

NTT DOCOMO

テクニカル・ジャーナル

Technical Journal

Vol.28 No.4 | Jan. 2021



DOCOMO Today

- 新たな事業価値を生み出し続けるR&D

Technology Reports (特集)

サービス向上・社会課題解決に貢献するAI

- 画像認識技術を用いたゴルフスイング解析サービス「GOLFAI」
- 親しみやすいチャットボットを目指したエンタメ対話技術
- ドコモ・バイクシェアにおけるAIを活用した自転車の再配置作業最適化の取り組み
- スマートフォンログを用いたストレス・注意機能推定技術の開発

Technology Reports

- マルチデバイスでの共通のAR/MR体験を提供可能なAR/MRクラウド技術
- モバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」の変遷
—1G～5Gのフィールド移動実験に使われたユニークな車両たち—

新たな事業価値を生み出し続けるR&D



常務執行役員 R&Dイノベーション本部長

たに なおき
谷 直樹

2020年3月に日本でも第5世代移动通信システム（5G）のサービスが開始されました。ドコモではパートナーとの協創により、働き方改革や産業の高度化、魅力ある街づくりなどに寄与する5Gソリューションを創出してきました。今後、5Gはさらに進化し、より多くのユースケースへ拡大していくことが期待されています。歴史を振り返れば、移动通信における無線方式は、ほぼ10年ごとに新しい世代が登場し、これらを活用するサービスについては、ほぼ20年ごとに大きな波がありました。1979年12月に開始した自動車電話は、約20年でデバイスの小型化とともに、音声利用の携帯電話へと広く世の中に普及しました。また、1999年2月に開始したi-modeサービスは、i-mode携帯端末やその後のスマートフォンの登場など、端末の高度化とともに、より多様な情報を手で扱うことができるモバイルマルチメディア拡大の礎となりました。では、2019年9月のプレサービスから始まった5G以降は、どのような世界が訪れるのでしょうか？総務省の電波政策2020懇談会の参考資料[1]によると、5Gの利活用による経済効果は、日本国内だけでも約47兆円という試算であり、あらゆる産業への貢献や新たな事業価値の創出が期待されています。

では、その実現に向けて取り組むべきことは、何でしょうか？キーワードは、「社会の変化」×「技術の進化」×「構想・デザイン」であると思います。まず、「社会の変化」ですが、超高齢化社会への対応や新型コロナウイルス感染対策における非接触のリモート型社会への対応などの社会課題を解決しつつ、経済発展に寄与していくことが求められています。次に、「技術の進化」においては、5Gをはじめとするネットワーク、IoT（Internet of Things）、仮想空間、AI、クラウド、エッジ

コンピューティングなどの多様なICTや、ロボット、ドローン、自動運転車などのデバイスの技術進化が目覚ましく、さらにはGAFA^{*1}などに代表されるデジタルプラットフォームの影響が大きくなってきています。以上のような「社会の変化」を捉えた課題の解決に「技術の進化」を活用するという、「デジタルトランスフォーメーション」を進めることにより、企業の再編や異業種連携の加速や新しいデジタルプレーヤーの登場を促し、そして働き方を変えることで、課題解決や新たな付加価値の創造につながります。しかしながら、スイスのIMD（International Institute for Management Development）が発表した「世界デジタル競争力ランキング2020」[2]によると、日本の総合順位は、世界63か国中27位でした。モバイルブロードバンド比率や新技術への投資などは強みとなっているものの、デジタル技術スキル、企業のビジネスにおける俊敏性の低さやデータ活用の遅れなどが弱みとして挙げられています。

そこで重要となってくるのが、3つ目にあげた「構想・デザイン」だと思います。ドコモR&Dイノベーション本部では、将来のありたい姿として、「一人ひとりが輝き、寄り添いながら、あらゆる可能性が広がっていく社会＝Wellbeing Societyへ」の実現に向けて研究開発活動を進めています。この実現のために、ネットワーク技術とサービス技術を同時に進化させつつ、「サイバー・フィジカル融合」というフレームワークを活用した価値創造を進めていきます。「サイバー・フィジカル融合」は、フィジカル空間でのヒト・モノ・コトの情報化から始まり、この情報化を基に、ネットワークを介してサイバー空間でデータ獲得・蓄積を行い、未来予測・知の発見につなげ、フィジカル空間にアクチュエイトさせるというループを回すことで価値創出へつなげ、それを企業・業界の枠を超えて昇華させていくものです。ただし、現時点では、デジタルデータや映像などをサイバー空間で蓄積・活用する仕組みは世の中に多く生まれてきているものの、それらを活用したフィジカル空間での抜本的業務改革や付加価値創造につなげるところは不十分との認識で、検討すべき領域は非常に多いと思っています。

大きな可能性をもつ5Gの進化を含め、新たな時代の価値創出に向けてR&Dは「サイバー・フィジカル融合」の実現に挑戦し続けます。

文 献

- [1] 総務省：“電波政策2020懇談会 参考資料。”
https://www.soumu.go.jp/main_content/000420824.pdf
- [2] IMD：“The IMD World Digital Competitiveness Ranking 2020 results.”
<https://www.imd.org/wcc/world-competitiveness-center-rankings/world-digital-competitiveness-rankings-2020/>

^{*1} GAFA：米国主要IT企業であるGoogle、Apple、Facebook、Amazonの4社の総称。

[Contents]

DOCOMO Today



新たな事業価値を生み出し続けるR&D 谷 直樹 1

特別寄稿



未来がやってきた？ 真鍋 宏幸 4

サービス向上・社会課題解決に貢献するAI Technology Reports (特集)



(P.15)

画像認識技術を用いたゴルフスイング解析サービス「GOLFAI」 6

画像認識

ディープラーニング

AI

親しみやすいチャットボットを目指したエンタメ対話技術 15

チャットボット

キャラクター

言葉遊び

ドコモ・バイクシェアにおけるAIを活用した
自転車の再配置作業最適化の取組み 22

シェアサイクルの事業効率化

移動需要予測

再配置最適化



(P.22)

スマートフォンログを用いた
ストレス・注意機能推定技術の開発 31

メンタルヘルスケア

ストレス

注意機能

Technology Reports

マルチデバイスでの共通の
AR/MR体験を提供可能なAR/MRクラウド技術

39

XR

AR/MRクラウド

サイバー・フィジカル融合



(P.39)



(P.45)

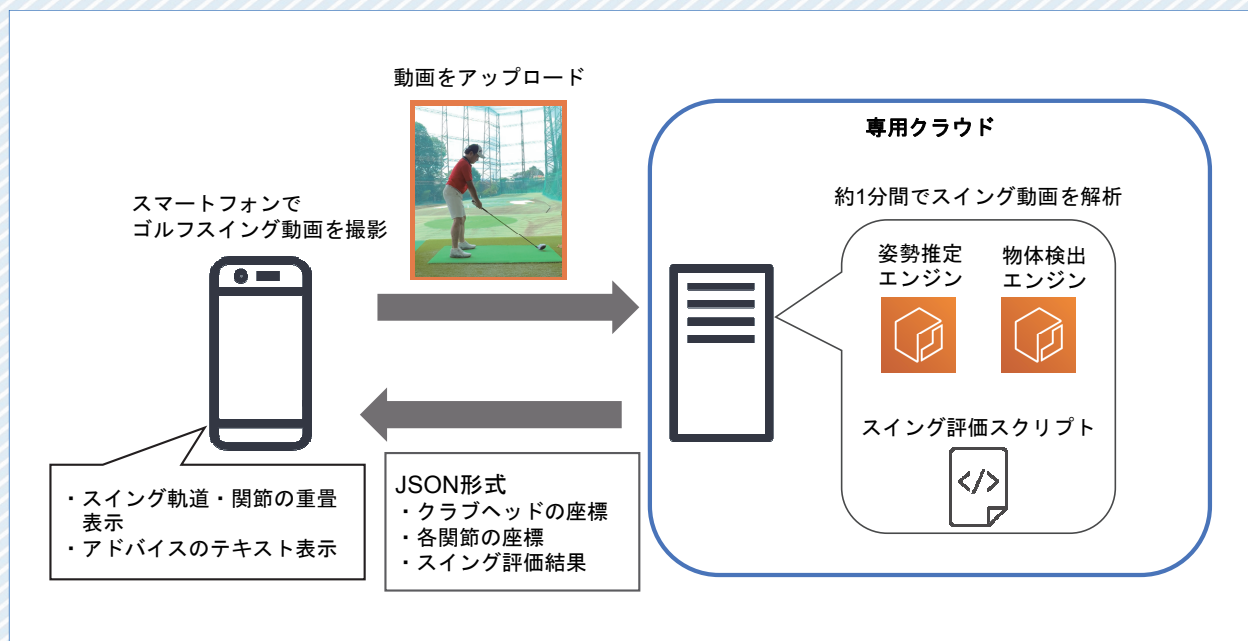
モバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」の変遷
—1G～5Gのフィールド移動実験に使われたユニークな車両たち—

45

研究開発用電測車

フィールド移動実験

特殊車両



Technology Reports (特集) 画像認識技術を用いたゴルフスイング解析サービス「GOLFAI」(P.6)
システム構成

未来がやってきた？

芝浦工業大学 工学部 准教授 まなべ ひろゆき
真鍋 宏幸さん

世界各地で新型コロナウイルスが猛威を振るっている。2019年に一部地域で観測されていたウイルスは、2020年に入り広く世界中に拡散した。日本においても、2020年1月に初の感染例が見つかり、3月から4月にかけて新規陽性者数が急増した。そのような状況の中、4月7日に緊急事態宣言が発令されたことは記憶に新しい。その後、新規陽性者数の増減はあったものの、未だ多くの患者や死者が出ており、収束の兆しは見えていない。

新型コロナウイルスによる負の影響は甚大である一方で、人々の生活が情報通信技術によって支えられていることを実感するきっかけにもなっている。本稿では、筆者が取り組んでいるHCI（Human Computer Interaction）^{*1}分野の目線からこの状況を考えてみたい。

新型コロナウイルスの流行によって、我々がかつてない大きな変化を余儀なくされている。例えば、2020年夏に行われる予定だったスポーツの大規模な国際イベントが延期となった。多くの人がかかわる巨大イベントが、開催4カ月前に延期決定されたことの影響は大きい。それ以上に大きな変化は、感染爆発を防止するために、外出を自粛したり、リモートワークが強く求められたりしたことであろう。これにより出社することが当たり前であると考えていた多くの企業や従業員には困惑が広がった。また、人々が移動し街中に滞在することを前提とする、交通機関や飲食店なども多くの打撃を受けている。影響は社会人だけにとどまらない。例えば、一部の大学では入試が中止となった^{※1}。小学校から高等学校は臨時休業となり、数カ月にわたり授業が無い日々が続いた。多くの大学では、始業開始を遅らせ、全面的なオンライン授業に転換するなどの措置を取った。2020年度後期から対面授業に戻す大学も増えてきたが、首都圏の大学の多くでは未だオンライン授業が主流となっている。

大学に所属している筆者も、オンライン授業への

全面移行を余儀なくされた。オンライン授業には、大きく分けてオンデマンド型とリアルタイム型の2つの実施形態がある。筆者はすべてリアルタイム型の授業を実施したが、オンデマンド型が主の大学もあるようである^{※2}。筆者の授業では、オンデマンド型の予習教材を主とし、リアルタイム型授業時間中は課題の確認や演習を行う、反転授業形式も一部で取り入れた。また、後期に入り対面授業が再開されてからは、対面とオンラインのハイブリッド形式の授業も進めている。当初、すべての学生がオンライン授業を受けられる環境にいるのか、また従来どおり学習を進められるのかなどの不安はあったが、おおむね順調に進めることができた。ありきたりであるが、やはり対面とオンラインとでは双方にメリットとデメリットがあり、どちらか一方のみが良いということではない。また、学生からの評判も一方に偏っているという印象も特になく、オンライン授業は対面授業と同等あるいはそれ以上の教育効果があるとする従来研究^[1]と符合する印象をもっている。

リモートワークが要請されたことで、ビデオ会議も当たり前となった。これまでもビデオ会議はあったが、限定的にしか利用されていなかったあるいは遠隔からの参加者は聴講主体となる傾向があった。しかし、このコロナ禍で、半ば強制的にビデオ会議が行われ、多くの人がビデオ会議上で議論を行う必要に迫られた。これまでビデオ会議では、視線が一致せず、視線を共有できないことや、発話衝突が生じやすいことなどが問題とされてきたが、実際に頻繁にビデオ会議を行ってみると、解決すべき問題は別

※1 HCI：ユーザとコンピュータの関わり方について取り組む研究分野。キーボードやマウス、音声入力などは分かりやすい例。

※1 例えば、北海道大学や高知大学では、2020年3月に行う予定であった後期入試を中止し、センター試験や調査書の内容で選抜する方式に切り替えた。

※2 実際、筆者の大学1年の息子は、リアルタイム型授業が週に1回もなく、ほぼすべてがオンデマンド型である。



Profile

1999年東京工業大学工学部電気電子工学科卒。2001年同大学院修士課程修了。同年(株)NTTドコモ入社。マルチメディア研究所、総合研究所、先進技術研究所を経て、2019年より現職。2012年東工大大学院博士課程に社会人学生として入学。2015年博士(工学)。ユーザインタフェース、ウェアラブル・ユビキタスコンピューティング、入出力デバイス、パーソナルファブリケーションの研究に従事。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

にあるのではないかと、という印象を受けている。

オンライン授業やリモートワークへの急激な転換に我々は戸惑い、そして試行錯誤を続けている。今後もさまざまな困難に直面するだろう。これらをネガティブに受け取ることもできるが、一方で筆者はこの機会をポジティブにも感じている^{※3}。それは、苦境の中に希望を見出したいという願望ではなく、情報通信技術が人々の生活を支えているという事実を再確認できたこと、そして夢見ていた将来が突然やってきたという意味においてである。

情報通信技術は、いつでもどこでもだれとでもつながり、多くの無駄を取り除くことや今まで不可能であったことの実現を目指していたはずである。例えば、大学での授業は未来永劫対面のみで行われると想定していただろうか？そうではなく、学びたい人がいつでもどこでも理解できるまで何度でも学習できる環境が、多くの人が望む未来の姿であるはずだ。すでに無料オンライン授業のMOOC (Massive Open Online Course)^{*2}はあったが、普及しているとは言えなかった。それが今回のコロナ禍で大学はオンライン授業に切り替えざるを得なくなった。これにより、遠隔地にいる学生であっても授業を受講することができる。他にも、動画を何度も見直したり、理解度に応じて動画の再生速度を変化させたりすることもできる^{※4}。現状はまだ大学生限定であるが、期待する未来が近づいてきたと言ってよい。ビデオ会議も同様である。

多くの人にとって身近な例として、マスクがある。マスクは口元を隠してしまうため、表情を伝えづらい。すでに口元を表示するディスプレイを用いた事例[2]や、口元だけでなく顔全体を他人の顔に差し替える提案が行われている[3]が、マスクを常に装着し続けるのであれば、これらの研究が描く未来も近づいてくるのではないだろうか。また、マスクが極度に品薄になった際に、マスクの3Dデータが無料公開されたことが話題になった。巣ごもり期

間が延びるにつれ、もの作りへの関心も高まっているとも聞く。まだ各家庭に3Dプリンタがある状況にはほど遠いが、ユーザによるものづくり、パーソナルファブリケーションが普及した世界が意外と早くやってくるかもしれない。筆者も、そのような未来の実現に向け、電子回路を簡単に作成する手法に取り組んでいる[4]。

このコロナ禍を通じて我々は大きな変化を迫られ、結果的に、あるいは強制的にはあるが、目指していた未来(の少なくとも一部)が突然目の前に出現した。ドコモは情報通信技術の中心的役割を担っており、i-modeを始めとする画期的な未来を作りあげてきた。5Gなどの通信方式だけにとどまらず、これからも我々の明るい未来を先導していてもらいたい。

文 献

- [1] 秋山 秀典, 寺本 明美, 小藪 和剛: “ストーリーミング技術を用いたオンライン授業の教育効果,” 電気学会論文誌A, 126巻, 8号, pp.782-788, 2006.
- [2] 石井 綾郁, 橋本 直: “MouthOver: 発話と口の表情を代替するマスク型デバイス,” 情報処理学会 インタラクシオン2017, pp.844-845, 2017.
- [3] K. Misawa and J. Rekimoto: “Wearing another’s personality: a human-surrogate system with a telepresence face,” Proc.of ISWC ’15, pp.125-132, 2015.
- [4] 今井 悠平, 加藤 邦拓, 瀬川 典久, 真鍋 宏幸: “3Dプリンタと転写箔を用いた両面基板の製作手法,” 情報処理学会研究会報告 HCI-188, pp.1-7, 2020.

^{*2} MOOC: インターネットを用いて多くの人が受けられる講座の総称。日本ではgaccoなどがある。

^{※3} 決して、多くの死者が出ていることや、失業者が増えつつある状況をポジティブに捉えているわけではない。あくまでも生活様式の変化についてである。

^{※4} 筆者のリアルタイム型オンライン授業では、授業動画をアップロードしており、学生は後日動画で振り返ることができる。

画像認識技術を用いたゴルフスイング解析サービス「GOLFAI」

サービスイノベーション部 川嶋 克明 酒井 俊樹
 ムハマドヒルミビン シャピエン 伊藤 友基
 移動機開発部 MUHD HILMI BIN SHAPIEN
 ビジネスクリエーション部 渡部 瑞季

近年、ゴルフスイングを自動で解析可能なゴルフレッスンアプリを使用するユーザが増えている。一方で既存のアプリでは高額な専用のセンサが必要となることが多いため、ゴルフ初中級者にとっては利用のハードルが高い。そこでドコモは、より安価かつ簡易なゴルフスイング解析を提供するため、スマートフォンで撮影された動画のみを用いて解析可能なサービス「GOLFAI」を開発した。これにより、スマートフォン1台でゴルフスイングを解析できるようになり、ユーザは自身のスイングに対するパーソナライズされたアドバイスを受けることが可能になった。

また、本アプリの開発にあたっては、UI/UX開発プロセスの内製化に取り組むことで、より迅速な提供を可能とした。

1. まえがき

GOLFAI [1] は、ユーザからアップロードされたゴルフスイング動画を画像認識技術^{*1}により自動で解析し、解析結果に応じたアドバイスを無料提供するドコモのサービスである。2020年3月よりApp Storeで提供が開始されており、ゴルフの上達に悩んでいる初中級者をメインターゲットとしている。

ゴルフスクールでは、ゴルフインストラクターか

らゴルフ上達のための自身に合った指導を直接受けることができるが、レッスン料やゴルフスクールに通う時間が負担となることがある。そこで近年では、それらの負担を減らすために、スイングを自動で解析できるSmart Golf Lesson [2] などのゴルフレッスンアプリが増えている。一方で既存のアプリでは高額な専用のセンサをゴルフクラブに取り付ける必要があることが多く、ゴルフ初中級者にとっては利用のハードルが高かった。そこでGOLFAIではディープ

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

*1 画像認識技術：画像処理技術や機械学習技術を用いて、画像を機械に理解させ、意味を取り出す技術。

ラーニング^{*2}を用いた画像認識を採用したことで、専用のセンサの代わりにスマートフォンで撮影された動画のみから体の関節位置やスイング軌道のセンシングを行っている。これにより、従来のアプリより安価かつ簡易にゴルフスイングの解析が可能となる。

ゴルフの上達を支援するためには単にスイングの良し悪しの判定のみではなく、どこが悪いのか、どのように練習すれば改善されるかなど、より具体的な情報をユーザに提示する必要がある。ディープラーニングは、一般的に推定結果に対する根拠の明示が難しいため、単体ではユーザが必要とする情報の取得が難しいことが多い。GOLFAIの場合、センシングにはディープラーニングを活用するものの、スイングの評価には専門家のゴルフレッスンの知見を組み合わせた古典的なルールベースの手法を用いることで、この課題を解決した。

本稿では、GOLFAIの画像認識機能の具体例と、本サービスをユーザに迅速に届けるために実施した

UI/UX^{*3}内製化の取組みについて解説する。

2. GOLFAIのシステム概要

GOLFAIのシステム構成を図1に示す。GOLFAIでは、ユーザはまずスマートフォンでゴルフスイング動画を撮影し、それらを専用クラウドにアップロードする。ユーザからアップロードされた動画に対してクラウド上のサーバが画像認識処理を実施し、画像認識結果をJSON（JavaScript Object Notation）^{*4}形式でアプリ側にレスポンスする。アプリ側では返却された画像認識結果を、動画像に重畳表示、もしくはアドバイスのテキスト表示などの形でゴルフ指導を提供する。

3. 画像認識概要

画像上からゴルフ指導に必要な特徴点を抽出するため、GOLFAIでは物体検出と姿勢推定の2つの

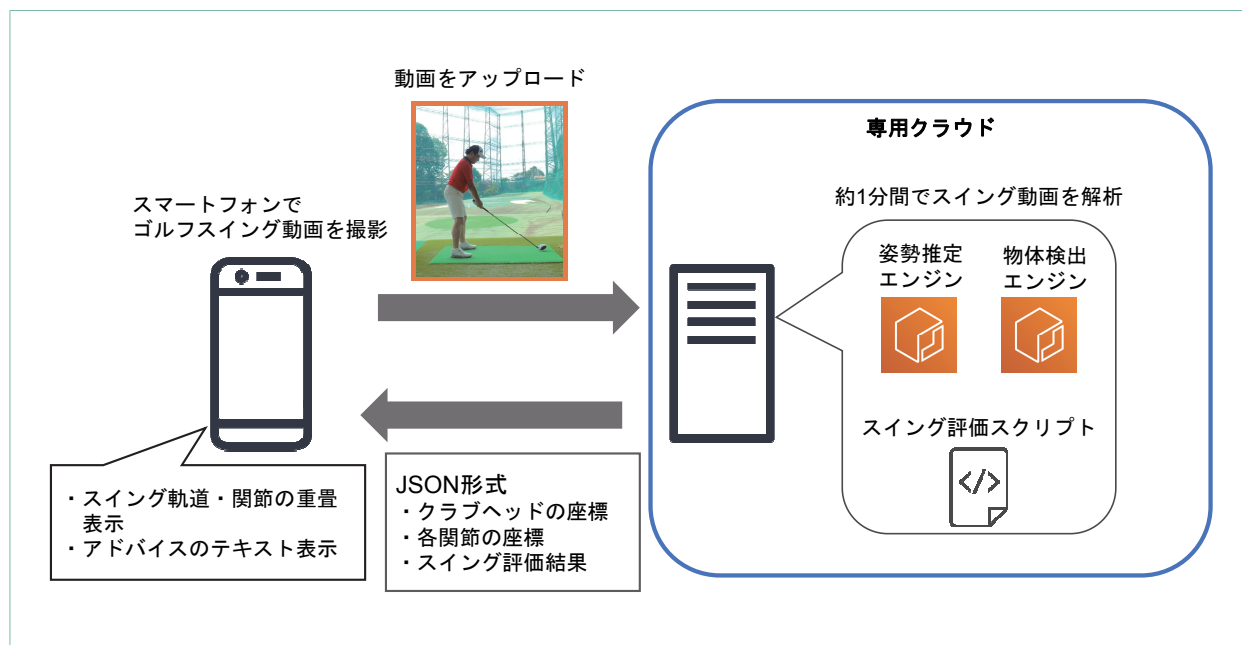


図1 システム構成

^{*2} ディープラーニング：多層のニューラルネットワーク（^{*14}参照）を用いた機械学習の一種。

^{*3} UI/UX：ユーザインタフェース・ユーザエクスペリエンスの略称。

^{*4} JSON：JavaScriptのオブジェクト記述に基づくデータ記述言語。

ディープラーニングを使用している。ディープラーニングの適用にあたり、ゴルフクラブの種類、撮影場所などさまざまな条件下で撮影されたゴルフスイング動画を独自に約1,000本収集している。1つの動画当たり約20秒程度の長さであり、フルHD解像度・120fps (frames per second)*⁵である。これらのデータを用いてファインチューニング*⁶を実施することで精度向上を達成した。

また、抽出された特徴点からルールベースの手法により、ゴルフスイングにおける重要なポジションのフレーム*⁷検出およびスイングタイプの分類を行い、ユーザが解釈しやすい形にした上でアドバイスの提供を可能にしている。

3.1 特徴点検出

(1) 物体検出

物体検出は、画像中の事前に定義された物体の位置と種類を推定する技術である。GOLF AIではゴルフクラブヘッドを検出しており、全フレームに対し

て物体検出処理を実施することでスイングの軌道を算出している (図2(a))。

近年、物体検出技術ではディープラーニングを用いた学習ベースの手法が高い精度を達成しており、大きく分けて以下の2つの手法がある。

① Two stage detection framework

物体の候補領域を提案する前処理の後に、物体の種類と領域の座標を推定する2段階の処理を行う手法である。2ステージのフレームワークでは、まずselective search*⁸やCNN (Convolutional Neural Network)*⁹で取得される特徴マップ*¹⁰を用いて候補領域を生成する。次に各候補領域から特徴量*¹¹を算出し、サポートベクターマシーン*¹²などの分類器*¹³を用いて物体の種類や詳細な座標を推定する。代表的なニューラルネットワーク*¹⁴にSPPNet [3], Fast RCNN [4], Faster RCNN [5] などがある。

② One stage detection framework

物体の候補領域、種類、領域の座標を1つの



図2 特徴点抽出例

*⁵ fps: 単位時間当りの静止画像の数。

*⁶ ファインチューニング: 一度学習されたモデルのパラメータを初期値に設定し、別のデータセットを用いて再度学習を行い、パラメータを微調整する手法。

*⁷ フレーム: 映像の元になる静止画像の1コマ。

*⁸ selective search: 画像中の類似するピクセルをまとめていく

ことで物体の候補領域を算出する手法。

*⁹ CNN: 多次元配列に対して縦方向と横方向に走査しながら、特定のサイズのベクトルを掛け合わせる処理が導入されたニューラルネットワーク (*¹⁴参照) であり、画像認識によく用いられる。

