

# 三次元ドローンメッシュネットワークへの挑戦 ——アンテナからネットワークまでの横断的アプローチ——

Challenges for 3D Drones Wireless Mesh Networking :  
Cross-cutting Approach from Antenna Design to Networking Technologies

平栗健史 木村共孝 西森健太郎  
金子めぐみ 松田崇弘 中尾彰宏

## 1. ドローンを用いた通信

近年、小形自律無人航空機（ドローン）を用いた研究開発は国内でも精力的に進められ、物流や広域災害対応、空撮、農業利用など新たな分野における産業利用／公的利用などに広まり、「空の産業革命」として期待されている。これらを背景に、ドローンを用いた通信技術は各研究機関や大学にて研究開発が進められている。例えば、国内では、KDDI 研究所と大学が産学連携により、次世代移動通信システム 5G を用いた、ドローンからの 4K 映像伝送実験が行われている<sup>(1)</sup>。また、情報通信研究機構（NICT）は、ドローンが撮影した動画像データを、中継ドローンを介して、電波が直接届かない場所であるカバレッジホールまで伝送する技術を開発している<sup>(2)</sup>。これらの技術は、既存のネットワークとの連携やドローン自体が空撮した動画像の伝送技術であり、ド

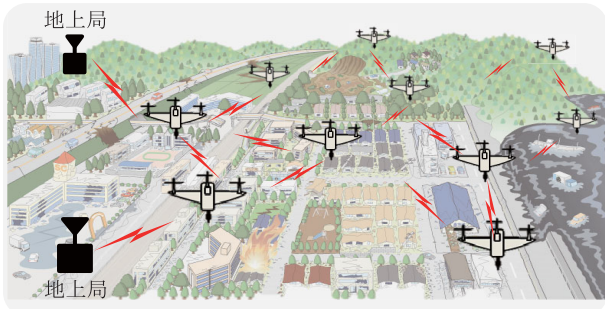
ローンと地上局との通信が主な研究課題と考えられる。

一方、国外では、フランスのプロジェクトとして、Green Communications 社などは、数年前から大規模なドローン中継ネットワークのためのプロジェクトを立ち上げ、メッシュネットワーク／アドホックネットワークの構成を用いた、ドローンの中継伝送のための研究を進めている<sup>(3)</sup>。またニューヨーク大学の Dr. M. Mezzavilla は、大型ファンドを獲得し、周波数帯にミリ波を採用したドローンによる新しい通信方式の研究開発に取り組んでいる。すなわち国外においては、ドローンを用いた通信技術は、多数のドローンを中継局とした新しいネットワークとして、メッシュネットワーク／アドホックネットワークのような形態に取り組んでいる点の特徴である<sup>(4)</sup>。

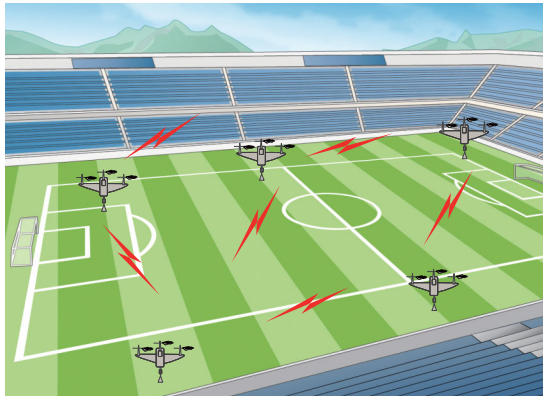
このようなドローンを中継局としたメッシュネットワークなどを用いることは、新しいサービスの実現につながる。例えば、図 1 に示すように、災害時にドローンを展開すれば、迅速な情報収集や、広範囲にわたった長距離中継伝送が可能となる。またスポーツ観戦のスタジアムでは、多視点でリアルタイム映像配信を実現できる。歴史的建造物など、複雑な構造も周囲を取り囲むように撮影し中継すれば、短時間で三次元画像スキャンが可能になる。

