

Osaka University

Core-periphery モデルに基づく AS レベルトポロジにおける コア構造の経年変化の分析

大阪大学 情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻
村田研究室 佐竹幸大

第 9 回 情報ネットワーク科学研究会 2016 / 5 / 27

Osaka University

研究の背景

- **社会インフラ化に伴うインターネットの大規模化**
 - インターネットは多数の Autonomous System (AS) の相互接続により構成
 - 各 AS は、利用形態に応じて利己的に他の AS とリンクを構築
 - 大規模かつ複雑なグラフを形成
 - 2012年時点: AS は約 4 万
- **様々な AS が存在**
 - ISP(Internet Service Provider)
 - Tier-1, Tier-2, Tier-3
 - コンテンツプロバイダー
 - HyperGiant
- **AS レベルトポロジの分析に関する既存研究** [6] [7] [9]
 - BGP ルーターの経路表からトポロジを推定し、構造的特徴を分析
 - 平均経路長やクラスタ係数などのグラフ指標の変化を分析

ASレベルトポロジ (2012年) Tier-1: 最大手のプロバイダー

[6] A.-L. Barabasi et al., Science, Oct. 1999.
[7] T. Bu et al., Proc. of INFOCOM, Apr. 2002.
[9] Y. Shavit et al., Proc. of SCNP, Jan. 2012.

グラフ指標の変化分析は、パフォーマンスを特徴づけるために重要一方で、インターネットにおける情報流通の複雑な挙動を理解するには不十分

Osaka University

研究の目的

- インターネットにおける情報流通の複雑な挙動は十分に理解されていない

インターネットの情報流通において中心的な役割を果たす AS 集合として定義されるコア及びコア以外を抽出し、その特徴や経年変化を分析

- インターネットを流れる情報を主に流通させ、かつ安定的に動作する AS 集合を抽出
- 抽出した AS 集合を構成する AS の種別や、構成 AS 数の経年変化を分析

引用: C. Arai, Z. Lorler, D. Peleg, Y. A. Pignolet, and I. Turker, "Core-periphery networks: An axiomatic approach," arXiv preprint arXiv:1411.2242, Nov. 2014.

Osaka University

Core-periphery モデル^[3]

- 自己組織的に動作するシステムで外的環境の急激な変化に対して安定的に機能提供可能であることを説明するモデル
- システムの構成を二つの要素で捉える
 - 低変動 (安定的) かつ 効率的に動作する Core
 - 外的要因の条件に応じて動作形態を変え、環境変動を吸収する Periphery

- Core が満たすべき要件を導出 [12]

AS レベルトポロジにおいて
情報流通の基盤となるコアを抽出

[12] C. Arai, Z. Lorler, D. Peleg, Y. A. Pignolet, and I. Turker, "Core-periphery networks: An axiomatic approach," arXiv preprint arXiv:1411.2242, Nov. 2014.

Osaka University

研究の方法

- AS レベルトポロジを対象に k -dense 分解法を用いて、接続構造の中心となっている AS 集合を抽出・分析
 - AS レベルトポロジは、インターネットにおける AS 間の接続関係を示すグラフで AS がノードに、AS 間の関係がエッジに対応
 - AS レベルトポロジは、BGP ルーティングテーブルから抽出、収集 [13]
 - k -dense 分解法はグラフ分解の手法
- 接続構造の中心となっている AS 集合の中でも特に、インターネットが情報流通を行う上で中心的役割を担う AS 集合としてのコアを公理^[12]を用いて抽出し、その経年変化を分析
 - コアの構成AS 数・構成 AS の種別 (Tier-1 や HyperGiant など)
 - Core と Periphery を接続するリンク数

[12] C. Arai, Z. Lorler, D. Peleg, Y. A. Pignolet, and I. Turker, "Core-periphery networks: An axiomatic approach," arXiv preprint arXiv:1411.2242, Nov. 2014.
[13] Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution and the future of the Internet topology focusing on low hierarchy," Journal of Computer Networks and Communications, vol. 113, pp. 13-18, May 2015.

