

トラフィック及びトポロジーの構造解析に基づく通信ネットワークの最適化

鎌村 星平*¹

Optimization of Communication Network based on Structural Analysis of Traffic and Network Topology

Shohei KAMAMURA *¹

ABSTRACT : With the emergence of services with various requirements, such as high-definition video distribution, online games that require real-time performance, IoT services that require high-density connections, and the recent explosive spread of remote work and online classes, the structure of communication traffic is becoming more and more complex. In addition, network topologies are becoming larger and more complex to realize high-capacity communication, and it is necessary to be able to accurately understand the structures of these traffic and topologies to design and control networks appropriately. In this paper, we report on a study to analyze the structure of complex communication traffic and network topology, and the case study to control the network optimally based on the network analysis.

Keywords : communication network , network topology, traffic, multi-access edge computing

(Received November 29, 2021)

1. はじめに

高精細な映像配信やリアルタイムアプリケーション及びクラウドサービスの普及に加え、リモートワークやオンライン授業の爆発的な増加、さらに様々な物がつながるIoT (Internet of Things) サービスの出現により、通信ネットワークに流れる情報の流れであるトラフィックの構造は動的に変化する特性を持ち益々複雑化している。通信ネットワークは災害時の社会インフラとしての側面もあるため、高信頼かつ高品質な通信ネットワークを設計するためにはこの複雑な振る舞いを持つトラフィックの特性を正確に把握できる必要である。

また、大規模通信ネットワークは大きくは超大容量伝送を行う光トランスポートレイヤと、パケット交換を行うIP (Internet Protocol) レイヤで構成される。近年、各レイヤを構成するネットワーク装置を汎用ハードウェアで構成し、SDN (Software Defined Network) コントローラを用いてより柔軟な制御を実現する方法が活発に研究されている¹⁾。SDNコントローラ上では、通信トラフィック

の実際の通信路となる波長パスやIPパケットの経路を変数とし、設備コストの最小化やユーザの収容効率の最大化といった目的関数を持ったアルゴリズムを実装することでネットワークの最適化が実現される²⁾。このような最適化を行うためにはネットワークの形であるネットワークトポロジーの情報を正確に把握することが必要であるが、ネットワークは大規模化・複雑化が進んでおりその構造を正確に把握することは容易ではない。

以上より、通信ネットワークを最適化するためには情報の流れであるトラフィックや構成情報であるネットワークトポロジーの構造及び特徴を正確に把握することが必要である。本稿ではトラフィックの構造解析に関する研究、ネットワークトポロジーの構造解析に関する研究、及びこれら構造解析の結果を踏まえ、リモートワークやオンライン授業といった映像コミュニケーションのための通信帯域を最適化する研究について紹介する。

2. 通信トラフィックの構造解析に関する研究

2. 1 通信トラフィックの観測に関する研究

通信事業者が提供する大規模なネットワークにおいて

*¹ : 情報科学科准教授(shohei-kamamura@st.seikei.ac.jp)

は、過剰な設備投資や設備不足に起因するふくそうを発生させないよう空間的及び時間的なトラヒックの構造を把握し、適切に設備の設計を行う必要がある³⁾。近年の様々な映像配信サービスやウェブ会議接続の増加、さらに新たなIoTサービスの出現によってトラヒック構造は複雑化しており、その構造を高い精度で観測及び分析することが重要となっている。

