

将来の状況の予測に基づく ネットワーク制御技術

Dynamic Network Control Based on Prediction

大下裕一 村田正幸

Abstract

スマートフォンやIoT機器など、様々な機器がネットワークに接続するようになり、ネットワークを流れる通信需要の変動は大きくなっている。状況変化が発生した場合であっても、必要な通信性能を維持するには、通信需要などの将来の状況を予測し、予測された状況に合わせてネットワークを制御することが有効である。本稿では、ネットワーク制御の概要と制御に利用可能な観測情報や制御対象について説明し、我々が検討を進めている新たなネットワーク制御手法を紹介する。

キーワード：ネットワーク制御，トラフィックエンジニアリング，予測，ネットワーク仮想化，資源割当

1. はじめに

スマートフォンの普及やIoT機器の登場により、ネットワークに多数の機器が接続されるようになった。今後、更なるIoT機器や関連するサービスの登場が期待され、更に多くの種類のサービスを、各サービスの性能要求に合わせてネットワークに収容することが求められると考えられる。それらのサービスの需要は時々刻々変化するため、必要となるネットワークの資源量も時々刻々変化する。その結果、当初割り当てた資源では必要な通信性能が確保できない等の問題を生じる可能性がある。この問題を防ぐためには、各時刻の状況に合わせて、各サービスに必要な資源を割り当てる必要がある。

この問題に対処する方法として、時々刻々の状況の変化に合わせて、ネットワークの構成や設定を動的に変更する技術の研究が進められている。ただし、状況の変化に合わせてネットワーク構成・設定を動的に変更する場合、現在の状況ではなく、将来の状況を予測して制御を

しないと、資源不足等の問題発生後に対処を行う場当たりの制御となってしまう、一時的な性能劣化を避けられないのみならず、ネットワークを不安定化させてしまう可能性もある。そのため、ネットワークの構成や設定の動的な変更は、将来の状況を予測し、予測に基づいて制御することが求められる。本稿では、このような将来の状況の予測と連携したネットワーク制御について紹介する。

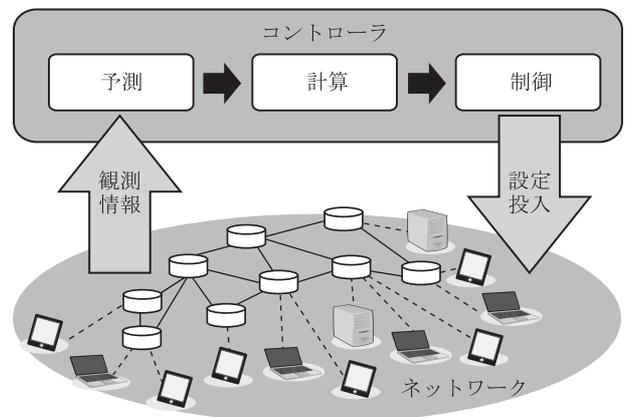


図1 将来の予測に基づくネットワーク制御の概要 ネットワークからの観測情報の取得、予測、計算、制御を繰り返すことにより、状況に合わせてネットワークを制御する。

大下裕一 正員 大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻
E-mail y-ohsita@ist.osaka-u.ac.jp
村田正幸 正員：フェロー 大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻
E-mail murata@ist.osaka-u.ac.jp
Yuichi OHSITA, Member and Masayuki MURATA, Fellow (Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita-shi, 565-0871 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.102 No.9 pp.860-865 2019年9月
©電子情報通信学会 2019

2. ネットワーク制御とは

2.1 ネットワーク制御の概要

図1に予測に基づくネットワーク制御の概要を示す。通信需要やネットワークを介したサービスへの需要は時々刻々変化する。ネットワーク制御技術では、その変化する需要に合わせて、ネットワークの構成、設定を動的に変更する。ネットワーク制御は、以下の手順を繰り返すことにより行われる。

(1) 観測・予測

ネットワークの現在の状況を把握するために、関連する情報を収集し、収集した情報を基に、近い将来のネットワークの状況や需要を予測する。

(2) 計算

予測されたネットワークの状態や需要に合わせて、制御目的を踏まえた適切なネットワークの設定を求める。

(3) 制御

計算された適切なネットワークの設定を投入する。

以降、本章では、上記の手順で必要となる、制御の目的、制御対象、制御の際に用いることができる観測情報について整理する。

2.2 制御の目的

ネットワーク制御の目的は、主として、以下のものが存在する。

- ・ 通信性能の維持

ネットワーク管理者は、想定した量のトラフィックを十分な通信性能で収容できるように、ネットワークの構成や経路を設計する。しかしながら、実際に発生するトラフィック量は時々刻々変化するため、想定とは異なる量のトラフィックが発生し得る。その場合、特定のリンクが混雑するなどの問題が発生する。その結果、ネットワーク内の遅延が長くなったり、発生した通信を全て収容することができない。このような問題に対応するためにネッ