このように、ドローンを用いた中継通信技術は、世界中で注目され始めており、新しいアプリケーション／サービスの実現が期待されるが、空中を飛行するドローン特有の伝搬環境条件や電波干渉などについての課題については、余り議論がなされていない。そこで、ドローンを用いたメッシュネットワークなどの課題について説明する。

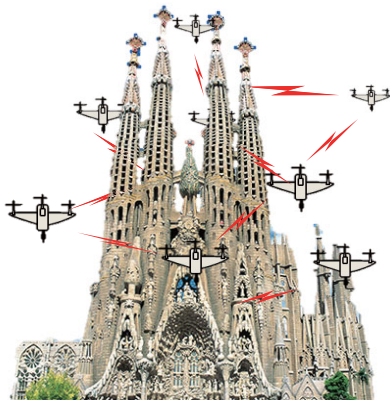
平栗健史 正員：シニア会員 日本工業大学基幹工学部電気電子通信工学科  
E-mail hira@nit.ac.jp  
木村共孝 正員 同志社大学理工学部インテリジェント情報工学科  
E-mail tomkimur@mail.doshisha.ac.jp  
西森健太郎 正員：シニア会員 新潟大学工学部情報工学科  
E-mail nishimori@ie.niigata-u.ac.jp  
金子めぐみ 正員 国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系  
E-mail megkaneko@nii.ac.jp  
松田崇弘 正員：シニア会員 首都大学東京大学院システムデザイン研究科情報科学域  
E-mail takahiro.m@tmu.ac.jp  
中尾彰宏 正員 東京大学大学院情報学環・学際情報学府学際情報学専攻  
E-mail nakao@nakao-lab.org  
Takefumi HIRAGURI, Senior Member (Faculty of Fundamental Engineering, Nippon Institute of Technology, Saitama-ken, 345-8501 Japan), Tomotaka KIMURA, Member (Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe-shi, 610-0321 Japan), Kentaro NISHIMORI, Senior Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan), Megumi KANEKO, Member (Information Systems Architecture Science Division, National Institute of Informatics, Tokyo, 101-8430 Japan), Takahiro MATSUDA, Senior Member (Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University, Hino-shi, 191-0065 Japan), and Akihiro NAKAO, Member (Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0033 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.12 pp.1186-1190 2018 年 12 月  
©電子情報通信学会 2018



(a) 災害時における「広範囲」の探索やネットワーク構築



(b) 「多視点切替」による映像伝送



(c) 「短時間」の3Dスキャンニング

図1 ドローンネットワークによるサービス ドローン編隊飛行による立体的メッシュネットワークを構築し、災害時の広範囲探索や多視点切替のリアルタイム映像配信、建造物の短時間3D映像スキャンニングなどのサービスに応用を目指す。

## 2. 空中ネットワークにおける課題

空中にメッシュネットワークを構築する際に、特有の課題がある。ドローンは、高い高度でネットワークを構築することを想定すると、見通し内の自由空間による伝搬環境で通信が行われることが多い。このような伝搬環境の条件では、地上での無線通信と比べて、電波の減衰量が非常に少なく、広範囲で電波が届くため、空間を占有するエリアも広がる。例えば、図2に示すような、複数のドローンによって中継伝送する場合には、ドローン間

