

Osaka University 15

多様性と物理距離のトレードオフの結果

- 得られたトポロジーに対して、総物理距離、総回線設備量の評価を行った
- 比較手法の 1.3 倍の物理距離を許容すると、総回線設備量が比較手法より 11% 抑えられることが分かった
- 想定外の環境変動に対する設備量の再利用可能割合も比較手法に比べて良いことが分かった

$\xi = 1000$ のとき

再利用可能割合 r_k

ランク

499 ノード追加後のトポロジー

総物理距離

$\xi = 1000$ のとき: 比較手法の 1.3 倍

総回線設備量

$\xi = 1000$ のとき: 比較手法より 11% 抑えられている

Osaka University 16

まとめと今後の課題

- まとめ
 - 相互情報量の最小化に基づくネットワーク設計手法を提案
 - 提案手法が情報ネットワークのモデル化手法に基づく成長モデルより少ない設備量で規模拡大できることを示した
 - 規模成長後のトポロジーにおいて、想定外の環境においても最悪時の再利用可能割合が高いことを示した
 - 相互情報量と物理距離のトレードオフの議論
- 今後の課題
 - トラヒック変動を考慮したシナリオでの評価
 - 局所的な情報に基づいて相互情報量を最小化する手法の考案