トワークの動的制御が行われる。必要となる通信性能は、アプリケーションにより異なり、通信帯域の確保ができればよいものもあれば、通信遅延を一定以下に抑えることが必要となるものや、通信遅延の変化の大きさが大きな影響を与えるアプリケーションも存在する。

- ・ 接続性の確保

ネットワーク内の機器が故障した場合、その機器を介して行われていた通信を中継することができなくなる。この問題には、事前に、バックアップとなる予備の経路を設定しておき、故障検知後、予備の経路に切り換えるといった手法が用いられる。動的なネットワーク制御の際には、性能の確保に加え、機器の故障を考慮し、故障時にも接続性を維持しつつ、性能劣化を抑えるような予備の経路を計算することが行われることもある。

- ・ 省電力

ネットワークは、発生し得る最大のトラフィックを収容することができるように設計される。しかしながら、トラフィック量の時間変動は大きく、トラフィック量が少ない時間帯には、設置された全ての機器の電源を投入しなくても、発生するトラフィックを全て収容することが可能となる。この場合、必要となる機器のみ電源を投入し、不要な機器をスリープさせることにより、ネットワークが消費する電力を抑えることができる。そのため、消費電力を考慮した手法も検討されている。

2.3 制御の対象

図2にネットワーク制御における制御対象の例を示す。

- ・ 経路

通信需要は、時々刻々変化する。その結果、当初、経路を設計した時点とは異なる箇所にトラフィックが集中し、通信遅延が大きくなる等、通信性能が低下する。この場合、トラフィックの集中が発生するリンクをう回するように、経路変更をすることにより、トラフィックの集中を解消することができる。近年では、OpenFlowに代表される Software Defined Networking 技術^(脚註)により、ネットワークを流れる各フローの経路を集中制御により決定することが可能となっている⁽¹⁾。そのため、コントローラが各時刻の状況に合わせて経路を計算し、その経路を設定として投入することにより、時々刻々の状況に合わせた経路設定を投入することが可能となる。

- ・ 機能配置

近年、ファイヤウォール等のネットワーク機能を汎用的なコンピュータ上で動作させる NFV (Network Function Virtualization) と呼ばれる技術の研究開発が進めら

■ 用語解説

Software Defined Networking 技術 ネットワークをソフトウェアで制御する技術。各機器が行っていた経路等の制御をコントローラ上のソフトウェアで行うようにすることにより、柔軟な制御が可能となる。

ネットワークスライシング技術 物理ネットワークを仮想的に複数のネットワークに分割する技術。これにより、単一のネットワークで、要求の異なる複数のネットワークサービスを提供可能となる。

