

2-2 AI を活用したネットワーク制御による無線基地局の省電力化

2-2 AI-Assisted Energy-Efficient Network Control for Wireless Base Stations

宮澤 高也 Ved Prasad KAFLE 朝枝 仁

MIYAZAWA Takaya, Ved Prasad KAFLE, and ASAEDA Hitoshi

Beyond 5G 時代に向け、地上系無線アクセスネットワーク (RAN) の基地局の消費電力が課題であるが、現在の RAN では、通信トラフィックが少ないカバレッジエリアも含めた全ての基地局が常時 ON となっており、電力の無駄遣いが生じている。本報告では、Open RAN を対象とし、AI による人流分析と非地上系ネットワークを活用した基地局の省電力制御技術の概要について説明するとともに、大阪・関西万博 (EXPO 2025) において出展した内容について紹介する。

In the Beyond 5G era, power consumption of base stations (BSs) in terrestrial radio access networks (RANs) will be a serious problem that needs to be addressed. Currently, all BSs in RANs remain turned on even in coverage areas with low data traffic. It causes a waste of energy. In this paper, we explain the concept of energy-efficient BS control technology that utilizes AI-assisted pedestrian flow analytics and non-terrestrial networks (NTNs). Additionally, we introduce the content exhibited at Expo 2025 Osaka, Kansai, Japan.

1 まえがき

現在年率 2 割～3 割増で増え続けている移動通信トラフィック [1] を、将来の Beyond 5G / 6G 時代においても効率よく収容する必要がある、さらに、超高速大容量・超低遅延・多数同時接続など多種多様化する通信ネットワークサービスを、迅速かつ安定的に提供することが求められる [2]。そのため、無線アクセスネットワークでは、モバイル端末とモバイルコア (基地局とインターネットの間にある交換機等で構成されたネットワーク) の間の通信を中継するためのコンポーネントの柔軟性向上や制御機構の自動化等が必須である。

そこで近年、次世代の無線アクセスネットワーク規格として、O-RAN (Open - Radio Access Network) が注目されており、O-RAN Alliance で仕様が議論及び策定されている [3]-[5]。O-RAN は、迅速なサービス提供や複数のベンダ装置の組込等を可能にする「オープン性」と、ネットワーク運用の自動化及び高度化を可能とする「インテリジェンス」を特長とする。

既存の 4G-LTE や 5G、ローカル 5G など、様々な周波数帯の様々なカバーエリア規模に対応したサービス提供の増加に伴い、無線基地局の数と種類は増加し続けており、地上系 RAN の消費電力の増加が、世界的に問題となっている。そのため、地上系 RAN の省電力技術に関する議論や研究開発が盛んに行われている

[6]-[10]。将来、6G サービスが商用化された場合においても、当面は移行期間として既存サービスのシステムを残す必要がある一方で、新たに 6G 用の無線基地局の整備が必要となるので、地上系 RAN の消費電力問題がより一層顕著となる。しかしながら、従来の RAN では、全ての基地局が常時稼働しており、モバイル端末数及びトラフィックが少ないカバレッジエリアにおいても稼働しているため、電力の無駄が生じている。O-RAN の標準仕様では、将来の RAN における電力効率向上の重要性は記述されているものの、具体的なモデルやプロトコルなどの十分な議論がまだなされていない。

一方、近年、通信衛星や成層圏通信プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) といった非地上系ネットワーク (NTN: Non-Terrestrial Networks) 回線と地上系ネットワークを統合し、カバレッジエリアの拡大や耐障害性の向上などを図る研究や標準化議論が盛んに行われている [11]-[13]。当該技術によって、様々な地理的エリアや状況においても通信が可能となる。さらに、NTN・TN 統合ネットワーク環境において、NTN を活用することによって地上系 RAN の基地局省電力化につながることを期待できる。

そこで、我々は、O-RAN 準拠のモバイルシステムを対象に、AI を活用した人流データ分析及び NTN 回線を活用した基地局省電力マネジメント技術の研究開発を行っている [14]-[17]。