*¹⁰ 特徴マップ: 本稿では入力画像をCNNで処理した結果得られる多次元配列を指す。

ニューラルネットワークで推定する手法である。1ステージのフレームワークでは候補領域の座標と種類を一度の処理で直接推定する。候補領域の生成なども含めたすべての計算を、単一のニューラルネットワークで行うシンプルな処理構造が特徴である。このため、一般的に2ステージのフレームワークより学習や推論が高速になると言われている。代表的なニューラルネットワークにYOLO [6], SSD [7], CornerNet [8] などがある。

GOLFAIではマシンリソースや処理時間を削減するため、図3に示すように、1ステージのフレームワークを採用している。このモデルでは3つの検出レイヤを持っており、それぞれ大中小と異なるサイズの物体を検出する役割をもつため、画像上の物体のサイズに左右されない高精度な物体検出が可能

となっている。

(2)姿勢推定

姿勢推定は、画像に映る人間の関節位置を2次元座標や3次元座標として推定する技術である。推定対象は事前に定義・学習する必要がある。GOLFAIではゴルフスイングの評価に必要な肘や手首、膝などの関節の2次元座標を算出している（図2(b)）。姿勢推定技術では、近年ディープラーニングを用いた学習ベースの推定手法の技術開発が進められており、高い精度を達成している。ディープラーニングを用いた姿勢推定技術は、主に以下の2つのアプローチに分類される。

①Top-downアプローチ

物体検出技術を用いて画像中から人物を検出し、検出された人物それぞれから関節を検出する手法である。人物検出、関節の検出を独立して行うシンプルな手法であり、人物検出の精度

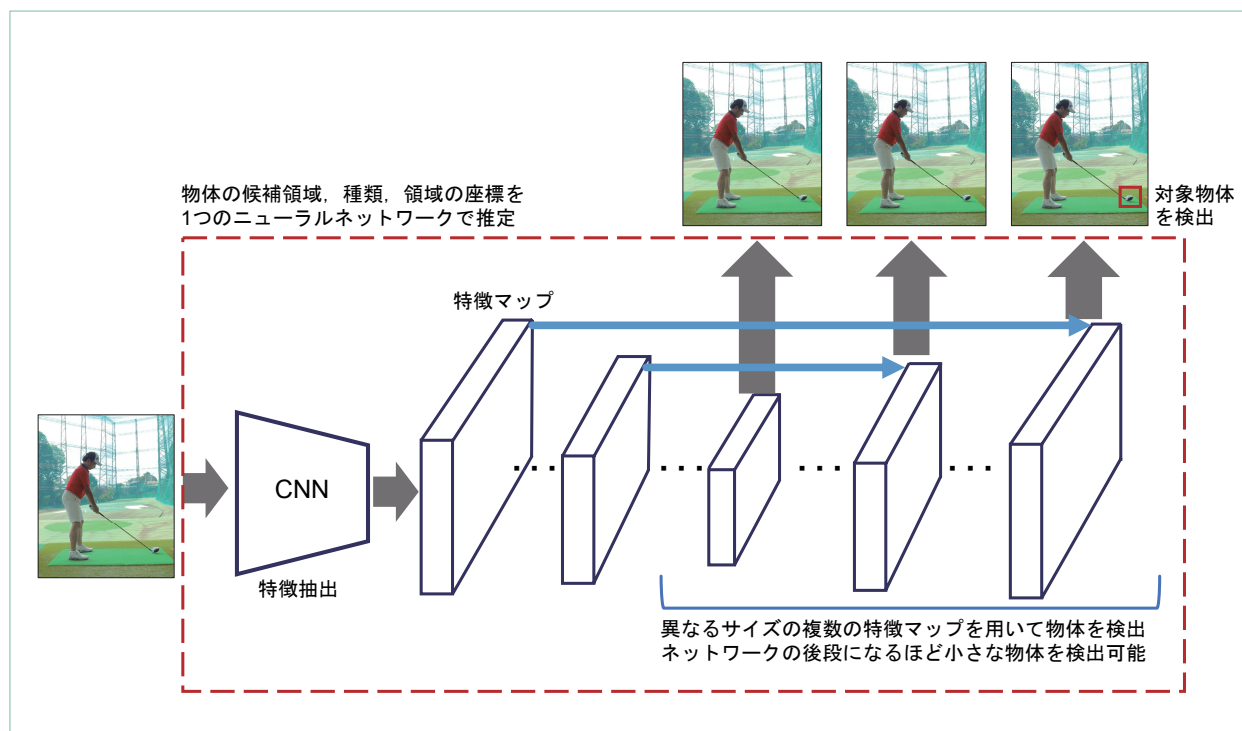


図3 物体検出の処理概要

- *11 特徴量：データから抽出される、そのデータの特徴付ける量（数値）のこと。
- *12 サポートベクターマシン：パターン識別に用いられる機械学習手法の一種。カーネル・トリックと呼ばれる方法で線形分離が不可能な問題に対しても適用可能な手法である。
- *13 分類器：入力をその特徴量に基づいてあらかじめ定められた分

類先のいずれかに分類する装置。

- *14 ニューラルネットワーク：人間の脳の構造を模した数理モデル。

を向上させることで姿勢推定の精度向上にもつながる。一方で、画像中の人物数に比例して計算量が増えるデメリットがある。代表的なニューラルネットワークにDeep Pose [9], Cascaded Pyramid Network [10], High-Resolution Network [11] などがある。

②Bottom-upアプローチ

画像中に存在する人間の関節をすべて検出した後にそれらを人物ごとにつなぎ合わせる手法である。単一のニューラルネットワークを用いて一度に画像中の全人物の関節点を検出するため、人物数によって推論速度が変わりにくい。一方で、関節を検出できたとしても、関節間のつながり合わせが失敗してしまい精度が低くなることがある。代表的なニューラルネットワークにDeep Cut [12], Open Pose [13], PersonLab [14] などがある。

GOLFAIでは処理時間の増加を防ぐためにBottom-upの手法を採用し、関節の位置推定と関節間の繋がり推定の2つのニューラルネットワークで構成されるモデルを使用している(図4)。関節の位置だけでなく、向きの情報も学習することで検出された関節を高精度に人物ごとにつなぎ合わせることが可能となっている。

3.2 スイング分析

(1)スイングポジションの推定

ゴルフスイングにおいて重要と考えられているアドレス (A), トップ (T), インパクト (I), フィニッシュ (F) の4つのポジションのフレームを検出している。これにより、ユーザは図5のようにA, T, I, Fボタンをタッチするだけで、所望のポジションのフレームに再生位置を移動し、スイングを確認することが可能となる。ゴルフスイングには個

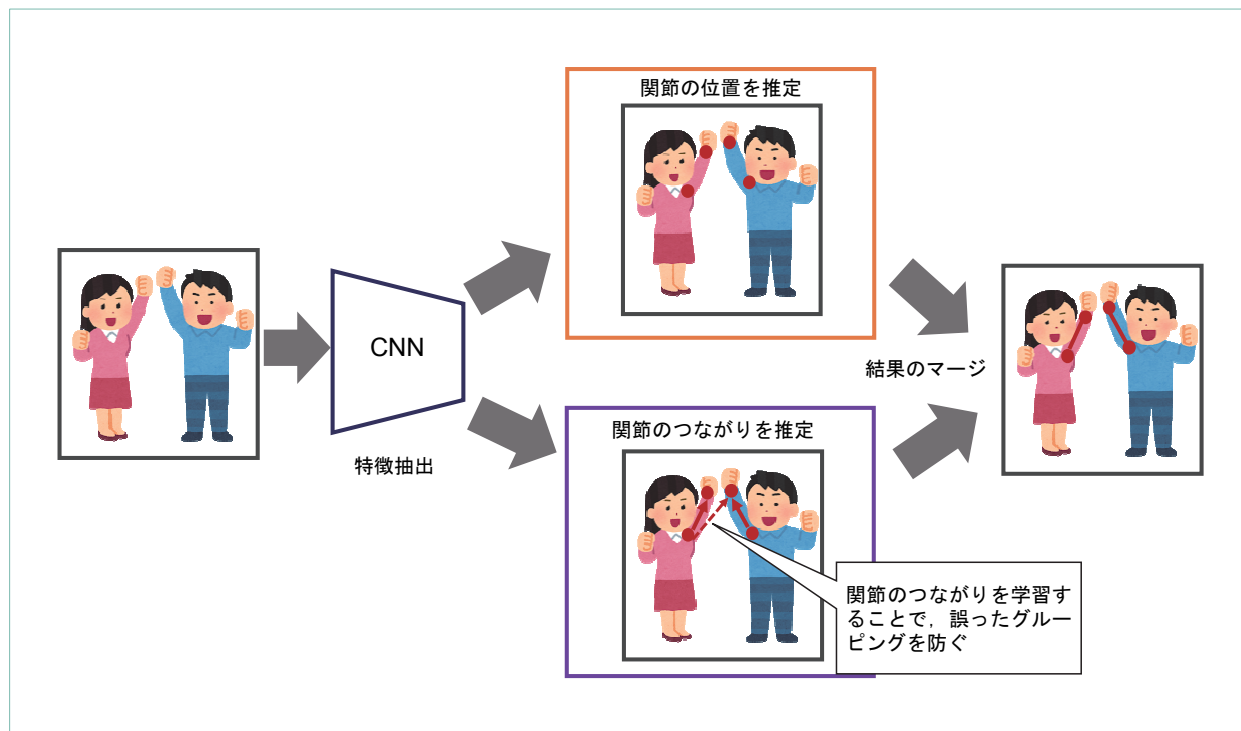


図4 姿勢推定の処理概要

人差はあるものの、その動きには規則性がある事に着目し、ルールベースでポジションを推定する。

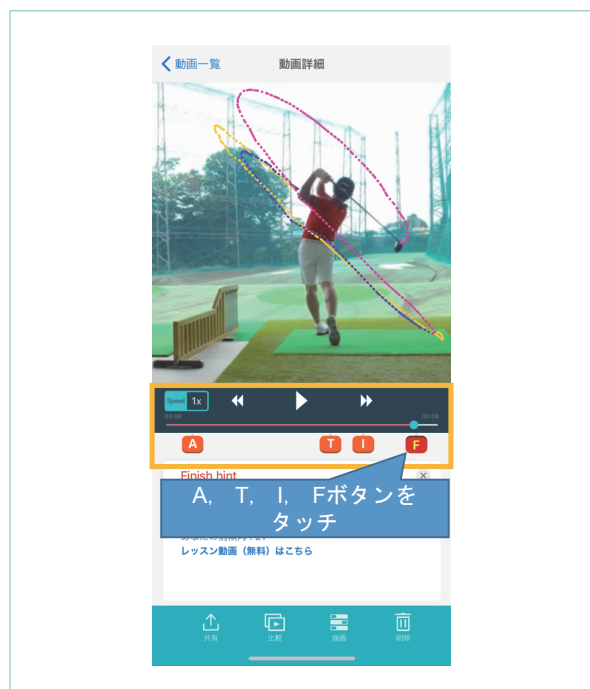


図5 ポジション推定結果例

(2)スイング評価

物体検出、姿勢推定技術によって算出された特徴点を用いてスイングを評価している。専門家とスイングの評価ポイントおよびその評価方法について議論を重ね、独自に画像認識によるスイング評価方法を開発した。専門家の知見を数式に落とし込みルールベースの手法で評価している。以下にGOLFAIにおける評価ポイントの例を示す。

(a)体の前傾角度の維持 (図6(a))

体の前傾角度がスイング中に一定であると良いスイングと言われている。この観点で良いスイングかを評価するため、ポジションごとに腰中央と首の座標を用いて前傾角度を算出し、ポジション間の前傾角度の変化量が一定数値以上だったときにユーザへ改善のアドバイスを提供している。ここで、一定数値は専門家の知見に基づき決定している。

(b)オーバースイング (図6(b))

オーバースイングと呼ばれる過度な振りかぶりは、スイング軌道が不安定になるため一般的



図6 スイング評価例

に良くないと言われている。この観点で良くないスイングかを評価するため、トップポジションのときにゴルフクラブヘッドが体よりボール側かつ、首の位置よりも低い位置にあるときオーバースイングと判定している。

(c)チキンウィング（図6(c)）

フォロースルーの際に左肘（左打ちなら右肘）が引けてしまっているスイングはチキンウィングと呼ばれている。チキンウィングでない正常なスイングの肘の動きをユーザの側方から見たとき、フォロースルーのときには肘が体に隠れて見えないという専門家の知見に基づき、インパクト以降にゴルフクラブヘッドが体を横切るよりも前に左肘（左打ちなら右肘）が画像上から検出された場合にチキンウィングと判定している。

上記のようにスイングの評価に関してはディープラーニングではなく、ルールベースの手法を組み合わせることで、ユーザが解釈しやすい形でアドバイスを実現している。

4. UI/UX検討プロセス内製化によるGOLFAIの開発期間短縮／使いやすさ向上の取り組み

4.1 サービス開発の課題

近年サービスアプリ市場においては競争が激しく、ユーザ獲得のためには、いかに早く、優れたUI/UXをもつアプリを提供するかが課題となっている。そのため、新規技術を活かしたGOLFAIを、UI/UXを最大に考慮しつつ、効率的、かつスピーディに開発し、市場に投入する必要がある。

一方、現状のドコモサービス開発においては、検討開始からサービス提供までに平均で5～6カ月の期間を要するため、今回、UI/UX・デザイン検討お

よびアウトプットを行うプロセス（以下、UI/UXプロセス）の改善に着目した。UI/UXプロセスの改善により、下記2点の課題を解決する。

・UI/UXの解釈上の齟齬

UI/UXを向上させるには、ユーザ提供価値についてステークホルダ間（アプリ開発側）で認識を一致させた上でユーザの反応を意識しながら試行錯誤を繰り返す必要があるが、認識を一致させることが難しい。

・情報伝達の非効率性

ステークホルダ間でのコミュニケーションに十分な配慮が必要であるが、外部のデザイン会社と連携する場合はコミュニケーションを密に取り難く、円滑に進めにくい。

ステークホルダの増加により、意思疎通が煩雑になることやコミュニケーションのタイムロスが要因となり、開発スピードの低下につながる。そのため、「UI/UXプロセス内製化」の取組みをGOLFAI開発において試験的に実施し改善を図ることとした。

4.2 UI/UXプロセス内製化

GOLFAI開発では、UI/UXプロセスにおいて外部のデザイン会社への委託は行わず、開発部門にて内製的に検討および対応を行った。

図7に示すように、全ステークホルダが参加したワークショップで定めたコンセプトをベースとして、機能案・デザイン案を開発部門にて作成・提案した。開発部門がUI/UXプロセスを担うことでステークホルダを減らしたことに加え、企画部門・開発ベンダ双方の状況を把握しているため、「実現したい要望」と「開発負荷」のバランスを取った形で効果的・効率的な提案を行うことができた。また、改善サイクルを回すにあたっては、橋渡し役として企画部門との仕様案のすり合せ・開発ベンダとの実現性検討をスピーディに行った。



図7 UI/UXプロセス内製化による開発工程

具体的には、デザインデータの作成・受渡しに広く活用されるツールであるSketch^{*15} [15]にてデザイン案を作成し、複数回の改善を繰り返しながら最終版を完成させた。操作可能なアプリが無い段階では、プロトタイピング^{*16}を容易に作成できるツールであるPrott^{*17} [16]にて画面遷移を擬似的に再現することで、実操作に近い形でデザイン確認を開発初期段階から可能とし、改善サイクルの高速化につなげた。

開発部門がUI/UXプロセスを担った結果として、GOLFAIのリリースを4カ月で実現させた。その中でUI/UX検討プロセスにておおむね1カ月ほどの期間短縮寄与があったと考えられる。新規サービスをいち早く世の中にリリースすることを目的とし、かつ、ステークホルダ減少の効果が高い中小規模のプロジェクトに対して、UI/UXプロセス内製化の効果が高いと考えられる。

5. あとがき

本稿では、GOLFAIで使用されている、ゴルフク

ラブヘッドを検出する物体検出技術と、体の関節位置を推定する姿勢推定技術について解説し、またそれらの技術を用いて抽出された特徴点を活用したスイングの評価方法、その技術をいち早くユーザーに届けるためのUI/UXプロセス内製化の取組みを解説した。ゴルフスイングの上達を支援するには、スイングの良し悪しの判定のみでなく、どこが悪いのか、改善方法など具体的なアドバイスが必要となる。本サービスでは、最新のディープラーニングを用いた高精度な特徴点検出と専門家の知見を組み合わせることで、ユーザーに有益なアドバイスを提供している。今後は逆光などの悪い撮影条件下でも高精度に認識可能な画像認識技術の開発や、サッカーなど他のスポーツへの本技術の活用、UI/UXプロセス内製化の広い適用に関して検討を行う予定である。

文 献

- [1] GOLFAI 公式サイト。
<https://golfai.jp/>
- [2] SONY スマートゴルフレッスン。
<https://smartsports.sony.net/golf/product/1G/JP/ja/>
- [3] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun: “Spatial Pyramid

^{*15} Sketch：オランダのBohemian Coding社がサービス提供しているベクターグラフィックエディターのこと。一般的にアプリやWebのUIデザインツールとして利用されている。

^{*16} プロトタイピング：検証・フィードバックのため、検討早期に実働モデルを製作する手法。

^{*17} Prott：日本のGoodPatch社がサービス提供しているアプリや

Webデザインに特化したプロトタイピングツールのこと。

- Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition,” In ECCV, 2014.
- [4] R. Girshick : “Fast R-CNN,” In ICCV, 2015.
- [5] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Sun : “Faster R-CNN : Towards Real Time Object Detection with Region Proposal Networks,” In NIPS, 2015.
- [6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi : “You only look once : Unified, real time object detection,” In CVPR, 2016.
- [7] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C. Fu and A. Berg : “SSD : Single Shot Multibox Detector,” In ECCV, 2016.
- [8] H. Law and J. Deng : “CornerNet : Detecting Objects as Paired Keypoints,” In ECCV, 2018.
- [9] A. Toshev and C. Szegedy : “Deeppose : Human Pose Estimation via Deep Neural Networks,” In CVPR, 2014.
- [10] Y. Chen, Z. Wang, Y. Peng, Z. Zhang, G. Yu and J. Sun : “Cascaded Pyramid Network for Multi-Person Pose Estimation,” In CVPR, 2018.
- [11] K. Sun, B. Xiao, D. Liu and J. Wang : “Deep High-Resolution Representation Learning for Human Pose Estimation,” In CVPR, 2019.
- [12] L. Pishchulin, E. Insafutdinov, S. Tang, B. Andres, M. Andriluka, P. Gehler and B. Schiele : “Deepcut : Joint Subset Partition and Labeling for Multi Person Pose Estimation,” In CVPR, 2016.
- [13] Z. Cao, T. Simon, S.-E. Wei and Y. Sheikh : “Realtime Multiperson 2d Pose Estimation using Part Affinity Fields,” In CVPR, 2017.
- [14] G. Papandreou, T. Zhu, L.-C. Chen, S. Gidaris, J. Tompson and K. Murphy : “PersonLab : Person Pose Estimation and Instance Segmentation with a Bottom-Up, Part-Based, Geometric Embedding Model,” In ECCV, 2018.
- [15] Sketchホームページ.
<https://www.sketch.com/>
- [16] Prottホームページ.
<https://prottapp.com/ja/>

親しみやすいチャットボットを目指したエンタメ対話技術

サービスイノベーション部 つのもり ゆいこ しらみず ゆうたろう
角森 唯子 白水 優太郎

近年、さまざまな用途でのチャットボットの需要が高まっている。コミュニケーションの提供を目的としたチャットボットとの対話においては、ユーザに「親しみやすい」「楽しい」と思ってもらうことが重要である。そこで、親しみやすい対話を実現するために、特定のキャラクターを再現する技術と、なぞかけなどの言葉遊び技術を開発した。これにより、チャットボットにエンターテインメント性を付与することが可能になった。さらに、エンタメ対話を提供するツールとして、チャットツール上で動作する対話アプリを開発した。

1. まえがき

近年、スマートスピーカーや対話エージェントアプリなどのチャットボットが普及している。これらは「アラームをかける」や「今日の天気は？」などのような、何かしらのタスク依頼を主に受け付けているものがほとんどである。これらのチャットボットはタスク依頼を受け付けることを念頭に設計されているが、ドコモが2012年にリリースした「しゃべってコンシェル」では、タスク依頼ではないコミュニケーションを目的としたユーザ発話が多く入力されていた。このようなユーザの入力に答えるために、

ドコモではNTTメディアインテリジェンス研究所の成果技術に基づき、雑談対話API (Application Programming Interface)*1を開発し、2013年よりdDs (docomo Developers support) [1] にて公開してきた。さらに、2018年には、雑談対話APIを基に開発した「かたらい [2]」をインターメディアプランニング株式会社と共同でリリースした。これらは、タスクを受け付けるのではなく、ユーザとコミュニケーションをとることを目的としている。このようなコミュニケーションを目的とした対話は、ユーザに「親しみやすい」「楽しい」と思ってもらうことが重要である。

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

*1 API：OSやミドルウェアなどが提供する機能を、他のソフトウェアが利用するためのインタフェース。

そこで、親しみやすい対話を実現するために、特定のキャラクターを再現するキャラクター雑談技術と、なぞかけなどチャットボットとのゲーム性のある対話を実現できる言葉遊び技術を開発した。これにより、ユーザが親しみやすいと感じる、エンターテインメント性をチャットボットに付与することが可能になった。さらに、ユーザが手軽にエンターテインメント性のある対話（以下、エンタメ対話）を楽しめるように、チャットツール上で動作するエンタメ対話アプリを開発した。

本稿では、キャラクター雑談技術と言言葉遊び技術、対話アプリについて解説し、活用事例についても紹介する。

2. キャラクター雑談技術

2.1 概要

チャットボットにキャラクター性を付与することで、ユーザに親しみやすいと思ってもらえる対話を実現できる可能性が高い。例えば、ユーザの好きなキャラクターや、オリジナルのキャラクターを設定することで、ユーザの興味を引くことができる。

キャラクター雑談技術は、NTTメディアインテリジェンス研究所の成果技術[3]を基に開発した、任意のキャラクターとの対話を再現する技術である。作成したいキャラクター風の発話ペアデータ（質問、回答）を作成し、それを基に対話システムを構築する。新規に対話システムを構築する場合だけでなく、組み合わせることで既存の対話システムにもキャラクター性を付与することが可能である。

本技術では、低コストでリアルタイム性のある、キャラクターを再現した高精度な対話を実現している。まず発話ペアデータベースを検索することで候補を抽出し、次にさまざまな手法で算出したスコアを用いて最終的な発話を決定している。このように、最初に検索で回答候補を絞ることで、高スペックな

サーバ以外でも、リアルタイム性のある対話を実現することができる。

2.2 処理の流れ

キャラクター雑談技術のシステム構成図を図1に示す。ユーザ発話が入力されると、次の処理を実行する。

まず、発話ペア検索部では、入力されたユーザ発話に対する複数の回答候補を、発話ペアデータベースから検索・抽出する。発話ペアデータベースには、任意のキャラクターの発話ペア（質問と回答の対）をあらかじめ格納している。発話ペアデータベースにおいて、入力されたユーザ発話に類似した質問を検索し、質問とそれに対応する回答候補のペア集合を取り出す。

次に、発話スコア計算部では、翻訳モデルやword2vec^{*2}モデルを含むさまざまな手法を用いて、複数のスコアを計算する。翻訳モデルは、一般には両言語（例：日本語と英語）での文間の対応が与えられた対訳コーパス^{*3}を用いて学習するが、本技術では質問と回答の対応が与えられた大量の発話ペアを用いて学習している。この翻訳モデルに、入力されたユーザ発話と回答候補の対を入力することで、そのユーザ発話と回答候補の対がどのくらい自然かに関するスコアを算出する。word2vecモデルでは、入力されたユーザ発話と回答候補との類似度に関するスコアを算出する。

最後に、発話ランキング部では、複数のスコアを統合して発話のランキングを行う。最もスコアが高い発話を、最終的なシステム発話として出力する。

2.3 活用事例

「携帯人間AIジミー」（以下、AIジミー）は、キャラクター雑談技術を初めて活用した商用サービスで、株式会社ラフ&ピースマザーから提供予定の、芸人のジミー大西氏を再現したAIとの音声対話が

*2 word2vec：テキストデータを解析し、各単語の意味をベクトル表現化する手法。

*3 コーパス：テキストや発話を大量に収集してデータベース化した言語資料。

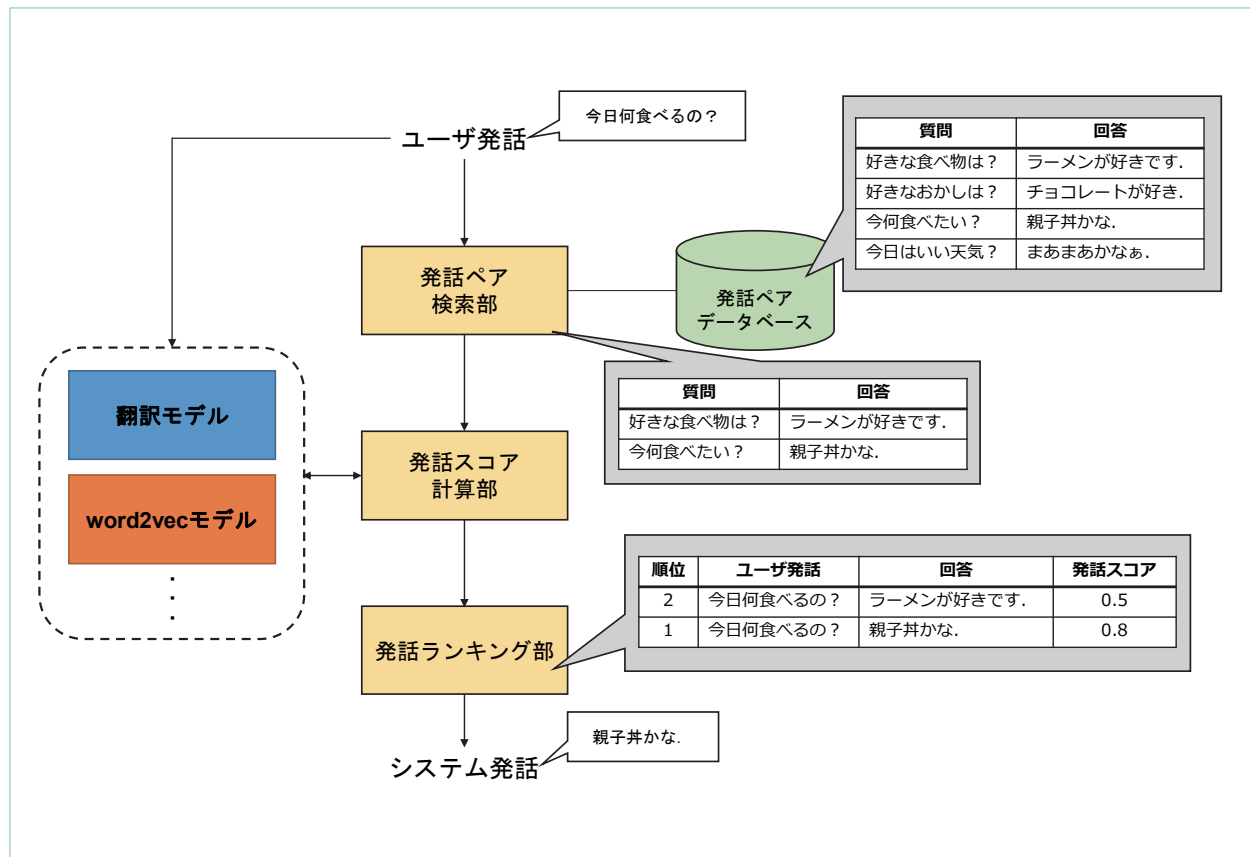


図1 キャラクター雑談技術のシステム構成図

可能なアプリケーションである（図2）。本アプリでは、ジミー大西氏本人が実際に質問に回答することで質問回答ペアを作成し、それらを学習させることでジミー大西氏を再現した対話を実現している。例えば、ユーザが「元気？」と発話すると、「僕ですか？もう至って元気です。もう止まれへんぐらい元気です。」のように、ジミー大西氏風の応答を行う。キャラクター雑談技術を用いることで、よりジミー大西氏らしい応答を可能にしている。