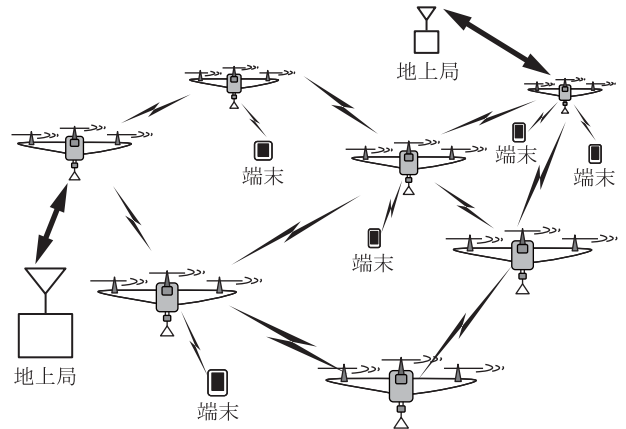


図2 ドローンによるメッシュネットワーク ドローン間が無線で通信し、メッシュネットワークを構築する。また、帰属する端末や地上局との通信を行い情報を中継する。

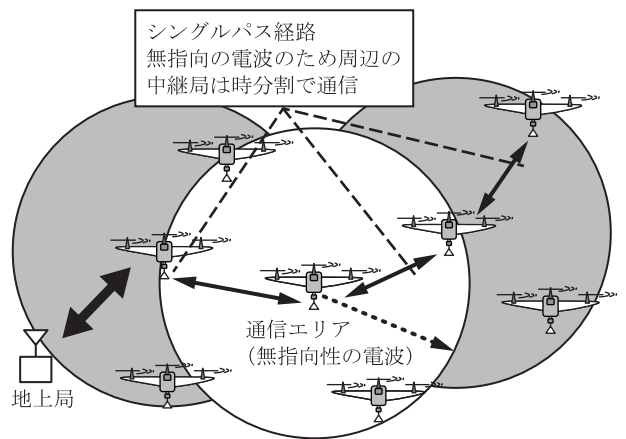


図3 無指向性の電波による時分割通信 通信エリアがオーバーラップする場合、ドローン間は時分割多元接続 (TDMA: Time-Division Multiple Access) によって中継伝送を行う。

で帯域を共有するため通信利用効率が大幅に低下する。

このような特徴を想定した際に、図3のような従来技術を用いたメッシュネットワークを考える。当該技術は、市場に広く普及する無線LANを想定し、無指向性のアンテナを使用した場合、主に二つ課題が挙げられる。

- (A) 無指向性アンテナを用いることによる伝送効率の低下
- (B) 自由空間伝搬による想定以上のオーバーリーチ干渉

(A) の課題は、無指向性アンテナを用いることにより、電波が四方に放射される。無線LANなどは、キャリアセンスによって干渉を回避するため、図3に示すように通信エリア内の無線局は実質 TDMA (Time-Division Multiple Access) 方式のように帯域を時分割に

よって利用することになる。したがって、中継局の増加は、1無線局当り帯域の利用時間が減り、伝送できる情報量が極めて少なくなる。例えば、各中継局が無線LANの最小伝送速度の2 Mbit/sに設定した場合、当然、オーバラップのエリア内全体で、スループットは2 Mbit/s以下となる。

(B)の課題は、空中では多くの場合障害物のない自由空間伝搬となり、地上の移動通信よりも伝搬損が小さくなることを意味する。つまり、中継先のドローンよりも遠方に信号が届くため、干渉がより深刻となるだけでなく課題(A)で示した伝送効率の低下がより顕著となる。

ITU-Rの勧告<sup>(5)</sup>に従い、空中での伝搬を想定した見通しありの自由空間伝搬乗数を2.0、地上屋外伝搬(市

街地)を想定した伝搬乗数2.6~4.0とし、距離に対する受信電力を以下の式によって求めると、図4のように示される。

$$P_r = P_t + G_{t,r} - L + 10 \log_{10}(B)$$

$$L = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n$$

$P_r$ は、送信電力 $P_t$ が20 dBmで送信された際の受信電力である。 $G_{t,r}$ は送受信機のアンテナ利得、 $B$ は帯域幅20 MHzとしている。 $L$ は伝搬損で、 $n$ は伝搬乗数、 $d$ はアンテナ間の距離(伝送距離)とする。 $\lambda$ は、無線LANで用いる周波数の2.4 GHzとした際の波長である。伝搬乗数2.6では、無線LANなどで受信可能の限界となる-80 dBmにおいて、100 m程度の伝送距離となるのに対して、自由空間では、1,000 m以上まで電波が届くことになる。また、伝搬乗数が3以上では、20 dBm程度の送信電力では10 m以内の伝送距離となる。すなわち、自由空間での伝搬は、極端に遠方まで信号が届くため、従来の地上における移動体通信とは異なる概念で検討しなければならない。空中でのメッシュネットワークを想定した中継伝送の設計には、このような特性に伴う帯域の利用効率低下や中継局間での干渉を考慮したメッシュネットワークのための通信方式を検討する必要がある。

