

## 2.6.4 ネットワーク運用

### (1) 研究開発領域の定義

通信ネットワークを24時間365日運用・提供するための技術である。携帯電話、FTTH、インターネット等の通信ネットワークサービスを利用者へ提供するために、通信事業者は携帯電話基地局、ルータ、サーバー等の多種多様な設備・機器を用いてネットワークを構築している。そのようなネットワーク上で、通信サービスの品質を常時監視し、ネットワーク障害等の問題へ早急に対処するためのネットワーク運用技術に関する研究動向を俯瞰する。

### (2) キーワード

ネットワーク運用、通信サービス、自律型ネットワーク、クラウドネイティブ

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

携帯電話、FTTH、インターネット等の通信サービスは娯楽的な利用用途だけではなく、経済活動や社会インフラの一部として組み込まれており、その重要性は年々増している。経済活動の観点では、ビッグデータ・IoT・AIなどのデジタル技術を用いた業務の効率化・高品質化を目指すデジタルトランスフォーメーション(DX)に関しても、通信サービスはそのデータ流通のバックボーンを担う。また、新型コロナウイルス感染症の流行を発端として急激に普及したリモートワークにおいて、通信サービスは遠隔の拠点/家庭を接続するための媒体であり必要不可欠となっている。社会インフラの観点では、警察・消防・救急等の緊急通報の提供や、運輸・交通といった社会生活に必要なサービスにおける通信サービスの利用が普及している。さらに、携帯電話の最新規格である5Gの普及に伴い、自動運転、遠隔手術といった人命に直結するようなアプリケーションへの通信サービス適用が期待されている。

このように通信サービスはすでに経済活動・社会インフラの一部を担っており、その通信サービスを提供する通信事業者は24時間365日、高い通信品質を維持することが求められる。しかしながら、通信サービスのために構築されたネットワークにおいては、そのネットワークを構成するネットワーク機器において機器故障等のネットワーク障害が日常的に発生する。通信事業者はネットワーク障害が発生したとしても通信サービスの通信品質の劣化や、通信サービスが停止する最悪の状況を回避しなければならない。この目的を達成する技術がネットワーク運用技術である。ネットワークの現在の状態や発生するイベントを計測し、求められる通信品質と乖離がある場合はネットワーク内において実施すべき対応策を確立し、その対応策をネットワーク上で実施するといった一連の流れにより、通信事業者は継続的・安定的な通信サービスの提供が可能となる。

#### [研究開発の動向]

ネットワーク運用を実現するためには、ネットワークの現在の状態や発生するイベントを逐次計測し(計測ステップ)、計測結果から規定のサービス品質を満たしていないことが判明した場合はネットワーク内で実施すべき対応策を判断し(判断ステップ)、判断された対応策・設定をもとにネットワーク機器を制御する(制御ステップ)という一連のステップが必要となる。例えば、Packet Drop率が現在3%であると「計測」され、それが利用者とのService Level Agreement(SLA)を満たしていないことが判明したとき、対応策として該当ルーターを経由しないRoutingの変更を「判断」し、ネットワーク内の対象ルーター群に対してRoutingを変更する「制御」を実施するといった動作が考えられる。

まず、計測ステップ関連の技術動向について述べる。通信サービスを提供するために構築されたネットワークの状態を計測するためには、ネットワークを構成する各ネットワーク機器の性能指標(例:CPU利用率、受信リクエスト正常終了率)を計測することが第一に求められる。そのような性能指標をネットワーク機器よ

り取得するための通信プロトコルとして、Simple Network Management Protocol (SNMP)<sup>1)</sup> や Network Configuration Protocol (NETCONF)<sup>2)</sup> が挙げられる。しかしながら、SNMP/NETCONFは通信プロトコルであり、その中で各性能指標の具体的構造(例:CPU利用率は0~100のIntegerとして表す)を定義する必要がある。近年では、NETCONFにおける性能試験の具体的構造の標準化が中心に進められており、Yet Another Next Generation (YANG)<sup>3)</sup> と呼ばれるデータモデル言語による記述が進められている。IETF, IEEE, O-RAN等の標準化団体において、自身の規定するルーター、光伝送装置、携帯電話基地局等のネットワーク機器の性能指標をYANGによって記述する標準化が進められている<sup>4)</sup>。