AIジミーでは、音声対話を実現するために、本技術に加えてAIエージェントと、NTTメディアインテリジェンス研究所が開発した音声合成モデルが使用されている。AIエージェントは、音声認識・音声合成機能を有しており、ユーザと音声での対話

が可能となる。AIエージェントの音声合成には、NTTメディアインテリジェンス研究所の協力のもとで開発した、ジミー大西氏の音声を学習したオリジナル音声合成モデルを使用している。

3. 言葉遊び技術

3.1 概要

ゲーム性のある対話機能をチャットボットに付与することで、ユーザの興味度を高め、ユーザに「もっと話したい」と思ってもらえる可能性が高くなる。本技術では、山手線ゲーム、百人一首、なぞかけ、クイズを実現している。



図2 携帯人間AIジミー

(1)山手線ゲーム

山手線ゲームとは、例えば「山手線の駅名」のような特定のお題に対して、「新宿」「渋谷」と回答していく対話型ゲームである。回答が重複したり、誤った回答をしたりしてしまうと負けとなる。

回答をユーザが入力する際の課題として、「表記ゆれ」が挙げられる。例えば、ユーザが回答しようとしている語が「新宿三丁目駅」である場合、「新宿三丁目」のように語末の「駅」を省略したり、「新宿3丁目駅」のように漢数字をアラビア数字に置換したりして入力するケースが想定される。このような問題に対処するため、Wikipediaから自動で表記ゆれ情報を収集し、定期的に辞書を構築している。また、ゲーム性を高めるための工夫として、Wikipediaのページ閲覧数やリンク頻度から算出した「回答の知名度」に従って、システム回答順序を決定している。例えばお題が「山手線の駅名」であれば、「新宿」「渋谷」のような比較的知名度の高い駅名を優先的に回答し、「田町」のような比較的知名度の低い駅名を後に回答する。

(2)百人一首

小倉百人一首を利用した競技かるたは一般的に、詠手が上の句を詠み上げ、下の句のみが書かれた札（字札）の中から対応する札を競技者が取る形式で行われる。

本機能も同様に、まずシステムは、1件の上の句と、その上の句に対応する1件を含む複数件の下の句を、それぞれ詠み札・取り札としてユーザに提示する。ユーザは、システムから提示された下の句の中から任意の句を選択する。システムは、ユーザが選択した下の句が上の句に対応しているかどうか（正誤）をユーザに返却する。

後述のmy daizメンバー*4「ことばあそび」は、上の句の表示と同時に、音声合成により句を詠み上げるが、上の句の表示テキスト（歴史的仮名遣）をそのまま発話音声とするのではなく、詠上げ文字列として別途発話文字列に調整を加えることで、既存の音声合成機能を利用した自然な札詠みを実現している。

(3)なぞかけ

なぞかけとは「XとかけてYととく。その心はど

*4 my daizメンバー：my daiz（*5参照）に追加できる拡張機能（サービス）のこと。

「ちかもZでしょう」といった形式の言葉遊びである。「かたらい」では、システムからランダムに提示される4つの単語から選択するか任意の単語を入力することで、それをお題Xとしたなぞかけを楽しめる。なぞかけはSNSから収集したテキストデータを基に構築しており、投稿文を（X，Y，Z）形式のトリプルデータに変換したものを利用している。

(4)クイズ

継続して気軽に遊べる対話型ゲームとして、クイズ機能を開発した。システムはランダムにクイズ本文1件と、回答候補として正答・誤答を併せて4つの選択肢をユーザに提示する。ユーザは必要に応じて、クイズ本文に対応するヒントを参照できる。問題に正解すると、問題の難易度に応じた点数が付与される。

後述の「ことばあそび」メンバーでは、一定期間

中の出題問題を固定し、獲得点数をユーザごとに蓄積することで、ユーザ間で点数の比較（ランキング化）を可能としている。

3.2 活用事例

my daiz^{*5}において、本技術を活用した対話型ゲームを「ことばあそび」として提供している（図3）。

my daizは、電車の運行状況や天気などの情報提供を主な機能としているが、対話型ゲーム機能を追加することで、エージェントに対するユーザの心的障壁を取り除き、親しみをもってもらうことをねらいとしている。

my daizメンバー「ことばあそび」独自の工夫として、音声・テキストによる操作だけではなく、GUI（Graphical User Interface）^{*6}によるボタン操作を可能としている。これにより、音声認識や誤字



図3 ことばあそび

*5 my daiz：ユーザに合わせた幅広い情報を提供する、スマートフォンやタブレット上で動作する音声対話エージェント。

*6 GUI：操作や表示の対象がボタンやアイコンで表現され、直感的な操作や視認性に優れるインタフェース。

脱字による入力ミスの低減を図っている。また、「クイズ」機能では、ユーザの利用継続率向上を狙って、日ごとに回答数の制限をつける、難易度に応じて点数を付与するなどの仕組みを追加しており、さらに「百人一首」機能では、my daizの音声合成を利用して上の句を詠み上げることで、競技かるたの自己練習としての活用や学習効果の定着を狙っている。

4. かたらいSlackアプリ

4.1 背景

昨今のリモートワークの全国的な普及に伴い、Slack^{*7}などのチャットツールが脚光を浴びている。一方で、リアルでの対話機会が減少したことで、「コミュニケーションが減った」など、リモートワーク特有の課題が浮き彫りになっている。エンターテインメント性の高い対話は、人と人、人とモノのコミュニケーションを活性化させる効果が期待できる。

そこで、ユーザが手軽にエンタメ対話を楽しめるように、主要なチャットツールの1つであるSlack上で動作する対話アプリを開発した。Slackにインストールできるアプリケーションとしては初の、チャンネル内での雑談活性化機能をもつ。

4.2 機能

本Slackアプリでは、インストールするだけで以下に述べる機能を利用できる。

①投稿内容の返答

チャンネル^{*8}へ投稿されたメッセージの内容に応じて、自然な返答を投稿する。応答文は、かたらいの雑談対話エンジンからの出力を利用している。本アプリでは、チャンネルのログが不用意に流れることを抑止するために、ユーザ発話に対して毎回回答するのではなく、一定確率での応答としている。

②投稿内容に含まれるキーワードを拾った言葉遊び

前述したなぞかけのデータベースに格納されている任意の語が、チャンネルへ投稿されたメッセージに含まれているとき、一定の確率で言葉遊びを返答する。例えば、「ラーメン食べたいなあ」という投稿に対して、「ラーメンとかけて祇園祭ととく。その心は、どちらも出汁（山車）が魅力でしょう」と返答する。

③なぞかけやクイズの自動投稿

チャンネルを盛り上げるために、なぞかけやクイズなどのコンテンツを自動で投稿する。これにより、雑談専用チャンネルの埋没・沈滞を防いだり、雑談専用チャンネルへの投稿を利用者に喚起したりする。

本アプリのトライアル利用者9名を対象に8項目からなるアンケート調査を実施した（図4）。各質問事項の評定平均値に対して、7段階リッカートスケール^{*9}の「4. どちらともいえない」を基準とした1標本のt検定^{*10}を実施したところ、「メッセージを送信しなくなった」「業務の息抜きになった」などの項目において5%水準で有意差が見られた。このことから、本アプリを利用することで、チャンネルへの投稿に対する心理的ハードルが下がり、組織内のコミュニケーションを促進させるとともに、対面の対話が減ることによる孤独感の解消が期待できる。なお、図中のエラーバーは標準偏差（収集したデータのばらつき具合）を示す。また、グラフ上部の「*」は有意水準を示す（*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.005）。

5. あとがき

本稿では、キャラクター雑談技術と言葉遊び技術、対話アプリについて解説した。キャラクター雑談技

*7 Slack®：Slack Technologies, Inc.の登録商標。

*8 チャンネル：Slackにおいて、メッセージをプロジェクトやチーム単位で整理・共有する場所。

*9 リッカートスケール：アンケートなどで使われる心理検査の回答尺度の一種であり、提示された文に対して回答者がどの程度合意できるかを回答する。一般的に5段階の尺度が用いられる

が、7、9段階の尺度を用いることもある。

*10 1標本のt検定：1つの母集団の母平均が特定の値と等しいかの検定（統計学的な検証手法）のこと。本稿では「アンケート結果の平均値が4.0（＝特定の値）である」と仮説（帰無仮説）を立てて検定を実施した。

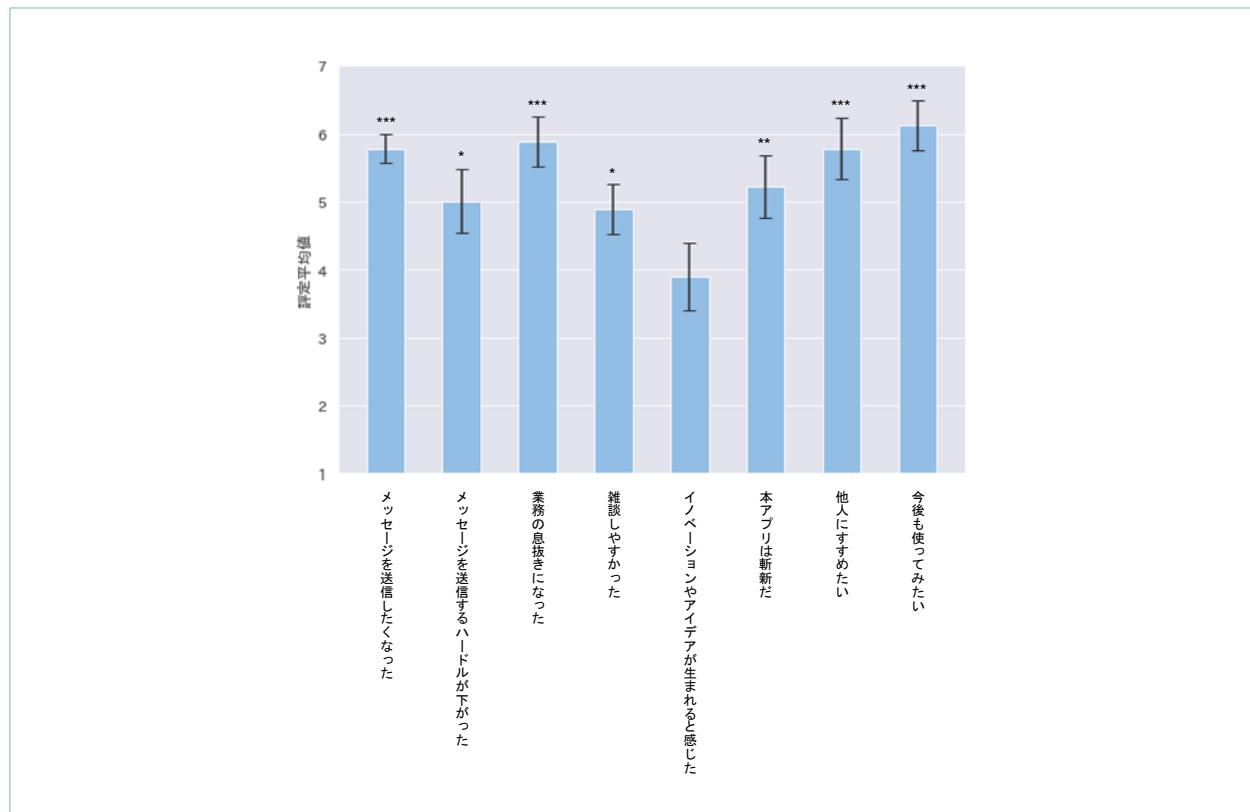


図4 かたらいアプリに関するアンケート結果

術は、作成したいキャラクター風の発話ペアデータを基に対話システムを構築することで、任意のキャラクターとの対話を再現することができる。言葉遊び技術は、Wikipediaなどの知識ベースを基に構築した「山手線ゲーム」や「なぞかけ」など、4種類のゲームを提供している。これらの技術により、チャットボットにユーザが親しみやすいと感じる、エンターテインメント性を付与することが可能になった。さらに、エンタメ対話を提供するSlackアプリを開発し、ユーザが手軽にエンタメ対話を楽しむことができるようになった。

今後は、実サービスで利用される中で課題を抽出

していき、より親しみやすいエンターテインメント性の高い対話を提供するサービスへと改良していき

文 献

- [1] docomo Developer support Webサイト.
<https://dev.smt.docomo.ne.jp/>
- [2] katarai Webサイト.
<https://www.katar.ai/>
- [3] R. Higashinaka, M. Mizukami, H. Kawabata, E. Yamaguchi, N. Adachi and J. Tomita: "Role play-based question-answering by real users for building chatbots with consistent personalities," Proc. of SIGDIAL, Jul. 2018.

Technology Reports (特集)

シェアサイクルの事業効率化

移動需要予測

再配置最適化

サービス向上・社会課題解決に貢献するAI

ドコモ・バイクシェアにおける AIを活用した自転車の再配置作業 最適化の取組み

クロステック開発部

いしぐろ
石黒しん
慎みむら
三村ともひろ
知洋かわさき
川崎さとし
仁嗣

サービスイノベーション部

ふかざわ
深澤ゆうすけ^{†1}
佑介

スマートライフ推進部

むろずみ
室住あつこ^{†2}
篤子

近年、シェアサイクルの利用が増えることで、専用駐輪場の自転車溢れ・不足の問題が顕在化している。そこでドコモは、ドコモ・バイクシェアの集配トラックのための自転車の再配置最適化システムを開発した。このシステムは自転車の利用需要予測を行い、将来予測に基づいて自転車の再配置計画を最適化し、集配トラックに再配置作業のレコメンドを行う。本システムを用いて再配置を行うことで、各駐輪場における自転車の不足および溢れが軽減され、利用者にとってより使いやすいシェアサイクル環境の維持が可能になると期待できる。

1. まえがき

近年、都市交通や観光において、電車駅から目的地の施設までや、複数の目的地間を移動するために、短距離移動がしやすい交通手段の1つとして自転車の人気が高まっている。さらに新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行以来、個人利用が可能で、三密回避が実現しやすい自転車需要はますます高まってきている。しかし、個人が自転車を所有し

て都市空間で使うには、駐輪場の空きスペースを定期契約することや、電車で自転車を携行して都市間を移動することが必要となるため、一般には扱いづらい。このような背景から、近年、シェアサイクルが注目され利用が増加している。

ドコモ・バイクシェア社は、シェアサイクル事業「ドコモ・バイクシェア」を展開しており、ドコモは本事業の業務支援を行っている。ドコモ・バイクシェアのサービスでは、街のさまざまな場所に専用

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

†1 現在、総務部

†2 現在、人事部

の駐輪場が設置されており、利用者は希望する駐輪場を選んで自転車の貸出し・返却をすることが可能である。また、借りた自転車を任意の駐輪場に返却できるため、貸出元の駐輪場に戻る必要は必ずしもなく、短い距離の移動の際に利便性が高い。ドコモ・バイクシェアの利用は増加し続けており、年間の総利用回数では、2011年度は約4万回であったところが、2019年度は約1000万回と急速に拡大した。これを受け、ドコモ・バイクシェア社は2019年時点で、東京では駐輪場約830カ所、自転車約8,300台を提供している。

ドコモ・バイクシェアでは、貸与される自転車は電動アシスト付きとなっており、坂道の多い日本の街事情においても気軽に利用しやすいサービスを提供している（写真1 [1]）。また、自転車故障時の



写真1 ドコモ・バイクシェアの電動アシスト付き自転車

メンテナンスやバッテリー充電もサービスの一環として行っており、利用者は常に整備された自転車を利用することが可能である。

ドコモ・バイクシェアを代表とするシェアサイクルは、ある駐輪場から別の駐輪場へ自由に移動できるサービスとして設計されており、利用者に貸与された自転車は貸出時の駐輪場と異なる駐輪場へも返却可能である。このため、自転車利用に伴って配置が局所的に偏り、特定の駐輪場において利用可能な自転車が不足することで利用者に貸出しできないことや、多数の自転車が駐輪場に配置されることで、満車となり返却できないことがある（写真2）。このような自転車配置の不均衡を緩和することは、一般に、シェアサイクルのサービス運営において共通の課題となっている。特にドコモ・バイクシェアでは、駐輪場のラック位置以外への駐輪が可能であり、多数の自転車が返却され、駐輪場のスペースから溢れて駐輪されることがあり、地権者や通行人に不便益を与えてしまう（写真2(b)）。

このような偏りを軽減し、自転車の配置台数を適正化するため、ドコモ・バイクシェアでは、集配トラックによる再配置を行っている。再配置では溢れている駐輪場から自転車を積み込み、不足している駐輪場へ運ぶことで配置台数の偏りを解消する。一



(a)自転車不足



(b)自転車溢れ

写真2 自転車配置の偏り状況

方で、シェアサイクルの利用回数は増加の一途をたどっており、限られた台数の集配トラックを効率的に運用することで、配置の不均衡に対応することが求められている。

そこでドコモでは、バイクシェアの利用実績や周辺の人口統計値をリアルタイムに収集し、各駐輪場における自転車の貸出し・返却の需要を予測することで、将来の溢れや不足を緩和するように再配置を行うべき駐輪場を選定し、各駐輪場への訪問順序、および、回収・配置すべき台数を作業者に対して提示する再配置最適化システムの開発を行った（図1）。本稿では、ドコモ・バイクシェアにおける自転車の再配置作業最適化の取組みについて解説する。

2. ドコモ・バイクシェアのサービス設計と配置の偏り問題

ドコモ・バイクシェアが提供する各自転車駐輪場では、自転車配置用のラックが設置されているものの、ラック自体には貸出し・返却機能はなく、近辺の自転車位置情報を検出するためのビーコンが配備

されており、自転車とビーコンとの間で短距離の通信を行うことで駐輪場周辺の自転車の返却状態が把握できる。このようにビーコンによって、自転車の状況を検出できるため、自転車配置の最大数はラックの数に縛られない、このため、ラックの数を超えた台数の自転車配置を物理的に制限することはできないサービス設計となっている。この設計により、駐輪場のスペースを有効に活用し、多くの自転車を駐輪することが可能になる一方で、多量の自転車が返却される際には、自転車が駐輪スペースから溢れる場合もある。

そこで、ドコモ・バイクシェアでは、駐輪場における自転車の溢れ状況を評価するために、駐輪場ごと、時間帯ごとに異なるしきい値により自転車配置溢れの目安となる溢れ制約台数を運用上定めている。

また、駐輪場の自転車配置台数以上の需要が予測される場合、利用の機会損失が生じると考えられる。機会損失を評価するため、駐輪場ごとに自転車不足の目安となる不足制約台数を定める。多くの一般的な駐輪場においては、自転車が一台もない状態で自転車の貸出需要があることを機会損失と考え、不足

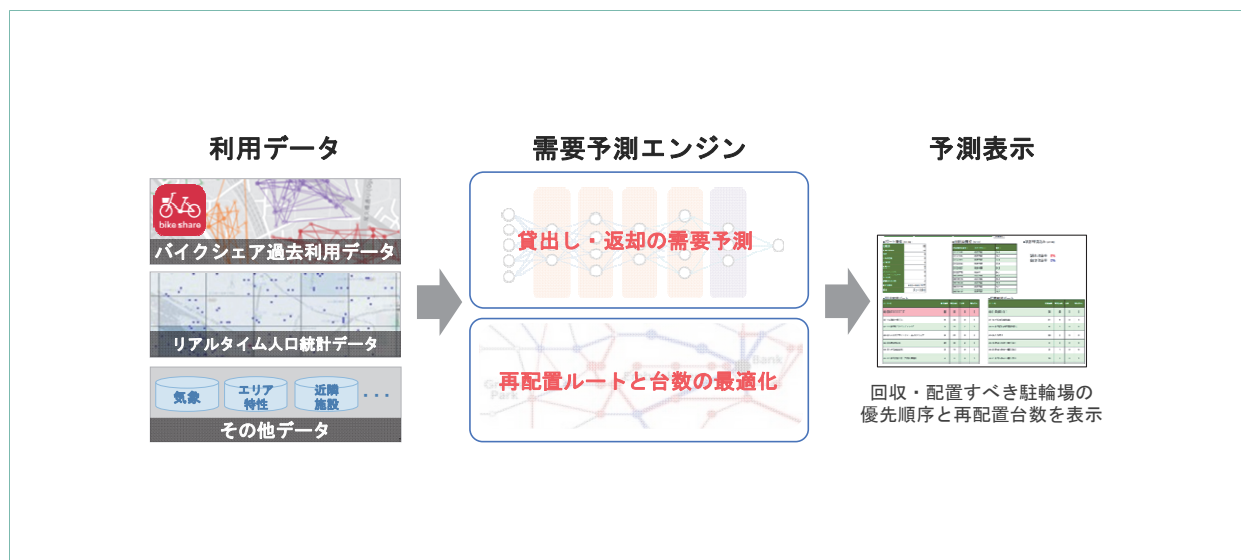


図1 再配置最適化システムの全体概要

制約台数を0に設定する。

ここで、自転車の配置台数が溢れ制約台数以下であり、かつ、不足制約台数以上であるとき、適正台数の自転車が配置されていると定義する。

これらの制約を超えて自転車の貸出し・返却が行われることで、駐輪場における自転車の配置台数が溢れや不足の状態となることがある。その模式図を図2に示す。

これまで、ドコモ・バイクシェアでは、自転車の再配置は過去の利用実績や天気予報の情報を考慮することにより、作業者自身が将来の需要を判断することで行われてきた。しかしながら、時々刻々と変化する自転車の需要に対して、人手による作業計画では必ずしも最適に再配置できない場合がある。

そこで需要予測に基づき再配置作業の効率化を行う再配置最適化システムの開発を行った。本システムの開発目標は、駐輪場ごとに将来の溢れや不足を予測し、各駐輪場で自転車台数の不均衡を平均化するように配置・回収するための手順を計画した上で、作業者に情報を伝え、それに基づいた再配置作業を行うことで駐輪場における自転車の極端な溢れや不足を緩和することである。

3. 再配置最適化システムの概要

3.1 需要予測機能

シェアサイクルの自転車貸出し・返却は、移動する人の人数、時間帯、曜日、天候、イベントの開催状況など、さまざまな要因に影響されて変化する。このように時々刻々と変化する需要を予測に反映するように、需要予測のモデル化を行った。需要予測モデルとしてはXGBoost (eXtreme Gradient Boosting)*1、および、時系列の深層学習手法*2を拡張したものを用いた [2]。

需要予測機能の概要を図3に示す。予測では24時間先の将来まで1時間ごとに、当該時刻から1時間経過するまでの間に発生する貸出しの回数、返却の回数をそれぞれ予測の目的変数とする。貸出し、返却ごとに24時間分、合計48モデルの作成を行い、各時間帯の貸出台数、返却台数を予測結果として算出する。各時刻の貸出台数と返却台数の差分を求めすることで、該当時刻における自転車配置台数の変化量を算出することが可能となる。自転車配置台数の変化量を用い、現在時刻の配置台数を初期値として累積和を求めることで、各時刻の配置台数の予測値を算出することが可能となる。