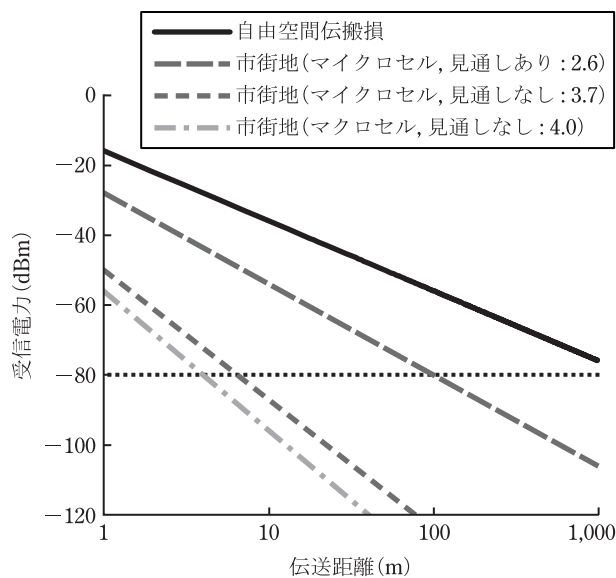


図4 伝搬損と伝送距離 ドローンを想定した自由空間と地上の通信(市街地)での伝送距離を比較。空中では地上と比べて、遠方まで信号が届くことが分かる。

### 3. 指向性ビームによるドローンネットワーク

#### 3.1 提案方式の概要

空中でドローンがネットワークを構築する特有の課題を解決するために、我々は、MU-MIMOやMassive MIMO<sup>(6)</sup>のようなビームフォーミングなどによる指向性電波によるマルチビームを用いた通信方式を提案し、現在、検討を進めている。この提案方式は、「複数指向

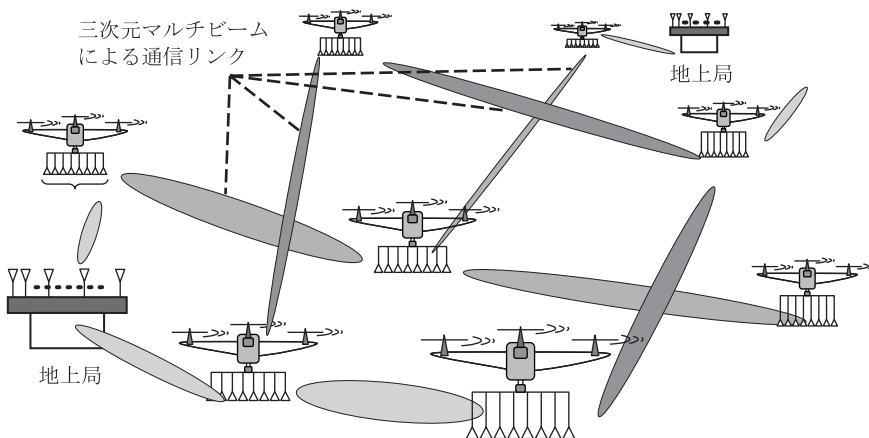


図5 指向性ビームを用いたドローンメッシュネットワーク ドローン間を指向性ビームフォーミングなどで相互に干渉が生じないようにリンクを結ぶことにより、複数無線局(ドローン)が同時に送受信することを可能とする。