本稿では、当該技術の概要について記述するとともに、大阪・関西万博 (EXPO2025) において出展した内容について紹介する。

2 研究概要図

図1は、O-RAN 無線基地局の省電力マネジメント技術の研究概要図である。目的は、通信の継続性や品質を維持しつつ、地上基地局に要する消費電力をネットワーク制御により低減することである。

図の上部のサイバー空間では、基地局カバレッジエリアごとの一定時間ごと (例:15 分) のモバイル端末数の変動、すなわち人流のデータを、AI/機械学習によって分析及び予測し、その予測結果に基づいて、各カバレッジエリアの基地局の一定時間ごと (例:1 時間) の電源 ON・OFF を事前にスケジューリングする。その際、当該地域からアクセス可能な NTN の通信容量も考慮したスケジューリングを行う。

図の下部のフィジカル空間では、当該スケジューリング結果に基づいて、指定時刻になったら自動で基地局 ON・OFF 制御を実行する。基地局 OFF となっているエリアにあるモバイル端末からは、NTN にアクセス可能とすることによって、通信を継続する。NTN は地上系基地局と比較して、通信容量が小さい一方で、1 基あたりのカバレッジエリアが極めて広いことから、地上の通信トラフィックが少ないエリアの通信を多く収容することができる。結果的に、多くの地上系基地局を OFF にすることが可能となり、RANs の消費電力を低減することができる。

3 アーキテクチャ

図2は、O-RAN Alliance で定義されている O-RAN 標準アーキテクチャに準拠したコンポーネントとそれらのコントローラー及びモバイルコアの概要図である。O-RAN アーキテクチャは、オープン仕様に基づき、無

線基地局を機能ごとに分離して相互接続する構成をとっている [3][4]。各機能を提供するコンポーネントには、CU (Central Unit)、DU (Distributed Unit)、RU (Radio Unit) 及び RIC (RAN Intelligent Controller) がある。CU はデータ処理部、DU は無線信号処理部、RU はアンテナ部である。RIC は O-RAN 全体の制御部であり、リソース制御やサービス品質制御、トラフィック制御等を行う。RIC は、さらに、制御処理時間が 10 ミリ秒以上 1 秒以下の Near-Realtime (Near-RT) RIC と、1 秒超の Non-Realtime (Non-RT) RIC に分けられる。各コンポーネント間の主なインターフェースとしては、Non-RT RIC と Near-RT RIC の間の A1、Non-RT RIC と Near-RT RIC・CU・DU の 3 つをつなぐ O1、Near-RT RIC と CU/DU の間の E2、CU と DU の間の F1、DU と RU の間の Open Fronthaul が規定されている。UE (User Element) は、モバイル端末であり、RU に接続し、O-RAN を介して、モバイルコア及びデータネットワーク (インターネット) へと接続される。

我々は、この O-RAN アーキテクチャをベースとして、NTN 回線も活用しつつ、基地局の電力制御管理用に拡張したアーキテクチャを提案している。主な拡張部は 2 か所あり、Non-RT RIC 内部に人流分析エンジン及び電力スケジューリングエンジンを導入した点と、NTN と UE 間、及び NTN と モバイルコア間に、地上と NTN を接続するインターフェースを追加した点である [14]-[17]。

図3は、O-RAN 基地局の省電力制御の手順を示している。当該制御では、以下の 3 つの処理が連動する。

- 人流予測：基地局カバレッジエリアごとのモバイル端末数の時間変動 (以下、人流と呼ぶ) の実データを、AI/機械学習で分析し、将来期間における変動を予測する。
- 基地局の電力制御スケジューリング：全カバレッ