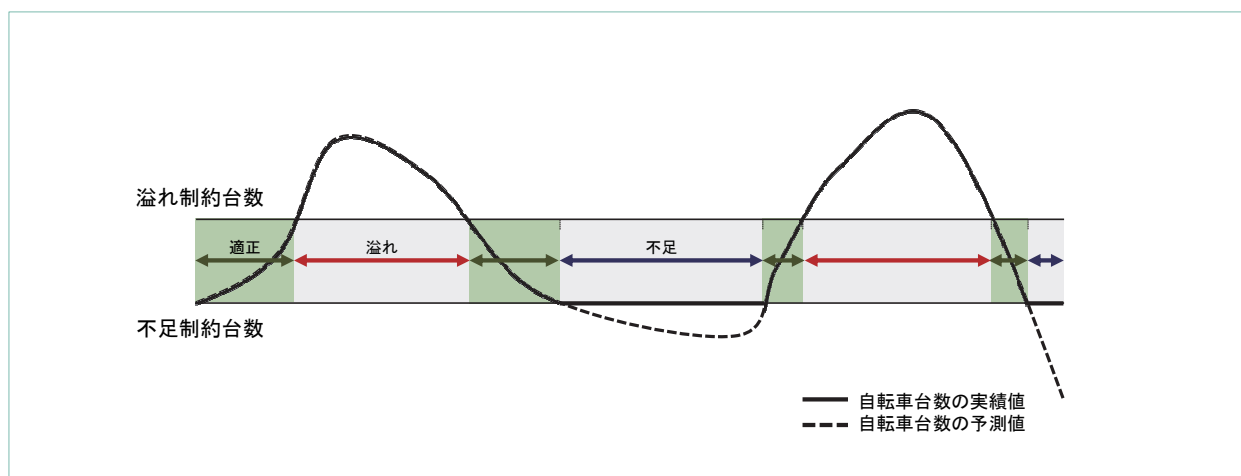


図2 駐輪場自転車の溢れと不足の模式図

*1 XGBoost：多数の異なる決定木による予測モデルから多数決を取ることで、高い精度での回帰予測を実現する機械学習手法。

*2 深層学習手法：再帰型のニューラルネットワークにより、時系列の変化を考慮した回帰予測を実現する機械学習手法。

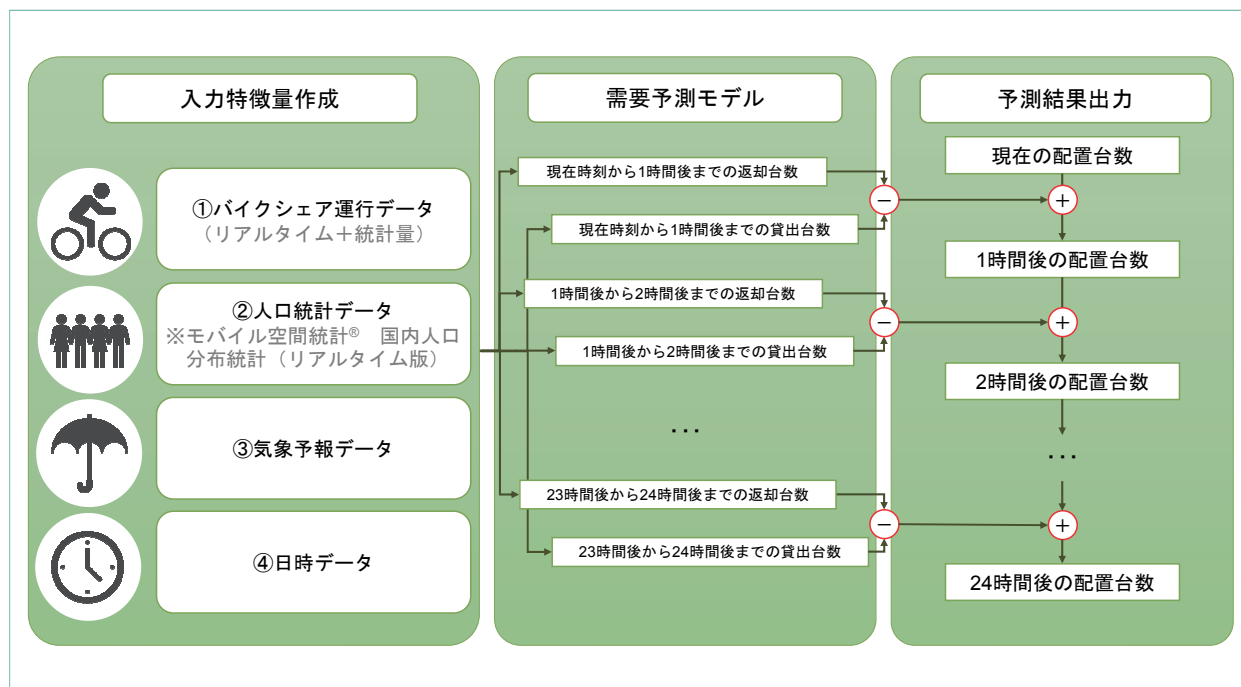


図3 需要予測機能の概要

学習時の入力特徴量では、①バイクシェア運行データ、②人口統計データ、③天気予報データ、④日時データを用いる。これらの特徴量をモデル学習に用いることで、人口、天候、バイクシェアの過去の利用実績と将来需要の変化についての相関関係が機械的に求められ、より高精度な将来需要の予測が実現されることが期待できる。

- ①バイクシェア運行データでは、各駐輪場における該当時刻までの自転車の貸出台数、返却台数、および、その変化量を用いる。また、過去の同曜日・同時間帯における貸出台数、返却台数の平均値、変化量の平均値も統計量として利用する。
- ②人口統計データでは、各駐輪場の周辺500mの人口および変化量を用いる。リアルタイムデータを用いることで、特に直近1～2時間の予測において人の移動の変化をとらえることが期待される。

③気象予報データでは、該当の予測対象時刻に対する雨量、風量、気温、湿度、気圧の最新の気象予報データを入力として用いる。

④日時データでは、予測対象時刻を表す日時（時間、年、月、日、曜日）に関するデータを入力として用いる。

3.2 再配置計画機能

図4に示す再配置計画機能について、詳細を以下に解説する。

(1) 予測結果に基づく溢れ・不足台数の推定

前述の需要予測機能により自転車配置台数の将来予測値が得られる。ここで求められた各時刻の配置台数は、配置台数の変化量の累積和であり、図2に示すように予測値は負の値を取ることもあり得る。各駐輪場における各時刻の自転車台数の予測値が、駐輪場ごとに決められた溢れ制約台数を上回るときに、上回った台数分の自転車配置台数が溢れると推



図4 再配置計画機能の概要

定され、逆に不足制約台数を下回るときに、下回った台数分の自転車台数が不足すると推定される。

(2) 評価値による作業レコメンド

これらの溢れ・不足分の自転車を回収・配置するための作業計画を立て、集配トラックを派遣する。この際、再配置では溢れた自転車を積み込み、自転車が不足する駐輪場で自転車を降ろすという一連の作業となることから回収と配置は一对であり、さらに、車両は再配置作業の過程で移動することから、回収においては車両の現在地から回収駐輪場までの距離を、配置においては回収駐輪場から配置駐輪場までの距離を計算する。ここで求められた距離を考慮して、駐輪場ごとに溢れの評価値、および、不足の評価値の算出を行う。溢れの評価値は、溢れの台数が多く距離が近いほど大きい値を取り、回収優先度が高く評価される。不足の評価値は、不足の台数が多く距離が近いほど大きい値を取り、配置優先度が高く評価される。ただし、各評価値は、再配置作

業による時間経過や車両の移動、および、自転車の需給の変動により時々刻々と変化する。したがって、作業終了時点で車両からの要求に基づいて、評価値を再算出することで、その時点で最も評価値が高い駐輪場を優先して作業順序を決定する。

(3) 評価値に基づく回収・配置台数の決定

評価値に基づいて選択された駐輪場の自転車台数が、回収作業では溢れ制約台数未満となる台数まで、配置作業では不足制約台数を超える台数まで、自転車の回収・配置を行うように作業台数を決定する。

また、回収・配置作業を行うことで車両に積載中の自転車の台数が変化する。このため、回収台数、配置台数は以下の値を上限として用いる。

回収台数 = \min (溢れ台数, 最大積載台数 - 現在の積載台数)

配置台数 = \min (不足台数, 現在の積載台数)

(4) 再配置計画の決定

駐輪場ごとに算出された評価値と回収・配置の要

求台数に基づいて、各時間帯における作業の優先度を決定する。回収と配置作業の評価値が最も高くなる駐輪場ペアを抽出し、当該の駐輪場間で、現在積載可能な最大台数の回収と配置の計画を行う。また、回収あるいは配置のどちらかのみ台数が少なく、回収台数と配置台数が異なる場合には、続けて2つの駐輪場の回収・配置を行うことで、回収作業と配置作業の台数の釣合いを保つこととする。複数台のトラックが再配置を行う場合は、同じ時間帯に同じ駐輪場が再配置対象として選択される可能性があるが、一方のトラックが作業を行っている場合は別の駐輪場ペアが選択されるように複数車両間での再配置計画がなされる。

4. 実証実験

これまで解説した需要予測、再配置計画のシステムについて有効性を確認する実証実験を行った。実証実験では、タブレット型端末を用いたユーザインタフェースを通じて、各時刻において、ある駐輪場から別の駐輪場に向けて、何台の自転車を回収・配置するかを指示するWebアプリケーションを作成し、作業実施者による利用を促した。実証実験の対象エリアとしては、東京地区から江東区、港区、中央区、新宿区、品川区を選定した。各エリアにおける実証実験期間は表1のとおりである。また、実証実験では30台まで積載可能なトラックを集配車両として利用した。東京全域での再配置は複雑となるため、実証実験ではエリアごとに異なる台数の担当トラックを決め、対応するエリアの中で再配置計画を行った。エリアごとの台数は表2のとおりである。学習データとして、バイクシェアの運行データ、モバイル空間統計^{※3} 国内人口分布統計（リアルタイム版）^{※3}、気象業務センターのメソ数値予報モデルGPV（MSM）^{※4}のデータを用いた。学習期間は2017/10～2019/3とした。各データの詳細は表3の

表1 エリアごとのトライアル期間

エリア	期 間
江東区、港区	2019/11/1～15
中央区、新宿区、品川区	2019/11/1～20 2019/12/3～6

表2 エリアごとのトラック台数

エリア	トラック台数
江東区	3
港 区	2
中央区	1
新宿区	1
品川区	1

とおりである。

本システムによる再配置について、トライアル前の期間とトライアル後の期間の不足台数、溢れ台数の評価値を比較した結果を図5に示す。トライアル前においては、作業実施者の判断で再配置を実施している。トライアル後の期間では、本システムからの指示に基づいて再配置を行った。本システムを適用することで、東京5エリアのすべてにおいて不足、溢れともに改善することが確認できた。また、エリアによって不足や溢れの改善割合が異なる結果が見られた。

新宿区での溢れ台数改善の効果は、0.4%とわずかである。集配トラックによる作業は、一度の再配置でより多くの自転車を移動する場合に効率的であることが多い。新宿区には、自転車を数台のみ配置している小型の駐輪場が数多く存在しており、溢れを改善するためには多くの駐輪場を周回するように再配置を実施する必要がある。このため、集配トラックによる再配置では本システムによる効率化の効果が小さくなったと考えられる。

一方、他のエリアにおいては、自転車が多くの配置

※3 モバイル空間統計[®] 国内人口分布統計（リアルタイム版）：モバイルデータを用いた統計分析により、500mごと10分ごとに1時間～30分前までの日本全国の人口を算出したデータ。モバイル空間統計は株式会社NTTドコモの登録商標。

※4 メソ数値予報モデルGPV（MSM）：気象庁が導入している3時間ごとに1回、39時間先までを予測する気象予報モデル。

表3 入力特徴量の詳細

データ名称	詳 細
バイクシェア運行データ	約5,900台
	駐輪場：約580カ所
	約730万回の自転車利用
	各数値は2019年3月時点の東京全エリアの延べ数
人口統計データ ※モバイル空間統計 国内人口分布統計 (リアルタイム版)	携帯電話 約7845万台（本台数より法人名義やMVNOを除く）
	2019年3月時点の日本全国の延べ台数、メッシュ状に集計した統計値を利用
	500mメッシュ、10分に一回
気象予報データ ※メソ数値予報モデルGPV（MSM）	雨量、気温、湿度、風量、風向、気圧、雲量
	3時間に1回、39時間先までを予報
	1,000mメッシュ

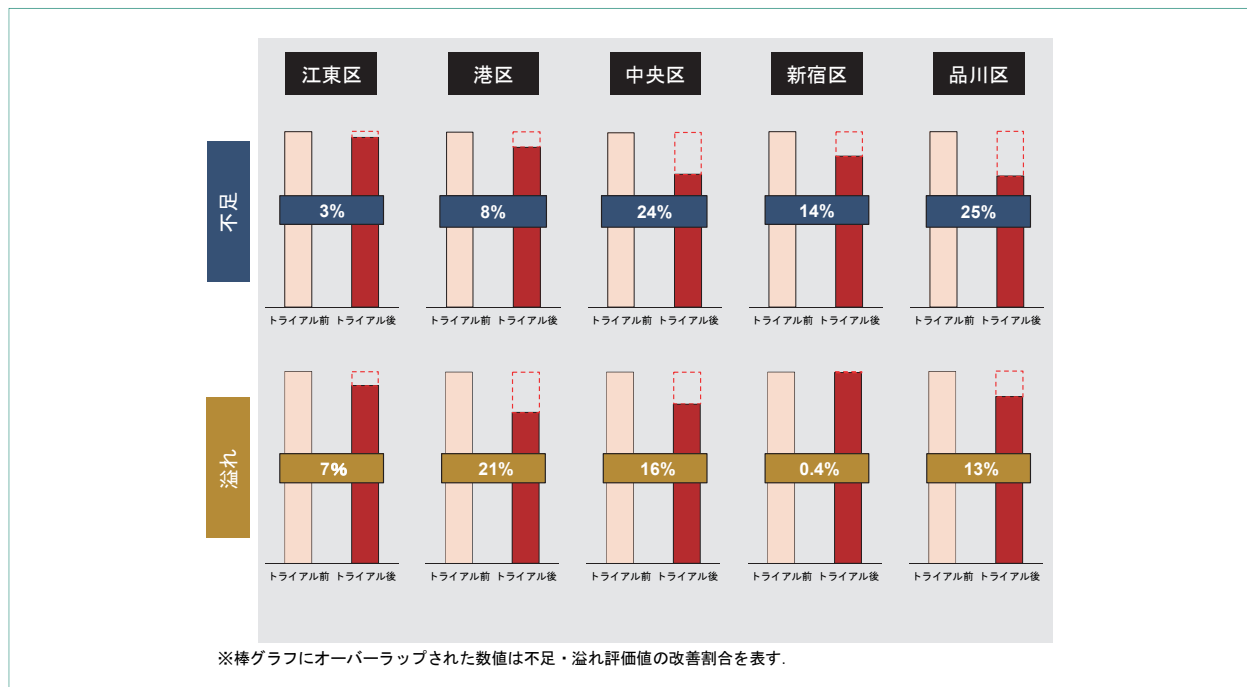


図5 トライアル前後の自転車の不足・溢れの改善量の比較結果

されている大型の駐輪場が存在しており、集配トラックの性質を活かした再配置ができたため、溢れ・不足が改善されたと考える。

次に、イベント時の予測精度に関する実験について解説する。シェアサイクルでは、通勤など乗車される曜日や時間帯が周期的である利用が多く割合

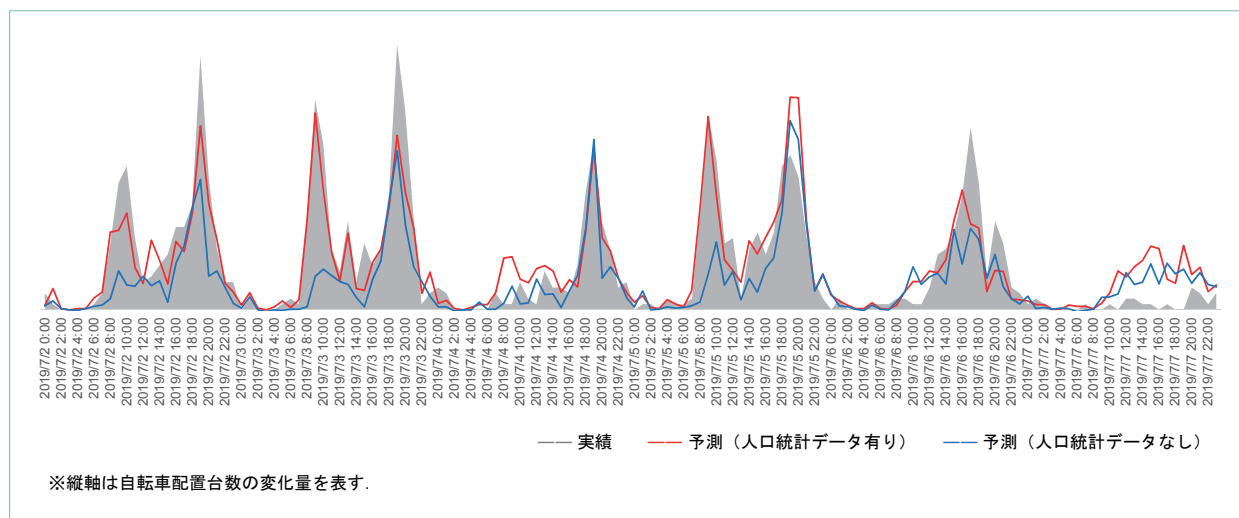


図6 予測が改善された駐輪場の例 (2019/7/2～7/7)

を占めている。このような需要については、バイクシェア運行データを統計的に分析することで、十分な予測精度を得ることが可能である。一方、大規模イベントによる特殊な需要が生じている場合、バイクシェア利用の周期性の分析だけでは説明ができず予測を行うことが難しい。このため、本システムでは人口統計データを入力に加えることで、定常時とは異なる周辺人口の変化を取得しイベント時の利用需要の変化を予測する。あるイベント会場周辺の駐輪場における自転車変化量の予測結果を図6に示す。このように、一部の駐輪場においては、需要のピーク時刻に関する予測について、人口統計データを用いることで精度が向上することが確認された。これは、イベント会場など人の移動量や移動時刻が日によって変化しやすい場所で、リアルタイムの人口統計データが周辺人口の増減に伴う需要の変化を説明する役割を果たし、予測精度の向上に寄与したと考えられる。

5. あとがき

本稿ではドコモ・バイクシェアにおける作業改善

のための再配置最適化の取組みについて解説を行った。需要予測機能と再配置計画機能を組み合わせることによって、将来の需要と供給の偏りを予測し、状況に合わせた再配置を提案するシステムを開発した。本システムを用いた再配置を実施することで、東京5エリアについて、溢れ・不足状態となる駐輪場が減少し、再配置効率の改善が確認された。また、人口統計データを用いることで、イベント会場など過去の利用傾向だけでは予測が難しい場所において、需要の変動をとらえ、予測精度を向上できることが確認された。今後は再配置最適化システムの全国での活用を検討し、また、本システムの開発によって得られたノウハウを活用することで、別の交通手段についても最適化の実施などを検討したい。

文 献

- [1] ドコモ・バイクシェアサービス。
<https://docomo-cycle.jp/>
- [2] T. Mimura, S. Ishiguro, S. Kawasaki and Y. Fukazawa :
“Bike-share demand prediction using attention based sequence to sequence and conditional variational autoencoder” In Proc. of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Prediction of Human Mobility, pp.41-44, Nov.2019.

Technology Reports (特集)

メンタルヘルスケア

ストレス

注意機能

サービス向上・社会課題解決に貢献するAI

スマートフォンログを用いた ストレス・注意機能推定技術の開発

クロステック開発部

やまもと なおき はまたに たかし
山本 直樹 濱谷 尚志おちあい けいいち
落合 桂一

サービスイノベーション部

たなか しげき ふかざわ ゆうすけ
田中 茂樹 深澤 佑介†

精神疾患の患者数は世界的に増加傾向にあり、メンタルヘルスの不調を未然に防ぐことが社会的な課題となっているが、精神的な健康状態を正確に把握することは困難である。そこでドコモは、スマートフォンから取得されるセンサログや位置情報、端末操作ログを基に、ユーザに過度な負担を与えることなく日々のストレス・注意機能（集中心）の2指標を推定する技術を開発した。本技術により、精神的な健康状態を可視化することが可能となり、ストレス状態への気づきを促すことでセルフケアをサポートすることが可能となった。

1. まえがき

精神疾患の患者数は年々増加傾向にあり、メンタルヘルスケアに対する社会的関心が高まっている。WHO（World Health Organization）の発表によると、世界中で3億人以上の人がうつ病を患っており、自殺者の90%以上が精神疾患に起因すると報告されている [1]。精神疾患を発症する一因として過度なストレスが知られており、精神的に良好な健康状態を保つためには自身が受けているストレスを自覚し、

予防に努めることが重要であるが、自身のストレス状態を正確に把握することは非常に困難である。

このような背景から、スマートフォンやウェアラブル端末から取得されるログを基に、ユーザの精神的な健康状態を推定する取組みが多数報告されている [2]。スマートフォンは個人個人が所持しており、かつ常時身につけ持ち運び、利用するものであることから、スマートフォンログにはユーザの日々の活動状況が反映されている。ユーザの活動状況と精神的な健康状態は互いに影響を及ぼし合うものである

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

† 現在、総務部

と想定すると、スマートフォンのログにはユーザの精神的な健康状態が反映されていると考えられる。ユーザに特殊な操作を求めることなく、日常的なスマートフォンの利用ログを収集するため、ユーザに対して負担を与える可能性は極めて小さい。また、スマートフォンのログは常時収集されていることから、連続的な精神的健康状態の評価が可能である。

ストレスはメンタルヘルス不調のリスクの一要因として考えられているが、適度なストレスは心を引き締め、仕事や勉強の能率を上げる効果があることが知られている [3]。一方でストレスが高く、かつ仕事や勉強の能率が低下している状態は、ユーザの精神的な健康状態が悪化していることを意味している。したがって、高ストレス状態であってもユーザに対してポジティブに作用する場面とネガティブに作用する場面が存在しており、高ストレス状態の良し悪しを切り分けて解釈することが必要である。

そこで本研究では、スマートフォンのログを基に日々のストレスの度合いの推定に加え、知的活動能力を示す注意機能（判断のスピードと判断の正確さ）を推定することで、人にかかるストレスが適切なものなのか否かを注意機能（集中力）の観点から読み解くことを目指している。

本稿では、提案手法の詳細と提案手法を用いた検証実験の結果について解説する。

2. 提案モデル

提案モデルの概要を図1に示す。本提案手法ではスマートフォンのログを説明変数、心拍データに基づくストレス指標と注意機能計測課題（Go/NoGo課題）に基づく注意機能スコアをそれぞれ目的変数とする推定モデルを構築する。ストレス指標と注意機能スコアは推定モデルを構築する時のみ利用し、

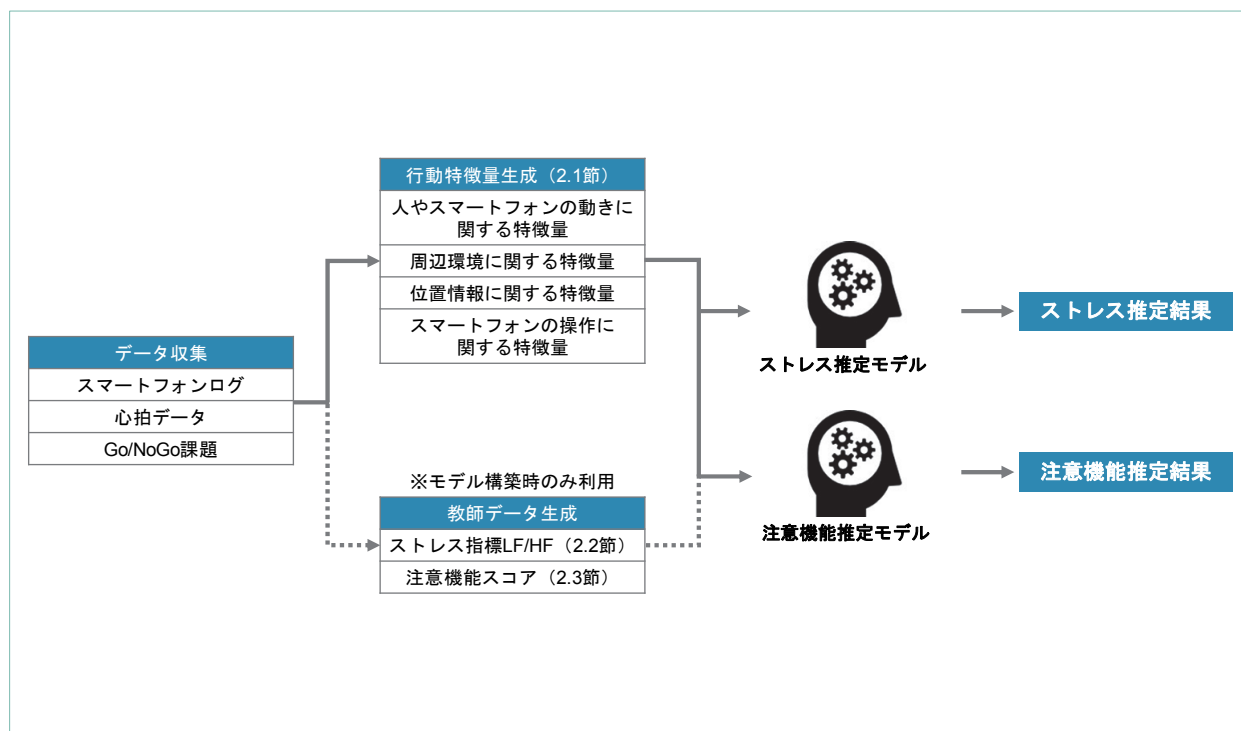


図1 ストレス・注意機能推定モデル

モデル構築後はスマートフォンログを収集するだけでストレス・注意機能状態の推定が可能である。

本研究ではドコモのR&D部門に勤務する有志社員を対象としてデータセットの収集試験を実施した。データ収集には男性34名と女性5名から構成される、20代から50代までの社員39人が参加した。試験実施期間は2017年11月から2018年1月までの3カ月間であり、試験参加者にこの間で最大42日間の協力を依頼した。

本試験は、東京大学大学院医学系研究科・医学部倫理委員会の承認のもと実施した（承認番号2017-001）。

2.1 行動特徴量

本研究で収集したスマートフォンのログと、生成した行動特徴量を表1に示す。データ収集試験によって、合計1,349日分のスマートフォンログを獲得した。

行動特徴量は、以下4つの観点で生成した。

①人やスマートフォンの動きに関する特徴量

ユーザの精神状態が行動に反映されると想定した。例えば、ストレスを感じている場合にはスマートフォンの扱い方が粗雑になると考えられる。

②周辺環境に関する特徴量

周辺の環境変化がユーザの精神状態や行動に影響を与えると想定した。例えば、急激な気圧の変化に対してストレスを感じる可能性がある。

③位置情報に関する特徴量

ユーザの精神状態が移動方法や訪問場所に影響を与えると想定した。また、訪問場所がユーザの精神状態に影響を与えると想定した。例えば、1日の移動距離や訪問施設数が通常よりも多い場合にストレスを感じている可能性がある。

④スマートフォンの操作に関する特徴量

ユーザの精神状態によりスマートフォンの使い方や目的が変化すると想定した。例えば、ユーザが対人関係にストレスを感じている場合には、コミュニケーションアプリの利用回数

