

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：62615

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24358

研究課題名(和文) 自律運用の安定化に向けた適応型協調機構に関する研究

研究課題名(英文) An adaptive cooperative mechanism for stable autonomous operation

研究代表者

明石 修 (Akashi, Osamu)

国立情報学研究所・学術ネットワーク研究開発センター・特任教授

研究者番号：60841202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：インターネットは自律システム(AS)の集合で構成される巨大分散システムである。各ASはBGPにより経路情報交換を行い接続性を維持するが、その構造はBGPの経路広報接続関係をエッジとするASのグラフとして捉えられ、経路情報の拡散や、障害時の振舞を解析するための重要な指針となる。本研究では、経路ハイジャック等の経路障害時の挙動に注目し、ASグラフ構造の視点からその振舞を解析し、各ASが隣接ASと協調動作した場合の協調戦略の有効性も含めて経路情報の耐性に関して定量的に解析を行い、その有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネットは分散システムであり、中央集権的な制御は難しい。現在においても重要な経路ハイジャック等、経路異常に対して、局所的な接続関係等の情報を用いて情報を共有し、その防御を行うのが現実的な解となる。しかしながら、局所的な情報のみを用いたどのような協調の仕方が有効であるのか、さらに定量的にどの程度有効であるのかは不明であり、これをBGP経路情報の接続関係をベースに定量的に解析することは重要である。

研究成果の概要(英文)：The Internet is the collection of Autonomous Systems (ASs), which are connected by exchanging network reachability information using BGP. It is considered as the AS graph where ASs are nodes and edges connecting ASs are BGP peering relations. The route-hijack problem is still one of the major inter-AS routing-management issues and is important to analyze its behavior. This paper focuses on the analysis and quantification of the effectiveness of cooperative hijack-prevention strategies from the viewpoint of locally available adjacency relations of cooperative ASs. Neighboring ASs are organized into multiple clusters based on their own local decisions. Simulations that use inferred Internet AS-relation graphs show that simple cooperative strategies are sufficiently effective for the route-hijack prevention and their effects differ based on applied cooperative strategies.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：自律制御 BGP経路情報 分散協調

1. 研究開始当初の背景

インターネットは、7万を超える自律システム(AS: Autonomous System)が他の複数ASと接続する巨大分散システムであり、60万ものIP prefix情報がAS間でBGPにより交換される。各ASはそれぞれ個別の組織によって運用されており、近傍AS間においてはより密な協調が可能であるが、グローバルな視点での中央集権的な手法は適用が難しい。そのため、さまざまな事象が複数ASをまたがって発生する。

経路情報の妥当性の検証は、そのような問題のうちの一つであり、さまざまなレベルでの接続性維持に影響する。BGPでは自身の保持するIP prefix情報を、BGP peerと呼ばれるBGP上の隣接ASに広報するが、これはAS毎にホップしながら伝わっていき、全インターネットに拡散する。広報元では、自身が広報したprefix情報に関して、全インターネット中のASでの妥当性を検証できないため、広報元ASに対する接続性に影響が出る状態になったとしても原因解析は難しい。

対策の一つとして、単一ASの中だけでなく、複数ASをまたがった分散観測・統合解析を行い、その結果に応じて近傍AS間での協調を通じて問題を解決する方法があげられる。しかしながら、現在の運用や障害対応は、AS毎のオペレータ間でのアドホックな対応手法が大半であり、ネットワーク運用の安定した自律化に向けて、各ASの環境に応じた協調動作が可能となるように、基本特性を解析し、新たなフレームワークを構築することが望まれている。経路情報障害ではないが、障害事象に対する経路情報操作の視点では、DDoSパケットフィルタリングに関し、BGP Flowspecを用いたサービスも展開されているが、AS内に閉じたケースであり、適用範囲の拡大、その構築フレームワーク、効果の指標に関しては議論が必要である。