ビームを用いることにより、高い伝送容量の実現」と「指向性ビームに適した編隊編成及びロバスト性の高いネットワーク構築」を目的としたドローンによる三次元メッシュネットワーク構築を実現する。図5に示すように、指向性電波のマルチビームは、互いに干渉しないように形成し、空間多重接続が可能となる。すなわち複数リンクと経路が干渉することなく同時に構築される。各リンクの伝送速度が低い場合も複数リンクが同時に通信するので、帯域の利用効率は向上する。例えば、各無線局間の伝送速度が2 Mbit/sであっても、10多重リンクなら、ネットワーク全体で10倍の20 Mbit/s相当のスループットが得られることになる。ただし、Massive MIMOのような数十本のアンテナを利用して多数の指向性マルチビームを形成する場合、相互干渉が生じないように、ビームを形成し、更には信号処理の干渉除去を行うことや、多角度に電波を放射する三次元ビーム形成をする必要がある。このような方法は、従来までには検討されてこなかった新しい課題である。また、実際にドローンに複数ビームを形成するような無線デバイスを実装することは、積載量の関係から物理的に難しい課題でもある。そこで、提案方式における新たな課題を整理する。

### 3.2 提案手法の課題の整理

提案方式は、主に以下の課題として図6に整理する。

- ・課題1：ドローン間のビーム形成と放射角度の選定
  - マルチビームの数を増加させることは、通信可能なリンク数が増加しルーチングの自由度が向上する観点では有効である。しかし、形成されるビームの条件はアンテナサイズで一般に決定されるため、狭いビームを形成するためには、アンテナの実装規模が大きく、回路構成も複雑となる。またビーム間の角度 $\alpha$ を狭くすることが有効であるが、角度を狭くすればビーム間干渉が生じる。一方、ビームが照射させる幅 $\beta$ を狭くすることにより、 $\alpha$ も狭くすることは可能であるが、空中に浮遊するドローンの変動に十分な照射ができるように $\beta$ も設計しなければならない。更に、三次元的にビームを生成する必要がある。これらのビーム幅や角度は、通信に適した編隊飛行の構成にもつながるパラメータとなる。
- ・課題2：ビーム形成に基づく編隊飛行構成の提案
  - 最適なビーム生成は、課題1と併せて、メッシュネットワーク全体でのスループットが得られるように設計