表1 ストレス・注意機能推定モデルの行動特徴量

スマートフォンログ	生成した特徴量（一部抜粋）
3軸方向加速度 角速度	平均、分散、最大値、最小値、最大最小差、ベクトルの大きさ、各軸の相関係数
照 度 気 圧 バッテリー残量	平均、分散、最大値、最小値、最大最小差
GPS	緯度・経度・高度の最大値・最小値・最大最小差、自宅からの移動距離、滞在点数
イヤホン接続 充電器の装着	接続回数、接続されていた割合〔／日〕
画面のOn/Off	On/Off回数、On時間の平均・分散・最大値・最小値
アプリ利用履歴	カテゴリごと（ゲーム、コミュニケーションツールなど）の起動時間・起動回数
Activity Recognition API	各状態（vehicle, bicycle, on foot, running, walking, still, tilting, unknown, ride, move）の割合
ストレージ使用量	残容量の値
カレンダー	各曜日、平日かどうか

減少する可能性がある。

これらの特徴量を基に、日々のユーザのストレスおよび注意機能を推定した。

2.2 ストレス指標

本研究では、胸部心電計を用いて639日分の心電波形のデータセットを収集し、低周波成分（LF：Low Frequency）と高周波成分（HF：High Frequency）^{*1}の比率を基にした生理指標LF/HF [4]をストレス指標として採用した。LF、HFはそれぞれ交感神経と副交感神経の活性度を表しており、ストレスを感じているときほどLF/HFは高い値を取ることが知られている。

本研究では、ある日のストレスが基準値に対して高いか低いかを2値で推定する。

まず、各日に対してLF/HFの代表値を算出した後に、ユーザごとにそれらの全日分の平均値を基準値として算出した。次に、各日のLF/HFの代表値が基準値以上の場合を高ストレス日、基準値未満の場合を低ストレス日と設定し、日ごとにストレス状態のラベル付けを行った。

2.3 注意機能指標

ユーザの注意機能を計測する手法として、Go/NoGo課題を用いた [5]。Android端末上に実装したGo/NoGo課題アプリケーションを図2に示す。

本課題では、スマートフォン画面上に一定時間ごとにアルファベット1文字が表示され、ユーザは特定の文字が表示された場合にのみ素早く画面をタップ（Go反応）し、その他の文字が表示された場合には画面をタップしない（NoGo反応）ことが求め

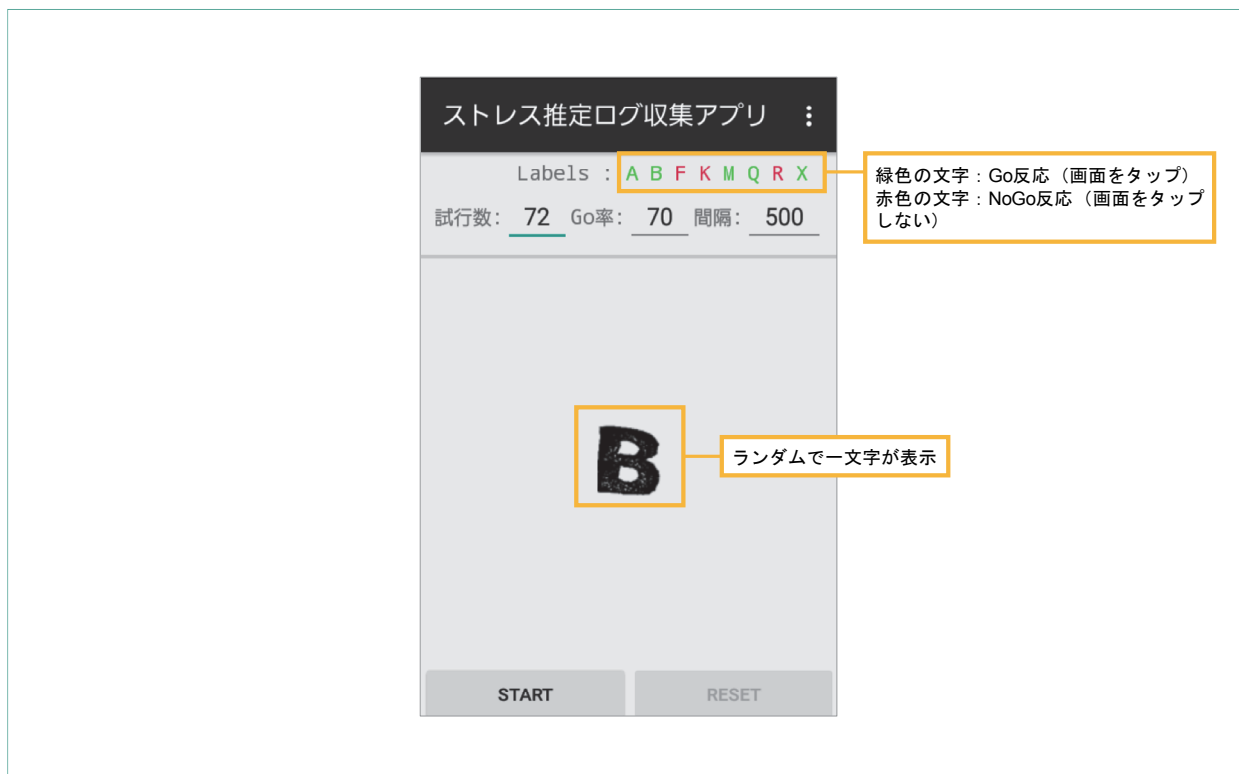


図2 Go/NoGo課題アプリケーション

^{*1} 低周波成分（LF）と高周波成分（HF）：心拍は常に一定の間隔で鼓動を打つのではなく、周期的にゆらいでいることが知られている。このゆらぎに含まれる2つの主要な成分を表す。

られる。表示されるアルファベットは、あらかじめ定められた8種類からランダムで1文字が選択され、約1分間で計72回文字が表示される。そのうち正しく反応できたGo反応、およびNoGo反応の数の合計を72で割った値を本課題における注意機能のスコアとする。

本課題を1日3回実施し、そのスコアの平均値を日の代表値とした。データ収集試験によって、779日分の注意機能計測結果のデータセットを獲得した。ストレスと同様に、ユーザごとに注意機能スコアの平均値を基準値として算出し、各日の注意機能の代表値が基準値以上の日を高注意機能、基準値未満の場合を低注意機能と設定し、日ごとに注意機能状態のラベルづけを行った。

2.4 性能評価

1,349日分のスマートフォンログ、639日分の心電波形データセット、779日分の注意機能計測結果データセットを基に、ストレス推定モデルと注意機能推定モデルにおける推定精度の評価を実施した。ここで、これら3種類のデータ数が一致しないのは、胸部心電計の着用およびGo/NoGo課題アプリケーションの実施は、試験参加者の日常生活に影響がない範囲で任意に実施してもらったためである。スマートフォンログ、心電波形データセット、注意機能計測結果データセットの3種類すべてが存在する日を分析対象日とし、合計554日分のデータを用いて性能評価を実施した。

前述の行動特徴量を説明変数、ストレスおよび注意機能状態のラベルを目的変数とした機械学習アルゴリズムにより、ストレスと注意機能を推定するモ

デルを構築した。

推定精度の評価では、1ユーザをモデル評価対象のユーザと定め、その他ユーザのデータセットを基にモデルを構築することで、未知のユーザに対するモデルの性能を評価する。評価対象ユーザの推定結果と、そのユーザの心電由来のストレス指標およびGo/NoGo課題を比較することで推定結果の正しさを評価する。各ユーザに対してそれぞれが未知のユーザであると想定した評価を行い、全ユーザの評価結果を合わせて最終的な評価結果とする。推定精度の評価指標は正確度（Accuracy）^{*2}、感度（Sensitivity）^{*3}、特異度（Specificity）^{*4}の3指標を採用した。

推定精度を表2に示す。提案手法ではストレス、注意機能いずれの正確度においても0.700以上の精度を達成した。ただしストレス、注意機能いずれにおいても特異度に対して感度が低い結果となっており、高ストレス状態、高注意機能状態を精度良く推定できるよう技術的な改善の余地がある。

3. 社外検証試験

3.1 検証用アプリケーションの開発

ストレス推定モデルおよび注意機能推定モデルを搭載した検証用アプリケーションを開発した。アプリケーションの推定結果提示画面を図3に示す。本アプリケーションは、常時スマートフォンログを収集し、内部ストレージへログを蓄積する。蓄積されたログは1日1回サーバへ送信され、サーバ上でストレスおよび注意機能を推定する。推定された結果はスマートフォンへ送信され、アプリケーション上でユーザに提示される。

表2 ストレス・注意機能の推定精度

	正確度	感 度	特異度
ストレス	0.711	0.608	0.773
注意機能	0.791	0.750	0.818

^{*2} 正確度（Accuracy）：本稿では、全サンプルに対して高ストレス（注意機能）、低ストレス（注意機能）を正しく分類した割合を表す。

^{*3} 感度（Sensitivity）：本稿では、高ストレス（注意機能）と推定されるべきものを、正しく高ストレス（注意機能）と正しく分類した割合を表す。

^{*4} 特異度（Specificity）：本稿では、低ストレス（注意機能）と推定されるべきものを、正しく低ストレス（注意機能）と正しく分類した割合を表す。

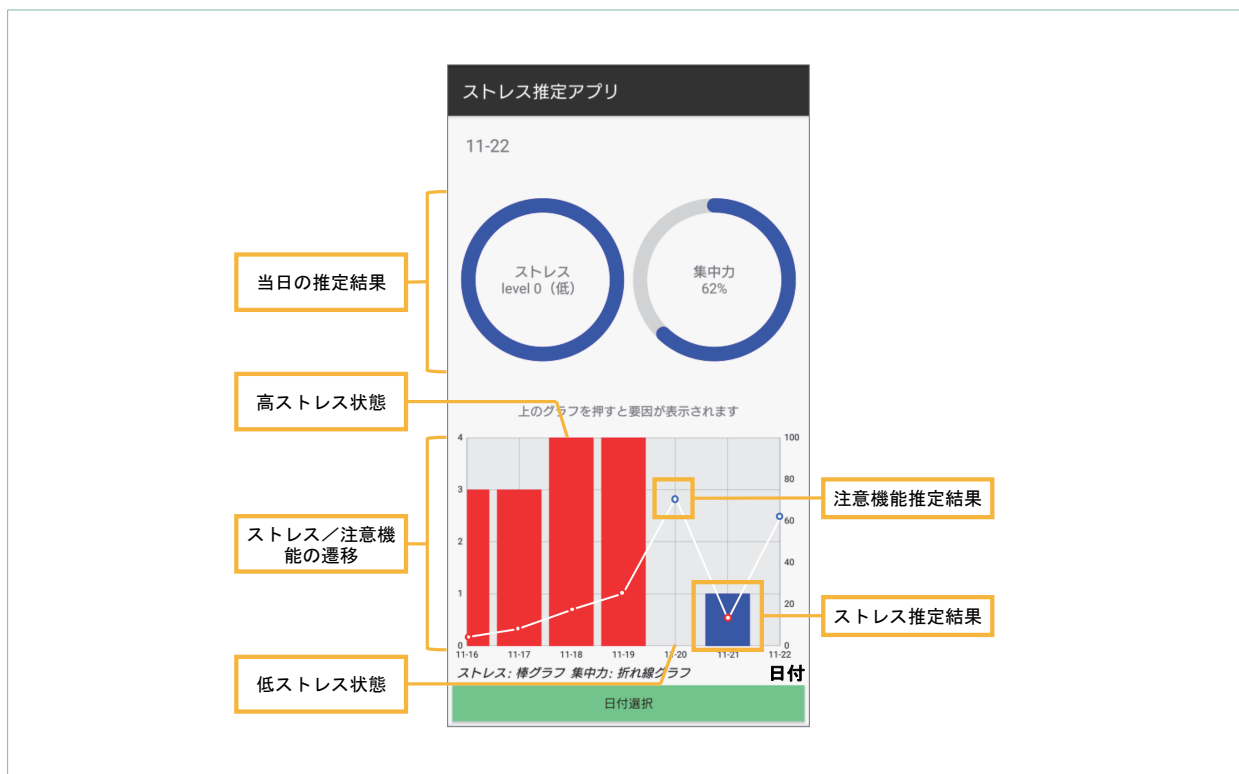


図3 ストレス・注意機能推定アプリケーション

3.2 省内リビングラボにおける実証実験

(1) 省内リビングラボ^{*5}概要

2019年12月から2020年3月にわたりドコモは、経済産業省主催の省内リビングラボ（令和元年度中小企業実態調査事業（リビングラボにおける革新的な社会課題解決サービスの創出にかかわる調査）、以下、リビングラボ）に参加した。リビングラボではストレスと睡眠に因果関係がある、という経済産業省の仮定に基づき、経済産業省に勤務する職員（健康成人）を対象として、睡眠の質を改善するプログラム（介入策）を実施し、ストレス改善効果を検証した。介入策は株式会社こどもみらい（以下、こどもみらい）が担い、リビングラボ期間中に対面やオンラインでの睡眠改善指導を実施した。また、リビングラボ開始時および終了時に参加者に対してアンケートを用いてストレス状態の計測を実施した。

ドコモは、介入策の効果を測定する機器として前述の検証用アプリケーションを提供した。リビングラボ参加者26名が所持する端末に対して検証用アプリケーションをインストールし、そのうち14名は介入策に従い睡眠改善プログラムを実施してもらい、残り12名は従来どおり日常生活を送った。リビングラボの期間中、本アプリケーションを用いて日ごとのストレス状態と注意機能状態を推定した。

(2) 検証結果

ストレス推定結果に対して、以下の2つの観点から評価を実施した。

① 介入策の効果検証

介入群と非介入群のストレス状態を比較し、ストレス状態に改善が見られるか確認した。

② ストレス推定結果の妥当性

リビングラボ開始時および終了時のアンケー

^{*5} リビングラボ：社会課題を解決するために、利用者と提供者が一体となって実環境での実験と評価を繰返し実施し、得られた知見を基にサービスや商品を生み出す取り組みである。

ト結果とストレス推定結果の一致度合いを確認し、推定モデルの実利用の可能性を検証した。

①に関して、介入策の実施によってストレス状態が改善したと仮定し、以下に示す分析を実施した。なお、期間 i と期間 ii はそれぞれ介入策実施前と介入策実施後の期間を示す。

(A)介入群（期間 i）と非介入群（期間 i）におけるストレス状態の比較

(B)介入群（期間 ii）と非介入群（期間 ii）におけるストレス状態の比較

このとき、(A)において有意差がなく、かつ(B)において有意差が確認できるときに、仮定が成立する可能性がある。検定手法にはMann-WhitneyのU検定^{*6}

を用い、有意水準を0.05と設定した。

分析結果を図4に示す。図中の「*」は、有意水準を満たすことを表す。(A)において、ストレスおよび注意機能推定結果には2群間に有意差を確認できなかった。一方で、(B)においてストレスおよび注意機能推定結果には2群間に有意差が確認されたことから、介入策がストレス状態の改善に寄与した可能性があることが確認できる。また、介入群では“低ストレス、かつ低注意機能状態”が増加していることを確認しており、睡眠の質改善を目的とした介入策により“リラックス状態”が増加していると解釈することができる。

②に関して、アンケートより介入群においてストレス反応、主観的睡眠の質、仕事の結果に関する3項目の改善が確認された。この結果より、ストレス

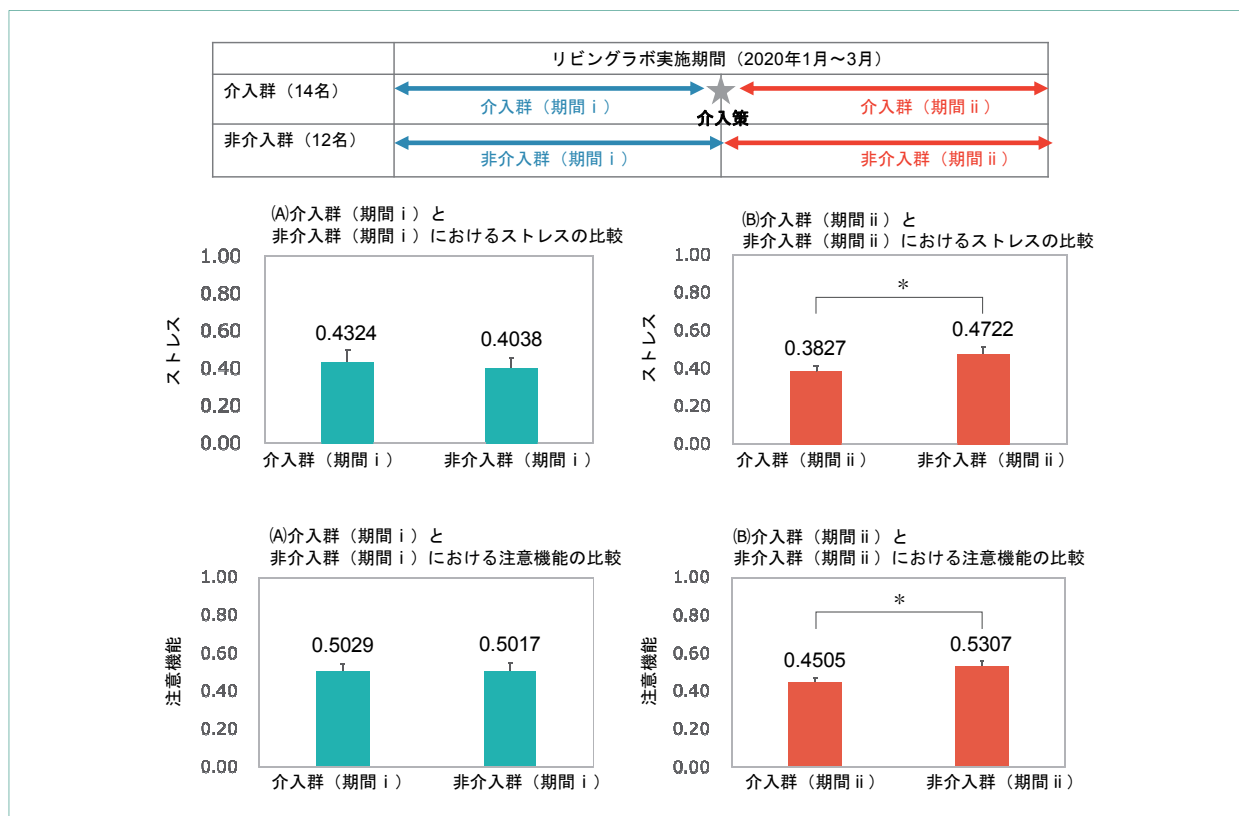


図4 介入策によるストレス・注意機能の変化

*6 Mann-WhitneyのU検定：ノンパラメトリックな検定手法であり、2つのデータ群において、統計的に「意味がある（有意）差」があるかどうかを検討するための手法である。

推定モデルの推定値が妥当であったと解釈することができる。また、前述のようにストレス・注意機能推定結果よりリラックス状態の増加を確認しており、また、アンケートにより仕事の結果に関する改善が確認できていることから、介入策によって“適度なストレスを感じながら、高い作業効率を維持できている状態”と“リラックス状態”のメリハリが生まれたと解釈することができる。

4. あとがき

本稿では、メンタルヘルスケアに対する関心の高まりに対して、スマートフォンから収集されたログを基にユーザの日々の精神的な健康状態を推定するモデルを提案し、そのモデルを用いた検証実験結果について解説した。ドコモは、本研究成果のさらなる検証により提案技術の高度化に注力し、お客様のメンタルヘルスケアのサポートを実現すべく実用化に向けて取組みを加速していく。そして、将来的には心身のヘルスケアを総合的にサポートし、お客様の健康寿命^{*7}の延伸に貢献することを目指す。

文 献

- [1] World Health Organization : “Preventing suicide : a global imperative,” 2017.
http://www.who.int/mental_health/suicide-prevention/world-report-2014/en/
- [2] Y. Fukazawa, N. Yamamoto, T. Hamatani, K. Ochiai, A. Uchiyama and K. Ohta : “Smartphone-based Mental State Estimation : A Survey from a Machine Learning Perspective,” Journal of Information Processing, Vol.28, pp.16-30, 2020.
- [3] C. Sandi : “Stress and cognition,” Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science, Vol.4, No.3, pp.245-261, 2013.
- [4] M. Vollmer : “A robust, simple and reliable measure of heart rate variability using relative RR intervals,” 2015 Computing in Cardiology Conference (CinC), IEEE, pp.609-612, 2015.
- [5] S. Hirose, J. Chikazoe, T. Watanabe, K. Jimura, A. Kunitatsu, O. Abe, K. Ohtomo, Y. Miyashita and S. Konishi : “Efficiency of go/no-go task performance implemented in the left hemisphere,” Journal of Neuroscience, Vol.32, No.26, pp.9059-9065, 2012.

^{*7} 健康寿命：心身に健康上の問題がなく、日常生活を過ごすことができる期間を指す。

マルチデバイスでの共通のAR/MR体験を提供可能なAR/MRクラウド技術

移動機開発部 はやし 林 こうき 宏樹 ごとう 後藤 おさむ 修
きむら 木村 しんじ 真治 やまもと 山本 たいし 泰士

5G時代の新たなサービスとして期待されているものの1つに「AR/MRクラウド」がある。本稿では、複数のデバイス間で共通のAR/MR体験を提供可能である「AR/MRクラウド」を実現するために必要な大きな3つの機能である、自己位置認識機能、空間構造生成／管理機能、コンテンツ空間管理機能についての、ドコモのR&Dでの取組みを解説する。

1. まえがき

ドコモでは、現実空間のヒト・モノ・コトの情報をデータ化し、集まったデータにAI技術を活用することで未来を予測して、現実空間のサービスや生活の価値を向上し最適化することを目的とした、「サイバー・フィジカル融合^{*1}」の実現に向けて取組みを進めている。「サイバー・フィジカル融合」とは、さまざまなセンサを介して現実空間のヒト・モノ・コトの情報を取得し、第5世代移動通信システム（5G）などの通信を用いてクラウド上にあるデジタル空間に情報を集約し、デジタルツイン^{*2}を構築する世界のことである。このような「サイバー・フィジカル融合」の世界をよりリアルな体験として

提供し、かつ5G時代の新たなサービスとして期待されているものがXR^{*3}技術である。XRとは、VR（Virtual Reality）^{*4}、AR（Augmented Reality）^{*5}、MR（Mixed Reality）^{*6}といった仮想空間と現実空間との融合で新たな体験を提供する技術の総称である。XR技術により、グラス型のAR/MRデバイス、VRゴーグルなどのヘッドマウントディスプレイ（HMD：Head Mounted Display）や、スマートフォンなどを用いて、デジタルツインの世界を覗き込むという新しい体験が可能となる。中でも、さまざまなセンサ情報を集約することによりデジタルツインとして作成したサイバー空間を、現実空間に重畳して複数デバイス間でインタラクティブかつ共通のAR/MR体験が可能となる「AR/MRクラウド技

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

^{*1} サイバー・フィジカル融合：現実空間（フィジカル空間）の情報をさまざまなセンサなどから収集し、仮想空間（サイバー空間）と結びつけることで、より良い高度な社会を実現するためのサービスやシステムのこと。

術」は、近年大きな注目を集めている。

AR/MRクラウドとは、現実空間にAR/MRコンテンツを重畳し、複数デバイス間で共通のAR/MRコンテンツをインタラクティブに共有可能にする技術基盤のことを指す。AR/MRクラウド技術により実現できるサービスとしては、

- ・現実空間の建物に仮想的にペンキを塗り合うような、没入感の高いインタラクティブなゲーム
- ・実際の家具などを買う前に、家具を仮想的に現実の部屋に描画し、フィット感を確認した上で購入できるeコマース
- ・街中を歩いていると、ユーザの趣味嗜好やTPOに合った広告やクーポンなどが店頭やビルの壁面などに表示される広告サービス
- ・ビルの壁面にそれぞれのユーザが好きなコメントを書き合うような掲示板サービス

など、さまざまなものが考えられる。

2020年1月に東京ビッグサイト青海展示棟にて開催した「DOCOMO Open House 2020 ―ようこそ、

5Gリアルワールドへ。そしてその先へ。―」では、ドコモR&Dで開発したAR/MRクラウド技術を用いて、AR/MRクラウドの世界観が体験できるデモの展示を行った（図1）[1]。街中を模した展示ブース内に、Magic Leap 1^{*7}、Mirage Solo（ビデオパススルー型VRゴーグル^{*8}）、iPadの3種類のデバイスで、共通のAR/MRコンテンツを共有することが可能となるデモンストレーションである。来場者からは、Magic Leap 1を体験したいとの要望が多く、最先端の空間コンピューティング^{*9}デバイスで体験するAR/MRクラウドの世界観に、感嘆の声が多く聞かれた。