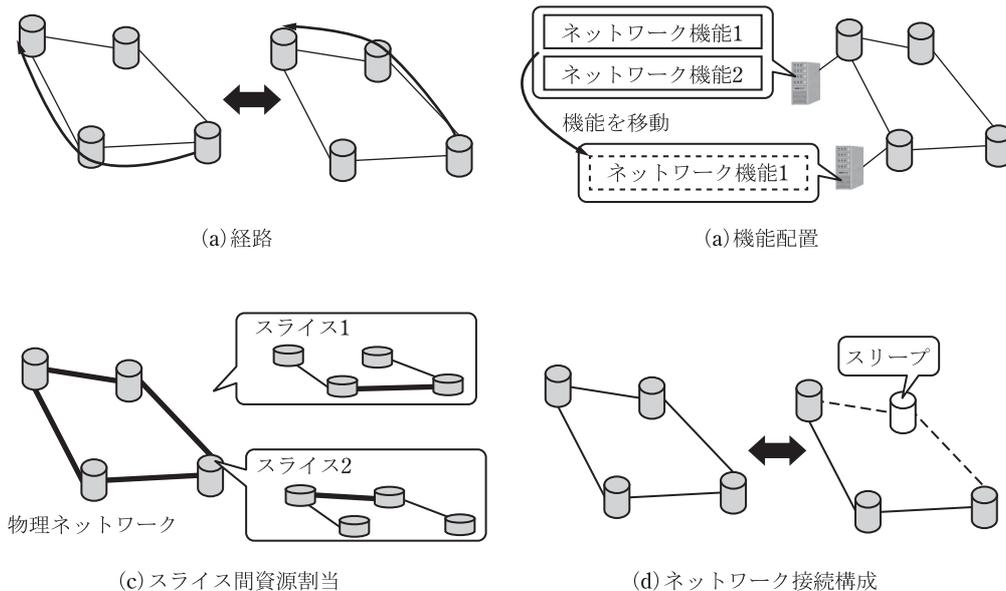


図2 ネットワーク制御における制御対象 ネットワーク制御では、ネットワーク内の経路、ネットワーク機能の配置箇所、スライス間の資源割当、ネットワークの接続構成などがある。

れている⁽²⁾。本技術を用いることにより、従来は、専用ハードウェアと一体化したアプライアンスとして提供されていたネットワーク機能を汎用なコンピュータ上で動作させることができるようになる。NFVを用いた場合、従来の専用アプライアンスでネットワーク機能を提供する場合と異なり、いずれのネットワーク機能も、ネットワーク上に設置された汎用的なコンピュータのいずれで動作させることも可能となり、汎用コンピュータで動作中の仮想マシンを別の汎用コンピュータに異動させるLive Migration技術と組み合わせることにより、ネットワーク機能をネットワーク内の任意の場所に異動させることができる。そのため、ネットワークの状況に応じて、各ネットワーク機能が必要とされる通信が多い箇所に異動させたり、需要の少ない時間帯には、ネットワーク機能を集約し、多数の機器をスリープさせるといった制御を行うことができる。

・ 資源割当

近年、ネットワークを仮想的にスライスに分割する、ネットワークスライシング技術^(用語)に関する研究が進められている⁽³⁾。ネットワークスライシング技術を用いることにより、サービスごとの要求条件に合わせて仮想的なネットワークスライスを構築することができ、要求条件の異なるサービスを柔軟に収容することができる。このようなスライシングされたネットワークにおいては、スライス間の資源割当を時々刻々の状況に合わせて調整することが必要となり、各スライスの需要の変化に対応して、各スライスに割り当てる資源を変更する制御が行われる。

・ ネットワーク構成

上述の経路や機能配置と合わせ、ネットワーク機器やリンクの電源をスリープさせたり、起動させることにより、物理的なネットワーク構成を状況に合わせて変更する制御を行うことも可能である⁽⁴⁾。この制御により、需要の少ない時間帯に機器をスリープし、低消費電力化が可能である。

2.4 制御の際に利用可能な観測情報

・ トラフィック量

ネットワークを制御する際に、重要となる情報は、現在から将来にわたる通信需要である。通信需要を把握・予測し、予測された需要を基にすることにより、必要な性能を確保できるようにネットワーク制御をすることができる。

将来のトラフィック状況を予測するのに、これまで観測されたトラフィック量の情報は有用な情報となる。トラフィック量の情報は、ネットワーク機器の各リンクを流れるパケット数やトラフィック量をカウントした値を定期的に収集すること⁽⁵⁾や、各機器でフロー単位 of トラフィック量を計測し、収集する方法⁽⁶⁾、ネットワークを流れるパケットをサンプリングして観測する方法⁽⁷⁾により、観測することができる。観測されたトラフィック量を基に、時系列予測手法により、将来のトラフィック量を予測することができる。

・ ネットワーク外の情報

ネットワークを流れるトラフィックは、現実世界の状況を反映している。例えば、何かのイベント等により人が

密集した地域からは、当該地域にいる人の持つスマートフォンからの多量の通信が発生する。そのため、ネットワーク外の現実世界の状況に関する情報を入手することにより、トラフィック量の時系列情報を用いた場合には予測が困難であった、突発的なトラフィック状況の変化も予測でき、そのような変化に先駆けてネットワーク制御を行うことが可能となる。このような現実世界の状況の把握に役立つデータとしては、人流や交通流といったセンサ等を用いて収集可能なデータや、SNSでのユーザの発言を解析して得られるデータなどが存在する。

3. ネットワーク制御手法の紹介

上述のようなネットワーク制御を行う手法については、様々な検討が進められている。本章では、我々が検討を進めている制御手法を2種類紹介する。

3.1 モデル予測制御に基づくネットワーク制御

上述のように、ネットワーク制御では、将来のネットワークの状況を予測し、性能劣化が発生しないようにするなど、目標に合わせて制御対象を制御する。しかしながら、将来のネットワークの状況を正確に予測することはできず、先の将来になればなるほど、大きな誤差が生じる。一方で、直近のネットワークの状況に合わせて制御を行うと、ネットワーク制御が状況の変化に追いつかず、性能劣化が生じたり、頻繁なネットワーク制御が行われ、結果として、遅延が大きく変化するなど、ネットワークを不安定化させてしまう。