2. 研究の目的

実際のネットワーク運用上、重要な問題の一つであるAS間経路障害を対象に、特に自己の経路情報が他の組織に意図的、あるいは設定ミスで広報される経路ハイジャックの対策に注目する。本症例においては、自己組織宛の packets が攻撃者等の組織に転送されてしまい、自組織の通信が不能になるという深刻な障害が今日のインターネットにおいても発生している。

ハイジャック経路情報の遮断の難しさとしては、経路情報は、一つのASで遮断しても自動的に迂回して他のAS経由で拡散する性質に由来する。そのため、不正なハイジャック経路を遮断するためには複数ASでのトポロジを考慮した協調フィルタが必要となる。BGPのベストパス選択ルールでは、特にlocal_pref値等のポリシー制御を行わない場合、ASパス長で決定されるため、短いASホップ数で拡散する不正経路のパスを遮断して無効化を行う手段も用いられるが、同様な協調フィルタが必要となる。ネットワーク環境の安定した運用自律化に向けて、AS間での問題解決に注目し、動的に変化する状況を考慮しながら近傍ASと協調問題解決する機構を提案し、その有効性を定量評価することが本研究の最終的な目的である。

3. 研究の方法

インターネット全体でのAS経路トポロジの作成や隣接関係の発見、そのグラフ理論的な解析に関しては多くの先行研究があるが、そのグラフ構造を経路情報拡散、経路ハイジャック、隣接協調防御有効性の解析に用いた例は限られる。①では総AS数30,000程度に対し、AS経路トポロジの構造を経路ハイジャック障害と連携させ、経路ハイジャック時の経路拡散の振舞等の定量的な統計的解析を行った。しかしながら、隣接協調による防御の有効性解析は不明確な部分も存在し、また現在では70,000を超えるASが観測され、ASグラフも変化している。本研究では、同様にCAIDAのAS relationships dataからASのトポロジ構造を作成し、BGPの経路情報拡散をシミュレーションすることで解析する。その上で、経路ハイジャック検知機能を持つASを、分散協調防御の視点も含めて配置し、その有効性を解析する。本データでは、隣接関係に、provider, customer, peerの推定された役割が付記されている。用いたデータは、20201101.as-rel.txtである。

シミュレーション内部では、ASを表すオブジェクトはAS番号を持ち、それぞれIP-prefixを表すprefix番号を一つ割り当てる。各ASは自AS番号をASパス情報として付与した後、自prefixをBGP接続関係にある隣接ASに広報する。受信したprefix情報は、BGPルールに従い、隣接ASに再度広報される。このとき、通常のBGPと同じく、受信したASパス情報に自身のAS番号をプッシュしてASパス情報を更新し、prefixと共に広報する。BGPの特徴であるポリシールーティングを実現するlocal_pref属性やcommunity属性は付与しない。従ってベストパスの選択、すなわち複数の隣接ASから同一宛先のprefixを受信した場合は、通例のBGP経路選択ルールに基づき、ASパスの長さの短い方を優先し、ベストパスのみを広報する。IGPのメトリックも考慮しないため、複数の候補が同一優先順位であった場合、ランダムに選択する。これらは、通例のポリシー制御のないBGPルータの挙動をシンプルにモデル化した挙動である。ただし、provider/customer, peerの関係は付加されているため、受信した経路の再広報に関しては、実際のインターネットの現状に従う。

この系を仮想時間で駆動し、仮想時間毎に 1AS ホップの広報を全 AS オブジェクトに関して行い、全ての AS に広報が完了し、経路情報の拡散が定常状態になった時点で停止する。なお現実の BGP 経路分散は実時間で、仮想時間を用いるシミュレーションと経路拡散途中での挙動が経路の到着時間により異なるが、最終的な定常状態は AS グラフ構造によって定まるため、結果は同じであり本解析の目的には十分であると考えられる。