本稿では、ドコモR&Dで開発している「AR/MRクラウド」の世界を実現するために必要な技術について解説し、今後の展望について紹介する。

2. AR/MRクラウドを実現するために必要な機能群

AR/MRクラウドを実現するための機能群を図2



図1 DOCOMO Open House 2020での展示

^{*2} デジタルツイン：現実空間のありとあらゆるものの位置や形状、各種センサ情報などをデジタルの仮想空間にリアルタイムに再現したもの。

^{*3} XR：VR、AR、MRといった仮想空間と現実空間との融合で新たな体験を提供する技術の総称。

^{*4} VR：仮想現実。ヘッドマウントディスプレイなどを使って、

現実空間と切り離された仮想空間に没入する技術。

^{*5} AR：拡張現実。グラス型の端末などを使って、現実空間にデジタル技術を用いて情報を付加する技術。

^{*6} MR：複合現実。グラス型の端末などを使って、現実空間と仮想空間をより密接に融合させ、バーチャルな世界をよりリアルに感じることができる技術。

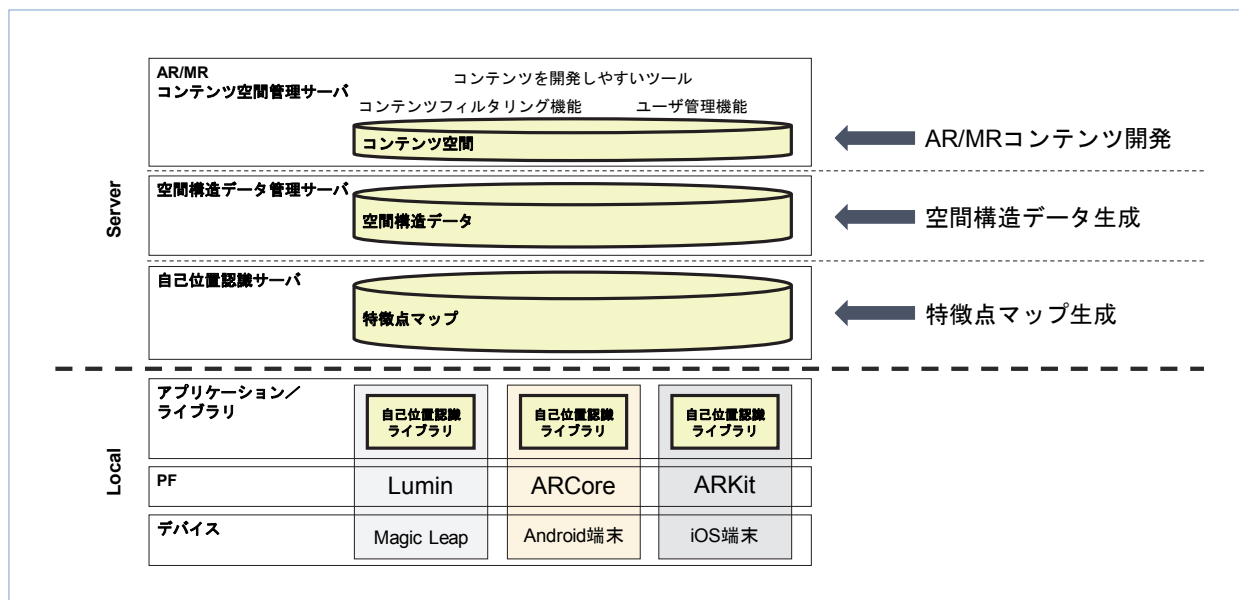


図2 ARクラウド実現に必要な機能群

に示す。本機能群は、自己位置認識機能、空間構造生成／管理機能、コンテンツ空間管理機能の大きく3つからなる。これら3つの機能について解説する。

2.1 自己位置認識機能

自己位置認識とは、各AR/MRデバイスの現実空間内での正確な位置と方位を認識する技術である。これらを認識することで、あたかも現実空間にフィットしているかのようなAR/MRコンテンツを重畳することが可能となり、また各デバイスの位置を共有することで、インタラクティブなAR/MR体験を提供することが可能となる。

既存技術で利用可能なものとしてGPSがあるが、GPSでは、特に屋内環境での位置認識誤差が大きく、周囲に遮蔽物がなく上空が開けた環境でも、数m程度の誤差がある。そのため、現実空間に正確にAR/MRコンテンツを重畳するAR/MR体験を提供するには、位置認識精度が不足している。また、ARマーカー^{*10}を用いて、現実空間の絶対座標を認識する方法もあるが、自己位置認識を行うために、

ARマーカーを配置する必要があるという課題がある。

そこでドコモは、カメラ画像から得られた、画像の特徴点を用いた特徴点ベースでの位置合わせの技術、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術^{*11}を応用することで、自己位置認識を実現するシステムを開発している。本システムの基本処理フローを図3に示す。事前にステレオカメラで、AR/MRコンテンツを配置したい場所周辺の撮影を実施し、位置合わせを行うために必要な「特徴点マップ」を生成する。現実空間との座標合わせ(グローバル座標^{*12})をした上で、特徴点マップをサーバにアップロードする。一方、各デバイスには、自己位置認識ライブラリが組み込まれており、カメラ画像を定期的に(数秒に1枚程度)サーバに送信する。自己位置認識サーバでは、各デバイスから送信された画像の特徴点を抽出し、特徴点マップとの照合を行い、画像が撮影されたグローバル座標を計算する。なお、各デバイスは、各デバイスローカル座標のリアルタイムのトラッキングを行い、サーバ

*7 Magic Leap 1:「MAGIC LEAP 1」, Magic Leapのロゴおよびその他のすべての商標は、Magic Leap, Inc. の商標。

*8 ビデオパススルー型VRゴーグル: 前方に取り付けられたカメラで認識した映像をゴーグル内のディスプレイに投影し、ゴーグルをかけた状態でも外の環境を視認できるVRゴーグル。

*9 空間コンピューティング: 現実空間の物体や空間を認識してデ

ジタル情報と融合する技術。これらを利用することにより2次元ディスプレイの制約を超え、現実空間とデジタル世界を1つに融合し、現実空間と同様にデジタル世界と相互作用が可能となる。

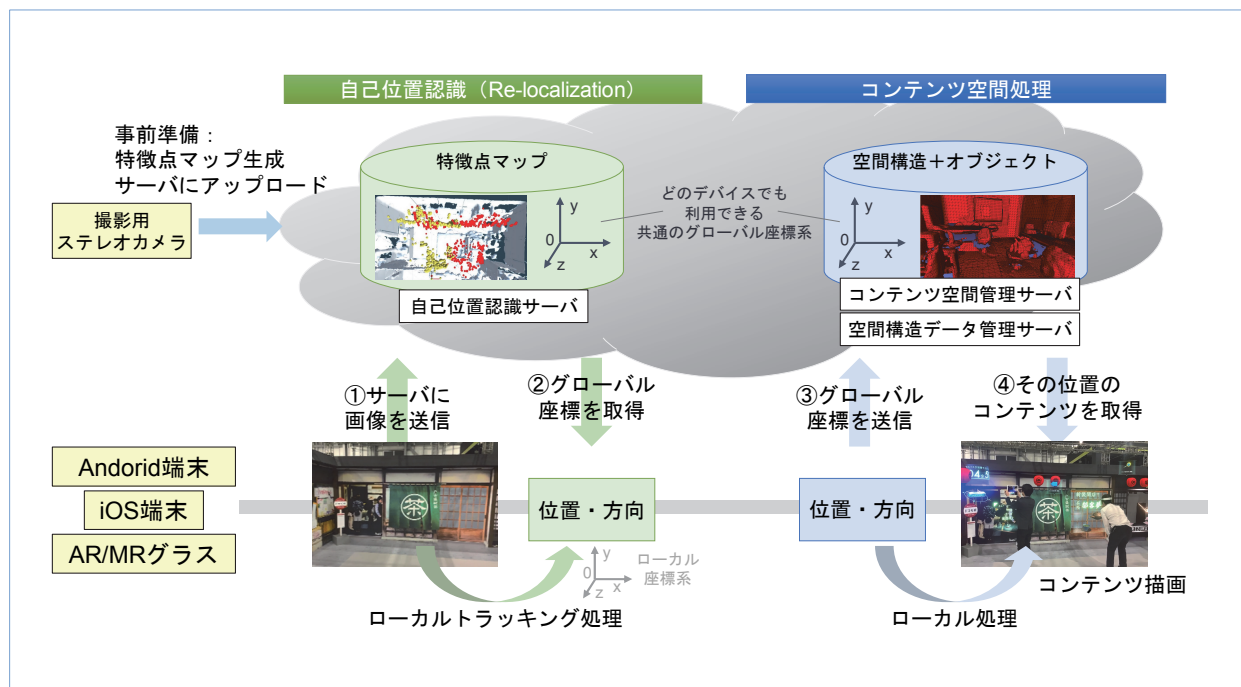


図3 本システムの基本処理フロー

から送信されたグローバル座標を用いて、リアルタイムに座標の補正を行う。自己位置認識サーバ、空間構造データ管理サーバおよびコンテンツ空間管理サーバとの間で共通のグローバル座標系を保持してデータ連携することで、その場所に正確に位置合わせされたAR/MRコンテンツの描画が可能となる。

このように、SLAM技術を活用した自己位置認識を行うことで、ARマーカーなどを配置せず、GPSよりも正確な位置の認識が可能となる。SLAM技術の特性上、自己位置認識がしやすい環境や、逆にしにくい環境があるため、特徴点マップをどのように作成するか性能に依存することがあるが、現在のところ、本システムにより屋内および一部の屋外にて自己位置認識が可能となっている。

一方、特徴点マップの事前撮影が必要である点、精度の高い特徴点マップの撮影にノウハウが必要である点、また周辺環境の変化などに影響を受けて自己位置認識が行えない場合がある点が課題である。

2.2 空間構造生成／管理機能

空間構造データは、主に2つの用途に利用される（図4）。1つは、AR/MRコンテンツの遮蔽・反射などの物理現象を表現するため、もう1つは、AR/MRコンテンツの開発者が開発する際に、どの場所にどのようにAR/MRコンテンツを配置するかを検討する上での、視認性を高くするための用途である。

物理現象の表現に用いる空間構造データには、点の集まりである点群データではなく、面の集まりであるメッシュデータが用いられる。メッシュデータで表現した透明な面を、現実空間に合うように位置合わせして配置することで、例えばAR/MRコンテンツのボールを投げた際に、壁での跳返りを表現（反射）できたり、障害物の向こう側ではボールが見えなくなるといった描画（遮蔽）を表現できたりする。このような物理現象の表現は、AR/MRコンテンツをよりリアルに感じさせるために非常に重要

*10 ARマーカー：デジタルコンテンツをデバイス画面上に表示するために使用されるマークや画像のこと。画像認識技術によりARマーカーを読み取ることで、ARマーカーの位置を認識することが可能となる。

*11 SLAM技術：デバイスのカメラ画像情報やセンサ情報を利用して、デバイス自身の自己位置の認識を行いながら、周辺環境の

地図を作成する技術。

*12 グローバル座標：AR/MRのコンテンツが配置される空間全体を表現する座標系であり、各デバイスの位置を表現するローカル座標系を自己位置認識によりグローバル座標系に変換することで、各デバイス間で共通のAR/MRコンテンツを視認することが可能となる。

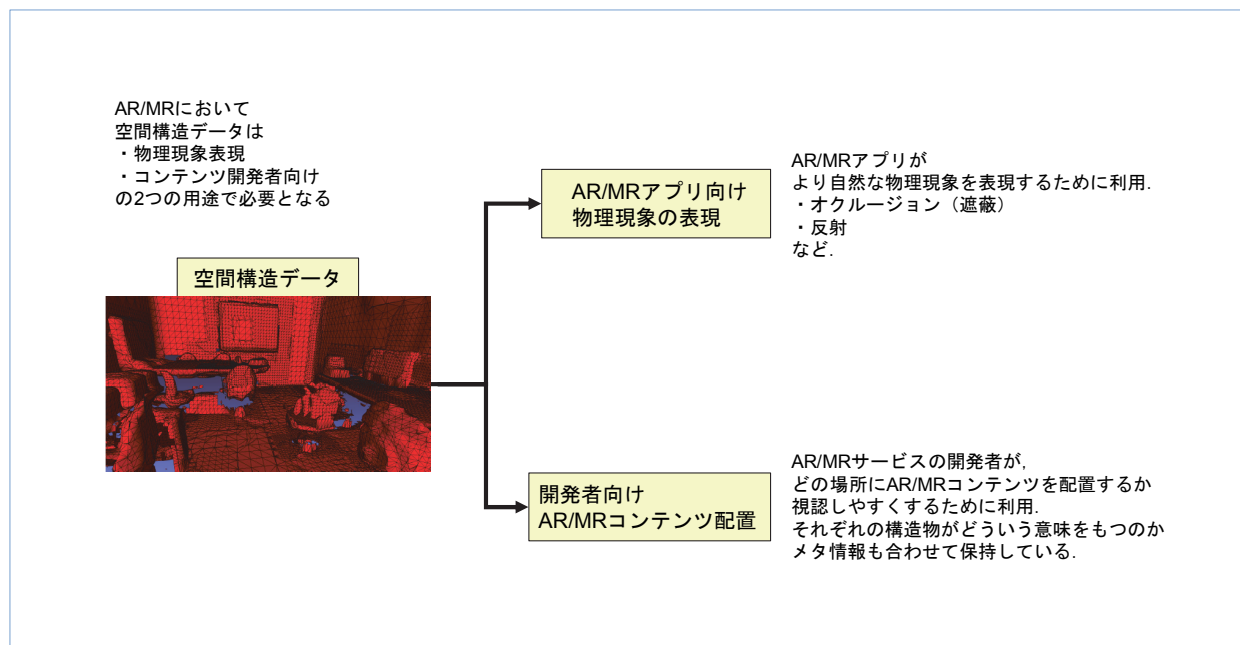


図4 空間構造データの利用用途

な技術である。

現実空間を事前に撮影することで空間構造データを生成し、空間構造データサーバで管理することにより、ユーザ間での空間構造の共有や、空間構造による物理現象の表現が可能となる。空間構造データは、一般的にファイルサイズが大きいため、物理現象を表現するために必要な最低限の精度を担保して、ファイルサイズが大きくなりすぎないようにする点は、リアルタイムなインタラクションを行う上で重要である。

また、開発者向けの用途としては、AR/MRコンテンツを配置するサイバー空間が、現実空間のどの場所なのかを理解するために必要となる。ここで利用する空間構造データは、ある程度の場所が理解できれば良いため、点群データでもメッシュデータでも利用できるものの、配置したいコンテンツ次第では、位置の精度、形状の精度の高いものが要求される可能性がある。

2.3 コンテンツ空間管理機能

コンテンツ空間管理機能とは、各デバイスのユーザの趣味嗜好、属性情報や現在の状態を管理し（ユーザ管理機能）、各デバイスを利用するユーザの各種属性や状態に応じたコンテンツを選択し出力する機能（コンテンツフィルタリング機能）である（図2）。また、これらのコンテンツを開発しやすいツール（ユーザフレンドリーな開発環境）を提供する機能もある。AR/MRコンテンツが配置されているコンテンツ空間は、自己位置認識技術で利用する特徴点マップおよび現実空間の空間構造データと共通の座標系で管理されており、自己位置認識機能、空間構造管理機能と連携をスムーズに行うためのインタフェースをもつ。

3. あとがき

本稿では、AR/MRクラウドを実現するための自己位置認識機能、空間構造生成／管理機能、コンテ

ンツ空間管理機能について解説した。

ドコモのR&Dでは、グラス型のAR/MRデバイス、スマートフォン、ビデオパススルー型VRゴーグルなど、さまざまなデバイスを利用するすべてのユーザが、共通のAR/MRコンテンツを体験可能となるAR/MRクラウドの世界を実現するべく、技術開発に取り組んでいる。サイバー空間上のAR/MRコンテンツが現実空間に重畳される空間コンピューティングであるAR/MRクラウドの世界は、これまでにない全く新しい体験を提供できると考えている。すべてのAR/MRデバイスを利用するユーザに

AR/MRクラウドが体験できる世界の実現に向けて、今後も引き続き開発を進めていきたい。

なお、ドコモにおけるXRの取組みについて、ドコモ公式HP上で紹介しているので、ぜひご一読いただきたい [2]。

文 献

- [1] 玉置：“DOCOMO Open House 2020 —ようこそ、5G リアルワールドへ。そしてその先へ。—,” 本誌, Vol.28, No.1, pp.48-55, Apr. 2020.
- [2] NTTドコモ：“docomo XR | NTTドコモ.”
<http://xr.docomo.ne.jp/>

Technology Reports

研究開発用電測車

フィールド移動実験

特殊車両

モバイルコミュニケーションの進化を支えた研究開発用「電測車」の変遷 —1G～5Gのフィールド移動実験に使われたユニークな車両たち—

R&D戦略部 おくむら ゆきひこ
奥村 幸彦

多様な環境下を移動しながら安定したコミュニケーションを図ることが可能な移動通信システムの実現にあたり、その研究開発段階におけるフィールド（屋外）移動実験は欠かすことのできない重要なプロセスである。1Gから5Gに至る各世代のフィールド移動実験では、それぞれユニークかつ創意工夫された仕様の研究開発用「電測車」（特殊車両）が投入され、果てしない距離の走行実験によりモバイルコミュニケーションの進化を支えてきた。

本稿では、これら各世代の研究開発用「電測車」の特徴を解説し、主な車両とそのフィールド移動実験模様、個別装備などを写真とともに紹介する。

1. まえがき

「電測車」とは、「電波測定車」または「電界強度測定車」の略であり、一般には移動通信システムをはじめとするさまざまな無線システムにおいて使用される電波の受信状態を広範なエリアで測定することを目的とした車両を指す。一方、本稿で紹介する移動通信システムの研究開発用「電測車」は、電波測定に加えて、電波を用いた無線通信実験（または無線伝送実験）や商用装置の通信接続試験などをフィールド（屋外）で移動しながら行う特殊車両であり、放送局が使用中継車や、移動通信事業者

が使用する移動基地局車などとも基本的に共通する仕様・機能を有している。

通常、研究段階のフィールド移動実験で使用される移動端末（または移動局）は試作装置であり、そのサイズや消費電力が大きいことに加えて極めてデリケートな装置であるため、それらを車両搭載するにあたっては、慎重かつさまざまな工夫が必要となる。ドコモの研究開発部門（電電公社／NTT時代の移動通信研究開発部門を含む）では、これらの点も考慮した研究開発用「電測車」として、世代ごとに必要な条件を満たすため特殊車両を順次投入してきた。多様な環境における実験走行の経験も活かし

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

て、世代を追うごとに車両仕様も進化させ、フィールド移動実験のノウハウを蓄積してきた。

本稿では、研究開発用「電測車」の特徴を解説した上で、移動通信システムの各世代で活躍してきた研究開発用「電測車」の主な車両とそのフィールド移動実験模様、個別装備などを写真とともに紹介する。

2. 研究開発用「電測車」の特徴

ドコモR&Dセンタ駐車場に勢揃いした研究開発用「電測車」(2007年10月撮影)を写真1に示す。移動通信システムの研究開発では、世代を追うごとに無線アクセス方式の高周波数化、高機能化が進んできたことを背景として、実験用の移動局装置・測定装置類はより大型化してきた。この傾向に伴い電測車の車両サイズも順次大型化し、3～4トンクラスの車両(小型トラックまたは小型バス)から8トンクラスの車両(中型トラック)がベース車両として採用され

るとともに、大型の実験装置の搭載を行いやすくなるための支持レール・可動架台機構、専用ドアなどを電測車に設置する工夫がなされてきた。さらに、実験装置の消費電力も大電力化する方向となり、安定かつ十分な電力を供給可能とする大容量(最大20kVA^{*1}クラス)の発動発電機^{*2}(以下、発発)が電測車に搭載されるとともに、騒音対策、振動対策のための特殊加工が施された。また、電測車の走行中における実験装置の振動対策としては、車両自体にエアサスペンションを採用しつつ、装置架台の防振加工も施された。

また、車両によっては、新しい無線アクセス技術の検証実験、移動電波伝搬特性^{*3}の測定実験において、実験メニューに応じた複数の形式のアンテナ本体を搭載することのできる脱着式専用架台や、低損失でのアンテナケーブル取回しを可能とするルーフ通線機構などが採用された。さらに、アンテナ地上高やアンテナ設置位置に依存する通信性能、伝搬特性を測定・評価するための伸縮ポール、折畳みアーム、ターンテー



写真1 ドコモR&Dセンタ駐車場に勢揃いした電測車

^{*1} VA：ボルトアンペア。交流電源を各種機器などに供給する際、負荷が利用する有効電力と利用しない無効電力の両方を考慮した皮相電力を表す単位で、発電機や変圧器の能力を示す場合に用いる。

^{*2} 発動発電機：主に商用電源の供給ができない環境で電力供給することを目的とした、エンジン(発動機)を動力源として動作する発電機または発電装置であり、燃料としてガソリン・軽油・カセットボンベなどが用いられる。一般に発発と略して呼ばれている。電測車への発発搭載にあたってはフィールド移動実験での使用を考慮したさまざまな工夫が施されている(5章参照)。

^{*3} 移動電波伝搬特性：移動通信システムにおいて、電波が送信点(基地局または移動端末)から受信点(移動端末または基地局)へ伝搬する際の特性で、伝搬損失、電力遅延プロファイル、角度プロファイルなどがある。陸上移動における電波伝搬では、電波が建物や樹木、地形の起伏など、障害物や反射物の影響を絶えず受けて伝搬するため、移動によって受信レベルは常に変動し、瞬時に大きく落ち込むことがある。

ブルなどを用いた可動式アンテナ架台が搭載された。

一方、高速鉄道で移動中の携帯電話／スマートフォン利用時の通信性能の向上、通信品質の安定化に向けた模擬実験のために、最大時速300kmでの高速走行中の無線通信実験が可能な車両や、実際の基地局アンテナの設置条件を再現した電波伝搬実験が可能な高伸長アンテナポールを搭載した車両といった特殊実験用の電測車も導入された。

なお、電測車の一部は、道路運送車両法における特種用途自動車、すなわち主たる使用目的が特種である自動車として登録されており、車両ナンバープレートに車種を表す数字（分類番号）が8で始まるいわゆる「8ナンバー車」となっている。

3. 各世代の研究開発用「電測車」

以下では、各世代の移動通信システムの研究開発に活躍した電測車のうち主な車両を解説する。

3.1 1G

セルラ方式^{*4}を採用する第1世代移動通信システム（1G）の実現にあたり、無線周波数帯として新

たに800MHz帯が候補となり、その移動電波伝搬特性の解明とモデル化がシステムの検討に先立ち必要であった。電電公社の電気通信研究所（東京都武蔵野市）では、1962年に、移動無線回線設計の基本となる基地局と移動端末間の電波伝搬特性を、実際に自動車で行きながら行う電波伝搬測定実験により解明し、これを基に受信電界強度とサービスエリアの推定法を一般化することを目標とした検討が開始された。VHF（Very High Frequency）帯^{*5}・UHF（Ultra High Frequency）帯^{*6}における実際の移動電波伝搬データを取得するため、関東一円で大規模な走行実験が1962年から1965年にかけて実施された[1]。実験場所については、市街地や郊外地を含む関東一円を対象に移動電波伝搬実験を行うこととした。5カ所に設置された送信設備の1つは、都心に位置し、高さのとれる「東京タワー（東京都港区）」に設置され、これを起点として伝搬距離1～100kmの範囲で実験が行われた。同実験に使用された電測車を写真2に示す。三菱・ジュピターをベースとした車両（中型電測車^{*}）に、送信設備から発射された電波を走行しながら受信測定するための受信アンテナと、受信電界強度測定器と電源供給のための発



写真2 大規模電波伝搬実験における電測車と実験模様

^{*4} セルラ方式：移動通信システムにおいて、サービスエリアを多数のセルと呼ばれる小さなエリアに分割した上で、それぞれのセルに基地局を設置し、ユーザ（移動端末）は近隣の基地局と接続して通信を行うシステム。通信中にユーザ（移動端末）が異なるセルにまたがって移動する際は、接続する基地局を自動的に切り替えるハンドオーバー制御により通信を継続する。セルの形状は正六角形とすることで、最も周波数利用効率を高くできる。

^{*5} VHF帯：30～300MHzの無線周波数帯のことで、波長は1～10mであり、メートル波、超短波とも呼ばれる。

^{*6} UHF帯：300MHz～3GHzの無線周波数帯のことで、波長は10cm～1mであり、デシメートル波、極超短波とも呼ばれる。

発が搭載された。当時の測定器は真空管式で、1日連続動作させると10dB程度測定値が変化するため、測定器を30分ごとにレベル校正を行いながら使用した。関東一円で2度にわたって実施した実験の走行距離は延べ約2,500kmにもおよんだ。

その後、大規模移動電波伝搬実験の結果も踏まえて、1972年に800MHz帯陸上自動車電話システム（大都市方式）[2]の商用システム開発が電電公社の横須賀電気通信研究所（神奈川県横須賀市）で開始された。セルラ方式を基本とし、周波数繰返し方式^{*7}および多元接続方式^{*8}にFDMA（Frequency Division Multiple Access）^{*9}を採用した周波数有効利用技術、ならびに無線回線制御技術、移動体交換技術など、同システムの基盤となる技術の確立に向けた開発が進められ、1973年から1976年にはフィールド移動環境におけるシステム試験が実施された。

同試験に使用された電測車を写真3に示す。トヨタ・マシーダイナ（レントゲンを搭載可能な検診車型式／4トン車）をベースとした7人が乗れるマイクロバス形式の車両（中型電測車、写真3(a)）や、トヨタ・クラウンバンをベースに後部機器スペースを拡張したワゴン形式の車両（小型電測車、写真3(b)）を用いて各種試験が行われた。マイクロバス形式の車両には、通信実験機器、各種測定機器に加えて実験データの分析・グラフ化に用いる電子計算機（写真3(a)・右下の車内写真中、左側に設置されている装置）が搭載され、これら全体に6kVAの発発から電源を供給した。一方、ワゴン形式の電測車は、一般の乗用車において移動端末を搭載する場合と同じアンテナ高を再現するとともに、自動車電話利用時の雑音（高周波帯域に加えて音声帯域での雑音）の影響も評価するために導入され、後に、加入者規模が少ない地方都市向けの中小都市方式のシステム試験でも使用された。

開発が完了した大都市方式は、1979年12月に、自動車電話サービス（音声電話サービス）として東京23区内で商用サービスが開始され、1983年3月には、広島、岐阜、仙台において中小都市方式のサービスが開始された。その後、持運び可能なショルダーホンとハンドヘルド型携帯電話が、それぞれ1985、1987年に商用導入された。さらに加入者の増加に対応すべく従来の5倍の加入者容量を実現する大容量方式[3]が実用化され、1988年に商用サービスが開始された。また、1991年には150ccの容積を実現した超小型携帯電話「ムーバ」[4]も商用導入された。

3.2 2G

1Gの導入前後より、次世代システムの初期検討が開始され、1987年には、システムのさらなる容量増大と音声品質の向上、およびファクシミリやデータ通信などの音声電話サービス以外の新サービス実現に向けて、多元接続方式にTDMA（Time Division Multiple Access）^{*10}を採用するデジタル移動通信システム[5]（PDC：Personal Digital Cellular system^{*11}）すなわち第2世代移動通信システム（2G）の研究開発が本格化し、1G同様、各種フィールド移動実験が実施された。