この問題に対応する方法として、我々は、モデル予測制御をネットワーク制御に適用することを提案している⁽⁸⁾。図3にモデル予測制御に基づくネットワーク制御の概要を示す。モデル予測制御に基づくネットワーク制御では、現在から一定区間先の状況を予測し、予測された状況を基に、次の時刻から将来に至るネットワークの

設定・構成の変更手順を求める。すなわち、時刻 t において、予測された将来のネットワーク需要 \hat{x}_{t+k} を基に、以下の最適化問題により、時刻 $t+1$ から $t+H$ までのネットワーク設定 C_{t+k} を求める。

$$\begin{aligned} \text{minimize } & \sum_{k=1}^H (1-w) O(\hat{x}_{t+k}, C_{t+k}) \\ & + \sum_{k=1}^H w D(C_{t+k}, C_{t+k-1}) \end{aligned}$$

ここで、 $O(\)$ はネットワーク需要とネットワーク設定に対応する制御目標の指標となる値を返す関数であり、 $D(\)$ はネットワーク設定変更にかかるコストを表す関数、 w はネットワーク設定変更のコストに対する重みを表すパラメータであり、 w を大きくすることにより、ネットワーク設定の変更を抑える。 $O(\)$ 、 $D(\)$ は制御目的や制御対象に合わせてあらかじめ設定しておくものである。上記の最適化問題を解くことにより、時刻 $t+1$ から $t+H$ までのネットワーク設定 C_{t+k} が得られるものの、直近の設定である C_{t+1} のみを投入する。そして、時刻 $t+2$ 以降のネットワーク設定については、新たな観測情報が得られ、ネットワーク需要の予測を行い直した上で、再度上記の最適化問題を解くことにより、得る。この手順を繰り返すことにより、将来の需要の変動を考慮しつつ、予測の精度の高い直近のネットワーク需要に合わせた制御を投入することができ、ネットワークの安定性と需要変動の追随性を両立することができる。

3.2 脳情報処理機構に基づくネットワーク制御

モデル予測制御に基づくネットワーク制御では、各時刻において、将来のトラフィック量を予測するのに必要な情報は全て観測でき、観測した情報を基にトラフィックを予測し直し、制御を行っていた。しかしながら、現実世界でセンシングされた情報を用いる場合、現実世界に配

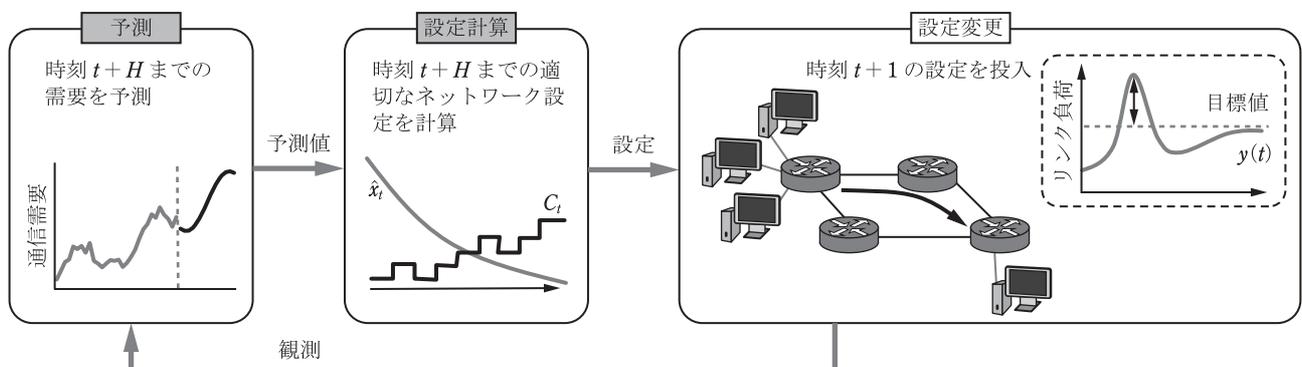


図3 モデル予測制御に基づくネットワーク制御 観測、時刻 $t+H$ までの状況を予測し、時刻 $t+H$ までの適切なネットワーク設定を計算、そのうち時刻 $t+1$ の設定のみ投入することを繰り返すことにより、需要の変動への追随とネットワークの安定性の両立を実現する。