次に、判断ステップ関連の技術動向について述べる。判断ステップにおいては、(1)計測された性能指標より規定サービス品質を満たしているか判断し、(2)(満たしていない場合)規定サービス品質を満たすために必要なネットワーク制御内容を決定するという手順が必要となる。従来、これらの手順は人(運用者)が判断・決定していたものである。そのため、判断ステップのコストを低減する上では「いかに人が実施していたネットワーク運用業務をシステムによって自動的に実施できるか」という観点が最も重要となる。近年では機械学習(Machine Learning, ML)、深層学習(Deep Learning, DL)、強化学習(Reinforcement Learning, RL)といったArtificial Intelligence(AI)技術の適用に関する研究開発が盛んに実施されている<sup>5)</sup>。ネットワーク運用へのAI技術の適用においては、計測ステップで得られるデータをもとに各種AIアルゴリズムにより学習が行われ、得られた学習モデルを用いてネットワーク内で発生するネットワーク障害が自動的に検知・予測されるとともに、そのネットワーク障害の原因を特定し、解消する最適な手段が推定される。ML/DL/RLのアルゴリズムは多種多様ではあるが、一例としては、AutoEncoder、LSTM(Long Short Term Memory)、RandomForest、Deep Q-Networkといったアルゴリズムが検討されている。

最後に、制御ステップ関連の技術動向について述べる。本ステップにおいては、判断されたネットワーク内の制御内容を実際に対象ネットワーク機器の設定へ反映する。判断ステップと同様に、従来は人(運用者)が実際に対象のネットワーク機器へログインし設定を投入していたものであり、それをシステムにより自動的に実施することが本ステップにおいて求められる。ネットワーク機器や設定を反映するための通信プロトコルとしては、計測ステップと同様にNETCONFを用いて自動的にネットワーク機器へ設定を反映する標準化が進んでいる。IETF, ETSI, IEEE, O-RAN等の標準化団体において、自身の規定するルーター、光伝送装置、携帯電話基地局等のネットワーク機器の設定内容をYANGにより記述する標準化が進められている。実際に設定内容をネットワーク機器へ反映するためのツール・プログラムとして、Python等のプログラミング言語を用いた設定反映の自動化に関する取り組みも盛んであり、ネットワーク機器操作の専用ライブラリをOSSとしてGitHub上で開発・公開している例もある<sup>6)</sup>。また、近年ではInfrastructure as Code(IaC)として、通信サービスのインフラの設定・あるべき状態をプログラミングコードとして定義する技術が注目されており、ネットワーク運用者がIaCのためのソフトウェア開発を実施する、いわゆるDevOpsによるネットワーク運用スタイルを取り入れる通信事業者が現れ始めている。DevOpsを可能とするOSSのIaCプラットフォームとしては、複数クラウドの統合的管理が可能なTerraform<sup>7)</sup>、ネットワーク機器の統合的管理を可能とするAnsible<sup>8)</sup>などが挙げられる。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### 利用者の体感品質の計測

ネットワーク運用における計測関連のトピックスとしては、通信サービスの利用者が体感するサービス品質の性能指標を測定するという新しい展開が注目されている。というのも、(3)で述べた性能指標はあくまでネットワーク機器単体の性能指標を示すものであり、通信サービス全体のサービス品質や、通信サービスを実際に利用する利用者が体感する通信品質の性能指標を直接示すわけではないためである。そのような性能指標を計測するために、In-band Network Telemetry技術に関する研究開発が進められている<sup>9)</sup>。In-band

Network Telemetry 技術においては、利用者が実際に送受信するパケットに対して、ネットワーク機器が測定用情報を埋め込み、その情報を関連する他のネットワーク機器が参照・処理（例：各ネットワーク機器の受信時刻、送信時刻をヘッダ内に記録する）することで、実際にその利用者が体感したサービス品質の測定が可能となる。