写真4(a)は、1989年に東京都新宿区周辺で実施されたデジタル伝送方式の1つであるQDPSK（Quaternary Differential Phase-Shift Keying）方式^{*12}と選択型受信ダイバーシチ^{*13}の組合せで高品質伝送する実験の様子を撮影したものである。その際の電測車には、米ゼネラルモーターズ（GM）・シェビーバン（シボレーブランド）をベースとして、発発とルーフ上に複数アンテナ素子間の間隔を可変する機構を備えたアンテナ設置用プラットフォームを架装した車両（小型電測車）が使用された。ベース車両にアメリカ車が使われたのは、通信実験用試作装置とその動作

^{*}電測車分類：本稿において、車両サイズや搭載する装置類の規模などを勘案し、電測車を3段階（小型、中型、大型）に分けて表記。

^{*7} 周波数繰返し方式：セルラ方式において限られた無線周波数資源を有効活用するため、ある基地局（セル）で用いた周波数と同じ周波数を、セル間の干渉の影響がない一定の距離を隔てて繰り返し再利用する方式。システムに割り当てられた周波数帯全体を N 個の周波数帯に分割し、これらを1つのグループとして各周波数帯のセルが隣接することのないよう面的に繰り返し配置する（代表例として、 $N=7$ とする7周波数繰返しがある）。

^{*8} 多元接続方式：移動通信システムにおいて、ある基地局が複数のユーザ（移動端末）を収容し、それらの端末が同時に基地局との間で無線通信を行う際、互いに干渉することなく各端末が正しく情報を送受信できるようにする方式。無線リソースを時間、周波数他のさまざまなドメインで分割し、各ユーザに割当てする方法が存在し、複数ドメインを組み合わせる方法など、限られた無線周波数資源を使ってより多くの端末が収容できるよう、各世代のシステムにおいて工夫がなされてきている。



(a)マイクロバス形式の電測車と試験模様



(b)ワゴン形式の電測車と試験模様

写真3 1G（大都市方式／中小都市方式）の研究開発で使用された電測車

に必要な電源容量を確保できる発発を搭載し、かつ、都心部の道路事情に合わせてスムーズに走行することができる適当な日本車が当時無かったためである。

2Gの研究開発が終盤に差し掛かると、1990～1992年にかけて神奈川県横浜市の横浜駅周辺およびみなとみらい地区において、フィールド試験が繰り返

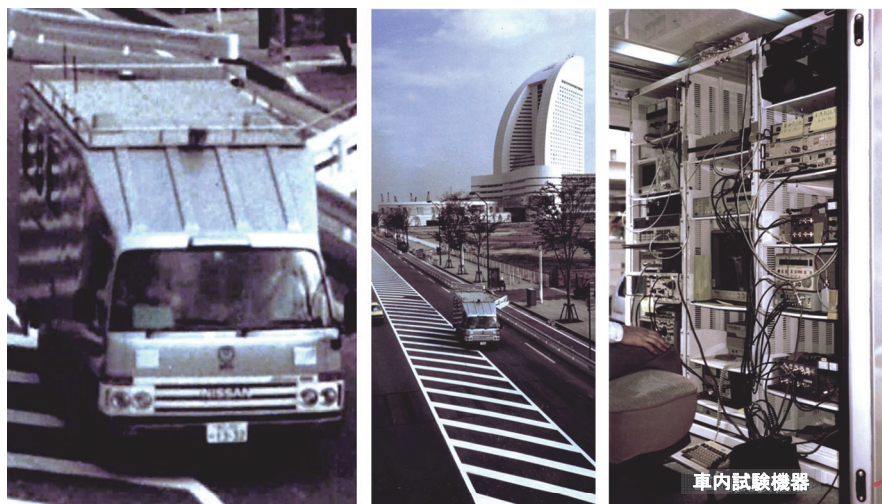
返し実施された。同試験では、主な電測車として、写真4(b)に示す日産・アトラス（4トン・トラック）をベースとして箱形の測定室と実験・測定機器ラック、発発などを架装した車両（中型電測車）が使用された。実験・測定機器ラック（写真4(b)・右）は、電子機器用標準ラック×3架の一体型で、収容機器

- *9 FDMA：システムに割り当てられた広い無線周波数帯域を複数の狭い帯域の無線チャンネルに分割し、それぞれを異なるユーザの通信チャンネルとして独立に使用可能とした周波数ドメインの多元接続方式。
- *10 TDMA：所定の周波数帯域を有する1つの無線チャンネルを複数の一定時間区間（タイムスロット）に分割し、それぞれを異なるユーザの通信チャンネルとして独立に使用可能とした時間ドメインの多元接続方式。
- *11 PDC：日本国内で普及した第2世代移动通信システムの1つで、ドコモなどが採用した。

- *12 QPSK方式：送信デジタルデータを無線信号の位相ドメインで変調する位相シフトキーイング（位相変調）方式において、1シンボルあたり4つの位相状態を使用し、かつ、データをシンボル間の位相差に反映する、4相変調位相シフトキーイング方式の略称。フェージング現象により、振幅とともに位相が大きく変動する移動電波伝搬路を経由する通信においては、絶対位相を用いる方式に比較して通信品質を向上可能である。



(a)小型電測車とQDPSKデジタル伝送実験模様



(b)中型電測車とシステム試験模様

写真4 2G（デジタル移動通信方式）の研究開発で使用された電測車

の種類や実験・測定項目に応じて一体型ラック全体を、床に埋め込まれたレール上を前後に動かして固定できる機構を備えていた。

2G（PDC方式）は1993年3月に商用サービスが開始された。その後、1997年3月に3倍のデジタルデータ通信速度を実現したPDCパケット方式（最大28.8kbps）

の商用サービス [6] が開始され、1999年2月には同方式を使用してWebアクセスやメール利用を可能とした「iモード」サービス [7] が開始された。

3.3 3G

2G開発完了とはほぼ同じ時期に第3世代移動通信シ

*13 ダイバーシチ：マルチパス環境下における、端末の移動中に生じるフェージング現象（受信電波のレベルが大きく落ち込む現象）を抑制するため、送受信する信号に冗長性をもたせることで得られた異なる変動成分を合成または選択利用することにより、受信電波レベルが落ち込む確率を低減し、無線伝送品質を向上させる技術。冗長性をもたせるドメインに応じて、空間ダイバーシチ、周波数ダイバーシチ、時間ダイバーシチなどがある。

システム（3G）の研究が本格的に開始された。3Gの多元接続方式には、複数候補を比較・検討した結果、CDMA（Code Division Multiple Access）^{*14}をベースとし、新しく割り当てられることとなった2GHz帯を用いて広帯域無線伝送することを特徴とする広帯域コヒーレントDS-CDMA（Direct Sequence-CDMA）[8]（後にW-CDMA（Wideband-CDMA）^{*15}と呼称）が採用された。この方式は、無線伝送帯域幅を最大5～10MHzに広帯域化することで市街地などの電波伝搬で生じるマルチパス^{*16}の分離・合成をしやすくし、高速・高品質のデータ伝送を実現している。実環境における広帯域化の効果の確認や384kbps～2Mbpsの最大通信速度による映像伝送、新たに採用された高速パワーコントロール、ソフトハンドオーバー^{*17}他の技術の検証を行うフィールド移動実験が1994年より千葉県船橋市において順次行われた。

写真5(a)は広帯域コヒーレントDS-CDMAの当初のフィールド移動実験に使用された電測車で、前述の2Gのシステム試験で使用されていた車両（日産・アトラス）に、新たにドコモ・ロゴを設置し、使用した。その後、最大2Mbpsの伝送実験で使用する、大型化された実験装置を搭載することや長時間におよぶ走行実験も考慮して、写真5(b)に示す新しいタイプの電測車が導入された。この車両（中型電測車）は、いすゞ・エルフ（3.5トン・トラック）をベースとして、安全性（強度）、断熱性、デザイン性などを考慮して成形された後部ボディに測定室、低騒音の発音、空調装置を架装するとともに、走行時の振動を軽減するエアサスペンションを装備した。さらに当該車両では、大型実験装置の積み下し専用の開閉ドアを追加設置し、専用の昇降機を用いて同装置の車両サイドからのスライドインを可能とするレール付き装置固定基台や、車両外に設置した各種実験用アンテナと実験装置を直結するための

機構など（後述）を新たに導入した。この新しいタイプの電測車は、その後、世代をまたがって継続使用または追加導入され、現在、7代目の車両がフィールド移動実験で活躍中である。

3G（W-CDMA方式）は2001年10月に商用サービス[9]が開始された（サービス開始時の最大通信速度は384kbps）。その後、2006年8月にHSDPA（High-Speed Downlink Packet Access）^{*18}方式[10]（サービス開始時の下り最大通信速度は3.6Mbps、順次高速化し、2011年6月には14Mbpsの提供を開始）、2009年6月にHSUPA（High-Speed Uplink Packet Access）^{*19}方式（上り最大通信速度5.7Mbps）の商用サービスがそれぞれ開始された。

3.4 4G

3Gが商用化された翌年の2002年には、第4世代移動通信システム（4G）に向けた無線アクセス実験装置の試作が開始された[11]。下り100Mbpsの高速パケット通信を実現すべく、無線周波数帯域幅を100MHzに拡大し、広帯域化により増大するマルチパスの相互干渉や周波数選択性フェージング^{*20}の影響を排除するため、下りリンクにおいて多数の狭帯域信号に分割してマルチキャリア伝送^{*21}する直交周波数分割多元接続（OFDMA：Orthogonal Frequency Division Multiple Access）ベースの方式を新たに採用した。これらの検証用に開発した試作装置を用いて、2003年5月よりフィールド移動環境における100Mbps伝送実験を行った。横須賀市で実施された、同実験に使用された中型電測車（いすゞ・エルフ）を写真6(a)に示す。前述の車両サイドから実験装置をスライドインさせる機構を活用して、複数種類の移動局実験装置を載せ換えた実験が行われている。

2005年5月には、OFDMAベースの無線アクセス

^{*14} CDMA：同一の周波数帯域・タイムスロットの無線チャンネル上に、ユーザごとに異なる直交符号系列を用いて拡散した通信チャンネルを多重化することで、複数ユーザの同時通信を可能とする符号ドメインの多元接続方式。

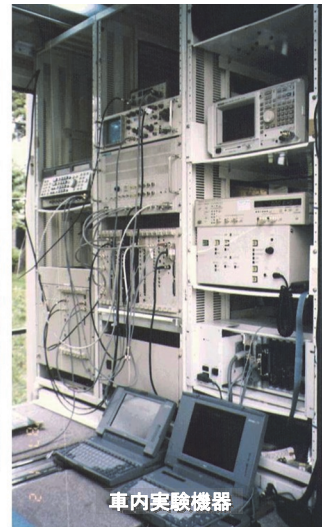
^{*15} W-CDMA：3GPPにおいて国際標準仕様された第3世代移動通信システムの呼称。

^{*16} マルチパス：送信点から放射された電波が、建物や地形などの障害物によって反射・回折し、複数の経路（パス）を伝わって受信点に到達する現象。

^{*17} ソフトハンドオーバー：通信中のユーザ（移動端末）が異なるセ

ルにまたがって移動する際、接続する基地局を自動的に切り替えるハンドオーバー制御において、セル境界の周辺エリアでは複数の基地局と同時接続し、各基地局からの信号を合成受信することで、通信の瞬断がないセル間移行を実現する方法。これに対して、セル境界での同時接続を行わず、セル切替えのみを行う方法をハードハンドオーバーと呼ぶ。

^{*18} HSDPA：W-CDMA方式に基づく下りリンクの高速パケット伝送方式。3GPP標準仕様上の下り最大伝送速度は約14Mbpsである。移動端末の電波受信状況に応じて、変調方式と符号化率が最適となるよう制御する。

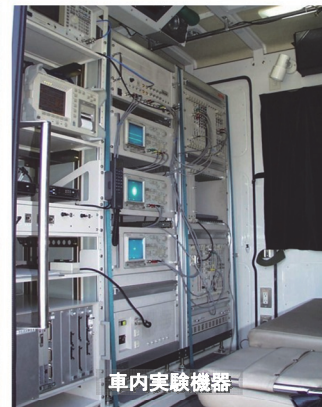


車内実験機器

(a) 中型電測車と広帯域コヒーレントDS-SS-CDMA実験模様



映像伝送実験



車内実験機器

(b) 新規導入された中型電測車と384kbps～2Mbps伝送実験模様

写真5 3G (W-CDMA方式) の研究開発で使用された電測車

- *19 HSUPA: W-CDMA方式に基づく上りリンクの高速パケット伝送方式。3GPP標準仕様上の上り最大伝送速度は5.7Mbpsである。基地局における電波受信状況に応じて、符号化率、拡散率、送信電力が最適となるよう制御する。
- *20 周波数選択性フェージング: マルチパスが生じる電波伝搬路において、受信信号の周波数軸上のレベルが一様ではなくなる状態を指す。
- *21 マルチキャリア伝送: 送信デジタルデータを複数の搬送波(キャリア)を用いて並列伝送する方法。マルチキャリア伝送を用いる代表的な方式に直交周波数分割多重 (OFDM:

Orthogonal Frequency Division Multiplexing) があり、LTE以降の移动通信システムをはじめとして、無線LAN、デジタルテレビなど、最近の無線システムで多く採用されている。

方式に、 4×4 MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) 多重技術^{*22}、16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 高次変調技術^{*23}などを組み合わせる方式を適用した実験装置を用いて、100MHz帯域幅において下り最大1Gbpsのリアルタイムパケット信号伝送実験 [12] に成功した。さらに、同年12月には、無線アクセス方式を 6×6 MIMO多重、64QAMに拡張し、下り最大2.5Gbpsのパケット信号伝送実験に成功し、2006年12月には、 12×12 MIMO多重を適用した下り最大5Gbpsの伝送実験 [13] にも成功している。

これら一連のGbpsクラスの伝送実験では、実験装置のさらなる大型化に対応すべく、写真6(b)に示す、いすゞ・フォワード (8トン・トラック) をベースとし、測定室内に実験装置を前後2列に設置できる車両 (大型電測車) を新たに導入して、フィールド移動実験に使用した。この車両は、通信実験用としては、これまでで最大規模である。さらに、高速かつ高度な信号処理を行う無線アクセス実験装置、および高速伝送を活かした多数動画の並列伝送をデモンストレーションする各種装置の電源を安定して供給するため、20kVAクラスの大容量発電を搭載するとともに、無停電電源装置も装備した。

一方ドコモは、2004年11月、世界に向けてSuper 3Gの概念 [14] を提唱したが、これは、3G技術の長期的な競争力を維持しながら、その先の4Gへの円滑な移行を可能とすることを想定した概念である。2006年からSuper 3Gの実験検証に向けた実験システム開発を行い、屋内での基本実験を経て2008年2月からは横須賀市、山梨県甲府市周辺でフィールド移動実験を行い、写真6(c)の中型電測車 (いすゞ・エルフ) を使用して下り最大約250Mbpsの伝送が可能であることを確認した。同実験システムでは、音声・画像伝送・ゲームなど各種アプリケーション

を用いてSuper 3Gの商用化に向けた実用性・有効性も検証した。

Super 3Gは、2009年3月に3GPP (3rd Generation Partnership Project) 仕様のLTE (Long Term Evolution) として標準規格化されるとともに、2010年12月に国内において商用サービス [15] が開始された (サービス開始時の下り最大通信速度は75Mbps。順次高速化し、2013年10月には倍の150Mbpsの提供を開始)。さらに、2015年3月には、LTEの発展形であり、キャリアアグリゲーション^{*24}、高度化C-RAN (Centralized Radio Access Network)^{*25}などの高速・大容量化技術が新たに適用されたLTE-Advancedを使用する商用サービス「PREMIUM 4G」 [16] の提供が開始された (サービス開始時の下り最大通信速度は225Mbps。順次高速化し、2020年3月には1.7Gbpsの提供を開始)。

3.5 5G

第5世代移動通信システム (5G) は、高速・大容量通信、低遅延通信、多数端末同時接続などの特長を有するシステムの実現を目標に、LTEが商用化された2010年ごろから研究開発を開始した。2012年12月には、11GHz帯において周波数帯域を400MHz (LTE-Advancedの4倍) に拡大し、 8×16 MIMO多重技術を適用した実験装置を用いて最大約10Gbpsのパケット信号伝送の基礎実験に成功した [17]。

沖縄県石垣市で実施した本実験装置によるフィールド移動実験では、写真7に示すように移動局 (送信装置とアンテナ) を、トヨタ・エスティマ (ハイブリッドカー) をベースとした車両 (小型電測車) に搭載し、これまで移動通信システムでは電波伝搬の特性上、利用が難しいとされていた6GHz以上の高い周波数を用いて広帯域無線伝送を行うことにより、5Gの目標とする10Gbps超えの超高速通信が可

^{*22} MIMO多重技術：複数のアンテナから異なる情報信号を同時に同じ周波数を用いて送信し、無線伝搬路において空間的に多重して信号伝送する技術。

^{*23} QAM高次変調技術：デジタルデータを無線送信信号に高効率変換する技術の1つ。変換された後の信号を、位相と振幅が異なる16通りの組合せで表現する16QAM変調では、1回の送信で4ビットの情報を送信することができる。

^{*24} キャリアアグリゲーション：複数の周波数帯を束ねることで高速通信を可能とするLTE-Advancedの主要無線アクセス技術の1つ。

^{*25} C-RAN：基地局制御部を集中設置するネットワークアーキテクチャ。



(a) 中型電測車と100Mbps伝送実験模様



(b) 新規導入された大型電測車と1Gbps伝送実験模様



(c) 中型電測車とSuper 3Gのシステム実験模様

写真6 4Gに向けた研究開発で使われた電測車



写真7 小型電測車と10Gbps伝送基礎実験模様

能であることを実証した。なお、本実験の機器電源はハイブリッドカーが装備しているバッテリーから出力される1.5kVAの電源を活用しつつ、追加のバッテリーを搭載して不足する電力を賄う構成となっており、住宅街を通過する試験コースにおいて発発搭載による騒音などを避けることを可能としている。

その後、2014年ごろから開始した5Gの本格的な研究開発段階では、5Gの周波数候補として、現行の4Gが使用する周波数の少し上である3.7GHz/4.5GHzなどの低SHF（Super High Frequency）帯^{*26}から15GHz/28GHzなどの高SHF帯、さらにその上の39GHz/70GHzなどのEHF（Extremely High Frequency）帯^{*27}といった幅広い周波数帯を仮定し、各周波数帯での無線アクセス技術に関する実験を世界の主要ベンダと協力して、並行実施してきた[18]。

低SHF帯での実験では、4.5GHzを使用する分散アンテナシステム^{*28}のフィールド伝送実験や、同じく4.5GHzのMassive MIMOシステム^{*29}におけるデジタルビームフォーミング^{*30}のビーム追従^{*31}に関するフィールド移動実験などを行った。2017～2018年に横須賀市および東京都内で実施した実験では、写真8(a)、(b)に示す中型電測車（いすゞ・エルフ）に移動局装置を搭載して走行するとともに、フィールドビーム追従実験で用いるMassive MIMO

基地局は、許可を得て路肩に停車した中型電測車（いすゞ・エルフ）を使用して、車内に基地局装置本体を、伸縮ポール上に同Massive MIMOアンテナユニット^{*32}（64素子×2）を設置して実験を行った。

一方、高SHF帯での実験では、28GHzを使用した高速移動5Gビームフォーミング通信実験、車載用5Gガラスアンテナ通信実験などを行った。2016年にレーシングコース（静岡県）において実施した高速移動実験では、写真9(a)に示す小型電測車（トヨタ・エスティマ）の車内にアナログビームフォーミング^{*33}を装備した28GHz帯移動局装置本体を、車両ルーフ上に固定した透明ドーム（風防構造）内に同アンテナユニットを搭載して、特急列車乗車時を想定した最大時速150kmの高速走行時のビーム追従実験を行った。さらに、2020年にミリ波関連研究開発プロジェクト^{*34}の一環として試験走路（茨城県）において実施した実験では、写真9(b)に示す小型電測車（トヨタ・アルファード）に、より高精度なビーム追従を可能とするデジタルビームフォーミングと基地局間連携機能を装備した28GHz帯通信実験システムの移動局を搭載し、高速道路の自動車走行時においても複数基地局間をまたいで安定かつ高品質な通信が可能となる新システムの実験を行った。また、2019年に市街地（東京都墨田区）で実施した

*26 SHF帯：3～30GHzの無線周波数帯のことで、波長は1～10cmであり、センチメートル波とも呼ばれる。

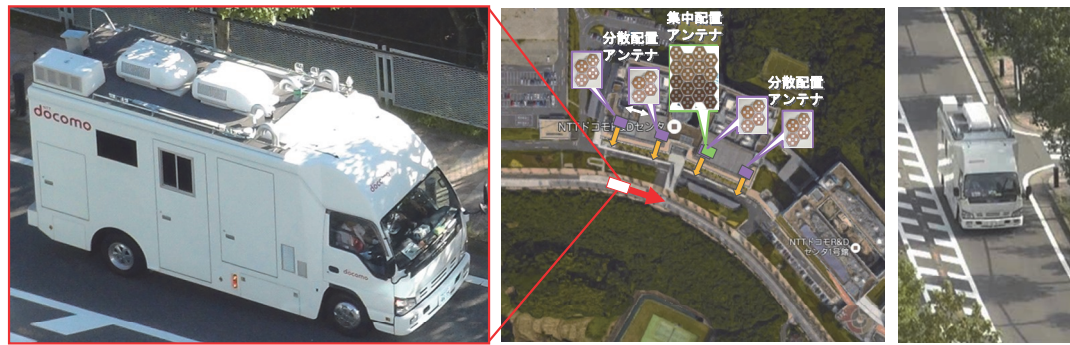
*27 EHF帯：30～300GHzの無線周波数帯のことで、波長は1～10mmであり、ミリメートル波（またはミリ波）とも呼ばれる。

*28 分散アンテナシステム：地理的に分散配置された複数のアンテナユニットを、中央処理（または集中処理）装置に光ファイバ経由で接続し、同装置において一元的に信号処理を行うことで通信能力、通信容量を増大できるようにしたシステム。

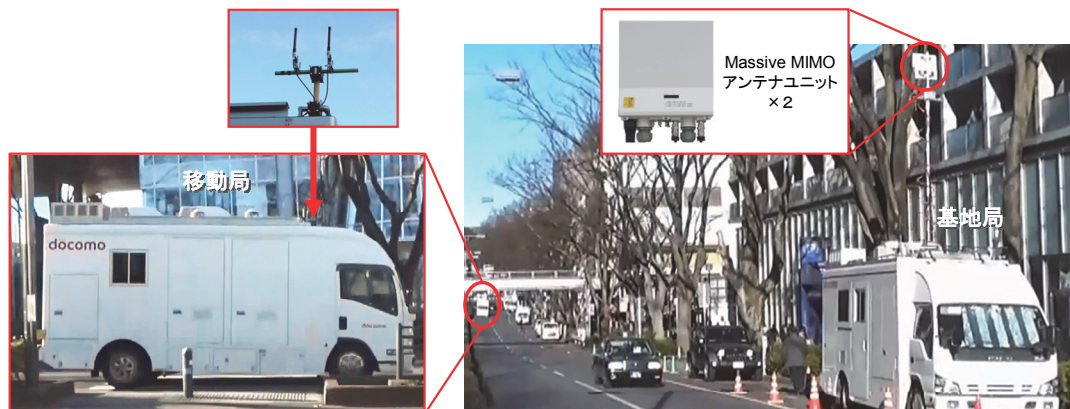
*29 Massive MIMOシステム：超多数のアンテナ素子で構成される

大規模MIMOを用いたシステムのことで、高い周波数帯ではアンテナ素子サイズを小さくすることができるため、従来世代よりも高い周波数帯（SHF帯～EHF帯）を用いる5Gにおいて導入が進められている。分散アンテナシステムに対し、集中アンテナシステムに相当する。

*30 デジタルビームフォーミング：超多素子で構成されるアンテナを用いて電波の放射エリアを特定方向へ集中させる機能（ビームフォーミング）を、デジタル信号処理によって実現する方法。



(a) 中型電測車と4.5GHz帯分散アンテナシステム実験模様



(b) 複数中型電測車と4.5GHz帯デジタルビームフォーミング伝送実験模様

写真8 5Gの研究開発で使用された電測車(1)

28GHz帯車載用5Gガラスアンテナ通信実験では、写真9(c)に示す小型電測車（トヨタ・ハイエース）の車内に28GHz帯移動局装置本体を、4カ所の車両ウインドウガラスに同車載用5Gガラスアンテナ（ガラス一体型5Gアンテナ^{*35}とオンガラスアンテナの2種類）をそれぞれ設置して時速約30kmのフィールド移動実験を行い、下り最大3.8Gbps（400MHz帯域幅時）／同7.5Gbps（800MHz帯域幅時）の高速無線データ伝送に成功した [19]。同実験では、移動局に加えて、許可を得て路肩に停車した中型電測車（いすゞ・エルフ）を使用して、車内に基地局装置本体を、伸縮ポール上に同Massive MIMOア

ンテナユニット（128素子×2偏波^{*36}）を設置して実験を行った（写真9(c)）。

2017年からは、多様な利活用分野で5Gを応用する新しいモバイルソリューションの実現可能性検証のため、実験用5G移動端末とともに高精細映像機器などのアプリケーション用機器を電測車に搭載して、総務省の「5G総合実証試験^{*37}」に取り組んだ。例えば、2018年にはスマートワークプレイス分野で5Gを活用して大容量コンテンツデータを共有しながら映像編集業務を行う「動くサテライトオフィス」（小型電測車使用）に関する試験 [21] を、2020年には地域医療分野で5Gを活用して複数診断映像を