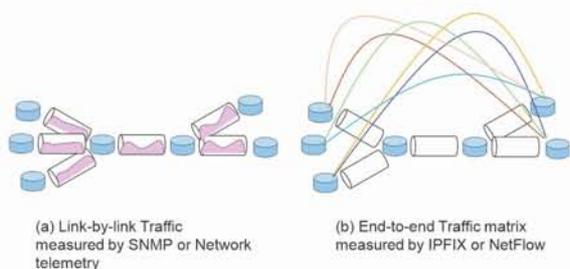


Fig. 1 Traffic measurement approach

トラヒックの観測技術は主に従来から使われるSNMP (Simple Network Management Protocol)⁴⁾やネットワークテレメトリ⁵⁾といったルータが保有するパケットカウント値を取得する方法、すなわちリンクトラヒックを観測する方法と、IPアドレスやポート番号といった特定の識別子によって分類されるパケット群であるフローをサンプリングや確率的データ構造を用いて観測する方法とに分類される。前者は観測が容易であるがトラヒックはリンクを通過する合算値として粗い粒度で情報が得られる。逆に後者は、例えばIPFIX⁶⁾やNetFlow⁷⁾と呼ばれるフロー観測プロトコルをルータに実装する必要がありルータ上で一定の負荷が発生するが、ルータ間やユーザ間といった特定の対地間のトラヒック発生状況を精緻に把握することが可能となる。これら特定の対地間のトラヒックを交流トラヒックと呼ぶ。リンクトラヒックと交流トラヒックのイメージをFig. 1に示す。リンクトラヒック量はそのリンクを通過する交流トラヒックの和となる線形の関係がある。

IPFIXやNetflowでは一定のルール及びサンプリング周期でフローを観測してその出現数をカウントしサンプリング前のトラヒック量を推定する。大規模通信網における観測データ量を削減するためにはサンプリング周期をある程度長く設定する必要があるが、この場合観測精度が著しく低下するため、フローカウントに代わる新たな観測方法が研究されている^{8),9),10),11)}。これらの新たなフロー統計の基本的な発想は、確率的データ構造を用いてフローの情報量を削減する点にある。Liらは確率的データ構造であるブルームフィルタを拡張したテーブル¹²⁾でフロー出現数とその量をカウントする方法を提案してい

る⁸⁾。ブルームフィルタによるハッシュの仕組みによって必要メモリ量を削減しつつ、基本演算は排他論理和によって実現されるため回路構成も簡易となる。Liuらは確率的データ構造であるCount-min-sketch構造¹³⁾を用いたフロー観測法を提案している⁹⁾。Count-min-sketchは高次元データをハッシュにより、より小さな空間である確率的データ構造へと射影するデータ構造である。Jinらはこの確率的データ構造に基づくデータ格納方法と合わせて、重点監視フローのための専用キュー構造とその溢れ判定の仕組みによって事前に閾値を設けることなくリアルタイムに急増するトラヒックを検出する方法を提案している¹⁰⁾。また、Yangらはsketch構造に基づく方法をより汎用化し、P4¹⁴⁾と呼ばれるプログラマブルスイッチやFPGAおよびソフトウェアによる実装方法及び性能評価結果を報告している¹¹⁾。

上述の交流トラヒック、もしくはより詳細なフローを観測する技術はインターネットへの適用を想定した場合に有効である。一方で、大規模通信事業者が提供するネットワークではVPNや柔軟な経路制御を実現するために多段のラベルが付与される、もしくはユーザ認証のためによりL2TP等のカプセル化が行われることが一般的である。このためフローを観測した場合に、外側のヘッダ情報のみが観測され所望の内側のヘッダ情報に基づく統計分析ができない課題があった。この課題に対し、著者らはワイヤーレートで発生するパケットをリアルタイムに解析するFast xFlow Proxyを提案してきた¹⁵⁾。Fast xFlow Proxyでは、複雑なアウターヘッダの解析やサービス毎の分計や統計処理をリアルタイムで行い後段に設置した市販分析装置が所望する形式でインナーヘッダの情報を転送する。通信事業者が管理する大規模通信網に適用するために、Fast xFlow ProxyをDPDKによるソフトウェア処理とFPGAによるハードウェア処理を組み合わせる実装し、100Gbpsのトラヒックをリアルタイム変換できることを確認している。

2. 2 通信トラヒックの分析に関する研究

通信ネットワークにおける交流トラヒックは面的なトラヒック分布を与えるため、前述したように過剰な設備投資や設備不足に起因するふくそうを発生させないよう通信ネットワークの最適化に活用できる。