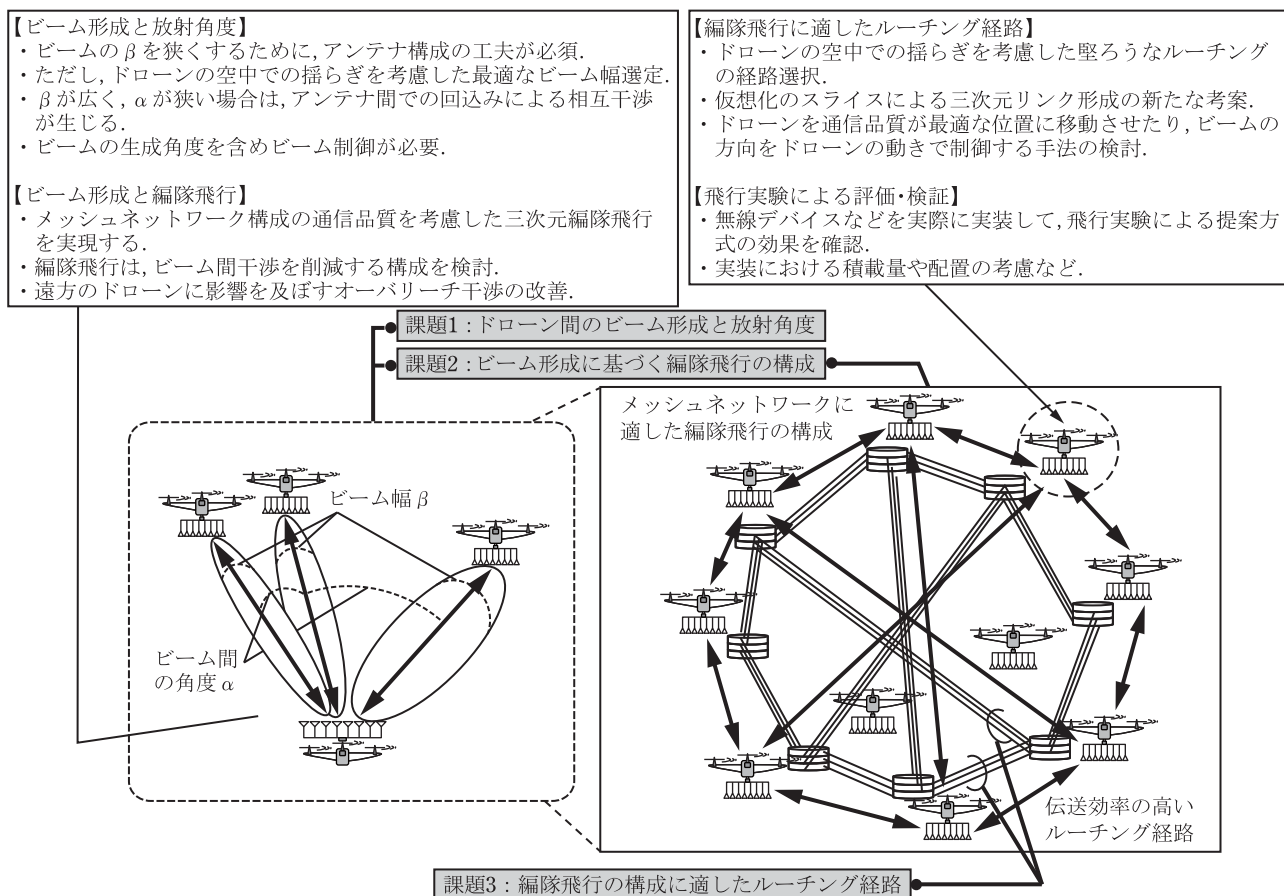


図6 ドローンメッシュネットワークを実現するための課題 提案方式を実現するためには、主に三つの課題があり、課題の分野も多岐にわたる。各技術が横断的に作用して、空中に高い伝送効率の三次元のメッシュネットワークを実現することが可能となる。

し、これは、三次元で構成されるドローンの編隊飛行にもつながる。ドローンは、ランダムな配置で飛行し、メッシュネットワークを構築することもできるが、本提案方式においては、現在、ビーム間の干渉を削減し、ネットワーク全体でのスループットを改善する通信に適した編隊飛行の構成も検討を進めている<sup>(7)</sup>。また更に、オーバーリーチによる干渉も改善するためのアクセス方式にも取り組んでいる<sup>(8)</sup>。

・課題3：編隊飛行の構成に適したルーチング経路選択  
編隊飛行の構成が確立したら、形成されたビーム、すなわち三次元のリンク選択方法の詳細な検討が必要となる。例えば、物理的な無線機を仮想化することで複数のスライスを構築し、スライスごとに独立なルーチングプロトコルを実施する手法を用いれば、無線局間に Disjoint Path が複数作成できるため、スループットの向上や堅ろう性を高めることが可能になる<sup>(9)</sup>。また、従来の地上の移動通信と異なり、ドローンを回転させれば、信号処理などをせずにビームの方向を容易に変えることや、通信品質が高くなるようにドローンを最適な位置に移動させることにより、新たなルーチング経路を選択／構築することが可能となる検討も進めている<sup>(10)</sup>。

#### 4. おわりに

我々が提案している三次元ドローンメッシュネットワークは、当該技術を確立するために、多岐にわたった専門分野での技術が必要とされる。そこで、異なる分野を専門に持つ本稿共著者の6名の研究者が協力し、プロジェクトを遂行している。これらの異なる技術の目的は独立した要素技術としてのパフォーマンスを得るのではなく、システム全体として横断的に機能する必要があり、現在、新たな無線通信技術の研究開発として、精力的に取り組んでいる。また、平成30～31年にわたって、提案方式を実装したドローンによって飛行実験を実施する予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基礎基盤(B)17H01738及び、戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE, 185004002)の助成金を受けて行われた。