^{*31} ビーム追従：ビームフォーミングされた電波の放射方向を、移動する端末の方向となるよう追従制御する機能。

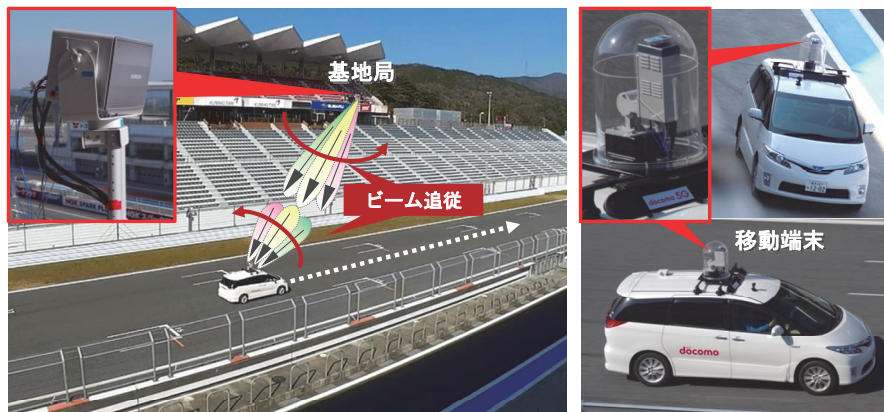
^{*32} アンテナユニット：基地局を構成する装置の1つで、送受信するデジタル信号を無線信号との間で変換し、無線信号の増幅やアンテナ素子からの電波の送受信などを行う機能を一体化した装置。

^{*33} アナログビームフォーミング：超多素子で構成されるアンテナを用いて電波の放射エリアを特定方向へ集中させる機能（ビームフォーミング）を、アナログ信号処理回路によって実現する方式。

^{*34} ミリ波関連研究開発プロジェクト：2018～2020年度にドコモが総務省から委託を受けて実施した「電波資源拡大のための研究開発（JPJ00024）」。

^{*35} ガラス一体型5Gアンテナ：小型、薄型、かつ透明なガラスアンテナで、車両ウインドウガラスに設置しても視野をささげず、車両デザインを損ねないという特長がある。

^{*36} 偏波：電波が空間を伝搬するときの電界の振動方向。基地局のアンテナから電波を送受信する場合、地面に対して垂直な面で振動する垂直偏波と水平な面で振動する水平偏波の両者を用いる構成が多い。



(a)小型電測車と28GHz帯アナログビームフォーミング高速移動実験模様



(b)小型電測車と28GHz帯デジタルビームフォーミング高速移動実験模様



(c)小型・中型電測車と28GHz帯車載用5Gガラスアンテナ通信実験模様

写真9 5Gの研究開発で使用された電測車(2)

*37 5G総合実証試験：5Gの実現による新たな市場や新しいサービス・アプリケーションの創出を目的に、移動通信事業者にとともにさまざまな利活用分野の関係者が参加する実証試験で、2017～2019年度に総務省が主導して実施した。同試験の推進支援を行ってきた第5世代モバイル推進フォーラム（5GMF：The Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum）より試験結果のレポート（英文）が発行・公開されている [20]。

共有しながら遠隔診療支援を行う「移動診療車」(大型電測車使用)に関する試験[22]を、それぞれ徳島県神山町と和歌山県において実施した(写真10)。

2019年からは、5Gの商用化に向けた移動端末および基地局装置開発を加速し、屋内試験を経て市街地から郊外に至る多様な通信環境下でのフィールド移動試験を繰り返し行うとともに、2019年9月からは5Gプレサービス[23]の提供を行った後、2020年3月に5G商用サービス[24](3.7/4.5GHz帯を使用して下り最大3.4Gbpsの高速通信を提供)を開始した。その後、5G対応移動端末の機種数増加とともに、2020年9月には、新たに28GHz帯を使用した下り最大4.1Gbpsのサービス提供を開始するに至った。

なお、2020年4月以降の新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の拡大に伴い、5G移動端末新機種

の開発過程における電測車を用いたフィールド移動環境での通信接続試験においては、従来電測車の中で複数の測定者が実施していた試験データの収集と解析を遠隔地から行えるようにして、感染拡大リスクを抑える形で試験を継続している(写真11)。

4. 特殊実験用電測車

以下では、特殊な実験や測定に必要な機能を備えた電測車として、超高速移動通信実験用、電波伝搬実験用の各車両について解説する。

4.1 超高速移動通信実験用車両

ドコモは、時速200kmを超える高速鉄道乗車中などの超高速移動環境における5Gサービスの提供を想



写真10 小型／大型電測車による5G総合実証試験模様



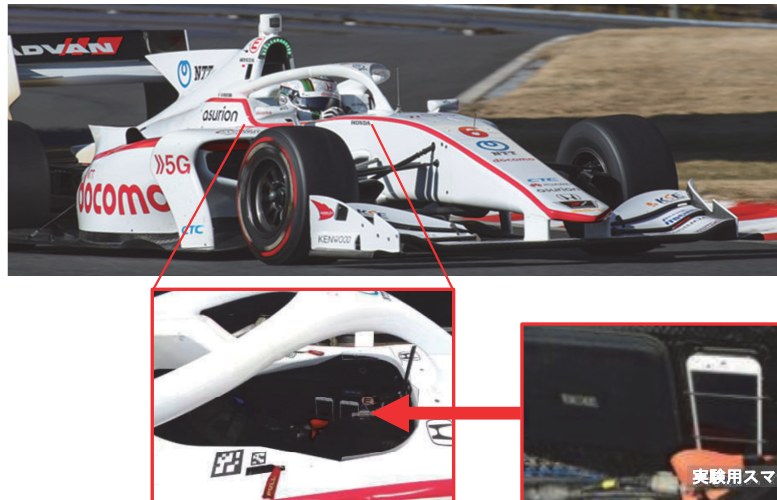
写真11 小型電測車による5G商用移動端末の遠隔試験模様

定した自動車走行による模擬実験を、2018年4月に茨城県にある日本自動車研究所の高速周回路において実施した [25]。同実験では、28GHz帯を使用し、高速走行可能な小型電測車に搭載した実験用移動端末装置とコース脇に設置した2つの実験用基地局との間で5G通信を行った (写真12(a))。同小型電測車

は、合計200kg近い重量の実験機材を搭載しながら時速300km超えの走行が可能となるよう、日産・GTR (V6ツインターボエンジン搭載) をベースに特別チューニングを行った車両で、車内に実験機器を安全かつ確実に固定できる専用架を装備するとともに、機器電源としてトランクに専用バッテリーを搭



(a)高速走行可能な小型電測車および大型電測車を用いた5G通信実験模様



(b)フォーミュラカーを用いた通信実験模様

写真12 超高速移動通信実験用電測車

載している。また、2つの基地局間での通信中ハンドオーバーを制御する疑似5Gコアネットワーク^{*38}装置を設置するために大型電測車（いすゞ・フォワード）を使用した。

実験の結果、最高時速305kmで移動する移動局と基地局との間の5G通信に成功するとともに、時速293km移動中の下り1.1Gbpsの超高速5G無線データ伝送や、時速290km移動中の5G移動局と5G基地局との間の無線通信回線を維持したまま接続先基地局を切り替える、通信中ハンドオーバーにも成功した。さらに、時速200kmで移動する5G移動局からの4Kハイフレームレート映像^{*39}による車窓カメラ映像の5G無線ライブ中継にも成功した。

また、ドコモでは、高速鉄道乗車中など超高速移動環境におけるモバイル通信サービスの品質向上に向けた取組みを各世代のシステムにおいて実施してきている。その超高速移動環境を模擬するため、4輪カーレースの「スーパーフォーミュラ^{*40}」に参戦するフォーミュラカーを活用し、搭載した小型移動端末（携帯電話・スマートフォン）と周辺基地局との間で、ハンドオーバー試験を含む各種通信実験を継続している（写真12(b)）。フォーミュラカーを活用する通信実験では、レース場にもよるが、直線コース部分で時速300km程度まで加速した後、カーブに突入する際、一気に時速50km程度まで減速するというように、走行速度、すなわち端末の移動速度が短時間で大きく変化する状況を得ることができる。その上、レース場は、同じコースを幾度も周回することで効率よく試験データを収集でき、また、通信性能向上に向けてパラメータ調整などを実施した場合の実験データの比較評価にも適している。

4.2 電波伝搬実験用電測車

市街地から郊外までの多様な通信環境を想定した

電波伝搬のフィールド測定実験を行うことに特化した電測車を写真13に示す。この特殊電測車（いすゞ・エルフ）には、実験用アンテナを任意の地上高で設置するための最伸長が14mおよび24mの2本の伸縮ポールが搭載されている。これは、中型電測車の一部で搭載されているアンテナ設置用伸縮ポールに比較して2～3倍の最伸長となっており、基地局のアンテナ高に対する条件を幅広いレンジで仮定した電波伝搬実験を可能としている。なお、同車両で移動する際、最伸長24mのポールは、縮めた状態のポールを水平にしてルーフ上に固定する（写真13・左）。また、伸縮ポールを最伸長近くまで伸ばす場合や、アンテナユニットの容積・重量によっては、実験現場でポールを補助ステーで支えた上で実験を行う。

5. 研究開発用「電測車」の個別装備

5.1 実験機器用電源

電測車の主要な装備として、車内で使用する各種実験機器・測定機器の電源供給に必要な発発がある。歴代の電測車（主に中型・大型電測車）では、実験に用いる機器の消費電力に応じて数kVAから20kVAを超えるものまで幅広い電源容量の発発が搭載されてきているが、いずれも車両走行時の振動対策、発発動作時の防音および熱対策、発動機排気ガスの軽減対策が施され、市街地・住宅街などでの走行試験も想定した配慮がなされている（写真14(a)）。なお、最初に紹介した1Gの電測車（写真2）では、当時、搭載する測定機器の電源（約1kVA）として使用可能な発発が国産では見つからず、米軍の払い下げ品を2台入手し、使用した。ただし、発発のスターターロープ^{*41}による始動の不調と出力電圧の変動に手を焼き、発発2台のうち1台を測定車に載せて実験に使用している間、もう1台を修理・点検に出し

^{*38} コアネットワーク：交換機、加入者情報管理装置などで構成されるネットワーク。移動端末は無線アクセスネットワークを経由してコアネットワークとの通信を行う。

^{*39} 4Kハイフレームレート映像：4K標準フレームレート映像の倍にあたる120フレーム／秒の高フレームレート・高精細映像。実験では、リアルタイム4KハイフレームレートHEVCコーデック[26]を用いて、超高速移動環境のように動きの速いシーンでも滑らかに高臨場のカメライメージ伝送を実現した。

^{*40} スーパーフォーミュラ：タイヤとコックピットがボディで覆われていない構造のフォーミュラカーを用いる国内最高峰の4輪

カーレースで、正式名称は全日本スーパーフォーミュラ選手権（旧全日本選手権フォーミュラ・ニッポン）。ドコモでは、同レースに参戦するDOCOMO TEAM DANDELION RACING[27]のフォーミュラカーを活用する通信実験を1999年より実施している。



写真13 高伸長ポール搭載の電波伝搬実験用電測車

ておき、使用中の発発が不安定になると、すぐに電気通信研究所に戻って修理・点検済みの発発に載せ替えることで、実験継続した状況であった。現在の発発は、車両エンジン同様セルモーター^{*42}で起動し、自動電圧調整機能を有しており、長時間の実験にも耐えうるものとなっている。

また、3G以降の発発を搭載する中型または大型電測車においては、写真14(b)に示すとおり、測定室内に発発の始動操作を含む電源系の集中操作が可能なパネルを備えるとともに、発発と連携する車載バッテリーシステムの導入によりバッテリー上がりへの対処も可能としている。さらに搭載機器に応じて、大容量UPS（無停電電源装置）や安定化電源も装備している。一方、小型電測車では、車両自体が機器への電源供給も可能な大容量バッテリーを搭載するハイブリッドカー^{*43}を積極的に導入し、発発を非搭載とすることで、温室効果ガスである二酸化炭素CO₂の排出量削減に取り組んでいる。今後は、さらなる排出量削減が可能な電気自動車やプラグインハイブリッドカー（PHV：Plug-in Hybrid Vehi-

cle）の使用も望まれる。

5.2 実験機器搭載機構

3G以降の研究開発における世代が進むにつれ実験装置が飛躍的に高機能化し、装置サイズが大型化されることとなったが、これらの大型装置を搭載してフィールド移動実験を行うことを前提に新規導入された中型・大型電測車では、実験装置の積み下し専用の開閉ドアを測定室に追加し、専用の昇降機を用いて同装置の車両サイドからのスライドインを可能とする、レール付き装置固定基台を新たに採用した（写真15）。従来の電測車における実験装置類の搭載方法は、測定室内に電子機器用標準ラック（19インチラック^{*44}）あるいは汎用棚をあらかじめ備え付けておいて、そこに実験装置や測定機器を設置した上で、必要な結線を行って実験系を組み上げていくスタイルであったが、新車両では、大型ラック（19インチラックよりも幅広のラックや19インチラック×2～3架を連結したラック）に多数のカード型回路ユニットやモジュールが組み込まれて一体的

^{*41} スターターロープ：発発などのエンジンをマニュアルで始動するためのリコイルスターター（マニュアルスターター）において使用されるロープ（引き紐）で、同ロープを操作者が強く引くことによりエンジンのクランクシャフトを回転させて始動する。現在の発発用エンジンでは、セルモーター（^{*42}参照）を用いて始動する方式が一般的である。

^{*42} セルモーター：エンジンの始動時に回転力を与えるための専用のモーターでセルスターターとも呼ばれる。モーターを動かすための電力はバッテリーより供給するが、同バッテリーが上がるとエンジンが始動できなくなる。

^{*43} ハイブリッドカー：エンジンとモーターの2つの動力源をもつ車両で、走行状況に応じてエンジンとモーターの使用を最適制御することで燃費を向上させる。モーター駆動用の専用バッテリーを搭載しており、車種によっては同バッテリーを車両内の汎用電源（電源容量1.5kVA程度）として利用可能である。また、同バッテリーを大容量化し、外部電源から充電可能とした車種はプラグインハイブリッドカーと呼ばれ、モーターのみで走行可能な距離を大幅に長くすることができる。



(a)低騒音発動発電機



(b)電源系集中操作パネル（上段）／車載バッテリー（下段左）・UPS&安定化電源（下段右）

写真14 実験機器用電源

に構成された実験装置を分解することなくそのまま搭載可能とする新スタイルとしたことが大きな変化であった（その後の中型・大型電測車では、この新スタイルを踏襲してきている）。さらに、慎重な取扱いを要する試作実験装置の振動対策として、実験装置固定基台と車両側の可動式プラットフォームの間に振動吸収用ゴムを挿入するとともに、車両自体にエアサスペンションを採用することで、走行実験中に生じる広範な周波数成分を有する振動の影響を軽減できるように工夫している。

5.3 実験用アンテナ搭載機構

電波を用いる無線通信システムの実験において、アンテナは特徴的かつ重要な構成要素の1つであり、研究開発用電測車には、各種実験用アンテナを搭載・使用するための特殊機構が装備されている。

旧式の小型電測車および現行の中型・大型電測車では、通常、車両の屋根上に設けられたデッキ（ルーフデッキ）にマグネット基台、クランプなどの専用取付け具を用いて実験用アンテナを固定設置しているが、金属製車両ボディ（ルーフ部分を含む）

* 44 19インチラック：各種電子機器を収容するためのラック（架）で、収容機器の幅を19インチ（482.6mm）に標準化したもの（米国EIA規格など）。なお、国内のJIS規格では480.0mmの機器幅が採用されているが、機器の取付け穴間隔はEIA規格と共通（465.0mm）である。



写真15 レール付き装置固定基台

による電磁界的な影響を軽減するため、一部車両では、写真16(a)・左側に示す折畳み式突出しパイプ基台や固定式突出しレール基台を用いてアンテナを設置することで、車両ボディとの必要な離隔距離を確保する工夫を行っている。

また、3G以降の研究開発において新規導入された中型・大型電測車では、システムの高周波数化に伴い新たに2GHz以上の周波数を用いた実験が行われるようになり、電測車外の実験用アンテナと電測車内の実験装置の間を接続する高周波同軸ケーブルの中継コネクタを不要とし、短いケーブル長で直結することができるよう、写真16(a)・右上に示すアンテナ接続ケーブル通線用のルーフ貫通管（逆U字管）を装備して、ケーブル区間の低損失化を図っている。なお、逆U字形状としているのは、車両ルーフの貫通部分の管路径を大きくしつつ、雨水などの侵入を防止するためである。

一方、小型電測車では、写真16(a)・右下に示す汎用アンテナ基台を一部の特殊車両および旧式車両を除いて標準搭載している。この基台は、各フィールド

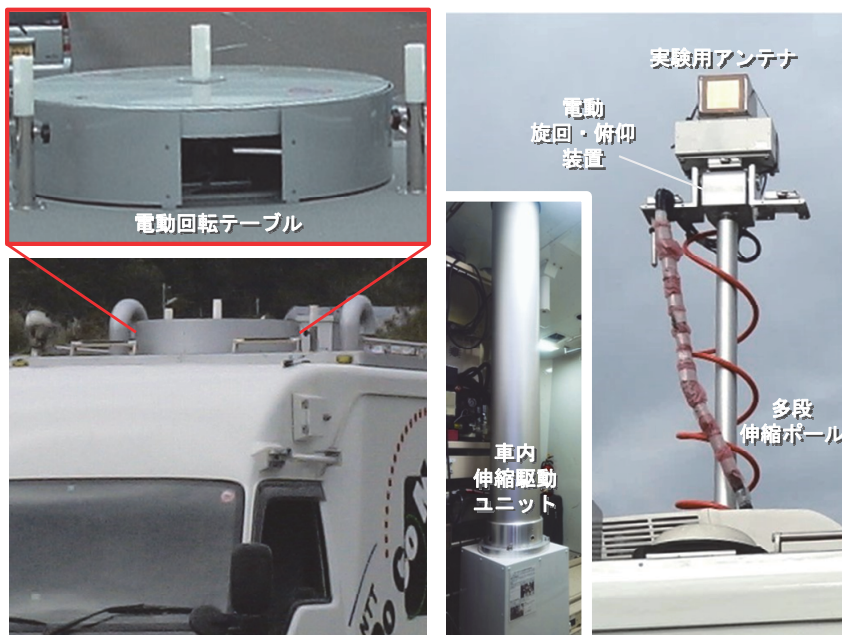
移動実験において、実験ごとに異なる周波数のアンテナを付け替えたり、同一実験において複数種類のアンテナを比較評価することなどが容易に行えるよう、プラグ&ソケット型アタッチメントを採用している。

新しい原理や方式による無線アクセス技術の検証の種類・内容によっては、アンテナの設置条件を細かく調整して実験することがあり、一部電測車では、それらに対応する各種アンテナ可動機構を装備している。写真16(b)左側の写真は、中型電測車のルーフ上に装備された低速度電動回転テーブルで、アンテナ素子を平面上で円を描く形で移動させたり、固定設置されたアンテナとの組合せでアンテナ間隔を変化させることが可能である。さらに、写真16(b)・右側の写真は、アンテナ素子またはアンテナユニットの位置を上下に移動調整したり、アンテナからの電波放射方向（方位角および仰角）を調整することのできる、電動旋回・俯仰装置（角度可変機構）付き多段伸縮ポールである。

なお、写真9～10に示した5Gの研究開発における高周波帯を用いたフィールド走行実験では、アンテナ単体ではなく、高周波回路部分と一体化したアン



(a)各種アンテナ搭載機構



(b)各種アンテナ可動機構

写真16 実験用アンテナ搭載機構

テナユニットが電測車外に設置されるようになってきており、同ユニットを設置するための機構（風防機構を含む）を新たに工夫し、装備している。

6. あとがき

本稿では、1Gから5Gに至る移動通信システムの研究開発を支えてきた「電測車」を写真とともに紹介した。現在ドコモでは、5Gの当初システムの技術を発展させた5G evolutionと、さらにその先の第6世代移動通信システム（6G）に向けた研究開発を推進している。今後も、これらの研究開発を支える「電測車」として、既存の車両をさらに進化させた車両も導入しながら、小ささまざまな車両がフィールドを走り続けていくことで、ユーザの期待と信頼に応えられる移動通信ネットワークを実現していきたい。なお、4G以降は、世代ごとに向上するシステムの能力を活かした新たなユーザ・アプリケーション／サービスを効果的にアピールし、かつ実証することが積極的に行われてきており、最近では、それらに特化した新しいカテゴリの車両も導入されているため、別の機会に紹介したい。

最後に、本稿の作成にあたり、黎明期の移動通信システム研究開発で使用された車両を含め、電測車の貴重な写真を提供いただいた電電公社・NTT・ドコモのOB諸氏に感謝いたします。また、研究開発用電測車の製造・整備を長年にわたり支えていただいた松電通信株式会社特装車両事業部（横浜市金沢区・旧株式会社アスカ電子）の関係各位に本誌面を借りて深く感謝申し上げます。

文 献

- [1] 奥村 善久, 大森 英二: “陸上移動無線の電界強度とその変動特性,” 電子通信学会雑誌, Vol.50, No.11, pp.2108-2115, Nov. 1967.
- [2] 伊藤 貞男: “我が国の移動通信小特集 自動車電話方式,” 電子通信学会誌, Vol.63, No.2, pp.122-127, Feb. 1980.
- [3] 倉本 実, 渡辺 邦夫, 江口 真人, 結城 主央巳, 小川 圭祐: “大容量自動車電話方式,” 電子情報通信学会誌, Vol.71, No.10, pp.1011-1022, Oct. 1988.
- [4] ト部, ほか: “移動機・携帯機の研究開発 ムーバの開発に至る経緯と今後の展開,” 本誌, Vol.2, No.3, pp.6-12, Oct. 1994.
- [5] 佐々木, ほか: “特集: デジタル移動通信システム,” 本誌, Vol.1, No.1, pp.16-49, Jul. 1993.
- [6] 大貫, ほか: “移動パケット通信システム特集,” 本誌, Vol.5, No.2, pp.6-37, Jul. 1997.
- [7] 榎, ほか: “iモードサービス特集,” 本誌, Vol.7, No.2, pp.6-32, Jul. 1999.
- [8] 安達, ほか: “広帯域コヒーレントDS-CDMA無線アクセス特集,” 本誌, Vol.4, No.3, pp.6-24, Oct. 1996.
- [9] 永田, ほか: “IMT-2000サービス特集(1) —モバイル新世紀の先駆け「FOMA」誕生—,” Vol.9, No.2, pp.6-26, Jul. 2001.
- [10] 後藤, ほか: “HSDPA特集,” 本誌, Vol.14, No.3, pp.6-24, Oct. 2006.
- [11] 正村, ほか: “第4世代無線アクセス技術特集 一次世代移動通信システムの実現に向けて—,” 本誌, Vol.11, No.2, pp.6-52, Jul. 2003.
- [12] 樋口, ほか: “ブロードバンドパケット無線アクセス 1Gbit/sパケット信号伝送実験特集,” 本誌, Vol.13, No.2, pp.6-24, Jul. 2005.
- [13] 田岡, ほか: “ブロードバンド無線アクセスにおけるMIMO多重法を用いた5Gbit/s超高速パケット信号伝送屋外実験,” 本誌, Vol.15, No.2, pp.25-30, Jul. 2007.
- [14] 尾上, ほか: “定額制時代の大容量・高効率通信を支える技術特集,” 本誌, Vol.16, No.2, pp.6-40, Jul. 2008.
- [15] 北川, ほか: “LTEサービス「Xi」(クロッシィ) 特集 —スマートイノベーションへの挑戦—,” 本誌, Vol.19, No.1, pp.6-48, Apr. 2011.
- [16] 安部田, ほか: “PREMIUM 4G特集 —LTE-Advancedの導入—,” 本誌, Vol.23, No.2, pp.6-29, Jul. 2015.
- [17] 須山, ほか: “超高速移動通信の実現に向けた10Gbps屋外無線伝送実験,” 本誌, Vol.21, No.4, pp.22-27, Jan. 2014.

- [1] 奥村 善久, 大森 英二: “陸上移動無線の電界強度とその変動特性,” 電子通信学会雑誌, Vol.50, No.11, pp.2108-

- [18] 岸山, ほか: “2020年のサービス実現に向けた5G技術特集,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.6-68, Jan. 2016.
- [19] 猪又, ほか: “車両デザインを損なわず, 安定した5G通信を実現する車載用アンテナ技術 —車載用5Gガラスアンテナ—,” 本誌, Vol.27, No.3, pp.51-56, Oct. 2019.
- [20] 第5世代モバイル推進フォーラム (5GMF): “White Paper & Report: 5Gシステム総合実証試験報告書.” <https://5gmf.jp/whitepaper/>
- [21] 奥村 幸彦, 須山 聡: “[5Gの幕開けに向けた研究開発と実証] 5G時代のサービス協創とシステムトライアル,” 情報処理, Vol.61, No.3, pp.243-249, Mar. 2020.
- [22] 奥村 幸彦, 増野 淳, 南田 智昭, 須山 聡, 岡田 隆: “[5Gが切り開く新たな通信社会とそれを支える要素技術] 5Gを活用する遠隔診療システムの実証試験,” 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン (2020冬号・No.55), Vol.14, No.3, pp.186-199, Dec. 2020.
- [23] 遠藤, ほか: “5Gプレサービス概要,” 本誌, Vol.27, No.3, pp.6-10, Oct. 2019.
- [24] 古城, ほか: “5G商用サービス概要,” 本誌, Vol.28, No.1, pp.6-10, Apr. 2020.
- [25] 奥村 幸彦: “時速300kmの超高速移動環境で5G無線通信実験に成功,” 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.9, pp.936-937, Sep. 2018.
- [26] NTTニュースリリース: “ハイフレームレートによる滑らかでシャープな映像のライブ伝送を実現,” Apr. 2018. <https://www.ntt.co.jp/news2018/1804/180405a.html>
- [27] DOCOMO TEAM DANDELION RACING: “ドコモチーム ダンディライアン オフィシャルホームページ.” <https://www.dandelion-racing.com/team/>

NTT DOCOMO
テクニカル・ジャーナル Vol.28 No.4

2021年1月発行

企画編集 株式会社NTTドコモ R&D戦略部
〒100-6150
東京都千代田区永田町 2-11-1
山王パークタワー39階

発行 一般社団法人 電気通信協会
〒101-0003
東京都千代田区一ツ橋 2-1-1
如水会ビルディング6階

本誌掲載内容についてのご意見は
e-mail: dtj@nttdocomo.com宛

本誌に掲載されている社名，製品およびソフトウェア，
サービスなどの名称は，各社の商標または登録商標です。
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

© 2021 NTT DOCOMO, INC.