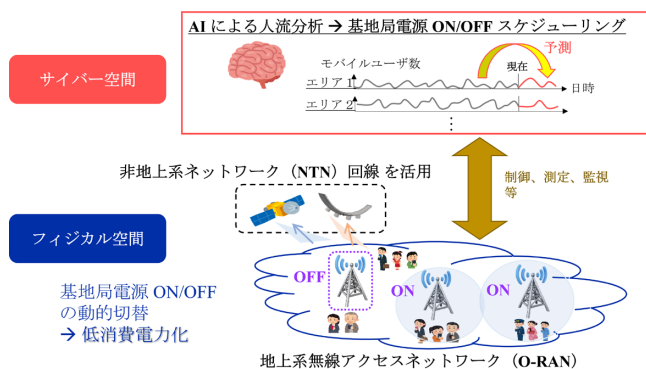


図1 研究概要図

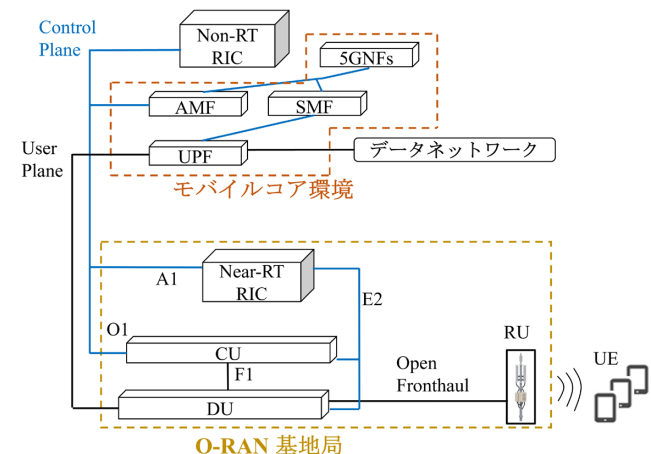


図2 O-RAN 標準アーキテクチャに準拠したコンポーネントとそれらのコントローラー及びモバイルコアの概要図

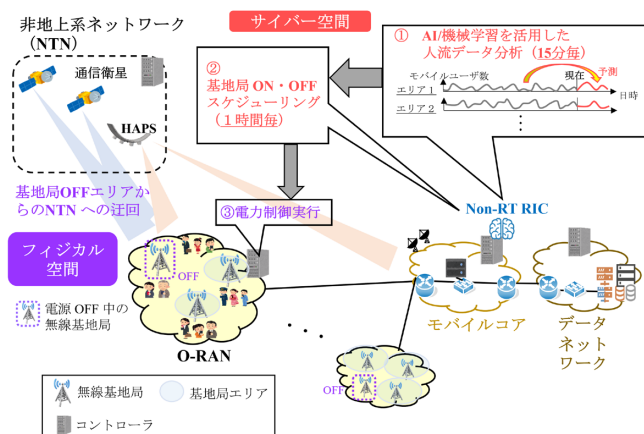


図3 O-RAN 基地局の省電力制御の手順

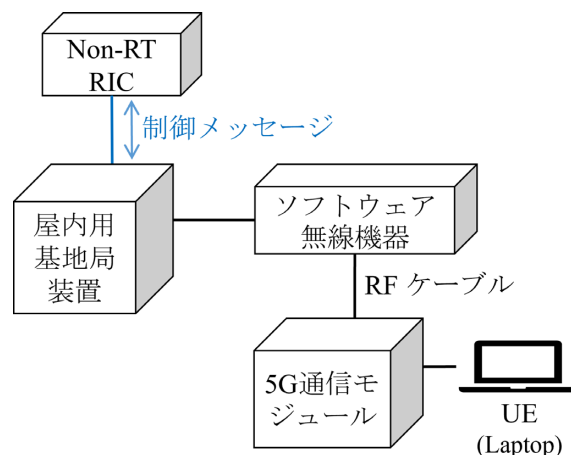


図4 デモ環境

ジェリアにおける上記の人流予測結果や、対象とするエリアに割当て可能な NTN 回線容量等に基づき、地上系 RAN での無線基地局の一定時間ごとの電源 ON・OFF を、カバレッジエリアごとに事前にスケジューリングする。その際、基地局電源 OFF のエリア内のモバイル端末からは、NTN 回線に自動切替え可能とすることで、通信の継続性や通信性能等を維持する。