## 自律型ネットワーク

ネットワーク運用における判断関連のトピックスとしては、技術動向として挙げられたAI技術をネットワーク運用へ完全に組み込み、人間の運用者を介さないネットワーク運用を目指す自律型ネットワーク (Autonomous Network) が主となる。ネットワーク運用に関するAPI等を規定する標準化団体であるTM Forumにおいて、Autonomous Network Levelというネットワーク運用自動化のレベルを規定しており<sup>10)</sup>、自律型ネットワークは最高レベルであるレベル5：full autonomous levelに対応する。レベル5においては、複数通信サービス、複数ネットワークドメインを跨いだ、通信サービス・ネットワークのあるべき状態 (Intent) によりネットワーク運用の完全な自動化が可能となる。自律型ネットワークにおいては、ネットワークのあるべき状態を定義する Intent という情報を通信事業者または利用者が自律型ネットワークに設定し、その Intent を達成するようにAI技術による自律的なネットワークを構築・運用を行う。そのような自律型ネットワークを実現するために、Intentのモデル化や、AI技術を利用する上で欠かせないAI学習モデルを自動的に訓練する技術、自律型ネットワークを可能とする Business Support System (BSS) / Operating Support System (OSS) を含んだネットワークアーキテクチャの検討等の研究開発・標準化活動が進められている。

## クラウドネイティブなネットワーク運用

ネットワーク運用における制御関連のトピックスとしては、近年爆発的に普及したクラウド関係の開発スタイルより派生したクラウドネイティブな手法をネットワーク運用へ適用する事である。Linux Foundationのプロジェクトの一つであるCloud Native Computing Foundation (CNCF) において、クラウドネイティブは、「クラウド等の近代的でダイナミックな環境において用いられるスケーラブルなアプリケーションの構築・実行するための能力を組織にもたらし、回復性、管理力、および可観測性のある疎結合システムが実現する」と定義されている<sup>11)</sup>。コンテナ、Kubernetes、サービスメッシュ、マイクロサービス等のクラウドネイティブな技術を通信サービスへ適用することで、現在のネットワークの詳細な状態を把握し (可観測性)、宣言的にネットワークインフラを構築し (管理力)、ネットワーク障害が発生したとしても利用者に影響を与えることなく復旧する (回復性) ことが期待されている。

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

### 利用者の体感品質の計測

利用者の体感品質計測に用いられる技術である In-band Network Telemetry 技術に関する注目すべき国内外のプロジェクトに関して述べる。IPレイヤにおける In-band Network Telemetry として受信したIPパケットに対して測定用情報を何らかのヘッダとして埋め込むためのパケット転送処理に関する研究開発が盛んに実施されてきている。とくにスタンフォード大学、プリンストン大学、Barefoot Networks (2019年 Intelが買収)、Intel、Google、Microsoft Researchによって開発されたパケット転送処理の動作を記述する専用プログラム P4<sup>12)</sup> による研究開発が盛んである。また、標準化の観点では、測定用情報のヘッダ構造に関する標準化活動が実施されており、IETFではIP Performance Measurement (ippm) WGにおいて標準化が進められており、ヘッダ構造としては In-situ OAM (IOAM)<sup>13)</sup> として標準化が完了しており、IOAMを用いた詳細な計測方法に関する標準化が実施されている。

## 自律型ネットワーク

自律型ネットワークに関しては現在さまざまな標準化団体間で並行かつ連携しながら開発が進められている。TMFにおいてはAutonomous Network Project<sup>14)</sup>が立ち上がり、自律型ネットワークのアーキテクチャ検討ならびに自律型ネットワークのあるべき姿を示す情報であるIntentを管理するためのAPIの規定を進めている。また、ITUにおいても楽天モバイルが中心となって設立したFocus Group Autonomous Network (FG-AN)<sup>15)</sup>において、自律型ネットワークのアーキテクチャ、技術要求の検討を実施している。また、自律型ネットワーク適用先の有力候補であるモバイルネットワークの標準化を実施している3GPPにおいても、モバイルネットワークにおけるAutonomous Networkレベル定義<sup>16)</sup>とIntent APIの定義<sup>17)</sup>を実施している。

## クラウドネイティブなネットワーク運用

上述した通り、Kubernetes等のクラウドネイティブな技術やOSSに関してはクラウド業界が先行して開発し、利用している状況である。そのようなクラウドネイティブ技術を通信用サービスへ適用する上で親和性が高い通信用サービスとしてはモバイルネットワークが挙げられる。モバイルネットワークの標準化団体である3GPPでは5Gのモバイルコアネットワーク(5GC)において、クラウドネイティブ技術の適用が可能なアーキテクチャであるService-Based Architecture (SBA)を導入した<sup>18)</sup>。SBAは5GCにおいて必要な各種機能(例: 認証、課金、モビリティ管理、セッション管理)をNetwork Function (NF)として定義し、各NFは自身の提供する機能をAPIとして公開するアーキテクチャである。しかしながら、ネットワーク障害時の迅速な復旧、ステートレスなアーキテクチャ等の課題も残存しており、今後標準化が行われる6Gにおいてそのような課題を解決し、クラウドネイティブなネットワーク運用を可能とする必要がある。