また、トラヒックは時間変動する時系列データでもあり、この刻々とデータが発生し続ける時系列データをストリームとみなすことでストリームマイニングの手法¹⁶⁾を適用可能である。通信トラヒックをストリームとみなした場合、通常複数のフローの集合によってストリーム

が構成される。このため、一般的なストリームマイニング手法である過去のストリームとの波形比較を行った場合、統計多重の影響により特定フローの異常を検知することは困難である。一方で、前述したフロー観測技術やFast xFlow Proxyを活用することでFig. 2に示すようにストリームをさらに分割することが可能となり、ストリームの特徴量をより明確化し精度の高い分析を実現可能である。

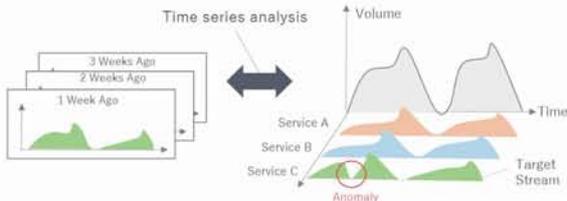


Fig. 2 Example of traffic anomaly detection

3. トポロジーの構造解析に関する研究

通信ネットワークの形であるトポロジーはその初期値は比較的単純な構造で与えられるが、2章で述べたトラフィックの構造変化に伴って計画的にあるいは不規則にその構造は変容し、結果として複雑な構造となる。そこでトポロジーの構造そのものを解析する方法が研究されている。トポロジーの構造分析に関する研究はマクロな傾向を分析する技術^{17),18),19)}と、より詳細な構造を分析するグラフマイニング^{20),21),22)}とに分類される。

マクロな傾向分析においては複雑大規模化するインターネットのトポロジー分析が2004年頃より活発に行われた結果、インターネットトポロジーの次数分布はべき乗則を持つスケールフリー性を有することが今では広く知られている^{17),18)}。トポロジーは次数分布に限らず例えばスペクトラム、中心性、尤度などの様々なメトリック構造を有しており、これらはMachadevanらによって体系化されている¹⁹⁾。Machadevanらはより実践的なトポロジーの構造分析を可能とするトポロジーのメトリック構造としてdK-graphを提案している。

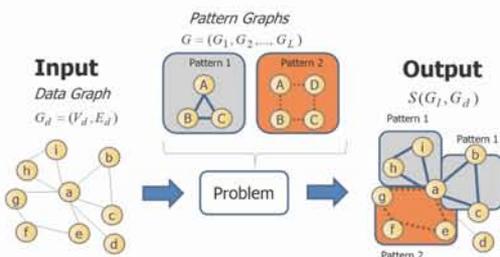


Fig. 3 Network resolution problem
Copyright(C)2018 IEICE from reference ²⁴⁾

より詳細なトポロジーの構造分析を行う方法としてグラフマイニングがあり、これは半構造データであるグラフを対象としたデータマイニング技術として位置付けられる。グラフマイニングでは探索対象とするデータグラフに対してパターングラフの出現を探索する。代表的なアルゴリズムとしてはデータマイニングにおける主流アルゴリズムであるアプリアリ法²³⁾を用いて探索を行う方法²⁰⁾や、バックトラック法を用いて探索を行う方法²¹⁾がある。これらのアルゴリズム^{20),21)}は大量のデータグラフを対象とした問題をいかに効率的に解くかという点に着眼している。いずれの方法においてもあるパターングラフがデータグラフの部分グラフであるかどうかを判定する必要がある、これは部分グラフ同型判定問題として定義される。部分グラフ同型判定問題を解く基本的なアルゴリズムはUllmannによって古くに考案されている²²⁾。Ullmannの手法では幅がデータグラフのノード数、深さがパターングラフのノード数に依存する探索木を作成し、探索木の深さ優先探索を行う。このとき枝狩り処理を適宜行うことで探索の効率化を行っている。