4. 研究成果

(1) 基礎データとして AS グラフの基本構成を表 1 に、接続数の分布を図 1 に示す。今回の実験に用いた 2020.11 のデータであり、総 AS 数は 70579 である。基本的な構成は①の構成と同様に思われるが、接続数が 10-1000 の部分で、後者の構成数が若干増加している。

Date	top ASes	leaf ASes	Total # of ASes
2010.01	121 (0.4%)	28525 (85.1%)	33508
2020.11	394 (0.6%)	59784 (84.7%)	70579

Provider/customer	peer	others	Total # of peers
69161 (92.2%)	5591 (7.5%)	219 (0.3%)	74971
140233 (38.7%)	221767 (61.3%)		362000

表 1 AS グラフの基本構造

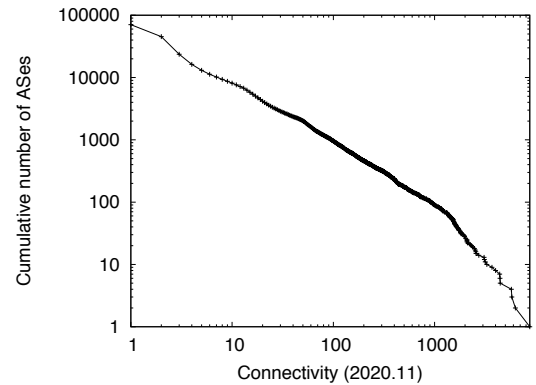


図 1 AS の接続数の分布

(2) 経路耐性

数式 1 に、接続数 c に関する平均 AS パス長 $D(c)$ の定義を示す。図 2 に、上の定義で計算した他の AS への平均 AS パス長の分布を示す。高い接続数を持つ AS ほど平均 AS ホップ数が少なく他の AS に到達できるベストパスを持つ傾向が、①における 2010.01 のデータでの解析と同様に見られる。高い接続数を持つ AS は AS グラフ全体の構造から、より中心に位置する AS であり、経路ハイジャックに対する耐性が強い。また逆にこのような AS から経路ハイジャックが行われてしまうと、他の AS からの正規経路を上書きしてしまうことが予測される。なお 2010.01 のデータでの解析に比べると、本データでは AS 数では倍増の一方、平均 AS パス長分布では同一の傾向ながら、0.6 ホップ程度の短縮が見られた。

次に図 3 に、AS の接続数から見た経路ハイジャックに対する生存割合を示す。本図は本来の prefix 広告元の AS、経路ハイジャックを行う AS の接続数をパラメータとして、ハイジャック経路の広報後の BGP 状態安定後の全 AS 中における平均生存割合を示す。例えば、生存割合 0.5 は、半分の AS でハイジャックされた経路がベストパスとして採用されたことを示す。なお経路広報元 AS、ハイジャック AS、それぞれの度数から 5 個の AS をランダムに選択して平均値とした。図 3 では、経路ハイジャック

をする AS の接続度が大きくなるにつれ、経路生存の割合が小さくなる傾向を示す。同時に、ハイジャックされる側の接続度が大きくなるにつれ、より大きな生存割合を示す。

$$D(c) = \text{average} \left(\sum_{AS_i \in AS_set(c)} \text{distance}(AS_i, AS_{j \neq i}) \right)$$

where:

$$AS_set(c) \equiv \{AS_k | \text{number_of_peers}(AS_k) = c\}$$

$$\text{distance}(AS_i, AS_j) \equiv AS_hops(\text{best_path}(AS_i, AS_j))$$

数式 1 平均距離の定義

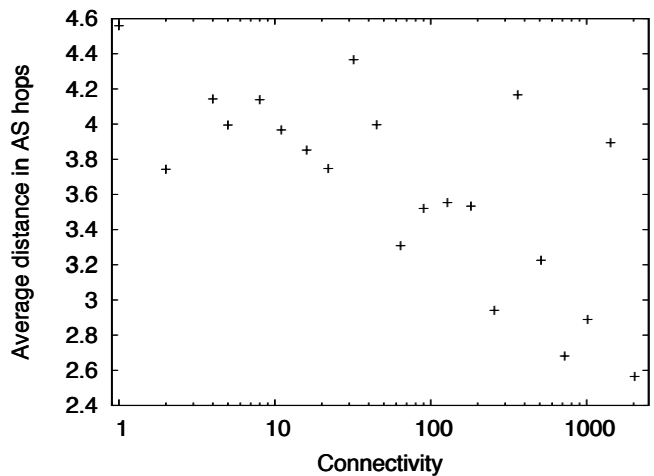


図 2 他の AS への平均 AS パス長

(3) 協調の効果

最初の基本となる比較対象の戦略として、ハイジャック検知をする能力がある AS をランダムに配置する戦略(ST-R)を想定する。ハイジャック検知をした AS は、その受信した経路がハイジャックだと自律的に(他の AS と協調動作や情報交換なしで)判断可能とし、その経路を廃棄することが可能と仮定する。

次の協調防御戦略として、ハイジャック検知をする能力がある AS を、接続度が高い AS から選択する戦略(ST-L)を想定する。ST-R と比べて、ハイジャックを検知する AS の数の違いで緩やかな一様ではなく、数が大きくなるに連れ明確に生存割合が上がる。また、ハイジャックされる AS の次数が大きくなるに連れ、全体的に生存割合も上がる傾向が見られる。

次に、経路ハイジャックを検知する AS として、隣接する AS を協調 AS として選択する戦略を想定する(ST-C2)。最初の検知する AS の選択はランダムであるが、その次の AS は隣接する AS とする。なお協調する隣接 AS 数はクラスタ毎で 2 と設定する。協調動作をする隣接 AS の選択として、provider, peer, customer の順番のプレファレンスで選択を行うとする。なお、Y 軸のハイジャック検知可能な AS の数は、協調動作する AS を含めた総数とする。ST-L ほど顕著ではないが、同様にハイジャックを検知する AS の数の違いで、緩やかな一様ではなく、次数が大きくなるに連れ明確に生存割合が上がる。また、ハイジャックされる AS の次数でも、数が大きくなるに連れ、全体的に生存割合も上がる傾向が見られる。

ここで、ST-L、ST-R、ST-C2 に関して、ハイジャックを検知する AS の数を X 軸に、その他の部分を平均化してプロットした図 4 を示す。

ST-L は、ハイジャックを検知する AS の数全てにおいてランダム選択である ST-R、大きさ 2 のクラスタを構成する協調動作戦略 ST-C2 を生存率において上回るが、ST-C2 も効果を示す。ST-R は、明らかにハイジャックを検知する AS の数の変化において、その生存割合は変化しない。ランダム選択である ST-R は、割合の多い接続数の少ない AS を選択する確率が高いため、ST-L に対して生存割合が低いと考えられる。また、customer AS を持たない leaf AS も 85%程存在し、その選択確率が高いためであると思われる。一方、ランダム選択を基本とする ST-C2 であるが、隣接 AS を provider あるいは peer AS から選択するため、選択された側のハイジャック検知機能により、生存割合が上がると考えられる。

次に隣接 AS 協調動作の有効性を解析するため、隣接 AS 選択部分を変更した戦略を用いた実験結果を示す。比較のため、隣接する AS からランダムに選択したケース(ST2-CR2)と、provider AS より先に peer AS を最初に選択する preference に変更したケース(ST2-CP2)を試した。なお、隣接 AS の最大数は 2 のままとした。また、ST-C2、ST-CR2、ST-CP2 に関して、ハイジャック検知する AS の数を X 軸に、その他の部分を平均化してプロットし図 5 に示す。

協調戦略間の有効性に関して、本実験では生存割合として、ST-CP2、ST-C2、ST2-CR2 の順番で効果が見られる。Peer 第一選択が provider 第一選択より有効そうである理由としては、peer 戦略が階層構造の他の木構造部分を