## (5) 科学技術的課題

ネットワーク運用という観点においては、自律型ネットワークが最終的に目指す姿であり、そこに向けて特に注力すべきである。ネットワークの観点で特に大きな今後の課題として、複数ネットワークドメイン間、複数事業者ネットワークの連携が挙げられる。

### 複数ネットワークドメイン間の連携・統合的運用管理技術

ある通信事業者が提供する通信用サービスは単一のネットワークドメインのみではなく、複数のネットワークドメインによって構築されている。例えば5G等のモバイルネットワークサービスにおいては、基地局ネットワーク(CU, DU, RU)、モバイルコアネットワーク(5GC)、それらのコンポーネントを接続するトランスポートネットワーク(光伝送装置、スイッチ、ルーター)によって構成されている。これらの複数ネットワークドメインそれぞれで規定サービス品質を満たすように計測・制御を実施した上で、複数ネットワークドメイン全体を管理するオーケストレーターの確立が求められる。

### 複数事業者ネットワークの連携

これまで、単一の通信事業者内のネットワークにおけるネットワーク運用技術の研究開発が中心であったが、異なる通信事業者ネットワーク間の連携に関しても今後検討を加速する必要があると考えられる。昨今ではモバイルネットワークにおける大規模障害発生時の緊急通報のローミングに関する検討が加速しており、単一の通信事業者内で対処しきれないネットワーク障害が発生した時に、他の通信事業者のネットワークを活用した一時的復旧が求められている。このような通信事業者間の連携を実現するために、各種ネットワークにおける標準化、一時的なネットワークリソースの貸し出しに関する研究開発の実施が期待されている。

## (6) その他の課題

ネットワーク運用の最終的に目指す姿である自律型ネットワークの実現に関しては、AI技術の適用が必要

不可欠であり、AI技術の発展のためには、学習のために広く利用が可能なオープンデータの存在が重要となる。特に通信サービス・ネットワークという観点では、実際のネットワーク機器の測定データが必要となるが、それらは通信事業者のみが得られる情報であり、AI技術の発展のために中心的存在となる大学等の学術機関は得ることが困難である。しかしながら、通信事業者にとってそのようなデータは経営に関する重要な秘匿情報であるため、何らかの形で通信事業者名の匿名化が必要となることも考えられ、そのような場合は行政によるサポートが必要となる。このように、自律型ネットワークに不可欠となるAI技術を発展させていく上では、産官学の連携強化が必要である。

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	ネットワーク関係の最難関国際会での発表件数は1件と少ないものの、ネットワーク運用に特化した国際会議においては発表件数9件と全体の13%を占めて第2位である。
	応用研究・開発	○	↘	NTTを中心とした国内キャリアによる標準化活動、NEC、富士通を中心としたOSS活動、ネットワーク運用関係の製品開発を進めている。しかしながら、近年海外における活動の勢いが低下している。
米国	基礎研究	◎	→	ネットワーク関係の最難関国際会議での発表件数が21件と全体の58%を占め第1位である。
	応用研究・開発	◎	↗	AWS, Azure, GCPと主要クラウドを要しており、クラウド関係のネットワーク運用製品開発、OSS活動が特に盛ん。TM Forum Catalystにおいても、欧州、中国に次ぐ参加数である。
欧州	基礎研究	◎	→	ネットワーク関係の最難関国際会議での発表件数が4件と全体の11%を占める。また、ネットワーク運用に特化した国際会議においては発表件数43件と全体の64%を占めて第1位である。
	応用研究・開発	◎	↗	TM Forum Catalystにおいて、最多の参加数であった。また、Ericsson/Nokiaを中心に5G関係のネットワーク運用製品開発が盛んに実施されている。
中国	基礎研究	◎	↗	ネットワーク関係の最難関国際会議での発表件数が10件と全体の28%を占めて第2位である。特に近年での発表件数の急速に増大している。
	応用研究・開発	◎	↗	標準化に特に力を入れており、5G関連のネットワーク運用製品開発が盛ん。TM Forum Catalystにおいても欧州に次ぐ参加数である。基礎研究と同様に急速に勢いを増している。
韓国	基礎研究	△	↘	ネットワーク関係の最難関国際会議での発表件数0件、ネットワーク運用に特化した国際会議での発表件数1件と近年、基礎研究に関する発表が減少している。
	応用研究・開発	△	↘	Samsung社の5G関係ネットワーク運用製品開発があるものの、他国・地域と比較すると近年の勢いは弱い。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