著者らはこのグラフマイニング技術に着目し、ネットワークトポロジーを「局所的な規定範囲」に適切に分解するトポロジーの主成分分析アルゴリズムを提案してきた²⁴⁾。ネットワークトポロジーに出現する主成分を分析する問題は、Fig. 3に示すように主成分をネットワークトポロジーの部分グラフとして捉えたときにその部分グラフを探索する部分グラフ同型判定問題²²⁾として定義される。しかし部分グラフ同型判定問題はNP困難な問題に属するため、既存のアルゴリズムを用いて大規模通信網を対象とした規模の問題を解くことは困難である。そこで大規模通信ネットワーク特有の条件を考慮することで同型判定処理を高速化するアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムでは探索先となるネットワークトポロジーにネットワーク運用の観点から既知である条件、例えば映像配信ノードやインターネット接続ノードが特定の位置に固定されるといった条件をラベル値として与えることで探索範囲を大幅に削減している。結果、例えば150

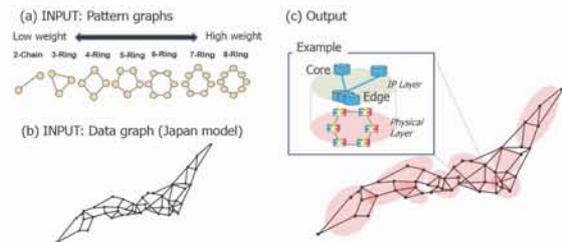


Fig. 4 Component Analysis from Physical Network
Copyright(C)2018 IEICE from reference ²⁴⁾

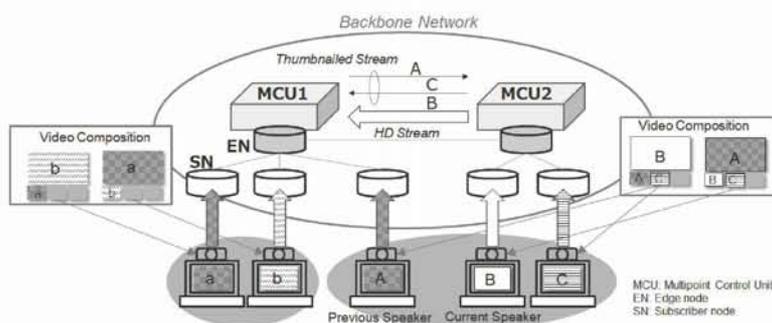


Fig. 5 Video streams in the MEC architecture with the distributed MCUs

Copyright(C)2020 IEICE from reference ²⁵⁾

ノードのデータグラフ及び5ノードのパターングラフを与えた条件下で、従来法で約2時間の計算時間を要するところ提案法では約0.07秒で計算を完了することを確認している。

提案する手法を用いたトポロジー解析の例をFig. 4を用いて説明する。Fig. 4では(a)に示すリング型のパターングラフと(b)に示す日本全域を想定したデータグラフを用いて主成分分析を行った結果を(c)に示している。結果よりリング型的主成分を用いて通信ビルと長距離通信路から構成される物理網を分割すると任意の通信ビルから常に2方路選択可能な部分グラフが作成される。すなわち、(c)に示すように例えばキャリア中継網などの階層構成を持つIP網を設計する場合において、中継ノードで区分する規定範囲の設計に活用可能である。この規定範囲内で例えばBGPのサブASやマルチエリアOSPFにおけるエリア等のドメインを設計することで、プロトコル信号の伝搬範囲を抑制する安定した中継ネットワークの設計に適用可能である。

4. 構造解析に基づくネットワークの最適化

2章で述べたトラヒック構造や3章で述べたトポロジー構造を正確に把握することで通信ネットワークの様々な最適化が可能となる。本稿では著者らによる映像コミュニケーションの帯域最適化の事例を紹介する²⁵⁾。