Osaka University

k -dense分解法 [6]

- 密に相互接続された集合をひとまとまりとした k -dense 部分グラフの組に分けるグラフ分解法
 - 各辺が構成する三角形の個数にもとづき分解
 - 階層入れ子構造を抽出
- AS レベルトポロジの構造と密接に關係
 - AS レベルトポロジは、地理的に近い大きな ISP の集合体が相互接続される一方、地理的に遠い小さな ISP との接続も多く持つ

[6] C. Orsi, E. Gregori, L. Lenzi, and D. Krackov, "Evolution of the Internet k -dense structure," IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 22, pp. 1768-1780, Dec. 2014.

Osaka University 7

k-dense 分解法にもとづく分解結果

- 少数の AS が接続構造の中心部を形成
 - 41909 個の AS のうち、642 個の AS が、7-dense 以上の部分グラフを構成
 - 7-dense 以上の部分グラフはそれぞれトポロジーにただ一つだけ存在
 - 残りの 41267 個の AS で構成される 6-dense 以下の部分グラフが、7-dense 以上の部分グラフに対して接続

7-dense 以上の部分グラフを中心とする接続形態

Osaka University 8

接続構造の中心部の部分グラフの構成を分析

- k-dense 部分グラフのノードの数と、k の相関
 - 7 ~ 10-dense (接続の中心部の階層構造の下位層) のノード数は顕著に増大
 - 11 ~ 17-dense (接続の中心部の階層構造の上位層) のノード数は比較的稳定
- k-dense 部分グラフの Tier-1, Tier-2 AS の割合と k の相関
 - 16-dense, 17-dense の AS の多くは Tier-1, Tier-2 AS
 - 11-dense ~ 15-dense には Tier-1, Tier-2 AS 以外の AS も多く含まれる

中心部の下位層が大きく変化
中心部の上位層の変化は少ない
→ Core-Periphery 構成

Osaka University 9

コアの抽出方法

- 上位の階層に属する AS から順に AS 集合 C に追加
 - 各時点で、三種類のリンク数 $I(C, C), I(C, P), I(P, P)$ を測定
 - $I(A, B)$ は A と B を接続するリンクの数、P は C に属さない AS の集合
- 公理を満たす C をコア C_L として抽出
 - 公理: $I(C, P) = I(P, P)$
 - リンク数を情報の流れ (トラフィック量) と見立てると、インターネット全体を流れる情報の半分近くを集める、情報流通の基礎である AS 集合としてのコア C_L を抽出

Osaka University 10

コアの経年変化

- C_L の構成 AS 数の経年変化
 - 近年、着実に増大し続けている
 - この増大は、インターネット全体の AS 数の増大に起因

インターネットトラフィックの成長に応じて C_L の AS 数は増大

Osaka University 11

情報流通における Tier-1 · HyperGiant の貢献度

- インターネットの情報流通において、 C_L を形成する Tier-1 が果たす役割と HyperGiant が果たす役割の経年変化
 - 各年の AS レベルトポロジーから、複数の Tier-1 および HyperGiant を削除した際、Core-periphery 間のリンク数の変化量を示す
 - 単純には、リンク数の変化量が大きいことは、削除した AS が多くのトラフィックを流通させていたことを意味する

インターネットの情報流通において、 C_L を形成する Tier-1 が果たす役割は近年減少している一方で、依然として HyperGiant よりもはるかに大きな役割を持つ

Osaka University 12

まとめ

- AS レベルトポロジーを対象に接続構造の中心である AS 集合を抽出・分析
 - インターネットの接続形態は、ごく少数の AS が接続形態の中心となっている
 - 接続構造の中心部にだけ着目すると、その下位層の AS は外的環境の変化に応じて大きく変化する一方、上位層の AS は変化が少ない (進化において rigid)
 - インターネットの接続構造の中心部には、Tier1, Tier2 AS に加えて HyperGiant などのコンテンツプロバイダーも含まれる
- インターネットが情報流通を行う上で中心的役割を担う AS 集合としてのコアを公理を用いて抽出し、その経年変化を分析
 - インターネットトラフィックの成長に応じて、情報流通において中心的な役割を果たしている AS 集合として定義されるコアの AS 数は近年増大し続けている
 - インターネットの情報流通において、コアを形成する Tier-1 が果たす役割は近年減少している一方で、依然として HyperGiant よりもはるかに大きな役割を持つ
- 今後の課題
 - トポロジーの将来的な変化予測
 - 優位なインターネット進化のために適切なコアサイズと内部構造の究明