×：活動・成果がほとんど見えていない

○：顕著な活動・成果が見えている

—：評価できない（公表する際には、表示しない）

△：顕著な活動・成果が見えていない

（註3）近年（ここ1～2年）の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向 →：現状維持 ↘：下降傾向

※ネットワーク関係の最難関国際会議としては、ACM SIGCOMM, ACM CoNEXT, IEEE INFOCOMにおけるネットワーク運用に関する直近2年間の発表件数を調査している

※ネットワーク運用に特化した国際会議としては、IEEE/IFIP NOMS, IEEE/IFIP IMにおけるネットワーク運用に関する直近2年間の発表件数を調査している

※TM Forum Catalystはネットワーク運用関係の標準化団体であるTM Forumが開催するグローバルPoCイベントであり、本報告書においては各国・地域ごとの2022年Catalystのネットワーク運用関係PoCへの累計参加企業数を調査している。

## 参考文献

- 1) Jeffery D. Case, et al., “A Simple Network Management Protocol (SNMP), May 1990,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc1157.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 2) Rob Enns, et al., “Network Configuration Protocol (NETCONF), June 2011,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc6241.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 3) Martin Bjorklund, “The YANG 1.1 Data Modeling Language, August 2016,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc7950.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 4) GitHub, Inc., “YangModels/yang,” <https://github.com/YangModels/yang>, (2023年2月26日アクセス) .
- 5) Chaoyun Zhang, Paul Patras and Hamed Haddadi, “Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21, no. 3 (2019) : 2224-2287., <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2904897>.
- 6) GitHub, Inc., “Awesome Network Automation,” <https://github.com/networktocode/awesome-network-automation>, (2023年2月26日アクセス) .
- 7) GitHub, Inc., “Terraform,” <https://github.com/hashicorp/terraform>, (2023年2月26日アクセス) .
- 8) GitHub, Inc., “Ansible,” <https://github.com/ansible/ansible>, (2023年2月26日アクセス) .
- 9) Lizhuang Tan, et al., “In-band Network Telemetry: A Survey,” *Computer Networks* 186 (2021): 107763., <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107763>.
- 10) TM Forum, “Autonomous Networks: Empowering Digital Transformation For The Telecoms Industry,” <https://www.tmforum.org/resources/standard/autonomous-networks-empowering-digital-transformation-telecoms-industry/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 11) GitHub, Inc., “cncf/toc,” <https://github.com/cncf/toc/blob/main/DEFINITION.md>, (2023年2月26日アクセス) .
- 12) Pat Bosshart, et al., “P4: programming protocol-independent packet processors,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 44, no. 3 (2014) : 87-95., <https://doi.org/10.1145/2656877.2656890>.
- 13) Frank Brockners, Shwetha Bhandari and Tal Mizrahi, “Data Fields for In Situ Operations, Administration, and Maintenance (IOAM), May 2022,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc9197.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 14) TM Forum, “Collaboration: Member Projects,” <https://www.tmforum.org/collaboration/autonomous-networks-project/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 15) International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), “ITU Focus Group on Autonomous Networks (FG-AN),” <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/an/Pages/default.aspx>, (2023年2月26日アクセス) .

- 16) 3GPP Portal, “TS28.100: Management and orchestration; Levels of autonomous network,” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3756>, (2023年2月26日アクセス) .
- 17) 3GPP Portal, “TS28.312: Management and orchestration; Intent driven management services for mobile networks,” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3554>, (2023年2月26日アクセス) .
- 18) 3GPP Portal, “TS23.501: System architecture for the 5G System (5GS),” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>, (2023年2月26日アクセス) .

## 2.6

俯瞰区分と研究開発領域  
通信・ネットワーク