4Kをはじめとする高精細映像の高効率圧縮技術や5Gに代表される高速モバイル通信といった技術の発展に加え、2020年2月から世界各国で流行したCOVID-19の影響を受けリモートワークやオンライン授業のための映像コミュニケーションの利用が爆発的に増加している。一般的な映像コミュニケーションではMCU(Multi-point Control Unit)と呼ばれる多地点接続及び映像合成を行うサーバが利用される。MCUはクラウド上に配置され、ユーザ端末はMCUを介して互いに接続することで、複数ユ

ーザ間での映像や音声による遠隔コミュニケーションが実現される。

現行の映像トラヒックはH.264等の標準的な圧縮プロトコルを用いた場合のHD画質映像で1ユーザあたり約1から2Mbpsの帯域を消費している。今後の更なる映像高精細化や利用頻度の増加を見据えると、MCUまでの通信路となる中継ネットワークの帯域消費量が增大する課題がある。この課題に対しETSIが提唱するMEC(Multi-access Edge Computing)アーキテクチャ²⁶⁾が5G本格化時代における中核技術として期待されている。MECアーキテクチャでは様々な制御機能をクラウドではなくよりユーザに近い「エッジ」に配備する。映像コミュニケーションを例にするとFig. 4に示すように映像トラヒックのエッジでの折り返しと、エッジ同士の通信におけるトラヒックのサムネイル化による情報量圧縮が可能となり²⁷⁾、中継ネットワークの帯域使用量の削減が期待される。

ここで、映像トラヒックのサムネイル化の原理について解説する。通常、MCUは全ユーザ映像を用いて映像合成を行うため、複数台のMCUが分散配備された場合は互いの情報をMCU間フルメッシュで交換する必要があり、MCU間のトラヒックが増加する課題がある。そこで映像トラヒックのサムネイル化では、現在発話しているメインスピーカのトラヒック以外はサムネイル映像のみを送信することでMCU間のトラヒックを圧縮する。なお、高精細なメイン映像は例えばHDストリームとして約2Mbps程度であるがサムネイル映像は最大でも200Kbps程度であり、サムネイル化によってトラヒック量は1/10程度に圧縮される。

MECアーキテクチャの導入により中継ネットワークの帯域消費量の削減が期待されるが、十分な効果を発揮するためにはエッジサーバの配置や、ユーザとエッジ間、及びエッジとエッジ間のルーティングを決定するEDR(edge deployment and routing)問題を解く必要がある。本問題は混合整数計画問題として定式化されるため、NP困

難に属する。

著者らはNP困難となるEDR問題を現実的な時間で解くためにEDR問題を複数の部分問題に分割し、得られた解を統合するヒューリスティックなアルゴリズムを提案してきた。提案アルゴリズムではまずエッジサーバを配置するノードを決定する。これはHirataらの手法²⁸⁾を用いてもよいし通信事業者のポリシーに従って手作業で決定してもよい。次にユーザ端末からエッジサーバまでのルーチングと、エッジサーバ間のルーチングをそれぞれホストラフィックモデル²⁹⁾を用いた線形計画問題として定式化する。これにより各部分問題に対する厳密最適解が求まり、最後にそれぞれの解を結合することで準最適解を得る。

数値例としてFig. 6に示すGoogle社のデータセンタートポロジーであるB4モデル³⁰⁾と人口重力分布に基づく交流トラフィックを用いて数値シミュレーションを行った結果をFig. 7に示す。エッジサーバ数を増加するにつれて中継ネットワークの帯域消費量を削減可能であり、現実的なモデル化で約30%減の効果を確認した。

このように、ネットワーク上の経路や設備配置を変数として特定の目的関数を最適化するためには、正確な交流トラフィック情報とトポロジー情報が必要不可欠である。

5. むすび

大規模複雑化する通信ネットワークにおいて設備コストの最小化やユーザの収容効率の最大化といった所望の最適化を実現する上では、情報の流れである通信トラフィックとネットワークを形成するトポロジーの構造を解析し可視化することが重要である。本稿ではトラフィック及びトポロジーの構造解析に関する研究トレンドと著者らによる研究について報告を行った。