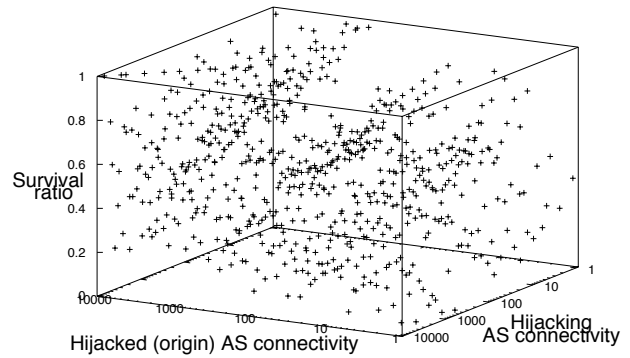


図 3 経路ハイジャックに対する耐性割合

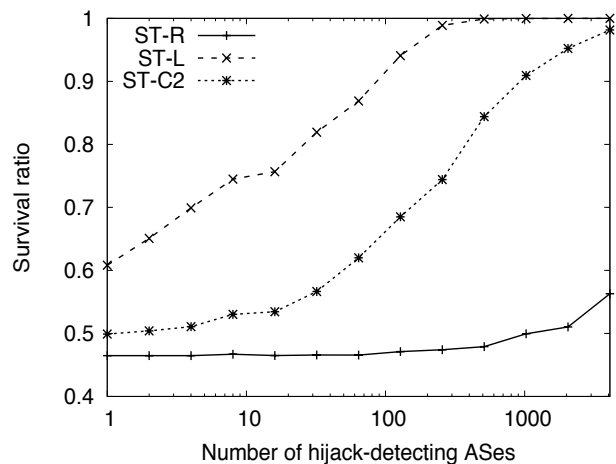


図 4 本来経路の平均生存割合 (ST-R, ST-L, ST-C2)

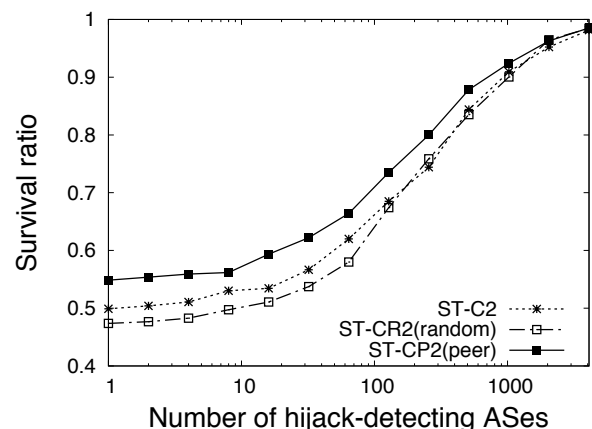


図 5 本来経路の平均生存割合 (ST-C2, ST-CR2, ST-CP2)

直接防御できるのに対し、直上の provider は、配下に持つ木構造が統計的に大きくなかった、という解釈が可能であるが、leaf AS が高確率で選択されるサンプリングの影響を排除し、その階層構造に基づくより詳細な解析が必要と思われる。

(4) 協調 AS の構成方法

協調動作する隣接 AS の数の違いに注視する。すなわち最初のランダム AS 選択からハイジャック検知 AS が、provider, peer AS の preference で隣接 AS から協調動作する AS を選択する ST2 をベースに、協調動作する AS を隣接 AS から選択し、その数を 3 (ST-C3), 4 (ST-C4) と変化させ、実験を行った。これらの比較のため、同様にハイジャックを検知する AS の数を X 軸に、その他の部分を平均化してプロットした図 6 を示す。なお、検知 AS 数を基準としたため、クラスタを構成する AS 数が多いほど、クラスタ数自体は小さくなる。