- 基地局の電源 ON/OFF 制御：上記のスケジューリング結果に基づき、基地局電源 ON・OFF の動的切替の制御を実行する。

上記の3つの処理内容や、数値解析による定量評価や NICT のテストベッド [18][19] を使ったフィールド実験については、詳細は文献 [14] を参照されたい。人流の実データとして KDDI Location Data [20] を用い、かつ、人流予測のための AI/機械学習として時系列分析に適したディープラーニングの1つである LSTM (Long Short-Term Memory) [21][22] を適用して、各基地局カバレッジエリアの一定時間ごとの通信トラヒック量の予測値を導出している。

4 大阪・関西万博での出展内容

大阪・関西万博では、NICT 本部 (東京都小金井市) の実験室内に整備した屋内用実験システムを用いた動態デモをビデオ撮影し、万博会場にライブ配信した。

図4に、デモ環境の構成図を示す。屋内用基地局装置には、RAN の基地局の機能だけでなく、5G コアの機能も含まれる。それら機能の状態 (稼働中もしくは停止中) を、クラウド上で視覚的に管理することが可能である。

ソフトウェア無線機器としては、USRP (Universal Software Radio Peripheral) を用い、エンド端末である UE (User Equipment) としてはラップトップを 5G 通

信モジュールと接続したものを用いた。ソフトウェア無線機器と 5G 通信モジュールの間は、4.8 GHz ~ 4.9 GHz の 100 MHz 幅の周波数帯を用いたが、今回の展示では電波放射不要とするため、両デバイスを RF (Radio Frequency) ケーブルで接続した。

また、基地局の電力制御をスケジューリングして実行するためのコントローラを、屋内用基地局装置に接続し、ポリシーに応じた電力制御が可能な環境を整備した。文献 [14]~[17] では、AI を活用した人流データ分析及び NTN 回線に基づいて、1 時間ごとに基地局の電源を ON・OFF する省電力マネジメント技術を提案・実装したが、大阪・関西万博の本展示では、展示の利便性や動態デモの運用の安定性等を考慮し、UE からのデータ通信は行わない状態で、30 秒ごとに屋内用基地局装置の (電源ではなく) 基地局機能のみの ON・OFF を切り替える処理を繰り返し自動実行する制御ポリシーとした。屋内用基地局装置の消費電力をリアルタイム表示するため、屋内用基地局装置のコンポーネント管理画面のすぐ下に消費電力モニターを設置した。

4.1 屋内用基地局装置を用いた基地局機能 ON・OFF の動態デモ

図5及び図6は、上記の屋内用基地局装置のクラウドベースの視覚管理画面であり、万博会場にライブ映像配信された。前述のとおり、本動態デモでは、30 秒ごとに基地局機能 (図5及び図6の「NG-RAN (Next Generation Radio Access Network)」) の ON・OFF を切り替える処理を繰り返し自動実行した。図5が基地局機能 ON 時の視覚管理画面全体図であり、図6が基地局機能を動的に ON・OFF 切替えした際の当該機能アイコンの変化の様子である。UE からの通信を行っていない状態で、基地局機能を ON にすると、屋内用基地局装置の消費電力が約 90 W であり、基地局機能