#### 文 献

- (1) KDDI ニュースリリース, <http://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2018/06/14/3202.html>
- (2) NICT プレスリリース, <https://www.nict.go.jp/press/2017/03/22-1.html>
- (3) Green Communications, <https://www.green-communications.fr/>
- (4) M. Mezzavilla, M. Polese, A. Zanella, A. Dhananjay, S. Rangan, C. Kessler, T.S. Rappaport, and M. Zorzi, "Public safety communications above 6 GHz : Challenges and opportunities," IEEE Access, vol. 6, pp. 316-329, Nov. 2017.
- (5) ITU-R, Report M.2135-1, "Guidelines for evaluation of radio interface

technologies for IMT-Advanced," Dec. 2009.

- (6) T. Hiraguri and K. Nishimori, "Survey of transmission methods and efficiency using MIMO technologies for wireless LAN systems," IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 7, pp. 1250-1267, July 2015.
- (7) 平栗健史, 木村共孝, 設楽 勇, 西森健太郎, 満井 勉, "無線メッシュネットワークに適したドローン編隊飛行構成の提案," 信学技報, CS2018-15, pp. 19-24, July 2018 年.
- (8) 設楽 勇, 木村共孝, 平栗健史, "直線に配置されたドローン中継伝送におけるアクセス制御方式の一検討," 信学技報, CS2018-13, pp. 9-12, July 2018.
- (9) 中尾彰宏, "第5世代移動通信におけるソフトウェア化と有線線エンドツーエンドネットワークスライシング," 信学誌, vol. 101, no. 11, pp. 1101-1110, Nov. 2018
- (10) R. Ismayilov, M. Kaneko, T. Hiraguri, and K. Nishimori, "Adaptive beam-frequency allocation algorithm with position uncertainty for millimeter-wave MIMO systems," IEEE VTC-Spring 2018, Porto, Portugal, June 2018.

(平成30年7月4日受付)



ひらぐり たけふみ  
平栗 健史 (正員：シニア会員)

平11筑波大学院修士課程了。同年NTTアクセスサービスシステム研究所入社。平20から日本工業大・基幹・電気電子通信・教授。博士(情報学)。高速無線通信のアクセス制御方式と通信品質の研究に従事。著書「超進化802.11高速無線LAN教科書」など。



きむら ともたか  
木村 共孝 (正員)

平20阪大・工・電子情報エネルギー卒。平27同大学院博士課程了。同年東京理科大・工・助教。平30から同志社大・理工・助教。博士(工学)。アドホックネットワークに関する研究に従事。平27年度本会学術奨励賞受賞。



にしもり けんたろう  
西森 健太郎 (正員：シニア会員)

平6名工大・工・電気情報卒。平8同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。MIMO伝送技術に関する研究に従事。平18デンマーク国オールボー大客員研究員。平21新潟大・工・准教授。博士(工学)。平22年度本会論文賞受賞。IEEE会員。



かねこ めぐみ (正員)

デンマークオールボー大博士(工学)。平23パリ11大HDR(フランス教授資格)。学振PD, 京大情報学・助教を経て, 国立情報学研究所准教授。IEEE Globecom Best Paper Award等国内外の賞を受賞。無線資源割当・信号処理を研究。



まつだ たかひろ  
松田 崇弘 (正員：シニア会員)

平8阪大・工・通信卒。平11同大学院工学研究科博士課程了。同年同大学院工学研究科助手。平17講師。平21准教授。平30から首都大東京大学院システムデザイン研究科教授。無線ネットワーク, ネットワーク計測技術に関する研究に従事。平26年度本会論文賞受賞。



なかお あきひろ  
中尾 彰宏 (正員)

東大・理卒, 同大学院修士課程了。日本IBM, 米IBM研究所, 東京基礎研究所を経て, 米プリンストン大修士・博士学位取得。東大大学院情報学環助教授(平17), 教授(平26)学際情報学専攻長(平28, 現職)。第5世代モバイル推進フォーラムネットワーク委員会委員長兼任(平26)。