ST-C4 がより高い生存割合を示し、ST-C3 が次点となる。ST-C3 は、ハイジャック検知を行う AS 数が 1000 を超える辺りで、ST-C2 の効果が逆転する。ハイジャック検知 AS 数が多くなることでの効果に関しては、より詳細な解析が必要と思われる。

次の構成法では、協調する AS が直列化するように選択する。すなわち、ランダム選択したハイジャック検知 AS が、provider, peer AS の preference で隣接 AS から協調動作する AS を選択し、さらにその協調動作 AS が次の協調動作する隣接 AS を同様の preference で選択する。協調動作する AS 数を 2 (ST-S2), 3 (ST-S3), 4 (ST-S4) と変化させ、実験を行った (図 7)。定義より、隣接 AS 数が 2 の場合、ST-S2 は ST-C2 と同じとなる。

この実験では、ST-S4 がより高い生存割合を示し、ST-S3 が次点となる。ST-S2 は、ハイジャック検知を行う AS 数が 10 以下で、ST-S3 の効果が逆転するが、数が小さい部分に関しては、配置箇所数とクラスタ効果のトレードオフ誤差が出やすいため、解釈には注意が必要と思われる。

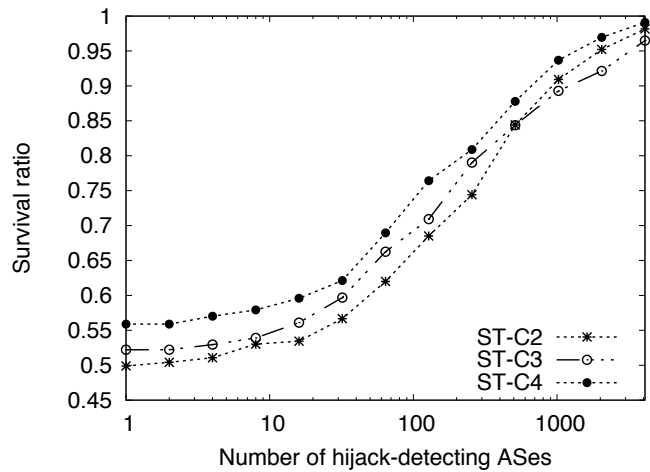


図 6 本来経路の平均生存割合 (ST-C2, ST-C3, ST-C4)

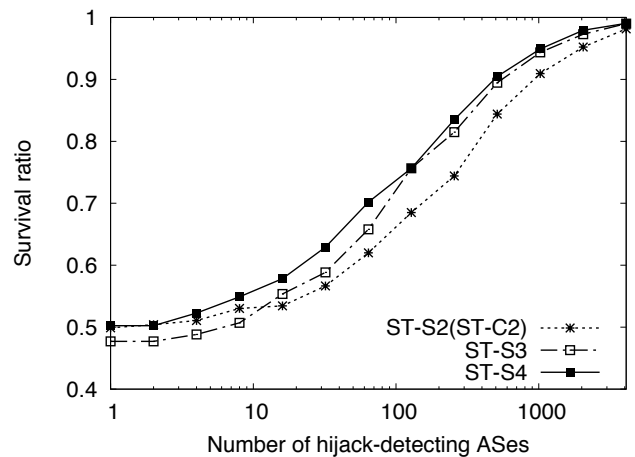


図 7 本来経路の平均生存割合 (ST-S2, ST-S3, ST-S4)

<引用文献>

- ① Akashi, O., Analysis of Cooperative Management Strategies against Route-Hijacking, 1st IFIP/IEEE Workshop on Managing Federations and Cooperative Management (In conjunction with IM11) (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 明石 修	4. 巻 Vol. 2021-DPS-186 No.57
2. 論文標題 ASグラフ構造に基づく経路情報耐性と協調防御の有効性に関する解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 明石 修
2. 発表標題 ASグラフ構造に基づく経路情報耐性と協調防御の有効性に関する解析
3. 学会等名 情報処理学会 第186回マルチメディア通信と分散処理研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------