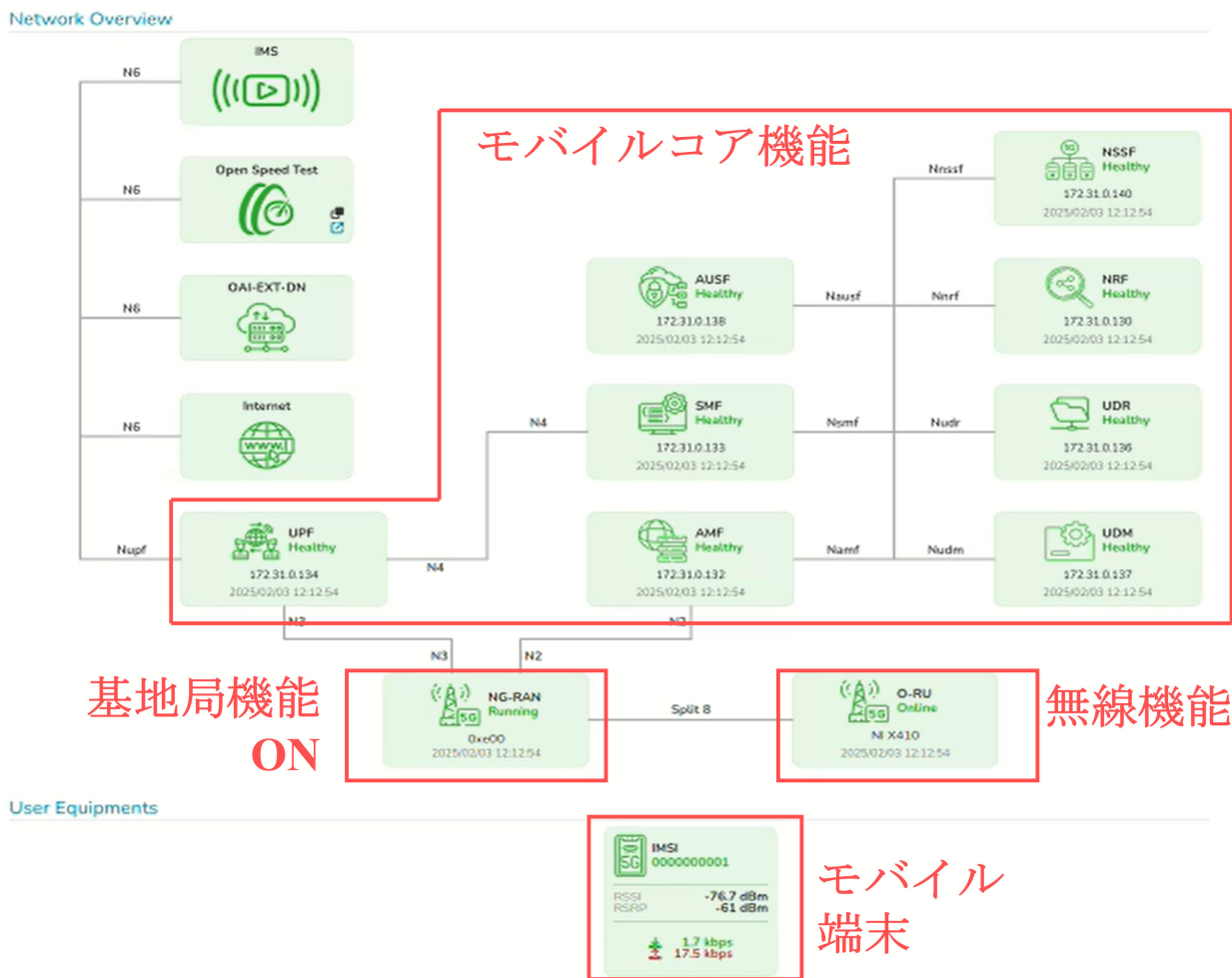


図5 NICT本部(東京都小金井市)実験室からライブ映像(屋内用基地局装置の基地局機能ON時)



図6 基地局機能の動的 ON・OFF 切替え時のアイコン変化

を OFF にすると、消費電力が約 75 W であった。すなわち、屋内用基地局装置について、基地局機能 (NG-RAN 機能) を OFF にするだけでも、15 % 程度の消費電力低減効果がある。さらに、今回の展示では、前述のとおり、基地局装置の電源自体の ON・OFF は実施しなかったが、電源 ON・OFF の切替えを自動実行可能な仕組みを既に実装しており、装置の電源を OFF