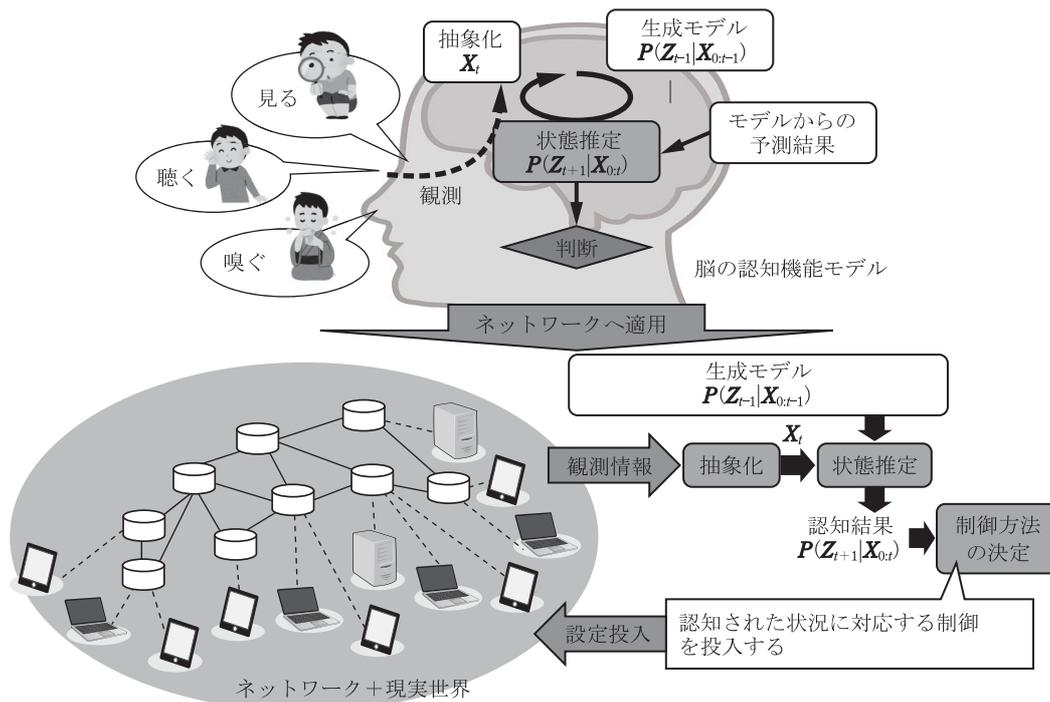


図4 脳情報処理機構に基づくネットワーク制御 観測情報を抽象化、生成モデルを持った上で得られた観測情報を基に、認知状態を更新することを繰り返すことにより、曖昧かつ部分的な情報を基に脳が逐次判断を行うプロセスのモデルをネットワーク制御に応用する。ネットワーク制御においても、現実世界やネットワークから得られる情報を抽象化し、得られた情報を基に認知状態を更新、現在の状態がどの状態であるのかを認知し、認知結果に合わせた制御を行う。

置された多種多様なセンサの全てから、短い周期で情報を収集することは困難であり、各時刻においては、観測し得る情報のうち、一部の情報しか得られない。また、情報が得られたとしても、その情報には雑音が含まれている。そのため、現実世界のセンシング情報を生かしながら、時々刻々変化するトラヒックに合わせてネットワークを制御するためには、このような各時刻に得られる情報が一部かつ不正確である場面に対応できる手法が必要となる。

曖昧かつ部分的な情報を基に逐次判断を行っている代表的なものとして、人の脳が挙げられる。近年、脳が行う情報処理はベイズ確率モデルを用いて表すことができるとするベイジアンブレイン仮説が提唱されており、それによると、脳は誤差を含んだ情報を抽象化した上で観測・取得し、取得・抽象化された情報を基にモデルを構築し、構築されたモデルに基づいて意思決定をしているとされる⁽⁹⁾。これにより、脳は、得られる情報は不正確であり、状況を正確に把握できない場合であっても、即時に意思決定を行うことができるとともに、新たに得られた情報を基に逐次、自身の認知の状態を更新することにより、状況判断の精度を向上できる。