ネットワークの構造解析は単なるネットワークの可視化に留まらず、ネットワークのデジタルツイン化に向けた第一歩である。ネットワークのデジタルツイン化では、インターネットを始めとする大規模通信ネットワークを計算機上でエミュレートし、その結果を実ネットワークにフィードバックし新たな価値を創造する。例えば激甚災害や大規模なセキュリティ攻撃を想定した事前のシミュレーションにより堅牢なネットワークを構築する、または通信トラフィック傾向から人々の社会行動の分析、卑近な例では緊急事態宣言下における自粛行動といった社会的傾向分析への活用が期待される。

様々な社会的価値の創出を実現するネットワークのデジタルツイン化に向け、今後は複雑な特性を持つ通信ト

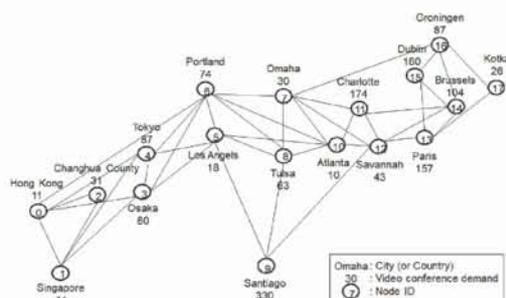


Fig. 6 Network and traffic model for video communication
Copyright(C)2020 IEICE from reference²⁵⁾

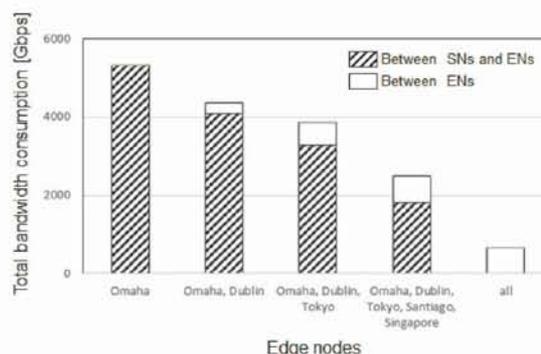


Fig. 7 Bandwidth consumption in the backbone network using the MEC
Copyright(C)2020 IEICE from reference²⁵⁾

ラフィックやトポロジーに対しデータマイニングを始めとする様々な学際的アプローチを用いて効率的なネットワーク解析を実現する研究を進める。

参考文献

- 1) D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2015.
- 2) R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks," in *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, Vol. 3, No. 5, pp. 489-500, Oct. 1995.
- 3) 植松芳彦, 鎌村星平, 杉山隆太, 武田知典, 宮村崇, 笹山浩二, "交流トラフィック推定技術の大規模サービス統合 IP 網への適用性," *電子情報通信学会論文誌(B)* vol. J98-B, No. 3 pp. 255-265, 2015年3月.
- 4) J. Case, et al., "A Simple Network Management Protocol (SNMP)," in *IETF RFC 1157*, May 1990.
- 5) M. Yu, "Network telemetry: towards a top-down approach," in *ACM SIGCOMM Computer*