にすることで、消費電力が 0 W に近くなる。

4.2 NICT のテストベッドを用いた基地局 ON・OFF のフィールド実験のビデオ

万博では、文献[14]において説明した、NICT テストベッド(「モバイルネットワーク開発環境」[15][16])を用いたフィールド実験の際に撮影した周波数スペクトラムの変化の様子について、ビデオ上映を行った。

図7は、当該ビデオであり、上部が基地局 OFF から基地局 ON に変更した際の周波数スペクトラムであり、下部が基地局 ON から基地局 OFF に変更した際の周波数スペクトラムである。CU 及び DU の電源 ON・プロセス稼働の処理によって RU から自動で電波放射が開始し、プロセス停止・電源 OFF の処理によって RU からの電波放射が自動停止する。詳細は、文献[14]を参照されたい。

なお、4.1で説明したNon-RT RICは、インターフェース部のみを変更することによって、制御アルゴリズム及びそのスクリプトを変更することなくNICTテストベッドの基地局装置とも接続すること可能であ

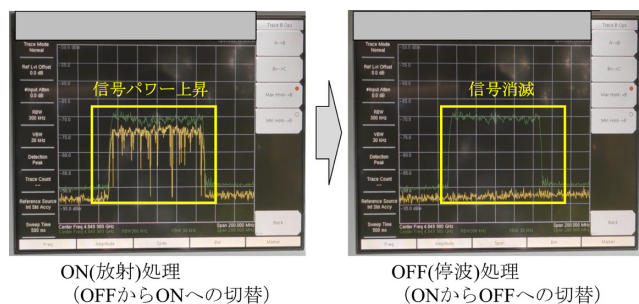


図7 周波数スペクトラムのオシロスコープ表示

る。すなわち、LSTMを活用した人流分析に基づく電力制御スケジューリング結果と連動させたCU/DU実機電源ON/OFF、プロセス稼働/停止、及びRUからの電波放射/停波について、フィールド実験が可能である。

5 まとめ

本研究報告では、人流分析及びNTN回線を活用したO-RAN基地局省電力制御技術の概要について記述し、さらに大阪・関西万博での展示内容について紹介した。大阪・関西万博では、屋内用基地局装置を用いた動態デモのライブ映像配信及びNICTテストベッドを用いたフィールド実験の様子を示したビデオ上映を行った。

今後、モバイルサービスの増加に伴い、基地局の種類と数がますます増えていくことが予想されるため、基地局の消費電力問題がより一層顕著となる。Beyond 5G / 6Gの実現に向けて、無線アクセスネットワークの更なる省エネ化を実現するための研究開発が重要である。

謝辞

石津健太郎 Beyond5G デザインイニシアティブ長、原井洋明 ネットワーク研究所長及びB5Gテストベッドを使った実験にご協力いただいた、小針康永 研究技術員、守屋公一郎 研究技術員、中野連利 研究技術員、中村一彦 研究技術員に感謝する。そのほか、貴重なご助言等をいただきました関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1 情報通信統計データベース, www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/
- 2 NICT Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー, beyond5g.nict.go.jp/download/index.html
- 3 O-RAN Alliance, www.o-ran.org
- 4 O-RAN Alliance Specifications, www.o-ran.org/specifications
- 5 Plugfest, www.o-ran.org/plugfest
- 6 3GPP TS 28.310 v18.1.0 (March 2023),