我々は、このような脳が認知・意思決定を行う過程のモデルをネットワーク制御に適用した手法について検討を進めている⁽¹⁰⁾。図4に脳情報処理機構に基づくネッ

トワーク制御の概要を示す。本手法では、将来のトラヒック状況を認知を行う認知対象として定め、あらかじめ認知を行う各選択肢とネットワーク制御手順（経路や資源割当等）を対応付けておく。各時刻においては、まず、得られた観測情報を抽象化し、認知機構に入力として与える観測値を表すベクトル X_t を得る。この抽象化は任意の方法を適用可能であるが、例えば、過去に経験した観測値とその観測値に対応する認知の選択肢の組合せを蓄積しておき、観測データと各選択肢の類似度を X_t とするといった手順が考えられる。ただし、各時刻に得られる観測データは欠損したものであるため、現在の状況が、このような手法で得られた X_t において類似度が高い選択肢の状況であるとは限らず、 X_t は誤差を含んだ情報となる。我々の手法では、このようにして生成した X_t を基に、逐次ベイズ推定を行うことにより、意思決定状態 Z_t を更新する。この手順を繰り返すことにより、各時刻においては、部分的な観測しか行うことができず、また、観測値に雑音が入っていた場合であっても、得られた観測値を基として、もっともらしい選択肢を選ぶことができる。そして、その選択肢に対応する制御を実行することにより、状況に合わせたネットワーク設定を投入する。

4. ま と め

本稿では、予測と連携してネットワークを動的に制御する手法について紹介を行った。今後は、これまでネットワークに接続していなかった機器がネットワークに接続されるようになる一方で、ネットワークを流れるトラフィックと現実世界の状況がより密接に関係するようになると思われる。また、多岐にわたるサービスがネットワークを介して提供されるようになるにつれ、ネットワークに求められる品質も多種多様となり、それらの要求に答えるような細粒度の制御の必要も高まると考えられる。そのため、現実世界の状況を踏まえて、ネットワークを流れるトラフィックの将来にわたる状況を予測、予測を基に制御を行う技術は今後、より重要となると考えられる。3.2で紹介した我々の手法は、現在は基礎検討の段階であるが、今後、より様々な状況や制御対象にも適用できるように検討を進めていく予定である。

謝辞 本稿で紹介した研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」により得られたものである。

文 献

- (1) F. Hu, Q. Hao, and K. Bao, "A survey on software-defined network and openflow: From concept to implementation," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2181-2206, 2014.
- (2) B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee, "Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 90-97, 2015.
- (3) X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M.K. Marina, "Network slicing in 5G: Survey and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55,

no. 5, pp. 94-100, 2017.

- (4) E. Amaldi, A. Capone, and L.G. Gianoli, "Energy-aware IP traffic engineering with shortest path routing," *Comput. Netw.*, vol. 57, no. 6, pp. 1503-1517, 2013.
- (5) J. Case, M. Fedor, M. Schoffstall, and C. Davin, "A simple network management protocol (SNMP)," RFC 1098, April 1989.
- (6) B. Claise, "Cisco systems netflow services export version 9," RFC3954, Oct. 2004.
- (7) R. Phaal, S. Panchen, and N. McKee, "InMon corporation's sFlow: A method for monitoring traffic in switched and routed networks," RFC 3176, Sept. 2001.
- (8) T. Otoshi, Y. Ohsita, M. Murata, Y. Takahashi, N. Kamiyama, K. Ishibashi, K. Shiimoto, and T. Hashimoto, "Traffic engineering based on model predictive control," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 98, no. 6, pp. 996-1007, June 2015.
- (9) S. Bitzer, J. Bruineberg, and S.J. Kiebel, "A bayesian attractor model for perceptual decision making," *PLoS computational biology*, vol. 11, no. 8, e1004442, 2015.
- (10) 佐竹幸大, 大下裕一, 村田正幸, "人の脳情報処理プロセスに着想を得た動的な予測形トラフィックエンジニアリング手法," *信学技報*, IN2017-93, pp. 21-26, March 2018.

(2019年2月27日受付 2019年3月8日最終受付)



おおした ゆういち
大下 裕一 (正員)

平 17 阪大大学院情報科学研究科博士前期課程了。平 20 阪大博士 (情報科学)。阪大大学院経済学研究科助教, 同大学院情報科学研究科助教を経て, 平 31 から同先導的学際研究機構准教授。同大学院情報科学研究科准教授兼任。



むらた まさゆき
村田 正幸 (正員:フェロー)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒。昭 59 同大学院博士前期課程了。昭 63 阪大工博。日本アイ・ビー・エム株式会社, 阪大大型計算機センター, 同基礎工, 同サイバーメディアセンターを経て, 平 16 から阪大大学院情報科学研究科教授。