- Communication, Vol. 49, Issue 1, pp. 11-17, February 2019.
- 6) B. Claise, et al., "Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of Flow Information," in IETF RFC7011, September 2013.
 - 7) B. Claise, et al., "Cisco Systems NetFlow Services Export Version 9," in IETF RFC3954, October 2004.
 - 8) Y. Li, R. Miao, C. Kim, and M. Yu, "FlowRadar: A Better NetFlow for Data Centers," In Proc. of NSDI, 2016.
 - 9) Z. Liu, A. Manousis, G. Vorsanger, V. Sekar, and V. Braverman, "One Sketch to Rule Them All: Rethinking Network Flow Monitoring with UnivMon," In Proc. of SIGCOMM, 2016.
 - 10) X. Jin, P. P. C. Lee, R. Li, L. Tang, Y. Chen, and G. Zhang, "SketchVisor: Robust Network Measurement for Software Packet Processing," in Proc. of ACM SIGCOMM 2017.
 - 11) T. Yang, J. Jiang, Peng Liu, Q. Huang, J. Gong, Y. Zhou, R. Miao, X. Li, S. Uhlig, "Elastic Sketch: Adaptive and Fast Network-wide Measurements," in Proc. of SIGCOMM 2018.
 - 12) M. T. Goodrich and M. Mitzenmacher. "Invertible bloom lookup tables," In arXiv:1101.2245v2, 2011.
 - 13) G. Cormode and S. Muthukrishnan, "An improved data stream summary: The count-min sketch and its applications," J. Algorithms, 2005.
 - 14) P. Bossharty, D. Daly, G. Gibby, M. Izzardy, N. McKeownz, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talaycoy, A. Vahdat, G. Varghesex, D. Walker, "P4: Programming Protocol-Independent Packet Processors," in ACM SIGCOMM Computer Communication Review, July 2014.
 - 15) 西岡孟朗, 林裕平, 三好勇樹, 森岡千晴, 鎌村星平, "複数事業者を収容するキャリア網のトラヒックを可視化する Fast xFlow Proxy の提案," 電子情報通信学会総合大会, B-6-33, 2021年3月.
 - 16) M. Toyoda, Y. Sakurai, and Y. Ishikawa, "Pattern Discovery in Data Streams under the Time Warping Distance," in VLDB Journal, Vol. 22, pp. 295-318, 2013.
 - 17) L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the internet's router-level topology," in Proc. of ACM SIGCOMM 2004, Aug. 2004.
 - 18) N. Sprint, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 12, pp. 2-16, Feb. 2004.
 - 19) P. Machadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, "Systematic topology analysis and generation using degree correlation," in Proceedings of ACM SIGCOMM 2006, Aug. 2006.
 - 20) A. Inokuchi, T. Washio, and H. Motoda, "An apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data," Proc. PKDD 2000, pp. 13-23, LNAI 1910, Springer-Verlag, 2000.
 - 21) X. Yan, and J. Han, "gSpan: Graph-based substructure pattern mining," Proc. IEEE ICDM'02, pp. 721-724, 2002.
 - 22) J. R. Ullmann, "An Algorithm for Subgraph Isomorphism," Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 23, No. 1, pp. 31-42, 1976.
 - 23) R. Agrawal, R. Srikant, "Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases," in Proc. VLDB 1994, pp. 487-499.
 - 24) S. Kamamura, A. Fukuda, R. Hayashi, and Y. Uematsu, "Regulated Transport Network Design using Geographical Resolution," IEICE Trans. Commun, Vol. E101-B No.3 pp. 805-815, March 2018.
 - 25) K. Genda, M. Abe, and S. Kamamura, "Video Communication for Teleconferencing using Edge Computing," in IEICE Communications Express, Vol. 9, No. 12, pp. 656-661, December 2020.
 - 26) "Multi-access Edge Computing (MEC)," website, <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>, accessed to March 2020.
 - 27) "Bandwidth optimization within PexipInfinity," website, https://docs.pexip.com/admin/bandwidth_management.htm, accessed to November 2021.
 - 28) K. Hirata, H. Yamamoto, S. Kamamura, T. Oka, Y. Uematsu, H. Maeda, and M. Yamamoto, "Traveling maintenance system design for wide-area telecommunication networks," in Proc. IEEE ComSoc International Communications Quality and Reliability Workshop (IEEE CQR 2019), Naples, FL, Apr. 2019.
 - 29) A. Juttner, I. Szabo, A. Szentesi, "On Bandwidth efficiency of the hose resource management model in virtual private networks," in proc. of IEEE Infocom 2003, pp. 386-395, March/April 2003.
 - 30) C.-Y. Hong, S. Mandal, M. Al-Fares, M. Zhu, et al., "B4 and after: managing hierarchy, partitioning, and asymmetry for availability and scale in google's software-defined WAN," in Proc. of ACM SIGCOMM 2018, pp. 74-87.