www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/28_series/28.310

- 7 3GPP TR 37.817 v17.0.0 (April 2022), www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.817/
- 8 X. Liang, Q. Wang, A. Al-Tahmeesschi, S. B. Chetty, D. Grace, and H. Ahmadi, "Energy Consumption of Machine Learning Enhanced Open RAN: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol.12, pp.81889–81910, June 2024.
- 9 M. Bordin, A. Lacava, M. Polese, S. Satish, M. Anantha, S. Nittoor, R. Sivaraj, F. Cuomo, and T. Melodia, "Design and Evaluation of Deep Reinforcement Learning for Energy Saving in Open RAN," *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2025.
- 10 W. T. Pires-JR, G. M. Almeida, S. L. Correa, C. B. Both, L. L. Pinto, and K. V. Cardoso, "Optimizing Energy Consumption for vRAN Placement in O-RAN Systems With Flexible Transport Networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol.6, pp.4279–4294, May 2025.
- 11 Ved P. Kafle, M. Sekiguchi, H. Asaeda, and H. Harai, "Integrated Network Control Architecture for Terrestrial and Non-Terrestrial Network Convergence," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol.8, issue.1, pp.12-19, March 2024.
- 12 ITU-T Y.3207 Recommendation: "Fixed, mobile and satellite convergence - Integrated network control architecture framework for IMT-2020 networks and beyond," March 2024.
- 13 電子情報通信学会誌, "特集：非地上系ネットワークの将来," vol.106, no.5, 2023年5月.
- 14 宮澤高也, "3-1 Open RAN 無線基地局の電力マネジメント技術", 情報通信研究機構研究報告, vol.70, no.1, 2024年10月.
- 15 宮澤高也, 石津健太郎, 朝枝仁, 辻宏之, 原井洋明, "人流データ分析及びNTN回線を活用したO-RAN無線基地局の電力制御," 信学技報, RCS2023-124, pp.113–118, 2023年8月.
- 16 宮澤高也, 石津健太郎, 朝枝仁, 辻宏之, 原井洋明, "人流分析及びNTN回線を活用したO-RAN基地局電力制御の実演及び実験結果," 信学技報, SR2023-50, pp.16–21, 2023年11月.
- 17 T. Miyazawa, K. Ishizu, H. Asaeda, H. Tsuji, and H. Harai, "Energy-efficient power management for O-RAN base stations utilizing pedestrian flow analytics and non-terrestrial networks," *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E107-B, Issue 11, pp.739-753, Nov. 2024.
- 18 原井洋明, 中村一彦, 寺田健次郎, 流田理一郎, 加藤拓也, 永野秀尚, 児島史秀, "循環進化型 Beyond 5G モバイルテストベッドの構築," 信学技報, NS2022-63, pp.17–22, 2022年9月.
- 19 高信頼・高可塑 B5G/IoT テストベッド (内, モバイルネットワーク開発環境), testbed.nict.go.jp/b5gm/
- 20 KDDI Location Data, k-locationdata.kddi.com/
- 21 S. Hochreiter, et al., "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol.9, issue 8, pp.1735–1780, Nov. 1997
- 22 N. Zhang, Y. Su, B. Wu, X. Tu, Y. Jin, and X. Bao, "Cloud Resource Prediction Model based on LSTM and RBF," *Proc. of International Conference on Big Data and Artificial Intelligence and Software Engineering (ICBASE 2021)*, pp.189–194, Zhuhai, China, Sept. 2021.



宮澤 高也 (みやざわ たかや)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー
博士(工学)
ネットワーク制御管理、モバイルシステム電力制御、時系列データ分析

【受賞歴】

2020年、2021年、2024年 電子情報通信学会
通信ソサイエティ 活動功労賞
2010年 平成21年度 船井研究奨励賞
2007年 第20回 安藤博記念学術奨励賞

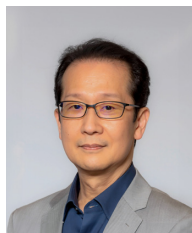


Ved Prasad KAFLE (べど ぷらさど かふれ)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー
博士(情報学)
高度なネットワークアーキテクチャ、ネット
ワーク制御管理、技術標準化

【受賞歴】

2023 年 情報通信技術賞 (TTC 会長表彰)
2017 年 日本 ITU 協会賞 功績賞



朝枝 仁 (あさえだ ひとし)

ネットワーク研究所 副研究所長／
ネットワークアーキテクチャ研究室 室長
博士(政策・メディア)
通信プロトコル、ネットワークアーキテク
チャ、情報指向ネットワーク

【受賞歴】

2024 年 電子情報通信学会 フェロー
2019 年 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
功労顕彰状